



การพัฒนาวัสดุเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติ  
เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุตกแต่งผิวที่เป็นมิตรกับธรรมชาติ

Development of natural dyed cotton biocomposites for environmental  
friendly decorative materials

ปาเจรา พัฒนถาบุตร\*, ญานิสสา คงอิม, ณัฐนรี มีเสน, ลักษิกา เรือนแก้ว

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์  
6 ถนนราชมรรคาใน ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมืองจังหวัดนครปฐม 73000

\*E-mail: Patanathabutr\_P@su.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาวัสดุตกแต่งผิวจากวัสดุเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติ งานวิจัยนี้ใช้สีธรรมชาติที่สกัดจากแก่นฝางและมีการใช้ 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) เป็นสารคู่ควบไซเลน ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัญญาณวิทยาของชิ้นงานฉีดวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุเสริม-องค์ประกอบพลาสติกชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติมีค่า Young's modulus ค่า Flexural modulus รวมถึงค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระแทกและค่าความแข็งที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยฝ้ายเพิ่มขึ้น การศึกษาสัญญาณทางวิทยาด้วยเทคนิค SEM แสดงการยึดติดที่ดีระหว่างผิวของเส้นใยฝ้ายกับพอลิแลคติกแอซิด จึงน่าจะเป็นทางเลือกในการนำวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติมาใช้ในงานวัสดุตกแต่งอาคารที่เป็นมิตรกับธรรมชาติได้

**คำสำคัญ:** วัสดุเสริมองค์ประกอบชีวภาพ, วัสดุตกแต่งผิว, พอลิแลคติกแอซิด

### Abstract

This research aimed to develop decorative materials from natural dyed cotton/poly(lactic acid) (PLA) biocomposites. Natural dye used in this research was extracted from Sappan wood and 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) was used as a silane coupling agent. Physical, mechanical, thermal and morphological properties of injection molded natural dyed-cotton/poly(lactic acid) biocomposites of which 3, 5 and 10%wt of biocomposites were investigated. The results showed that Young's modulus, flexural modulus, impact strength and hardness of natural dyed-cotton/poly(lactic acid) biocomposites increased with increasing cotton fiber content and morphological studies by SEM showed good adhesion between cotton fibers and PLA. Thus, natural dyed cotton/poly(lactic acid) biocomposites can be an alternative choice to be used as environmental friendly decorative building materials.

**Keywords:** Biocomposites, Decorative materials, Poly(lactic acid)



## 1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันวัสดุเสริมองค์ประกอบจากพลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากผู้บริโภคมีความตระหนักถึงการใช้องค์ประกอบที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น นอกเหนือจากการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาอันจะเป็นการลดปริมาณพลาสติกที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตและส่งผลให้เป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกที่จะเกิดขึ้นเมื่อหมดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นๆแล้ว การเลือกใช้วัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่จะสามารถย่อยสลายกลับสู่ธรรมชาติได้ยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจในการผลิตวัสดุชนิดใหม่ที่ใช้ในงานตกแต่งอาคาร พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ [1] อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย ซึ่งวัสดุเหล่านี้เป็นวัสดุที่ย่อยสลายแล้วสามารถนำกลับเข้ามาสู่กระบวนการสร้างวัสดุใหม่ได้ (Renewable materials) [2] สำหรับในประเทศไทยมีหัตถกรรมสิ่งทอที่ใช้วัตถุดิบเป็นฝ้ายและย้อมด้วยสีธรรมชาติ โดยในกระบวนการผลิตเป็นเสื้อผ้าและผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะมีเศษผ้าและเศษด้ายที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตในปริมาณที่มาก ดังนั้นแนวคิดในการนำเศษผ้าและเศษด้ายเหล่านี้กลับมาใช้ประโยชน์โดยนำกลับมาสาางให้เป็นเส้นใยแล้วนำเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการย้อมสีธรรมชาติมาใช้ในการผสมกับพลาสติกชีวภาพเพื่อทำเป็นวัสดุเสริมองค์ประกอบจากพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและมีการใช้สารเสริมแรงที่ได้จากธรรมชาติด้วยจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานตกแต่งอาคารที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติทั้งหมดมีจุดเด่น มีสีสันทันและสามารถสร้างทางเลือกใหม่ให้กับการก่อสร้างที่เป็นมิตรกับธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามการนำเส้นใยฝ้ายซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมาเป็นสารเสริมแรงในพอลิแลคติกแอซิด ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีสมบัติในการดูดซับความชื้นดีทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้กับพอลิแลคติกแอซิด และเส้นใยฝ้ายมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ดังนั้นจึงอาจเป็นอุปสรรคในการผสมกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการหลอมด้วยความร้อน งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงผิวเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติโดยใช้ 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) เป็นสารคู่ควบไซเลน เพื่อให้เส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีแดงที่ได้จากการสกัดสีจากแก่นฝาง (*Caesalpinia Sappan* Linn.) มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นสามารถนำเข้าสู่กระบวนการหลอมพลาสติกและทำให้เส้นใยฝ้ายสามารถยึดติดกับพอลิแลคติกแอซิดได้ดีขึ้นอันจะเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบจากพลาสติกชีวภาพที่ผสมเส้นใยฝ้ายให้ดีขึ้นได้

## 2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงผิวเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติที่มีการปรับปรุงผิวด้วย 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) เป็นสารคู่ควบไซเลน จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิดเพื่อเตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพผสมเส้นใยฝ้ายด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ แล้วทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยฝ้ายที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัญญาณวิทยาของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติ

## 3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมด้วยเส้นใยปอเพื่อเพิ่มสมบัติความต้านทานแรงกระแทก [3] และได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเรยอนและเส้นใยปอ พบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยเรยอนมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้ [4] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส ทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค Thermo-gravimetric analysis (TGA) พบว่าสมบัติการไหลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสจะยังคงแสดงพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบ shear thinning [5] และได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยไผ่ (bamboo fiber) เส้นใยหญ้าแฝก (vetiver grass fiber) และเส้นใยมะพร้าว (coconut fiber)



ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติด้วยสารอีพอกซี (flexible epoxy) พบว่าค่าความแข็งที่ผิวหน้าของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย flexible epoxy จะลดค่าความแข็งที่ผิวหน้าของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติ ในขณะที่สามารถจะเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงเมื่อเทียบกับของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว นอกจากนี้จะเห็นว่าอิทธิพลของ flexible epoxy ที่มีต่อการปรับปรุงสมบัติการต้านทานแรงดึงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาตินั้นขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยธรรมชาติ โดยพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยไผ่และเส้นใยมะพร้าวที่มีการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงดึงที่ดีกว่าของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่ผสมเส้นใยธรรมชาติที่ผสมเส้นใยหญ้าแฝก และจากผลการศึกษาพบว่าเส้นใยไผ่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดดีที่สุดเมื่อเทียบกับเส้นใยหญ้าแฝกและเส้นใยมะพร้าว [6]

ได้มีการศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยลิกนินด้วยสารคู่ควบไซเลนประเภท organosilane พบว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำของเส้นใยลิกนินจะเพิ่มขึ้นและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิด ขที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยลิกนินได้ พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยลิกนินด้วยสารคู่ควบไซเลนประเภท organosilane จะทำให้เกิดการ interlocking ระหว่างพื้นผิวของเส้นใยลิกนินและเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดได้ จากการวิเคราะห์ Dynamic mechanical thermal analysis (DMA) พบว่ามีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) แสดงให้เห็นพฤติกรรมการแตกหักของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยลิกนินที่ศึกษาเป็นการแตกหักแบบเหนียว ที่แสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนแรงโดยเส้นใยลิกนิน [7] นอกจากนี้ได้มีการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวเปลือกข้าวสาลี และกลบข้าวด้วย alkaline treatment ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้ในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยเปลือกข้าวสาลีและกลบข้าว พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย alkaline treatment นั้นจะสามารถละลายส่วนของแฉีกซ์ ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสเพื่อให้ความเป็นขี้ของพื้นผิวของเปลือกข้าวสาลีและกลบข้าวเพิ่มขึ้น และเมื่อนำมาปรับปรุงพื้นผิวด้วย 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) และ 3-Glycidoxypropyl trimethoxy silane (GPS) พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเปลือกข้าวสาลีและกลบข้าวด้วยสารคู่ควบไซเลนประเภท organosilane ทั้งสองชนิดนั้นสามารถลดความไวต่อความชื้นและเพิ่มพลังงานพื้นผิวของเปลือกข้าวสาลีและกลบข้าวได้ และเมื่อทำการผสมกลบข้าวที่ปรับปรุงพื้นผิวในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้ในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดมีค่าโมดูลัสสูงชันมากกว่าในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยกลบข้าวที่ไม่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน [8]

## 4. วิธีดำเนินการวิจัย

### 4.1. การเตรียมและการย้อมเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีธรรมชาติ

นำเส้นด้ายฝ้ายปั่นมือที่ได้จากกลุ่มหัตถกรรมบ้านหนองอาบช้าง อำเภोजอมทอง จังหวัดเชียงใหม่มาทำความสะอาดด้วยสารซักฟอกให้สะอาด จนเปลือกและเมล็ดฝ้ายที่ติดมากับเส้นด้ายหลุดออก จากนั้นล้างด้วยน้ำให้สะอาดแล้วนำไปตากให้แห้งในที่ร่ม และทำการปรับผิวเส้นด้ายฝ้ายด้วยสารละลายมอร์แดนที่อะลูมิเนียมความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักเส้นด้ายและน้ำหนักสารละลายมอร์แดนที่เป็น 1:1 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วจึงทำการสกัดน้ำย้อมสีธรรมชาติจากแก่นฝางด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักแก่นฝางต่อน้ำที่ใช้ในการสกัดสีเป็น 3:10 แล้วทำการปรับเฉดสีน้ำย้อมแก่นฝางให้เป็นสีแดงโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ จากนั้นทำการย้อมเส้นด้ายฝ้ายที่ผ่านการปรับผิวด้วยสารละลายมอร์แดนที่อะลูมิเนียม ด้วยน้ำย้อมสีธรรมชาติที่สกัดจากแก่นฝาง ที่อุณหภูมิ



80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นด้ายฝ้ายที่ย้อมเสร็จแล้วมาล้างในน้ำให้สะอาดแล้วตากในที่ร่ม และทำการวัดความเข้มข้นของสีย้อมก่อน หลัง และนำล้างด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy ด้วยเครื่อง UV-Visible spectroscope ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-50 เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสี (% Dye exhaustion) และความสามารถในการยึดติดสี (% Dye fixation) บนเส้นด้ายฝ้าย โดยการเทียบกับกราฟมาตรฐาน calibration curve ความเข้มข้นของสีและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นของน้ำย้อมจากแก่นฝ้างมีการเติมสารละลายมอร์แดนทอะลูมิเนียมที่ความยาวคลื่น  $493\text{ cm}^{-1}$

#### 4.2. เตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย

ทำการตัดเส้นด้ายฝ้ายให้มีขนาดสั้นๆ แล้วนำไปล้างด้วยเครื่องล้างเส้นใยที่ได้รับความอนุเคราะห์จากคณะอุตสาหกรรมสิ่งทอและออกแบบแฟชั่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร แล้วจึงนำไปปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติด้วยสารละลาย 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) ในสารละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล ที่อัตราส่วน 80:20 จากนั้นพ่นสารละลาย APTES ที่ปริมาณ 2% โดยน้ำหนักของเส้นใยลงบนเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีและไม่ย้อมสีให้ทั่วแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR เพื่อพิสูจน์เอกลักษณ์ของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและย้อมสีจากแก่นฝ้างที่ถูกปรับปรุงผิวด้วย APTES เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซื้อจากบริษัท NatureWorks® Ingeo™ เกรด 3052D ที่มีการเติมสารหล่อลื่น แล้วจึงทำการอบไล่ความชื้นพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยฝ้ายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการผสมเส้นใยฝ้ายลงในพอลิแลคติกแอซิดโดยมีปริมาณเส้นใยฝ้ายเป็น 3% 5% และ 10% โดยน้ำหนักของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-Screw extruder) ยี่ห้อ ENMACH รุ่น SHL-25 โดยกำหนดอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตั้งแต่ส่วนป้อนเม็ดพลาสติกถึงหัวตาย เท่ากับ 120, 130, 140, 170, 180, 185, 190, 185 องศาเซลเซียส และทำการอัดรีดพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้ายจำนวน 1 รอบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ จากนั้นทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Injection Molding ยี่ห้อ Battenfeld รุ่น BA 250 CDC เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลขนาดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานสำหรับทดสอบความโค้งงอขนาดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 7264 และชิ้นงานทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 256

#### 4.3. การทดสอบวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย

4.3.1. การทดสอบสมบัติทางความร้อน ดังนี้ ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น DSC1 ซึ่งทดสอบในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสุดท้ายเป็น 210 องศาเซลเซียสเพื่อหาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะ  $T_g$ ,  $T_m$ ,  $T_c$  และ % Crystallinity และทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุ ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น TGA1 ภายใต้สภาวะของก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ ) โดยกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

4.3.2. ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนี้ การทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile testing) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้าย ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ที่ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5969 การทดสอบความสามารถในการทนต่อการโค้งงอ (Flexural testing) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้าย ตามมาตรฐาน ASTM D 7264 ที่ความเร็วในการกดขึ้นงาน 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5969 และการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก





(Impact testing) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้าย โดยมีการ notch ขึ้นงาน ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D 256 โดยใช้ Load ในการใช้แรง 4 จูล โดยใช้เครื่อง Pendulum impact tester ยี่ห้อ Zwick รุ่น 5102.2004J และทำการทดสอบความแข็งที่ผิวของชิ้นงาน (Hardness testing) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้าย ทำการทดสอบ Hardness ตามมาตรฐาน ASTM-D 2240 โดยใช้เครื่อง Hardness tester ชนิด Shore D ยี่ห้อ PTC Instrument รุ่น 473

4.3.3. ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว Morphology โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ และพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ผสมเส้นใยฝ้ายที่แตกหักหลังการทดสอบ Tensile Testing ที่เคลือบทองด้วยวิธี Sputtering โดยมีสภาวะในการศึกษา SEM ที่ค่าความต่างศักย์ 20 kV ในสภาวะสุญญากาศ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Cam Scan รุ่น MX2000 และมีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุของชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)

## 5. ผลและวิจารณ์

การศึกษาประสิทธิภาพการย้อมสีเส้นด้ายฝ้ายด้วยน้ำย้อมสีธรรมชาติจากแก่นฝางโดยใช้สารละลายออร์แกนิกอะลูมิเนียมเป็นสารช่วยย้อม พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสี (%Dye exhaustion) = 86.11% และความสามารถในการยึดติดสี (%Dye fixation) = 84.11% จากผลการทดสอบ พบว่า การย้อมเส้นด้ายฝ้ายด้วยสีธรรมชาติจากแก่นฝางมีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากมีการใช้สารละลายออลูมิเนียมซัลเฟตทำหน้าที่เป็นสารช่วยย้อม ซึ่งทำให้โมเลกุลสีของแก่นฝางที่ดูดซึมเข้าไปในเส้นด้ายฝ้ายเกิดการยึดติดกับเส้นด้ายฝ้ายได้ดีขึ้น และจากการวิเคราะห์โดยเทคนิค พบว่า เส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน -OH stretching ที่เลขคลื่น 3500-3200  $cm^{-1}$  เนื่องจากยังคงมีหมู่ Silanol (Si-OH) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของหมู่ Ethoxy ของสารคู่ควบไซเลน และพีคของหมู่ฟังก์ชัน Primary amine (-NH<sub>2</sub>) ที่เลขคลื่น 1650  $cm^{-1}$  เนื่องจากปรากฏพีคของหมู่ Amino ของสารคู่ควบไซเลนที่ยึดติดบนเส้นใยฝ้ายและเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝาง และพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si และ Si-O-C ที่เลขคลื่น 1000-1200  $cm^{-1}$  เนื่องจากหมู่ Silanol เกิดปฏิกิริยาควบน้ำหนักเกิดเป็น Siloxane และ หมู่ Silanol เกิดปฏิกิริยาควบน้ำหนักกับหมู่ Hydroxyl บนเส้นใย แสดงให้เห็นว่าในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายด้วยสารคู่ควบไซเลนชนิด APTES ได้

ตารางที่ 1 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) จากผลการทดสอบ พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายและเส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติจากแก่นฝางด้วย APTES ทำให้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้นสามารถทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากมี Siloxane อยู่ในเส้นใยฝ้ายช่วยดูดซับความร้อน ดังนั้นจึงสามารถนำเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES ไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการผสมโดยใช้ความร้อนในการหลอมเหลวพลาสติกได้ การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายสูตรต่างๆ ในงานวิจัยนี้ พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (neat PLA) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 336 องศาเซลเซียส และพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extruded PLA) จะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวทางความร้อน และเมื่อพิจารณาวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าจึงเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวของพอลิแลคติกแอซิด นอกเหนือจากการที่พอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวทางความร้อนในระหว่างกระบวนการอัดรีดทางความร้อนด้วย ทั้งนี้พบว่า การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายและเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางด้วย APTES ส่งผลให้วัสดุเสริม



องค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายสูตรต่างๆ มีอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากมี Siloxane อยู่ในเส้นใยฝ้ายที่ช่วยดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งต่อไปยังเมตริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้การย้อมเส้นใยฝ้ายด้วยสีจากแก่นฝางร่วมกับการใช้สารละลายมอร์แดนท์อะลูมิเนียมช่วยให้วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางมีเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีปริมาณเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีธรรมชาติในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มากกว่า 10% จะพบว่าเส้นใยฝ้ายจะเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้ประสิทธิภาพการช่วยดูดซับความร้อนเป็นไปได้ไม่ดีเนื่องจากเส้นใยไม่สามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมตริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดได้

ตารางที่ 1 : แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของวัสดุที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

วัสดุ (Materials)	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>end</sub> (°C)	T <sub>inflection</sub> (°C)	Weight loss (%)
เส้นใยฝ้าย (CT)	332.94	364.72	343.94	95.09
เส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (CT-APTES)	331.04	371.15	356.19	73.21
เส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝาง (SP-CT)	312.16	359.07	341.69	77.62
เส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (SP-CT-APTES)	326.63	370.14	353.51	67.93
พอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Neat PLA)	336.87	368.57	359.04	96.54
พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extruded PLA)	321.82	358.36	345.63	95.92
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 3% (3%CT/PLA)	326.25	361.77	349.68	95.83
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 5% (5%CT/PLA)	326.03	360.88	348.35	96.35
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 10% (10%CT/PLA)	329.59	359.40	348.55	92.50
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 3% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (3%CT-APTES/PLA)	328.63	362.28	350.47	94.91
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 5% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (5%CT-APTES/PLA)	330.59	365.43	352.74	93.48
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (10%CT-APTES/PLA)	327.60	361.45	347.97	91.80
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 3% (3%SP-CT-/PLA)	321.38	356.67	341.39	94.36
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 5% (5%SP-CT-/PLA)	322.39	353.60	338.24	95.28
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 10% (10%SP-CT-/PLA)	323.46	351.68	340.15	92.35
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 3% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (3%SP-CT-APTES/PLA)	333.03	364.63	343.94	94.54
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 5% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (5%SP-CT-APTES/PLA)	329.01	359.69	345.91	94.23
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (10%SP-CT-APTES/PLA)	319.45	350.16	336.82	94.40



ตารางที่ 2 : แสดงผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของของวัสดุที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

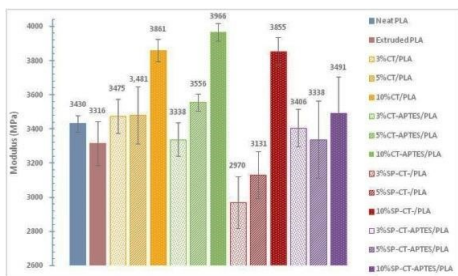
วัสดุ (Materials)	T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>cc</sub> (°C)	T <sub>m1</sub> (°C)	T <sub>m2</sub> (°C)	ΔH <sub>cc</sub> (°C)	ΔH <sub>m</sub> (°C)	%X <sub>c</sub>
พอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Neat PLA)	61.52	-	156.16	162.12	-	10.94	11.75
พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extruded PLA)	69.44	115.70	154.53	160.85	-29.48	11.04	11.86
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 3% (3%CT/PLA)	58.85	102.77	151.15	160.02	-20.48	22.52	25.71
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 5% (5%CT/PLA)	59.94	103.20	151.93	160.61	-22.87	20.82	24.09
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 10% (10%CT/PLA)	59.13	102.62	151.45	160.17	-19.32	19.18	25.43
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 3% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (3%CT-APTES/PLA)	61.02	103.35	151.98	161.05	-18.17	21.91	25.01
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 5% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (5%CT-APTES/PLA)	61.17	103.10	151.57	160.40	-14.87	21.22	25.25
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES (10%CT-APTES/PLA)	59.51	102.25	151.78	160.91	-16.34	19.26	25.54
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 3% (3%SP-CT-/PLA)	58.54	101.44	151.02	160.09	-17.50	21.83	24.92
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 5% (5%SP-CT-/PLA)	59.44	102.20	150.98	160.00	-16.97	20.37	24.24
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 10% (10%SP-CT-/PLA)	59.07	101.24	151.06	160.14	-13.46	18.20	24.13
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 3% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (3%SP-CT-APTES/PLA)	59.67	102.50	151.43	160.36	-17.11	19.25	21.97
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 5% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (5%SP-CT-APTES/PLA)	60.25	101.74	151.22	160.20	-14.14	15.17	18.05
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ย้อมสีจากแก่นฝางที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวจาก APTES (10%SP-CT-APTES/PLA)	59.37	101.54	151.27	160.24	-13.95	14.56	19.30

ตารางที่ 2 แสดงผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) ของ พอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ได้จากกระบวนการอัดรีดทางความร้อนในสูตรต่างๆ ที่ศึกษา จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณา PLA ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดทางความร้อน (Extruded PLA) พบว่ามีอุณหภูมิกลาสทราน-ซิชัน (T<sub>g</sub>) สูงกว่า PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยความร้อนโดยการอัดรีดจะมีการคลายตัวทางความร้อนทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น แต่ยังมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%X<sub>c</sub>) ใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์ ทั้งนี้อุณหภูมิ T<sub>g</sub> ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย ยังคงใกล้เคียงกับอุณหภูมิ T<sub>g</sub> ของ PLA บริสุทธิ์ และพบว่าปริมาณเส้นใยฝ้ายที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ T<sub>g</sub> ดังนั้นเมื่อพิจารณาการนำวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายไปใช้ในการเป็นวัสดุตกแต่งอาคารที่ใช้งานที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 40 องศาเซลเซียส) ก็ยังคงเป็นไปได้โดยไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิ Cold Crystallization (T<sub>cc</sub>) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%X<sub>c</sub>) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิด

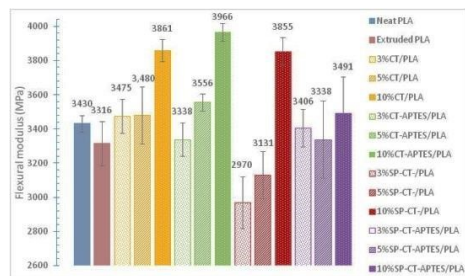


ผสมเส้นใยฝ้าย จะพบว่า มีอุณหภูมิ  $T_{cc}$  ต่ำกว่าและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกสูงกว่า Extruded PLA มาก เนื่องจากเส้นใยฝ้ายทำหน้าที่เป็น Heterogeneous nucleating agent ซึ่งทำให้ PLA เกิดผลึกได้ง่ายขึ้น และมีปริมาณผลึกที่มากขึ้น และจะพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายที่ไม่ย้อมสีที่ปรับปรุงด้วย APTES ไม่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว แต่เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายที่มีการย้อมสีธรรมชาติจะมีค่าลดลงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการปรับปรุงผิวเส้นใยย้อมสีธรรมชาติด้วย APTES ทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยฝ้ายผ่านการให้ความร้อนโดยการต้มในน้ำย้อมสีมาแล้วหนึ่งครั้ง ทำให้เส้นใยฝ้ายย้อมสีธรรมชาติที่มีการปรับปรุงผิวด้วย APTES เข้ากันได้กับพอลิแลคติกแอซิด

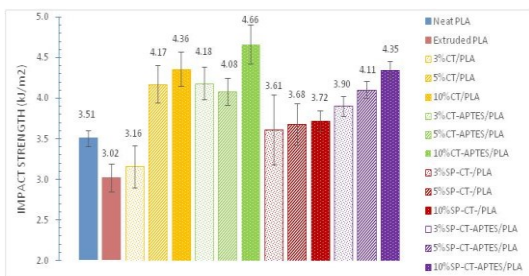
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงใน รูปที่ 1 (ก) แสดงค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง และรูปที่ 1 (ข) แสดงค่าความต้านทานต่อการโค้งงอของวัสดุเมื่อได้รับแรงดัดโค้งงอ จากผลการทดสอบ เมื่อพิจารณา PLA ที่ผ่านกระบวนการอัดรีดทางความร้อน พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปและค่าความต้านทานต่อการโค้งงอที่ต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการอัดรีดทางความร้อนส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวทางความร้อนทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีขนาดสั้นลง ดังนั้นจึงเกิดผลึกขนาดเล็กที่ไม่สมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย พบว่า มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงดึงและแรงดัดโค้งงอสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่มากขึ้นเนื่องจากเส้นใยฝ้ายสามารถรับแรงและส่งผ่านแรงไปยังเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิด และการจัดเรียงตัวของเส้นใยฝ้ายตามความยาวของชิ้นงานทดสอบเนื่องจากการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ช่วยทำให้วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมและย้อมสีจากแก่นฝางสามารถต้านทานการเปลี่ยนรูปเนื่องจากแรงดึงที่ให้ตามแนวความยาวของชิ้นงานได้ดี และเมื่อพิจารณาผลจากการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและย้อมสีจากแก่นฝางด้วย APTES พบว่า ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงดึงและแรงดัดโค้งงอสูงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายจะเพิ่มขึ้นสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวด้วย APTES ยกเว้นแต่เมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยฝ้ายมากกว่า 10% จะเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มทำให้เป็นจุดความเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหักของชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและที่ย้อมสีจากแก่นฝางได้



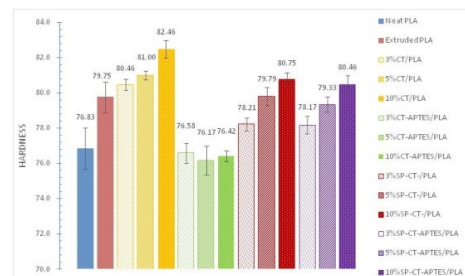
(ก) ค่า Tensile modulus (MPa)



(ข) ค่า Flexural modulus (MPa)



(ค) ค่า Impact strength (kJ/m<sup>2</sup>)



(ง) ค่า Hardness

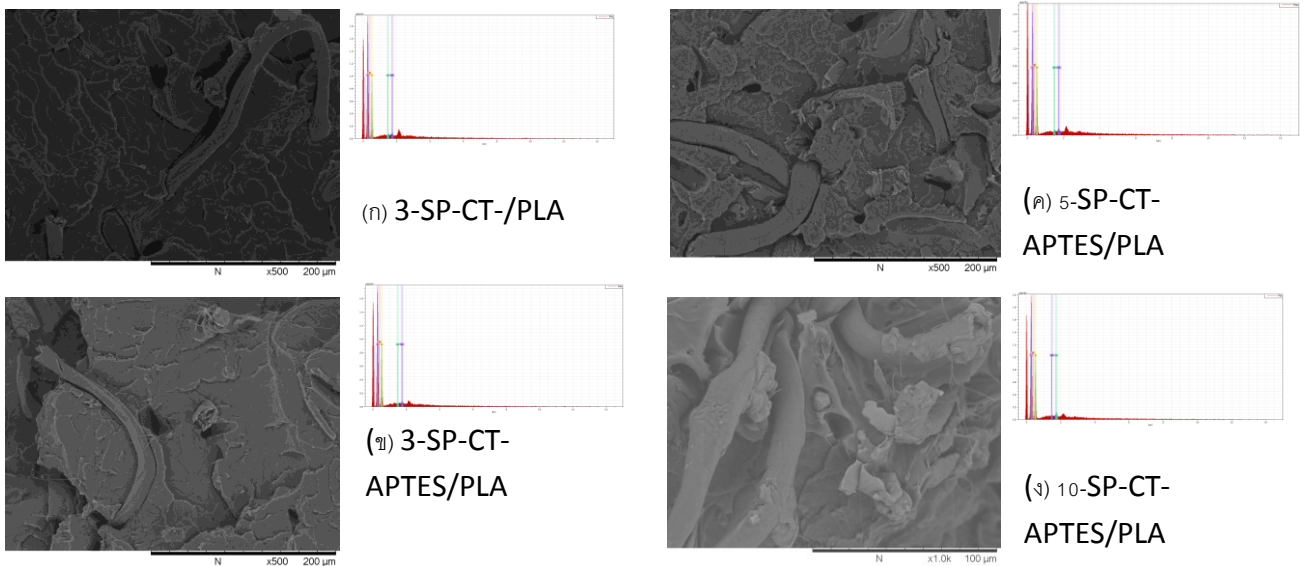
รูปที่ 1 : แสดง (ก) ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง (Tensile modulus) (ข) ค่าความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural modulus) (ค) ค่าความต้านทานต่อการกระแทก (Impact strength) และ (ง) ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานวัสดุที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้





รูปที่ 1 (ค) แสดงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก แบบ Izod impact จากผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและที่ย้อมสีจากแก่นฝ้างมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณเส้นใยฝ้ายมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายที่เสริมแรงจะช่วยดูดซับพลังงานจากแรงกระแทกที่ได้รับ และเมื่อวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและที่ย้อมสีจากแก่นฝ้างที่มีการปรับปรุงผิวด้วย APTES พบว่า มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายทั้งที่ไม่ย้อมสีและที่ย้อมสีจากแก่นฝ้างที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES เนื่องจากเส้นใยยึดติดกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ทำให้สามารถรับและถ่ายโอนแรงได้มากขึ้น

และรูปที่ 1 (ง) แสดงค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย ที่ทดสอบด้วยเครื่อง Hardness tester ชนิด Shore D จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อนำ PLA ไปเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายจะทำให้มีค่าความแข็งที่ผิวมากขึ้นเนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ยึดติดกันด้วยลิกนินจึงมีค่าความแข็งที่ผิวสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด เมื่อนำมาผสมกับพอลิแลคติกแอซิดจึงทำให้วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายมีค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานมากขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าของชิ้นงานมากขึ้น และเมื่อพิจารณา PLA ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES พบว่า ค่าความแข็งที่ผิวของชิ้นงานลดลงเนื่องจากเส้นใยฝ้ายเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิด และเส้นใยฝ้ายถูกปกคลุมด้วย APTES ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและสเปกตรัมขององค์ประกอบธาตุในชิ้นงานวัสดุที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 2 วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝ้างที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวด้วย APTES หลังจากการแตกหักแสดงลักษณะของเส้นใยเกิดการ pull out และมีช่องว่างเกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยฝ้ายไม่ยึดติดกับพอลิแลคติกแอซิด และเมื่อปรับปรุงผิวเส้นใยฝ้ายด้วย APTES จะแสดงให้เห็นถึงการยึดติดระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิแลคติกแอซิดดีขึ้น แต่ถ้าเติมเส้นใยฝ้ายในปริมาณที่มากกว่า 10% จะเกิดการรวมกลุ่มกันเป็น stress concentration ที่จะทำให้วัสดุเสริมองค์ประกอบเกิดการแตกหักได้ง่าย



รูปที่ 2: แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาและแสดงสเปกตรัมขององค์ประกอบธาตุในชิ้นงานวัสดุวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้าย



## 6. สรุปผล

งานวิจัยนี้สามารถเตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางโดยกระบวนการขึ้นรูปด้วยความร้อนด้วยการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางด้วยการปรับปรุงผิวเส้นใยฝ้ายด้วย APTES เป็นสารควบคุมโซลูชัน เพื่อให้เกิดการยึดติดระหว่างเฟสของเส้นใยและพอลิแลคติกแอซิดดีขึ้นและมีค่าความแข็งที่ผิวหน้าที่ดีขึ้น วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมเส้นใยฝ้ายย้อมสีจากแก่นฝางจึงน่าจะเป็นทางเลือกในการนำมาใช้ในงานวัสดุตกแต่งอาคารที่เป็นมิตรกับธรรมชาติ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยที่ใช้ในการจัดซื้อวัสดุและสารเคมี รวมถึงการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและทดสอบจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Datta, R., Henry, M., 2006, "Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies-a review", *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81, pp. 1119- 1129.
- [2] Lim., L.T., Aurus, R., Rubino, M., 2008, "Processing technologies for poly(lactic acid)", *Progress in Polymer Science*, 33, pp. 820-852.
- [3] Oksman, K., Skrifvars, M., Selin, J.-F., 2003, "Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites", *Composites Science and Technology*, 63, pp. 1317-1324.
- [4] Bax, B., Mussig, J., 2008, "Impact and tensile properties of PLA/Cordenka and PLA/flax composites", *Composites Science and Technology*, 68, pp. 1601-1607.
- [5] Awal, A., Rana, M., Sain, M., 2015, "Thermorheological and mechanical properties of cellulose reinforced PLA bio-composites", *Mechanics of Materials* 80, pp. 87-95.
- [6] Sujaritjuna, W., Uawongsuwanb, P., Pivsa-Arta, W., Hamadab, H., 2013, "Mechanical property of surface modified natural fiber reinforced PLA biocomposites", *Energy Procedia* 34, pp. 664 – 672. 161
- [7] Moigne, N.L., Longerey, M., Taulemesse, J.-M., Bénézet J.-C., Bergeret, A., 2014, "Study of the interface in natural fibres reinforced poly(lactic acid) biocomposites modified by optimized organosilane treatments", *Industrial Crops and Products* 52, pp. 111-124.
- [8] ThaoTran, T.P., Bénézet J.-C., Bergeret, A., 2014, "Rice and Einkorn wheat husks reinforced poly(lactic acid) (PLA) biocomposites: Effects of alkaline and silane surface treatments of husks", *Industrial Crops and Products* 58, pp. 111- 124.