



รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2557

โครงการวิจัยรหัส ว-ท (ด) 128.57

การศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส  
สำหรับศักยภาพของการนำมาทำคอมพอสิต  
(Study of surface and bulk properties of cellulose fibers for  
using in composite potential)

โดย

วุฒินันท์ คงทัต, วีรศักดิ์ สมितिพงศ์, สุธีรา วิทยากาญจน์, จิรชยา บุญญฤทธิ์  
และ รังสิมา ชลคุป

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เสนอต่อ

สถาบันวิจัยและพัฒนา แห่ง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กุมภาพันธ์ 2559

**รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์**  
**โครงการวิจัย (Project)**  
**โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ.....2557**

**ส่วนที่ 1 สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย (Project)**

1.1 รหัส ว-ท(ด)128.57... ชื่อโครงการ การศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส สำหรับศึกษาคุณภาพของการนำมาทำคอมพอสิต

1.2 ลักษณะโครงการ  เป็นโครงการวิจัยเดี่ยว  
 เป็นโครงการย่อยในชุดโครงการวิจัย (ระบุชื่อชุดโครงการวิจัย) .....

1.3 ชื่อหัวหน้าโครงการ ...นายวุฒินันท์ คงทัต.....

1.4 หน่วยงานต้นสังกัด ...สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.....  
 หน่วยงานหลัก...มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....

1.5 ประเภทโครงการ  โครงการวิจัย 3 สาขา;  เกษตรศาสตร์  วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
 สังคมศาสตร์ฯ  
 โครงการวิจัยสถาบันเพื่อพัฒนาคุณภาพ  
 โครงการวิจัยและถ่ายทอดงานวิจัยสู่ประชาชน  
 โครงการเสริมสร้างความเข้มแข็งด้านการวิจัย  
 โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะ (SRU)  
 โครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มศักยภาพเชิงบูรณาการเพื่อการแข่งขันฯ  
 โครงการวิจัยพัฒนาร่วมภาครัฐและเอกชน  
 โครงการวิจัยเชิงพื้นที่ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

1.6 ระยะเวลาดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ ...1.....ปี ตั้งแต่ปีงบประมาณ 2557.....ถึงปีงบประมาณ 2557.....

1.7 สถานที่ดำเนินงานวิจัย/เก็บข้อมูล...สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.....

1.8 งบประมาณได้รับ...450,000.....บาท การเบิกเงิน  งวดที่ 1 เบิกแล้ว 213,750 บาท  
 งวดที่ 2 เบิกแล้ว 213,750 บาท  งวดที่ 3 เบิกแล้ว 22,500 บาท

1.9 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย.....

1. เพื่อเป็นเตรียมเส้นใยที่ได้จากแหล่งชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางพื้นผิว ซึ่งจะช่วยให้ทราบการนำไปใช้งานในการนำไปเป็นสารเสริมแรงคอมพอสิตกับ พอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิเอธิลีน พอลิพรอพิลีน และ พอลิแลคติกแอซิด
4. เพื่อศึกษาทางกายภาพที่สำคัญ เช่น สมบัติทางเชิงกล สมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ (pull-out test) สมบัติการดูดซับน้ำ เพื่อนำเส้นใยดังกล่าวมาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมพอสิตชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิเอธิลีน พอลิพรอพิลีน และ พอลิแลคติกแอซิด

1.10 เป้าหมายผลงานวิจัยตลอดโครงการ

- ปีที่ เดือนที่ ผลงานวิจัยที่คาดว่าจะได้
1. 1-6.....1. การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากแหล่งชีวมวลต่าง ๆ จำนวน 5 ชนิด  
 2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้  
 3. ศึกษาสมบัติพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้.....
- 7-12.....1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้  
 2. สรุปผลและเขียนรายงาน และการตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการ.....

1.11 สรุปการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์ (ตามแผน)	เป้าหมาย / ผลที่คาดหวัง (ตามแผน)	ผลการดำเนินงาน (ปฏิบัติได้จริง)
1. เพื่อเป็นเตรียมเส้นใยที่ได้จากแหล่งชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย 2. เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้	1. ได้วิธีการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากแหล่งชีวมวลต่าง ๆ จำนวน 5 ชนิด 2. ได้องค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้	1. ได้ผลการเตรียมเส้นใยของวัตถุดิบของพืชจากแหล่งชีวมวลต่าง ๆ จำนวน 5 ชนิด 2. ได้ทราบองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบก่อนนำมาใช้และหลังการเตรียมเส้นใย เพื่อประกอบการนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพอื่นต่อไป สำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงคอมพอสิต สำหรับขนาดและลักษณะสัณฐานของเส้นใยกำลังทำการศึกษาจะรายงานในครั้งต่อไป

1.12 สรุปผลการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์

- บรรลุ.....
- บรรลุบางส่วน (ร้อยละ.....) เหตุผล.....
- ไม่บรรลุ เหตุผล.....

1.13 ผลผลิต/ สิ่งที่ได้จากการวิจัย (Outputs) (โปรดระบุรายละเอียด)

- องค์ความรู้/ข้อมูลพื้นฐาน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยพืชชนิดต่าง ๆ เพื่อการนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงคอมพอสิต.....
- สายพันธุ์พืช/สัตว์/จุลินทรีย์.....
- ผลิตภัณฑ์.....
- สิ่งประดิษฐ์.....
- เทคโนโลยี/นวัตกรรม.....
- ฐานข้อมูล/ซอฟต์แวร์.....
- คู่มือ.....
- วิดีทัศน์.....

- การสร้างนักวิจัย/สนับสนุนนิสิตปริญญาตรี 1.....คน ปริญญาโท .....คน ปริญญาเอก .....คน
- สนับสนุนการศึกษาปัญหาพิเศษ.....1.....เรื่อง (ระบุ) การศึกษาศักยภาพของการใช้เส้นใยเซลลูโลสสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดย นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร ม.เกษตรศาสตร์.....เรื่อง (ระบุ).....
- อื่นๆ (ระบุ).....

1.14 ผลลัพธ์/ผลสำเร็จที่ได้/หรือคาดว่าจะได้จากการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ (Outcomes)

(1) เป้าหมายการนำไปใช้ประโยชน์ (ระบุกลุ่มเป้าหมายของงานวิจัยเชิงปริมาณ/คุณภาพ)

- ด้านการศึกษา/เสริมการเรียนการสอน.....
- ด้านการเกษตร.....
- ด้านอุตสาหกรรม.....
- ด้านทรัพยากรธรรมชาติ/สิ่งแวดล้อม.....
- ด้านคุณภาพชีวิต สุขภาพอนามัย.....
- ด้านเศรษฐกิจ.....
- ด้านสังคม.....
- ด้านการทำนุบำรุงศิลป ศาสนา วัฒนธรรม.....
- ด้านการถ่ายทอดเทคโนโลยี/ฝึกอบรมแก่กลุ่มเป้าหมาย.....
- เสนอภาครัฐ เพื่อใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ.....
- นำความรู้ไปวิจัย/พัฒนาขั้นต่อไป.....
- ก่อให้เกิดความร่วมมือระหว่างหน่วยงาน/การสร้างเครือข่าย.....
- อื่นๆ (ระบุ).....

(2) สรุปผลการนำผลการวิจัยไปเผยแพร่ / ถ่ายทอด **ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดโครงการ** (ระบุรายละเอียด อยู่ระหว่างดำเนินการส่งเสริม/ตีพิมพ์แล้วในรูปแบบเอกสารอ้างอิงและแนบสำเนาเป็นภาคผนวกของรายงาน)

- ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการต่างประเทศ.....เรื่อง (ระบุ).....
- ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ.....เรื่อง (ระบุ).....
- นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ต่างประเทศ.....เรื่อง (ระบุ).....
- นำเสนอในการประชุม/สัมมนา ในประเทศ..... 2.....เรื่อง (ระบุ) 1. การศึกษาศักยภาพของการใช้เส้นใยเซลลูโลสสำหรับเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดยงานครบรอบคล้ายวันสถาปนาสถาบันผลิตผลเกษตรฯ ปีที่ 24 วันที่ 29 กรกฎาคม 2558 ณ อาคารปฏิบัติการวิจัยกลาง
- 2. การศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสสำหรับศักยภาพของการนำมาทำคอมพอสิต การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 54 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ระหว่างวันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2559.....
- นำเสนอทางวิทยุ/โทรทัศน์/Website.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- นำเสนอทางนิทรรศการ.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- บทความ/เอกสารสิ่งพิมพ์/วีดิทัศน์.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- ถ่ายทอด/ฝึกอบรมแก่เกษตรกร/ผู้สนใจ.....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- ถ่ายทอดสู่ภาคเอกชน/อุตสาหกรรม/ผู้ประกอบการ (ประโยชน์เชิงพาณิชย์).....เรื่อง/ครั้ง (ระบุ).....
- ภาครัฐนำไปใช้กำหนดแผน/นโยบาย ฯลฯ (ระบุ).....
- มีผู้นำผลงานวิจัยไปอ้างอิง (ระบุ).....
- อื่นๆ (ระบุ).....

1.15 การยื่นจด  สิทธิบัตร  อนุสิทธิบัตร  ลิขสิทธิ์  
 มีศักยภาพที่จะยื่นจด (ระบุ).....  ยื่นจดแล้ว เมื่อ.....


1.16 ผลกระทบ (Impact) ที่เกิดจากการนำผลการวิจัยไปใช้ (ระบุว่าก่อให้เกิดผลกระทบอย่างไร)  
 ด้านความมั่นคง อาทิ การเมืองการปกครอง กฎหมาย การต่างประเทศ โครงสร้างพื้นฐาน และบริการโทรคมนาคม ฯลฯ (ระบุ).....  
 ด้านการเศรษฐกิจ อาทิ การพาณิชย์กรรม การเกษตรกรรม การอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พลังงาน ฯลฯ (ระบุ).....  
 ด้านคุณภาพชีวิตและสังคม ศักยภาพของคนและการศึกษา การแพทย์และสาธารณสุข หลักประกันความมั่นคง สวัสดิการสังคม วัฒนธรรม จริยธรรมและค่านิยม ฯลฯ (ระบุ).....  
 ด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม การบริการจัดการการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์ การป้องกันการทำลาย ลดการสูญเสีย การฟื้นฟูทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม ฯลฯ  
 อื่นๆ (ระบุ).....

1.17 ผลการดำเนินงานวิจัยสอดคล้องกับยุทธศาสตร์ชาติ ในด้าน  
 ยุทธศาสตร์การจัดความยากจน  
 ยุทธศาสตร์การพัฒนาคคนและสังคมที่มีคุณภาพ  
 ยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุล และแข่งขันได้  
 ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม  
 ยุทธศาสตร์การต่างประเทศและเศรษฐกิจระหว่างประเทศ  
 ยุทธศาสตร์การพัฒนากฎหมายและส่งเสริมการบริหารกิจการบ้านเมืองที่ดี  
 ยุทธศาสตร์การส่งเสริมประชาธิปไตยและกระบวนการประชาสังคม  
 ยุทธศาสตร์การรักษาความมั่นคงของรัฐ  
 ยุทธศาสตร์การรองรับการเปลี่ยนแปลงและพลวัตโลก  
 อื่นๆ โปรดระบุ.....

1.18 ปัญหา อุปสรรค ในการดำเนินงานวิจัยและแนวทางแก้ไข.....

1.19 งานที่จะทำต่อไป/คำชี้แจงเพิ่มเติม.....

1.20 ได้แนบ “รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ของโครงการ (Project)” ตามหัวข้อ ในส่วนที่ 2 (หน้าถัดไป) มาด้วยแล้ว

ลงชื่อ.....  .....หัวหน้าโครงการ  
 (..... นายวุฒินันท์ คงทัต.....)

..... / กุมภาพันธ์ / 2559 ..... วัน/เดือน/ปี ที่รายงาน

## ส่วนที่ 2

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
โครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก. ปีงบประมาณ 2557.....

โครงการวิจัยรหัส ว-ท(ด)128.57.....

การศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติทางกายภาพของเส้นใยเซลลูโลสสำหรับศักยภาพของการนำมาทำคอมพอสิต

Study of surface and bulk properties of cellulose fibers for using in composite potential

วุฒินันท์ คงทัด, วีรศักดิ์ สมิตธิพงษ์, สุธีรา วิทยากาญจน์, จิรัชยา บุญญฤทธิ์ และ รังสิมา ชลคูป  
Wuttinant Kongtud, Wirasak Smitthipong, Suteera Witayakran, Jirachaya Boonyarit  
and Rungsima Chollakup

## บทคัดย่อ

ในการศึกษาการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากพืชที่เป็นแหล่งชีวมวลสำคัญ 5 ชนิด คือ เส้นใยจากกากกล้วย ใบบัวบก เปลือกกล้วย กาบมะพร้าวอ่อน และทะเลสาบปาล์มน้ำมัน มาใช้ประโยชน์สำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับคอมพอสิต ด้วยการเลือกสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมตามแหล่งวัตถุดิบ คือ เส้นใยจากกากกล้วยและใบบัวบกเตรียมด้วยเครื่องขูดใบ แล้วล้างน้ำสบู่และน้ำ เส้นใยเปลือกกล้วยเตรียมด้วยการแช่น้ำและแยกจากเปลือก เส้นใยจากมะพร้าวและทะเลสาบปาล์มน้ำมัน ได้จากการต้มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เส้นใยเหล่านี้นำมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพ เชิงกล และความร้อน โดยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเหล่านี้ มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลส 48-66% โดยเส้นใยใบบัวบกมีค่าสูงสุด และมีปริมาณเฮมิเซลลูโลส 15-28% โดยเส้นใยกล้วยมีค่าต่ำสุด ขนาดเส้นใยเรียงจากเล็กไปใหญ่ คือ เส้นใยจากใบบัวบก กล้วย กาบมะพร้าว ทะเลสาบปาล์มน้ำมันและกล้วย สำหรับลักษณะพื้นผิวของเส้นใย พบว่าเส้นใยกล้วยแสดงสมบัติ hydrophobicity ขณะที่เส้นใยกล้วย และใบบัวบก แสดงสมบัติ hydrophilicity ทำให้สมบัติการดูดซับน้ำให้ผลเช่นเดียวกัน คือ เส้นใยกล้วยและใบบัวบกสามารถดูดซับน้ำได้ดี ขณะที่เส้นใยกล้วยมีความสามารถดูดซับน้ำต่ำสุด ผลของความแข็งแรงทางเชิงกลของเส้นใยเหล่านี้ พบว่า ค่าต้านแรงดึงของเส้นใยใบบัวบกมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ เส้นใยจากเปลือกกล้วยและกากกล้วย โดยที่ค่า Young's modulus ของเส้นใยจากเปลือกกล้วยมีค่าสูงสุด ขณะที่เส้นใยจากมะพร้าวและทะเลสาบปาล์มน้ำมันมีความเด่นในการให้ค่าการยืดตัวสูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น ส่วนค่าสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ด้วยการวัด pull-out test ในเมตริกซ์ LDPE และ PLA พบว่า เส้นใยจากใบบัวบกและกล้วยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง และมีปริมาณที่ไม่ใช่เซลลูโลสต่ำ และแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้ดีให้สมบัติการยึดติดในเมตริกซ์ทั้งสองชนิดดี และสุดท้ายสำหรับสมบัติทางความร้อนของเส้นใย พบว่า เส้นใยจากกากกล้วย ใบบัวบกและเปลือกกล้วย ที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงจะมีความเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าเส้นใยจากมะพร้าวและทะเลสาบปาล์มน้ำมัน ดังนั้นการนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาใช้เสริมแรงคอมพอสิต ขึ้นกับ แหล่งของวัตถุดิบ การเตรียมเส้นใยที่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกไป และการทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กเพื่อให้การยึดติดกับพอลิเมอร์ได้ดี

คำสำคัญ: เส้นใยเซลลูโลส, คอมพอสิต

## Abstract

In this study, cellulose fibers from 5 types of biomass plant sources, banana stem, pineapple leaf, coir, hemp bast and palm oil empty fruit bunch, were investigated for using as the reinforcement materials in composites. The appropriate method for cellulose fiber extraction of each material was chosen. Cellulose fibers from banana stem and pineapple leaf were prepared by the decorticating machine, then washed with soap and water. Hemp fiber was prepared by water retting of hemp bast. Fibers from coconut husk and palm oil empty fruit bunch were prepared by treatment with sodium hydroxide, followed by bleaching with hydrogen peroxide. The chemical composition, physical, mechanical and thermal properties of these fibers were investigated. The chemical composition of these fibers contained 48-66% of alpha cellulose found with the maximum content in the pineapple fiber, and 15-28% of hemicellulose found with the minimum content in the hemp fiber. Fiber diameter can be sorted by the fineness from pineapple, hemp, coir, palm to banana fibers, respectively. For the fiber surface, hemp fiber indicated hydrophobicity while banana and pineapple fibers showed the hydrophilicity. These mean that banana and pineapple fibers can absorb water well, while hemp has the lowest water absorption. From the mechanical properties point of view, the tensile strength of pineapple fiber was the highest, followed by hemp and banana fibers. Meanwhile, the Young's modulus of hemp fiber is the highest, while fibers from coconut and oil palm present a predominance of elongation better than other fibers. However, the adhesion properties between the fibers and the polymer matrix (LDPE and PLA) using the pull-out test found that pineapple and hemp fibers (with high cellulose contents and low non-cellulose contents, and split to a single fiber) had good adhesion properties in both types of matrix. Finally, for the thermal properties of the fibers from banana, pineapple and hemp fiber, with high cellulose contents, displayed better thermal stability than coir and palm fibers. Therefore, the cellulose fibers from plants used for reinforcement in composites based on the source of raw material, fiber preparation that can eliminate impurities out, and prepare the small fibers that can adhered well to the polymer.

Key words: Cellulose fibers, Composite

---

ฝ่ายเทคโนโลยีชีวมวลและพลังงานชีวภาพ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ม.

เกษตรศาสตร์ 50 ถ. งามวงศ์วาน จตุจักร กทม. 10900

Biomass and Bio-energy Technology Division, Kasetsart Agricultural Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI), Kasetsart University, 50 Ngam Won Wan Rd., Chatujak, Bangkok 10900

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	5
Abstract	6
1 บทนำ	12
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	15
1.3 การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	15
1.3.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)	15
1.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย	16
1.3.1.2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ	19
1.3.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติ	19
1.3.2 คอมพอสิต (composites)	20
1.3.2.1 การใช้เส้นใยเสริมแรงในคอมพอสิต	20
1.3.2.2 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในคอมพอสิต	21
1.3.3 สมบัติที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติในการเสริมแรงคอมพอสิต	23
1.3.3.1 สมบัติทางเชิงกล	23
1.3.3.2 สมบัติการยึดติดระหว่างเฟสของเส้นใยและเมทริกซ์ในคอมพอสิต	26
1.3.3.3 สมบัติการดูดซับน้ำ	30
1.3.3.4 สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)	31
2 วิธีวิจัย	33
2.1 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากวัตถุดิบที่ใช้ทดลอง	33
2.1.1 การเตรียมเส้นใยกาบกล้วย	33
2.1.2 การเตรียมเส้นใยใบสับปะรด	33
2.1.3 การเตรียมเส้นใยกล้วยง	33
2.1.4 การเตรียมเส้นใยกาบมะพร้าว	34
2.1.5 การเตรียมเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน	34
2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้	34
2.3 ศึกษาสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้	34
2.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้	35
3 ผลและวิจารณ์	38
3.1 ผลการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากวัตถุดิบที่ใช้ทดลอง	38
3.1.1 ผลการเตรียมเส้นใยกาบกล้วย	38
3.1.2 ผลการเตรียมเส้นใยใบสับปะรด	39
3.1.3 ผลการเตรียมเส้นใยกล้วยง	40
3.1.4 ผลการเตรียมเส้นใยกาบมะพร้าว	41
3.1.5 ผลการเตรียมเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน	42
3.2 องค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้	46
3.4 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้	47
3.4.1 ลักษณะทางสัณฐานของชิ้นเส้นใยก่อนและหลังการทดสอบสมบัติทางเชิงกล	47
3.4.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใย	51
3.4.3 สมบัติการติด (adhesion property) ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์	57
3.4.4 สมบัติการดูดซับน้ำของเส้นใย	58
3.4.5 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย	59
4. สรุปผลการทดลอง	61
5. เอกสารอ้างอิง	63

## สารบัญภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 1-1	ผลผลิตของพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ซึ่งให้ผลพลอยได้จากเศษเหลือทิ้ง	12
ภาพที่ 1-2	การจำแนกประเภทของเส้นใยธรรมชาติ	16
ภาพที่ 1-3	โครงสร้างของเซลลูโลส	17
ภาพที่ 1-4	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	17
ภาพที่ 1-5	โครงสร้างของลิกนิน	18
ภาพที่ 1-6	โครงสร้างภายในของเส้นใยจากลำต้นป่าน	19
ภาพที่ 1-7	สมบัติยืดหยุ่นแบบวิสโคอีลาสติกของวัสดุ เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain)	24
ภาพที่ 1-8	กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท	25
ภาพที่ 1-9	การเกิดจุดตำหนิ (kick band) บนเส้นใยป่านลินิน เปรียบเทียบกับเส้นใยป่านที่ไม่มีจุดตำหนิ	26
ภาพที่ 1-10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความสูงต่อความกว้างของ loop กับค่าความสูงของ loop ในระหว่างการทดสอบคุณสมบัติแรงกดด้วยเทคนิค Elastic loop test	26
ภาพที่ 1-11	ลักษณะของการหยดของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็ง	27
ภาพที่ 1-12	ลักษณะการทดสอบการวัดค่ามุมสัมผัสของเส้นใย	28
ภาพที่ 1-13	พันธะทางกล	28
ภาพที่ 1-14	พันธะทางไฟฟ้า	29
ภาพที่ 1-15	พันธะทางเคมีที่เกิดจากสารเคมีบนผิวของเส้นใยเสริมแรงและเมตริกซ์	29
ภาพที่ 1-16	พันธะทางเคมีที่เกิดจากสารช่วยยึดเกาะระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมตริกซ์	30
ภาพที่ 1-17	พันธะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา	30
ภาพที่ 1-18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในระหว่างการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis	32
ภาพที่ 2-1	หลักการของวิธี Washburn (W) สำหรับการวัดมุมสัมผัส	35
ภาพที่ 2-2	ลักษณะของเส้นใยธรรมชาติเมื่อทำการทดสอบสมบัติ compression test ด้วยเทคนิค elastic loop test	36
ภาพที่ 2-3	การทดสอบสมบัติการติดด้วยวิธี pull-out test ในเมตริกซ์ LDPE	36
ภาพที่ 3-1	ลักษณะของเส้นใยกล้วยที่พอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	39
ภาพที่ 3-2	ลักษณะของเส้นใยใบสับปะรดที่พอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	40
ภาพที่ 3-3	ลักษณะของเส้นใยกล้วยขง ที่พอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	41
ภาพที่ 3-4	ลักษณะของเส้นใยมะพร้าวอ่อนที่พอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	42
ภาพที่ 3-5	ลักษณะของเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่พอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	43
ภาพที่ 3-6	สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยจากกล้วยบ้าน ใบสับปะรด เปลือกกล้วยขง กาบมะพร้าว และทะเลลายปาล์มน้ำมัน	45
ภาพที่ 3-7	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากกล้วยบ้าน ใบสับปะรด เปลือกกล้วยขง กาบมะพร้าว และทะเลลายปาล์มน้ำมัน ที่ได้จากการกระบวนการเตรียมเส้นใยต่างๆ	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile stress และ strain ในระหว่างการทดสอบเชิงกลด้วยการยืดเส้นใยทั้ง 5 ชนิด	51
ภาพที่ 3-9 ลักษณะของเส้นใยจากกาบมะพร้าว และทะเลายปาล์มน้ำมันเมื่อสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10 เท่า	53
ภาพที่ 3-10 ลักษณะของเส้นใยกาบกล้วย และเปลือกกล้วยเมื่อทำการวน loop เพื่อเตรียมการทดลอง	53
ภาพที่ 3-11 ค่าแรงยึดเกาะของเส้นใยเดี่ยวชนิดต่าง ๆ ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ PE และ PLA	58
ภาพที่ 3-12 ปริมาณการดูดซับน้ำของเส้นใย ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง	59
ภาพที่ 3-13 Thermogravimetric curves ของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด	60

## สารบัญญัตินำ

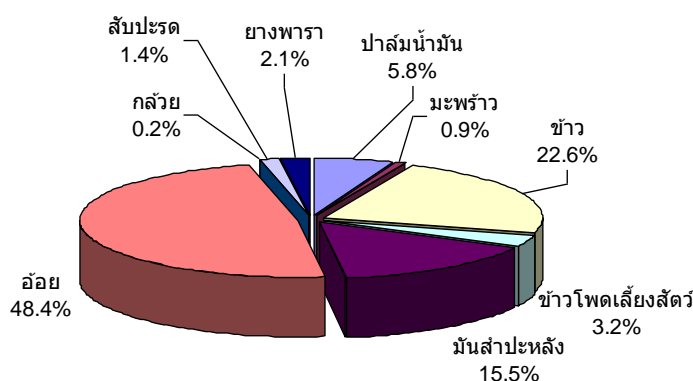
	หน้า	
ตารางที่ 1-1	ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ	18
ตารางที่ 1-2	สมบัติของ LDPE, PP และ PLA	22
ตารางที่ 1-3	สมบัติทางเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ	23
ตารางที่ 3-1	ข้อมูลแสดงเส้นรอบวงและน้ำหนักของต้นกล้วยน้ำว้าที่เก็บผลผลิตแล้ว	38
ตารางที่ 3-2	ข้อมูลแสดงจำนวนกาบและน้ำหนักของกาบในแต่ละชั้นของต้นกล้วยที่เก็บผลผลิตแล้ว	38
ตารางที่ 3-3	เปรียบเทียบเส้นใยกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	39
ตารางที่ 3-4	เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยใบสับประรดที่ได้จากการแช่ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างกัน	39
ตารางที่ 3-5	เปรียบเทียบเส้นใยกล้วยที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	40
ตารางที่ 3-6	เปรียบเทียบเส้นใยกาบมะพร้าวอ่อนที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	41
ตารางที่ 3-7	เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	42
ตารางที่ 3-8	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ	43
ตารางที่ 3-9	องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันหลังการเตรียมเส้นใยด้วยการสกัดด้วยต่างและฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	44
ตารางที่ 3-10	มุมสัมผัสของเส้นใยเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ ที่วัดได้ในของเหลวที่มีความเป็นขี้ต่างกัน	47
ตารางที่ 3-11	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นฐานของเส้นใยก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกล	48
ตารางที่ 3-12	ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยภายหลังการทดสอบสมบัติเชิงกล	50
ตารางที่ 3-13	แสดงค่า Tensile strength, % elongation at break และ Young's modulus ของเส้นใยภายหลังการทดสอบสมบัติเชิงกล	52
ตารางที่ 3-14	ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงลักษณะของ loop เส้นใยสับประรดในระหว่างการวิเคราะห์ค่า compression strength	54
ตารางที่ 3-15	ลักษณะการแตกหักของเส้นใยเมื่อสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10 เท่า	56
ตารางที่ 3-16	ความชื้นเริ่มต้นของเส้นใยก่อนการดูดซับน้ำ และปริมาณการดูดซับน้ำ ณ ชั่วโมงที่ 24 ของการทดลอง	59

## 1. บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบัน โลกได้ตระหนักถึงการนำเอาแหล่งทรัพยากรธรรมชาติมาใช้อย่างระมัดระวัง และก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเฉพาะการใช้ประโยชน์จากแหล่งชีวมวลซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากและมีความหลากหลายที่ได้จากวัสดุพืชผลทางการเกษตร และสิ่งที่เหลือจากวัสดุเหล่านั้น หนึ่งในแหล่งชีวมวลที่สำคัญและมีปริมาณมากที่สุดในโลก คือ เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ ซึ่งมีปริมาณมากถึงสองแสนล้านตันที่ผลิตในแต่ละปี เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ผลิตเพียงหนึ่งพันห้าร้อยล้านตัน สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีพืชเศรษฐกิจที่สำคัญสำหรับการส่งออกและบริโภคภายในประเทศหลากหลายชนิด โดยสามารถแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ได้แก่ พืชน้ำมัน พืชอาหาร ไม้ผล ไม้ยืนต้น ซึ่งมีผลผลิตรวมของพืชสำคัญ 9 ชนิด (ภาพที่ 1-1) เป็น 142 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) และสามารถแบ่งประเภทของผลผลิตตามชนิดของพืชดังแสดงในภาพที่ 1-1

ผลผลิตพืชเกษตรที่สำคัญในประเทศไทย



ภาพที่ 1-1 ผลผลิตของพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ซึ่งให้ผลพลอยได้จากเศษเหลือทิ้ง

จากภาพที่ 1-1 จะเห็นได้ว่าแหล่งพืชเศรษฐกิจที่สำคัญซึ่งเป็นแหล่งชีวมวลที่มีอยู่แล้วในธรรมชาติ ได้แก่ อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง สับปะรด ข้าวโพด ซึ่งผลพลอยได้จากเศษเหลือทิ้งจากพืชเหล่านี้ คือ แหล่งเส้นใยเซลลูโลสของขานอ้อย ฟางข้าว กากมัน และรวมทั้งต้นมัน ใบและต้นสับปะรด ฟางและซังข้าวโพด เป็นต้น โดยสามารถให้ลักษณะเยื่อที่มีขนาดสั้นกว่าเส้นใย เหมาะสำหรับผลิตเยื่อในอุตสาหกรรมกระดาษอุตสาหกรรมแผ่นไม้ประกอบ ซึ่งมีการใช้ร่วมกับสารที่ไม่ใช่เซลลูโลส เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และมีการใช้ส่วนผสมที่เป็นกาวย่วมด้วย ส่วนพืชเส้นใยชนิดอื่นๆ ที่มีในประเทศไทย ได้แก่ ฝ้าย ลินิน ปอ ป่าน มะพร้าว กัญชง มีปริมาณการผลิตรวมสองแสนตันโดยประมาณ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า และมีการใช้ประโยชน์จากความแข็งแรงของเส้นใยสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำหรับเป็นเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม เฟอร์นิเจอร์ ผลิตภัณฑ์กระเป๋า เชือก กระสอบ ที่นอน เบาะ ปัจจุบันนี้ ความสนใจทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลกได้ตระหนักถึงการนำเอาแหล่งวัสดุธรรมชาติมาใช้ประโยชน์ โดยเฉพาะเส้นใยธรรมชาติ เช่น กัญชง กาบมะพร้าว และเส้นใยสับปะรด เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งชีวมวลของเซลลูโลสที่สำคัญ เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างพืชที่เสริมความแข็งแรงให้เซลล์พืช จึงได้มีการค้นคว้าในการนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนวัสดุสังเคราะห์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสังเคราะห์ประเภท เส้นใยแก้ว อะรามิด (aramid) และคาร์บอน พบว่า เส้นใยธรรมชาติมีราคาถูก มีความหนาแน่นต่ำ มีความเหนียวและสมบัติความแข็งแรงสูง ไม่ระคายเคืองในระบบหายใจ มีสมบัติทนความร้อน และสามารถย่อยสลายได้ จากสมบัติเหล่านี้ทำให้มีการค้นคว้าวิจัยในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม

รถยนต์ โดยเป็นส่วนประกอบของกันชนและโครงสร้างรถ เครื่องบินและเรือเดินสมุทร อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น (Reddy and Yang, 2005 ; Ghosh and Sinha, 1977)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากพืชเซลลูโลสที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือทิ้ง มีปริมาณมาก และหาแหล่งได้ง่าย รวมทั้งให้เส้นใยสั้น โดยมีรายละเอียดของปริมาณที่ผลิตได้ดังนี้

- กล้วยเป็นผลไม้เมืองร้อนที่นิยมปลูกมากในประเทศแถบร้อนชื้น โดยในปี พ.ศ. 2538 ประเทศไทยถือเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการปลูกเพื่อบริโภคภายในและส่งออก สามารถผลิตกล้วยน้ำว่าจำนวน 732,000 ไร่ กล้วยหอม จำนวน 53,560 ไร่ และกล้วยไข่จำนวน 93,000 ไร่ (นิรนาม, 2555) โดยมีปริมาณเซลลูโลส 32-48% เฮมิเซลลูโลส และอื่น ๆ 10-15% (Majumdar and Chanda, 2001 ; Kulkarni et al., 1983) โอลิเซลลูโลส 55.05% ลิกนิน 19.43% เถ้า 15.34% สารสกัดได้ 10.34% เพนโตแซน 14.78% แอลฟาเซลลูโลส 47.34% Punsuvan (1997) โอลิเซลลูโลส 76.82% ลิกนิน 12.17% เถ้า 1-3.1% เพนโตแซน 16-22% Escolano (1988) เซลลูโลส 59.13% เฮมิเซลลูโลส 17.05% Abhay (2009) เซลลูโลส 31.75% เฮมิเซลลูโลส 14.98% ลิกนิน 15.07% เถ้า 8.65% สารสกัดได้ 4.46% Bilba et.al (2007) จากองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง ทำให้มีความเป็นผลึก 45% งานวิจัยส่วนใหญ่จะมีการใช้เส้นใยกล้วยเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ต่าง ๆ ได้แก่ พอลิเอธิลีน พอลิพรีพรีน จึงมีความสนใจในการนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในงานวิจัยนี้

- สับปะรด มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Ananus comosus (L.) Merr.* อยู่ในวงศ์ Bromeliaceae สับปะรดเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกมาก โดยในปี 2553 มีพื้นที่ปลูกประมาณ 601,090 ไร่ สับปะรดหลังจากเก็บผลแล้วจะเหลือลำต้นซึ่งมีน้ำหนักเฉลี่ย 3.5 กิโลกรัมต่อลำต้น ดังนั้นในแต่ละปีจะมีลำต้นสดถึง 14.58 – 23.69 ล้านตัน ลำต้นสดนี้จะมีส่วนของลำต้น 12.15% และใบ 87.85% คิดเป็นน้ำหนักของใบสดถึง 12.81 – 20.82 ล้านตัน ใบสับปะรดสดจะมีเส้นใยอยู่ 2–3% (วิชัย และคณะ, 2548) ดังนั้นจะได้เส้นใยสับปะรดสดถึง 256.25–624.61 ตัน เส้นใยจำนวนดังกล่าวนี้ได้มีการนำมาใช้ผลิตเป็นวัสดุประกอบพลาสติก และเยื่อกระดาษ หรือการจักสานสำหรับหัตถกรรมและบรรจุภัณฑ์ แต่ส่วนที่เป็นเส้นใยในต้นสับปะรด สามารถคิดเป็นน้ำหนักของต้นสด (ไม่รวมใบ) 1.77-2.87 ล้านตัน ซึ่งเกษตรกรมักจะกลบฝังดิน เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผล จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่น่าจะนำมาใช้ประโยชน์เพื่อให้เกิดมูลค่า โดยสามารถให้เส้นใยได้ 30% (วุฒินันท์ , 2551) คิดเป็น 531,000 -861,000 ตัน เส้นใยสับปะรดมีปริมาณเซลลูโลส 70-80% โอลิเซลลูโลส 67.05% ลิกนิน 17.41% เถ้า 5.98% สารแทรกที่ละลายในเอทานอล+เบนซีน 11.23% เพนโตแซน 24.34% แอลฟาเซลลูโลส 49.22% (วิทยา, 2540) และระดับความเป็นผลึก crystallinity สูง ทำให้สมบัติของแรงดึงและมอดุลัสสูง 400-1600 MPa และ 59 GPa ตามลำดับ (Mohanty et al., 2000) มีงานวิจัยที่น่าเอาเส้นใยสับปะรดไปใช้ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอธิลีน พอลิพรีพรีน และ ยาง (Liu, 2005 ; Arib et al., 2006 ; Mangal et al., 2003 ; Luo and Netravali, 1999 ; George et al., 1996) และโดยเฉพาะถือเป็นแหล่งชีวมวลสำคัญที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลสับปะรดของอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง ซึ่งเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศ ซึ่งเกษตรกรมักจะกลบฝังดิน เมื่อทำการเก็บเกี่ยวผล จึงถือได้ว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่น่าจะนำมาใช้ประโยชน์เพื่อให้เกิดมูลค่า โดยสามารถให้เส้นใยได้ 30% (วุฒินันท์, 2551) คิดเป็น 531,000 -861,000 ตัน

- มะพร้าว (Coconut) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera Linn.* เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจพืชหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยนิยมใช้เนื้อมะพร้าวบริโภคเป็นอาหาร ทั้งคาวและหวาน คนไทย 1 คน บริโภคเนื้อมะพร้าวปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมะพร้าวอ่อนและมะพร้าวน้ำหอมจำนวน 181,779 ไร่ และมะพร้าวแก่ 1,842,455 ไร่ ให้ผลผลิตมะพร้าวอ่อนและมะพร้าวน้ำหอม 636,226,500 ผล และมะพร้าวแก่ 6,448,592,500 ผล ในปีเพาะปลูก 2552 มีพื้นที่ปลูกมะพร้าวทั้งประเทศ 1,493,000 ไร่ ได้ผลผลิตจำนวน 1,381,000 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) มะพร้าว 1 ผล จะให้กาบแห้ง 0.2 กิโลกรัม ดังนั้นจะได้กาบมะพร้าวอ่อนแห้งถึง 1,272,453 กิโลกรัม กาบมะพร้าวนี้ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ปล่อยให้ทิ้งไป หากนำมาผลิตเยื่อและเส้นใยจะช่วยสร้างมูลค่าให้ได้มาก

กาบมะพร้าวอ่อนหรือมะพร้าวน้ำหอมจะมีส่วนของกาด้านใน และผิวเปลือกสีเขียวด้านนอก การใช้ประโยชน์จะใช้เฉพาะกาด้านในประมาณ 79.50% ส่วนผิวเปลือกสีเขียวด้านนอกประมาณ 20.50% จะไม่ใช้กาด้านในนี้เมื่อแห้งแล้วจะเหลือน้ำหนักแห้ง 23.25% ส่วนนี้จะนำมาผลิตเยื่อและเส้นใย ถ้าต้มกาด้วยสารโซดาไฟ 15% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง จะได้เยื่อที่เป็นส่วนของชุย 31.81% และเส้นใย 68.19% (วุฒินันท์, 2551) เซลลูโลส 35.55% เฮมิเซลลูโลส 25.80% ลิกนิน 15.01% (วิทวัส และคณะ, 2554)

- กัญชง เป็นพืชที่เดิมนักวิทยาศาสตร์ได้จัดให้อยู่ในวงศ์ตำแย (Urticaceae) แต่ต่อมาภายหลังพบว่ามีความสัมพันธ์และลักษณะเฉพาะหลายประการที่ต่างออกไปจากพืชในกลุ่มตำแย จึงได้รับการจำแนกออกเป็นวงศ์เฉพาะ คือ Cannabidaceae เส้นใยกัญชงเป็นเส้นใยที่มีคุณภาพสูง มีความยืดหยุ่น แข็งแรงและทนทานสูง สามารถใช้เป็นตัวเติมในการทำผลิตภัณฑ์จากเส้นใยได้กว่า 5,000 ชนิด ตั้งแต่เชือกจนถึงเส้นใยที่ละเอียด ส่วนเส้นใยคุณภาพต่ำหรือกากเส้นใย ซึ่งประกอบไปด้วยเซลลูโลสกว่า 77 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยเปลือกกัญชงมีความยาวเฉลี่ย 3.56 มิลลิเมตร สั้นกว่าเส้นใยเปลือกปอสาที่มีความยาวเฉลี่ย 7.3-9.56 มิลลิเมตร ส่วนเนื้อไม้มีความยาวเฉลี่ย 0.70 มิลลิเมตร สั้นกว่าเส้นใยยูคาลิปตัสที่มีความยาวเฉลี่ย 1.0 มิลลิเมตร และสนสามใบมีความยาวเฉลี่ย 5.93 มิลลิเมตร กัญชงมีลิกนินในเปลือกประมาณ 6.44% และเนื้อไม้มีประมาณ 27.46% เนื้อไม้จะได้เยื่อเฉลี่ย 49.23% (วิวัฒน์ และคณะ, 2548) เปลือกกัญชงอายุ 91 วัน จะมีสารแอลฟาเซลลูโลส 56.74 % เฮมิเซลลูโลส 14.24 % เพคติน 12.34 % ลิกนิน 4.24 % และอื่นๆ 12.44 % เปลือกอายุ 142 วันจะมีสารแอลฟาเซลลูโลส 54.15 % เฮมิเซลลูโลส 12.28 % เพคติน 14.51 % ลิกนิน 7.05 % และอื่นๆ 11.98 % เปลือกส่วนปลายมีเซลลูโลส 44.90 % ส่วนกลางต้นมี 45.66 % และส่วนโคนต้นมี 48.77 % Gang (2012) เปลือกกัญชงอายุ 90-120 วัน จะได้เยื่อเฉลี่ย 59.64% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง (ปทุมทอง และวุฒินันท์, 2547) สูงกว่าเยื่อปอสาเกรด A ที่จะได้เยื่อเฉลี่ย 40-45% (วุฒินันท์, 2551) นั้น สามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆกว่า 25,000 ชนิด นับตั้งแต่เป็นส่วนผสมของดินระเบิดหรือ โดนาไมท์ จนถึงการทำแผ่นเยื่อบางเซลโลเฟน อย่างไรก็ตาม ความต้องการของตลาดเส้นใยกัญชงในปัจจุบันนี้มีอยู่ 2 ประการ คือ ใช้เป็นตัวเติมในการผลิตผ้าและกระดาษ ในการเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยจากการปลูกกัญชงและการปลูกฝ้ายในระยะเวลา 1 ปี เท่า ๆ กัน พบว่า การปลูกกัญชง 10 ไร่ จะให้ผลผลิตผลเส้นใยเท่ากับการปลูกฝ้าย 20-30 ไร่ ซึ่งเส้นใยจากกัญชงนี้จะมีคุณภาพดีกว่าเส้นใยจากฝ้าย โดยเส้นใยกัญชงจะยาวเป็น 2 เท่าของเส้นใยฝ้าย มีความแข็งแรงและความนิ่มของเส้นใยมากกว่าฝ้าย จากข้อดีของเส้นใยกัญชงจะเห็นได้ว่า ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากเส้นใยกัญชง 100 เปอร์เซ็นต์ เช่น เสื้อยืด กางเกง กระเป๋า ฯลฯ ถึงแม้ว่าเส้นใยกัญชงจะให้ผ้าที่เกิดรอยยับง่าย แต่ลักษณะของเส้นใยที่สามารถลอกออกเป็นชั้นๆ คล้ายหัวหอม สามารถนำมาผลิตเป็นผ้าบางได้เท่าที่ต้องการ และยังสามารถซักด้วยเครื่องซักผ้าได้ โครงสร้างของเส้นใยทำให้ผ้าที่สวมใส่เย็นสบายในฤดูร้อน อบอุ่นและสบายในฤดูหนาวและคุณสมบัติของเส้นใยที่แข็งแรงกว่าผ้าฝ้าย ดูดซับความชื้นได้ดีกว่าไนลอน อบอุ่นกว่าลิกนิน ทั้งยังเบา สวมใส่สบาย ก็เป็นปัจจัยที่ทำให้เส้นใยกัญชงเริ่มเข้ามาเป็นคู่แข่งที่สำคัญของตลาดเส้นใยธรรมชาติ

กัญชง ในปัจจุบันจัดเป็นพืชห้ามปลูกตามกฎหมาย ยกเว้นเพื่อการศึกษา ค้นคว้า วิจัย ที่ต้องตามกฎหมาย ยกเว้นเพื่อการศึกษา ค้นคว้า วิจัย ที่ต้องขออนุญาตพิเศษ แต่ในหลายประเทศ เช่น แคนาดา และจีน จัดเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศ เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษหลายประการ คือ การให้เส้นใยที่มีคุณภาพสูงจำนวนมาก และในระยะเวลาสั้นสามารถนำไปถักทอเสื้อผ้า เชือก กระสอบ ทำกระดาษ หรือเครื่องใช้ต่างๆ ประเทศไทยยังมีข้อมูลจริงของกัญชงน้อยมาก ส่วนใหญ่จะได้จากเอกสารอ้างอิงของต่างประเทศ และเนื่องจากสภาพทางกายภาพของพื้นที่และชนิดพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับปลูกในประเทศไทย จะต่างกับของต่างประเทศ จึงต้องมีการศึกษาข้อมูลด้านต่างๆของกัญชง ที่ปลูกในประเทศไทยโดยละเอียดทั้งด้านกรรมวิธีการปลูกให้ได้ผลผลิตสูงสุด และข้อมูลเชิงปริมาณและคุณภาพ

- ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) ชื่อวิทยาศาสตร์ *Elaeis guineensis* Jacq เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันสูง เหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น จัดอยู่บริเวณใกล้เคียงกับเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเจริญเติบโตได้ดีใน

ภาคใต้ของประเทศ บริเวณพื้นที่ที่ปลูกมากที่สุด คือจังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล และ ตรัง โดยจังหวัดกระบี่ปลูกมากที่สุดจำนวน 537,637 ไร่ คิดเป็น 39.40% และรองลงมาได้แก่จังหวัดสุราษฎร์ธานี 405,213 ไร่ และจังหวัดชุมพร 216,798 ไร่ คิดเป็น 29.70% และ 15.89% ของพื้นที่ปลูกทั้งประเทศตามลำดับ ในปี 2550 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน 3,197,625 ไร่ มีพื้นที่ให้ผลผลิต 2,663,252 ไร่ มีผลผลิตปาล์มทั้งหมด 6,389,983 ตัน (นิรนาม 2552.) ทะลายปาล์มน้ำมันสดจะมีน้ำหนักโดยเฉลี่ย 22.5 กิโลกรัม และถ้าปีปลูกปาล์มออกจากทะลายแล้วจะได้ทะลายเปล่าแห้งมีน้ำหนักทะลายละ 1.184 กิโลกรัม ทะลายปาล์มน้ำมันสดเมื่อปีปลูกปาล์มออกแล้วจะได้ทะลายเปล่าแห้งมีน้ำหนักเพียง 5.26% ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มรวมทั้งหมด 37 โรงงาน สามารถผลิตได้ 1,715 ตัน/ชั่วโมง ดังนั้น ในแต่ละปีจะเหลือทะลายเปล่าแห้งประมาณ 399,373.94 ตัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันนี้โรงงานขายทะลายปาล์มเปล่าราคากิโลกรัมละ 25 -75 สตางค์ ในกาบปาล์มน้ำมันจะมี โอลิเซลลูโลส 69.36% ลิกนิน 8.47% เถ้า 1.29% สารแทรกที่ละลายในเอทานอลผสมเบนซิน 7.75% เพนโตแซน 26.64% และแอลฟาเซลลูโลส 54.24% ขององค์ประกอบ (วิทยา, 2540) มีลิกนิน 15.2% โอลิเซลลูโลส 82.2% แอลฟาเซลลูโลส 47.6% สารแทรกที่ละลายในแอลกอฮอล์และเบนซิน 1.4% เถ้า 0.70% สารในโพลิแซคคาไรด์ ประกอบด้วย Arabinose 1.5% Mannose 2.2% Galactose 0.9% Glucose 66.6% และ Xylose 28.9% (Wanrosli et al., 2007)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจที่จะศึกษาเส้นใยเซลลูโลสจากแหล่งชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย ได้แก่ กาบหรือใบกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย กาบมะพร้าว และ ทะลายปาล์มน้ำมัน ซึ่งสามารถนำมาสกัดเส้นใยที่มีความยาวอย่างน้อย 3 เซนติเมตร เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่สำคัญ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ลักษณะสัณฐานของพื้นผิวเส้นใยและพื้นที่หน้าตัด การตรวจสอบหุ้มฟังก์ชันภายในเส้นใยด้วยเทคนิค FTIR สมบัติเชิงกลของเส้นใย คุณสมบัติในการดูดซับน้ำของเส้นใย ซึ่งเป็นการบ่งบอกความสามารถในการนำเส้นใยดังกล่าวไปใช้เสริมแรงกับพอลิเมอร์ โครงการนี้ถือเป็นการต่อยอดจากโครงการรหัส ว-ท(ช) 5.50 ชื่อโครงการการใช้เส้นใยสับปะรดเป็นวัสดุเสริมแรงในพลาสติก (Pineapple fiber for reinforced plastic) ซึ่งได้รับทุนจาก สวพ. และโครงการการใช้ประโยชน์กากมะพร้าว และทะลายปาล์มน้ำมัน ด้านการเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต ภายใต้ชุดโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาหน่วยปฏิบัติการวิจัยเชี่ยวชาญเฉพาะ (SRU) เรื่อง โครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีเส้นใยธรรมชาติและพลังงานทดแทน ปี 2552 อีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

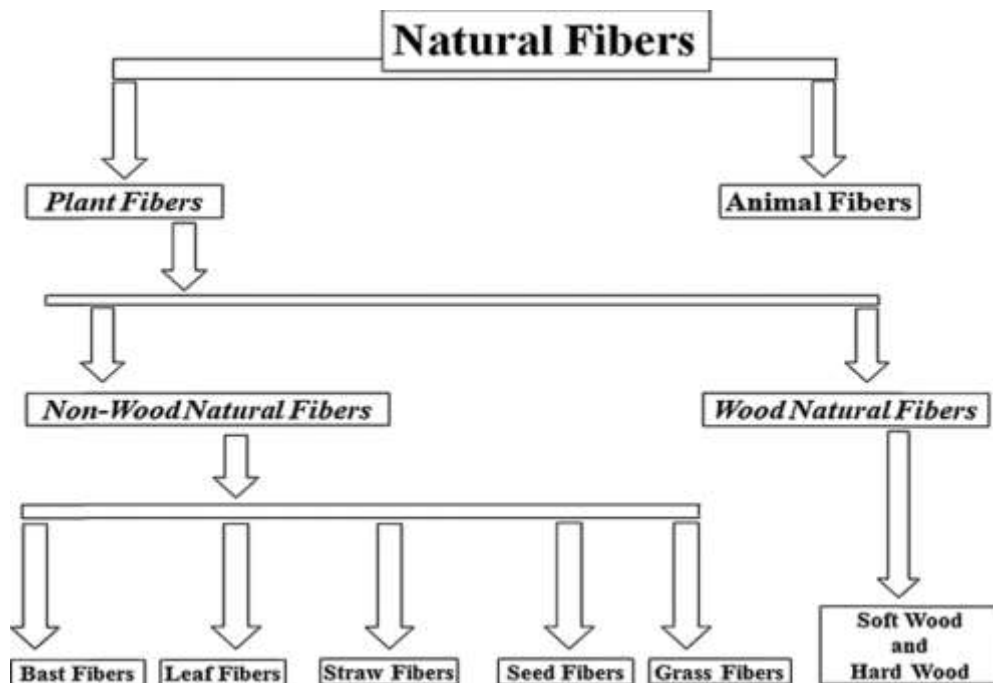
- 1.2.1 เพื่อเป็นเตรียมเส้นใยที่ได้จากแหล่งชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะสัณฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางพื้นผิว ซึ่งจะทำการนำไปใช้งานในการนำไปเป็นสารเสริมแรงคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิเอธิลีน และ พอลิแลคติกแอซิด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาทางกายภาพที่สำคัญ เช่น สมบัติทางเชิงกล สมบัติการดึงระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ (pull-out test) สมบัติการดูดซับน้ำ เพื่อนำเส้นใยดังกล่าวมาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิเอธิลีน และ พอลิแลคติกแอซิด

## 1.3 การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.3.1 เส้นใยธรรมชาติ (Natural fiber)

เส้นใยธรรมชาติ ถือเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural polymer) โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามแหล่งที่มา ได้แก่ เส้นใยจากสัตว์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นโปรตีน และเส้นใยจากพืชที่เป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Thakur and Thakur, 2014) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเส้นใยจากพืช หรือเส้นใยเซลลูโลส ที่มีปริมาณการผลิตที่สูงถึงสองแสนล้านตันต่อปี (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553) เส้นใยจาก

พืชสามารถแบ่งได้เป็น เส้นใยจากไม้ยืนต้น ทั้งไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง และเส้นใยจากพืชที่ไม่ใช่ไม้ โดยสามารถจัดกลุ่มเส้นใยประเภทหลังนี้ตามแหล่งที่มาของเส้นใยได้เป็น เส้นใยที่ได้จากส่วนที่เป็นเปลือก เช่น ป่าน ปอ ปอกระเจา กัญชง เส้นใยที่ได้จากส่วนที่เป็นใบ เช่น เส้นใยจากใบสับปะรด เส้นใยจากที่ได้จากส่วนที่เป็นเมล็ด หรือผล เช่น ฝ้าย กาบมะพร้าว ปาล์มน้ำมัน เส้นใยจากฟาง เช่น ฟางข้าว ฟางข้าวโพด และเส้นใยจากหญ้า เป็นต้น (ภาพที่ 1-2)



ภาพที่ 1-2 การจำแนกประเภทของเส้นใยธรรมชาติ  
ที่มา: Thakur and Thakur (2014)

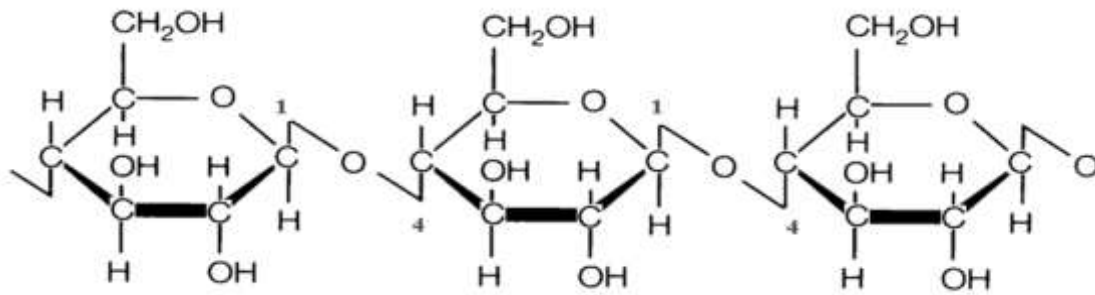
เส้นใยจากหญ้า ได้มาจากส่วนของลำต้นของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (Monocotyledonous plants) ตัวอย่างเช่น ใผ่ ชานอ้อย หญ้า ส่วนเส้นใยจากฟาง เป็นวัสดุเหลือใช้หลังการเก็บเกี่ยวธัญพืช ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวเช่นกัน ในกรณีของฝ้าย ซึ่งเป็นเส้นใยจากส่วนที่เป็นเมล็ด จะปรากฏในรูปของเส้นใยเดี่ยว ไม่รวมตัวกันเกิดเป็นมัดของเส้นใยดังกรณีของเส้นใยจากส่วนที่เป็นเปลือกและใบพืช ที่พบในส่วนเปลือกใน (Bast หรือ Phloem) ของพืชใบเลี้ยงคู่ (Dicotyledonous plants) และตามแนวความยาวของใบพืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยว ตามลำดับ ซึ่งช่วยเสริมให้เกิดความแข็งแรงแก่ลำต้นและใบของพืช นอกจากนี้ รูปร่างและจำนวนของเส้นใยจากลำต้นนี้จะมี ความหลากหลายขึ้นอยู่กับสภาวะในการเจริญของพืช (Thakur and Thakur, 2014)

### 1.3.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย

อาจกล่าวได้ว่า เส้นใยธรรมชาติ เกิดจากการรวมตัวกันขององค์ประกอบทางเคมีหลากหลายชนิด ซึ่งมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของเส้นใย องค์ประกอบที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่

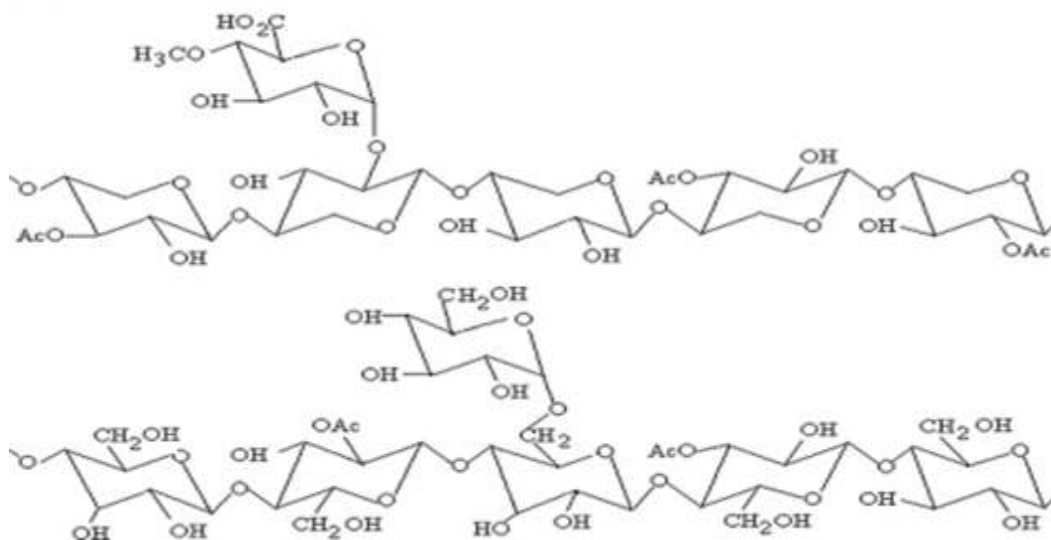
1) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบขนาดใหญ่ที่ไม่มีกิ่งก้านสาขา เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อย  $\beta$ -d-anhydroglucopyranose หรือน้ำตาลกลูโคส ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ของโมเลกุลน้ำตาลเป็นสายโซ่ตรง (ภาพที่ 1-3) ความยาวของสายโซ่เซลลูโลส ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของเซลลูโลส โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติจะประกอบไปด้วยเซลลูโลสประมาณ 60-70 % (Thakur and Thakur, 2014) และเป็น

ส่วนประกอบที่ก่อให้เกิดความต้านทานต่อแรงกระทำ ความแข็งแรง และความเสถียรของโครงสร้างแก่เส้นใยธรรมชาติ (Kabir et al. 2013a)



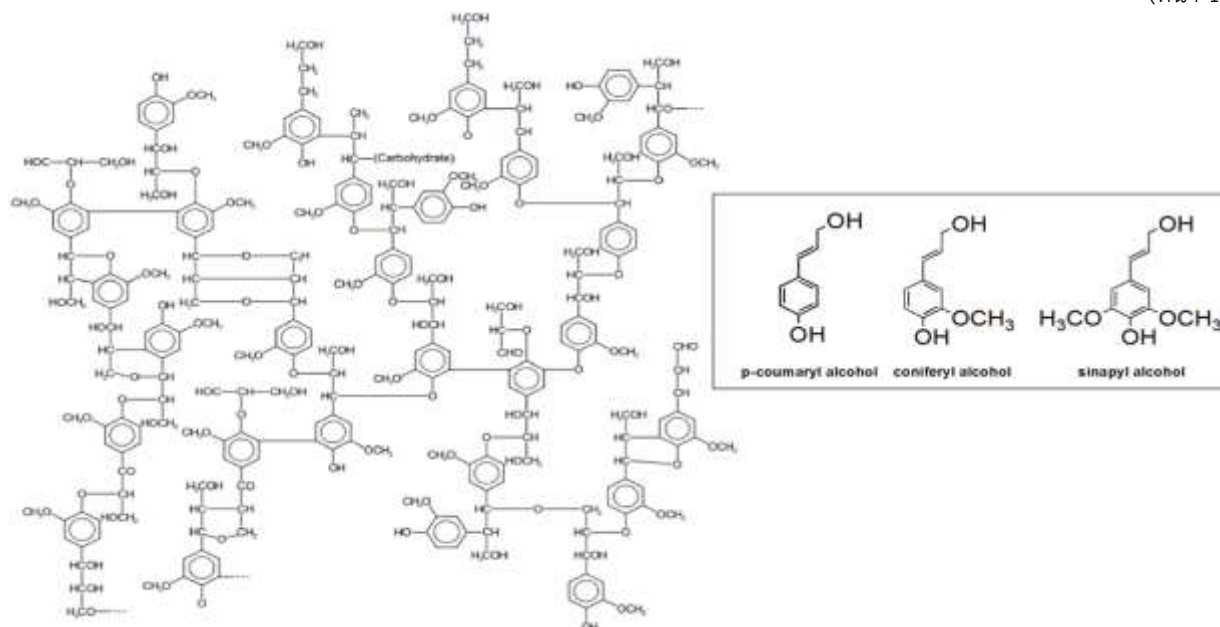
ภาพที่ 1-3 โครงสร้างของเซลลูโลส  
ที่มา: พิมพ์เพ็ญและนิธิยา (2553)

2) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของวงโมเลกุลของน้ำตาลที่มีจำนวนคาร์บอน 5-6 อะตอมต่อโมเลกุล เป็นโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) ที่มีโครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส และปริมาณที่พบในเส้นใยมีค่าน้อยกว่าเซลลูโลส (ภาพที่ 1-4) ตัวอย่างของสารประกอบประเภทนี้ คือ เพคติน หน้าที่หลักของเฮมิเซลลูโลสคือช่วยยึดโครงสร้างส่วนเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ในการทำให้เกิดเจล หรือเป็นสารเพิ่มความหนืดในอุตสาหกรรม (Thakur and Thakur, 2014)



ภาพที่ 1-4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส  
ที่มา: Thakur and Thakur (2014)

3) ลิกนิน (Lignin) เป็นองค์ประกอบภายในผนังเซลล์ของเส้นใยที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขามากที่สุด ประกอบด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนของหน่วย phenyl propane 3 ชนิด ได้แก่ p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol และ sinapyl alcohol (Christopher et al., 2014) จัดวางตัวในรูปแบบสามมิติ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะระหว่างคาร์บอนหลากหลายรูปแบบ (ภาพที่ 1-5) มีหน้าที่ในการปกป้องเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากสภาวะแวดล้อมที่จะก่อให้เกิดการสีกกร่อน เช่น น้ำ (Thakur and Thakur, 2014)



ภาพที่ 1-5 โครงสร้างของลิกนิน  
ที่มา: Christopher et al. (2014)

4) สารแทรก (Extractive) คือสารที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างผนังเซลล์ มีค่าพีเอช (pH) อยู่ในช่วงกรดหรือเป็นกลาง ตัวอย่างเช่น เรซิน หรือสารประกอบโพลีฟีนอลต่างๆ และสารประกอบประเภท Waxes ในพืชแต่ละชนิดจะมีสารแทรกที่แตกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดคุณสมบัติเฉพาะตัวของพืช โดยเป็นองค์ประกอบอยู่ในพืชเพียงประมาณ 5-10% ซึ่งรวมไปถึงสารส่วนน้อยที่ทำให้เกิดเถ้า เช่น สารประกอบ โพลีแซคคาไรด์ แคลเซียม ฟอสเฟส และซิลิกา (สุรชัย, 2557)

เส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบทางเคมี คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในปริมาณที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติแสดงได้ในตารางที่ 1-1

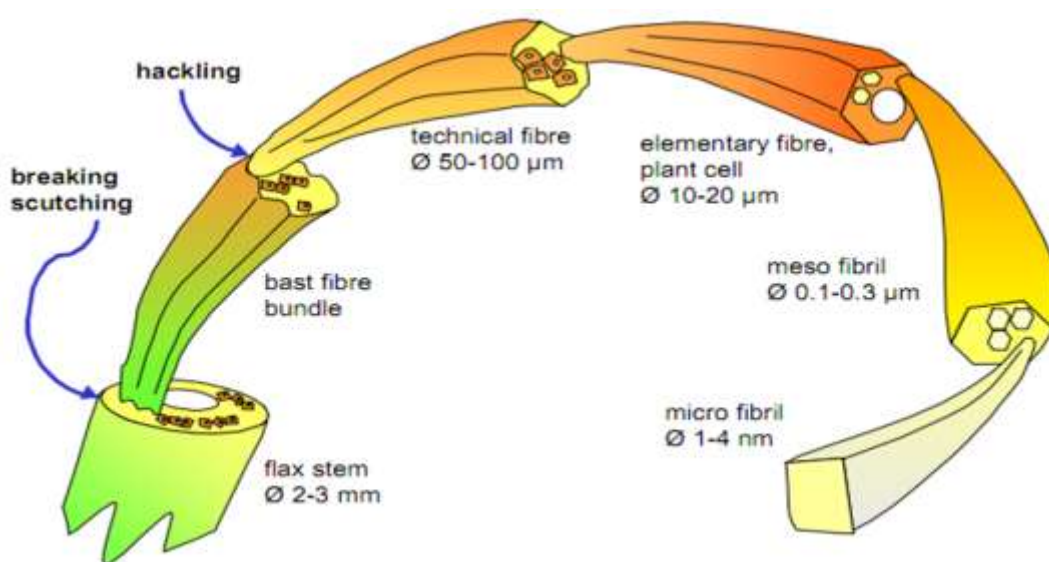
ตารางที่ 1-1 ส่วนประกอบของเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดของเส้นใยธรรมชาติ	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ปอกระเจา	61-72	13.6-20.4	12-13
ปอลินิน	71	18.6-20.6	2.2
กล้วย	60-65	6-8	5-10
สับปะรด	70-82	18	5-12
ซังข้าวโพด	38-40	28	7-21
ฟางข้าว	28-36	23-28	12-14
ชานอ้อย	32-48	19-24	24-32
ไม้ไผ่	26-43	ns	21-31
ป่านศรนารายณ์	67-78	10-14.2	8-11
กาบมะพร้าว	36-47	15	31
ปาล์มน้ำมัน	48	17	20-25
ฝ้าย	82.7	5.7	-

(Kroschwitz, 1990 ; Reddy and Yang, 2005)

### 1.3.1.2 โครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยที่มีความแข็งแรงและความเหนียวเหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุคอมพอสิตคือ เส้นใยที่ได้จากบริเวณเปลือกของลำต้นพืช เช่น ป่าน งามี้ กัญชง (หลุ่ย, 2551) โดย Bos (2004) ได้อธิบายลักษณะโครงสร้างของเส้นใยจากเปลือกลำต้นของป่าน (Flax) (ภาพที่ 1-6) ว่าลำต้นเกิดจากรวมตัวกันของมัดเส้นใย (Fiber หรือ Fibre bundles) จำนวนมาก ล้อมรอบบริเวณแกนกลาง (Coir) ในแต่ละมัดของเส้นใยประกอบด้วย Technical fibres จำนวนหลายเส้นที่ถูกเชื่อมกันด้วยสารตัวกลางประเภทเพคตินที่มีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และเมื่อสังเกตตามแนวภาพตัดขวาง ภายใน Technical fibres แต่ละเส้นจะประกอบไปด้วย Elementary fibres ซึ่งเป็นเซลล์เส้นใยเดี่ยว จำนวน 10-40 เส้น Elementary fibres นี้มีความยาวของเซลล์ประมาณ 2-5 เซนติเมตร และจะวางตัวซ้อนทับกันตามแนวยาวของเส้นใย โดยเชื่อมกันด้วยสารตัวกลางคือเพคตินหรือเฮมิเซลลูโลสชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 1-6 โครงสร้างภายในของเส้นใยจากลำต้นป่าน  
ที่มา: Bos (2004)

ภายในเส้นใยเดี่ยวหรือ Elementary fiber จะประกอบไปด้วยผนังเซลล์ 2 ชั้น คือ primary cell wall และ Secondary cell wall และช่องตรงกลางเซลล์ที่เรียกว่า Lumen โดยผนังเซลล์ชั้นนอกสุดหรือ primary cell wall มีลักษณะเป็นชั้นบางๆ มีความหนาเพียง 0.2 µm ประกอบไปด้วยสารประเภท wax เคลือบอยู่ที่ผิวหน้า ส่วนชั้น Secondary cell wall เป็นชั้นที่อยู่ถัดเข้ามาด้านใน มีความหนาเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย ประกอบไปด้วยเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบ (Crystalline cellulose) หรือที่เรียกว่า Microfibril ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีขนาดเล็ก เรียงตัวกันแบบเวียนขวา สลับกับเซลลูโลสที่จัดเรียงตัวแบบไร้ทิศทาง (Amorphous cellulose) การรวมตัวกันของ Microfibril ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ที่เรียกว่า Meso fibril โดยมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นตัวประสานระหว่าง Microfibrils

### 1.3.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติ

การประยุกต์ใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต มีจุดประสงค์เพื่อให้วัสดุคอมพอสิตมีความแข็งแรงที่ดีขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลส โดยปัจจัยต่างๆ ที่

ส่งผลต่อความแข็งแรงของเซลลูโลสได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณที่พบในเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วยเซลลูโลสเป็นโครงสร้างหลัก ภายในเซลลูโลส ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH, Hydroxyl group) เป็นจำนวนมาก หมู่ฟังก์ชันนี้สามารถทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ทั้งภายในสายโซ่โมเลกุลเดียวกัน และระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่ต่างกันได้ ซึ่งพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลนี้ทำให้เซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีความแข็งแรง (Bos, 2004) นอกจากนี้โครงสร้างการจัดเรียงตัวของสายโซ่ Microfibril ของเซลลูโลสก็ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติเช่นกัน โดย Mukhopadhyay et al. (2008) กล่าวว่าปริมาณเซลลูโลสที่สูง และมุมระหว่าง Microfibril ที่ต่ำ ส่งผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลของเส้นใยจากเปลือกของลำต้นพีชมีค่าที่สูง ในส่วนของสารประกอบเฮมิเซลลูโลสที่ช่วยยึดจับ Microfibril ของเซลลูโลส มีส่วนช่วยทำให้เกิดความแข็งแรงแก่เส้นใยธรรมชาติ Marrot et al. (2013) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่างเพคตินในรูปแบบโครงสร้างและเพคตินในรูปของร่างแห มีอิทธิพลต่อความทนทานของเส้นใยธรรมชาติ ส่วนลิกนิน เมื่ออยู่ร่วมกับเฮมิเซลลูโลส จะมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาโครงสร้างของเส้นใยในกรณีที่มีแรงมากระทำต่อเส้นใย (Kabir et al., 2013b)

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีจะมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติแล้ว ขนาดของเส้นใยเดี่ยวก็ส่งผลต่อความแข็งแรงของเส้นใยธรรมชาติเช่นกัน โดยเส้นใยที่มีขนาดเล็ก จะมีค่า Young's Modulus และ ultimate strength ที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของเส้นใยที่มีค่าสูง เนื่องจากเส้นใยมีโอกาสพบส่วนที่มีปัญหาหรือจุดอ่อนของโครงสร้างที่จะนำไปสู่การแตกหักของเส้นใย มากกว่าเส้นใยที่มีขนาดเล็ก (Marrot et al., 2013) นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างปริมาณผนังเซลล์และช่องว่างภายในผนังเซลล์ หรือความหนาแน่นของเส้นใยก็มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยที่เท่ากัน เส้นใยที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความคงทนและแข็งแรงมากกว่าเส้นใยที่มีความหนาแน่นต่ำ (Tran et al., 2014)

### 1.3.2 คอมโพสิต (composites)

#### 1.3.2.1 การใช้เส้นใยเสริมแรงในคอมโพสิต

คอมโพสิต (composites) นั้น ประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทหรือมากกว่า 2 ประเภทขึ้นไปผสมรวมตัวกัน โดยมีวัสดุประเภทหนึ่งเป็นเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ และวัสดุอีกประเภทหนึ่งเป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์นั้น ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดนั้นอาจมีสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะอย่าง ดังนั้นการผสม (blend) หรือการเติมสารตัวเติม (filler) บางชนิดเข้าไปจะช่วยให้วัสดุที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น และมีความหลากหลายขึ้น โดยที่วัสดุหรือสารที่ผสมเข้าไปนั้นอาจเข้าไปปรับหรือเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างของวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่คุณสมบัติบางอย่างอาจถูกจำกัดหรือด้อยลงไป (Nielsen and Landel, 1994)

งานวิจัยพอลิเมอร์คอมโพสิต ส่วนใหญ่ที่ทำการศึกษามากใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่ไม่ใช่ไม้ยืนต้น ได้แก่ สับปะรด (George et al., 1998 ; Arib et al., 2006 ; Chollakup et al., 2011) มะพร้าว (Brahmakumar et al., 2005 ; Chollakup et al., 2013) ปอกระเจา (Karmaker and Youngquist, 1996) ป่านศรนารายณ์ (Joseph et al., 2003) กล้วย (Idicula et al., 2005 ; Sapuan et al., 2006) ปาล์ม (Khalid et al., 2008 ; Chollakup et al., 2013) เป็นต้น โดยมีการแบ่งประเภทของเส้นใยที่นำมาใช้เป็น 4 ประเภท คือ

- 1) เส้นใยจากขนของเมล็ด ได้แก่ ฝ้าย เป็นต้น
- 2) เส้นใยจากลำต้นที่เป็นท่อลำเลียงน้ำอาหาร ได้แก่ งามิ ปอกระเจา ชานอ้อย กล้วย เป็นต้น
- 3) เส้นใยจากใบ ได้แก่ สับปะรด ป่านศรนารายณ์ เป็นต้น
- 4) เส้นใยอื่น ๆ เช่น จากเยื่อหุ้มผล เช่น มะพร้าว จากกาบใบ เช่น ฟางข้าว

ซึ่งมีการนำมาใช้ทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมี หรือ การฉายแสง เป็นต้น เพื่อทำการผสมกับพอลิเมอร์ประเภท เทอร์โมเซต (thermoset) ได้แก่ พอลิเอสเทอร์ และอีพอกซี เป็นต้น และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ได้แก่ พอลิพรอพิลีน (polypropylene) และ พอลิเอทิลีน (polyethylene) อะคริลิก

(acrylic) ไนลอน (polyamide) และ พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) เป็นต้น โดยมีกระบวนการขึ้นรูปได้หลายวิธี คือ การผสมในเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ (extruder) และฉีดขึ้นรูปในเครื่อง injection molding หรือการเรียงตัวขึ้นรูปเป็นชั้น ๆ ด้วยเครื่อง compression molding ซึ่งผลที่ได้พบว่า การผสมเส้นใยเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ทั้งสองประเภทนี้ ทำให้สมบัติของยังมอดูลัส และแรงดึง เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ผสมเส้นใย

การใช้เส้นใยเสริมแรงนี้ขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญ คือ กระบวนการผลิต ปริมาณเส้นใย ความยาวและขนาดของเส้นใย และการจัดเรียงตัวของเส้นใย เป็นต้น โดยที่กระบวนการผลิต จะมีผลต่อการเตรียมสารขึ้นต้นและการผสมเส้นใยลงในพอลิเมอร์เพื่อขึ้นรูป ปริมาณเส้นใย ซึ่งพบว่า เส้นใยซึ่งมีความหนาแน่นต่ำหรือมีปริมาตรสูง ทำให้จำกัดปริมาณการใช้เส้นใย ซึ่งไม่มากไปกว่า 50% ความยาวของเส้นใย ซึ่งจะเป็นตัวชี้ถึงกระบวนการผลิตที่ใช้ เช่น เส้นใยสั้น ต่ำกว่า 5 มม. ใช้ผสมในเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ เส้นใยยาวขนาด 30 มม. ใช้การจัดเรียงตัว และขึ้นรูปด้วยการทำเป็นเส้นใยไม่ถักทอ แล้วจึงนำมาอัดกับพอลิเมอร์ด้วยวิธี Compression molding เป็นต้น การเรียงตัวของเส้นใย ในแนวเดียวกัน หรือ แบบสุ่ม ซึ่งจะมีผลต่อความแข็งแรงของคอมพอสิต และการใช้งาน เป็นต้น นอกจากนี้ การเตรียมเส้นใยสำหรับนำมาเสริมแรง มีผลสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของคอมพอสิต โดยที่อัตราส่วนของเส้นใย ผิวหน้าเส้นใยและเมตริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งจะบ่งบอกการประสานกันดีระหว่างเส้นใยในเมตริกซ์ ซึ่งจะเพิ่มการยึดเกาะที่ดี และมีบทบาทสำคัญต่อการถ่ายแรงเค้นจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไปยังเส้นใย ส่งผลกระทบต่อคอมพอสิต (Saheb and Jog, 1999)

### 1.3.2.2 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในคอมพอสิต

พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติแข็งแรง เหนียว ทนทาน ป้องกันความชื้นมิให้ผ่านเข้าออกได้ แต่ให้ก๊าซต่างๆ ซึมผ่านได้ ทนกรดและด่างอ่อน ไม่ทนน้ำมันและไขมัน โดยเฉพาะน้ำมันก๊าซ และน้ำมันเบนซิน มีน้ำหนักเบา ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.93 ในรูปแผ่นบาง สามารถพับงอได้ดี มีความยืดตัวได้สูง ฉีกขาดยาก เป็นฉนวนไฟฟ้าดีมาก ไม่สามารถทนความร้อนสูง แต่ทนความเย็นได้ถึง  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยทั่วไปพอลิเอทิลีนสามารถแบ่งได้ตามเกรดเป็น 3 ชนิดคือ

a) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene - LDPE) ใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์และหีบห่อ เช่น กระสอบ ถุงเย็น ซองใส่ของ ตลอดจนเป็นวัตถุดิบผลิตของเล่นเด็กพลาสติกและฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ทำวัสดุเคลือบผิว (coating or lamination) และใช้กับงานขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกโดยการเป่า (blow molding) เช่น ขวดพลาสติก คุณสมบัติเด่นของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชนิดนี้คือ มีความเหนียว และคงทน และมีสมบัติของ LDPE ดังแสดงใน ตารางที่ 1-2

b) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high-density polyethylene - HDPE) ใช้กับงานเป่าขึ้นรูป (blow moulding) โดยใช้ทำเป็นขวดพลาสติกและภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ ที่ต้องทนต่อแรงดันและต้องมีแรงต้านทานสูง นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านการฉีดขึ้นรูป (injection) เช่น ผลิตของเล่นเด็ก และเครื่องใช้ต่างๆ ภายในบ้าน ตลอดจนใช้ทำแผ่นฟิล์ม เชือก ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อ และรางน้ำ ทั้งนี้ ท่อที่ทำจาก HDPE สามารถใช้แทนท่อที่ทำจากพีวีซี เนื่องจากมีความทนทานใกล้เคียงกันแต่มีราคาถูกกว่า

c) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (linear low-density polyethylene - LLDPE) เป็นวัสดุผสมกับ LDPE เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับตัวผลิตภัณฑ์

พอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน นิยมให้แสงผ่านได้ดี สามารถมองเห็นอาหารที่บรรจุอยู่ภายในได้ มีสมบัติแสดงในตารางที่ 1-2 ทนความร้อนได้สูงกว่า PE ถึง  $120\text{-}130\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทนต่อแรงดึงและแรงกระแทก ไม่ดูดซึมน้ำและเปราะที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ทนกรดและด่างอ่อน เป็นฉนวนไฟฟ้า ในประเทศไทยใช้เม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนเป่าเป็นถุงบรรจุเอนกประสงค์ ทั้งถุงร้อนและถุงเย็น

รวมทั้งทำเป็นเชือก กระสอบ พื้นพรม สนามหญ้าเทียม ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และเครื่องใช้ภายในบ้าน เป็นต้น

ตารางที่ 1-2 สมบัติของ LDPE, PP และ PLA

สมบัติ	LDPE	PP	PLA
Melt flow index (g/10min)	1.0	2.5	4.8
Vicat softening point (°C)	91	143	
Density (g cm <sup>-3</sup> )	0.92	0.95	1.25
Tensile strength (MPa)	20	58-104	35
Young's modulus (MPa)	250-500	1500-2000	3500
Elongation at break (%)	500	2-4	6.0

ที่มา : George et al. (1998), Hu and Lim (2007)

พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกต่าง ๆ เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection) การอัดรีดเป็นแผ่น (extrusion) การเป่าเป็นฟิล์ม (blown film) เป็นต้น ถือได้ว่าเป็นชนิดหนึ่งของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ ที่ได้จากกรดแลคติก (lactic acid) โดยที่กรดแลคติกสามารถผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการหมักเป็นวิธีการหลักในการผลิตกรดแลคติกในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้น้ำตาลจากอ้อยหรือหัวบีท หรือใช้แป้งจากข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันสำปะหลัง หรือพืชชนิดอื่นๆ เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมัก จุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนน้ำตาลเป็นกรดแลคติก หลังจากผ่านขั้นตอนการแยกและทำบริสุทธิ์แล้วจึงนำกรดแลคติกไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เป็น PLA ซึ่งการสังเคราะห์อาจทำได้โดยการพอลิเมอไรเซชันด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation polymerization) ของกรดแลคติก หรือโดยปฏิกิริยาการเปิดวงแหวน (ring-opening polymerization) ของแลคไทด์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากกว่า พอลิแลคติกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติก สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกได้หลากหลายรูปแบบ เช่นการเป่าเป็นฟิล์ม การฉีดขึ้นรูป การปั่นเป็นเส้นใย มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ในทางการแพทย์ ใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยตัวยา ทำอุปกรณ์ยึดจับกระดูกและเนื้อเยื่อ และไหมละลาย เป็นต้น มีการนำไปใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ขวดน้ำ ถ้วยโยเกิร์ต ฟิล์มห่อลูกกวาด อุปกรณ์สำหรับรับประทานอาหารที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ถูเก็บเศษใบไม้และขยะชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้งานด้านสิ่งทอและเส้นใย เช่น เสื้อผ้า พรม ผ้าเช็ดตัว เป็นต้น มีสมบัติแสดงในตารางที่ 3 จากการสืบค้นเอกสารเกี่ยวกับการใช้เส้นใยธรรมชาติผสมกับ PLA เพื่อผลิตพอลิเมอร์คอมพอสิต มีการศึกษากับเส้นใยไม้กึ่งชนิด เฉพาะการใช้เส้นใยจากไผ่ (Takagi et al., 2007; Takagi and Takeichi, 2012) ปอกระเจา (Fujiura, 2008) ปอควิวา (Garcia et al., 2007 ; Ochi, 2008) hemp (Hu, 2007) abaca (Shibata, 2003) และ ฝ้าย (Graupner, 2008) เป็นต้น ซึ่งมีทั้งการผสมกันด้วยวิธีเอ็กซ์ทรูดเดอร์ หรือ compression molding พบว่าสามารถเสริมความแข็งแรง และเพิ่มค้ำยงมอดูลัสของคอมพอสิต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการใช้เส้นใยธรรมชาติสำหรับเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ประเภท PLA

สำหรับงานวิจัยนี้ ต้องการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากชีวมวลในประเทศไทย สำหรับเสริมแรงกับ PE หรือ PP หรือ PLA โดยศึกษาสมบัติพื้นผิวและสมบัติกายภาพของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์คอมพอสิตชนิดต่าง ๆ สำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ต่อไป

### 1.3.3 สมบัติที่สำคัญของเส้นใยธรรมชาติในการเสริมแรงคอมพอสิต

#### 1.3.3.1 สมบัติทางเชิงกล

สมบัติของเส้นใยธรรมชาติไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติเท่านั้น สมบัติต่างๆ ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลส และปัจจัยอื่นๆ เช่น จำนวนเซลล์ ขนาดของเซลล์ และขนาดของลูเมน เส้นใยที่มีการยืดมากกว่า 5% จะนุ่มแต่เหนียว ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติที่มีการยืดน้อยกว่า 5% จะเหนียวแต่เปราะ สมบัติเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 สมบัติทางเชิงกลของเส้นใยธรรมชาติ

ชนิดเส้นใย	Crystallinity %	Initial modulus (GN/m <sup>2</sup> )	Ultimate tensile strength (MN/m <sup>2</sup> )	Elongation at break (%)
ปอกระเจา		18	226	1.3
ปอลินี		27.6	780	2-4
กล้วย	45	7-20	54-754	1-4
สับปะรด	44-60	34-82	413-1627	0.8-1
ป่านศรนารายณ์		9-22	568-640	3-7
กาบมะพร้าว	27-33	4-6	175-220	15-30
ปาล์มน้ำมัน		2-7.5	58-248	5-10
ฝ้าย		5.5-12.6	287-597	3-10

(George et al., 2001; Reddy and Yang, 2005; Li et al., 2007)

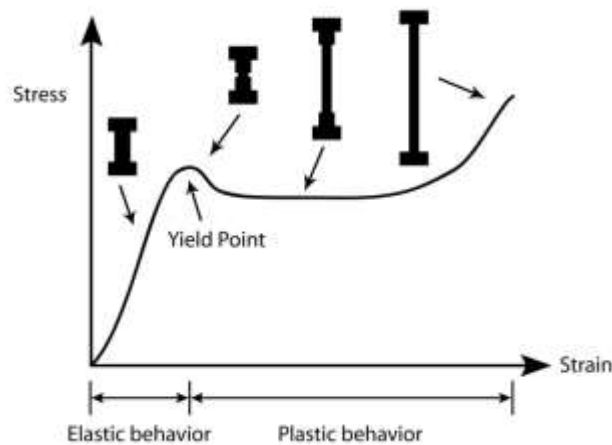
#### 1) สมบัติแรงดึง (tensile properties)

ในการทดสอบสมบัติแรงดึงนั้น (tensile properties) เป็นการให้แรงกระทำเพื่อดึงชิ้นตัวอย่างให้ยืดออกในแนวตั้ง แล้ววัดผลในรูปของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อใช้แรงดึงด้วยความเร็วสม่ำเสมอ เครื่องมือทดสอบสมบัติความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของวัสดุที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เรียกว่า เครื่องทดสอบแรงดึง (tensile testing machine) ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบอัตโนมัติ ที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและจัดเก็บข้อมูล โดยส่วนใหญ่แล้ว การเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน จะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ (dumbbell) ซึ่งปลายทั้งสองด้านมีขนาดกว้างกว่าบริเวณส่วนตรงกลาง เพื่อให้ชิ้นทดสอบแตกหักในบริเวณกึ่งกลางที่มีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าและเป็นบริเวณที่มีค่าความเค้นสูงที่สุด ในการทดสอบสมบัติแรงดึงนี้ ปลายด้านหนึ่งของชิ้นทดสอบจะถูกจับยึดกับปากจับด้านล่างที่ยึดติดกับแท่นเครื่อง ในขณะที่อีกปลายข้างหนึ่งถูกยึดเข้ากับปากจับด้านบนซึ่งเชื่อมต่อกับตัววัดแรง (load cell) จากนั้นเมื่อเริ่มการทดสอบ ปากจับส่วนบนมีการเคลื่อนที่ขึ้นไป โดยปลายส่วนล่างของชิ้นทดสอบยังอยู่กับที่ แรงต้านของชิ้นทดสอบที่กำลังยืดออกด้วยความเร็วคงที่นี้ มีผลให้ตัววัดแรงสามารถวัดค่าแรงดึง (tension force) ที่แปรผันตามระยะการยืดตัวอย่างหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (deformation) ออกมาได้ จนกระทั่งเมื่อดึงชิ้นตัวอย่างจนขาดออกจากกัน ผลที่ได้จากตัววัดแรงจะเป็นค่าแรงต้านสูงสุดของชิ้นตัวอย่างที่สามารถทนแรงดึงได้ก่อนขาดจากกัน จากข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบนี้ เราสามารถที่จะคำนวณค่าต่างๆ ที่เป็นสมบัติทางกลของวัสดุซึ่งเกี่ยวข้องกับความเค้นและความเครียดได้

โดยทั่วไป ความเค้น (stress) หมายถึงแรงที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ หรือความสามารถในการต้านทานแรงภายนอกที่มากระทำ (load) มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร หรือ พาสคาลส์ (Pascals, Pa) ส่วนความเครียด (strain) หมายถึง อัตราส่วนการยืด (elongation) หรือการเปลี่ยนแปลงขนาดต่อหน่วยความยาวเดิม ค่าความเครียดส่วนใหญ่ใช้หน่วยเป็นร้อยละ (ของความยาวเดิม) โดยความชัน (slope) ที่บริเวณเริ่มต้นที่เป็นเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียด (ค่าความเค้นหารด้วยค่า

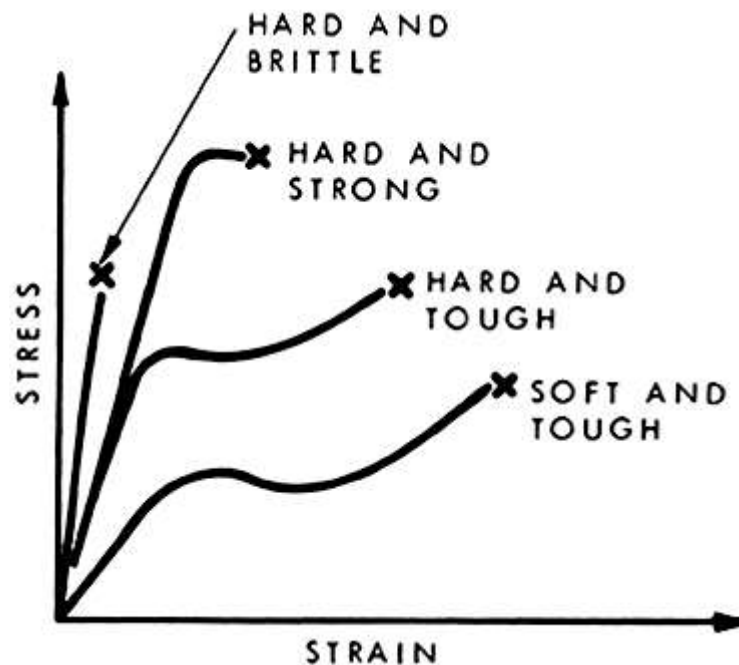
ความเครียด) จะมีค่าคงที่ เรียกว่า โมดูลัสยืดหยุ่น หรือยังมอดูลัส (elastic หรือ Young's modulus: E) ดังนั้น โมดูลัส จึงหมายถึง ความสามารถของวัสดุในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (resistance to deformation) เมื่อมีแรงมากระทำ โดยที่วัสดุที่มีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นสูงนั้น เมื่อได้รับแรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อย ส่วนวัสดุที่มีมอดูลัสต่ำจะเปลี่ยนรูปร่างได้มากเมื่อถูกแรงกระทำ จากมาตรฐาน ASTM D638 ได้กำหนดให้ โมดูลัสยืดหยุ่นนี้คือความแข็งตึง (stiffness) หรือความแข็งเกร็ง (rigidity)

สำหรับวัสดุที่มีสมบัติยืดหยุ่นแบบวิสโคอีลาสติค (viscoelastic) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกของการทดสอบเท่านั้น ซึ่งวัสดุยังแสดงสภาพยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นอยู่ (linear elastic behavior) โดยวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างคืนกลับสู่สภาพเดิมได้ เมื่อเราหยุดให้แรงกระทำแก่วัสดุ เป็นการแสดงสมบัติยืดหยุ่น (elastic behavior) ที่ระดับของค่าความเครียดต่ำเท่านั้น จากนั้นเมื่อชิ้นงานถูกยืดออกไปและเสียรูปแบบไม่กลับคืน หรือจนกระทั่งถึงจุดที่วัสดุเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (plastic deformation) หรือที่เรียกว่า จุดคราก (yield point) หากวัสดุถูกแรงกระทำให้ยืดตัวเกินจากระดับค่าความเครียดที่จุดครากนี้แล้ว จะไม่สามารถคืนตัวกลับไปสู่สภาพเดิมได้เมื่อยุติการให้แรงกระทำ วัสดุที่อยู่ในสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก มักจะพบการเกิดคอคอด (necking) ของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เห็นได้อย่างชัดเจนที่บริเวณของชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดลดลงมากกว่าและรวดเร็วกว่าบริเวณอื่น ซึ่งมักเกิดบริเวณตรงกลาง หลังจากนั้นวัสดุจะอยู่ในสภาพการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก โดยที่พื้นที่หน้าตัดของวัสดุจะลดลง โดยไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรง จนกระทั่งในช่วงท้ายของการครากนั้น วัสดุจะมีความสามารถในการต้านแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ดังเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของความชันของกราฟ พฤติกรรมของวัสดุในช่วงนี้เรียกว่า strain hardening จนในที่สุดถึงจุดที่วัสดุเกิดการแตกหักขึ้น (ภาพที่ 1-7)



ภาพที่ 1-7 สมบัติยืดหยุ่นแบบวิสโคอีลาสติคของวัสดุ เปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain)

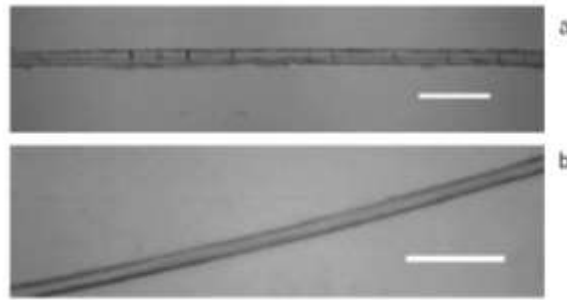
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดสามารถบอกสมบัติของวัสดุได้ว่าเป็นวัสดุประเภทใด เช่นเป็นวัสดุที่เหนียว (ductile) หรือ เป็นวัสดุที่เปราะ (brittle) ดังภาพที่ 1-8



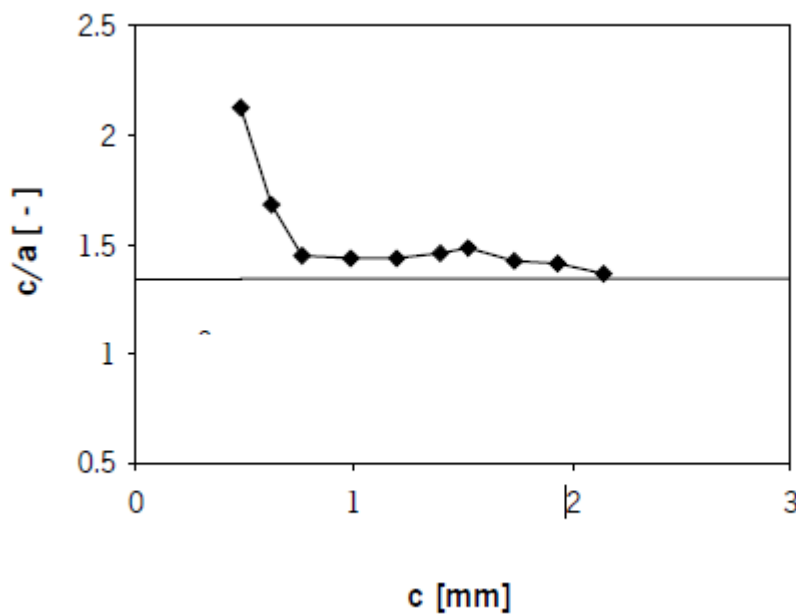
ภาพที่ 1-8 กราฟความเค้น – ความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์ 4 ประเภท

2) สมบัติแรงกด (compression properties)

การทดสอบสมบัติแรงกดมีทิศทางในทางตรงกันข้ามกับสมบัติแรงดึง กล่าวคือ เป็นการให้แรงกระทำเพื่อกดอัดขึ้นตัวอย่างให้มีขนาดเล็กลงในแนวตั้ง ในกรณีของการศึกษาสมบัติข้อนี้ในเส้นใยธรรมชาติจะดำเนินการได้ยาก เนื่องจากข้อจำกัดคือขนาดที่เล็กมากของเส้นใย จึงมีผู้คิดค้นเทคนิคการวิเคราะห์หาค่า compression strength ของเส้นใยโดยทางอ้อมขึ้นหลากหลายทาง หนึ่งในวิธีการเหล่านั้นคือเทคนิค Elastic loop test ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก เนื่องจากอาศัยอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่อนข้างน้อย Bos (2004) และ Fidan (1989) ได้วิเคราะห์ค่า compression strength ของเส้นใยป่าน และเส้นใยสังเคราะห์ 3 ชนิดคือ Kevlars, PBO และ PBZT ตามลำดับ เทคนิคนี้อาศัยการรวนเส้นใยให้อยู่ในลักษณะของ loop แล้วดึงเส้นใยที่ปลายทั้งสองข้างด้วยแรงดึงขนาดเท่ากัน จนกว่าจะเกิดการแตกหักของเส้นใยซึ่งจะสังเกตเห็นรอยตำหนิเล็กๆ (Kink band: ภาพที่ 1-9) ภายในเส้นใย ผ่านทางกล้องจุลทรรศน์ โดยบริเวณดังกล่าวคือด้านบนของ loop ซึ่งเป็นบริเวณเล็กๆ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการถูกอัดเข้ามาในขณะที่ loop มีขนาดเล็กเรื่อยๆ มีจุดที่น่าสังเกตคือ ในระหว่างที่ดึงปลายทั้งสองข้างของเส้นใย ทำให้ loop มีขนาดเล็ก โดยที่อัตราส่วนระหว่างความสูง (c) ต่อความกว้างของ loop (a) จะมีขนาดคงที่เท่ากับ 1.34 โดยตลอด เมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความสูงของ loop ต่อความกว้างของ loop (c/a) กับค่าความสูงของ loop (c) จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงขนาดกับค่าความสูงของ loop แต่เมื่อถึงจุดวิกฤตที่เริ่มเกิดการแตกหักของเส้นใย ค่าความสูงต่อความกว้างของ loop จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้เส้นกราฟในบริเวณดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 1-10) ซึ่งค่าความสูง ณ จุดวิกฤตนี้ จะถูกนำไปใช้เพื่อการคำนวณหาค่า Compressive strength ของเส้นใย ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับขนาดของเส้นใย และค่า Tensile strength ของเส้นใยชนิดเดียวกัน (สมการแสดงในส่วนวิธีการทดลองของการวิเคราะห์ค่า Compression strength ของเส้นใย)



ภาพที่ 1-9 การเกิดจุดตำหนิ (kick band) บนเส้นใยป่านลินิน (a) เปรียบเทียบกับเส้นใยป่านลินินที่ไม่มีจุดตำหนิ (b)  
ที่มา: Bos (2004) สเกลบาร์ แทนขนาด 100 ไมโครเมตร



ภาพที่ 1-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความสูงต่อความกว้างของ loop กับค่าความสูงของ loop ในระหว่างการทดสอบคุณสมบัติแรงกดด้วยเทคนิค Elastic loop test  
ที่มา: Bos (2004)

### 1.3.3.2 สมบัติการยึดติดระหว่างเฟสของเส้นใยและเมตริกซ์ในคอมพอลิท

ลักษณะการยึดติดที่ผิวหน้าของวัสดุกลายเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมลักษณะ interfacial และส่งผลของสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมพอลิท ดังนั้นความเข้าใจถึงลักษณะการยึดติดของวัสดุประกอบต่างๆ หรือคอมพอลิท จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งาน ความยากในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ของกลไกการยึดติด คือ การที่ยึดติดเป็นศาสตร์ที่ประกอบด้วยสาขาวิทยาศาสตร์หลายแขนง ได้แก่ ฟิสิกส์เคมีของผิวหน้าและระหว่างเฟส วัสดุ และวิทยาศาสตร์ของมาโครโมเลกุล กลไกเชิงกลและกลไกระดับอนุภาคของการแตกหัก และรีโอโลยี เป็นต้น ในทางทฤษฎี การยึดติดระหว่างของแข็งกับของแข็ง หรือ ของแข็งกับของเหลว เกิดจากแรงภายในอะตอม และแรงภายในโมเลกุลที่เกิดขึ้นที่ระหว่างเฟส ขณะที่ได้มีการสัมผัสกัน แรง interfacial ระหว่างที่วัสดุสัมผัสกันเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงอันตรกิริยาของ Lewis ของกรด-เบส ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของพันธะเทอร์โมไดนามิกส์ ได้แก่ พลังงานผิวหน้าของสองวัสดุที่สัมผัสกัน โดยทั่วไปการรวมตัวอยู่ด้วยกันเกิดจากการสัมผัสผ่านของเหลวและของแข็ง ดังนั้นจุดวิกฤติของการยึดติดที่ดี ขึ้นกับสมบัติการเปียกของวัสดุ การสัมผัสที่ระยะเวลาหนึ่งของวัสดุทั้งสอง จะทำให้ชั้นระหว่างเฟส เกิดกลไกการยึดติด ซึ่งเกิดขึ้นได้จากการสร้างพันธะทาง

เคมีระหว่างเฟส การจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลที่ใกล้พื้นผิวระหว่างเฟส การแพร่ผ่านของโมเลกุลหรือสายโซ่ โมเลกุลข้ามผ่านระหว่างเฟสกรณีสำหรับพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ระดับการยึดติดต่างกัน (Nardin, 2006)

แรงที่กระทำบนเมตริกซ์จะถูกส่งผ่านไปยังตัวเสริมแรงโดยผ่านทางผิวหน้าสัมผัส ดังนั้นเส้นใยเสริมแรง จะต้องถูกเชื่อมต่อกับเมตริกซ์เพื่อทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง (strength) และความแข็งเกร็ง (stiffness) สูง ลักษณะของการแตกหักเสียหายก็ขึ้นกับความแข็งแรงของหน้าสัมผัสเช่นกัน หน้าสัมผัสที่ไม่แข็งแรงจะส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความแข็งแรงและความแข็งเกร็งน้อยลงและจะมีความต้านทานในการแตกหักน้อยลง นอกจากนี้ลักษณะของหน้าสัมผัสก็มีผลต่อสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น ความต้านทานของ creep และการล้า (fatigue) และการเสื่อมเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของหน้าสัมผัส มีดังนี้

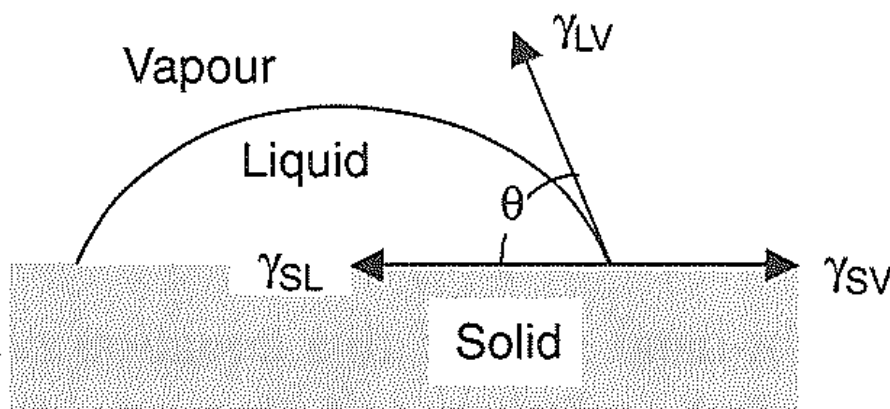
1) ความสามารถในการเปียก (wettability)

พันธะที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าเป็นผลเนื่องมาจากการยึดเกาะระหว่างสารเสริมแรงกับเมตริกซ์และผลจากการยึดเกาะทางกล สำหรับแรงยึดเกาะจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งสารเสริมแรงและเมตริกซ์จะถูกทำให้ชิดติดกัน ในบางขั้นตอนของกระบวนการผลิต เมตริกซ์จะมีการไหลได้และแสดงพฤติกรรมใกล้เคียงกับของเหลว พฤติกรรมนี้เรียกว่า ความสามารถในการเปียก ซึ่งหมายถึงการที่ของเหลวจะสามารถแผ่กระจายไปบนสารเสริมแรงในทุก ๆ ระดับพื้นผิวและเข้าแทนที่อากาศได้หมด การกระจายตัวของเมตริกซ์จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีความหนืดไม่สูงมากนัก

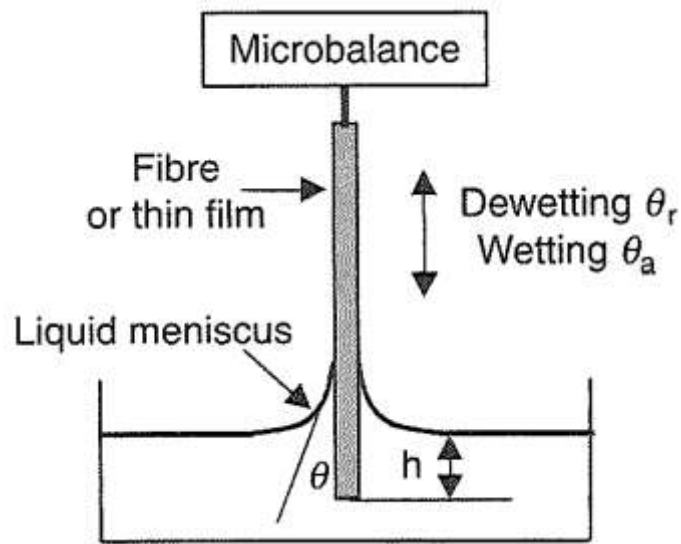
สำหรับในระบบของของแข็ง-ของเหลว ความสมดุลของความสามารถในการเปียกได้ถูกให้คำจำกัดความจากลักษณะของหยดสารละลายบนผิวหน้าของของแข็ง โดยสมการของ Young (1805) สัมพันธ์ระหว่างแรงตึงที่ผิวหน้า  $\gamma$  ของวัสดุที่มุมสัมผัสระหว่างสามเฟสกับจุดสมดุลของมุมสัมผัส (ภาพที่ 1-11) ตามสมการที่ 1 โดยนำเส้นใยจุ่มในสารละลายที่มีความเป็นขั้วต่างกัน เพื่อวัดมุมสัมผัส ตามภาพที่ 1-12

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$$

สมการที่ 1



ภาพที่ 1-11 ลักษณะของการหยดของของเหลวบนพื้นผิวของของแข็ง  
ที่มา : Nardin (2006)

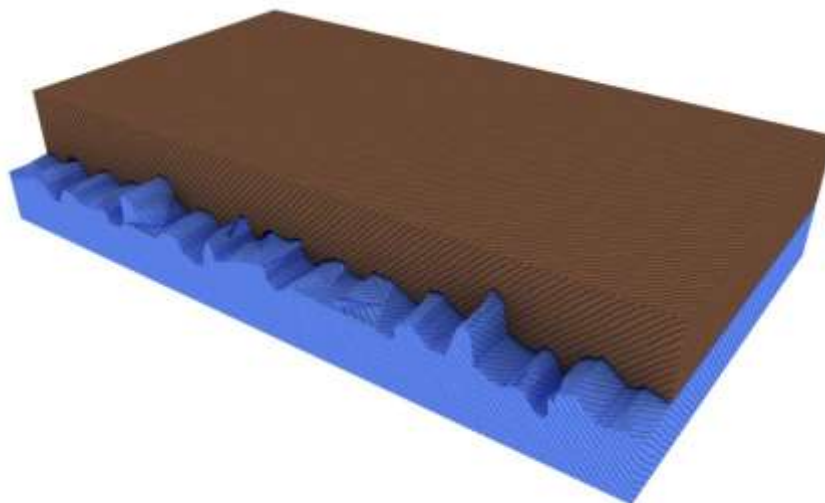


ภาพที่ 1-12 ลักษณะการทดสอบการวัดค่ามุมสัมผัสของเส้นใย  
ที่มา : Nardin (2006)

## 2) พันธะระหว่างหน้าสัมผัส

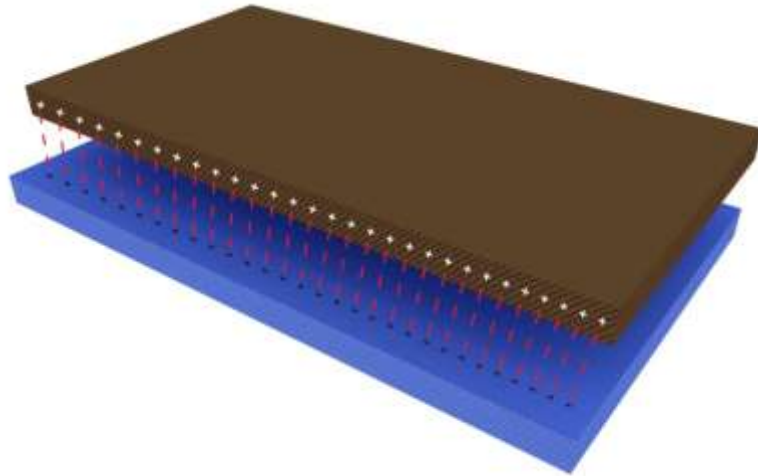
เนื่องจากเมตริกซ์กระจายตัวปกคลุมสารเสริมแรง และเนื่องจากการขีดกันของหน้าสัมผัสระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรงเป็นผลให้เกิดพันธะแบบต่าง ๆ ขึ้น ดังนี้

- พันธะทางกล (mechanical bonding) เป็นการยึดกันทางกลระหว่างผิวสัมผัสสองด้าน ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ความขรุขระและการยึดเกาะที่ดีจะส่งผลให้พันธะทางกลมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การหดตัวของเมตริกซ์บนสารเสริมแรงจะช่วยสนับสนุนให้พันธะแข็งแรงขึ้น พันธะทางกลจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อแรงกระทำในแนวขนานกับหน้าสัมผัส ซึ่งหมายถึงความต้านทานแรงเฉือนนั่นเอง ในทางตรงกันข้ามความแข็งแรงของหน้าสัมผัสในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของหน้าสัมผัสจะมีค่าต่ำ นอกจากนี้ว่าจะมีลักษณะที่ขรุขระและเป็นมุมมากพอ (Mathew and Rawlings, 1994) ดังแสดงในภาพที่ 1-13



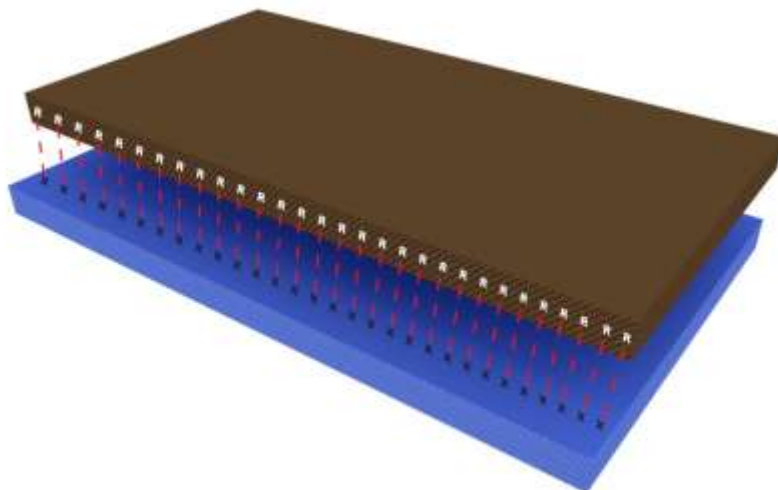
ภาพที่ 1-13 พันธะทางกล  
ที่มา : Chollakup et al. (2012)

- พันธะทางไฟฟ้า (electrostatic bonding) เป็นพันธะทางไฟฟ้าระหว่างเมตริกซ์และสารเสริมแรง จะเกิดขึ้นเมื่อผิวหนึ่งมีประจุบวกและผิวอีกด้านหนึ่งมีประจุเป็นลบ ดังแสดงใน ภาพที่ 1-14 ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิด การดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างแต่ละส่วนประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิต ปฏิกริยาทางไฟฟ้านี้จะเกิดในช่วง แคบ ๆ และจะเกิดกับหน้าสัมผัสที่มีระยะในระดับอะตอมที่ไม่ห่างกันมากนัก โดยปกติหน้าสัมผัสระหว่างเส้นใยเสริมแรง กับเมตริกซ์จะอยู่ติดกัน แต่ถ้าหากมีสารปนเปื้อนหรือก๊าซไปกีดขวางระหว่างหน้าสัมผัสแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพ ของพันธะนี้ลดลง



ภาพที่ 1-14 พันธะทางไฟฟ้า  
ที่มา : Chollakup et al. (2012)

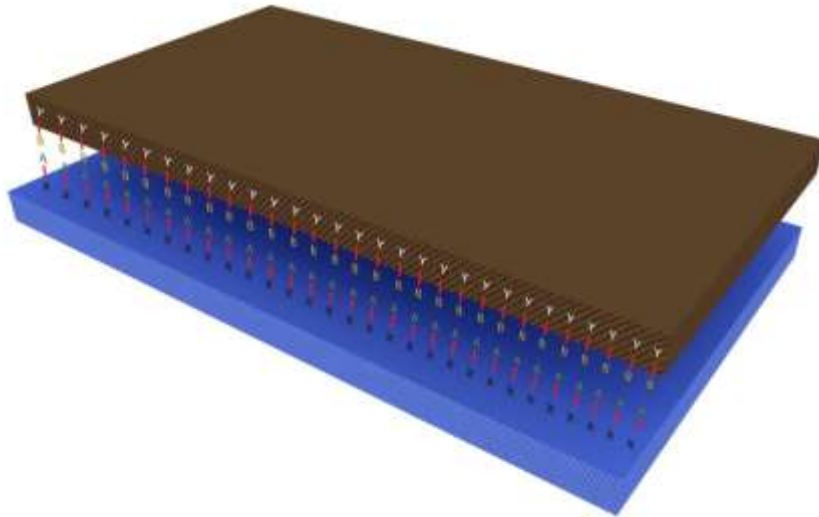
- พันธะทางเคมี (chemical bonding) พันธะนี้ถูกสร้างระหว่างสารเคมีบนผิวของสารเสริมแรง (X) กับ สารที่มีความเข้ากันได้กับเมตริกซ์ (R) ดังแสดงในภาพที่ 1-15 ความแข็งแรงของพันธะเคมีนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของ พันธะและจำนวนพันธะต่อหน่วยพื้นที่



ภาพที่ 1-15 พันธะทางเคมีที่เกิดจากสารเคมีบนผิวของเส้นใยเสริมแรงและเมตริกซ์  
ที่มา : Chollakup et al. (2012)

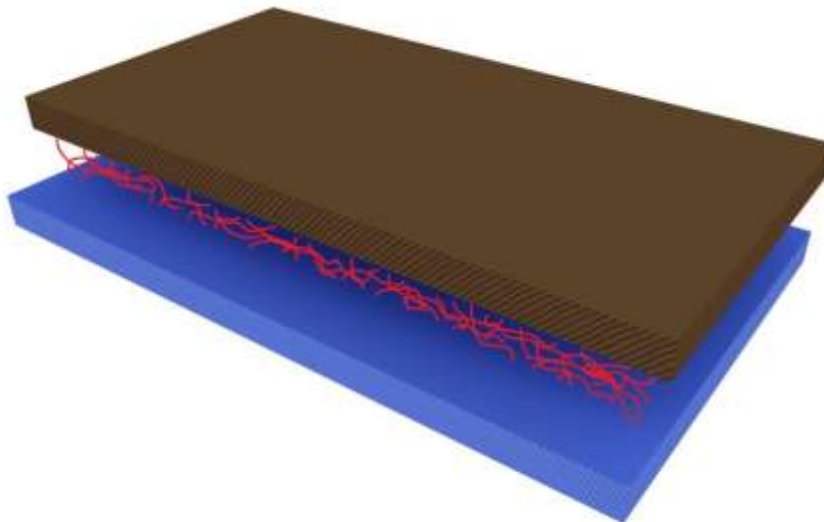
พันธะเคมีสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการเติมสารช่วยในการยึดเกาะ (coupling agent) เช่น ซิลเลน (silane) เป็นต้น ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยในการยึดเกาะสำหรับพอลิเมอร์คอมโพสิตเสริมเส้นใยแก้ว จากภาพ

ที่ 1-16 โมเลกุลด้านหนึ่ง (A) ของไซเลนจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับผิวของเส้นใยแก้ว ในขณะที่โมเลกุลอีกด้านหนึ่ง (B) ทำปฏิกิริยากับสารในเมตริกซ์



ภาพที่ 1-16 พันธะทางเคมีที่เกิดจากสารช่วยยึดเกาะระหว่างเส้นใยเสริมแรงและเมตริกซ์  
ที่มา : Chollakup et al. (2012)

- พันธะจากปฏิกิริยาหรือการเชื่อมด้วยสารตัวกลางอะตอมหรือโมเลกุลของส่วนประกอบสองส่วนของพอลิเมอร์คอมโพสิต ถือเป็นพันธะที่เกิดจากโมเลกุลของแต่ละส่วนประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทำการแพร่เข้าหากันและทำปฏิกิริยาเกิดเป็นพันธะขึ้นระหว่างหน้าสัมผัส ส่วนใหญ่จะเกิดในวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ ลักษณะของพันธะชนิดนี้แสดงในภาพที่ 1-17



ภาพที่ 1-17 พันธะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยา  
ที่มา : Chollakup et al. (2012)

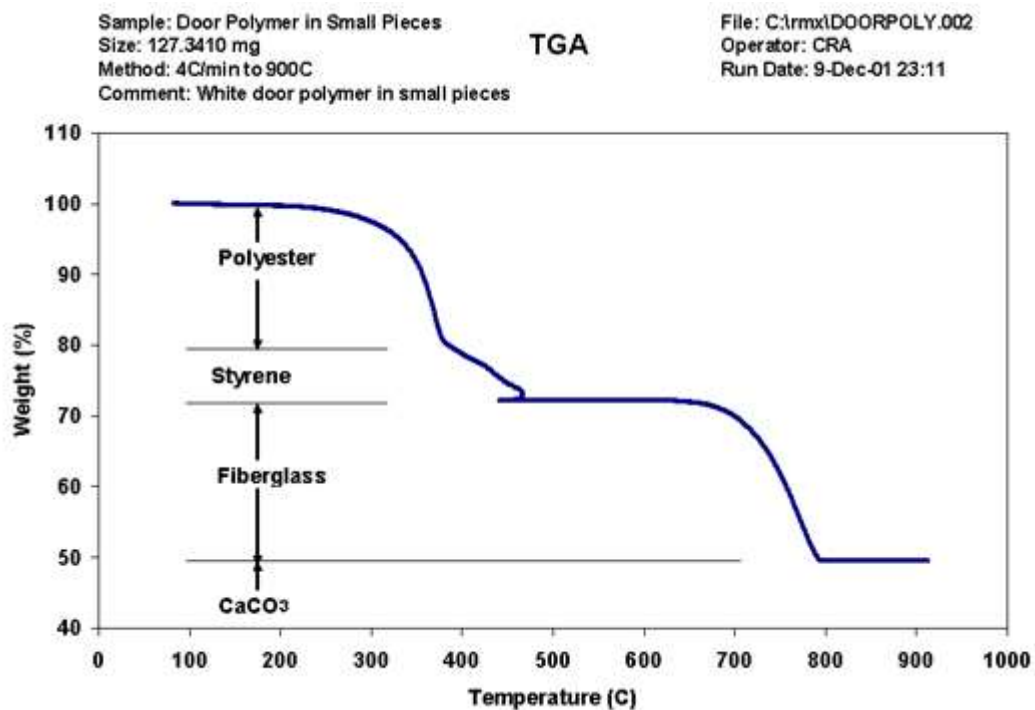
### 1.3.3.3 สมบัติการดูดซับน้ำ

การดูดซับน้ำของคอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต เนื่องจากน้ำก่อให้เกิดการสีกกร่อนของเมตริกซ์โพลีเมอร์และเส้นใย

ธรรมชาติ รวมถึงทำลายพื้นผิวสัมผัสระหว่างโพลีเมอร์และเส้นใย (Osman et al., 2011) จากการศึกษาของ Alamri and Low (2012) และ Osman et al.(2011) พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยเซลลูโลสที่ผ่านการรีไซเคิล และเส้นใยปอแก้ว ในการผลิตวัสดุคอมพอสิตที่มี unsaturated polyester และ epoxy เป็นเมทริกซ์ ตามลำดับ ทำให้คุณสมบัติการดูดซับน้ำของคอมพอสิตทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล Flexural strength และ Flexural Modulus ที่มีค่าลดลงอย่างชัดเจน จะเห็นว่าปริมาณเส้นใยมีความสัมพันธ์การดูดซับน้ำของคอมพอสิต และแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับน้ำของเส้นใยที่ใช้เสริมแรง ดังนั้น การศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำของเส้นใยธรรมชาติ ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของการศึกษาคุณสมบัติของคอมพอสิต รวมทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจเลือกใช้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการผลิตคอมพอสิตได้อีกด้วย ทั้งนี้ การดูดซับน้ำของเส้นใยธรรมชาติ เกิดขึ้นจากความชอบน้ำของเส้นใย (Hydrophilic interaction) เนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชัน Hydroxyl (-OH) ซึ่งเป็นองค์ประกอบภายในโมเลกุลของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ที่วางตัวอยู่ในบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของเซลลูโลส (Amorphous region) (Kabir et al. 2013b)

#### 1.3.3.4 สมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric Analysis เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนและสัดส่วนขององค์ประกอบในตัวอย่างที่สนใจโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างในระหว่างทำการให้ความร้อนด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยการวิเคราะห์จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศ หรือในสภาวะที่มีก๊าซเฉื่อย เช่น ฮีเลียม หรือ อาร์กอน และจะทำการบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น บางครั้งจะทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซออกซิเจนในปริมาณที่ต่ำ (1-5% ออกซิเจน ในสภาวะที่เติมไปด้วยก๊าซไนโตรเจนหรือฮีเลียม) เพื่อให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของ Carbon nanotube ในระหว่างที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้คือ น้ำหนักที่ลดลงเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือเกิดการเผาไหม้ของคาร์บอนไปอยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในระหว่างนั้นมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักด้วย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง เกิดเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีมวลเพิ่มมากขึ้น ([http://www.uzaktanegitimplatformu.com/UEP/uep\\_ylisans/ey2/ey2\\_download/Practice%20Guide\\_Section%202\\_TGA.pdf](http://www.uzaktanegitimplatformu.com/UEP/uep_ylisans/ey2/ey2_download/Practice%20Guide_Section%202_TGA.pdf)) การวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคนี้ สามารถบ่งบอกถึงชนิดและปริมาณขององค์ประกอบ รวมถึงจำนวนขององค์ประกอบในสารแต่ละชนิดได้ โดยดูจากการลดลงของกราฟน้ำหนักตัวอย่าง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในระยะต่างๆ เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทนต่อการย่อยสลายด้วยความร้อนที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างในภาพที่ 1-16 ที่แสดงถึงการเผาไหม้ขององค์ประกอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ โพลีเอสเตอร์, สไตรีน, เส้นใยแก้ว และ  $\text{CaCO}_3$  โดยโพลีเอสเตอร์เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 300 - 350 °C ส่วนสไตรีนเกิดการเผาไหม้ที่ 350 - 480 °C เส้นใยแก้วที่ 700 - 790 °C และ  $\text{CaCO}_3$  คือองค์ประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการย่อยสลายตัวอย่างเสร็จสิ้น



ภาพที่ 1-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในระหว่างการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis

ที่มา: <http://www.andersonmaterials.com/tga.html>

## 2. วิธีวิจัย

### 2.1 การเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากวัตถุดิบที่ใช้ทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ทดลองได้แก่ กาบกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย กาบมะพร้าวอ่อน และทะลายปาล์มน้ำมัน การสกัดเอาเส้นใย มีความแตกต่างกันตามชนิดของพืช โดยดูจากองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยแต่ละชนิด

#### 2.1.1 การเตรียมเส้นใยกาบกล้วย

วัตถุดิบที่ใช้ทดลองเป็นกล้วยน้ำหว้าที่เก็บผลผลิตแล้วโดยตัดส่วนโคนสูงจากพื้นดินประมาณ 5 เซนติเมตร และตัดปลายต้นตรงกึ่งกลางของส่วนยอด ตัดกาบแห้งออกให้หมดเหลือเฉพาะลำต้น นำลำต้นมา วัดเส้นรอบวง 3 จุด ตรงส่วนโคนต้น กลางลำต้น และส่วนปลายลำต้น วัดความยาวของลำต้น ชั่งน้ำหนักสดทั้งต้น แล้วแยกกาบ ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนจากจำนวนกาบทั้งหมด จะได้กาบชั้นนอก กาบชั้นกลาง และกาบชั้นใน ชั่งน้ำหนักสด วัดความยาวของกาบแล้วอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่แล้วนำไปต้มหาเส้นใยด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของน้ำหนักเปลือกอบแห้ง ใช้เปลือกต่อสารละลายในอัตราส่วน 1:35 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาดดีด้วยเครื่องตีเยื่อ Hollander ล้างน้ำแยกเอาไว้เฉพาะเส้นใยอบแห้งเพื่อหาปริมาณเส้นใยที่ได้ นำเส้นใยที่ได้จากการคัดเลือกแล้วฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้งใช้เยื่อต่อสารละลายในอัตราส่วน 1:20 ร่วมกับสารโซเดียมซิลิเกต 2.0% สารแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาด ทำแผ่นตากแห้งแล้ววัดความขาวสว่างของเส้นใยด้วยเครื่อง Brightness tester (Kumagai Riki Kogyo, CO.,Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87

#### 2.1.2 การเตรียมเส้นใยใบสับปะรด

ใบสับปะรดที่ใช้เป็นพันธุ์ปัตตาเวีย เนื่องจากเป็นพันธุ์ที่มีใบใหญ่และยาว สีเขียวเข้ม ใบเป็นร่องตรงกลาง ผิวใบด้านบนเป็นมันเงา ใต้ใบสีเทา กลางใบสีแดงอมน้ำตาล ขอบใบเรียบมีหนามเล็กน้อยบริเวณปลายใบ การศึกษานำกอสับปะรดที่ตัดถูกตัดแยกกอกออกมา ชั่งน้ำหนัก แล้วแยกใบแต่ละใบออกจากลำต้น วัดขนาดความกว้าง ความยาว แบ่งใบออกเป็นสามโคน กลางใบ และปลายใบ ชั่งน้ำหนักสด แล้วอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่เพื่อหาน้ำหนักแห้งของใบสับปะรดแต่ละส่วน การเตรียมเส้นใยนำใบสับปะรดสดทุบหรือบิให้ใบแตกแล้วอบให้แห้งหลังจากนั้นนำใบสับปะรดแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10% ของน้ำหนักเปลือกอบแห้งใช้เวลาแช่ 7 วัน ที่ความเข้มข้น 20% ใช้เวลาแช่ 6 วัน และที่ความเข้มข้น 30% ใช้เวลาแช่ 5 วัน ล้างด้วยน้ำสะอาดตัดแยกส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยออกแล้วอบเส้นใยให้แห้งเพื่อหาน้ำหนักแห้งของเส้นใย นพเส้นใยที่ได้จากการคัดเลือกฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ร่วมกับสารโซเดียมซิลิเกต 2.0% สารแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด ทำแผ่นตากแห้งแล้ววัดความขาวสว่างของเส้นใยด้วยเครื่อง Brightness tester (Kumagai Riki Kogyo, CO.,Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87

#### 2.1.3 การเตรียมเส้นใยกล้วย

เปลือกกล้วยที่ใช้ศึกษาการเตรียมเส้นใยเป็นกล้วยที่มีอายุ 90 วัน จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) เป็นเปลือกที่ลอกสดจากต้นกล้วย ตัดยาว 20 เซนติเมตร ต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของเปลือกกล้วยอบแห้งอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนเปลือกกล้วยต่อสารละลาย 1:25 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ล้างด้วยน้ำสะอาด อบแห้งจนน้ำหนักคงที่หาปริมาณของเส้นใยที่ได้จากการคัดเลือก ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 และ 40% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง ร่วมกับสารโซเดียมซิลิเกต 2.0% สารแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และสารโซเดียมไฮดร

อกไซด์ 1.5% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด ทำแผ่นตากแห้งแล้ววัดความขาวสว่างของเส้นใยด้วยเครื่อง Brightness tester (Kumagai Riki Kogyo, CO.,Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87

#### 2.1.4 การเตรียมเส้นใยกาบมะพร้าว

กาบมะพร้าวที่ใช้เตรียมเส้นใยเป็นกาบมะพร้าวอ่อนโดยนำมาซังหาน้ำหนักสดแล้วดึงเอาเปลือกออก ซังหาน้ำหนักในส่วนของเปลือก นำเปลือกอบให้แห้งด้วยตู้อบลมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ซังหาน้ำหนักแห้ง การเตรียมเส้นใยโดยใช้วิธีต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของกาบอบแห้ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด คัดแยกส่วนที่ไม่ใช่เส้นใยออกแล้วอบเส้นใยให้แห้งเพื่อหาน้ำหนักของเส้นใย นำเส้นใยที่ได้จากการคัดเลือก ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 20 40 60 และ 80% ของเส้นใยอบแห้ง ร่วมกับสารโซเดียมซัลไฟด์ 2.0% สารแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด ทำแผ่นตากแห้งแล้ววัดความขาวสว่างของเส้นใยด้วยเครื่อง Brightness tester (Kumagai Riki Kogyo, CO.,Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87

#### 2.1.5 การเตรียมเส้นใยละลายปาล์มน้ำมัน

การเตรียมเส้นใยจากละลายปาล์มน้ำมันใช้ละลายปาล์มเปล่าที่บีบลูกปาล์มออกแล้วและผ่านการตีละลายด้วยเครื่องเพื่อแยกเอาช่อดอกออกจากกันก่อน เพราะละลายปาล์มมีความเหนียวและส่วนปลายช่อดอกมีความแหลมคมมาก นำส่วนของช่อดอกที่ผ่านการตีแล้วอบด้วยตู้อบลมร้อนจนน้ำหนักคงที่จึงนำมาคัดแยกส่วนที่ไม่ใช่ช่อดอกหรือส่วนที่ไม่ต้องการออกไป นำส่วนที่เป็นช่อดอกที่ต้องการจะผลิตเป็นเส้นใย ต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของน้ำหนักช่อดอกแห้งใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารละลาย 1:30 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด คัดแยกสิ่งที่ไม่ต้องการออก อบเส้นใยให้แห้งเพื่อหาปริมาณของเส้นใยที่ได้นำเส้นใยที่ได้จากการคัดเลือก ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง ร่วมกับสารโซเดียมซัลไฟด์ 2.0% สารแมกนีเซียมซัลเฟต 0.05% และสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ล้างทำความสะอาด ทำแผ่นตากแห้งแล้ววัดความขาวสว่างของเส้นใยด้วยเครื่อง Brightness tester (Kumagai Riki Kogyo, CO.,Ltd.) ตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI T452 om-87

## 2.2 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะพื้นฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้

เส้นใยเซลลูโลสที่ได้ก่อนและหลังการเตรียมนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีมาตรฐานของ TAPPI (T264-cm-99) (TAPPI, 2002-2003) ด้วยการหาปริมาณสารแทรกที่สามารถละลายในอินทรีย์สาร (T204-cm-97) การละลายในน้ำร้อน (T207-om-93) ปริมาณลิกนิน (T222-om-98) ปริมาณไฮโดรเซลลูโลสด้วยวิธี Acid chlorite (Browning, 1967) ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส (T203-cm-93) ปริมาณเพนโตแซน (T223-om-84) และปริมาณเถ้า (T221-om-93)

นอกจากนี้ยังนำมาตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบอยู่บนเส้นใยด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ด้วย ATR mode ช่วงความยาวคลื่น  $4000-400\text{ cm}^{-1}$  รวมทั้งทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์

## 2.3 ศึกษาสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้

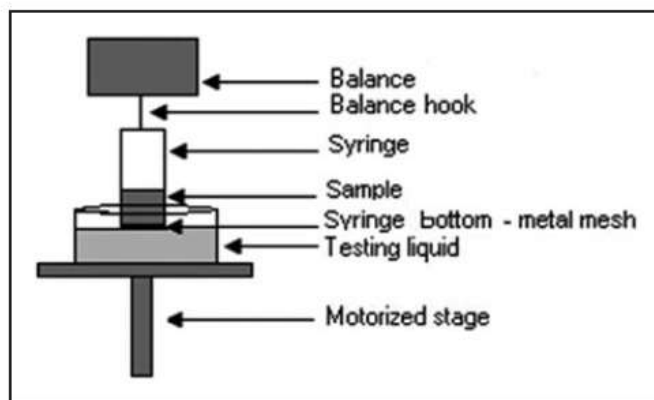
ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว (surface energy) ด้วยการวัดมุมสัมผัสของหยดสารละลายที่มีความเป็นขั้วต่างกันบนผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้ ตามวิธีของ Wu (1969) กับสารละลายชนิดต่าง ๆ ที่มีความเป็นขั้วต่างกัน ได้แก่ น้ำ formamide หรือ diiodomethane เป็นต้น สมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้

จากเส้นใยทั้ง 5 ชนิด จะวิเคราะห์ด้วยการวัด contact angle ของเส้นใยกับของหยดสารละลายที่มีความเป็นขี้ต่างกันบนผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้ โดยจุ่มใน diiodomethane ซึ่งเป็นตัวแทนของสารละลายที่ไม่มีขี้ และ formamide ซึ่งเป็นตัวแทนของสารละลายที่มีขี้ ด้วยวิธี Washburn (W) ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างมวลของสารละลายที่ดูดซับบนผิวหน้าของเส้นใย และเวลา (Persin et al., 2004 ; Cieslak et al., 2012) โดยที่เส้นใยจะถูกแขวนบนขอเกี่ยวของเครื่องชั่ง และสารละลายที่บรรจุในภาชนะจะถูกยกขึ้นไปจนกระทั่งตัวอย่างสัมผัสกับผิวหน้าของของเหลว (ภาพที่ 2-1) ซึ่งจะทำการอ่านค่าน้ำหนักของของเหลวที่ดูดซับบนตัวอย่าง โดยที่การวัดมุมสัมผัส คำนวณได้จากสมการที่ดัดแปลงของ Washburn ในสมการที่ 2 คือ

$$m^2 = \frac{Cp^2\gamma\cos\theta}{\eta} \cdot t$$

สมการที่ 2

เมื่อ m คือ น้ำหนักของของเหลวที่ดูดซับบนเส้นใย (g), t คือ เวลา (s) ; C คือ ค่าคงที่ของเส้นใย (cm<sup>5</sup>) ; p คือ ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm<sup>3</sup>) ; γ คือ แรงตึงผิวของของเหลว (mN/m) ; θ คือ มุมสัมผัส และ η คือ ความหนืดของของเหลว (mPa s)



ภาพที่ 2-1 หลักการของวิธี Washburn (W) สำหรับการวัดมุมสัมผัส  
ที่มา : Cieslak et al. (2012)

## 2.4 ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้

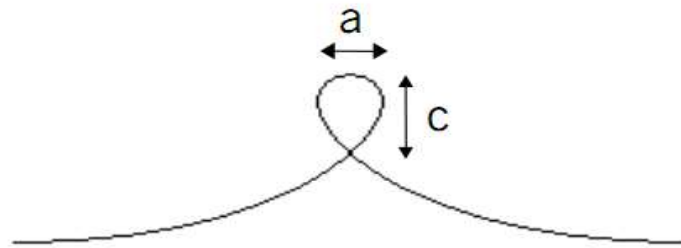
เส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้ นำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญ ดังนี้

- ลักษณะสัณฐานของชิ้นตัวอย่างเส้นใยก่อนและหลังการทดสอบสมบัติทางเชิงกล นำมาวัดด้วย scanning electron microscope (SEM) (XL Series, XL30, Philips, The Netherlands) ที่ 13 KV

- สมบัติทางเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลส ได้แก่ ค่าความต้านแรงดึง ค่าการยืดตัว ค่า Young's modulus ตามวิธีของ ISO 5079-1955(E) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยระยะที่ใช้ทดสอบ (gauge length) เท่ากับ 30 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการดึงเส้นใยจากใบสับปะรดและกัญชงอยู่ที่ 3 มิลลิเมตรต่อนาที เส้นใยจากกากกล้วยอยู่ที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และเส้นใยจากกากมะพร้าวและทะเลลายปาล์มที่ 25 มิลลิเมตรต่อนาที

- สมบัติ compression property ด้วยเทคนิค elastic loop test ตามวิธีของ Bos (2004) ด้วยการผูกเส้นใยให้เป็นวง (loop) และใช้แรงดึงที่ปลายของเส้นใยทั้งสองข้าง พร้อมกับวัดขนาดความกว้าง (a) และความสูง (c) ของ loop ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ดึงปลายเส้นใยทั้งสองข้างให้แน่นขึ้น ดังแสดงในภาพที่ และสังเกตรอยแตกหักของเส้นใยบริเวณส่วนโค้งด้านบนของ loop ผ่านกล้องจุลทรรศน์ โดยสัดส่วนระหว่างขนาด

ความสูงต่อความกว้างของ loop ( $c/a$ ) ที่มีค่าสูงกว่า 1.34 จะแสดงถึงการแตกหักของเส้นใย ซึ่งเป็นจุดวิกฤตของการคำนวณหาค่า compression strength ของเส้นใยจากสมการที่ 3

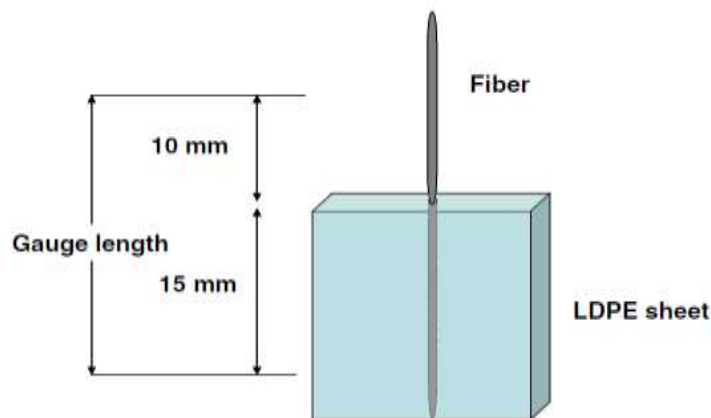


ภาพที่ 2-2 ลักษณะของเส้นใยธรรมชาติเมื่อทำการทดสอบสมบัติ compression test ด้วยเทคนิค elastic loop test  
ที่มา : Bos (2004)

$$\sigma_{fcomp} = \frac{1.34 E_{fcomp}d}{C_{crit}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

- โดยที่  $\sigma_{fcomp}$  คือ compression strength ของเส้นใย
- $E_{fcomp}$  คือ compressive modulus ของเส้นใย โดยอนุโลมว่ามีค่าเท่ากับค่า Tensile modulus ของเส้นใย
- d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย
- $C_{crit}$  คือ ขนาดความสูงของ loop ที่ทำให้เกิดจุดวิกฤต หรือการแตกหักของเส้นใย

- สมบัติการติด (adhesion property) ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ คือ พอลิแลคติกแอซิด ด้วยวิธี pull-out test ตามวิธีที่ดัดแปลงและพัฒนาตาม Chollakup และคณะ (2013) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 แผ่นตัวอย่างที่เตรียมจากการนำเส้นใยเซลลูโลสเส้นใยเดี่ยวมายึดติดกับแผ่นพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ด้วยวิธี compression molding แล้วนำแผ่นพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยมาวัดค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้เส้นใยขาด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ด้วยหัววัด tensile ที่ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าแรงที่ได้นำมาคิดต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใย ด้วยการวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยภายใต้กล้องจุลทรรศน์ จำนวนอย่างน้อย 5 ค่า แล้วคำนวณพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยเพื่อนำมาใช้คำนวณแรงยึดติดระหว่างผิวของเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงในเมตริกซ์ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2-3 การทดสอบสมบัติการติดด้วยวิธี pull-out test ในเมตริกซ์ LDPE  
ที่มา : Chollakup et al. (2013)

- สมบัติการดูดซับน้ำ (water absorption) ตามวิธี ASTM D570-81 ด้วยการนำตัวอย่างเส้นใยอบที่อุณหภูมิ 50 °C เวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักเส้นใยหลังอบ ( $W_d$ ) นำเส้นใยที่ได้แช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องตามระยะเวลา 3 – 24 ชั่วโมง ตัวอย่างที่บ่มตามระยะเวลา จะถูกนำมาชั่งน้ำหนักที่ผิวหน้าด้วยกระดาษทิชชู แล้วชั่งน้ำหนักของเส้นใยที่ดูดซับน้ำไว้ ( $W_s$ ) คำนวณค่าการดูดซับน้ำ ตามสมการที่ 4

$$\text{Water absorption} = \frac{(W_s - W_d) \times 100}{W_s} \quad \text{สมการที่ 4}$$

- สมบัติทางความร้อน ศึกษาด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA, Mettler Toledo, USA) ที่ความเร็วของการสแกน 10 °C/min ตั้งแต่อุณหภูมิ 25 ถึง 600 °C

### 3. ผลและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการเตรียมเส้นใยเซลลูโลสจากวัตถุดิบที่ใช้ทดลอง

ผลการเตรียมเส้นใย กาบกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย ขิง กาบมะพร้าวอ่อน และทะเลาะปาล์มน้ำมัน โดยการใช้สารเคมี เพื่อให้ได้เส้นใยได้ผลการเตรียมดังนี้

##### 3.1.1 ผลการเตรียมเส้นใยกาบกล้วย

กล้วยที่ใช้ทดลองเป็นกล้วยน้ำว้าที่เก็บผลผลิตแล้ว ตัดสูงจากดินประมาณ 5 เซนติเมตร และตัดปลายตรง กาบล่างและเอาใบแห้งออก ชั่งน้ำหนักสด วัดขนาดเส้นรอบวง 3 จุด คือ ตรงโคนต้น กลางต้นและปลายต้น วัดความยาว ของลำต้นได้ข้อมูลดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ข้อมูลแสดงเส้นรอบวงและน้ำหนักของต้นกล้วยน้ำว้าที่เก็บผลผลิตแล้ว

ตัวอย่าง	ต้นยาว (ซม.)	เส้นรอบวง (ซม.)			น้ำหนักสด (กก.)	น้ำหนักแห้ง (กก.)	น้ำหนักแห้ง (%)
		โคน	กลาง	ปลาย			
1	283	68	56	48	43.73	2.54	5.80
2	286	68	47	39	27.28	1.59	5.82
3	269	65	46	38	25.31	1.41	5.57
4	256	70	46	38	26.28	1.14	4.33
5	322	64	74	37	29.93	2.50	8.35
6	244	63	42	32	20.76	0.91	4.38
เฉลี่ย	276.66	66.33	51.83	38.66	28.88	1.68	5.70

จากข้อมูลต้นกล้วยมีความยาวเฉลี่ย 276.66 เซนติเมตร น้ำหนักสดเฉลี่ยต้นละ 28.88 กิโลกรัม น้ำหนักแห้งเฉลี่ย 1.68 กิโลกรัม คิดเป็นน้ำหนักแห้งเฉลี่ย 5.70% ต้นกล้วยสดมีน้ำหนักเฉลี่ย 94.30% ถ้านำต้นกล้วยมาแยกกาบออกจากลำต้นแล้วแบ่งตามกาบกล้วยออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้นนอก ชั้นกลาง และชั้นใน ไม่รวมไส้กลางจะแบ่งกาบกล้วยได้ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 ข้อมูลแสดงจำนวนกาบและน้ำหนักของกาบในแต่ละชั้นของต้นกล้วยที่เก็บผลผลิตแล้ว

ตัวอย่าง	จำนวน (กาบ)	ชั้นนอก กาบที่	ชั้นกลาง กาบที่	ชั้นใน กาบที่	น้ำหนักแห้ง (ก.)			ไส้ (ก.)
					ชั้นนอก	ชั้นกลาง	ชั้นใน	
1	21	1-7	8-14	15-21	88.14	147.71	81.86	320.00
2	26	1-8	9-17	18-26	43.25	77.88	52.00	78.00
3	22	1-7	8-14	15-22	51.86	86.14	56.25	68.00
4	18	1-6	7-12	13-18	60.50	79.16	43.33	45.00
5	24	1-8	9-16	17-24	68.88	140.75	95.25	70.00
6	17	1-5	6-11	12-17	45.60	66.50	41.50	38.00
เฉลี่ย	22	1-7	8-14	15-22	59.70	99.69	61.70	103.16

ต้นกล้วยน้ำว้าที่เก็บผลผลิตแล้วมีจำนวนกาบเฉลี่ยต้นละ 22 กาบ การแบ่งชั้นกาบกล้วยออกเป็น 3 ชั้น ให้ชั้นนอกเริ่มตั้งแต่ กาบที่ 1-7 กาบด้านนอก กาบชั้นกลางตั้งแต่กาบที่ 8-14 และการชั้นในตั้งแต่กาบที่ 8-14 น้ำหนักแห้งของกาบชั้นนอกเฉลี่ย 18.41% กาบชั้นกลางเฉลี่ย 30.74% กาบชั้นในเฉลี่ย 19.02% และไส้กลางเฉลี่ย 31.83%

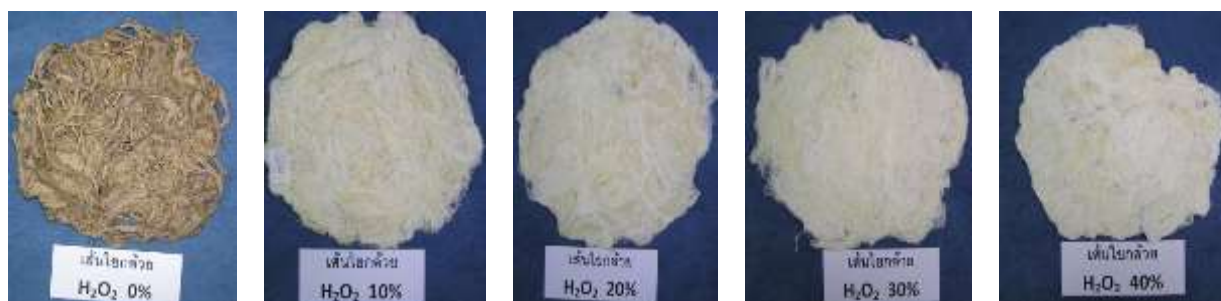
จากการต้มกากกล้วยด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของน้ำหนักกากอบแห้ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ได้ปริมาณเส้นใยดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 เปรียบเทียบเส้นใยกล้วยน้ำว้าที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง	NaOH (%)	เส้นใยที่ได้ (%)	ลักษณะของเส้นใย
1	10	40.83	เส้นใยแยกออกไม่ดี
2	20	29.79	เส้นใยแยกออกดี
3	30	22.75	เส้นใยเปื่อยเกินไป

การต้มเส้นใยกล้วยน้ำว้าที่เก็บผลผลิตแล้วควรต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จะได้ปริมาณเส้นใยเฉลี่ย 29.79% จากน้ำหนักแห้งของการรวม ถ้าแยกผิวกากด้านนอกและผิวกากด้านในออกจากกันจะได้ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยมีอยู่มากเฉพาะส่วนของผิวกากด้านนอก กากกล้วยมีส่วนของผิวด้านนอกแห้งเฉลี่ย 59.69% และผิวกากด้านในแห้งเฉลี่ย 40.31%

เส้นใยกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% นำมาฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ลักษณะของเส้นใยและวัดความขาวสว่างของเส้นใยได้ 27.42 54.48 61.89 64.31 และ 66.38% ตามลำดับดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ลักษณะของเส้นใยกล้วยที่ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

### 3.1.2 ผลการเตรียมเส้นใยใบสับประรด

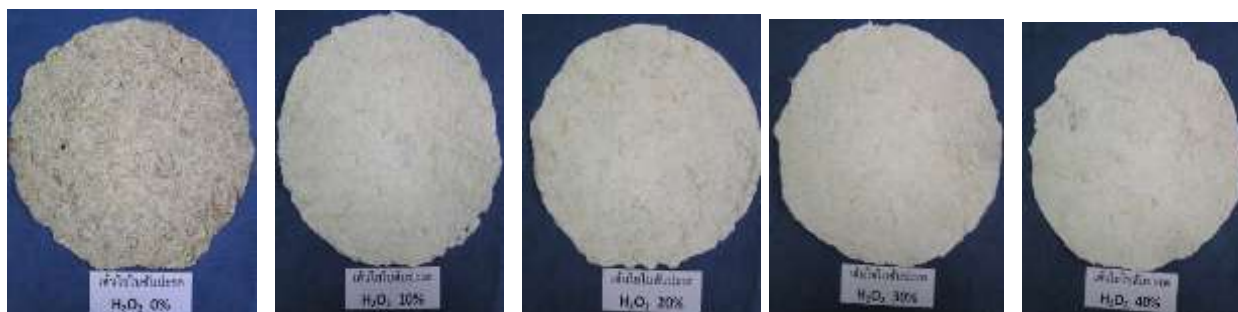
ใบสับประรดพันธุ์ปัตตาเวีย เมื่อนำมาสับประดมาแยกใบและลำต้นออกจากกันเป็นส่วนของลำต้น 12.15% และส่วนของใบ 87.85% ในส่วนของใบนี้ถ้าแบ่งความยาวใบออกเป็น 3 ส่วนจะเป็นส่วนของโคนใบ 24.12% ส่วนของกลางใบ 31.35% และปลายใบ 32.38% เมื่อนำไปอบแห้งแล้วจะเหลือส่วนของลำต้น 12.76% ส่วนโคนใบ 16.57% กลางใบ 15.22% และปลายใบ 12.94% เมื่อนำใบสับประรดที่ผ่านการทุบหรือบีบให้แตกอบแห้งแล้วแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้ปริมาณและลักษณะของเส้นใยตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยใบสับประรดที่ได้จากการแช่ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่างกัน

ตัวอย่าง	NaOH (%)	แช่สาร NaOH (วัน)	เส้นใยที่ได้ (%)	ลักษณะของเส้นใย
1	10	7	21.29	เปลือกติดมาก
2	20	6	20.73	เปลือกติดปานกลาง
3	30	5	18.74	เปลือกติดน้อย

เส้นใยสับปะรดที่เหมาะสมควรแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 30% เวลา 5 วัน ลักษณะของเส้นใยก็ยังมีส่วนของเปลือกเล็ก ๆ ติดอยู่บ้างเนื่องจากการทุบและบีบใบจะมีส่วนที่ไม่ถูกการทุบหรือบีบให้แตกในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ยังไม่ถูกย่อยและจะติดอยู่กับเส้นใย การผลิตเส้นใยโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์นี้ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากเส้นใยจะถูกย่อยได้ง่ายถ้าใช้ความร้อนช่วย การผลิตเส้นใยที่ให้ผลดีควรใช้เครื่องตีใบสับปะรดจะได้เส้นใยที่ดีมีคุณภาพเป็นเส้นใยยาว และมีความแข็งแรงมากกว่าใช้สารเคมี

เมื่อนำเส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านการแช่ด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 30% ใช้เวลาแช่ 5 วัน ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ลักษณะของเส้นใยและวัดความขาวสว่างของเส้นใยได้ 52.64 72.47 77.39 77.95 และ 76.49% ตามลำดับ ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ลักษณะของเส้นใยใบสับปะรดที่ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

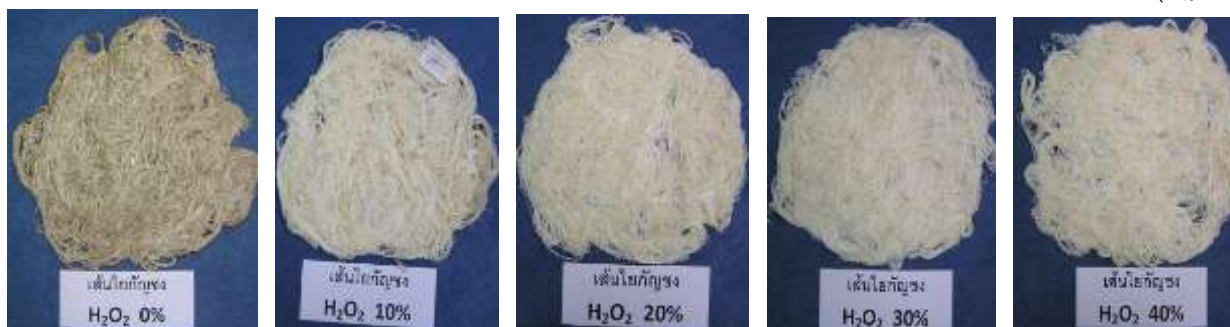
### 3.1.3 ผลการเตรียมเส้นใยกัญชง

เปลือกกัญชงอายุ 90 วัน ลักษณะเป็นเส้นยาวประมาณ 1-2.5 เมตร สีเขียว มีความชื้น 9.05% เปลือกมีเนื้อไม้ติดมาบ้างแต่ไม่มาก มีฝุ่น และเชื้อราบ้างในกรณีที่เปลือกแห้งไม่ดี ดังนั้นต้องคัดออก นำเปลือกกัญชงต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ผลการต้มได้ปริมาณเส้นใยดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 เปรียบเทียบเส้นใยกัญชงที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง	NaOH (%)	เส้นใยที่ได้ (%)	ลักษณะของเส้นใย
1	10	60.74	เส้นใยแยกได้ไม่ดี
2	20	60.08	เส้นใยแยกได้ดี
3	30	57.28	เส้นใยแยกได้ดี

ลักษณะของเส้นใยที่สามารถแยกออกจากกันทางด้านขวางได้ง่ายคือเปลือกกัญชงที่ต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จะได้เยื่อเฉลี่ย 60.08% เมื่อนำเส้นใยดังกล่าวฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้งวัดความขาวสว่าง เส้นใยได้ 25.09 57.12 58.05 58.98 และ 59.91% ตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยที่ได้ดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 ลักษณะของเส้นใยกัญชง ที่ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

### 3.1.4 ผลการเตรียมเส้นใยกาบมะพร้าว

มะพร้าวอ่อนที่นำมาผลิตเส้นใยเมื่อแยกกาบออกจากกะลามะพร้าวแล้วสามารถแบ่งชนิดของกาบได้ดังนี้

- ผิวเปลือกด้านนอกที่ถูกปาดออกจากผลมะพร้าวเพื่อนำผลมะพร้าวขายเป็นน้ำมะพร้าวอ่อนนั้น ในส่วนของเปลือกที่ถูกปาดออกนี้จะเป็นส่วนของเนื้อกาบประมาณ 51.35% ของน้ำหนักสดของกาบและส่วนที่เป็นผิวนอกสีเขียวประมาณ 48.65% ส่วนของผิวนอกนี้เมื่อแห้งแล้วจะเหลือน้ำหนักแห้งประมาณ 23.78% ผิวนอกส่วนนี้จะแข็งมากการนำมาผลิตเส้นใยทำได้ยากกว่าส่วนของเปลือกด้านใน

- กาบในที่มีส่วนของผิวเปลือกด้านนอกปนอยู่บ้าง กาบส่วนนี้จะมีเส้นใยและขุยมะพร้าวมากกว่าผิวกาบด้านนอกเมื่อนำมาแยกจะมีส่วนของกาบในประมาณ 88.23% และผิวเปลือกสีเขียวประมาณ 11.77% กาบด้านในนี้ถ้าแห้งจะเหลือน้ำหนักแห้งประมาณ 17.25% การนำมาใช้ควรแยกเอาผิวสีเขียวออกให้หมด การผลิตเส้นใยจะทำได้ดี

- กาบด้านในที่ไม่มีส่วนของผิวเปลือกสีเขียว ติดอยู่เลยกาบส่วนนี้เมื่อแห้งแล้วจะเหลือน้ำหนักแห้งประมาณ 17.39% ถ้านำไปต้มจะผลิตเส้นใยได้ง่ายกว่ากาบที่มีผิวเปลือกติดอยู่แต่ความยาวของเส้นใยจะไม่ต่างจากกาบที่กล่าวมาเนื่องจากเป็นกาบที่ถูกปาดด้วยมีดเพื่อนำผลไปจำหน่ายเป็นน้ำมะพร้าวอ่อนนั่นเอง

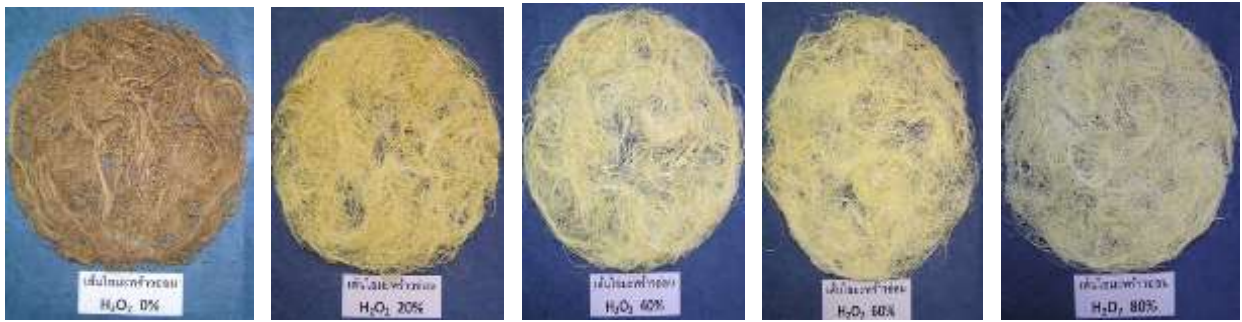
- กาบมะพร้าวที่ดึงออกจากผลมะพร้าวโดยตรงกาบชนิดนี้จะมีส่วนของกาบด้านในมากกว่าผิวกาบสีเขียวด้านนอกและจะมีเส้นใยที่ยาวกว่าเนื่องจากกาบไม่ถูกตัด กาบชนิดนี้จะมีส่วนของกาบด้านในประมาณ 79.50% และผิวเปลือกสีเขียวด้านนอกประมาณ 20.50% เมื่อแห้งแล้วจะเหลือน้ำหนักแห้งประมาณ 23.25% เส้นใยที่ได้เหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์

การผลิตเส้นใยกาบมะพร้าวโดยนำกาบมะพร้าวอ่อนที่ดึงออกจากผลมานำส่วนของผิวสีเขียวออกแล้วต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10 20 และ 30% ของน้ำหนักกาบแห้ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง จะได้ปริมาณและลักษณะของเส้นใยดังตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 เปรียบเทียบเส้นใยกาบมะพร้าวอ่อนที่ได้จากการต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง	NaOH (%)	เส้นใยที่ได้ (%)	ลักษณะของเส้นใย
1	10	44.55	การแยกเส้นใยไม่ดี
2	20	34.06	การแยกเส้นใยได้ปานกลาง
3	30	27.87	การแยกเส้นใยได้ดี

ลักษณะเส้นใยที่ได้ การต้มกาบมะพร้าวอ่อนควรใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง จะได้เส้นใยเฉลี่ย 27.87% ของน้ำหนักกาบแห้ง เมื่อนำเส้นใยดังกล่าวฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 20 40 60 และ 80% ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง วัดความขาวสว่างของเส้นใยได้ 0.04 11.35 17.69 26.53 และ 35.38% ตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยที่ได้ดังภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ลักษณะของเส้นใยมะพร้าวอ่อนที่ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

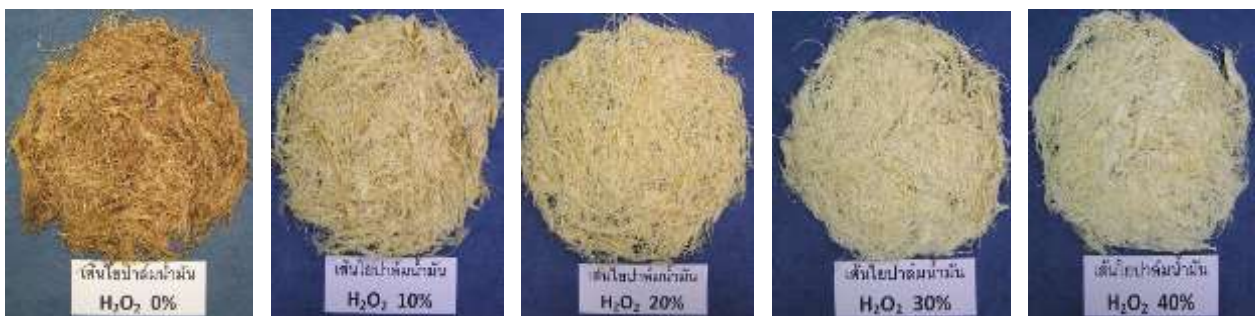
### 3.1.5 ผลการเตรียมเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน

ทะเลลายปาล์มน้ำมันสดที่ใช้ทดลองจะมีน้ำหนักสดเฉลี่ยทะเลลายละ 22.5 กิโลกรัม ถ้าบีบเอาลูกปาล์มออกแล้วจะเหลือทะเลลายปาล์มแห้งเฉลี่ยทะเลลายละ 1.2 กิโลกรัม ทะเลลายปาล์มนี้จะมีช่อดอกที่ยังติดแน่นอยู่กับทะเลลาย จำเป็นต้องผ่านการตีด้วยเครื่องที่มีกำลังแรงม้าสูงมาก ๆ เพื่อตีช่อดอกแยกออกจากกันเพื่อง่ายต่อการนำไปต้ม และได้เส้นใยที่เหมาะสมต่อการนำไปศึกษาทดลอง และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายที่เป็นค่าเชื้อเพลิงและสารเคมีด้วย ลักษณะของช่อดอกจะเป็นเส้นใยยาวจากโคนทะเลลายปาล์มไปจนสุดปลาย ช่อดอกที่อยู่ตรงปลายจะยาวกว่าช่อดอกที่อยู่ส่วนโคนทะเลลาย จากการต้มช่อดอกทะเลลายปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตเส้นใยด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์จะได้ปริมาณของเส้นใยดังตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 เปรียบเทียบปริมาณเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ต้มด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง	NaOH (%)	เส้นใยที่ได้ (%)	ลักษณะของเส้นใย
1	10	77.60	เส้นใยแยกได้ไม่ดี
2	20	71.60	เส้นใยแยกได้ปานกลาง
3	30	66.60	เส้นใยแยกได้ดี

จากการต้มช่อดอกทะเลลายปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตเส้นใยนั้นควรจะต้มโดยใช้สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% ของน้ำหนักช่อดอกอบแห้ง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จะได้เส้นใยเฉลี่ย 66.60% ของน้ำหนักช่อดอกอบแห้งที่ต้ม เมื่อนำเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ได้ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0 10 20 30 และ 40 % ของเส้นใยอบแห้งวัดความขาวสว่างของเส้นใยได้ 3.43 16.11 22.76 31.33 และ 33.95% ตามลำดับ ลักษณะของเส้นใยที่ได้ดังภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3-5 ลักษณะของเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลของการเตรียมเส้นใยทั้ง 5 ชนิด คือ กาบกล้วยบ้าน ใบสับปะรด กัญชง กาบมะพร้าว และทะเลลายปาล์มน้ำมัน ด้วยสารเคมีที่ต้มด้วยต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และการฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์

ออกไซด์ ซึ่งได้แสดงผลไปแล้วข้างต้น พบว่า เส้นใยที่ได้ ค่อนข้างเป็นเส้นใยที่สั้น เหมาะกับการเตรียมเส้นใยเสริมแรงด้วยวิธีการเตรียมแผ่นผืนผ้าไม่ถักทอแบบเปียกด้วยการกระจายตัวในน้ำและทำแห้ง (คล้ายการทำกระดาษ) ซึ่งหากนำมาใช้เสริมแรงคอมพอสิตที่ใช้การเตรียมแบบสานเส้นใยเป็นแผ่นผืนผ้าไม่ถักทอแบบแห้ง จำเป็นต้องเตรียมเส้นใยที่มีความยาวเส้นใยที่เหมาะสม 30-40 มิลลิเมตร เพื่อผ่านเครื่องสานเส้นใยได้ ดังนั้นการเตรียมเส้นใยของพืชบางชนิด จึงได้มีการปรับการเตรียมให้เหมาะสม โดยเฉพาะพืชจากลำต้น คือ กาบกล้วยบ้าน พืชจากใบ คือ ใบสับปะรด ซึ่งได้ทำการเตรียมเส้นใยด้วยการสกัดทางกล ด้วยเครื่อง decorticating เพื่อให้ได้เส้นใยต่อไป

### 3.2 องค์ประกอบทางเคมี ขนาดเส้นใย และลักษณะพื้นฐานของเส้นใยเซลลูโลสที่สกัดได้

ผลจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยตัวอย่าง กาบกล้วยบ้าน ใบสับปะรด กล้วย กาบมะพร้าว และทะเลาะปาล์มน้ำมัน ก่อนการสกัดที่เป็นวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 3-8 พบว่า พืชจากกล้วย และใบสับปะรด มีลักษณะองค์ประกอบทางเคมีเส้นใยที่คล้ายกัน คือ มีปริมาณลิกนิน อยู่ต่ำกว่า 10% เนื่องจากเป็นส่วนของกบลำต้น และใบ ปริมาณสารแทรกมีน้อย และมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูง ดังนั้นในการเตรียมเส้นใยเพื่อใช้ศึกษาสำหรับการนำมาทำเป็นวัสดุเสริมแรง ไม่จำเป็นต้องทำการเตรียมด้วยการใช้ด่างหรือฟอกขาว เนื่องจากกระบวนการล้างน้ำสบู่และน้ำ หลังการลอกเส้นใยออกมาจากกบหรือใบ เพียงพอที่จะนำเส้นใยที่ยังมีปริมาณเซลลูโลสสูงมาใช้ได้ สำหรับพืชจากกล้วย ซึ่งเป็นเปลือกลำต้นที่นำมาทำเส้นใย มีองค์ประกอบของลิกนินต่ำ 5.74% และมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสสูง ส่วนปริมาณถ้ามีค่าต่ำมาก ดังนั้นการเตรียมเส้นใยเพื่อใช้ศึกษาเช่นเดียวกับเส้นใยจากกบกล้วยหรือใบสับปะรด เพียงลอกเปลือกออกมาใช้แล้วล้างน้ำสบู่และน้ำ น่าจะเพียงพอในการนำมาใช้เสริมแรงต่อไป และจะนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพอื่นต่อไป

ตารางที่ 3-8 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ

องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนักแห้ง)	กาบกล้วย <sup>1</sup>	ใบสับปะรด <sup>2</sup>	เปลือก กล้วย <sup>3</sup>	กาบมะพร้าว <sup>4</sup>	ทะเลาะปาล์ม น้ำมัน <sup>5</sup>
1. ปริมาณสารแทรก	4.14	5.57	14.85	28.48	20.79
2. ปริมาณลิกนิน	10.09	4.83	5.74	29.79	23.10
3. ปริมาณโฮโลเซลลูโลส	83.40	94.62	79.87	73.40	66.98
4. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	58.95	66.35	64.74	39.31	47.83
5. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	24.45	28.27	15.13	34.09	19.15
6. ถ้า	4.80	4.23	2.93	4.80	6.49

<sup>1</sup> แยกเอาเปลือกออก คิดเฉพาะส่วนเส้นใย

<sup>2</sup> แยกเอาส่วนผิวใบออก คิดเฉพาะส่วนเส้นใย

<sup>3</sup> แยกเอาส่วนเปลือก

<sup>4</sup> คิดจากกบมะพร้าว

<sup>5</sup> คิดจากทะเลาะปาล์ม

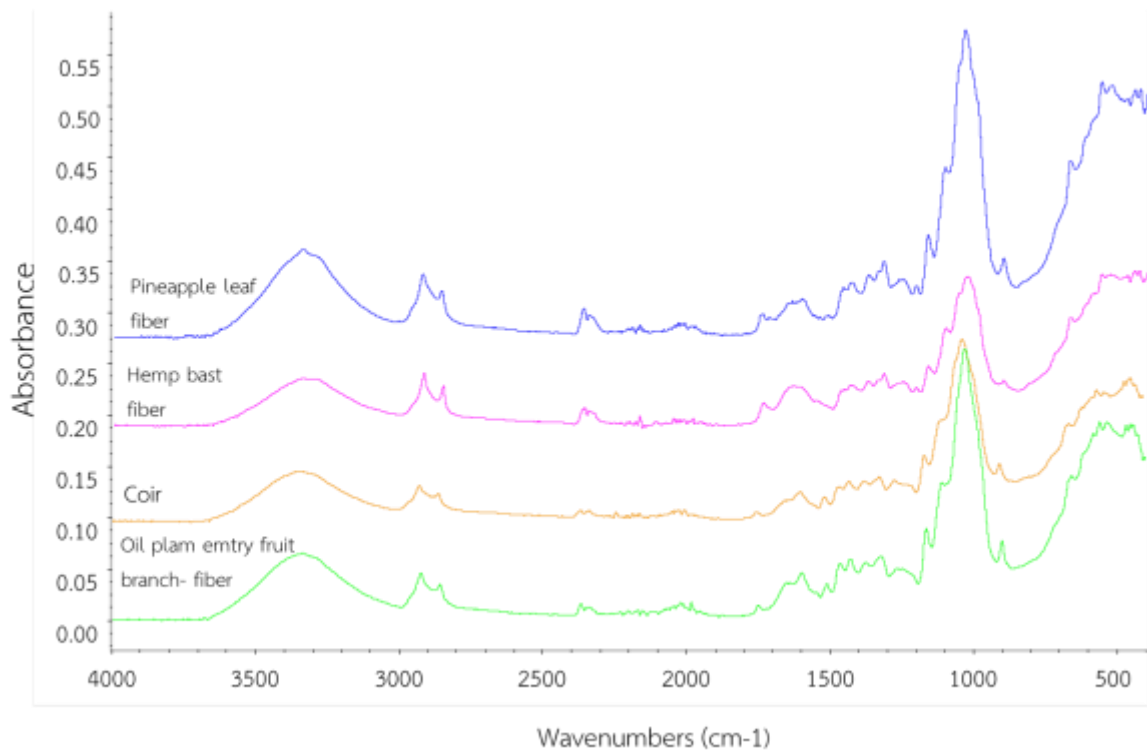
สำหรับเส้นใยจากกบมะพร้าวและทะเลาะปาล์มน้ำมันนั้น ยังมีองค์ประกอบของลิกนินสูง เนื่องจากได้มาจากส่วนผล และช่อของผล ซึ่งมีปริมาณลิกนิน มากกว่า 20% โดยที่เส้นใยจากกบมะพร้าวมีค่าเหล่านี้สูงกว่าทะเลาะปาล์มน้ำมัน ซึ่งการมีปริมาณลิกนินสูงนี้ทำให้เส้นใยมะพร้าวมีลักษณะแข็งตัว และการมีปริมาณสารแทรกสูงนี้ เนื่องจากการมีชั้นไขที่เป็นกรดไขมันเคลือบที่ผิวของเส้นใย (Prasad et al., 1983) จึงจำเป็นที่ต้องเตรียมเส้น

ใยด้วยการสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จากรายงานผลข้างต้น จึงเลือกใช้สถานะของการเตรียมสำหรับเส้นใยมะพร้าวครั้งนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40 % ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง เนื่องจากค่อนข้างมีปริมาณลิกนินมากจึงต้องใช้ความเข้มข้นของสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูง อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นสูงมากกว่า 40% จะไม่เหมาะกับการทำงานจริง สำหรับเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน ใช้สถานะครั้งนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30 % ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง ผลขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยทั้งสองชนิดแสดงในตารางที่ 3-9 พบว่า เมื่อนำเส้นใยทั้งสองชนิดมาต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และฟอกขาว เพื่อช่วยกำจัดสิ่งเจือปนอื่น เช่น ลิกนิน เฮมิเซลลูโลส ซีฟี่ง เป็นต้น พบว่า องค์ประกอบของปริมาณแอลฟาเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และมีปริมาณลิกนินและสารแทรกอื่นลดลง โดยผลขององค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยทั้งสองชนิดในวัตถุดิบมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น (Khalil and Rozman, 2000 ; Reddy and Yang, 2005) เส้นใยที่ได้จากกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันดังกล่าว จะนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพอื่นเพื่อศึกษาการนำไปเสริมแรงให้กับคอมพอสิตพอลิเมอร์ต่อไป

ตารางที่ 3-9 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกาบมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันหลังการเตรียมเส้นใยด้วยการสกัดด้วยด่างและฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

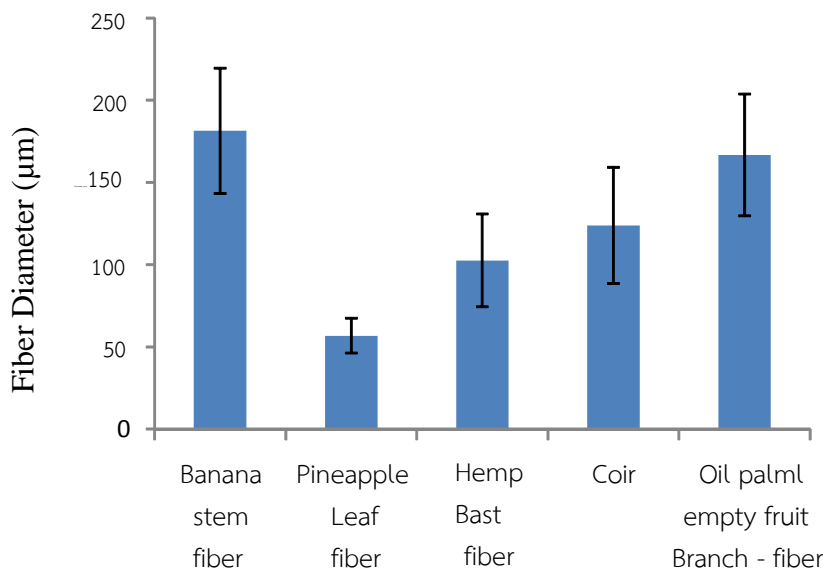
องค์ประกอบทางเคมี (% โดยน้ำหนักแห้ง)	กาบมะพร้าว	ทะเลลายปาล์มน้ำมัน
1. ปริมาณสารแทรก	3.37	3.68
2. ปริมาณลิกนิน	26.85	10.92
3. ปริมาณไฮโดรเซลลูโลส	68.46	83.28
4. ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส	48.82	67.19
5. ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	19.64	16.09

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบบนพื้นผิวของเส้นใยแต่ละชนิดด้วย ATR mode ของเครื่อง FTIR Spectroscopy ได้ผลของ สเปกตรัม FTIR (ATR) ดังแสดงในภาพที่ 3-6 โดยที่พีก 3200 – 3600  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการสั่นของหมู่ -OH ภายในโครงสร้างเซลลูโลส (Seki et al., 2013) พีกที่ 2923  $\text{cm}^{-1}$  และ 2854  $\text{cm}^{-1}$  เป็นสัญญาณจากการ stretching ของพันธะ C-H ภายในหมู่ CH และ  $\text{CH}_2$  ของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Paiva et al., 2007) พีกที่ 1730  $\text{cm}^{-1}$  เป็นพีกของหมู่ C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิลในเฮมิเซลลูโลส (Biagiotti et al., 2004) รวมทั้งการมีหมู่อะลิฟาติกคีโตน หรือ อัลดีไฮด์ในโครงสร้างลิกนิน (Abdelmonleh et al., 2007) ส่วนพีกที่ 1375  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของหมู่ C-H ของลิกนิน เซลลูโลส หรือไซเลน ซึ่งมีมากในเส้นใยก่อนการฟอกขาว เมื่อเปรียบเทียบกราฟ FTIR ของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด พบว่า เส้นใยทั้ง 5 ชนิด แสดงพีกที่องค์ประกอบหลักสอดคล้องกันที่มีรายงานมา ส่วนลักษณะความเข้มของพีกที่แตกต่างกันไปขึ้นกับส่วนประกอบของพีกที่แตกต่างกัน รวมทั้งวิธีในการเตรียมเส้นใยมีความแตกต่างกัน โดยเส้นใยจากกล้วยและสับปะรด มีลักษณะค่อนข้างเป็นสีขาว และมีองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยใกล้เคียงกัน จึงให้ลักษณะความเข้มของพีกใกล้เคียงกัน ขณะที่เส้นใยจากกล้วย ซึ่งรวมเปลือกด้วย ซึ่งมีสีเข้มกว่า และไม่ผ่านการฟอกขาว ทำให้เห็นความเข้มของพีกที่ต่ำกว่า สำหรับเส้นใยมะพร้าวและทะเลลายปาล์ม ซึ่งเป็นส่วนของวัตถุดิบที่เป็นเส้นใยที่เตรียมด้วยการสกัดด้วยด่างและฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ยังเห็นลักษณะพีกของเส้นใยมีแนวโน้มเดียวกัน



ภาพที่ 3-6 สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยจากกล้วยบ้าน ใบสับปะรด เปลือกกล้วยขง กาบมะพร้าว และทะเลาะปาล์ม น้ำมัน

การเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด ผ่านกล้องจุลทรรศน์ (ภาพที่ 3-7) พบว่า ทะเลาะปาล์มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 220 ไมโครเมตร รองลงมาคือกบกล้วยบ้านที่มีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 175 ไมโครเมตร สอดคล้องกับการรายงานของ Mukhopadhyay et al. (2008) ที่พบว่าเส้นใยกล้วยมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 140 – 230 ไมโครเมตร ในขณะที่เส้นใยกล้วยขงมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 97 ไมโครเมตร จากรายงานของ Marrot et al. (2013) พบว่าเส้นใยเดี่ยวของกล้วยขงมีขนาดเล็กเพียง 12 – 22 ไมโครเมตรเท่านั้น ทั้งนี้ ขนาดที่ใหญ่ขึ้นของเส้นใยกล้วยขงจากการทดลองนี้ น่าจะเกิดจากการที่เส้นใยเดี่ยวรวมตัวกันกลายเป็นกลุ่มของเส้นใย และการเตรียมเส้นใยที่ได้จากเปลือกทั้งลำต้น ในส่วนของเส้นใยสับปะรดที่ได้มาจากส่วนของใบ ทำให้มีขนาดของเส้นใยค่อนข้างเล็ก (50 ไมโครเมตร) ใกล้เคียงกับการรายงานของ Nato et al. (2015) ที่วัดขนาดของเส้นใยจากใบสับปะรด 12 สายพันธุ์ ซึ่งมีขนาดการกระจายตัวอยู่ในช่วง 35-73 ไมโครเมตร จะเห็นว่าขนาดของเส้นใยทั้ง 5 ชนิดมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับธรรมชาติ สภาพแวดล้อมในการเจริญ ส่วนของพืชที่ได้เส้นใยมา และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งขนาดของเส้นใยจะมีอิทธิพลต่อกระบวนการเสริมเส้นใยลงในพอลิเมอร์ โดยเส้นใยที่มีขนาดใหญ่จะถูกจำกัดปริมาณการใช้เส้นใย นอกจากนี้ยังส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลและทางกายภาพอื่นๆ ดังจะกล่าวถึงในการศึกษาต่อไป



ภาพที่ 3-7 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยจากกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย ขง กาบมะพร้าว และทะลายปาล์ม น้ำมัน ที่ได้จากกระบวนการเตรียมเส้นใยต่างๆ

### 3.3 สมบัติทางพื้นผิวของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้

จากการทดลองการหามุมสัมผัสของของเหลว diiodomethane และ formamide บนเส้นใยทั้ง 5 ชนิด แสดงผลในตารางที่ 3-10 โดยที่เส้นใยเซลลูโลสที่จุ่มใน diiodomethane ซึ่งเป็นสารละลายที่มีขี้ พบว่า เส้นใยจากทะลายปาล์ม น้ำมันให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุด รองลงมาคือ เส้นใยจากใบสับปะรด กาบกล้วย กาบมะพร้าว และกล้วยขง แสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของเส้นใยที่ให้ค่ามุมสัมผัสสูงสุดในสารละลายที่มีขี้ นี้ เป็นเส้นใยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารเคมีทั้งต่างและฟอกขาว ทำให้องค์ประกอบอื่น ถูกกำจัดออกไป เหลือแต่องค์ประกอบเซลลูโลส ซึ่งมีความเป็นขี้มากกว่า (hydrophilicity) หากพิจารณาค่ามุมสัมผัสของเส้นใยเซลลูโลสที่จุ่มในของเหลว formamide ซึ่งเป็นสารละลายที่ไม่มีขี้ พบว่า ค่ามุมสัมผัสต่ำ คือ ผิวหน้าเส้นใยชนิดนั้น มีความเป็นขี้ต่ำ (hydrophobicity) เส้นใยกล้วยซึ่งมีองค์ประกอบของเซลลูโลส 58.95% และยังมีปริมาณองค์ประกอบอื่น โดยที่เส้นใยเตรียมทางกลด้วยเครื่อง decorticating แล้วล้างด้วยสบู่ ทำให้ผิวหน้าเส้นใยยังมีสารอื่นที่ไม่ใช่เซลลูโลสเหลืออยู่ ดังนั้นจึงให้ค่ามุมสัมผัสเป็น 0 รองลงมา คือ เส้นใยจากใบสับปะรด กล้วยขง กาบมะพร้าว และ เส้นใยปาล์ม ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของมุมสัมผัสที่วัดจากการจุ่มเส้นใยในของเหลว diiodomethane ซึ่งเป็นสารละลายที่มีขี้ ผลของการเตรียมเส้นใยด้วยต่างและการฟอกขาว ทำให้กำจัดสิ่งเจือปนออกไป ทำให้เส้นใยบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งปริมาณเซลลูโลสที่มากขึ้น สัมพันธ์กับพลังงานพื้นผิวตามที่ Papirer et al. (2000) ศึกษาว่าปริมาณแอลฟาเซลลูโลสมาก ทำให้ความเป็นผลึกสูง และทำให้พลังงานพื้นผิวเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3-10 มุมสัมผัสของเส้นใยเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ ที่วัดได้ในของเหลวที่มีความเป็นขี้ต่างกัน

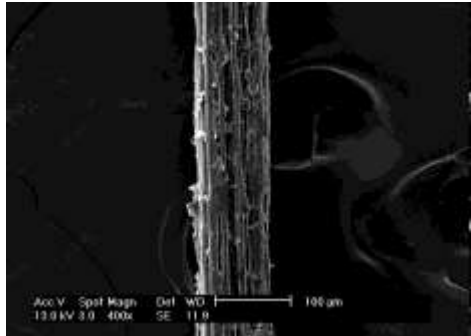
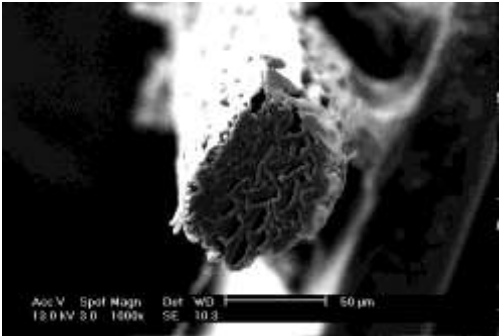
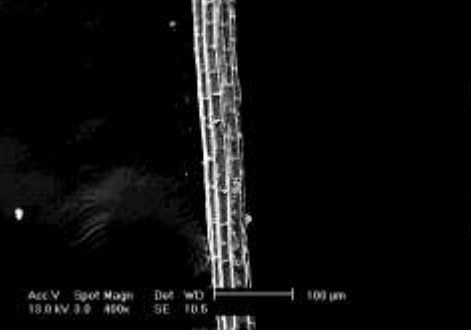
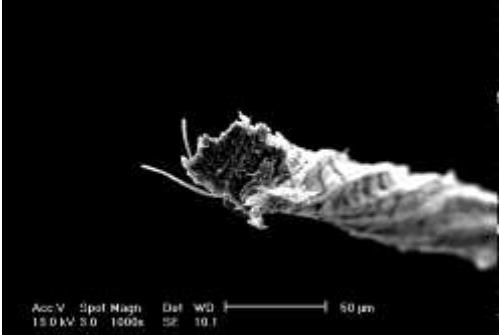
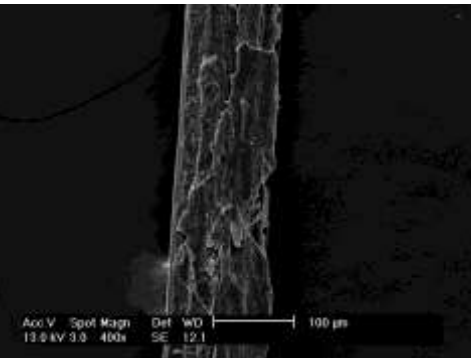
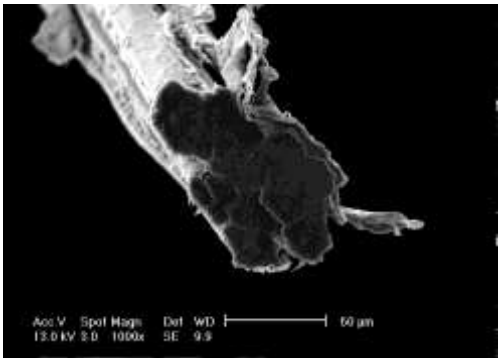

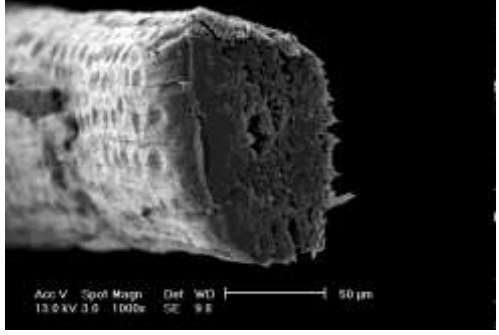
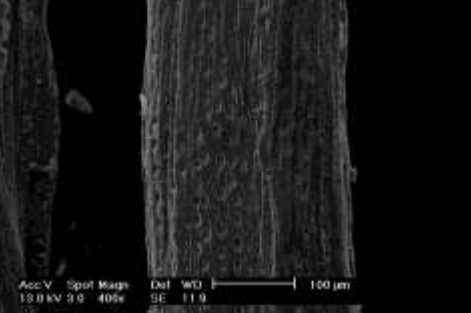
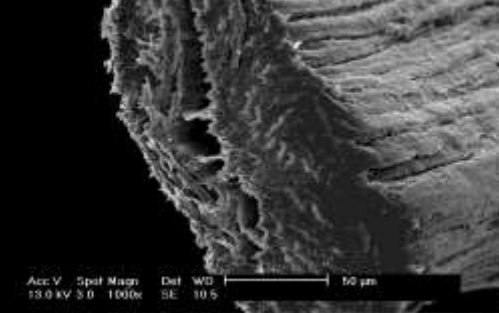
Fiber	Liquid	Contact angle
Banana stem	Diiodomethane	70.1+4.3
	Formamide	0+0
Pineapple leaf	Diiodomethane	76.8+5.5
	Formamide	49.8+3.5
Hemp bast	Diiodomethane	57.2+3.7
	Formamide	58.6+16.7
Coir	Diiodomethane	65.2+4.7
	Formamide	64.1+9.8
Oil palm empty fruit branch	Diiodomethane	83.7+3.3
	Formamide	86.6+5.8

### 3.4 สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของเส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้

#### 3.4.1 ลักษณะทางสัณฐานของชิ้นเส้นใยก่อนและหลังการทดสอบสมบัติทางเชิงกล

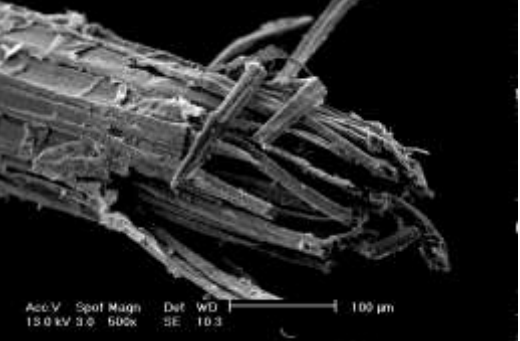
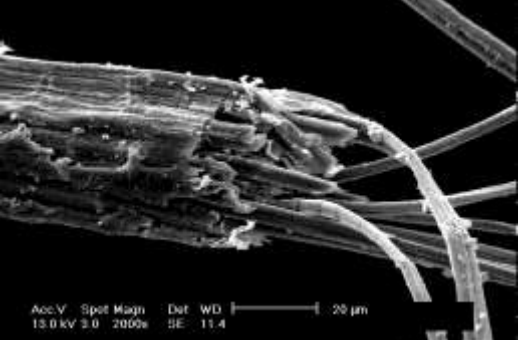
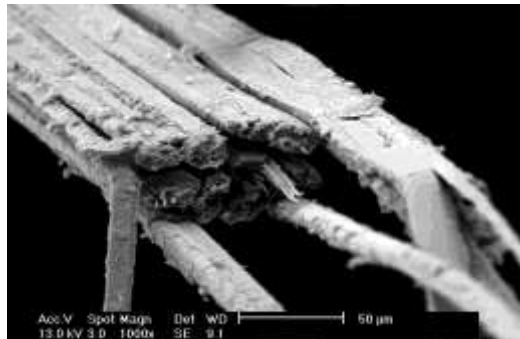

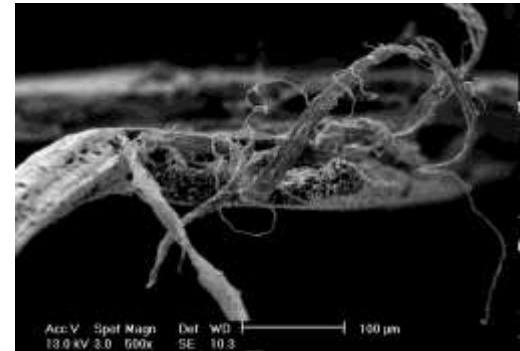
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานของเส้นใยจากกากกล้วย ใบสับประรด เปลือกกล้วย ขอบมะพร้าวอ่อน และทะเลสาปาล์มน้ำมัน ก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกล ภายใต้กล้อง SEM ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-11 ในการทดลองนี้ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อสังเกตพื้นที่หน้าตัดโดยการตัดด้วยใบมีดโกน ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นการจัดเรียงตัวของเส้นใยเดี่ยว (single fiber) ที่เรียงตัวภายในเส้นใยแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน สำหรับการสังเกตลักษณะของเส้นใยจากกากกล้วย ใบสับประรด มีลักษณะพื้นผิวภายนอกค่อนข้างขรุขระ สามารถมองเห็นการแยกตัวของเซลล์ทรงกระบอกของเส้นใยเดี่ยวได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเส้นใยจากใบสับประรดที่สามารถสังเกตเห็นผนังกันเซลล์ภายในเส้นใยเดี่ยวแต่ละเส้นได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยทั้ง 2 ชนิดนี้มีลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่ต่ำกว่า 10% นอกจากนี้เส้นใยจากกากกล้วยและใบสับประรดยังมีสารแทรกอยู่เพียง 4% และ 5.5% ตามลำดับ สอดคล้องกับลักษณะของพื้นที่หน้าตัดที่สามารถสังเกตเห็นช่องว่างระหว่างเส้นใยเดี่ยวได้อย่างชัดเจน ในกรณีของกล้วย มีลักษณะพื้นผิวภายนอกขรุขระเช่นเดียวกับเส้นใยจากกากกล้วยและเส้นใยสับประรด แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นเส้นใยเดี่ยวได้อย่างชัดเจน สอดคล้องกับการศึกษาของเส้นใยกล้วยภายใต้กล้อง SEM ของ Kabir et al. (2013a) ที่พบว่าส่วนของเส้นใยกล้วยที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ เป็นส่วนประกอบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่ห่อหุ้มเส้นใยเซลลูโลสอยู่ภายใน นอกจากนี้ เส้นใยกล้วยยังมีปริมาณสารแทรกอยู่สูงกว่าเส้นใยกล้วยและสับประรด (14.85%) ส่งผลให้ไม่สามารถสังเกตเห็นการแยกตัวของเส้นใยเดี่ยวบนพื้นที่หน้าตัดได้เมื่อใช้ใบมีดโกนในการตัดเตรียมชิ้นตัวอย่างก่อนการสังเกตภายใต้กล้อง SEM ในขณะที่พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยกล้วยและสับประรดมีลักษณะกลม เส้นใยกล้วยกลับมีลักษณะแบนและมีเหลี่ยมมุม Marrot et al. (2013) ได้ทำการศึกษารูปร่างของเส้นใยเดี่ยวที่บรรจุอยู่ภายในเส้นใยกล้วยเปรียบเทียบกับเส้นใยป่าน พบว่าเส้นใยเดี่ยวของกล้วยมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมที่ไม่สม่ำเสมอ มากกว่าเส้นใยเดี่ยวของป่าน ซึ่งมีลักษณะที่เป็นรูปทรง 6 เหลี่ยมที่เล็ดดูคล้ายวงกลม ส่วนกรณีของเส้นใยจากมะพร้าวและทะเลสาปาล์มที่ผ่านการล้างด้วย NaOH และฟอกด้วย H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> แล้ว มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เนื่องจากยังมีลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึง 26% และ 11% ตามลำดับ พื้นที่หน้าตัดของเส้นใยมะพร้าวมีลักษณะกลม ส่วนเส้นใยทะเลสาปาล์มมีรูปร่างเป็นวงรี และสังเกตเห็นช่องว่างระหว่าง single fibers ได้เนื่องจากมีปริมาณสารแทรกอยู่ในปริมาณเพียง 3%

ตารางที่ 3-11 ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะสัณฐานของเส้นใยก่อนการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตัวอย่าง จาก	ลักษณะพื้นผิว	ลักษณะพื้นที่หน้าตัด
กาบ กล้วย		
ใบ สับปะรด		
เปลือก กล้วย		
กาบ มะพร้าว		
ทะลาย ปาล์ม น้ำมัน		

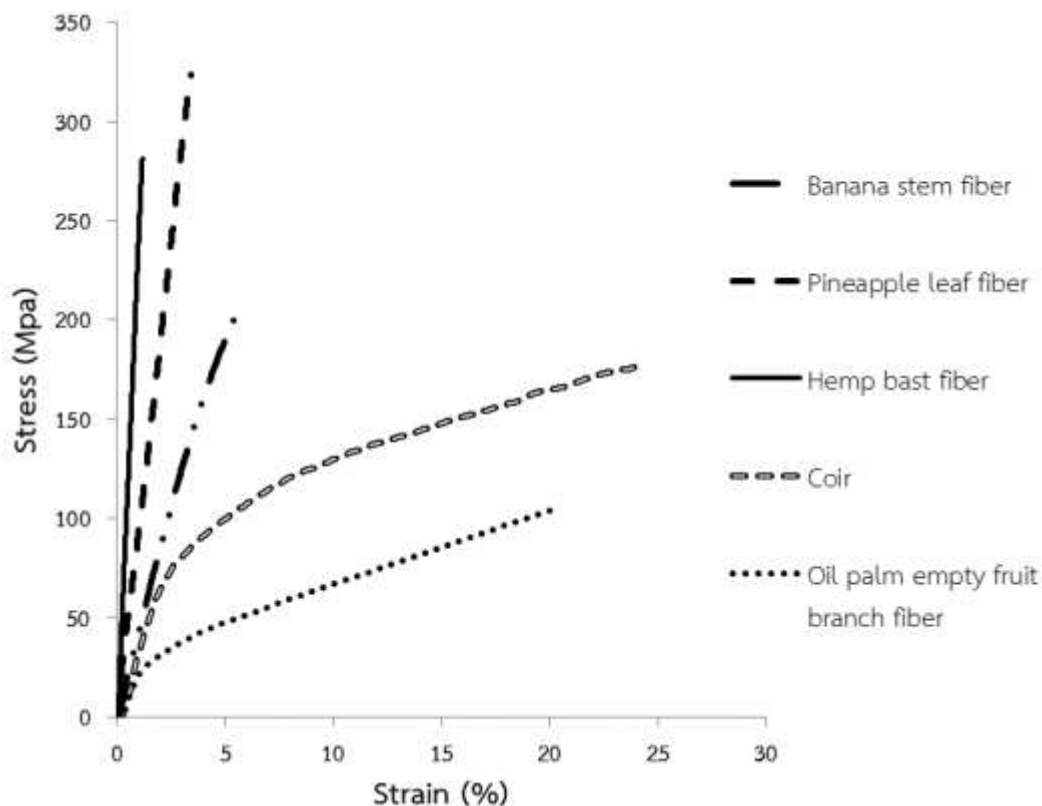
เส้นใยแต่ละชนิด หลังการทดสอบการขาดภายใต้แรงดึงจะถูกนำมาส่องด้วยกล้อง SEM เพื่อดูลักษณะการขาดของเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 3-12 ซึ่งสังเกตพบว่า เส้นใยจากกากกล้วยมีการยึดตัวของเส้นใยเดี่ยวทรงกระบอกอย่างสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยจากใบสับปะรดและเปลือกกล้วย ซึ่งมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปทรงกระบอกและทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าตามลำดับ และมีร่องรอยการแตกหักของเส้นใยเดี่ยวมากกว่าเส้นใยที่ถูกยึดออก นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นช่องว่างภายในเส้นใยเดี่ยวที่เรียกว่า lumina ในเส้นใยกากกล้วยและใบสับปะรด แต่ไม่พบในเส้นใยกล้วย สอดคล้องกับปริมาณสารแทรกของกล้วยที่มีค่าสูงกว่าเส้นใยอื่นๆ ส่วนเส้นใยของกากมะพร้าวมีการกระจายตัวของเส้นใยเดี่ยวที่มีความสามารถในการยึดตัวได้สูงมากกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ สอดคล้องกับการที่มีองค์ประกอบประเภทลิกนินอยู่สูงถึง 26% ในกรณีของเส้นใยจากทะเลลายปาล์มจะมีส่วนที่ยึดตัวออกมาและอีกส่วนที่ถูกหักออกไป เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ (ประมาณ 300 ไมโครเมตร) และมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงรี อาจส่งผลให้เกิดการดึงด้วยแรงที่ไม่สม่ำเสมอต่อพื้นที่หน้าตัดของทะเลลายปาล์มได้

ตารางที่ 3-12 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใยภายหลังการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตัวอย่าง	ลักษณะสัณฐานของพื้นที่หน้าตัดเส้นใยภายหลังการทดสอบสมบัติเชิงกล	
กากกล้วย		 <p>Acc.V Spot Magn Det WD   100 µm 13.0 kV 3.0 600x SE 10.3</p>
ใบสับปะรด		 <p>Acc.V Spot Magn Det WD   20 µm 13.0 kV 3.0 2000x SE 11.4</p>
ก้านกล้วยขง		 <p>Acc.V Spot Magn Det WD   50 µm 13.0 kV 3.0 1000x SE 9.1</p>
กากมะพร้าว		 <p>Acc.V Spot Magn Det WD   100 µm 13.0 kV 3.0 500x SE 9.8</p>
ทะลายปาล์มน้ำมัน		 <p>Acc.V Spot Magn Det WD   100 µm 13.0 kV 3.0 500x SE 10.3</p>

### 3.4.2 สมบัติเชิงกลของเส้นใย

ในระหว่างการทดสอบสมบัติเชิงกลของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด มีการเปลี่ยนแปลงของค่า tensile stress ซึ่งแสดงถึงปริมาณแรงที่ใช้ในการดึงเส้นใยต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใย และ strain ที่แสดงถึงระยะทางที่เส้นใยมีการยืดตัวออก ดังแสดงในภาพที่ 3-8 พบว่าเส้นใยกาบกล้วย ใบสับปะรด และกล้วยง ให้ลักษณะกราฟที่มีค่าความชันสูง และการยืดตัวน้อย ซึ่งสามารถให้ค่า Young's modulus รวมทั้งให้ค่า tensile stress สูงกว่าเส้นใยกาบมะพร้าวและเส้นใยทะเลสาปาล์ม หมายความว่า เส้นใยกาบกล้วย ใบสับปะรด และกล้วยง จะมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกระทำต่อเส้นใยที่มากขึ้น จนถึงจุดที่เกิดการแตกหักของเส้นใย โดยเส้นใยกล้วยงมีค่าความชันของกราฟสูงที่สุด อธิบายได้ว่าถึงแม้จะใช้แรงดึงที่สูง แต่การขยายตัวของเส้นใยจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเส้นใยมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น รองลงมาคือเส้นใยสับปะรดและเส้นใยกล้วย ที่มีค่าชันของกราฟต่ำกว่าเส้นใยกล้วยงตามลำดับ ในขณะที่เส้นใยกาบมะพร้าวและทะเลสาปาล์มมีลักษณะของกราฟเป็นเส้นตรงเพียงระยะสั้นๆ ในช่วงแรกของการใช้แรงดึง หลังจากนั้นเส้นกราฟจะมีลักษณะโค้งเข้าหาแกนของค่า strain แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำต่อเส้นใยและการยืดตัวที่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน จนถึงจุดที่เกิดการแตกหักของเส้นใย โดยความสามารถในการยืดตัวของเส้นใยมะพร้าวและทะเลสาปาล์มมีค่าสูงกว่าเส้นใย 3 ชนิดแรก แม้ได้รับแรงกระทำที่น้อยกว่า โดยเส้นใยกาบมะพร้าวมีความสามารถในการยืดตัวได้สูงที่สุด ในขณะที่เส้นใยทะเลสาปาล์มมีความสามารถในการยืดตัวรองลงมา หรือกล่าวได้ว่า เส้นใยมะพร้าวและทะเลสาปาล์ม มีความต้านทานต่อแรงดึงน้อยกว่าเส้นใยกล้วยง เส้นใยจากใบสับปะรด และเส้นใยกาบกล้วย



ภาพที่ 3-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile stress และ strain ในระหว่างการทดสอบเชิงกลด้วยการยืดเส้นใยทั้ง 5 ชนิด

เมื่อพิจารณาค่า tensile strength, % elongation at break และ Young modulus ดังแสดงในตารางที่ 3-13 พบว่ากล้วยงเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง เนื่องจากมีค่า Young modulus สูงที่สุด และมีค่า tensile strength สูงเป็นลำดับที่ 2 นอกจากนี้ยังมีค่า % elongation at break ที่ต่ำที่สุด อธิบายได้ว่าต้องใช้แรงดึงใน

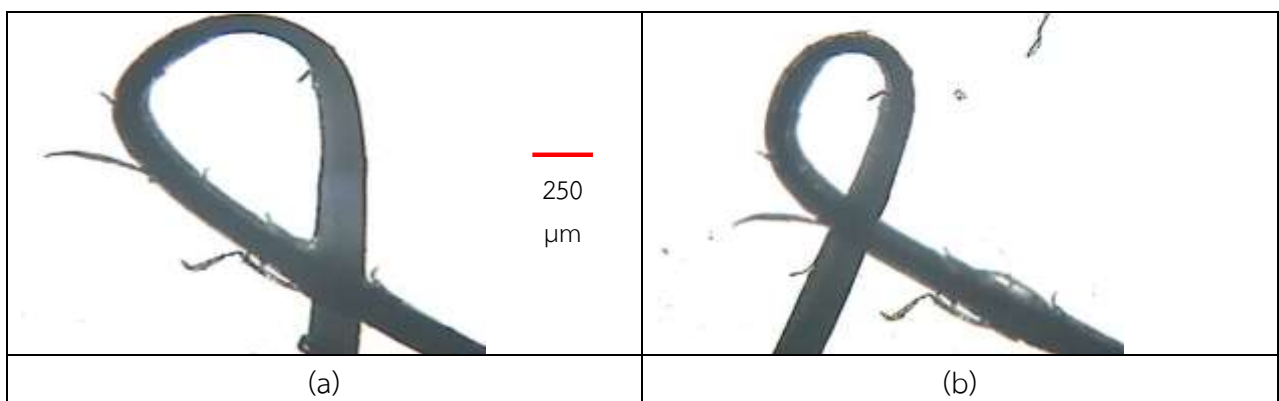
ปริมาณที่สูงจึงจะก่อให้เกิดการยืดตัวของเส้นใยเป็นระยะที่สั้น สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า tensile stress และ strain ของเส้นใยกัญชงที่มีความชันสูงที่สุด และภาพถ่าย SEM ภายหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกล ที่สังเกตเห็นการแตกหักของเส้นใยเดี่ยวมากกว่าเส้นใยที่ยึดออก นอกจากนี้การที่มีแอลฟาเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีความแข็งแรง และมีค่า Young's modulus ที่สูง (Salmén, 2004) ในปริมาณค่อนข้างมาก รวมทั้งขนาดเส้นใยเดี่ยวที่เล็กมาก (Marrot et al., 2013) ส่งผลให้มีค่า Young Modulus และ Tensile strength ของเส้นใยกัญชงมีค่าสูงเช่นกัน (Duval et al., 2001 ; Fan, 2010 ; Placet et al., 2012) ในทำนองเดียวกัน เส้นใยจากกากกล้วย และใบสับปะรด ซึ่งมีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสสูงกว่าเส้นใยจากทะเลาะปาล์มและกากมะพร้าว ส่งผลให้มีความแข็งแรงของเส้นใยสูงกว่าเส้นใยปาล์มและมะพร้าวเช่นกัน นอกจากนี้ ค่า % elongation at break ของเส้นใยกากมะพร้าวที่มีค่าสูงที่สุด สามารถยืนยันได้ว่าเป็นเส้นใยที่มีคุณสมบัติในการยืดตัวได้มากที่สุด เช่นเดียวกับภาพถ่าย SEM ของเส้นใยมะพร้าวภายหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกลที่มีการกระจายตัวของเส้นใยเดี่ยวมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น อาจเนื่องมาจากมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณต่ำที่สุด และมีลิกนินที่มีบทบาทสำคัญต่อการรักษาโครงสร้างของเส้นใยเมื่อมีแรงมากระทำอยู่สูงกว่าเส้นใยชนิดอื่นๆ ส่งผลให้เส้นใยประเภทนี้มีความยืดหยุ่นตัวสูง (Kabir et al., 2013b)

ตารางที่ 3-13 แสดงค่า Tensile strength, % elongation at break และ Young's modulus ของเส้นใย ภายหลังจากทดสอบสมบัติเชิงกล

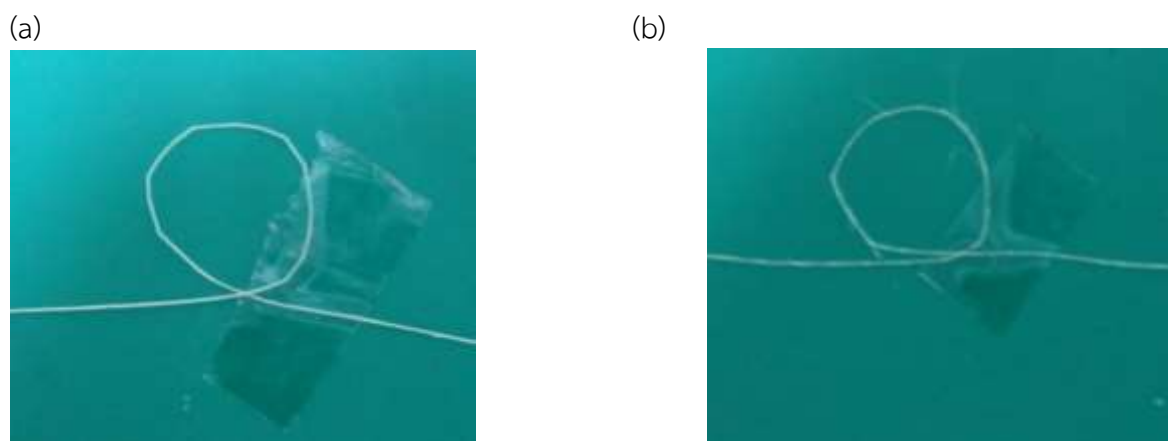
ชนิดเส้นใย	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
กากกล้วย	214.51 ± 43.96	5.19 ± 1.51	72.94 ± 12.66
ใบสับปะรด	333.75 ± 59.07	3.73 ± 1.00	85.20 ± 12.92
เปลือกกัญชง	295.21 ± 61.20	2.43 ± 0.38	200.41 ± 41.57
กากมะพร้าว	190.09 ± 37.71	27.25 ± 5.71	33.81 ± 5.83
ทะเลาะปาล์มน้ำมัน	103.48 ± 20.70	18.92 ± 1.87	28.74 ± 6.31

จากการสังเกตลักษณะเส้นใยทั้ง 5 ชนิด ก่อนทดลองวิเคราะห์สมบัติ compression property พบว่าเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ เส้นใยจากกากมะพร้าว และทะเลาะปาล์ม มีความหนาและทึบแสง เมื่อวนในลักษณะ loop แล้วนำไปสังเกตลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ทำให้ไม่สามารถสังเกตจุดแตกหักได้อย่างชัดเจน (ภาพที่ 3-9) ส่วนเส้นใยจากกากกล้วยและเส้นใยกัญชง เมื่อวน loop แล้วพบว่ามียอยแตกกระจายอยู่ทั่วไปตลอดความยาวของเส้นใย ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นจากกระบวนการเตรียมเส้นใย (ภาพที่ 3-10) จึงไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ค่า compression property ด้วยวิธีการ elastic loop test เนื่องจากต้องอาศัยการสังเกตจุดที่เกิดการแตกหักของเส้นใยบริเวณด้านบนของ loop ในระหว่างที่ทำการดึงที่ปลายทั้งสองข้างเพื่อให้ loop มีขนาดที่เล็กลง จึงทำการทดลองกับเส้นใยสับปะรดที่มีขนาดของเส้นใยเล็กที่สุด และสังเกตไม่พบการแตกหักของเส้นใยก่อนการทดลอง ภายหลังจากวนเส้นใยในลักษณะของ loop และดึงปลายทั้งสองข้างของเส้นใยที่ระยะต่างๆ พร้อมกับวัดขนาดของ loop ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายขนาด 4 เท่า (ตารางที่ 3-14) และสังเกตจุดที่เกิดการแตกหักของเส้นใยที่กำลังขยายขนาด 10 เท่า (ตารางที่ 3-15) ซึ่งพบว่าเกิดปัญหาหลายประการในระหว่างการวิเคราะห์หา ระยะความยาวของ loop ที่จุดวิกฤตที่เกิดการแตกหักของเส้นใยบริเวณด้านบนของ loop ของเส้นใยสับปะรด ทั้งปัญหาจาก loop ที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าการสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4 เท่า ซึ่งเป็นกำลังขยายต่ำที่สุดของกล้องจุลทรรศน์ ทำให้การวัดขนาดความสูงและความกว้างของ loop เป็นไปได้ยาก หรือเมื่อเริ่มวัดขนาดได้ อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความกว้างของ loop กลับมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด พร้อมทั้ง

สังเกตเห็นแตกหักเกิดขึ้นบนเส้นใยสับปะรด ส่งผลให้ไม่สามารถระบุระยะที่เริ่มเกิดจุดวิกฤตได้โดยตรง นอกจากนี้ การควบคุมแรงดึงที่ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยให้มีความสม่ำเสมอเป็นไปได้ยาก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ loop และค่าสัดส่วนระหว่างความสูงต่อความยาวของ loop ที่ลดลงจนต่ำกว่า 1.34 ทำให้การระบุจุดวิกฤตของการวิเคราะห์ค่า compression strength เป็นไปได้ยาก จากที่กล่าวมานี้ จึงสรุปได้ว่า การวิเคราะห์ compression property ด้วยวิธีการ elastic loop test ไม่เหมาะสมต่อเส้นใยธรรมชาติทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจาก เส้นใยที่ใช้ในการทดลองของ Bos (2004) เป็นเส้นใยเซลล์เดี่ยว (elementary fibers) ของป่าน ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็ก แต่การทดลองครั้งนี้ใช้เส้นใยสับปะรดที่อยู่ในลักษณะของกลุ่มหรือมัดของเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีความสนใจศึกษาคุณสมบัติของเส้นใยธรรมชาติในลักษณะที่ใช้ในการผลิตคอมพอลิไทจริง จึงอาจส่งผลต่อการสังเกตการแตกหักของเส้นใย และค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความสูงต่อความกว้างของ loop ที่จุดวิกฤตได้

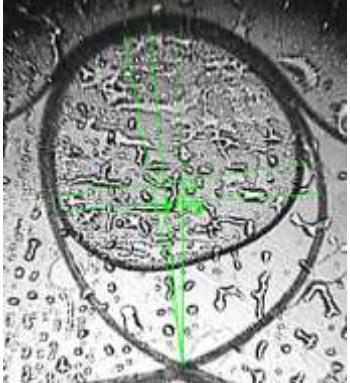
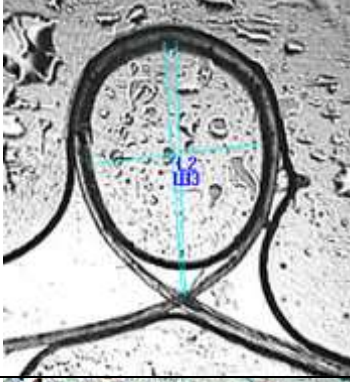
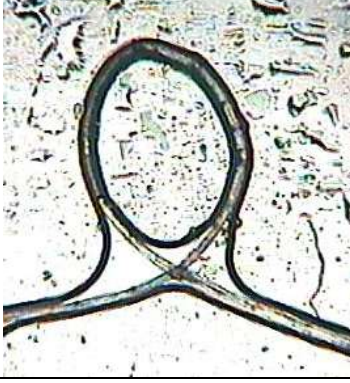
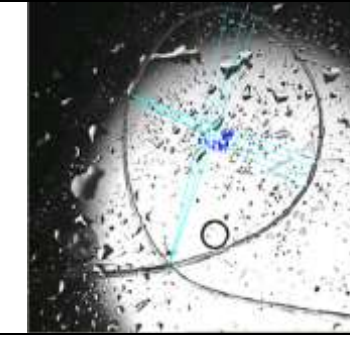


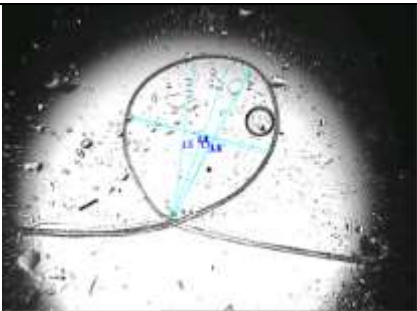
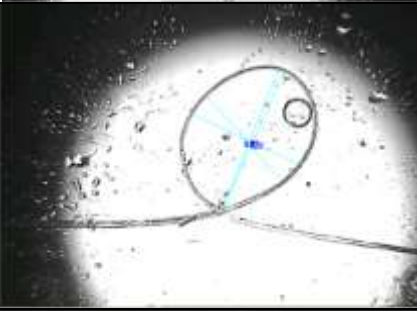
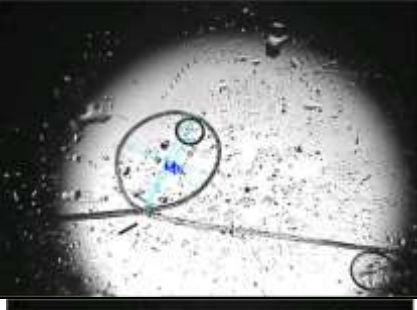
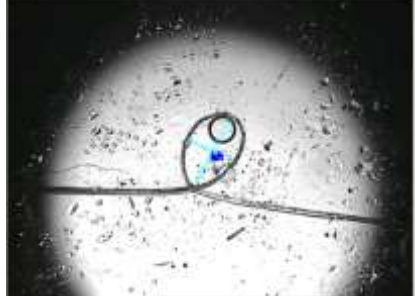
ภาพที่ 3-9 ลักษณะของเส้นใยจากกาบมะพร้าว (a) และทะเลสาปาล์มน้ำมัน (b) เมื่อสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10 เท่า สเกลบาร์แทนขนาด 250  $\mu\text{m}$



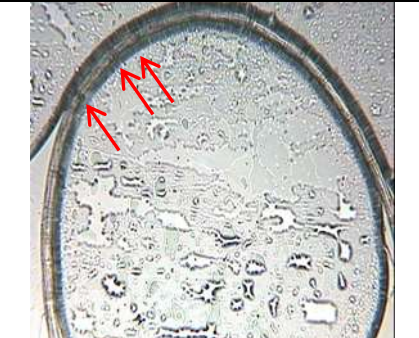
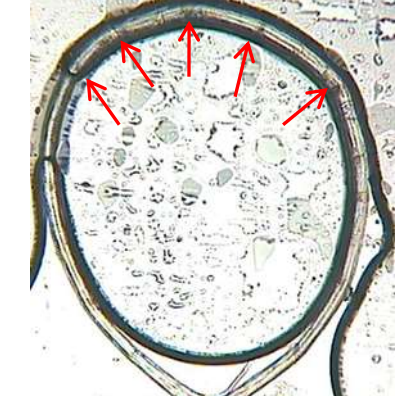
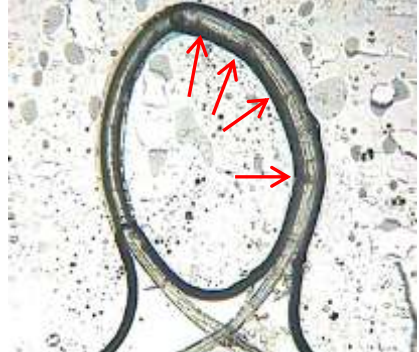


ภาพที่ 3-10 ลักษณะของเส้นใยกาบกล้วย (a) และเปลือกกล้วย (b) เมื่อทำการวน loop เพื่อเตรียมการทดลอง


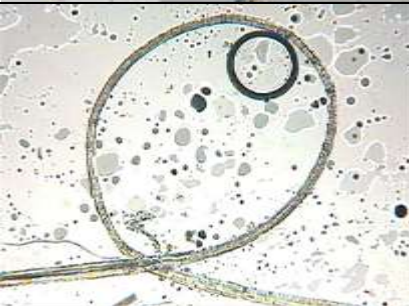
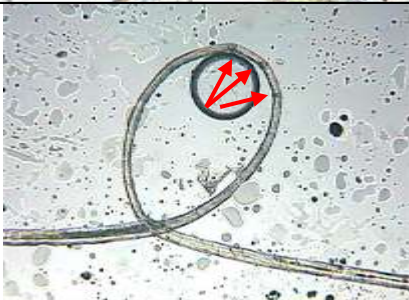
ตารางที่ 3-14 ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์ แสดงลักษณะของ loop เส้นใยสับปะรดในระหว่างการวิเคราะห์ ค่า compression strength : สเกลบาร์แทนขนาด 25  $\mu\text{m}$

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ loop ลำดับที่	ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 4 เท่า	ความยาวของ loop ( $\mu\text{m}$ ) (a)	ความกว้างของ loop ( $\mu\text{m}$ ) (c)	อัตราส่วนค่า c/a
ตัวอย่างที่ 1				
1		1,923.60	1,324.87	1.45
2		1,024.87	694.49	1.48
3		906.50	596.40	1.52
ตัวอย่างที่ 2				
1		2,098.60	1,582.95	1.33

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ loop ลำดับที่	ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 4 เท่า	ความยาวของ loop ( $\mu\text{m}$ ) (a)	ความกว้างของ loop ( $\mu\text{m}$ ) (c)	อัตราส่วนค่า c/a
2		1,467.44	1,176.73	1.25
3		1,308.55	1,283.71	1.33
4		921.31	760.89	1.21
5		667.46	437.63	1.53

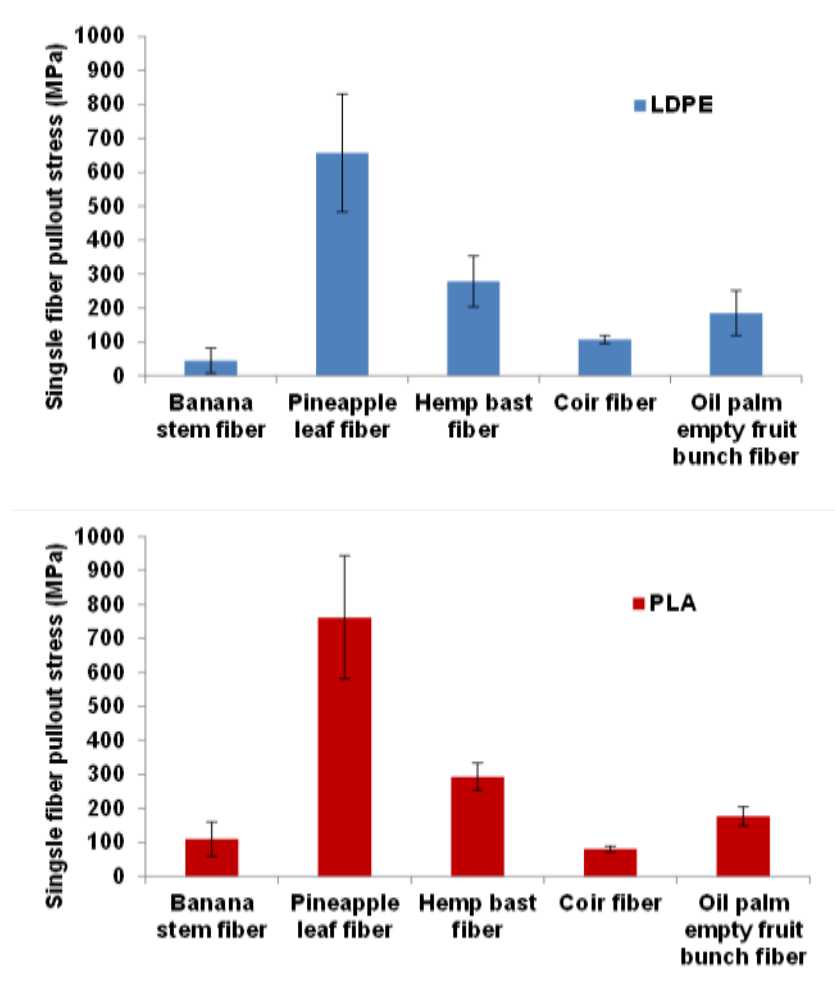
ตารางที่ 3-15 ลักษณะการแตกหักของเส้นใยเมื่อสังเกตภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 10 เท่า ลูกศรแสดงจุดที่เกิดการแตกหักของเส้นใย สเกลบาร์แทนขนาด 25 และลูกศรแสดงจุดตำหนิบนเส้นใย

ตัวอย่างที่ / ระยะการดึงที่	อัตราส่วน c/a	ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า
1/1	1.45	
1/2	1.48	
1/3	1.52	
2/1	1.33	
2/2	1.25	

ตัวอย่างที่ / ระยะการดึงที่	อัตราส่วน c/a	ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า
2/3	1.33	
2/4	1.21	
2/5	1.53	

### 3.4.3 สมบัติการติด (adhesion property) ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์

สำหรับสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ในการทดลองนี้ ใช้การทดสอบค่าแรงยึดเกาะของเส้นใยเดี่ยว (single fiber pullout test) ในเมตริกซ์พอลิเมอร์สองชนิดคือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) และ พอลิแลคติกแอซิด (poly (lactic acid), PLA) โดยเปรียบเทียบเส้นใยทั้ง 5 ชนิดคือ เส้นใยจากกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย กาบมะพร้าว และทะเลสาบปาล์มน้ำมัน แสดงในภาพที่ 3-11 พบว่า ในเมตริกซ์ของ LDPE เส้นใยสับปะรดซึ่งมีขนาดเส้นละเอียดที่สุด และมีองค์ประกอบของสารที่ไม่ใช่เซลลูโลสต่ำ ทำให้พื้นผิวของเส้นใยค่อนข้างสะอาด เมื่อทดสอบสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ด้วยวิธี pull-out test จึงให้ค่าสูงที่สุด รองลงมาคือเส้นใยจากเปลือกกล้วย ทะเลสาบปาล์มน้ำมัน มะพร้าวและกล้วย สัมพันธ์กับปริมาณเซลลูโลสที่มีในเส้นใยภายหลังการเตรียมเส้นใยด้วยวิธีต่าง ๆ ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของการวัดมุมสัมผัส ซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะพื้นผิวของเส้นใย และสอดคล้องกับขนาดของเส้นใย เนื่องจากการวัดแรง pull-out ของเส้นใยที่ติดกับเมตริกซ์ LDPE ดังนั้นการยึดติดระหว่างเฟสของเส้นใยเซลลูโลสกับเมตริกซ์ได้ดี จึงส่งผลให้มีความแข็งแรง pullout สูง สำหรับการยึดติดในเมตริกซ์ PLA ให้ผลในทำนองเดียวกัน โดยที่ค่าแรง pull-out ของเส้นใยมีแนวโน้มค่อนข้างสูงกว่าในเมตริกซ์ LDPE เนื่องจากพอลิเมอร์ของ PLA มีความเป็นขรุขระของพอลิเมอร์มากกว่า LDPE ผลที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Chollakup et al (2004) ซึ่งวัดค่า pull-out ของเส้นใยจากมะพร้าวและเส้นใยจากปาล์มน้ำมัน ที่ผ่านการเตรียมเส้นใยด้วยต่างและฟอกขาว ซึ่งพบว่า เส้นใยจากปาล์มน้ำมันมีค่าแรง pullout สูงกว่าเส้นใยจากมะพร้าวเนื่องจากสามารถกำจัดสิ่งเจือปนอื่นออกไปได้มาก ทำให้ปริมาณเซลลูโลสมีมากกว่า และเส้นใยแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้มากขึ้น



ภาพที่ 3-11 ค่าแรงยึดเกาะของเส้นใยเดี่ยวชนิดต่าง ๆ ในเมตริกซ์พอลิเมอร์ PE และ PLA

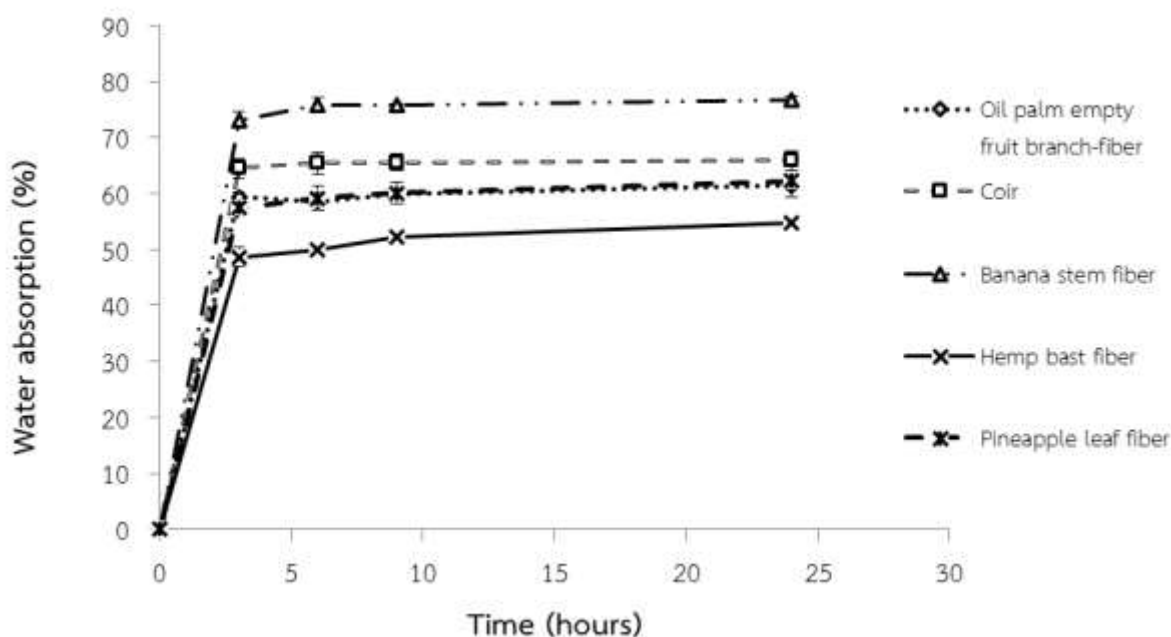
### 3.4.4 สมบัติการดูดซับน้ำของเส้นใย

เส้นใยทั้ง 5 ชนิดมีความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกันที่ 7-7.8% (ตารางที่ 3-16) แต่มีความสามารถในการดูดซับน้ำแตกต่างกัน ส่วนใหญ่ดูดซับน้ำได้คงที่ภายในเวลา 9 ชั่วโมง (ภาพที่ 3-12) โดยเส้นใยจากกากกล้วยมีความชื้นเริ่มต้นของเส้นใยในปริมาณสูงที่สุด และสามารถดูดซับน้ำได้มากที่สุด ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของกากกล้วย ได้แก่ ขนาดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ และจากภาพถ่าย SEM ที่พบว่าพื้นผิวของเส้นใยกล้วยมีลักษณะขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ สามารถสังเกตเห็นการเรียงตัวของเส้นใยเดี่ยวได้ ทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำได้มาก นอกจากนี้การที่มีองค์ประกอบของแอลฟาเซลลูโลสถึง 58.95% ส่งผลทำให้มีหมู่ -OH ที่มีความชอบน้ำอยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่าหมู่ที่ไม่ชอบน้ำที่พบในโครงสร้างของลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ในเส้นใยชนิดนี้เพียง 10% (Kabir et al., 2013b) ในทางกลับกัน เส้นใยจากเปลือกกล้วยกลับดูดซับน้ำได้ในปริมาณต่ำที่สุด ถึงแม้จะมีขนาดเส้นใยที่ใกล้เคียงกับเส้นใยจากกากมะพร้าว ที่มีลิกนินและเฮมิเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่สูงกว่า ทั้งนี้ จากการสังเกตภาพถ่ายผ่านกล้อง SEM พบว่าลักษณะภายนอกของเส้นใยถูกปกคลุมไปด้วยชั้นของลิกนิน เฮมิเซลลูโลสและสารแทรก ที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ส่วนเซลลูโลส ที่มีหมู่ -OH ซึ่งดูดซับน้ำได้ดีกลับเป็นองค์ประกอบภายในของเส้นใย (Kabir et al, 2013a) รวมทั้งขนาดของเส้นใยเดี่ยวที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เส้นใยกล้วยดูดซับน้ำได้น้อย และสามารถดูดซับน้ำได้สูงขึ้นเล็กน้อยในระหว่างชั่วโมงที่ 6-9 ซึ่งเส้นใยประเภทอื่นมีการดูดซับน้ำ ณ เวลาเดียวกันนี้ได้คงที่แล้ว การดูดซับน้ำที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากน้ำค่อยๆ แทรกซึมผ่านชั้นของสารแทรกและลิกนินผ่านหมู่ -OH ที่มีอยู่ในปริมาณน้อย ส่วนเส้นใยสับปะรดและเส้นใยจากทะเลสาปาล์มสามารถดูดซับน้ำได้ใกล้เคียงกัน แม้ว่าเส้นใยสับปะรดจะมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยจากทะเลสาปาล์มประมาณ 4 เท่า แต่การสังเกตผ่านกล้อง SEM กลับพบว่าเส้นใยปาล์มมีพื้นผิวที่มีลักษณะเรียบ ซึ่งน่าจะเป็นองค์ประกอบของ

ลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ที่มีปริมาณสูงกว่า 11% และ 16% ตามลำดับ ซึ่งทำให้การดูดซับน้ำของเส้นใยต่ำกว่า ในขณะที่เส้นใยสับปะรดที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยกว่า 5% และสังเกตเห็นเส้นใยเดี่ยวได้อย่างชัดเจน ซึ่งมีความน่าจะเป็นที่จะพบเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ในบริเวณนี้ การดูดซับน้ำของเส้นใยสับปะรดจึงเกิดขึ้นได้โดยตรง

ตารางที่ 3-16 ความชื้นเริ่มต้นของเส้นใยก่อนการดูดซับน้ำ และปริมาณการดูดซับน้ำ ณ ชั่วโมงที่ 24 ของการทดลอง

ตัวอย่างเส้นใย	ความชื้นเริ่มต้น (%)	การดูดซับน้ำที่ 24 ชั่วโมง (%)
กากกล้วยบ้าน	7.79	76.63 ± 0.74
ใบสับปะรด	7.01	62.21 ± 2.95
เปลือกกล้วยขง	7.19	54.73 ± 1.02
กากมะพร้าว	7.43	65.91 ± 1.72
ทะลายปาล์มน้ำมัน	7.31	61.39 ± 0.44

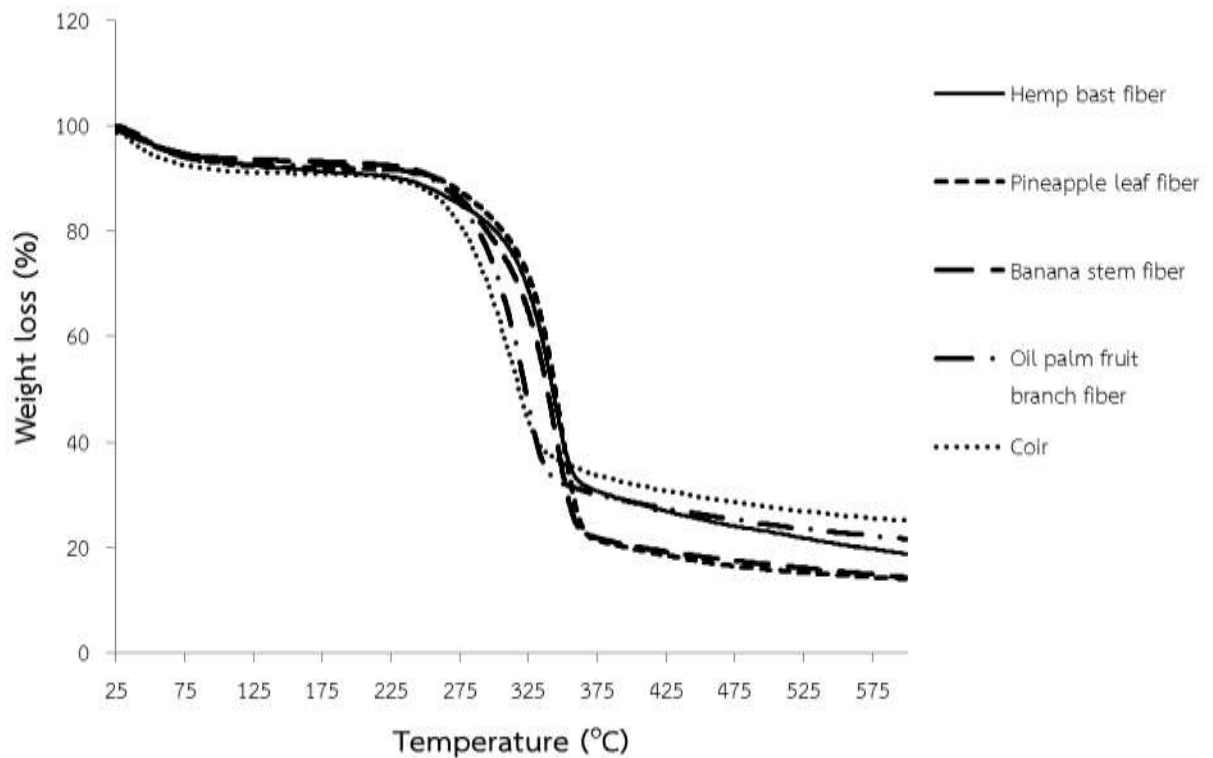


ภาพที่ 3-12 ปริมาณการดูดซับน้ำของเส้นใย ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง

### 3.4.5 สมบัติทางความร้อนของเส้นใย

จากการวิเคราะห์การย่อยสลายของเส้นใยด้วยความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetry analysis (TGA) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเส้นใยกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3-13) พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของเส้นใยกล้วย สับปะรดและกล้วยขง ลดลงมากในช่วงอุณหภูมิ 325 – 365 °C ในขณะที่เส้นใยจากทะลายปาล์มและกากมะพร้าวมีการย่อยสลายสูงที่สุดในช่วง 295 - 335 °C และ 285- 325 °C ตามลำดับ จากรายงานของ Fiore et al., (2014), Moriana et al., (2014), และ Kabir et al., (2013a) พบว่าการย่อยสลายแอลฟาเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบในเส้นใยธรรมชาติของอ้อย ฝ้าย ปอ ป่าน ปอกระเจา และกล้วยขง ด้วยความร้อนโดยอาศัยเทคนิค TGA เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 320 – 350 °C ส่วนการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 280 – 320 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า สอดคล้องกับองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยกล้วย สับปะรด และกล้วยขงที่มีปริมาณแอลฟาเซลลูโลสอยู่สูงกว่าเส้นใยมะพร้าว

และปาล์ม ทำให้เกิดเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า นอกจากนี้ หากเปรียบเทียบปริมาณของเหลือหลังการย่อยสลายของเส้นใยแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 600 °C พบว่าเส้นใยมะพร้าว ปาล์ม และกัญชง มีสิ่งปนเปื้อนอยู่ภายในเส้นใยสูงกว่าเส้นใยสับปะรดและกล้วย เนื่องจากมีเศษเหลือหลังการย่อยสลายที่สูงกว่า สอดคล้องกับปริมาณสารแทรกที่มีอยู่ในเส้นใยกัญชง มะพร้าวและปาล์ม ซึ่งมีปริมาณสูงกว่า 15%



ภาพที่ 3-13 Thermogravimetric curves ของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด

#### 4. สรุปผลการทดลอง

การนำเส้นใยจากกากกล้วย ใบสับปะรด เปลือกกล้วย กาบมะพร้าวอ่อน และทะเลลายปาล์มน้ำมัน ซึ่งมาจากแหล่งชีวมวลในประเทศไทย มาใช้ประโยชน์สำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับคอมพอสิต จำเป็นต้องเตรียมเส้นใยให้เหมาะสมในแต่ละชนิดเส้นใย โดยเบื้องต้นได้ทำการศึกษาการสกัดด้วยการต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพื่อให้ได้ลักษณะเส้นใยที่ดี และวัดค่า brightness สำหรับการเตรียมเป็นข้อมูลทั่วไป อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากวัตถุดิบ เพื่อเป็นข้อมูลในการเลือกวิธีการเตรียมเส้นใยจากวัตถุดิบต่าง ๆ ทั้ง 5 ชนิด โดยพบว่า เส้นใยจากกากกล้วย ใบสับปะรด และเปลือกกล้วย เมื่อทำการแยกเอาส่วนของเส้นใยจากกาก หรือ จากใบ หรือจากส่วนที่เป็นเปลือกของกล้วย พบว่า ปริมาณแอลฟาเซลลูโลส มีปริมาณที่สูง โดยมีปริมาณลิกนินน้อยกว่า 10% ซึ่งเส้นใยที่ได้เหล่านี้ สามารถกำจัดสารแทรกและสิ่งเจือปนอื่น ๆ ด้วยการล้างในน้ำสบู่และน้ำ ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนและค่าใช้จ่ายในการนำเส้นใยมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงกับคอมพอสิต สำหรับเส้นใยจากกากมะพร้าวอ่อนและทะเลลายปาล์มน้ำมัน นั้น เป็นเส้นใยจากผลและทะเลลายผล ซึ่งมีปริมาณสารแทรก สิ่งเจือปน ขี้ผึ้งและลิกนินมาก ดังนั้นการเตรียมเส้นใยดังกล่าว จำเป็นต้องผ่านกระบวนการในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และฟอกขาวด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมตามที่ได้ศึกษาสำหรับเส้นใยแต่ละชนิด โดยสภาวะของการเตรียมที่เหมาะสมสำหรับเส้นใยมะพร้าว คือ ต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 40 % ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง สำหรับเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน มีสภาวะการเตรียมที่เหมาะสมดังนี้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 30% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง ฟอกด้วยสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 30 % ของน้ำหนักเส้นใยอบแห้ง

เส้นใยเซลลูโลสที่เตรียมได้ข้างต้นทั้ง 5 ชนิด นำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และความร้อน เพื่อศึกษาศักยภาพในการนำเส้นใยมาใช้เสริมแรงคอมพอสิต พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกัน คือ เส้นใยจากกากกล้วย สับปะรด และกล้วย ซึ่งได้จากลำต้น และใบ โดยที่มอดูลัสของเส้นใยใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากเส้นใยกล้วยยังมีลิกนินอยู่ 10% ทำให้ขนาดเส้นใยยังยึดติดจึงมีขนาดเส้นใยใหญ่ ซึ่งต่างจากเส้นใยสับปะรดที่มีขนาดเล็กที่สุดและกล้วยที่มีขนาดเล็กรองลงมา สำหรับเส้นใยจากมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันซึ่งทำการต้มด้วยด่างและฟอกขาว โดยที่เส้นใยจากมะพร้าวมีขนาดเส้นใยเล็กกว่าเส้นใยจากทะเลลายปาล์มน้ำมันเนื่องจากลักษณะของธรรมชาติของวัตถุดิบตั้งต้น เมื่อนำมาวิเคราะห์พื้นผิวของเส้นใยพบว่า เส้นใยกล้วยมีสมบัติทางพื้นผิวที่มีความเป็นขรุขระ เนื่องจากปริมาณเฮมิเซลลูโลสต่ำ และไม่ผ่านการปรับปรุงทางเคมี โดยมีความสัมผัสต่ำในสารละลายที่ไม่มีไขมัน ขณะที่เส้นใยกล้วยมีสมบัติทางพื้นผิวที่มีความขรุขระ จากการมีค่ามุมสัมผัสต่ำในสารละลายที่มีไขมัน เนื่องจากยังมีองค์ประกอบอื่นเหลืออยู่ในเส้นใย เมื่อพิจารณาสมบัติทางแรงกลของเส้นใยทั้ง 5 ชนิด พบว่า ค่าต้านแรงดึงของเส้นใยสับปะรดมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ เส้นใยจากลำต้นกล้วยและกากกล้วย โดยที่ค่า Young's modulus ของเส้นใยจากลำต้นกล้วยมีค่าสูงสุด ขณะที่เส้นใยจากกากมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมันมีความเด่นในการให้ค่าการยึดตัวสูงกว่าเส้นใยชนิดอื่น โดยที่เส้นใยเส้นใยจากกากมะพร้าวซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยจากทะเลลายปาล์ม น้ำมัน ส่งผลทำให้ค่าต้านแรงดึงมีค่ามากกว่า ส่วนค่าแรงกดของเส้นใยเมื่อทดสอบด้วยวิธี elastic loop test พบว่า ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากเส้นใยที่เตรียมในงานวิจัยนี้ เป็นเส้นใยที่เตรียมเพื่อใช้ในการเสริมแรงคอมพอสิตในการปฏิบัติงานจริง จึงทำให้ได้เส้นใยที่เป็นกลุ่ม ทำให้ยากในการควบคุมสัดส่วนระหว่างความสูงต่อความยาวของ loop ที่ลดลงจนต่ำกว่า 1.34 และขณะดึงที่มีค่ามากกว่า 1.34 ส่วนค่าสมบัติการติดระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ด้วยการวัด pull-out test ในเมตริกซ์ LDPE และ PLA พบว่า เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง และมีปริมาณที่ไม่ใช่เซลลูโลสต่ำ และแยกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก จะให้สมบัติการยึดติดในเมตริกซ์ทั้งสองชนิดดี นั่นคือ เส้นใยใบสับปะรด และ เส้นใยจากกล้วย ขณะที่เส้นใยจากกากกล้วยซึ่งประกอบด้วยสารที่

ไม่ใช่เซลลูโลสสูง และมีขนาดเส้นใยใหญ่ จึงให้ค่าสมบัติการติดที่ต่ำ สำหรับค่าการดูดซับน้ำพบว่าสัมพันธ์กับสมบัติทางพื้นผิวของเส้นใย โดยเส้นใยกล้วยมีสมบัติทางพื้นผิวที่มีความเป็นขรุขระสูงจึงให้ค่าการดูดซับน้ำสูง และเส้นใยกล้วยมีสมบัติทางพื้นผิวที่มีความเป็นขรุขระต่ำ มีค่าการดูดซับน้ำต่ำสุด และสุดท้ายสำหรับสมบัติทางความร้อนของเส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง จะทำให้ทนต่อการย่อยสลายได้สูง นั่นคือ เส้นใยจากกล้วย ใบสับปะรดและกล้วย มีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าเส้นใยจากมะพร้าวและทะเลลายปาล์มน้ำมัน ดังนั้นการนำเส้นใยเซลลูโลสจากพืชมาใช้เสริมแรงคอมพอสิต ขึ้นกับการเตรียมเส้นใยที่สามารถกำจัดสิ่งเจือปน และการแตกเป็นเส้นใยเดี่ยวได้ดีขนาดไหน

## 5. เอกสารอ้างอิง

นิรนาม, 2552. ปาล์มน้ำมัน. ใน <http://203.151.46.10/anda/krabi/km-palm/techno-ol.html>

นิรนาม, 2555. พื้นที่ปลูกกล้วยของประเทศไทย. <http://www.ku.ac.th/e-magazine/february44/agri/banana.html>.

ปทุมทอง ไตรรัตน์ และวุฒินันท์ คงทัต, 2547. การผลิตกระดาษจากเปลือกกล้วยชงด้วยมือแบบไทย. วารสารวิจัยและฝึกอบรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล 7(2): 73-90

พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิริยา รัตนานนท์. 2553. เซลลูโลส. ศูนย์ข้อมูลเครือข่ายอาหารครบวงจร.

แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-%E0%B9%80%E0%B8%8B%E0%B8%A5%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AA>. 28 กุมภาพันธ์ 2557.

สุรัชย์ ศรีชินราช. 2557. องค์ประกอบทางเคมีของไม้. BP: Buranapa Group: Leader in Advanced Manufacturing Environmental Protection. แหล่งที่มา:

[http://www.buranapagroup.com/knowledge\\_chemical.php](http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php). 28 กุมภาพันธ์ 2558.

วิวัฒน์ อรรถพานูรักษ์, เพ็ญศรี อติวรรณพัฒน์ และ เบญจวรรณ คฤหาพัฒนา, 2548. การผลิตเยื่อกระดาษจากกล้วย. สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร. 8 น.

วิชัย หลุทัยธนาสันต์, สุชาติ อูชชิน, วิบูลย์ น้อยใจบุญ, รังสิมา ชลคุป, ทินโน ขวัญดี, พรชัย ตูลพิจิตร, และวนิดา ผาสุขดี. 2548. รายงานฉบับสมบูรณ์ ชุดโครงการต้นแบบการใช้ประโยชน์จากเส้นใยของใบสับปะรด เสนอต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย กรุงเทพมหานคร, 300 หน้า.

วิทยา บันสุวรรณ. 2540 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ไม่ใช้ไม้สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 14 น.

วิทวัส จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวษ ทรงธนศักดิ์ 2554. การศึกษาปริมาณเซลลูลอส เฮมิเซลลูลอส และลิกนินจากของเหลือทิ้งจากพืชเพื่อใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์ม พลาสติกชีวภาพ การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 ระหว่างวันที่ 10 - 11 พฤศจิกายน, 2554, อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 4 น.

วุฒินันท์ คงทัต. 2551. ความรู้เรื่องเยื่อและกระดาษพื้นบ้าน. สถาบันคั้นคว่ำและสถาบันผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 87 หน้า.

หลุทัย ล่องกุลบุตร. 2551. สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมเส้นใยกล้วยที่เสริมแรงด้วยท่อนานาโนคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553. ใน <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook53/>

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555. สถิติการเกษตรของประเทศไทย. ใน

<http://www.google.co.th/search?q=%E0%B8%AA%E0%B8%B4%E0%B8%95%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9E%E0%B8%B2%E0%B8%B0%E0%B8%9B%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B8%81%E0%B8%9E%E0%B8%B7%E0%B8%8A%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%A8&hl=th>

Abhay,S.D. 2009. Now banana for making greaseproof paper. Current science. 96. pp.332.

- Abdelmouleh, M., Boufi, S., Belgacem, M.N., and Dufresne, A. 2007. Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural composites : Effect of silane coupling agents and fibres loading. 67: 1627-1639.
- Alamri, H. and Low, I.M. 2012. Mechanical properties and water absorption behavior of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites. *Polym. Test.* 31: 620-628.
- Arib, R.M.N., Sapuan, S.M., Ahmad, M.M.H.M., Paridah, M.T., and Zaman, H.M.D.K. 2006. Mechanical properties of pineapple leaf fibre reinforced polypropylene composites. *Materials and Design.* 27: 391-396.
- Bilba, K., M. A, Arsene, and A., Ouen sanga. 2007. Study of banana and coconut fibers Botanical composition, thermal degradation and textural observations. *Bioresource Technology.* 98, pp.
- Biagiotti, J., Puglia, D., Torre, L., Kenny, J. M., Arbelaiz, A., Cantero, G., et al. (2004). A systematic investigation on the influence of the chemical treatment of natural fibers on the properties of their polymermatrix composites. *Polymer Composites,* 25, 470–479.
- Bos, H. 2004. The potential of flax fibres as reinforcement for composite material. Thesis. The Eindhven University of Technology, The Netherlands, 192 p.
- Brahmakumar, M., Pavithran, C., and Pillai, R.M. 2005. Cocunut fibre reinforced polyethylene composites: effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Compos. Sci. Technol.* 65: 563-569.
- Chollakup, R., Smitthipong, W., Kongtud, W., and Tantatherdtam, R. 2013. Polyethylene reinforced by cellulose fibers (coir and palm fibers) : effect of fiber surface preparation and fiber content. *J. Adhesion Sci. Technol.* 27: 1290-1300.
- Chollakup, R., Smitthipong, W. and Suwanruji, P. 2012. Environmentally Friendly Coupling Agents for Natural Fibre Composites, pp. 161-182, In *Natural Polymers, Volume I - Composites*, M. J. John and S. Thomas, (eds.), The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 349 p. DOI:10.1039/9781849735193-00161.
- Chollakup, R., Tantatherdtam, R., Ujjin, S., and Sriroth, K. 2011. Pineapple leaf fiber reinforced thermoplastic composites: Effect of fiber length and fiber content on their characteristics. *J. of Applied Polym. Sci.* 119(4): 1952-1960.
- Christopher, L.P., Yao, B. and Ji, Y. 2014. Lignin biodegradation with laccase-mediator systems. *Front. Energy Res.* 2. doi: 10.3389/fenrg.2014.00012.
- Cieslak, M., Puchowicz, D., and Schmidt, H. 2012. Evaluation of the possibility of using surface free energy study to design protective fabrics. *Textile Res. J.* 82(11) 1177–1189.
- Duval, A., Bourmaud, A., Augier, L., and Baley, C. 2011. Influence of the sampling area of the stem on the mechanical properties of hemp fibers. *Materials Letters,* 65: 797–80.
- Escolano, J.O. 1988. Non-wood/fiber crops. *International non-wood fiber pulp and papermaking conference, Beijing, China*
- Fan, M. 2010. Characterization and performance of elementary hemp fibres: factors influencing tensile strength. *BioResources,* 5: 2307–2322.

- Fidan, S. 1989. Experimentation and analysis of compression test methods for single filament high performance fibres. Thesis. Air Force Institute of Technology. Air University.
- Fujiura, T., Sakamoto, K., Tanaka, T., Imaida, Y. 2008. A study on preparation and mechanical properties of long jute fiber reinforced polyactic acid by the injection molding process, p 231-240. The 4th International Conference on High Performance Structures and Materials, HPSM 2008, May 13-15, 2008, Algarve, Portugal.
- Gang, G. 2012. **Current research and development in China hemp industry**. In seminar on hemp production and processing inspiration of fiber: The heritage of highland hemp. Highland research and development Institute, Chiangmai. Thailand. 21 p.
- Garcia, M., Garmendia, I., and Garcia, J. 2007. Influence of natural fiber type in eco-composites. *J. of Applied Polymer Science*. 107: 2994-3004.
- George, J., Janardhan, R., Anand, J.S., Bhagawan, S.S., and Thomas, S. 1996. Melt rheological behavior of short pineapple fibre reinforced low density polyethylene composites. *Polymer*. 37(24): 5421-5431.
- George, J., Bhagawan, S.S., and Thomas, S. 1998. Effects of environment on the properties of low-density polyethylene composites reinforced with pineapple-leaf fibre. *Composite Science and Technology*. 58: 1471-1485.
- George, J., Sreekala, M.S., and Thomas, S. 2001. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polym Eng and Sci*. 41: 1471-1485.
- Ghosh, S., Sinha, M.K. 1977. Assessing textile value of pineapple fiber. *Ind. Text.J.*, 88, 111-115.
- Graupner, N. 2008. Application of lignin as natural adhesion promoter in cotton fibre-reinforced poly (lactic acid) (PLA) composites. *J. of Materials Science*. 43(15): 5222-5229.
- Hu, R. and Lim, J-K. 2007. Reinforced polylactic acid composites fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber. *J. Compos. Mater*. 41: 1655.
- Idicula, M., Malhotra, S.K., Joseph, K., and Thomas, S. 2005. Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites.
- Joseph, P.V., Mathew, G., Joseph, K., Groeninck, G., and Thomas, S. 2003. Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 34: 275-290.
- Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T. and Cardona, F. 2013a. Effects of chemical treatments on hemp fibre structure. *Appl. Surf. Sci*. 276: 13-23.
- Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T. and Cardona, F. 2013b. Tensile properties of chemically treated hemp fibres as reinforcement for composites. *Composites: part B*. 53 : 362-368.
- Karmaker, A.C., and Youngquist, J.A. 1996. Injection molding of polypropylene reinforced with short jute fibers. *J. of Applied Polymer Science*. 62: 1147-1151.
- Khalid. M., Ratnum, C.T., Chuah, T.G., Ali, S., and Choong T.S.Y. 2008. Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil plam empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose. *Materials and Design*. 29: 173-178.

- Kroschwitz, J.I. 1990. *Polymers Fibers and Textiles, A Compendium. Encyclopedia Reprint Series.* John Wiley & Sons: USA. 867 p.
- Kulkarni, A.G. et al. 1983. Mechanical properties of banana fibres. *J. Mater. Sci.* 18: 2290–2296.
- Li, X., Tabil, L.G., and Panigrahi, S. 2007. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *J Polym Environ.* 15: 25-33.
- Liu, W. Misra, M., Askeland, P., Drazal, L.T., Mohanty, A.K. 2005. Green composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: fabrication and properties. *Polym.* 46(8): 2710-2721.
- Luo, S., Netravali, N. 1999. Mechanical and thermal properties of environment-friendly “green” composites made from pineapple leaf fibres and poly(hydroxybutyrate-co-valeratel ) resin. *Polym. Compos.* 20(3): 367-378.
- Majumdar, P. and Chanda, S. 2001. Chemical profile of some lignocellulosic crop residues. *Indian J. Agric. Biochem.* 14(1 & 2): 29–33.
- Mangal, R., Saxena, N.S. and Thomas, S., and Singh, K. 2003. Thermal properties of pineapple leaf fiber reinforced composites. *Materials Sci and Eng.* A339: 281-285.
- Marrot, L. Lefeuvre, A., Pontoire, B., Bourmaud, A., and Baley, C. 2013. Analysis of the hemp fiber mechanical properties and their scattering (Fedora 17). *Ind. Crop. Prod.* 51: 317-327.
- Matthews, F.L., and Rawlings, R.D. 1994. *Composite Materials: Engineering and Science.* London: Chapman and Hall, 470 p.
- Mohanty, A.K. et al. 2000. Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromol. Mater. Eng.* 276/277, 1-24.
- Moriana, R., Vilaplana, F., Karlsson, S. and Ribes, A. 2014. Correlation of chemical structural and thermal properties of natural fibres for their sustainable exploitation. *Carbohydr. Polym.* 112: 422-431.
- Mukhopadhyay, S., Figueiro, R., Arpac, Y. And Senturk, U. 2008. Banana Fibers-Variability and Fracture Behaviour. *J. Eng.Fiber.Fabr.*
- Nardin, M. 2006. Chapter 9. Wettability of Fibers and Powders Application to Reinforced Polymeric Materials, *In Powders and Fibers Interfacial Science and Applications*, Edited by Nardin, M. and Papirer, E. CRC Press , Pp. 349–388.
- Nato, A.R.S, Araujo, M. A.M. , Barboza, R. M.P., Fonseca , A. S., Tonoli, G. H.D., Souza, F.V.D., Mattoso, L.H.C., Marconcini, J. M. 2015. Comparative study of 12 pineapple leaf fiber varieties for use as mechanical reinforcement in polymer composites. *Ind. Crop. Prod.* 64 : 68-78.
- Nielsen, L.E., Landel, R.F. 1994. *Mechanical Properties of Polymers and Composites*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker Inc., pp. 463-483
- Ochi, S. 2008. Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials.* 40: 446-452.
- Osman, E., Vahguelt, A., Sbarski, I. and Mutasher, S. 2011. Water absorption behavior and its effect on the mechanical properties of Kenaf natural fiber unsaturated polyester

- composites. 18<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM18). Jeju, Korea. August 21-26.
- Papirer E, Brendle E, Ballard H, Vergelati C. 2000. Inverse gas chromatography investigation of the surface properties of cellulose. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 14:321–37.
- Paiva, M. C., Ammar, I., Campos, A. R., Cheikh, R. B., & Cunha, A.M. (2007). Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization. *Composites Science and Technology*, 67, 1132–1138.
- Persin Z, Stana-Kleinschek K, Sfiligoj-Smole M, Kreze T. and Ribitsch V. 2004. Determining the surface free energy of cellulose materials with the powder contact angle method. *Textile Res. J.* 74: 55–62.
- Placet, V., Trivaudey, F., Cisse, O., Gucheret-Retel, V., Boubakar, M.L. 2012. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres: a morphological, structural or ultrastructural effect? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43: 275–287.
- Prasad, S.V., Pavithran, C., Rohatgi, P.K. 1983. Alkali treatment of coir fibres for coir-polyester composites. *J. Mater. Sci.* 1979(14): 431-432.
- Punsuvan, V. 1997. Chemical component determination of non-wood raw material for pulp and paper industry. Department of Chemistry, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok. 14p.
- Reddy N., and Yang, Yiqi. 2005. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. 23(1): 22-27.
- Saheb, D.N. and Jog, J.P. 1999. Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*. 18(4) : 351-363.
- Salmén, L. 2004. Micromechanical understanding of the cell-wall structure. *Comptes Rendus Biologies*, 327: 873–880.
- Sapuan, S.M., Leenie, A., and Harimi, M., and Beng, Y.K. 2006. Mechanical properties of woven banana fibre reinforced epoxy composites. *Materials and Design*. 27: 689-693.
- Seki, Y., Sarikanat, M., Sever, K., & Durmus, Kahya, C. (2013). Extraction and properties of *Ferula communis* (chakshir) fibers as novel reinforcement for composites materials. *Composites Part B: Engineering*, 44, 517–523.
- Shibata, M. 2003. Biocomposites made from short abaca fiber and biodegradable polyesters. *Macromolecular Materials and Engineering*. 288: 35-43.
- Takagi, H., Shuhei, K. Koji, K., Akiharu, O. 2007. Thermal conductivity of PLA-bamboo fiber composites. *Adv. Compos. Mater.* 16: 377-384.
- Takagi, H. and Takeichi, G. 2012. Bamboo fiber reinforced binderless green composites from steam exploded bamboo powder. *Adv. Mater. Develop. Perform. (AMDP2011), Inter. J. Modern Phys.: Conference Series*. 6: 739-744.
- TAPPI. 2002-2003. TAPPI Test Method. The Technical Association of the Pulp and Paper Industry. TAPPI Press, Atlanta, Georgia.

- Thakur, V.K. and Thakur, M.K. 2014. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydr. Polym.* 109: 102-117.
- Tran, L.Q.N., Minh, T.N, Fuentes, C.A., Chi, T.T. and A.W. Van Vuure. 2014. Investigation of microstructure and tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials. *Ind. Crop. Prod.*
- Young T. 1805. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society.* 95:65–87.
- Wanrosli, W.D, Zainuddin, Z., Law, K.N. and Asro, R. (2007) Pulp from oil palm Fronds by chemical process. *Industrial Crops and Products* Volume 25, issue, January. P.89-94.
- Wu S. 1969. Surface and interfacial tensions of polymers melts. I-Polyethylene, polyisobutylene, and polyvinyl acetate. *J. Colloid Interface Sci.* 31:153.
- <http://www.andersonmaterials.com/tga.html>