



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ คอมโพสิตรักษ์สิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด  
Green Composite from Poly(lactic acid) and Pineapple Leave Fiber

ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ผศ. ดร. ศิริเดช บุญแสง

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๗

มหาวิทยาลัยบูรพา

สัญญาเลขที่ ๗๕/๒๕๕๗

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ คอมโพสิตรักษ์สิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด

Green Composite from Poly(lactic acid) and Pineapple Leave Fiber

ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ. ดร. ศิริเดช บุญแสง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

เลขที่สัญญา ๗๕/๒๕๕๗

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตชีวภาพที่ผลิตจากพอลิแลคติกแอซิดโดยมีเส้นใยสับปะรด (PALF) เป็นสารเสริมแรง เส้นใยสับปะรดที่ใช้สกัดได้จากใบสับปะรดด้วยวิธีเชิงกล (ใช้เครื่องชูดใบ) ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ ก่อนเตรียมคอมโพสิต เส้นใยสับปะรดจะถูกตัดให้มีความยาวประมาณ 1-3 มม. และผสมกับพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ในปริมาณเส้นใยร้อยละ 10-50 ก่อนที่จะขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) การทดสอบแรงดึงของคอมโพสิตตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 พบว่าค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 มีค่ามอดูลัสของยัง เพิ่มขึ้นจาก PLA ร้อยละ 68 ส่วนคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 มีค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นจาก PLA ร้อยละ 48 แต่มีค่าความหนืดขณะหลอม (Melt viscosity) ต่ำกว่าคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 50 นอกจากนี้ เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA กับเส้นใย งานวิจัยนี้ยังได้เติมสารคู่ควบ (Coupling agent) มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 10 ลงในคอมโพสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 40 ผลที่ได้พบว่าค่ามอดูลัสของยังของคอมโพสิตเพิ่มจาก 3.8 เป็น 5.1 GPa หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 34

## Abstract

This work aimed to study the mechanical properties and morphology of pineapple fiber-reinforced poly (lactic acid) composites. The fiber was mechanically extracted from pineapple leaves, so called PALF. The fiber surface morphology and tensile properties were observed by scanning electron microscopy (SEM) and universal tensile tester, respectively. The fiber was chopped into a specified length (1-3 mm.) and blended with poly (lactic acid); PLA, using a twin-screw extruder, with the fiber content of 10-50 wt%. The extruded compounds and pure PLA were molded to tensile test specimens by injection molding. The tensile properties of the composites were studied, according to ASTM D638. The results showed that Young's modulus of the composites increased with increasing the fiber content. The composites with 50 wt% fiber displayed the highest tensile modulus of 68% increase, compared to that of the pure PLA. The composite with 40 wt.% of PALF content showed lower melt viscosity than the composite with 50 wt% of PALF and exhibited only 48% increase in tensile modulus, compared to that of the pure PLA. In order to improve the tensile modulus of the composite with 40 wt% of PALF, 10 wt% of maleic anhydride coupling agent was applied. Their tensile properties were observed and compared with the composite with no coupling agent. The results showed that the tensile modulus of the composites with and without coupling agent were 5.1 and 3.8 GPa, respectively. In other words, the tensile modulus of the composite with a coupling agent was improved by 34 %.

# สารบัญ

หน้า

๑. บทนำ .....	๑
๑.๑ ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	๑
๑.๒ วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	๒
๑.๓ ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	๓
๑.๔ การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง .....	๓
๒. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	๗
๒.๑ เส้นใยธรรมชาติ .....	๗
๒.๑.๑ ธรรมชาติของเส้นใย.....	๗
๒.๑.๒ การจัดกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช .....	๗
๒.๑.๓ โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติจากพืช .....	๘
๒.๑.๔ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ .....	๑๔
๒.๒ เส้นใยสังเคราะห์ .....	๑๖
๒.๒.๑ โครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบของเส้นใยจากใบสับปะรด .....	๑๗
๒.๒.๒ สมบัติของเส้นใยจากใบสับปะรด .....	๑๘
๒.๓ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) .....	๑๙
๒.๓.๑ สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ PLA .....	๒๐
๒.๓.๒ สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด .....	๒๑

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๒.๔ ไบโอบีโอมโพลีเมอร์ .....	๒๑
๒.๔.๑ คอมโพลีเมอร์ .....	๒๑
๒.๔.๒ เส้นใยธรรมชาติที่ใช้เสริมแรงในคอมโพลีเมอร์ชีวภาพ .....	๒๓
๒.๕ สารเชื่อมประสาน .....	๒๕
๓. การทดลอง .....	๒๖
๓.๑ วัสดุ .....	๒๖
๓.๑.๑ พอลิแลคติกแอซิด .....	๒๖
๓.๑.๒ เส้นใยจากใบสับปะรด .....	๒๗
๓.๑.๓ สารเคมี .....	๒๗
๓.๒ เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	๒๗
๓.๓ การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด .....	๒๘
๓.๓.๑ การสกัดโดยการแช่น้ำ .....	๒๘
๓.๓.๒ การสกัดด้วยสารเคมี .....	๒๘
๓.๓.๓ การสกัดโดยใช้เครื่องแยกเส้นใย .....	๒๙
๓.๔ การเตรียมไบโอบีโอมโพลีเมอร์ PALF/PLA .....	๓๑
๓.๔.๑ การเตรียมเส้นใยสั้นของ PALF .....	๓๑
๓.๔.๒ การคอมพาวด์ไบโอบีโอมโพลีเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ .....	๓๑

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๓.๔.๓ การเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 .....	๓๒
๓.๕ การเตรียมไปโอคอมโพลีต PALF/MA/PLA .....	๓๔
๓.๖ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PALF .....	๓๕
๓.๗ การทดสอบความทนต่อแรงดึง .....	๓๕
๓.๗.๑ การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใย PALF .....	๓๕
๓.๗.๒ การทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PLA และไปโอคอมโพลีต PALF/PLA และ PALF/MA/PLA .....	๓๖
๓.๘ สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC) .....	๓๗
๓.๙ สมบัติการทนต่อความร้อนโดยเทคนิค Thermo gravimetric analysis (TGA) .....	๓๘
๓.๙.๑ การทดสอบการทนต่อความร้อนของ PLA และ PALF .....	๓๘
๓.๙.๒ การทดสอบการทนต่อความร้อนของไปโอคอมโพลีต PALF/PLA .....	๓๘
๓.๑๐ สันฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	๓๘
๔. ผลการทดลองและอภิปรายผล .....	๔๐
๔.๑ การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด .....	๔๐
๔.๑.๑ การแช่น้ำ .....	๔๐
๔.๑.๒ การสกัดด้วยวิธีทางเคมี .....	๔๐
๔.๑.๓ การสกัดโดยใช้เครื่องแยกเส้นใย .....	๔๑



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๔.๒ การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยสับปะรด .....	๔๒
๔.๒.๑ ขนาดของเส้นใย .....	๔๒
๔.๒.๒ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย .....	๔๒
๔.๒.๓ สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	๔๔
๔.๒.๔ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน .....	๔๖
๔.๓ การวิเคราะห์สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด .....	๔๘
๔.๓.๑ สมบัติทางความร้อน .....	๔๘
๔.๓.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	๔๙
๔.๓.๓ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน .....	๔๙
๔.๔ การวิเคราะห์สมบัติของ PALF/PLA ไบโอบีโอคอมโพสิต .....	๕๑
๔.๔.๑ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตก .....	๕๑
๔.๔.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	๕๓
๔.๔.๓ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน .....	๕๔
๔.๕ การวิเคราะห์สมบัติของ PALF/MA/PLA ไบโอบีโอคอมโพสิต .....	๕๖
๔.๕.๑ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตก .....	๕๖
๔.๕.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	๕๖
๔.๖ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จาก PALF/PLA ไบโอบีโอคอมโพสิต .....	๕๙

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

๕. บทสรุป .....	๖๐
เอกสารอ้างอิง .....	๖๒
ภาคผนวก .....	๖๘
ผลผลิต .....	๗๗
รายงานสรุปการเงิน .....	๗๘

## บทที่ ๑

### บทนำ

#### ๑.๑ ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติก ยังคงเป็นเรื่องที่ต้องได้รับความสนใจเป็นพิเศษ ทั้งในภาครัฐ อุตสาหกรรม และประชาชนทั่วไป หลายภาคส่วนมีความพยายามที่จะใช้วัสดุที่เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้เองในธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง เช่น พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) เซลลูโลสเอสเทอร์ (Cellulose esters) พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Poly hydroxyl butyrates) พลาสติกจากแป้งและลิกนิน (Starch and Lignin based plastics) เป็นต้น มาใช้ทดแทนพลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Petroleum based plastics) อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์จากพลาสติกเหล่านี้ยังจำกัดอยู่ในวงแคบ เช่น ในวงการแพทย์และเภสัชกรรมเท่านั้น เนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้เองในธรรมชาติเหล่านี้ ยังมีข้อด้อยในเรื่องสมบัติเชิงกล เงื่อนไขทางการตลาด ราคาแพง อีกทั้งยังมีความสามารถในการแปรรูปต่ำ เปราะแตกหักง่าย และมีความผันแปรต่อความชื้นสูง แต่อย่างไรก็ตามในอนาคตอันใกล้นี้ การใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เองในธรรมชาติน่าจะขยายตัวอีกมาก มีแนวโน้มการพัฒนาในด้านสมบัติและมีแนวโน้มเพิ่มปริมาณการผลิตมากขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามระเบียบ กฎ ข้อบังคับทางกฎหมาย ที่ออกมาบังคับให้มีความรับผิดชอบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีการใช้คอมโพสิตจากพอลิพรอพิลีนที่ผสมด้วยเส้นใยธรรมชาติเพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนต่างๆ ในรถยนต์ ประเทศในยุโรปมีการปรับตัวเปลี่ยนไปใช้เส้นใยจากธรรมชาติมากขึ้น มีอัตราการใช้งานเส้นใยธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยเพิ่มขึ้นถึง 400 ตันในปี ค.ศ. 1996 และเป็น 17,140 ตันในปี ค.ศ. 2000 และมีการทำนายว่าจะเพิ่ม

มากขึ้นถึง 60,000 ตัน ในปี ค.ศ. 2005 เนื่องจากการใช้เส้นใยธรรมชาติช่วยลดต้นทุนการผลิต วัสดุที่ได้มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับเส้นใยแก้ว รวมถึงชิ้นส่วนที่ได้มีน้ำหนักเบา ช่วยให้น้ำหนักโดยรวมลดน้อยลง เป็นผลให้มีอัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงลดลง และมีประโยชน์ต่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม สามารถแยกเส้นใยออกจากพลาสติกได้ง่าย มีความสะดวกต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ ไม่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม ช่วยลดปัญหาการเกิดภาวะเรือนกระจก และภาวะโลกร้อนได้เป็นอย่างดี

เส้นใยจากใบสับปะรดเป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณมาก และเป็นของเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกในประเทศไทย เส้นใยสับปะรดเป็นเส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีค่ามอดูลัสสูงถึง 6 GPa และมีน้ำหนักเบา จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติก คณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะทำการทดลองนำเส้นใยสับปะรดมาผสมในพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้เองในธรรมชาติที่มีราคาแพง เพื่อวัตถุประสงค์ในการเสริมแรงและลดปริมาณการใช้ PLA ให้ลดลง โดยมีความคาดหวังว่าจะสามารถใช้เส้นใยสับปะรดเพื่อวัตถุประสงค์ในการเสริมแรงและแทนที่ PLA ได้มากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยในการวิจัยจะทำการแยกเส้นใยจากใบสับปะรด ผลิตคอมโพสิตจาก PLA และเส้นใยสับปะรด ที่อัตราส่วนต่างๆ ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผลิตขึ้น และสุดท้ายจะได้ทดลองขึ้นรูปคอมโพสิต PLA และเส้นใยสับปะรด ดังกล่าว ด้วยกระบวนการฉีด

## ๑.๒ วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

๑.๒.๑ การศึกษาวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการแยกเส้นใยจากใบสับปะรด และใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิตที่ผลิตโดยใช้ PLA เป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบ

๑.๒.๒ ศึกษาสมบัติของเส้นใย และ PLA

๑.๒.๓ เตรียมคอมพอลิเมอร์จาก PLA และเส้นใยสับปะรด ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยวิธีผสมในสถานะหลอม (Melt blend)

๑.๒.๔ ศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของ PLA คอมพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยสับปะรดเป็นสารเสริมแรง

๑.๒.๕ ศึกษาอิทธิพลของสารค้ำคั่ว ต่อสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของ คอมพอลิเมอร์จาก PLA และเส้นใยสับปะรด

### ๑.๓ ขอบเขตของโครงการวิจัย

แยกเส้นใยจากใบสับปะรด ผลิตคอมพอลิเมอร์จาก PLA และเส้นใยสับปะรด ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อวัตถุประสงค์ในการเสริมแรงและแทนที่ PLA ให้ได้มากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผลิตขึ้น และสุดท้ายจะได้ทดลองขึ้นรูปคอมพอลิเมอร์ PLA และเส้นใยสับปะรด ด้วยกระบวนการฉีด เพื่อยืนยันความสามารถในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

### ๑.๔ การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

รังสิมา ชลคุป และ สุชาดา อุชชิน ศึกษาการแยกเส้นใยจากใบสับปะรด และการใช้ประโยชน์ของเส้นใยเซลลูโลสจากใบสับปะรด พบว่าเพื่อให้เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ จำเป็นต้องกำจัดสารที่ไม่ใช่เซลลูโลส (รวมเรียกว่ากัม) ที่เป็นสารยึดเกาะโครงสร้างเซลล์ในเส้นใย เพื่อให้ได้เส้นใยเดี่ยวที่มีความละเอียด ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคอัลตราโซนิคที่ความถี่ 40 kHz มาใช้ร่วมกับสารเคมีสำหรับขจัดสารที่ไม่ใช่เซลลูโลส แล้วเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้สารเคมีซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิม ผลที่ได้พบว่า การใช้เทคนิคอัลตราโซนิคร่วมกับสารเคมีในการขจัดกัมมีผลต่อประสิทธิภาพการขจัดกัม

และแยกเส้นใยแตกต่างกัน ขึ้นกับการเตรียมวัตถุดิบเริ่มต้น และการเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีมีผลต่อการลดลงของกัมมอย่างชัดเจน

R.M.N. Arib และคณะ ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ของพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด โดยการผสมเส้นใยสับปะรดที่สัดส่วนที่แตกต่างกันโดยปริมาตรเข้ากับพอลิโพรพิลีน ศึกษาความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความทนต่อการดัดงอ (Flexural strength) พบว่าสมบัติความทนต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของเส้นใยสับปะรดมากขึ้น และคอมโพลีเมอร์ให้ค่าความทนต่อการดัดงอสูงกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์นั้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเส้นใยมากขึ้นถึงจุดหนึ่งค่าความทนต่อการดัดงอจะลดลง การศึกษาลักษณะการแตกหักและลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยสับปะรดและพอลิโพรพิลีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการยึดเกาะยังต้องการการปรับปรุงต่อไปเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นอีก ผลการวิจัยสรุปได้ว่าคอมโพลีเมอร์ที่มีเส้นใยสับปะรดเสริมแรงในพอลิโพรพิลีน มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

K. Oksmana และคณะ ศึกษาการใช้เส้นใยจากปอ (Flax) เสริมแรงให้กับ PLA เนื่องจาก PLA นั้นมีสมบัติเฉพาะตัวคือเปราะแตกหักง่ายจึงได้ใช้ไตรอะเซทิน (Triacetin) ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ในการปรับปรุงสมบัติของคอมโพลีเมอร์ ให้มีความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น โดยในการศึกษาได้ทำการผสมเส้นใยจากปอในสัดส่วน 30% wt และ 40%wt ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ และขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) โดยทำการเปรียบเทียบผลจากสมบัติเชิงกล กับคอมโพลีเมอร์ของพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยชนิดเดียวกัน พบว่า PLA/Flax คอมโพลีเมอร์ให้ผลในด้านความแข็งแรงดีกว่า PP/Flax คอมโพลีเมอร์ ถึงร้อยละ 50 แต่ ไตรอะเซทินที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์นั้น ไม่ได้มีผลในเชิงบวกกับสมบัติในการทนต่อแรงกระแทก ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการยึดเกาะระหว่าง PLA เมท

ริกซ์กับเส้นใยปอนันไม่ตีนัก และ PLA/Flax คอมโพลีตสามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบเกลียว หนอนคู่ และขึ้นรูปขึ้นททดสอบด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดได้ตีไม่แตกต่างจาก PP/Flax คอมโพลีต

M.S. Huda และคณะ ใช้เส้นใยจากหนังสือพิมพ์ (Recycled newspaper cellulose fiber; (RNCF)) ผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายเองในธรรมชาติ PLA เพื่อทำเป็นไบโอบคอมโพลีต ภายใต้แนวคิดเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม โดยการแทนที่การเสริมแรงพลาสติกด้วยเส้นใยแก้ว และศึกษาสมบัติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบระหว่าง PLA บริสุทธิ์ กับคอมโพลีตของ PLA/RNCF คอมโพลีตของ PLA/เส้นใยแก้ว และคอมโพลีตของพอลิโพรพิลีน(PP)/เส้นใยแก้ว โดยทำการผสมคอมโพลีตด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ ขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีด (Injection Molding) ผลการศึกษาพบว่าคอมโพลีตของ PLA/RNCF ให้สมบัติการทนต่อความร้อนดีกว่า PLA บริสุทธิ์ และสมบัติด้านการสะท้อนความร้อน (Heat deflection temperature) คอมโพลีตของ PLA/RNCF ให้ผลใกล้เคียงกับคอมโพลีตของ PLA/เส้นใยแก้ว

B. Bax และ J. Mössig ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง PLA/Cordenka rayon fibres คอมโพลีต กับ PLA/Flax fibers คอมโพลีต โดยขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีด พบว่า PLA/Cordenka rayon fibres คอมโพลีต ที่สัดส่วนของ Cordenka rayon fibres ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ให้ผลลัพธ์ในด้านความทนต่อแรงกระแทก และความทนต่อแรงดึงดีกว่า PLA/Flax fibers คอมโพลีต

A.K. Bledzki และ คณะ ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพลีตจาก PLA และเส้นใยปอมะนิลา และคอมโพลีตจาก PLA และเส้นใยจากเซลลูโลสสังเคราะห์ เตรียมคอมโพลีตด้วยกระบวนการ Extrusion และ เตรียมขึ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีด โดยใช้เส้นใยร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลกับ PLA บริสุทธิ์ โดยผลการทดสอบพบว่าคอมโพลีตจากจาก PLA /เส้นใย

ปอมนิลา และคอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยจากเซลลูโลสสังเคราะห์ ให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเส้นใยจากเซลลูโลสสังเคราะห์และ PLA เมทริกซ์ มีการเกาะยึดกันไม่ดี และเส้นใยบางส่วนหลุดออกจากเมทริกซ์ แต่ผลการยึดเกาะของปอมนิลากับเมทริกซ์ให้ผลดีกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อสมบัติของคอมโพสิต เช่น การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยก่อนการผสม อุณหภูมิในการหลอมผสม ความเร็วในการฉีด ความเร็วรอบของสกรู และรูปร่างของสกรูฉีดพลาสติก ต่างก็มีอิทธิพลต่อสมบัติของคอมโพสิตทั้งสิ้น

N.Graupner และคณะ ศึกษาสมบัติเชิงกลและการนำไปใช้งานของ PLA/Natural fibers คอมโพสิต และ PLA/man-made cellulose fibers(Lyocell) คอมโพสิต โดยเตรียมคอมโพสิต 4 กลุ่ม คือ คอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยฝ้าย คอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยป่าน คอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยปอกระเจา และ คอมโพสิตจาก PLA/Lyocell ในสัดส่วนเส้นใย 40% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ได้พิจารณาถึงการรวมลักษณะเด่นของเส้นใยธรรมชาติต่างชนิดกันเพื่อให้ลักษณะเด่นของเส้นใยที่ต่างกันนั้น ช่วยเสริมแรงให้กับคอมโพสิตให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยการเตรียมคอมโพสิตจากเส้นใยผสม 2 ชนิด คือ PLA/เส้นใยป่าน+เส้นใยปอกระเจา และ คอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยป่าน+ Lyocell ในสัดส่วนเส้นใย 40% โดยน้ำหนัก เตรียมชิ้นงานทดสอบด้วยการขึ้นรูปแบบอัด และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าคอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยป่าน+เส้นใยปอกระเจา มีค่าความทนต่อแรงดึง และมอดูลัสของยังสูงที่สุด คอมโพสิตจาก PLA/เส้นใยฝ้าย มีความทนต่อแรงกระแทกดีที่สุด ส่วนคอมโพสิตจาก PLA/ Lyocell แสดงสมบัติที่ดีทั้งในด้าน ความความทนต่อแรงดึง มอดูลัสของยัง และ ความทนต่อแรงกระแทก



## บทที่ ๒

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

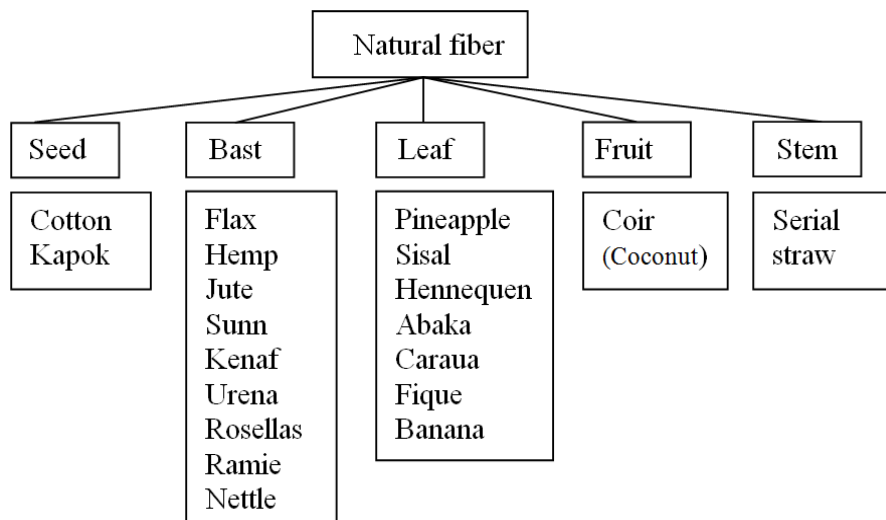
#### ๒.๑ เส้นใยธรรมชาติ

##### ๒.๑.๑ ธรรมชาติของเส้นใย

เส้นใยธรรมชาติแบ่งได้หลายชนิดตามแหล่งที่มา เช่น พืช สัตว์ และแร่ต่างๆ เส้นใยจากพืชทุกชนิดประกอบด้วยเซลลูโลส และมาจากหลายแหล่ง เช่น ก้าน ใบ ผล เมล็ด เนื้อ และเปลือก เป็นต้น ในขณะที่เส้นใยจากสัตว์ประกอบด้วยโปรตีน เช่น เส้นผม ไหม และขนสัตว์ เป็นต้น การนำเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เป็นสารเสริมแรงในคอมโพสิตมีมานานหลายสิบปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากคอมโพสิตที่ได้มีราคาถูกลง นำมาใช้ใหม่ได้ และมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา เส้นใยจากพืชเป็นเส้นใยที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เส้นใยจากพืชประกอบด้วยสายเซลลูโลส (cellulose fibrils) หลายๆ สายรวมกันโดยมีลิกนินเป็นสารช่วยประสาน องค์ประกอบหลักของเส้นใยพืช ได้แก่ แอลฟา-เซลลูโลส ( $\alpha$ -Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) ลิกนิน (Lignin) เพคติน (Pectin) และแว็กซ์ (Wax) (John & Thomas, 2008) สายเซลลูโลสเหล่านี้จะเรียงตัวตามแนวยาวของเส้นใยซึ่งเป็นผลให้เส้นใยมีความทนต่อแรงดึง ความทนต่อแรงดัด และความแข็ง (Rigidity) สูง อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการเสริมแรงของเส้นใยธรรมชาติก็ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเซลลูโลสและความเป็นผลึกของเส้นใย

##### ๒.๑.๒ การจัดกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช

เส้นใยธรรมชาติจากพืชโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ขึ้นอยู่กับการได้มาหรือแหล่งของเส้นใย รูปที่ ๒.๑ แสดงแผนภาพการแบ่งกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช

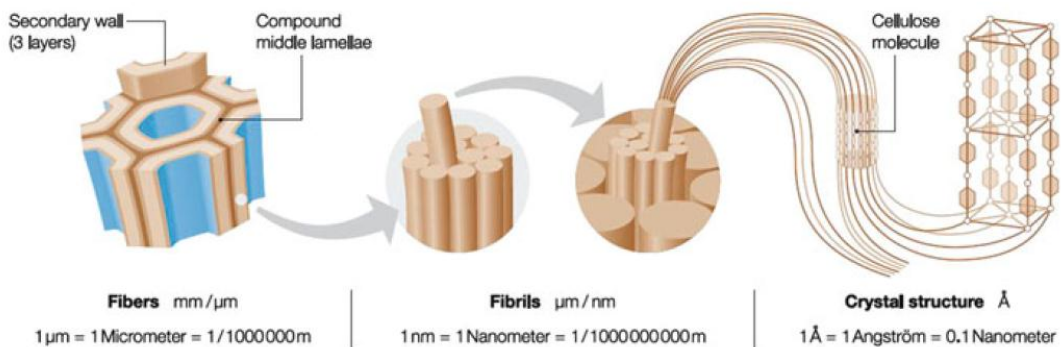


รูปที่ ๒.๑ แผนภาพการแบ่งกลุ่มของเส้นใยธรรมชาติจากพืช (Mohanty et al., 2005)

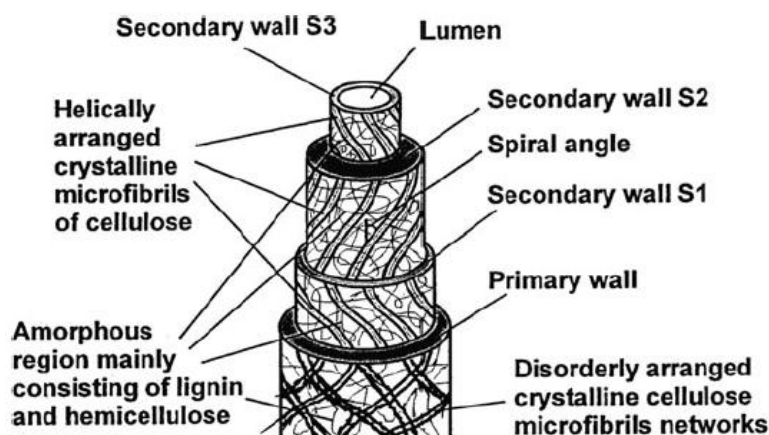
### ๒.๑.๓ โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติจากพืช

โดยทั่วไปเส้นใยเดี่ยวจากพืชมีความยาวอยู่ในช่วง 1 to 50  $\mu\text{m}$  และเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10-50  $\mu\text{m}$  มีโครงสร้างคล้ายหลอดขนาดเล็กมาก โดยมีท่อลำเลียงน้ำ (Lumen) อยู่ตรงกลาง และล้อมรอบด้วยผนังเซลล์ (Toumis, 1991) หลายๆ ชั้น ซึ่งผนังเซลล์นี้เกิดจากการจัดเรียงตัวของเซลล์ลูโลสที่งอกในลักษณะของเส้นใยขนาดไมครอน (Microfibrils) ฝังอยู่ในเฮมิเซลล์ลูโลส-ลิกนิน เมทริกซ์ (Hemicelluloses-lignin matrix) โดยเส้นใยขนาดไมครอนดังกล่าวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10-30 nm และประกอบด้วยเซลล์ลูโลสประมาณ 30-100 โมเลกุล มีลักษณะเหยียดตรง (Extended chain conformation) จึงเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่เส้น รูปที่ ๒.๒ แสดงการจัดเรียงตัวของเส้นใย (Fibrils) เส้นใยขนาดไมครอน และเซลล์ลูโลส ในผนังเซลล์ของเส้นใยจากพืช

โมเลกุลของเฮมิเซลล์ลูโลสในผนังเซลล์จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับเซลล์ลูโลสประหนึ่งวัสดุเชื่อมประสานระหว่างเส้นใยขนาดไมครอน กลายเป็นร่างแหเซลล์ลูโลส/เฮมิเซลล์ลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างของเส้นใย ส่วนลิกนินซึ่งเป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซลล์ลูโลส/เฮมิเซลล์ลูโลส คอมโพสิต



รูปที่ ๒.๒ การจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดไมครอน และเซลลูโลส ในผนังเซลล์ของเส้นใยจากพืช (Zimmermann et al., 2004).



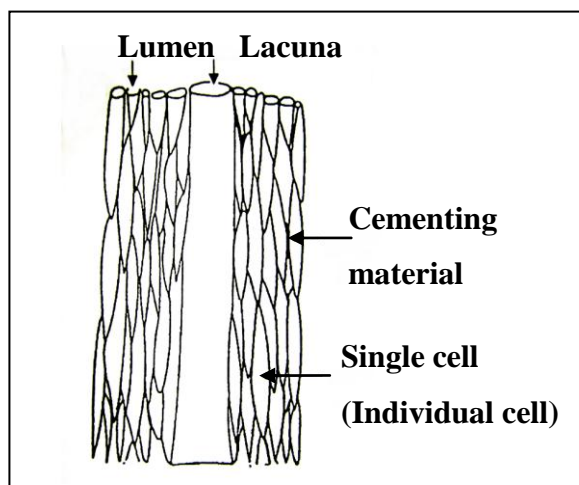
รูปที่ ๒.๓ โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติจากพืช (Rong et al., 2001).

ผนังเซลล์แบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งเรียกว่าผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) ประกอบด้วยร่างแหที่ไม่ค่อยมีรูปแบบแน่นอน (Irregular net work) ของเส้นใยเซลลูโลสขนาดไมครอนจัดเรียงตัวกันแน่น อีกส่วนเรียกว่าผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) ประกอบด้วยผนังสามชั้น ได้แก่ S1 (ชั้นนอก) S2 (ชั้นกลาง) และ S3 (ชั้นใน) ดังรูปที่ ๒.๓ ซึ่ง S2 เป็นชั้นที่หนาที่สุดและเป็นชั้นที่ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกล (Toumis, 1991) ผนังเซลล์เหล่านี้มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน อาทิ อัตราส่วนระหว่างลิกนิน/เฮมิเซลลูโลส และการจัดเรียงตัวหรือมุมในการบิดเกลียว

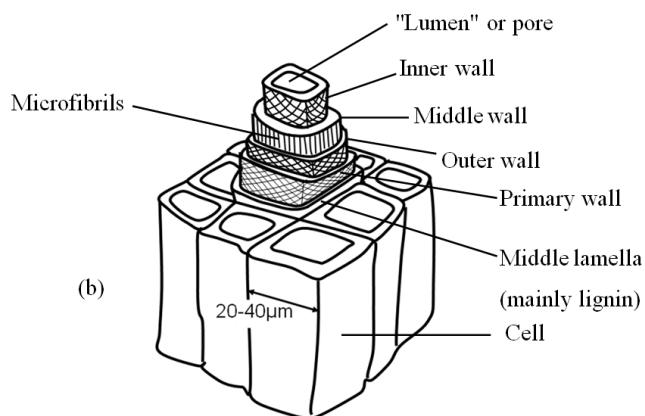
เส้นใยเซลลูโลสขนาดไมครอน (Spiral angle) เป็นต้น (Rong et al., 2001) เป็นต้น สมบัติเชิงกลของเส้นใยขึ้นอยู่กับปริมาณเซลลูโลส มุมในการบิดเกลียวเส้นใยเซลลูโลสขนาดไมครอน และองศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization) ซึ่งแตกต่างกันในส่วนต่างๆ ของพืช โดยทั่วไปเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง องศาของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสูง และมุมในการบิดเกลียวต่ำ จะมีค่าความทนต่อแรงดึงและมอดุลัสสูงด้วย

เส้นใยเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสังฐานและส่วนที่เป็นผลึกที่มีสัดส่วนแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา และชนิดของพืช เส้นใยจากฝ้าย ปอ (Flax) ป่าน (Ramie) ไซซาล (Sisal) และกล้วย มีความเป็นผลึกสูง (ร้อยละ 65-70) การกำจัดส่วนที่เป็นอสังฐานออกจากเส้นใยช่วยให้เส้นใยมีความเป็นผลึกสูงขึ้นและอาจสูงมากถึงร้อยละ 100 (Rong et al., 2001) ในโครงสร้างของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ทั่วทั้งโครงสร้างของเส้นใย ซึ่งปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นกับระดับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ความบริสุทธิ์ของเซลลูโลส และองศาความเป็นผลึก และหมู่ไฮดรอกซิลทุกหมู่ที่อยู่ในส่วนที่เป็นอสังฐานสามารถดูดซับกับโมเลกุลของน้ำได้ในขณะที่ในส่วนที่เป็นผลึก โมเลกุลของน้ำถูกดูดซับไว้โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวหน้าของเฟสเท่านั้น

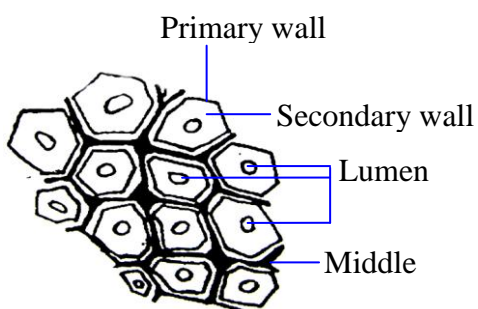
เมื่อพิจารณาโครงสร้างโดยรวมของเส้นใยธรรมชาติ พบว่าประกอบด้วยหลายเซลล์ติดต่อกันในลักษณะรวงผึ้งทรงกระบอก มีขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวแตกต่างกัน ตามชนิดของเส้นใย ดังรูปที่ ๒.๔ (Satyanarayana et al., 1990) เซลล์เหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยสารช่วยประสาน เช่น ลิกนิน เป็นต้น แต่ละเซลล์ประกอบด้วยผนังเซลล์สองชั้น และช่องว่างตรงกลางเซลล์หรือลูเมน (รูปที่ ๒.๕ - ๒.๖) ดังได้กล่าวแล้วข้างต้น รูปที่ ๒.๗ แสดงการจัดเรียงตัวของเส้นใยขนาดไมครอนที่มีการบิดเป็นเกลียวทำมุมกับแกนของเส้นใย ดังนั้นผลึกของเซลลูโลสในเส้นใยจึงมีลักษณะบิดเป็นเกลียวด้วยมุมและระยะห่างที่แตกต่างกันไปตามชนิดของเส้นใย (Bledski & Gassan, 1999)



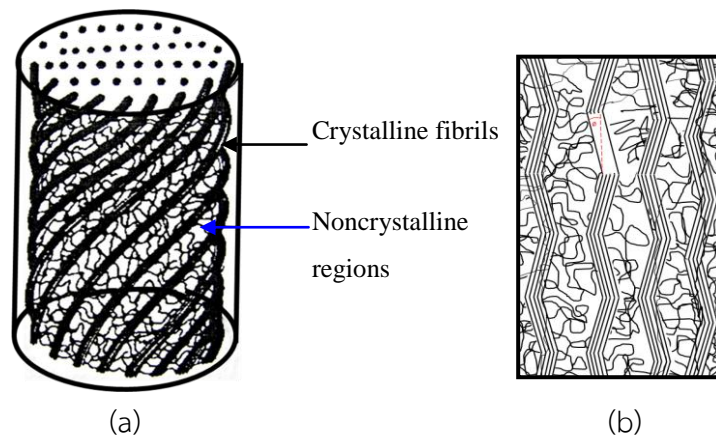
รูปที่ ๒.๔ การจัดเรียงตัวของเส้นใยชนิดลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic fiber) (Satyanarayana et al,1990).



รูปที่ ๒.๕ โครงสร้างภายในของเส้นใยธรรมชาติ (Sukumaran et al., 2001).



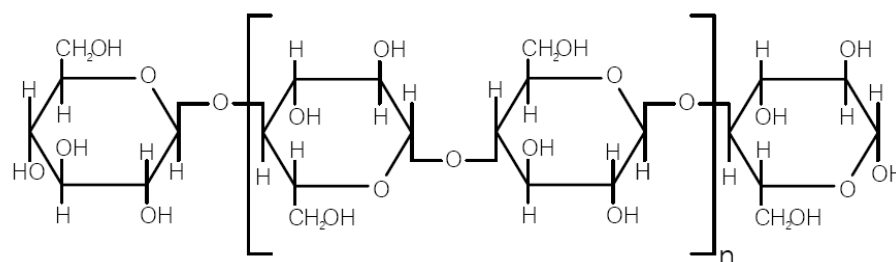
รูปที่ ๒.๖ ภาพตัดขวางของเส้นใยปอกระเจา (Jute fiber) (Majumdar, 1956).



รูปที่ ๒.๗ การจัดเรียงตัวของเส้นใยในส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน แบบสามมิติ (a) และสองมิติ (b) (Bledski & Gussan, 1999).

#### ๒.๑.๓.๑ เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ ประกอบด้วยสายโซ่ตรงของหน่วยซ้ำของแอนไฮโดรกลูโคส 1,4- $\beta$  anhydroglucose ( $C_6H_{11}O_5$ ) ซึ่งถูกเชื่อมต่อกันด้วย 1,4 -  $\beta$  -D-glycosidic linkages ที่ตำแหน่ง  $C_1$  และ  $C_4$  (Nevell&Zeronian, 1985) ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่มาจากแอลกอฮอล์ (Alcoholic hydroxyl groups) ดังรูปที่ ๒.๘



รูปที่ ๒.๘ โครงสร้างของเซลลูโลส (Mohanty, Drzal & Misra, 2005)

หมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล และระหว่างโมเลกุล (Intermolecular and intramolecular hydrogen bonds) ของเซลลูโลสเองหรือกับโมเลกุลมีขั้วอื่นๆ ได้ ดังนั้นเส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจึงจัดเป็นโมเลกุลชอบน้ำ นอกจากนี้หมู่ไฮดรอกซิลที่

สร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลยังมีประโยชน์ต่อการเกิดผลึกภายในเซลลูโลส และมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของเส้นใยด้วย ลักษณะของผลึกเซลลูโลสที่เกิดตามธรรมชาติเป็นรูปแท่ง (Slender rod like crystalline microfibrils) หรือรูปเข็ม (Monoclinic sphenodic) เซลลูโลส I (Cellulose I) เซลลูโลสมีความทนทานต่อตัวออกซิไดซ์ได้ดี และทนต่อต่างสูงได้ถึงความเข้มข้นของด่างร้อยละ 17.5 โดยน้ำหนัก แต่ถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzed) ด้วยกรดกลายเป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำ (Water-soluble sugar) ได้ง่าย

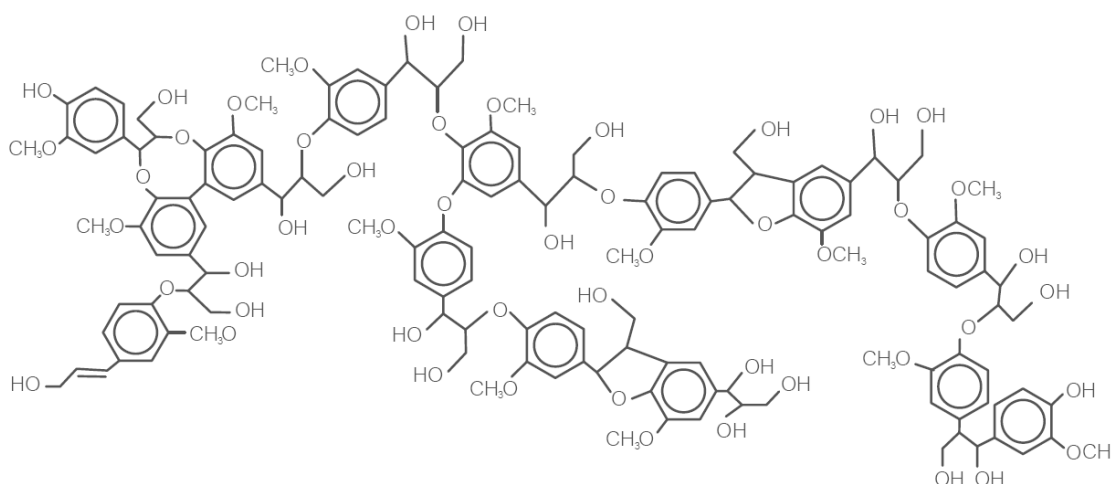
#### ๒.๑.๓.๒ เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสไม่ใช่เซลลูโลส มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซคคาไรด์ที่มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม เฮมิเซลลูโลสแตกต่างเซลลูโลสสามประการดังนี้ ประการแรก เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลต่างชนิดกันในขณะที่เซลลูโลสมีเฉพาะหน่วยของ 1,4 -  $\beta$  -D-glucopyranose ประการที่สอง เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งในสัดส่วนที่มากพอสมควร จึงมีโครงสร้างอสังฐานในปริมาณที่มากกว่า ในขณะที่เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรง ประการที่สาม องค์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเซลลูโลสสูงกว่าเฮมิเซลลูโลสประมาณ 10-100 เท่า โดยองค์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเฮมิเซลลูโลสอยู่ระหว่าง 50-300 เฮมิเซลลูโลสจึงทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ให้กับเส้นใยขนาดไมครอนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสมีความชอบน้ำสูง ละลายได้ในด่าง และถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายด้วยกรด

#### ๒.๑.๓.๓ ลิกนิน

ลิกนินจัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เป็นสารพยางค์โครงสร้างในพืช ลิกนินเป็นสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทนต่อการเสื่อมสลายโดยแบคทีเรีย รูปที่ ๒.๙ แสดงโครงสร้างของลิกนินซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนทั้งแบบเส้นตรง และวงอะโรมาติก ลิกนินไม่ค่อยละลายในตัวทำละลายและไม่สามารถแตกโครงสร้างเป็นหน่วยของมอนอเมอร์ได้ ลิกนินมี

โครงสร้างเป็นอสัณฐานและไม่ชอบน้ำ สารประกอบของลิกนินทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับพืช มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เป็นโคพอลิเมอร์ลักษณะสามมิติของส่วนประกอบที่เป็นเส้นตรง และวงอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล เมทอกซิล (Methoxyl) และคาร์บอนิล (Carbonyl) โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลและเมทอกซิลอย่างละห้าหมู่ในหนึ่งหน่วยโครงสร้าง ซึ่งเชื่อว่าเป็นอนุพันธ์ (Derivatives) 4-hydroxy-3-methoxy phenylpropane ลิกนินจัดเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วประมาณ 90 °C และอุณหภูมิหลอมเหลวประมาณ 170 °C (Olesen & Plackett, 1999) ลิกนินไม่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยกรด แต่ละลายในด่างร้อน ถูกออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็วด้วยฟีนอล (Bismarck et al., 2005)



รูปที่ ๒.๙ โครงสร้างของลิกนิน (Rouchi, 2000).

#### ๒.๑.๔ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

เป็นที่ทราบกันดีว่าสมบัติของเส้นใยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ ปริมาณผลึกของเซลลูโลส (Cellulose crystallinity) องศาการบิดเกลียว (Microfibrillar angle) จำนวนเซล และอัตราส่วนระหว่างแนวตั้งและแนวนอนของเซล (Cell aspect ratio) ดังนั้นเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมาก และองศาการบิดเกลียวต่ำจะเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงมาก อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของเส้นใย-



ตาราง 2.1 สมบัติบางประการของเส้นใยธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ (Mohanthy et al., 2000)

เส้นใย	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	เส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\mu$ m)	Tensile Strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Flax	1.5	40-600	345-1500	27.6	2.7-3.2
Hemp	1.47	25-500	690	70	1.6
Jute	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1.16-1.5
Kenaf			930	53	1.6
Ramie	1.55		400-938	61.4-128	1.2-3.8
Nettle			650	38	1.7
Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
PALF		20-80	413-1627	34.5-82.5	1.6
Abaca			430-760		
Oil palm EFB	0.7-1.55	150-500	248	3.2	25
Oil/palm mesocarp			80	0.5	17
Cotton	1.5-1.6	12-38	287-800	5.5-12.6	7-8
Coir	1.15-1.46	100-460	131-220	4-6	15-40
E-glass	2.55	<17	3400	73	2.5
Kevlar	1.44		3000	60	2.5-3.7
Carbon	1.78	5-7	3400 <sup>a</sup> -4800 <sup>b</sup>	240 <sup>b</sup> -425 <sup>a</sup>	1.4-1.8

<sup>a</sup> Ultra high modulus carbon fibers.

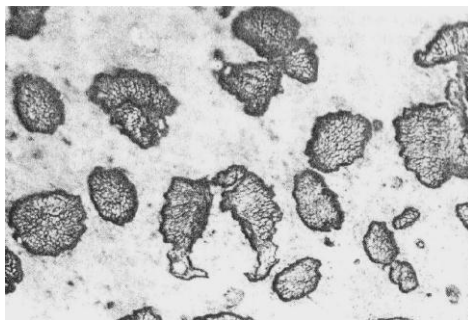
<sup>b</sup> Ultra high tenacity carbon fibers.

ธรรมชาติที่นั่นด้อยกว่าเส้นใยคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยใยแก้วมาก แต่เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความหนาแน่นต่ำจึงมีสมบัติที่น่าสนใจ เช่น ความแข็งแรงสูงเมื่อเทียบกับความหนาแน่น จึงเป็นจุดเด่นที่แข่งขันกับเส้นใยแก้วได้ (Kromer et al., 1995, Hieber et al., 2001 และ Wambua et al., 2003) นอกจากนี้เส้นใยจากพืชยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและสามารถปลูกทดแทนได้ สมบัติบางประการของเส้นใยแสดงในตารางที่ 2.1

## ๒.๒ เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fiber, PALF)

เส้นใยสับปะรดได้จากใบสับปะรด (*Ananas Comosus*) ซึ่งอยู่ในแฟมิลี *Bromeliaceae* สับปะรดเจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อนของทวีปอเมริกา แอฟริกา และเอเชีย (Mwaikambo, 2006) ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการปลูกและส่งออกสับปะรดรายใหญ่ของโลก จึงมีขยะที่เกิดจากใบสับปะรดจำนวนมาก และเกษตรกรจะกำจัดโดยการหมักเป็นปุ๋ยหรือเผาทำลาย ซึ่งการเผาทำลายนั้นก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมมากมาย

เส้นใยสับปะรดจัดเป็นเส้นใยลิกโนเซลลูโลส มีโครงสร้างคล้ายริบิ้นเชื่อมติดกันด้วยลิกนิน ซึ่งทำให้เส้นใยมีความแข็งแรง (George et al., 1998) รูปที่ ๒.๑๐ แสดงภาพตัดขวางของเส้นใยสับปะรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แต่ละเซลล์ในเส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ  $10\ \mu\text{m}$  ความยาวเฉลี่ย  $4.5\ \text{mm}$  และ Aspect ratio เท่ากับ 450 ความหนาของผนังเซลล์มีค่าเท่ากับ  $8.3\ \mu\text{m}$  ซึ่งอยู่ระหว่างค่าความหนาของผนังเซลล์ของเส้นใยป่าน ( $12.8\ \mu\text{m}$ ) และเส้นใยจากใบกล้วย ( $1.2\ \mu\text{m}$ ) สมบัติเชิงกลของตัวอย่างเส้นใยสับปะรดจากอินเดียได้แสดงในตารางที่ ๒.๒



รูปที่ ๒.๑๐ ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 160 เท่า) แสดงภาพตัดขวางของเส้นใย  
สับปะรด (Mukherjee et al., 1986)

ตารางที่ ๒.๒ สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของเส้นใยสับปะรดจากอินเดียใต้ (George et  
al., 1996, 1998 และ Devi et al., 1997)

สมบัติ	
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.526
Softening Point (°C)	104
Tensile Strength (MPa)	170
Young's Modulus (MPa)	6260
Specific Modulus (MPa)	4070
Elongation at Break (%)	3
Moisture regain (%)	12

#### ๒.๒.๑ โครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบของเส้นใยจากใบสับปะรด

จากผลการศึกษานักวิจัยหลายกลุ่มพบว่าเส้นใยสับปะรดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ  
เซลลูโลส ตารางที่ ๒.๓ แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากใบสับปะรดจากหลายที่มาซึ่งพอสรุป

ได้ว่ามีองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลสอยู่ในช่วง 67.12–82% เฮมิเซลลูโลส 9.45–18.80% ฮอลเซลลูโลส (Holocellulose) 80–87.56% ลิกนิน 4.4–15.4% เพคติน (Pectin) 1.2–3% ไขมัน และแว็กซ์ 3.2–4.2% และเถ้า 0.9–2.7% ปริมาณองค์ประกอบเหล่านี้แตกต่างกันไปตามแหล่งที่มา อายุ สภาพอากาศ และวิธีการสกัด หน่วยที่เล็กที่สุดในโครงสร้างของเส้นใยสับปะรดคือแอนไฮโดร-ดี-กลูโคสโคไพรานอส (Anhydro-D-glucoseopyranose) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลสามหมู่ (Bledzki & Gassan 1999) ทำหน้าที่สร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างและภายในโมเลกุล ( Intramolecular and intermolecular hydrogen bonds) ของแอนไฮโดร-ดี-กลูโคสโคไพรานอสเอง หรือกับความชื้นในอากาศ เส้นใยสับปะรดจึงมีสมบัติชอบน้ำ และสมบัตินี้เองที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด

ตารางที่ ๒.๓ องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากใบสับปะรด

Chemical composition (%)	Source						
	Bhaduri et al. (1983)	Mohanty et al. (2000)	Abdul Khalil et al. (2006)	Saha et al. (1990)	Rowell and Han (2000)	Munirah et al. (2007)	Siregar et al. (2008)
Cellulose	69.5	70–82	73.4	68.5	80–81	78.11	67.12–69.34
Hemicellulose	–	–	–	18.80	16–19	9.45	–
Hollocellulose	–	–	80.5	–	–	87.56	82.3–85.5
Lignin	4.4	5–12.7	10.5	6.04	4.6–12	4.78	14.5–15.4
Pectin	1.2	–	–	1.10	2–3	–	–
Fat and wax	4.2	–	–	3.2	–	–	–
Ash	2.7	–	2	0.9	–	–	1.21
Extractive	–	–	5.5	–	–	–	3.83–0.97

### ๒.๒.๒ สมบัติของเส้นใยจากใบสับปะรด

เส้นใยสับปะรดได้รับความสนใจนำไปเป็นสารเสริมแรงให้แก่คอมโพสิตเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่น่าสนใจหลายประการดังแสดงในตาราง ๒.๔ (Bismarck et al., 2005) ในตารางแสดงให้เห็นว่าเส้นใยสับปะรดมีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) อยู่ในช่วง 170–1,627 MPa ค่ามอดุลัส

แรงดึง (Tensile modulus) อยู่ในช่วง 6.26 to 82.5 GPa และค่าระยะยืด ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 0.8–3.37% ซึ่งเป็นผลจากปริมาณเซลลูโลสที่สูงและมุมในการบิดเกลียวที่ต่ำถึง 14° (Bismarck et al., 2005) อย่างไรก็ตามขณะเปียกค่าความแข็งแรง (Wet bundle strength) ลดลงถึง 50%

ตาราง ๒.๔ สมบัติเชิงกลของเส้นใยสับปะรด

Mechanical and physical properties	Source				
	Mohanty et al. (2000)	George et al. (1993)	Luo and Netravali (1995)	Arib et al. (2006)	Mohamed et al. (2009)
Tensile strength (MPa)	413–1,627	170	445	126.6	293.08
Young's modulus (GPa)	34.5–82.5	6.26	13.21	4.405	18.934
Elongation at break (%)	1.6	0.8–1.6	3.37	2.2	1.41
Diameter (µm)	20–80	5–30	–	–	105–300
Density (g cm <sup>-3</sup> )	–	1.44	1.36	1.07	–
Moisture content (%)	11.8	–	–	–	–
Microfibrillar angle (°)	14	12	–	–	–

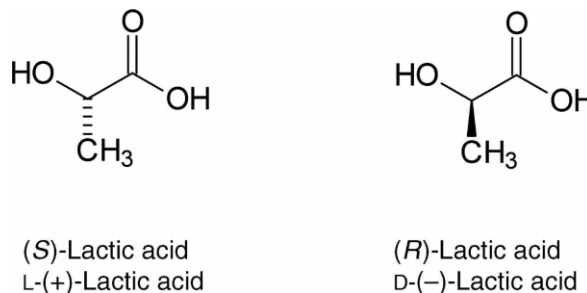
### ๒.๓ พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดแข็งเปราะเช่นเดียวกับพอลิสไตรีน (PS) หรือพอลิเอทิลีนเทเรพทาเรต (PET) มีการใช้งานหลากหลาย เช่นบรรจุภัณฑ์ พลาสติก ถ้วยเครื่องดื่มเย็น เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เส้นใย ขวด เคลือบผิว และอื่นๆ (Garlotta, 2001) PLA จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ปลูกทดแทนได้ จึงสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีทางธรรมชาติอย่างสมบูรณ์ (Garlotta, 2001; Gupta & Kumar, 2007; Hartmann, 1998) การย่อยสลายของ PLA เกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้กรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถย่อยผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมโดยจุลินทรีย์ได้น้ำ และคาร์บอนมอนอกไซด์ภายในเวลา 3-4 สัปดาห์ (Meinander et al., 1997) และเนื่องจาก

PLA เป็นวัสดุที่แข็งเปราะโดยธรรมชาติจึงต้องเติมพลาสติกไซเซอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติการดึงยึดและสมบัติการทนต่อแรงกระแทก PLA มีความสามารถในการขึ้นรูปโดยเครื่องขึ้นรูปประเภทเดียวกับที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน และเทอร์โมพลาสติก

### ๒.๓.๑ สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ PLA

แลคติกแอซิด หรือ 2-ไฮดรอกซีลิวโปอิกแอซิด (2-Hydroxypropanoic acid) เป็นรูปที่ง่ายที่สุดของ 2-ไฮดรอกซีคาร์บอกซิลิกแอซิด หรือแอลฟาไฮดรอกซีลิวโปอิกแอซิด ( 2-Hydroxycarboxylic acid (or  $\alpha$ -Hydroxy acid) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ PLA แสดงในรูปที่ ๒.๑๑ พอลิแลคติกแอซิดเกรดการค้าเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง Poly-L-Lactic Acid (PLLA) และ Poly-D-Lactic Acid (PDLA) หรือเรียกว่า PDLLA โคพอลิเมอร์ ซึ่งสังเคราะห์จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ LLA และ DLLA สมบัติของ PLA จึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วน (The ratio of D- to L-enantiomers) และการจัดลำดับของสองโครงสร้างนี้



รูปที่ ๒.๑๑ แลคติกแอซิดซึ่งมีสองรูปแบบ (Enantiomeric form) (Holten et al., 1971)

PLLA เป็นองค์ประกอบหลักของ PLA ซึ่งได้จากการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติก PLA ที่มีปริมาณ PLLA สูงกว่า 90% มีความเป็นผลึกสูง แต่หากมีปริมาณ PLLA ต่ำจะมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน อุณหภูมิหลอมเหลว (The melting temperature,  $T_m$ ) และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (The glass transition temperature;  $T_g$ ) และความเป็นผลึกของ PLA จึงลดลงเมื่อปริมาณของ

PLLA ลดลง สมบัติของ PLA เช่น สมบัติทางความร้อนและสมบัติการทนต่อแรงกระแทกมีค่าต่ำกว่า พอลิเมอร์การค้า ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ เพื่อให้ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์เหล่านั้น (Lim, Auras & Rubino, 2008) การปรับปรุงสมบัติของ PLA เพื่อให้ใช้งานได้มีหลายวิธี เช่นการสังเคราะห์ โคพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์ชนิดอื่น เช่น อนุพันธ์ของสไตรีน อคริเลต และพอลิเอทิลีนออกไซด์ (Poly (ethylene oxide), PEO) นอกจากนี้การเติมสารตัวเติม (Filler) ขนาดนาโนก็ช่วยปรับปรุงสมบัติของ PLA ได้อีกด้วย โดยสมบัติที่สามารถปรับปรุงให้ดีขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรง (Stiffness) ความสามารถในการให้ผ่าน (Permeability) ความเป็นผลึก และสมบัติทางความร้อน เป็นต้น (Auras et al., 2004)

#### ๒.๓.๒ สมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิด

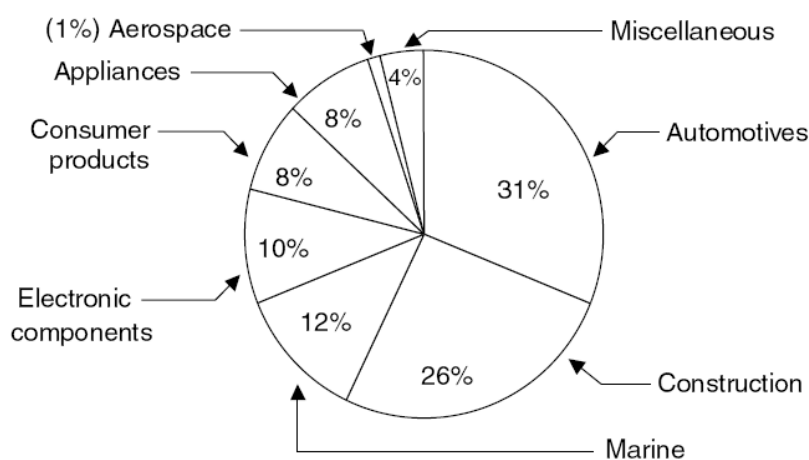
พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความวาว และมีค่ามอดูลัสสูงใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิดมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและอสัณฐาน มีค่ามอดูลัสอยู่ในช่วง 3000–4000 MPa และความทนต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 50–70 MPa จึงสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น งานบรรจุภัณฑ์ประเภทต่างๆ แต่ข้อจำกัดในการใช้งานถูกกำหนดโดยค่าความยืดหยุ่นที่ค่อนข้างต่ำ พอลิแลคติกแอซิดมีค่า  $T_g$  อยู่ในช่วง 60–70 °C จึงเป็นพลาสติกเปราะที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดทำได้โดยปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือการผสมกับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่นโดยเฉพาะยาง และการเติมพลาสติกไซเซอร์ (Ajioka et al., 1995)

### ๒.๔ ไบโอบีโอมโพสิต (Biocomposites)

#### ๒.๔.๑ คอมโพสิต

คอมโพสิตเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานหลากหลายเนื่องจากสมบัติของวัสดุชนิดเกิดจากการรวมสมบัติที่ดีของวัสดุอย่างน้อยสองชนิดเข้าด้วยกัน วัสดุคอมโพสิตส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง และมีสมบัติเฉพาะในการใช้งานเฉพาะ สำหรับพลาสติกคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

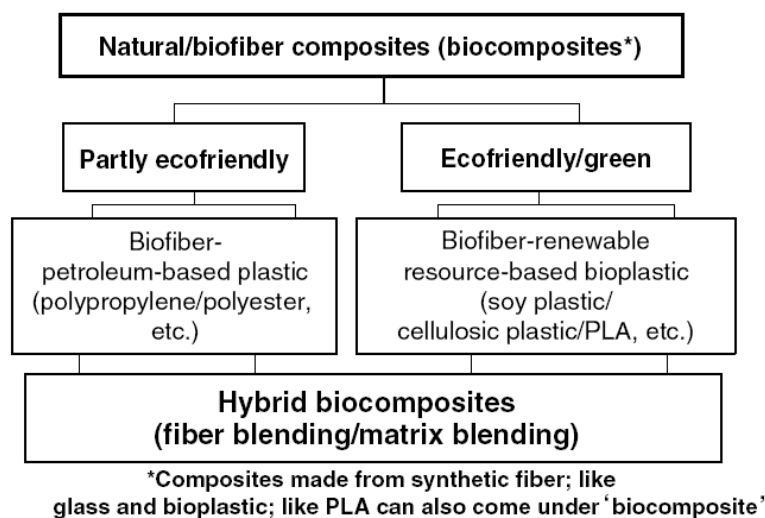
เกิดขึ้นครั้งแรกใน ปี คศ. 1908 โดยการผสมเส้นใยเซลลูโลสกับฟีนอลิกส์ จากนั้นมีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกเป็นยูเรีย และเมลามีน จนกระทั่ง ปี คศ. 1940 มีการผลิตพลาสติกคอมโพสิต โดยใช้พอลิเมอร์ ชนิดพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyesters) และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (Glass fiber) ในทางการค้า เพื่อผลิตเป็นสินค้าหลายประเภท เช่น กีตาร์ ไม้เทนนิส ชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนเครื่องบิน ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และข้อต่อต่างๆ เป็นต้น สัดส่วนการตลาดของพลาสติกคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแสดงในรูปที่ ๒.๑๒ โดยเส้นใยแก้วเป็นเส้นใยที่มีการใช้มากที่สุดถึง 95% โดยคอมโพสิตทั้งกับเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีผลการศึกษายืนยันว่า สำหรับการใช้งานบางประเภท คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติก็มีศักยภาพในการใช้งานเทียบเท่ากับคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยใยแก้ว



รูปที่ ๒.๑๒ สัดส่วนการตลาดของพลาสติกคอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Adapted from Plast.

News. August 26, 2002)



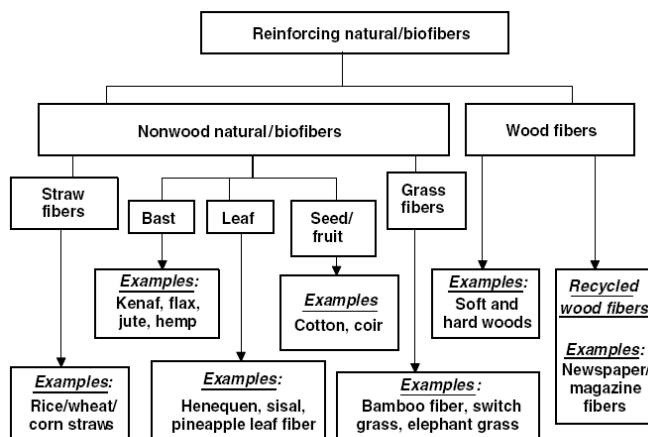


รูปที่ ๒.๑๓ ชนิดของคอมโพสิตชีวภาพ (Bio-based composites) (Mohanty et al., 2005)

คอมโพสิตชีวภาพจัดเป็นคอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเลียม เช่น PP PE และอีพอกซี หรือพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น PLA และ PHAs นอกจากนี้คอมโพสิตชีวภาพยังรวมไปถึงคอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอนอีกด้วย คอมโพสิตชีวภาพที่เตรียมได้จากเส้นใยจากพืชและพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาตินั้นว่ามีผลดีต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ดังนั้นจึงถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “คอมโพสิตสีเขียว” (Green composites) (Mohanty et al., 2005).

๒.๔.๒ เส้นใยธรรมชาติที่ใช้เสริมแรงในคอมโพสิตชีวภาพ

การกำเนิดของคอมโพสิตชีวภาพที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ นับเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าและของเหลือทิ้งจากการเกษตรทั่วโลก ปอกระเจา (Jute) ปลูกมากในอินเดียและบังคลาเทศ กาบมะพร้าว (Coir) ได้จากประเทศในเขตร้อน โดยร้อยละ 20 ได้จากอินเดีย ไชวซาล (Sisal) จากประเทศแถบแอฟริกา อินเดียตะวันตก และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมีผลผลิตมากที่สุดจากประเทศตุนีเซีย และบราซิล ปอกระเจา (Kenaf) ได้จากสหรัฐอเมริกา ปอแฟลกซ์ (Flax) จากประเทศแถบยุโรป แคนาดา อาร์เจนตินา อินเดีย และรัสเซีย โดยพบว่า ร้อยละ 2 ของการใช้งาน



รูปที่ ๒.๑๔ การจำแนกประเภทของเส้นใยธรรมชาติ (Mohanty et al., 2005)



รูปที่ ๒.๑๕ ภาพถ่ายของตัวอย่างเส้นใยประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิต

(Adapted from Mohanty et al., 2005).

ปอแพชท์ทั่วโลก ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กล้วยา (Hemp) จากเอเชียกลาง และจีน ป่านรามี่ (Ramie) จัดเป็นเส้นใยพืชที่ยาวที่สุด และแข็งแรงที่สุดชนิดหนึ่ง พบในจีน ญี่ปุ่น และมาเลเซีย ซึ่งราคาของเส้นใยธรรมชาตินั้นแตกต่างกันไปตามภาวะเศรษฐกิจของแต่ละประเทศผู้ผลิต สำหรับคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาตินั้น เส้นใยจะทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่คอมโพสิต ในขณะที่พอลิเมอร์ เมตริกซ์ทำหน้าที่คล้ายกับกาวคอยพยุงเส้นใยเอาไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม การจำแนกประเภทของเส้นใยแสดงในรูปที่ ๒.๑๔ และรูปที่ ๒.๑๕ แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างเส้นใยประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการเสริมแรงในคอมโพสิต (Mohanty et al., 2005).

## ๒.๕ สารเชื่อมประสาน (Coupling agent)

สารเชื่อมประสานคือสารเคมีที่ใช้เพิ่มแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างเฟสในคอมโพสิตซึ่งเมื่อแรงยึดเกาะระหว่างเฟสดังกล่าวแข็งแรง จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตนั้นดีขึ้นด้วย สารเชื่อมประสานมีการใช้งานทั่วไป ทั้งในระบบของเทอร์โมพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วหรือเส้นใยธรรมชาติ และระบบของพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ยังพบว่าสารเชื่อมประสานยังช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ธรรมชาติซึ่งชอบน้ำ และเฟสของพลาสติกสังเคราะห์ซึ่งไม่ชอบน้ำได้ด้วย (Leblanc et al., 2007) โดยสารเชื่อมประสานจะมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดแรงดึงดูดกับเฟสทั้งสองได้ จึงช่วยให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดีขึ้นได้ (Huneault & Li, 2007) มาลีเอเทตพอลิพรอพิลีนโคพอลิเมอร์เป็นสารเชื่อมประสานที่ช่วยให้ คอมโพสิต พอลิพรอพิลีน/เส้นใยมะพร้าว (Polypropylene/green coconut fiber (PP/GCF) composites) (Rozman et al., 2000) มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น และยังทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานที่ดีให้กับคอมโพสิต พอลิแลคติกแอซิด / เส้นใยปอกระเจา (Poly (lactic acid)/kenaf flour blends (Avella et al., 2000)) อีกด้วย

### บทที่ ๓

#### การทดลอง

#### ๓.๑ วัสดุ

##### ๓.๑.๑ พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเกรดทนความร้อนสูง (GP 330-1) ซื้อมาจากบริษัทไบโอกรีนเวิลด์ (Bio Green World Company) ซึ่งมีสมบัติทั่วไปแสดงในตารางที่ ๓.๑

ตารางที่ ๓.๑ สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (GP 330-1) (Bio Green World Co.,Ltd.)

Typical Resin Properties	Value	Standard Method
Melting Temperature (°C)	145	-
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.26	ASTM D1505
Tensile Strength at Yield (kgf/cm <sup>2</sup> )	300.3	ASTM D638
Elongation Ratio at Yield (%)	11.2	ASTM D638
Yield Strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )	396.5	ASTM D638
Izod Impact Strength (J/m)	40.2	ASTM D256
HDT (load 66 psi) (°C)	73.6	ASTM D648
MFR.190 C.2.16 kg. (g/10min)	8.51	ASTM D1238
Hardness, Shore D (D)	89	ASTM D2240
Color	White	-
Mold Shrinkage Ratio (%)	0.246	ASTM D955

๓.๑.๒ เส้นใยจากใบสับปะรด (Pineapple leaf fibers, PALF)

เส้นใยสกัดจากใบสับปะรดพันธุ์ปัตตาเวีย ซึ่งปลูกในพื้นที่จังหวัดระยอง ประเทศไทย โดยตัด

ใบที่มีความยาวอยู่ในช่วง 70-80 cm จากต้นสับปะรดที่มีอายุระหว่าง 12 ถึง 14 เดือน

๓.๑.๓ สารเคมี

๓.๑.๓.๑ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความบริสุทธิ์ 98% จากบริษัท Suttipan

Chemistry Limited Company, Thailand.

๓.๑.๓.๒ สารเชื่อมประสานมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride ( $C_4H_2O_3$ )) จาก

บริษัท Fluka, Sigma-Aldrich chemical GmbH, Germany.

## ๓.๒ เครื่องมือและอุปกรณ์

๓.๒.๑ Differential scanning calorimeter (DSC), model TA Instruments 2920.

๓.๒.๒ Scanning electron microscope (SEM), model JSM-5410LV, Jeol Co., Ltd.

๓.๒.๓ Thermo gravimetric analysis (TGA), model TGA/SDTA 851<sup>e</sup>, Mettler

Toledo Co., Ltd., Thailand.

๓.๒.๔ Desiccant dryer, model Thermo lift, Arburg Company, Germany.

๓.๒.๕ Water bath, model WMB7, Memmert

๓.๒.๖ Optical microscope, model DMLM, DFC290HD, LEICA Company.

๓.๒.๗ Injection molding machine, Allrounder 370U, Arburg GmbH, Germany.

๓.๒.๘ Tensile testing machine, model LRX Plus, Ametek LLOYD Ltd., USA.

๓.๒.๙ Tensile testing machine, model 5500R, INSTRON., USA.

๓.๒.๑๐ Pineapple fiber extraction machine, Kasetsart University

๓.๒.๑๑ High speed mixer, Lab tech engineering Limited Company.

๓.๒.๑๒ Two rolls mill machine, model, Lab tech Engineering Company LTD.

๓.๒.๑๓ Twin screw extruder (Co-Rotating), model Plastograph EC, Brabender® GmbH., Germany.

๓.๒.๑๔ Injection mold, tensile specimen Type I, ASTM D638-07.

### ๓.๓ การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีสกัดเส้นใยจากใบสับปะรดที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่

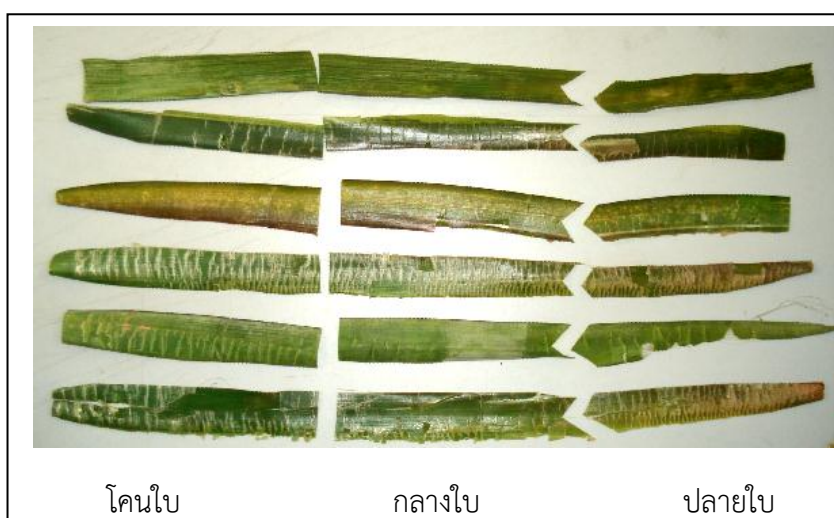
#### ๓.๓.๑ การสกัดโดยการแช่น้ำ (Water retting extraction)

ล้างใบสับปะรดสดด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะตัดแบ่งเป็นสามส่วน ได้แก่ ปลายใบ กลางใบ และโคนใบ ด้วยกรรไกร โดยให้แต่ละส่วนยาว 20 ซม. ดังรูปที่ ๓.๑ หลังจากนั้นแช่ใบสับปะรดในน้ำที่บรรจุในภาชนะปิดเป็นเวลา 14 วัน ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 45 °C เมื่อครบกำหนดให้เทน้ำที่แช่ทิ้งแล้วล้างใบสับปะรดด้วยน้ำสะอาด แล้วค่อยๆ แยกเส้นใยสับปะรด (ในน้ำ) ให้หลุดจากกันด้วยมือ

#### ๓.๓.๒ การสกัดด้วยสารเคมี

ล้างใบสับปะรดสดด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะตัดแบ่งเป็นสามส่วน ได้แก่ ปลายใบ กลางใบ และโคนใบ ด้วยกรรไกร โดยให้แต่ละส่วนยาว 20 ซม. จากนั้นเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.0, and 2.0wt% เพื่อใช้เป็นสารละลายตัวกลางในการสกัด ก่อนที่จะแช่ใบสับปะรดลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และควบคุมให้มีอุณหภูมิเท่ากับ

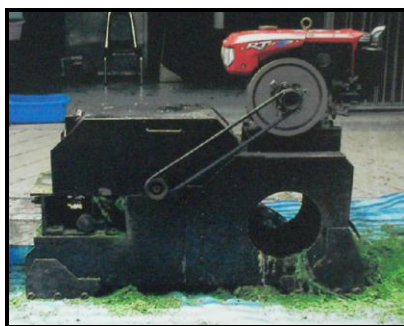
80 °C เมื่อครบกำหนดเวลาทดสอบละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทิ้งไป และล้างเส้นใยที่เหลือจน  
 สารละลายเป็นกลาง ก่อนที่จะแยกเส้นใยสับปะรด (ในน้ำ) ให้หลุดจากกันด้วยมือ



รูปที่ ๓.๑ ใบสับปะรดสดที่ถูกตัดแบ่งเป็นสามส่วน

### ๓.๓.๓ การสกัดโดยใช้เครื่องแยกเส้นใย

ล้างใบสับปะรดสดด้วยน้ำสะอาดก่อนที่จะป้อนเข้าเครื่องแยกเส้นใย (รูปที่ ๓.๒) ใบมีดใน  
 เครื่องจะขูดเปลือกใบและแยกใบออกมา หลังจากนั้นเส้นใยที่ได้จะถูกนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง  
 ก่อนที่จะแช่ในน้ำยาปรับผ้านุ่ม (2%wt/v) ที่อุณหภูมิ 70°C จากนั้นล้างเส้นใยด้วยน้ำสะอาดอีกครั้ง  
 ก่อนจะนำไปผึ่งลมที่อุณหภูมิห้องพอสะเด็ดน้ำ สุดท้ายเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ  
 60 °C จนกระทั่งเส้นใยแห้ง เส้นใยที่ได้มีความยาวประมาณ 70-80 cm (รูปที่ ๓.๓)



(ก)



(ข)

รูปที่ ๓.๒ (ก) เครื่องแยกเส้นใย และ (ข) เส้นใยที่แยกได้จากเครื่อง (Picture: Kasetsart university)



รูปที่ ๓.๓ เส้นใยสับปะรดหลังผ่านการล้างและเป่าแห้ง

ในการสกัดเส้นใยด้วยวิธีที่แตกต่างกันสามวิธีข้างต้น งานวิจัยนี้พบว่า การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยวิธีใช้เครื่องแยกเส้นใยเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากมีอัตราส่วนปริมาณเส้นใยต่อน้ำหนักใบมากที่สุด ใช้เวลาสั้น และไม่ใช้สารเคมีจึงเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนวิธีการสกัดหลังการแช่น้ำทำให้เกิดน้ำเสียที่มีกลิ่นเหม็นรุนแรง และใช้เวลานาน วิธีสกัดโดยใช้สารเคมีไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และพบการขาดและหักของเส้นใย รวมถึงการแยกเส้นใยออกจากกันก็ทำได้ยาก



### ๓.๔ การเตรียมไบโอคอมโพสิต PALF/PLA

#### ๓.๔.๑ การเตรียมเส้นใยสั้นของ PALF

หลังจากเลือกส่วนของเส้นใยที่แข็งแรงที่สุดจากผลการทดสอบความทนต่อแรงดึงแล้ว เส้นใย PALF ที่มีความยาวประมาณ 20 cm จะถูกตัดด้วยกรรไกรให้มีความยาวอยู่ในช่วง 1-3 mm (รูปที่ ๓.๔) และเก็บในภาชนะปิดป้องกันไม่ให้อากาศเข้า



รูปที่ ๓.๔ เส้นใย PALF ที่ถูกตัดด้วยกรรไกรให้มีความยาว 1-3 mm

#### ๓.๔.๒ การคอมพาวด์ไบโอคอมโพสิตด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder)

เพื่อลดการเกิดโพรงอากาศ (Voids) ทั้งเส้นใยจากใบสับปะรด และ PLA จะถูกอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น จากนั้นจึงทำการผสมเส้นใยและ PLA ให้มีปริมาณเส้นใย 10, 20, 30, 40, and 50 wt% ก่อนที่จะนำส่วนผสมดังกล่าวเข้าผสมในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Lab tech engineering) และทำให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Brabender co-rotating twin-screw extruder) ดังรูปที่ ๓.๕ โดยใช้อุณหภูมิในกระบวนการคงที่ที่ 110 °C ทั้งหมด และเมื่อไบโอคอมโพสิตออกมาจากเครื่องจะถูกตัดเป็นเม็ดเล็ก (Pellet) ด้วยใบมีด (Pelletizer)



(ก)

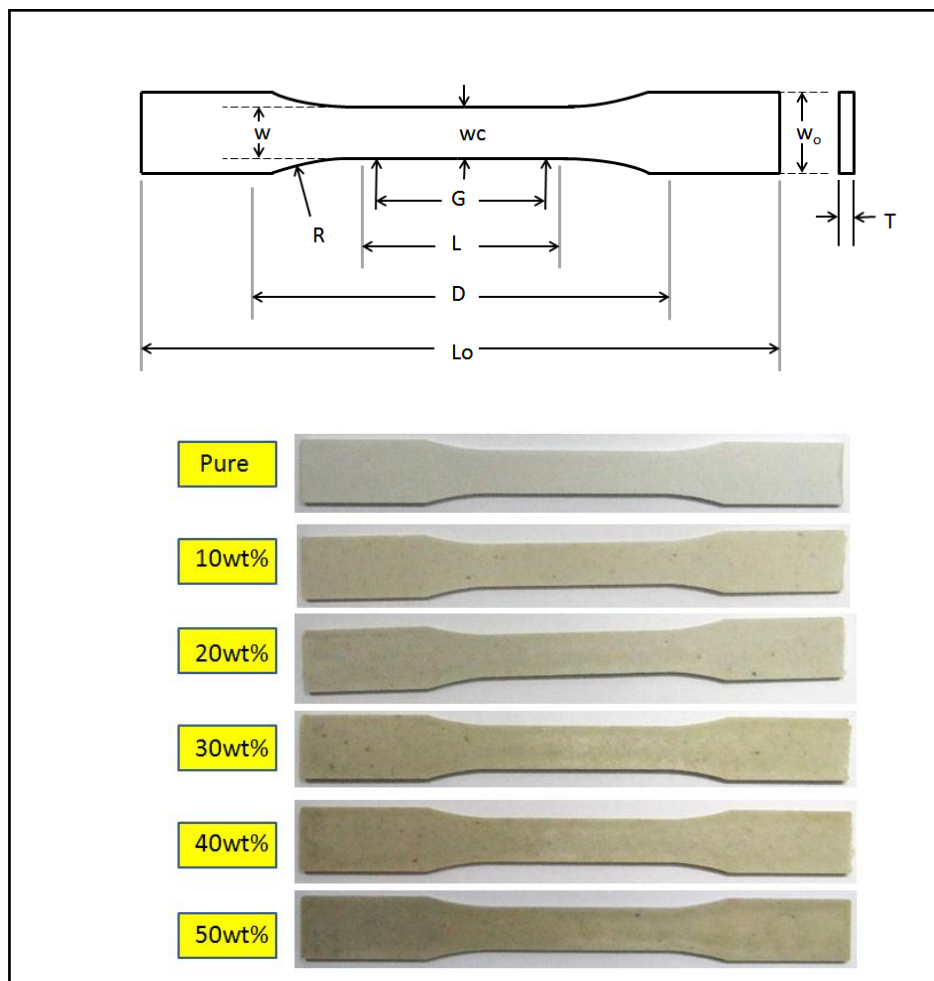


(ข)

รูปที่ ๓.๕ (ก) เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (ข) เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

#### ๓.๔.๓ การเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลสำหรับ PLA และไบโอคอมโพสิต ใช้วิธีขึ้นรูปแบบฉีด และใช้แม่พิมพ์สำหรับทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดึง ประเภทที่ 1 (The type I tensile specimens) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (รูปที่ ๓.๖ และตาราง ๓.๒) โดยก่อนการขึ้นรูปจะอบเม็ดตัวอย่างที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นนำเข้าสู่เครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (ARBURG ALLROUNDER model 370U) ดังรูปที่ ๓.๗ ตั้งอุณหภูมิที่ (Nozzle) และโซนอื่นๆ อีกสามโซนไว้ที่ 160 °C ตั้งอุณหภูมิที่ผิวหน้าของแม่พิมพ์ไว้ที่ 50 °C และเวลาในการทำให้เย็นตัว (Cooling time) เท่ากับ 25 วินาที ความดันในการดันเข้าแม่พิมพ์ (Filling pressure) และความดันที่ไว้ (Holding pressure) อยู่ที่ 130 และ 70 MPa ตามลำดับ



รูปที่ ๓.๖ การเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลสำหรับ PLA และไบโอคอมโพสิตตามมาตรฐาน

ASTM D638

ตารางที่ ๓.๒ ขนาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638

Dimension	Value, mm (in)
Thickness <7mm (0.28in), T	1.00 ± 0.4 (0.13 ± 0.02)
Width of narrow section, W	13 (0.5)
Length of narrow section, L	57 (2.25)
Width overall, WO	19 (0.75)
Length overall, LO	165 (6.5)
Gauge length, G	50 (2.00)
Distance between grips, D	115 (4.5)
Radius of fillet, R	76 (3.00)



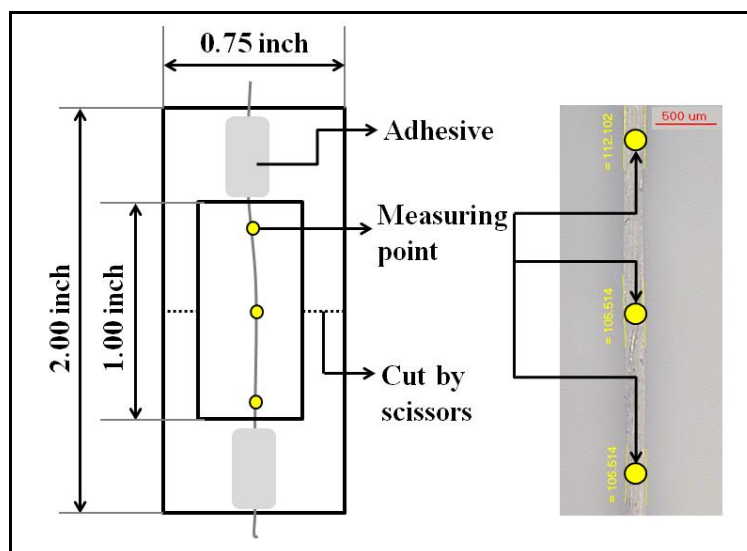
รูปที่ ๓.๗ เครื่องขึ้นรูปแบบฉีด ARBURG ALLROUNDER model 370U

### ๓.๕ การเตรียมไบโอคอมโพลีต PALF/MA/PLA

ไบโอคอมโพลีต PALF/PLA ที่มีสมบัติที่ดีที่สุดจะถูกเลือกมาปรับปรุงแรงยึดเกาะระหว่างเฟสด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) การเตรียมไบโอคอมโพลีต PALF/MA/PLA ทำได้โดยผสม MA (10wt%) เข้ากับ PLA โดยเครื่องผสมความเร็วรอบสูง (High speed mixer) จนเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วจึงนำเข้าเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งซึ่งตั้งอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้งเท่ากับ 140 °C เป็นเวลา 5 นาที จึงใส่เส้นใยสับปะรดที่ตัดให้ได้ขนาด 1–3 mm และอบแล้วที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ลงในเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เมื่อผสมเข้ากันดีก็ผ่านของผสมไปยังเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 110 °C ในทุกโซน และได้เม็ดไบโอคอมโพลีต PALF/MA/PLA ซึ่งจะนำไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเก็บในภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้น

### ๓.๖ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย PALF

แยกเส้นใยสับปะรดที่สกัดได้จากส่วนปลายใบ กลางใบ และโคนใบ ออกเป็นเส้นใยเดี่ยว จากนั้นติดเส้นใยลงบนการ์ด (Mounting cards) โดยมีความยาวของระยะทดสอบ (Gauge length) เท่ากับ 1 นิ้ว จากนั้นถ่ายภาพตัวอย่างเส้นใยผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า (รูปที่ ๓.๘) และบันทึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และคำนวณหาค่าเฉลี่ย



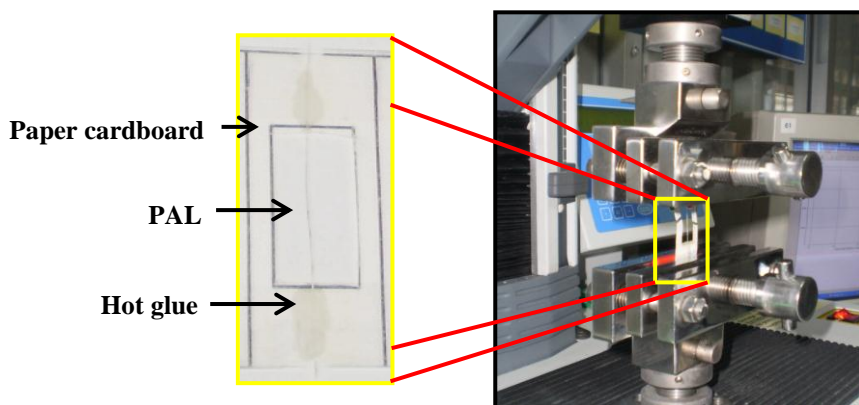
รูปที่ ๓.๘ การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย

### ๓.๗ การทดสอบความทนต่อแรงดึง

#### ๓.๗.๑ การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใย PALF

การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใย PALF ทำตามมาตรฐาน ASTM D3822-07 ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยเดี่ยว การทดสอบทำโดยแยกเส้นใยสับปะรดออกเป็นเส้นใยเดี่ยว จากนั้นติดเส้นใยลงบนการ์ดโดยใช้กาวร้อน ให้มีความยาวของระยะ

ทดสอบเท่ากับ 1 นิ้ว (รูปที่ ๓.๙) ก่อนทำการทดสอบต้องตรวจสอบความเรียบร้อยของการติดตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 200 เท่า จากนั้นนำตัวอย่างเส้นใยที่ติดบนการ์ดติดเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึงอเนกประสงค์ (Ametek LLOYD Instrument Ltd., tensile testing machine, model LRX Plus) จากนั้นตั้งจนกระทั่งเส้นใยขาดด้วยอัตราเร็ว (Cross head speed) เท่ากับ 0.5 mm/min ส่วนวัดแรง (Load cell) ขนาด 5N ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 20 การทดสอบ และคำนวณค่าเฉลี่ยของค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)

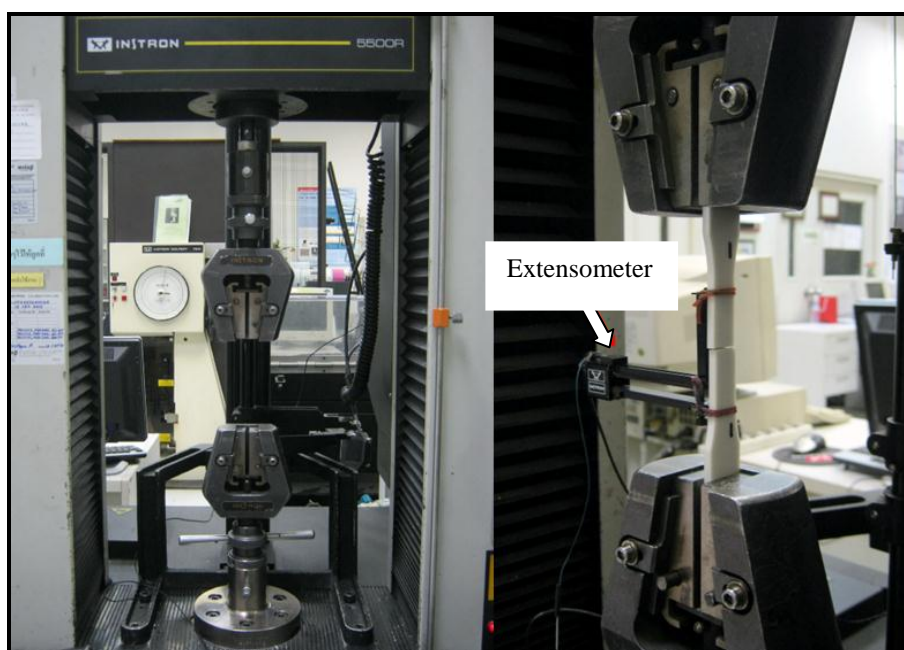


รูปที่ ๓.๙ การทดสอบความทนต่อแรงดึงของเส้นใย PALF

๓.๗.๒ การทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PLA และไบโอคอมโพสิต PALF/PLA และ PALF/MA/PLA

การทดสอบความทนต่อแรงดึงของ PLA และไบโอคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารเชื่อมประสาน (PALF/MA/PLA และ PALF/PLA ตามลำดับ) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง 5500R Instron tensile testing machine (รูปที่ ๓.๑๐) โดยมีส่วนวัดแรง 10kN อัตราเร็วในการดึง 50 mm/min ระยะทดสอบ 50 mm และใช้ Extensometer ในการวัด

ระยะยืดของตัวอย่าง การทดสอบทำที่อุณหภูมิ  $23 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  และระดับความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5 \%$  ซึ่งเป็นสถานะเดียวกันกับสถานะที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างไว้ 40 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ แต่ละตัวอย่างทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 5 ครั้ง



รูปที่ ๓.๑๐ เครื่องทดสอบแรงดึง Instron tensile testing machine, model 5500R.

### ๓.๘ สมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)

ศึกษาจุดหลอมเหลวและความเป็นผลึกของ PLA โดยใช้ TA Instruments 2920 modulated differential scanning calorimeter (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างประมาณ 10 mg ใส่ในแพนอะลูมิเนียมมีฝาปิด ที่ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง  $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราเร็วในการให้ความร้อนคงที่  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และใช้แพนอะลูมิเนียม

ฝาปิดขนาดเดียวกับที่ใส่ตัวอย่างเป็นสารอ้างอิง การศึกษาจุดหลอมเหลวของ PLA มีความสำคัญต่อการเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปตัวอย่างไบโอคอมโพสิต

### ๓.๙ สมบัติการทนต่อความร้อนโดยเทคนิค Thermo gravimetric analysis (TGA)

#### ๓.๙.๑ การทดสอบการทนต่อความร้อนของ PLA และ PALF

ทดสอบการทนต่อความร้อนของ PLA และ PALF โดยใช้เครื่อง TA 2950 TGA ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 600 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C /min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

#### ๓.๙.๒ การทดสอบการทนต่อความร้อนของไบโอคอมโพสิต PALF/PLA

ทดสอบการทนต่อความร้อนของ ไบโอคอมโพสิต PALF/PLA โดยใช้เครื่อง Mettler Toledo TGA/SDTA851<sup>c</sup> ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 600 °C อัตราการให้ความร้อน 10 °C /min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

### ๓.๑๐ สัณฐานวิทยาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวของเส้นใย พื้นผิวรอยแตกของเส้นใย และพื้นผิวรอยแตกของไบโอคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JSM-5410LV, Jeol Co., Ltd. กำลังขยาย 200 และ 3,500 เท่า (รูปที่ ๓.๑๑)





รูปที่ ๓.๑๑ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JSM-5410LV, Jeol Co., Ltd.

## บทที่ ๔

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### ๔.๑ การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด

มีหลายวิธีที่ใช้ในการสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด เช่น การคัดแยกด้วยมือ การแช่น้ำให้เปื่อยยุ่ย การใช้สารเคมี และการใช้เครื่องปอก เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบสถานะในการสกัดเส้นใย 3 วิธี คือ การแช่น้ำ การสกัดด้วยเบสแก่ และการใช้เครื่องปอก และจะเลือกวิธีที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด และใช้ต้นทุนต่ำที่สุดเพื่อสกัดเส้นใยจากใบสับปะรดและนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงแก่พอลิเมอร์ต่อไป

##### ๔.๑.๑ การแช่น้ำ (Water retting)

แช่ใบสับปะรดสดในน้ำจืดระดับน้ำท่วมใบแล้วปิดฝาภาชนะเป็นเวลา 14 วัน แล้วจึงใช้มีดดึงเส้นใยออกมาที่ละเส้น พบว่าวิธีนี้ใช้เวลายาวนาน และทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมาก เส้นใยที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อน หลังจากนำไปอบให้แห้งเส้นใยเกาะกันเป็นก้อน ดังรูปที่ ๔.๑

##### ๔.๑.๒ การสกัดด้วยวิธีทางเคมี (Chemical extraction)

การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.25, 0.5, 1.0 และ 2.0 wt% พบว่าการแยกเส้นใยหลังการแช่ในเบสนั้นทำได้ยาก เส้นใยมักขาดและเปื่อยเป็นเส้นสั้นๆ เนื่องจากถูกทำลายด้วยความร้อน และเบส อีกทั้งสารละลาย NaOH ที่ใช้ก็เป็นสารเคมีที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย อย่างไรก็ตามเส้นใยที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อนมาก และไม่เกาะกันเป็นกลุ่ม ดังรูปที่ ๔.๒

### ๔.๑.๓ การสกัดโดยใช้เครื่องแยกเส้นใย (Mechanical extraction)

การสกัดเส้นใยด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าสองวิธีข้างต้นมาก โดยได้เส้นใยแห้งคิดเป็นร้อยละ 2.2 ของน้ำหนักใบสับประรดสด ใช้เวลาน้อย และไม่มีการใช้สารเคมีที่เป็นปัญหาแก่สิ่งแวดล้อม เส้นใยที่ได้มีสีครีม และไม่เกาะกันเป็นก้อนเมื่อแช่ในน้ำ แต่จะรวมกลุ่มกันเมื่อแห้ง ดังรูปที่ ๔.๓ ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการสกัดเส้นใยจากใบสับประรดสดที่จะใช้ในงานวิจัยนี้ต่อไป



รูปที่ ๔.๑ เส้นใยสับประรดที่สกัดด้วยวิธีแช่น้ำ



รูปที่ ๔.๒ เส้นใยสับประรดที่สกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ ๔.๓ เส้นใยสับประรดที่สกัดโดยใช้เครื่องปอก

Kengkhetkit and Amornsakchai (Kengkhetkit & Amornsakchai, 2012) ได้ทดลองแยกเส้นใยจากใบสับปะรดเช่นกัน และพบว่าวิธีแช่น้ำนั้นได้ผลผลิตเส้นใยต่ำเมื่อเทียบกับน้ำหนักใบสับปะรดสด และยากที่จะพัฒนาเป็นสเกลอุตสาหกรรมได้ และวิธีที่ให้ผลดีและพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมได้คือวิธีใช้เครื่องบด (Mechanical milling)

## ๔.๒ การวิเคราะห์สมบัติของเส้นใยสับปะรด (PALF)

### ๔.๒.๑ ขนาดของเส้นใย

จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพบว่าเส้นใยที่สกัดจากตำแหน่งโคนใบ กลางใบ และปลายใบ ให้ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ ๔.๑ ชางแสดงให้เห็นว่าขนาดของเส้นใยที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการตีพิมพ์ก่อนหน้านี้ (Mohanthy et al., 2000 และ George et al., 1998)

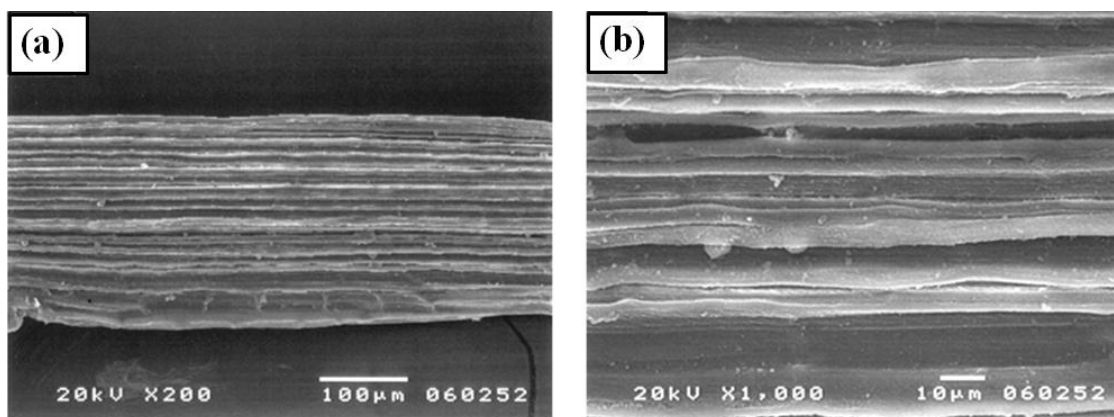
ตาราง ๔.๑ ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่ตำแหน่งโคนใบ กลางใบและปลายใบ

เส้นใยที่สกัดจาก	ค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย (mm)
ปลายใบ	0.197±0.043
กลางใบ	0.199±0.050
โคนใบ	0.219±0.052

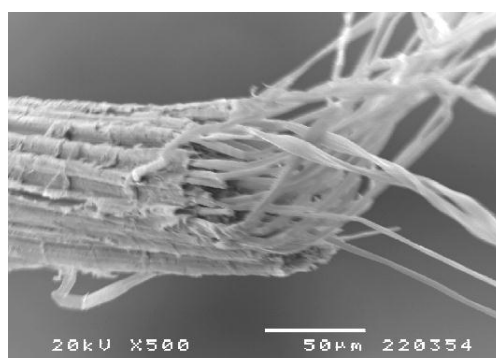
### ๔.๒.๒ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใย ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

แสดงดังรูปที่ 4.5-4.6



รูปที่ ๔.๕ ภาพถ่ายบริเวณพื้นผิวของเส้นใยที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 1000 เท่า

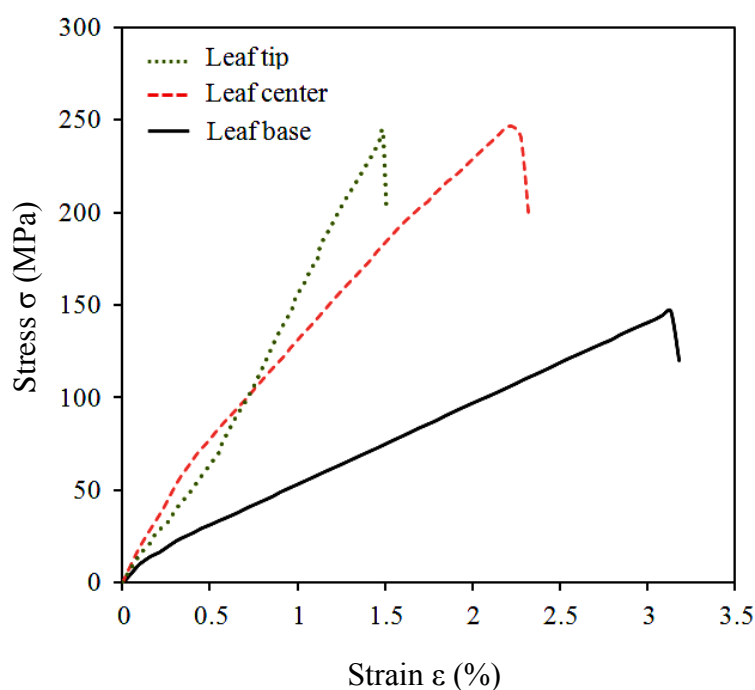


รูปที่ ๔.๖ ภาพถ่ายบริเวณพื้นผิวรอยแตกของเส้นใยที่กำลังขยาย 500 เท่า

รูปที่ ๔.๕ แสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นผิวของเส้นใยซึ่งมีลักษณะค่อนข้างขรุขระ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการยึดเกาะทางกลกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ (Pickering et al., 2007) ส่วนรูปที่ ๔.๖ แสดงพื้นผิวที่แตกหัก (Fractured surface) ของเส้นใยซึ่งพบว่ามีการแตกออกเป็นกลุ่มเส้นใยเล็กๆ แตกออกมาบางส่วน (Partially defibrillated fiber bundles) กลุ่มเส้นใยเหล่านั้นแตกแบบพุ่งออกมาจากรอยแตก ในขณะที่ยังถูกห่อหุ้มด้วยลิกนินและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานตามธรรมชาติ (Kengkhetkit & Amornsakchai, 2012)

### ๔.๒.๓ สมบัติความทนต่อแรงดึง

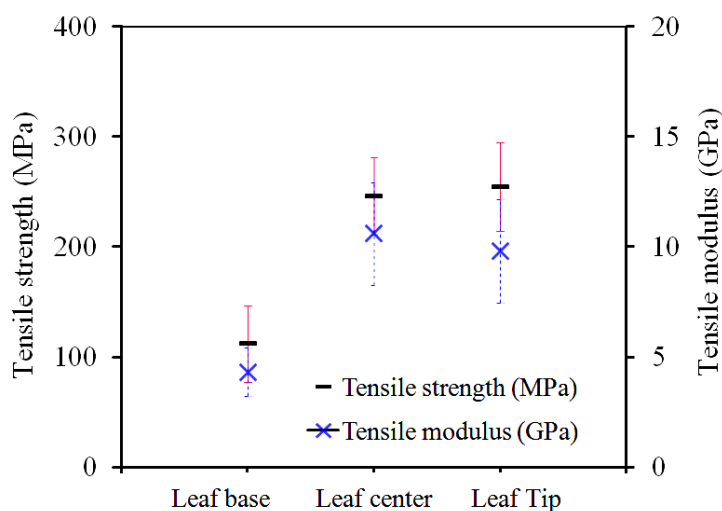
การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงของเส้นใยให้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นและความเครียดแสดงในรูปที่ ๔.๗



รูปที่ ๔.๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นและความเครียดของเส้นใยจากใบสับปะรดที่สกัดจากปลายใบ กลางใบและโคนใบ

จากรูปพบว่าค่าแรงเค้นสูงสุดของเส้นใยที่สกัดจากปลายใบมีค่าเท่ากับ 244 MPa และค่าระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 1.5% ส่วนเส้นใยที่สกัดจากกลางใบให้ค่าแรงเค้นสูงสุดและค่าระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 246 MPa และ 2.3% ตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยที่สกัดจากโคนใบให้ค่าแรงเค้นสูงสุดต่ำที่สุดเท่ากับ 146 MPa แต่ให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูงที่สุดเท่ากับ 3.1% ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากใบสับปะรดมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของใบที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัด

รูปที่ ๔.๘ แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าเฉลี่ยของค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของเส้นใยจากใบสับปะรดที่สกัดจากปลายใบ กลางใบและโคนใบ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เส้นใยที่สกัดจากปลายใบและกลางใบให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่าค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดูลัสแรงดึงของเส้นใยที่สกัดจากโคนใบ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปเส้นใยที่สกัดจากกลางใบจึงถูกใช้เป็นสารเสริมแรงในการเตรียมไบโอคอมโพสิตต่อไป



รูปที่ ๔.๘ ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) ของเส้นใยจากใบสับปะรดที่สกัดจากปลายใบ กลางใบและโคนใบ

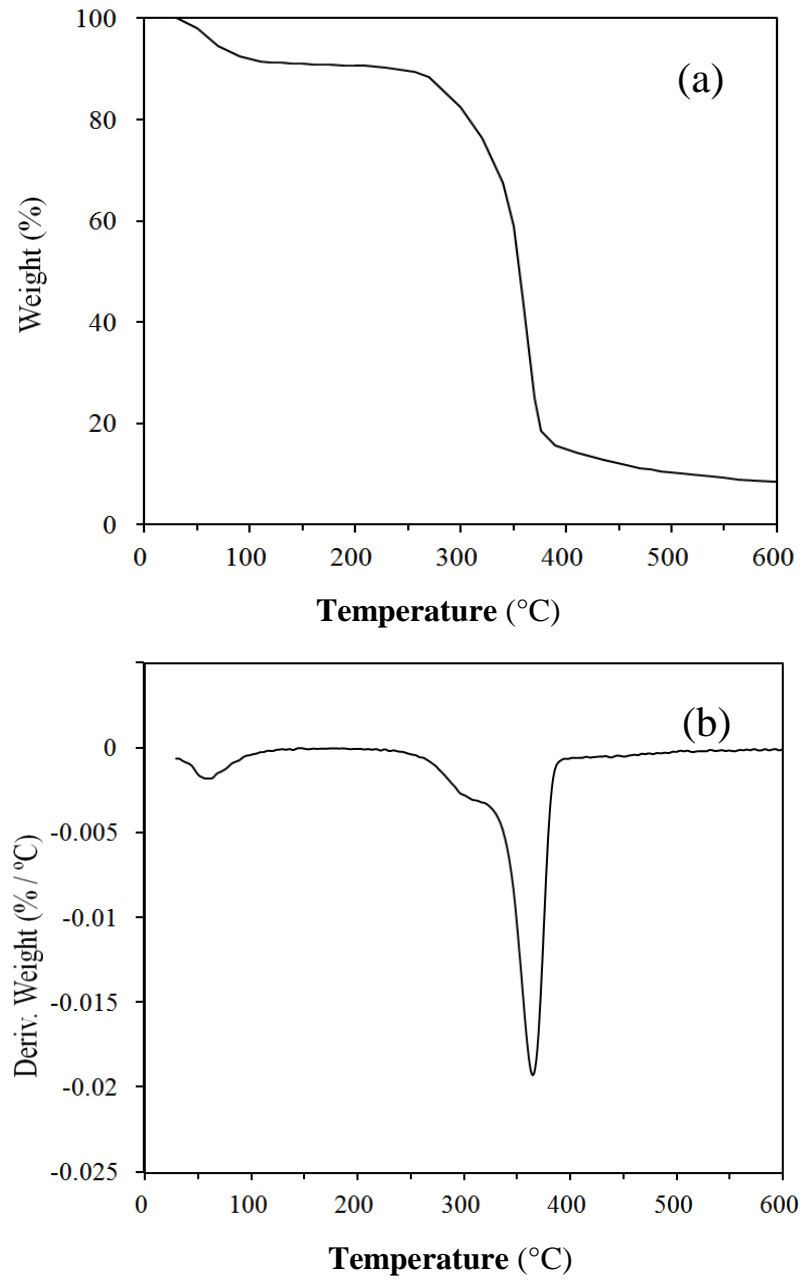
จากรูปพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของเส้นใยจากใบสับปะรดที่สกัดจากปลายใบ มีค่าเท่ากับ 244 MPa และ 9.8 GPa ตามลำดับ และมีค่าระยะยัด ณ จุดขาดค่อนข้างต่ำคือ 1.5 % ส่วนความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของเส้นใยจากใบสับปะรดที่สกัดจากกลางใบมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เท่ากับ 246 MPa และ 10.6 GPa ตามลำดับ และมีค่าระยะยัด ณ จุดขาดสูงขึ้นคือ 2.3 % และโคนใบมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงต่ำสุดคือเท่ากับ 146 MPa และ 4.3 GPa

ตามลำดับ และมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 3.1 % ซึ่งสมบัติเชิงกลของเส้นใยสับปะรดที่สกัดได้ในงานวิจัยนี้มีสมบัติเชิงกลดีกว่าเส้นใยจากใบสับปะรดที่รายงานโดย Arib และคณะ (Arib et al, 2006) ซึ่งมีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสแรง และค่าระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 126 MPa 4 GPa และ 3.1 % ตามลำดับ

#### ๔.๒.๔ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน

พฤติกรรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเส้นใยที่สกัดจากใบสับปะรดแสดงในรูปที่ ๔.๙ พบว่าการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 30-100 °C เกิดจากการระเหยของความชื้นที่เส้นใยดูดซับไว้ การสูญเสียน้ำหนักเริ่มเกิดขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิ 250-330 °C เนื่องจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (Kim et al.,2006 and Hatakeyema et al., 2005) ส่วนสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่สารประกอบจำพวกเซลลูโลสเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 330 °C และพวกที่มิใช่เซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 330 °C สลายตัวด้วยอัตราเร็วมากที่สุดที่ 362 °C จนกระทั่งสลายตัวทั้งหมดที่อุณหภูมิ 385 °C (Kim et al.,2006; Hatakeyema et al., 2005) และมีกากเหลือประมาณ 10%



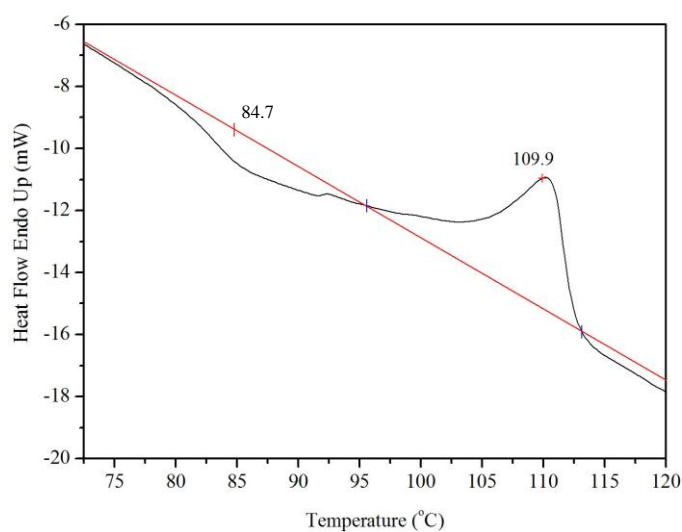


รูปที่ ๔.๙ พฤติกรรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของเส้นใยที่สกัดจากใบสับปะรด

### ๔.๓ การวิเคราะห์สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

#### ๔.๓.๑ สมบัติทางความร้อน

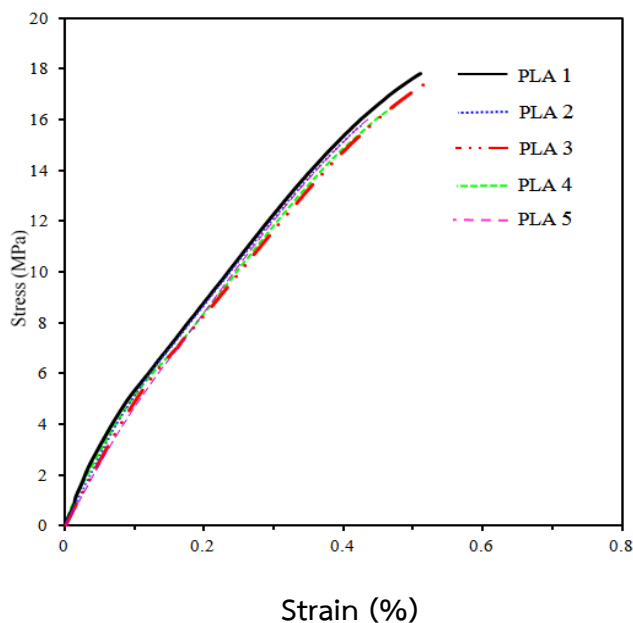
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของ PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก มีค่าเท่ากับ 85 และ 110 °C ตามลำดับ (แสดงในรูปที่ ๔.๑๐) ซึ่งอุณหภูมิหลอมเหลวที่ได้จะถูกนำไปใช้อ้างอิงในการเลือกอุณหภูมิสำหรับขึ้นรูปคอมโพสิตโดยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนคู่ (Co-rotating twin screw extruder) ดังนั้นในการขึ้นรูปคอมโพสิตในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 120 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ PLA แต่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของเส้นใยที่สกัดจากใบสับปะรด



รูปที่ ๔.๑๐ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิหลอมเหลวของ PLA

#### ๔.๓.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นและความเครียดของ PLA ซึ่งวัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 แสดงดังรูป ๔.๑๑ จากการทดลอง 5 ครั้ง พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน แสดงให้เห็นถึงความเที่ยงของการทดลอง ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงและค่าเฉลี่ยของมอดุลัสแรงดึงของ PLA เท่ากับ 8.5 MPa และ 2.7 GPa ตามลำดับ ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาดเท่ากับ 0.45% แสดงว่า PLA เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งแต่เปราะ และมีกลไกการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture)

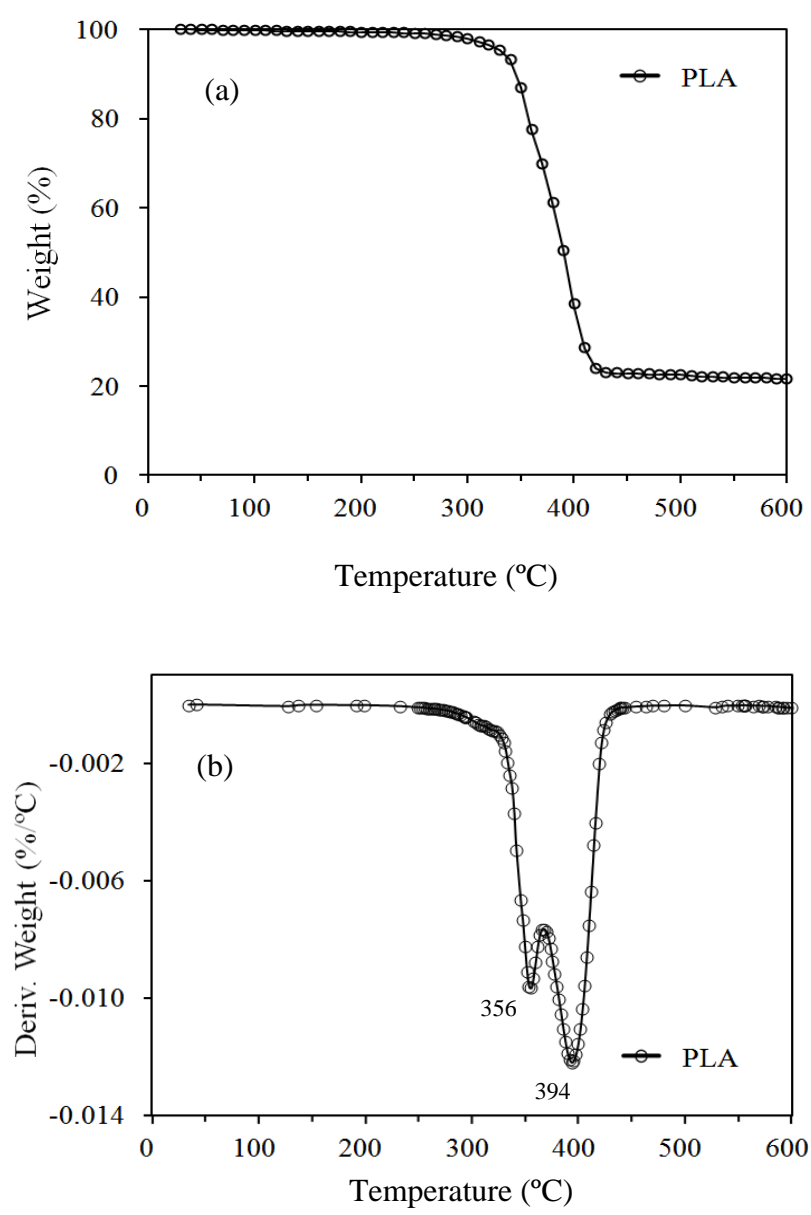


รูปที่ ๔.๑๑ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเค้นและความเครียดของ PLA

#### ๔.๓.๓ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน

พฤติกรรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของ PLA แสดงในรูปที่ ๔.๑๒ การระเหยของความชื้นเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100 °C ส่วนการสลายตัวของ PLA เริ่มขึ้นที่ประมาณ 250 °C การสลายตัวที่ 356 °C เกิดจากการสลายตัวของสารเติมแต่งประเภทช่วยในการทนต่อความร้อน (Heat

resistant additive) ใน PLA การสลายตัวของ PLA เกิดขึ้นด้วยอัตราเร็วสูงสุดที่อุณหภูมิ 394 °C ดังนั้นการขึ้นรูปคอมโพสิตโดยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Co-rotating twin screw extruder) ดังนั้นในการขึ้นรูปคอมโพสิตที่อุณหภูมิ 120 °C นอกจากเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ PLA แล้ว ยังเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายของทั้ง PLA และเส้นใยที่สกัดจากใบ สับปะรดด้วย จึงนับว่าเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูป



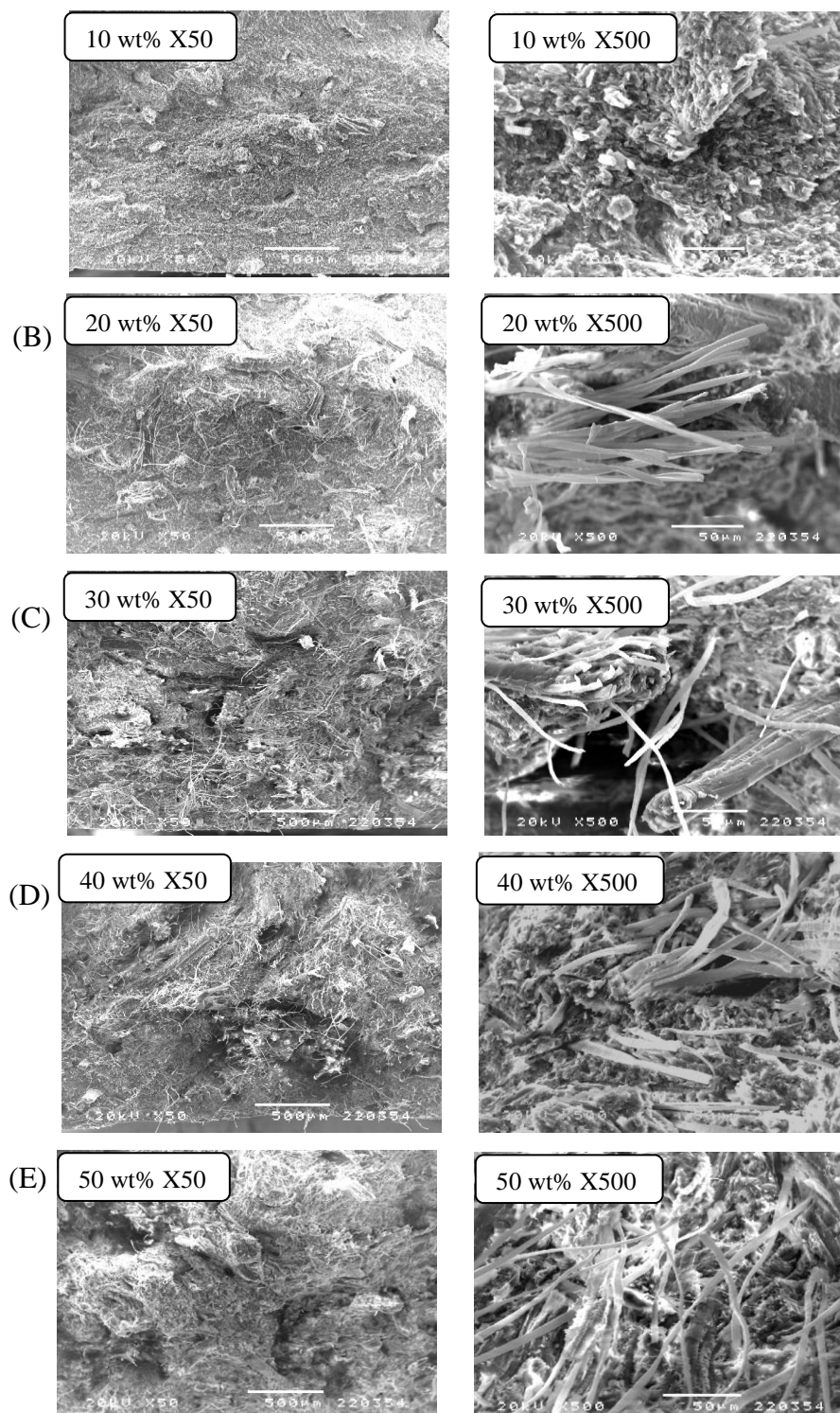
รูปที่ ๔.๑๒ พฤติกรรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของ PLA

## ๔.๔ การวิเคราะห์สมบัติของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต

### ๔.๔.๑ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตก

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต (รูปที่ ๔.๑๓) แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของเส้นใยใน PLA เมตริกซ์ โดยลักษณะการแตกเป็นแบบ Fiber pull-out รูปที่ ๔.๑๓ (A) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 10 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ภาพถ่ายแสดงให้เห็นการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของเส้นใยใน PLA เมตริกซ์ รอยแตกค่อนข้างเรียบแต่มีรูพรุนขนาดเล็กปรากฏให้เห็นบ้าง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัดสมบัติแรงดึงที่พบว่า การเติมเส้นใย 10% ไม่ทำให้สมบัติของไบโอบีโคมโพสิตที่ได้เปลี่ยนแปลงจากสมบัติเดิมของ PLA มากนัก

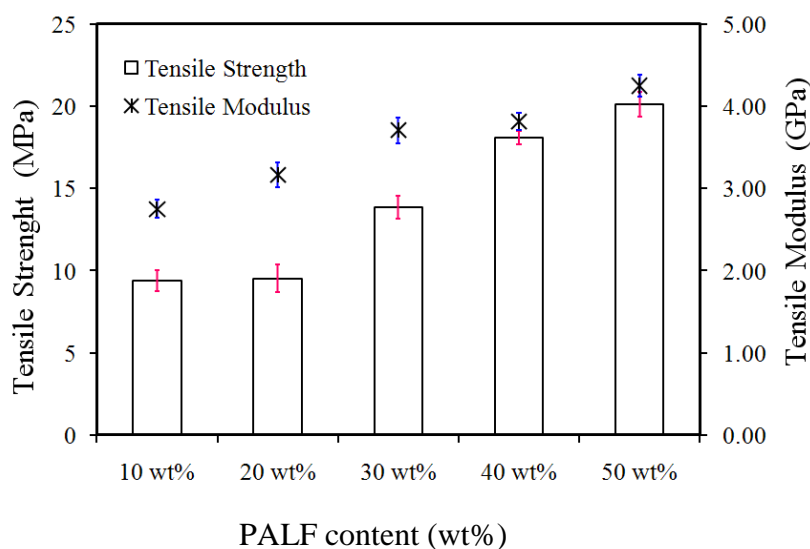
รูปที่ ๔.๑๓(B) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 20 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ซึ่งแสดงความขรุขระมากขึ้นเมื่อเทียบกับ 10 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต แต่ยังมีรูพรุนขนาดเล็กปรากฏให้เห็นบ้างเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดสมบัติแรงดึงที่พบว่าความแข็งแรงดึงมีค่าไม่ต่างจาก 10 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต แต่ค่ามอดุลัสแรงดึงมีค่าสูงกว่ามาก ส่วนรูปที่ ๔.๑๓(C) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 30 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต จากรูปพบว่าเส้นใยยังคงกระจายตัวได้ดีใน PLA เมตริกซ์ แต่พื้นผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาด สูงกว่า 10 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต แม้ว่าค่ามอดุลัสแรงดึงจะใกล้เคียงกัน รูปที่ ๔.๑๓(D)-(E) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 40 wt% และ 50 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ตามลำดับ จากรูปพบว่า การกระจายตัวของเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่พบการรวมเป็นกลุ่มของเส้นใยในบางจุด เนื่องจากปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามเส้นใยใน 40 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต กระจายตัวได้ดีกว่า เนื่องจากมีปริมาณน้อยกว่า จึงส่งผลให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของไบโอบีโคมโพสิตนี้มากกว่าค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ 50 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ถึงแม้ว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงจะน้อยกว่าก็ตาม



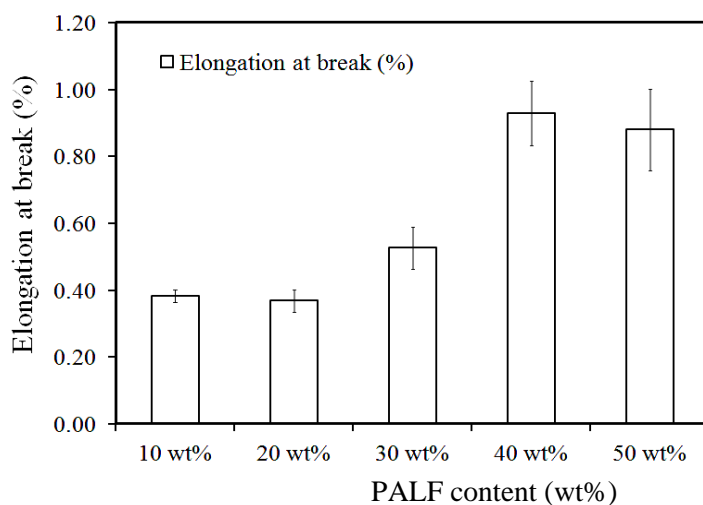
รูปที่ ๔.๑๓ ภาพถ่าย SEM แสดงผิวหน้ารอยแตกของ PALF/PLA ไบโอบีโอมโพสิต ที่มีปริมาณเส้นใย 10 wt% (A), 20 wt% (B), 30 wt% (C), 40 wt% (D), และ 50 wt% (E) ที่กำลังขยาย 50 เท่า (ซ้าย) และ 500 เท่า (ขวา)

#### ๔.๔.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง

ความทนต่อแรงดึงและมอดุลัสแรงดึงของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต แสดงในรูปที่ ๔.๑๔ พบว่าทั้งสองค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณของเส้นใยที่เติมในไบโอบีโคมโพสิตเพิ่มขึ้น รูปที่ ๔.๑๕ แสดงค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ซึ่งเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อปริมาณของเส้นใยที่เติมในไบโอบีโคมโพสิตเพิ่มขึ้นจาก 10-40% แสดงให้เห็นว่า เราสามารถปรับปรุง PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์แข็งเปราะให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นได้โดยการเติมเส้นใย PALF อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นถึง 50% ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิตกลับลดลงเนื่องจากปริมาณเส้นใยที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มของเส้นใยและมีการกระจายตัวแย่งลง ส่งผลให้การยึดติดระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์แย่งไปด้วย (Oksman et al., 2002, 2003)



รูปที่ ๔.๑๔ ความทนต่อแรงดึงและมอดุลัสแรงดึงของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต



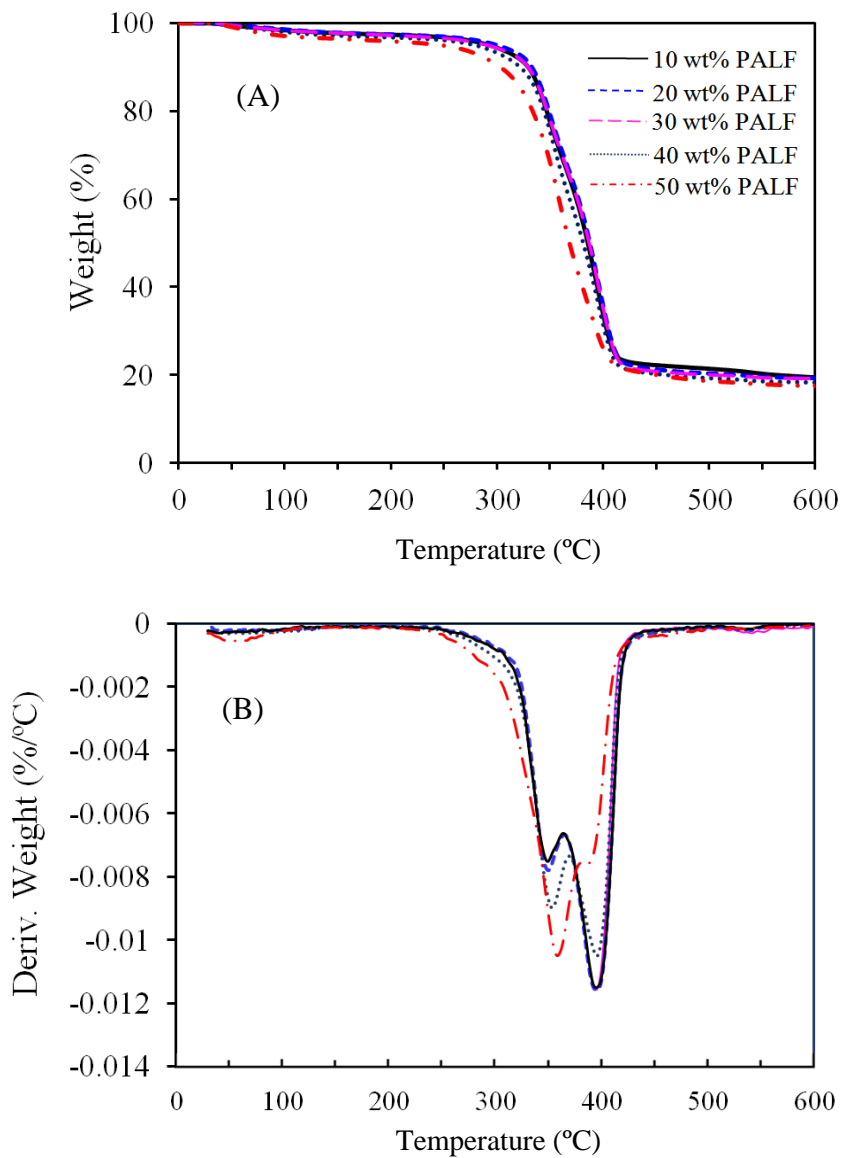
รูปที่ ๔.๑๕ ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์

#### ๔.๔.๓ การสลายตัวเนื่องจากความร้อน

พฤติกรรมของการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่มีปริมาณเส้นใยต่างกันมีลักษณะคล้ายกันและแสดงในรูป ๔.๑๖ ซึ่งพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 30-100 °C เป็นการระเหยของน้ำที่อยู่ในตัวอย่างในรูปของความชื้น การเสื่อมสลายของไบโอบีโคมโพลีเมอร์แบ่งได้เป็นสองช่วง ช่วงแรกที่มีอุณหภูมิประมาณ 225-377 °C เกิดเนื่องจากการเสื่อมสลายของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบในเส้นใย (Kim et al., 2006 and Hatakeyema et al., 2005) โดยมีอัตราการเสื่อมสลายสูงที่สุดที่ 350 °C การสลายตัวในช่วงที่สองที่มีอุณหภูมิประมาณ 377-415 °C เกิดเนื่องจากการเสื่อมสลายแบบดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ของ PLA (Kim et al., 2008) โดยมีอัตราการเสื่อมสลายสูงที่สุดที่ 396 °C จากรูปจะเห็นว่าปริมาณความชื้นที่ระเหยออกจากตัวอย่างไบโอบีโคมโพลีเมอร์มีปริมาณต่างกันและแปรผันโดยตรงกับปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป นอกจากนี้ยังพบว่า การสลายตัวของเส้นใยในคอมโพลีเมอร์จะเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณเส้นใยไม่มีผลต่อการเสื่อมสลายของ PLA ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ ที่



เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 225 °C และมีศักยภาพในการนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบฉีด (Injection molding) ที่อุณหภูมิ 120 °C ได้



รูปที่ ๔.๑๖ กราฟ TGA (A) และ DTG (B) เทอร์โมแกรมของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต

#### ๔.๕ การวิเคราะห์สมบัติของ PALF/MA/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์

เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ 40 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ ที่จะใช้เป็นตัวแทนของไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้ ไปทดลองขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีดซึ่งเป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่ใช้กับชิ้นงานพลาสติกทั่วไป งานวิจัยนี้จะใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) เป็นสารคู่ควบ เพื่อเชื่อมระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิเมอร์เพื่อให้ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้น ระยะห่างระหว่างเฟสน้อยลง

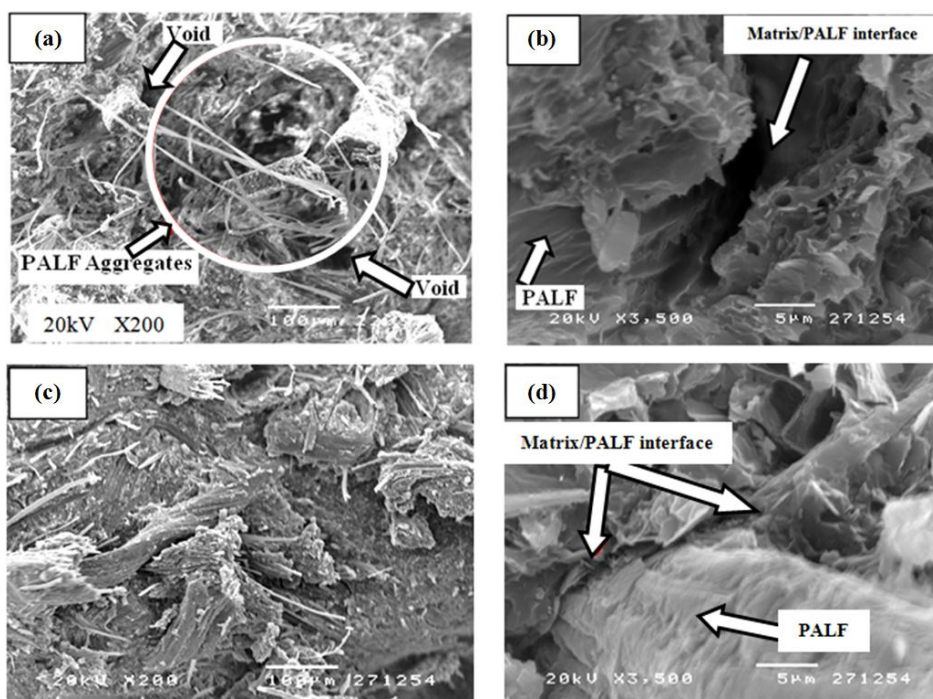
##### ๔.๕.๑ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตก

รูปที่ ๔.๑๗(A) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 40 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของเส้นใยไม่สม่ำเสมอ เส้นใยมีการเกาะกลุ่ม (ในวงกลม) และมีช่องว่างเกิดขึ้น (ลูกศร) ระยะห่างระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิเมอร์เมตริกซ์มาก (รูป ๔.๑๗(B)) จึงเป็นสาเหตุให้ไบโอบีโคมโพลีเมอร์มีค่ามอดูลัสแรงดึงต่ำ รูปที่ ๔.๑๗(C) แสดงพื้นผิวรอยแตกของ 40 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ MA ปริมาณ 10 wt% เมื่อเทียบกับน้ำหนักของ PLA จากรูปพบว่าเส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น การเกาะกลุ่มของเส้นใยลดลง และระยะห่างระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิเมอร์เมตริกซ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ ๔.๑๗(D)) แสดงถึงความเข้ากันได้ดีขึ้นระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติความทนต่อแรงดึงดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่เสนอไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Keener et al., 2004)

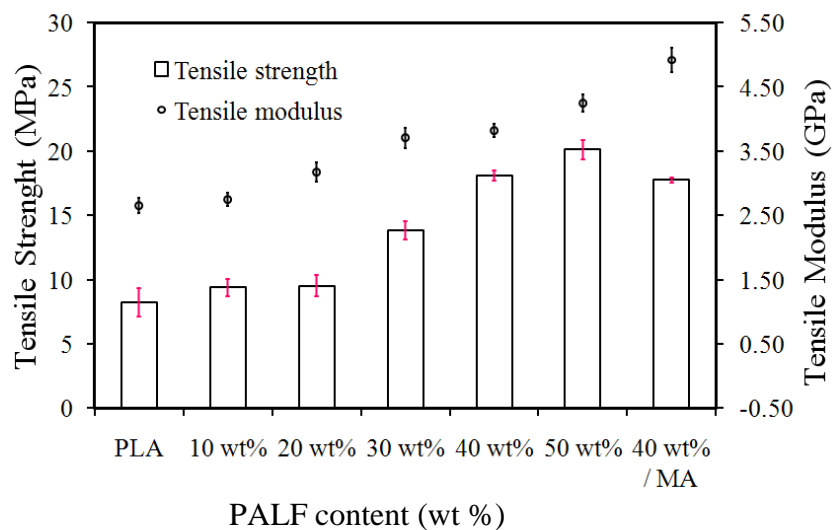
##### ๔.๕.๒ สมบัติความทนต่อแรงดึง

รูปที่ ๔.๑๘ แสดงค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของ 40 wt% PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ MA ปริมาณ 10 wt% ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับไบโอบีโคมโพลีเมอร์

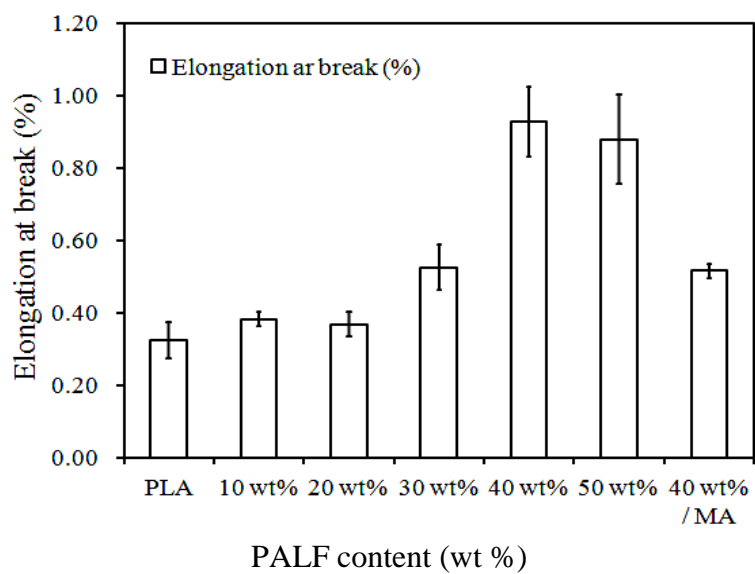
คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมสารคู่ควบ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าสารคู่ควบ MA ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PALF/PLA ไบโอบคอมโพสิตได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่ามอดูลัสแรงดึง เนื่องจาก MA จะเกิดปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิดกิ่งก้าน และการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล โดยหมู่คาร์บอกซิลในแอนไฮไดรด์ที่อยู่ใน PLA-g-MA ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใย (Keener et al., 2004) ซึ่งสอดคล้องกับ รูปที่ ๔.๑๙ ที่แสดงให้เห็นว่าค่าระยะยึด ผน จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบ MA มีค่าน้อยกว่าค่าระยะยึด ผน จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบคอมโพสิตสูตรเดียวกันที่ไม่เติมสารคู่ควบ MA



รูปที่ ๔.๑๗ พื้นผิวรอยแตกของ 40 wt% PALF/PLA ไบโอบคอมโพสิตที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ MA โดย (A) การกระจายตัวของเส้นใยในไบโอบคอมโพสิตที่ไม่เติมสารคู่ควบ (B) รอยต่อระหว่างเฟสที่กว้างในไบโอบคอมโพสิตที่ไม่เติมสารคู่ควบ (C) การกระจายตัวของเส้นใยในไบโอบคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบ และ (D) รอยต่อระหว่างเฟสที่แคบลงในไบโอบคอมโพสิตที่เติมสารคู่ควบ



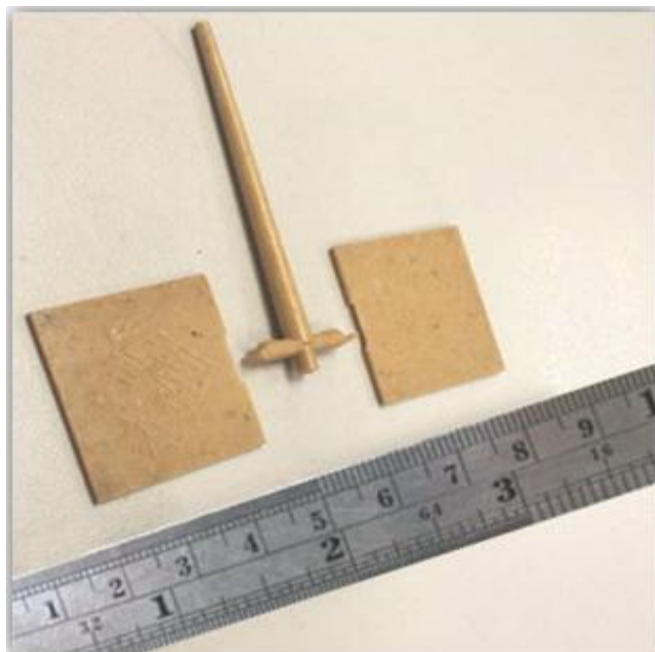
รูปที่ ๔.๑๘ ค่าความทนต่อแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ MA



รูปที่ ๔.๑๙ ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของ PALF/PLA ไบโอบีโคมโพลีเมอร์ที่เติมและไม่เติมสารคู่ควบ MA

#### ๔.๖ การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จาก PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิตด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด

เพื่อพิสูจน์ว่า PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด ซึ่งเป็นการขึ้นรูปที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมพลาสติก จึงได้มีการขึ้นรูป PALF/PLA ไบโอบีโคมโพสิตที่มีสมบัติที่ดีที่สุด คือไบโอบีโคมโพสิตที่เตรียมโดยการเติมเส้นใย 40wt% และปรับปรุงด้วยสารคู่ควบ MA ปริมาณ 10 wt% ใช้ชื่อว่า 40 wt% PALF/MA/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ให้เป็นผลิตภัณฑ์รูปแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความหนา 1.2 mm ด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีดโดยใช้เครื่อง ARBURG ALLROUNDER 370U machine กำหนดอุณหภูมิที่ Nozzle เป็น 140 °C อุณหภูมิที่ผิวหน้าแม่พิมพ์เท่ากับ 50 °C ระยะเวลาในการเย็นตัวลงเท่ากับ 15 วินาที Filling pressure และ Holding pressure เท่ากับ 120 และ 70 MPa ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสามารถขึ้นรูป 40 wt% PALF/MA/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ได้สำเร็จ และรูปชิ้นงานที่ได้แสดงในรูป ๔.๒๐



รูปที่ ๔.๒๐ ผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจาก 40 wt% PALF/MA/PLA ไบโอบีโคมโพสิต ที่ขึ้นรูปโดยเทคนิคการขึ้นรูปแบบฉีด

## บทที่ ๕

### บทสรุป

๕.๑ การสกัดเส้นใยจากใบสับปะรดด้วยเครื่องสกัดเส้นใย เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดเส้นใยจากใบสับปะรด เนื่องจากวิธีนี้ให้อัตราส่วนของผลผลิตเส้นใยต่อน้ำหนักใบสับปะรดสูงกว่าการสกัดวิธีการอื่น นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่ทำได้รวดเร็ว และไม่สร้างหรือปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อม

๕.๒ สมบัติเชิงกลของเส้นใยจากใบสับปะรดที่ได้จากส่วนต่างๆ ของใบแตกต่างกัน โดยเส้นใยที่ได้จากส่วนปลายใบและกลางใบมีค่าความทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสใกล้เคียงกัน แต่สูงกว่าเส้นใยที่ได้จากส่วนโคนใบอย่างมีนัยสำคัญ

๕.๓ การศึกษาสัญญาณวิทยาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยจากใบสับปะรดมีพื้นผิวที่ขรุขระ ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการยึดเกาะกับเมตริกซ์ของ PLA นอกจากนี้สัญญาณวิทยาวินิจฉัยรอยแตกของเส้นใยยืนยันว่ากลไกการแตกหักของเส้นใยเป็นการแตกแบบเปราะ (Brittle fracture)

๕.๔ สมบัติความทนต่อแรงดึง และค่ามอดุลัสของไบโอคอมโพสิต PALF/PLA เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใย PALF เพิ่มขึ้น แต่กลับพบว่าค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของไบโอคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไม่เกินร้อยละ 40 เท่านั้น และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มเป็นร้อยละ 50 ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของไบโอคอมโพสิตกลับลดลง และสัญญาณวิทยาวินิจฉัยรอยแตกของไบโอคอมโพสิตแสดงให้เห็นว่า กลไกการแตกหักของไบโอคอมโพสิตเป็นการแตกแบบเปราะ

๕.๕ สารช่วยประสานมาเลอิกแอนไฮไดรด์ช่วยให้การกระจายตัวของเส้นใยใน PLA ดีขึ้น และช่วยให้การจับกันเป็นกลุ่มของเส้นใยน้อยลง รวมทั้งระยะห่างระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิเมอร์น้อยลงด้วย นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงค่ามอดุลัสของไบโอคอมโพสิตให้เพิ่มมากขึ้นได้ แต่ทำให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดลดน้อยลง

๕.๖ ไบโอบีโอมพอลิเมอร์ PALF/MA/PLA ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด (Conventional injection molding machine) ซึ่งเป็นเครื่องขึ้นรูปที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมพลาสติก โดยสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ อุณหภูมิ 140 °C ความดันเข้าแม่พิมพ์ (Filling pressure) และความดันขณะอัดในแม่พิมพ์ (Holding pressure) เท่ากับ 130 และ 70 MPa ตามลำดับ ดังนั้นไบโอบีโอมพอลิเมอร์ PALF/MA/PLA ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการพัฒนาให้ใช้งานได้จริงด้วยเครื่องขึ้นรูปที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมพลาสติก

## เอกสารอ้างอิง

- Ajioka M., Enomoto K, Suzuki K, Yamaguchi A. (1995). *J. Polym. Environ.* 3, 225– 234.
- Arib, R.M.N., Sapuan, S.M., Ahmad, M.M.H.M., Paridah M.T., & Zaman H.M.D. (2006). Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene composites. *Materials and Design*, 27, 391–396.
- Auras R, Harte B, Selke S. (2004). An overview of polylactides as packaging materials. *Macromol Biosci*, 4, 835-64.
- Avella M., Bogoeva-Gaceva G., Bu\_zarovska A., Errico M.E., Gentile G., Grozdanov A.(2008). Poly(lactic acid)-based biocomposites reinforced with kenaf fibers. *J Appl Sci* , 108, 3542–51.
- Bax, B. and Mössig J. (2008). Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites. *Composites Science and Technology*, 68, 1601–1607.
- Bismarck, A., Mishra, S., & Lampke, T. (2005). In A. K. Mohanty, M. Misra, & L. T. Drzal (Eds.), *Natural fibres, biopolymers & biocomposites* (p. 37). CRC Press.
- Bledski AK, Gassan J. (1999). Composites reinforced with cellulose-based fibres. *Prog Polym Sci*, 24, 221-274.
- Bledzki, A.K., Jaszkwicz, A., and Scherzer, D. (2009). Mechanical properties of PLA composites with man-made cellulose and abaca fibres. *Composites: Part A*, 40, 404–412.



Chollakup, R. and Ujjin S. (2006). Ultrasonic technique for pineapple fiber chemical degumming treatment, Textile Technology Research Unit, KAPI, Kasetsart University, Thailand

Devi L.U., Bhagawan S.S., & Thomas S. Mechanical properties of pineapple leaf fibre-reinforced polyester composites. *J Appl Polym Sci* , 64, 1739–48.

George, J., Bhagawan, S.S., & Thomas, S. (1998). Effects of Environment on the Properties of Low-density Polyethylene Composites Reinforced with Pineappleleaf Fiber. *Composites Science and Technology*, 58, 1471-1485.

Garlotta D. (2001). A literature review of poly(lactic acid). *J Polym Environ* , 9, 63-84.

George, J., Bhagawan, S.S., & Thomas, S.(1998). Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fiber. *Composites Science and Technology*, 58, 1471-1485.

George, J., Janardhan, R., Anand, J. S., Bhagawan, S. S., & Thomas, Sabu. (1996). Melt rheological behaviour of short pineapple fibre reinforced low density polyethylene composites. *Polymer*, 37, 5421-5431.

Graupner, N., Herrmann, A.S., and Mössig, J. (2009). Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas. *Composites: Part A*, 40, 810–821.

Gupta, A. P., Kumar, V. (2007). *Eur. Polym. J.*, 43, 4053–4074.

- Hartmann, M.H.(1998). High molecular weight polylactic acid polymers. In: Kaplan D.L., editor. Biopolymers from renewable resources. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag; 1998. p. 367–411.
- Hatakeyema, H., Tanamachi, N., Matsumura, H., Hirose, S., & Hatakeyama, T. (2005). Biobased polyurethane composite foams with inorganic fillers studied by thermogravimetry. *Thermochim Acta*, 431, 155–60.
- Hieber,G., Kohler, R., and Alex, R. (2001). Umweltfreundliche Verbunde, PMMA Reaktionsharze mit Flachsfasern verstärken. *KU Kunststoffe*, 91, 70.
- Huda, M. S., Drzal, L.T., Mohanty A.K., and Misra M. (2006). Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid)(PLA) composites: A comparative study. *Composites Science and Technology*, 66, 1813–1824.
- Huneault M.A., Li H. (2007). Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends. *Polymer* , 48, 270–80.
- John, M.J., & Thomas S. (2008). Biofibers and Biocomposites : Carbohydrate Polymers, 71, 343-364.
- Keener, T.J., Stuart, R.K., & Brown, T.K. (2004). Maleated coupling agents for natural fiber composites. *Composites*, A35, 357-362.
- Kengkhetkit, N., Amornsakchai, T. (2012). Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement:1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber : *Industrial Crops and Products*, 40, 55– 61.

- Kim, H.S., Park, B.H., Choi, J.H., & Yoon, J.S.(2008). Mechanical properties and thermal stability of poly(L-lactide)/calcium carbonate composites. *J Appl Polym Sci*, 109, 3087–92.
- Kim, H.S., Kim S., Kim, H.J., & Yang, H.S.(2006). Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. *Thermochim, Acta* ,451, 191-9.
- Kromer, K.H., Gottschalk, H., and Beckmann, A. (1995). Technisch nutzbare Leinfaser : Eine neue Flachskurzfaser-Technologie, *Landtechnik*, 50, 340.
- Leblanc J.L., Furtado C.R.G, Leite M.C.A., Visconte L.L.Y., Souza M.F.( 2007). Effect of the fiber content and plasticizer type on the rheological and mechanical properties of poly(vinyl chloride)/green coconut fiber composites. *J Appl Polym Sci*, 106, 3653–65.
- Lim L. T., Auras R., Rubino M. (2008). *Prog. Polym. Sci.*, 33,820–852.
- Majumdar, S.K. (1956). Ph.D. thesis, Calcutta University.With permission.
- Meinander, K., Niemi, M., Hakola, J.S., & Selin J-F. (1997). Polylactides-degradable polymers for fibres and films. *Macromol Symp*,123, 147–54.
- Mohanthy, A.K., et.al. *Macromol.Mater.Engin.*, 276-277, 1, 2000. Further developed with Kennwerte von Fasern nach KOHLER&WEDLER 1996 and Kennwerte von Faser werkstoffen nach BOBETH. Link in <http://www.inaro.de/Deutsch/ROHSTOFF/industrie/FASER/meckenn.htm> accessed on July 25, 2003

- Mohanty, A.K., Misra, M., Drzal, L.T.(2005). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. United States of America: Taylor & Francis Group.
- Mukherjee, P.S., Satyanarayana, K.G. (1986). Structure and Properties of Some Vegetable Fibres-Part 2 Pineapple Fibre (*Anannus comusus*). *Journal of Materials Science*,21, 51-56.
- Mwaikambo, L.Y. (2006). Review of the history, properties and application of plant fibres. *Afr J Sci Technol* 7:120–133.
- Oksman K, Wallstrom L., Berglund L.A., Filho R.D.T. (2002). Morphology and properties of unidirectional sisal-epoxy composites. . *J Appl Pol Sci*, 84, 2358-65.
- Oksman, K., Skrifvars, M., & Selin, J.-F. (2003). Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. *Composites Science and Technology*, 63, 1317-1324.
- Pickering, K.L., Beckermann, G.W., Alam, S.N., & Foreman N.J. (2007). Optimising industrial hemp fibre for composites. *Composites*, A38, 461–468.
- Rong MZ, Zhang M.Q., Liu Y, Yang GC, Zeng HM et al. (2001). Effect of fibre treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Compos Sci Technol*, 61, 1437-1447.
- Rouchi, A.M. (2000). *Chem.Eng. News*, Nov.13, pp.29-32.
- Rozman H.D., Tan K.W., Kumar R.N., Abubakar A., Ishak M.Z.A., Ismail H.(2000). The effect of lignin as a compatibilizer on the physical properties of coconut fiber–polypropylene composites. *Eur Polym J* , 36, 1483–94.

Satyanarayana K.G., et al. (1990). *Handbook of Ceramics and Composites, 1*, 341.

Sukumaran K, Satyanarayana K G, Pillai S G K and Ravikumar K K. (2001). Structure, physical and mechanical properties of plant fibers of Kerala, *Metals Mater Proc, 13*, 21-136.

Toumis, G.T. (1991). Structure, properties and utilization. Science and technology of wood. Van Nostrand Reinhold, New York, p 494.

Wambua, p., Ivens, J., and Verpoest, I. (2003). Natural fibers: can they replace glass in fiber reinforced plastics?. *Compos. Sci. Technol, 63*, 1259.

Zimmermann T, Pohlerand E., Geiger T. (2004). Cellulose fibrils for polymer reinforcement. *Adv Eng Mater, 6*, 9.

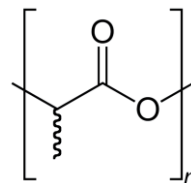
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก สารเคมี

ตารางที่ ๑ก สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

Formula

$(C_3H_4O_2)_n$



Chemical Name

poly [lactic Acid]

Physical Properties

Molecular Weight

Status at 25 °C

Solid

Color

White

Viscosity

Melting Point (°C)

145

Density (20 °C)

1.26

Solubility

Insoluble in water

Purity

-

Supplier

Bio Green World Co.,Ltd..

\* Bio Green World Co.,Ltd..

## ตารางที่ ๒ก สมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์

---

Formula	NaOH
Chemical Name	Sodium hydroxide
Physical Properties	
Molecular Weight	40.00
Status at 25 °C	Solid
Color	White pellets
Odor	Odorless
Boiling Point (°C)	804
Melting Point (°C)	-
Solubility	Soluble in water
Density (20 °C)	2.13
Purity	> 98%
Supplier	NaOH (98%) from Suttipan Chemistry Limited Company, Thailand.

---

\* Suttipan Chemistry Limited Company, Thailand.

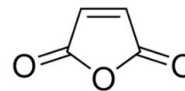


ตารางที่ ๓ก สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์

---

Formula

$C_4H_2O_3$



Chemical Name

Maleic Anhydride

Physical Properties

Molecular Weight

98.06

Status at 25 °C

Solid

Color

White POWDER

Boiling Point (°C)

200

Melting Point (°C)

50-56

Density (20 °C)

Solubility

Soluble in water

Purity

Supplier

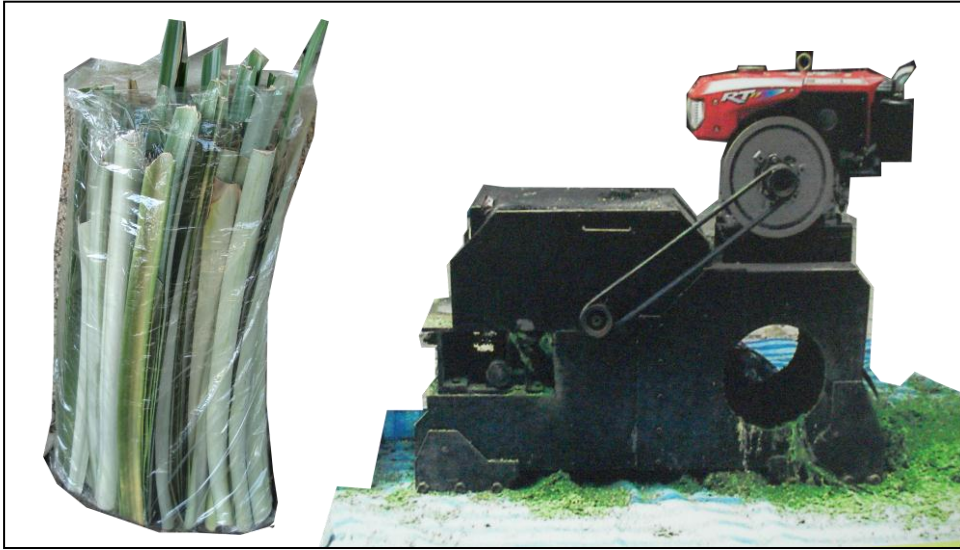
Sigma Aldrich Co., Ltd

---

\* From Sigma Aldrich Co., Ltd

ภาคผนวก ข

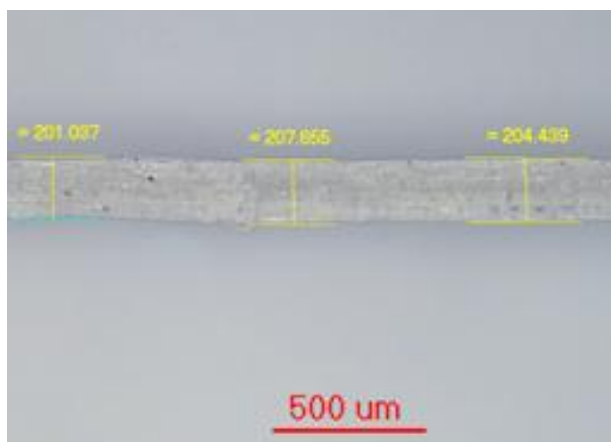
รูปภาพ



รูปที่ ๑๗ ใบสับปะรดสด และเครื่องแยกเส้นใยจากใบสับปะรด



รูปที่ ๒๗ เส้นใยที่สกัดจากใบสับปะรดโดยเครื่องแยกเส้นใย



รูปที่ ๓ข การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใย



รูปที่ ๔ข การเตรียมตัวอย่างเส้นใยเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์



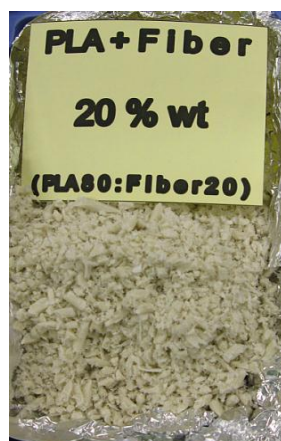
รูปที่ ๕ข เส้นใยสับปะรดที่ตัดให้ได้ขนาด 1-3 mm



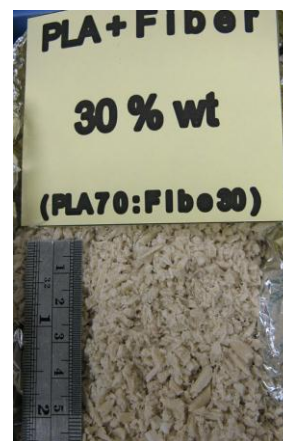
รูปที่ ๖๖ เม็ดพลาสติก PLA



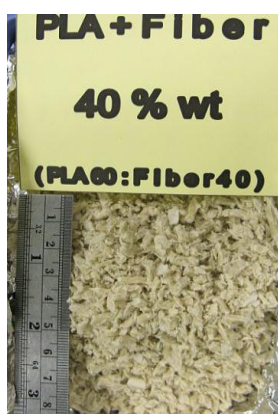
(a)



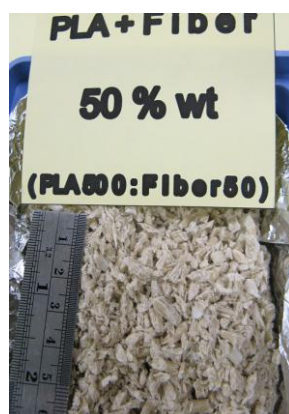
(b)



(c)



(d)

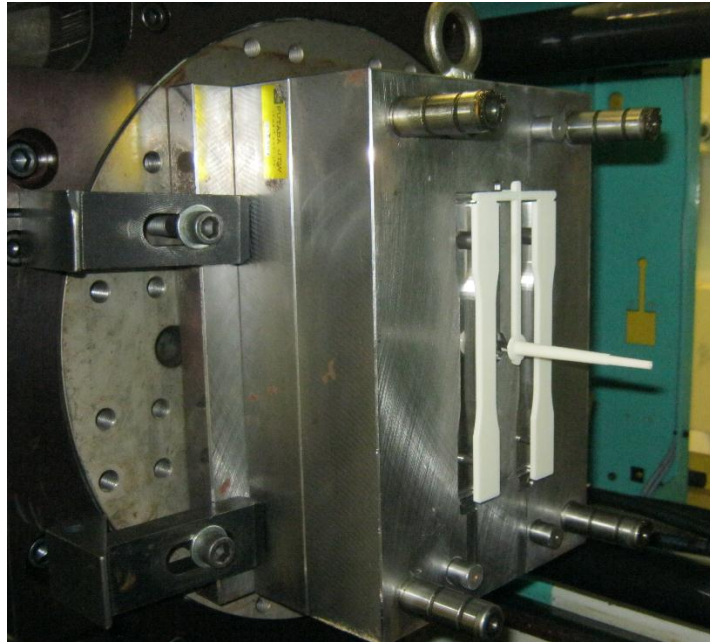


(e)

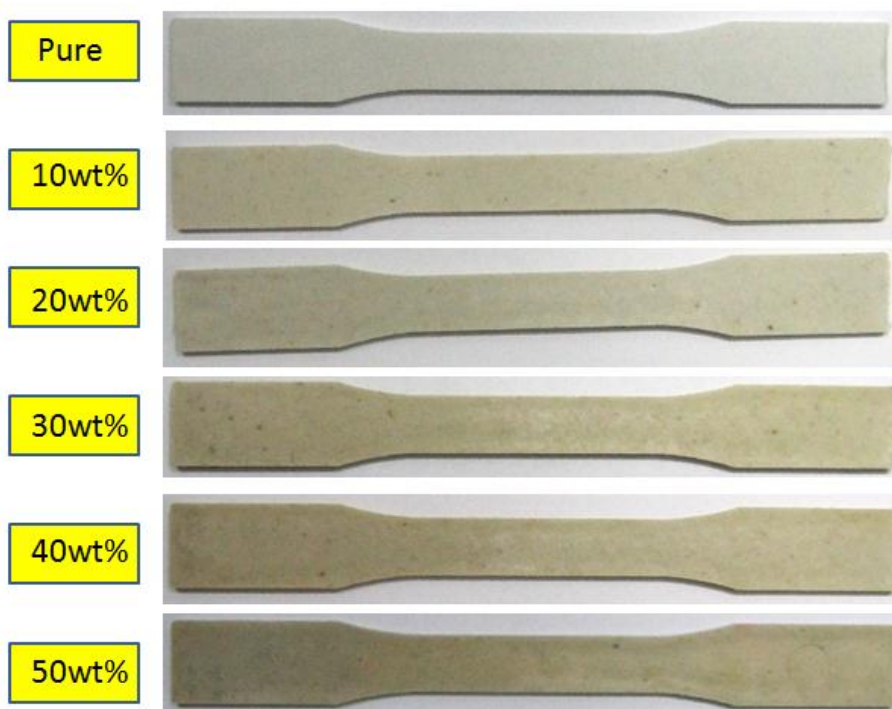


(f)

รูปที่ ๖๗ เม็ด ไบโอคอมโพสิต PALF/PLA ที่มีส่วนผสมของเส้นใย (a) 10 wt%, (b) 20 wt%, (c) 30 wt%, (d) 40 wt% และ (e) 50 wt% และ (f) เม็ดไบโอคอมโพสิต PALF/PLA/MA ที่มีเส้นใย 40 wt%



รูปที่ ๘๗ การขึ้นรูปชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ ๘๘ ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิต PALF/PLA

## ผลผลิต (Output)

Supranee Kaewpirom and Cherdthawat Worrarat, "Preparation and Properties of Pineapple Leaf Fiber Reinforced Poly(lactic acid) Green Composites" 2014. *Fibers and Polymers*, 15 (7), 1469-1477.

## รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย 2557A10802120 สัญญาเลขที่ 75/2557

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๘

มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ คอมพิวเตอร์รักษสิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัย ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

รายงานในช่วง ตั้งแต่วันที่ ๑ ตุลาคม ๒๕๕๖ ถึงวันที่ ๓๑ ธันวาคม ๒๕๕๗

ระยะเวลาดำเนินการ ๑ ปี ๓ เดือน



รายรับ

งวดที่ ๑ (ร้อยละ ๕๐)	๑๓๕,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๔ มีนาคม ๒๕๕๗
งวดที่ ๒ (ร้อยละ ๔๐)	๑๐๘,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ ๑๕ สิงหาคม ๒๕๕๗
งวดที่ ๓ (ร้อยละ ๑๐)	๒๗,๐๐๐ บาท เมื่อวันที่ หลังจากส่งรายงานฉบับสมบูรณ์
รวม	๒๗๐,๐๐๐ บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงินคงเหลือ/เกิน
1. ค่าตอบแทน	๗๒,๐๐๐	๗๒,๐๐๐	๐.๐๐
2. ค่าจ้าง	๘๖,๔๐๐	๘๖,๔๐๐	๐.๐๐
3. ค่าวัสดุ	๔๔,๖๐๐	๔๔,๖๐๐	๐.๐๐
4. ค่าใช้สอย	๔๐,๐๐๐	๔๐,๐๐๐	๐.๐๐
5. ค่าธรรมเนียม อุดหนุนสถาบัน	๒๗,๐๐๐	๒๗,๐๐๐	๐.๐๐
<b>รวม</b>	๒๗๐,๐๐๐	๒๗๐,๐๐๐	๐.๐๐

(ผศ. ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์)

หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน