อิทธิพลของสารเชื่อมประสานไซเลนที่มีต่อสมบัติความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้เพื่อใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาคาร

Effect of silane coupling agent on weathering properties of wood-PLA composites for building decorative materials

ณฐวัฒน์ กาญจนวลีกุล, ชัญญานุช จอมศรี, ศศิธร ทองชนะ, ปาเจรา พัฒนถาบุตร*

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์
6 ถนนราชมรรคาใน ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมืองจังหวัดนครปฐม 73000
*E-mail: Patanathabutr_P@su.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานชนิด 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศภายใต้แสง UV เป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดยได้ทำการศึกษาสมบัติของชิ้นงานฉีดของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้ที่ปริมาณร้อยละ 10 ที่มีปริมาณการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วย APTES ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 2, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของผงไม้ ผลการศึกษาพบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้มีเสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการเกิดผลึกที่สูงขึ้นตามปริมาณ APTESที่ใช้ในการปรับปรุงผิวผงไม้จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติดแอซิดผสมผงไม้ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย APTES ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักผงไม้พบว่ามีค่า Young's modulus และค่า tensile stress at break สูงที่สุดในช่วงอัตราส่วนของ APTES ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ส่วนค่า %elongation at break ค่า flexural strength ค่า %flexural strain และค่า Izod impact strength มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของ APTES ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวเพิ่มขึ้น เมื่อวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้ได้ผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ พบว่ามีความเสถียรทางความร้อนลดลง โดยที่ค่า Young'smodulus ค่า tensile stress at break และค่า %elongation at break มีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ค่า flexural strength ค่า %flexural strain และค่า Izod impact strength มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้พบว่าการปรับปรุงผิวด้วย APTES ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวมในวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้ภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ ดังนั้นจึงสามารถที่จะนำวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้มาเพื่อใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาคารภายนอกได้

คำสำคัญ: วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้, วัสดุตกแต่งอาคาร, พอลิแลคติกแอซิด

Abstract

The objectives of this research is to examine the effect of 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) coupling agent content on physical, thermal and mechanical properties of wood-PLA composites after weathering test under 120 hour exposure to UV. The properties of 10%wt wood-PLA composites which were treated with APTES at 0, 2, 5 and 10 %wt. of wood, were studied. The result found that thermal stability and

cold crystallization temperature of wood-PLA composites increased with increasing of APTES content. In addition, Young's modulus and tensile stress at break of wood-PLA composite treated by 5%wt APTES were the highest among other contents studied. It was found that %elongation at break, flexural strength, %flexural strain and Izod impact strength of wood-PLA composites decreased with higher APTES content on wood surface treatment. The results after weathering test showed that thermal stability of wood-PLA composites decreased and Young's modulus, tensile stress at break and %elongation at break also slightly decreased but flexural strength, %flexural strain and Izod impact strength increased. It was also found that APTES has no effect on the specimen color shade after weathering test. Thus, wood-PLA composites could be used as building decorative materials.

Keywords: Wood-PLA composites, Building decorative materials, Polylactic acid

1. ที่มาและความสำคัญ

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable bioplastic) ผลิตมาจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติกที่มีอยู่ในพืชจำพวกแป้งและน้ำตาล ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพที่ย่อยสลายกลับสู่ธรรมชาติจะสามารถผลิตขึ้นมาทดแทนใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) [1] และเมื่อนำพอลิแลคติกแอซิดมาเติมสารเสริมแรงที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติ เช่น ฝ้าย เส้นใย ผงไม้ เป็นต้น จะทำให้ได้วัสดุเสริมองค์ประกอบจากวัสดุที่ได้จากธรรมชาติทั้งหมดที่สามารถย่อยสลายได้และมีสมบัติการใช้งานได้ดีขึ้น เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [2] เนื่องจากการเสริมแรงด้วยวัสดุธรรมชาติ หรือมีสภาพพื้นผิวที่หลากหลายสามารถเป็นทางเลือกให้ใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาคารได้ วัสดุเสริมองค์ประกอบด้วยผงไม้ (Wood-plastic composites; WPCs) เป็นวัสดุเสริมองค์ประกอบที่นิยมนำมาใช้ในงานโครงสร้างและงานตกแต่งอาคาร เช่น รั้ว ระแนง ลานไม้ เป็นต้น การใช้งานในส่วนนี้จะต้องคำนึงถึงความทนต่อการใช้งานในสภาวะที่มีน้ำและความชื้น ทั้งนี้สารเสริมแรงจำพวกไม้ในวัสดุเสริมองค์ประกอบนั้นจะเป็นส่วนที่สามารถดูดซึมน้ำเข้าไปในวัสดุเสริมองค์ประกอบได้ และจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบลดลง และมีความต้านทานต่อเชื้อราต่ำลง โดยน้ำและจุลินทรีย์ต่างๆจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ที่ผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์และไม้ซึ่งเป็นส่วนที่สามารถดูดซึมน้ำได้[3-4] งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการปรับปรุงผิวสัมผัสระหว่างเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดและผงไม้ โดยทำการปรับปรุงผิงผงไม้ด้วยสาร Silane coupling agent ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุเสริมองค์ประกอบด้วยผงไม้เกิดการซึมผ่านของน้ำลดลง และมีสมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น[1,4] งานวิจัยนี้ได้นำ 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) เป็นสารคู่ควบ ไซเลนเพื่อเชื่อมประสานทำให้ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ชีวภาพกับสารเสริมแรงจากธรรรมชาติสามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น งานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงเป็นวัสดุเสริมแรงจากธรรมชาติ ในขั้นตอนแรกได้ทำการปรับปรุงผิวผงไม้แดงด้วย alkaline treatment จากนั้นเตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกผสมผงไม้แดงที่ไม่ปรับปรุงผิวและที่ปรับปรุงผิวด้วย APTES ในอัตราส่วนร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยน้ำหนักเทียบกับผงไม้ จากนั้นทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง แล้วทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกผสมผงไม้แดงก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาวะอากาศ (Accelerated weathering test)

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนของสารเชื่อมประสานชนิด 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) ที่มีต่อสมบัติวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงและศึกษาผลจากการทดสอบความคงทนต่อสภาวะอากาศ (Accelerated weathering test) ที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของและการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์แลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการเติมสารเชื่อมประสาน APTES

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่ไม่ผ่านการดึงยืดจะมีสมบัติเปราะ (Brittle) แต่มีความคงรูป (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง และเมื่อผ่านการดึงยืดเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้พอลิแลคติกแอซิดมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น โดยมีค่ามอดูลัสแรงดึงที่สูงขึ้น แต่มีความทนต่อแรงกระแทกและการยืดที่จุดแตกหักมีค่าลดลง [5] ทั้งนี้การเสริมแรงด้วยเส้นใยเสริมแรงจะเป็นการปรับปรุงให้วัสดุมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น และการเชื่อมประสานเส้นใยธรรมชาติให้เข้ากับพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น โมเลกุลของสารเชื่อมประสานไซเลนควรจะมีหมู่ฟังก์ชั่น 2 ข้างเพื่อให้สามารถทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบที่มีในเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์ชีวภาพได้ ซึ่งสารเชื่อมประสานไซเลนนี้จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์สารเชื่อมประสานไซเลนจะเข้าทำปฏิกิริยาแล้วเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ได้ดีหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันและความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ และประเภทของไซเลนที่นิยมนำไปใช้กับพอลิแลคติกแอซิดคือสารเชื่อมประสานไซเลนประเภทAminosilane โดยเฉพาะอย่างยิ่ง 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) จากงานวิจัยของ Moigne และคณะ[6] ได้ทำศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยลิกนินด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนประเภท organosilane พบว่าสมบัติความไม่ชอบน้ำของเส้นใยลิกนินจะเพิ่มขึ้นและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยลิกนินได้ พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยลิกนินด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนประเภท organosilane จะทำให้เกิดการ interlocking ระหว่างพื้นผิวของเส้นใยลิกนินและเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นพฤติกรรมการถ่ายโอนแรงโดยเส้นใยลินินทำให้เกิดการแตกหักแบบเหนียว

4. วิธีดำเนินการวิจัย

4.1. การเตรียมวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์แลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการเติมสารเชื่อมประสาน APTES

เม็ดพลาสติกพอลิแลคติดแอซิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซื้อจากบริษัท NatureWorks® Ingeo™ เกรด 3052D ที่มีการเติมสารหล่อลื่น และผงไม้แดงที่ได้จากเศษผงไม้ทิ้งจากการผลิตเฟอร์นิเจอร์เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรง โดยทำการร่อนแยกขนาดผงไม้ให้อยู่ในช่วง 150-250 ไมโครเมตร แล้วทำการปรับปรุงพื้นผิวของผงไม้แดงด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 20% ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงแล้วทำการล้างผงไม้ด้วยสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1% โดยปริมาตรเพื่อปรับค่า pH ให้เป็นกลาง จากนั้นนำผงไม้แดงมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 รอบ จนมี pH เป็นกลางแล้วนำมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจนแห้งสนิท แล้วทำการปรับปรุงพื้นผิวผงไม้แดงด้วยสารละลาย APTES ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักผงไม้ในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล (30/70 v/v) ทำการแช่ผงไม้แดงเป็นเวลา18 ชั่วโมง นำผงไม้แดงที่แช่อยู่ในสารเชื่อมประสาน APTES ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจนแห้งสนิท

4.2. กระบวนการขึ้นรูปวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์แลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง

นำผงไม้แดงและผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนและเม็ดพลาสติกPLA ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำผงไม้แดงกับเม็ดพลาสติกที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 2, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของผงไม้ด้วยเครื่อง twin-screw extruder ชนิด co-rotating โดยใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 170rpm ใช้อุณหภูมิกระบอกหลอมอยู่ในช่วง 155-180 องศาเซลเซียส และที่หัวดาย 180 องศาเซลเซียส ทำการตัดเม็ดเพื่อให้ได้เม็ดวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์แลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงจนแห้งสนิท แล้วจึงทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Injection Molding ยี่ห้อ Battenfield รุ่น BA 250 CDC เพื่อให้ได้ชิ้นงานสำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลขนาดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 638 และชิ้นงานสำหรับทดสอบความโค้งงอขนาดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 7264 และชิ้นงานทดสอบสมบัติความต้านทานแรงกระแทกขนาดตามมาตรฐาน ASTM D 256

4.3. การทดสอบวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง

ทำการจำลองสภาวะการใช้งานจริงด้วยการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ (Accelerated weathering test) โดยนำชิ้นงานของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน APTES แล้วจะนำมาจำลองสภาวะการใช้งานจริงในสภาพอากาศแวดล้อมต่างๆ ด้วยเครื่อง QUV accelerated weathering tester ตามมาตรฐาน ASTM G154 งานวิจัยนี้กำหนดสภาวะทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ โดยปรับตั้งอุณหภูมิในการจำลองสภาวะเป็น 50 องศาเซลเซียส ทำการจำลองสภาวะจำนวน 10 cycles เป็นเวลา 120 ชั่วโมง โดย 1 cycles แบ่งเป็น UV 8 ชั่วโมงและไอน้ำ 4 ชั่วโมง

4.3.1. ทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุก่อน-หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ ด้วยDifferential Scanning Calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Mettle-Toledo รุ่น DSC1ซึ่งทดสอบในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิสุดท้ายเป็น 210 องศาเซลเซียสเพื่อหาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะT_g, T_m, T_cและ % Crystallinityและทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเครื่อง Thermo gravimetric analysis (TGA) โดยใช้โหมด temperature scan ช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุเสริมองค์ประกอบแต่ละสูตร

4.3.2. ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุก่อน-หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ โดยทำการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile testing) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วนต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D 638 ใช้โหลดขนาด 5 กิโลนิวตัน ที่ความเร็วในการดึง 5 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instronรุ่น 5969 ทำการทดสอบความสามารถในการทนต่อการโค้งงอ (Flexural testing) ตามมาตรฐาน ASTM D 7264 ที่ความเร็วในการกดชิ้นงาน 1.3 มิลลิเมตรต่อนาที ด้วยใช้เครื่อง Universal Testing Machine ยี่ห้อ Instron รุ่น 5969และทำการทดสอบความสามารถในการทนต่อแรงกระแทก (Impact testing) โดยมีการnotch ชิ้นงานทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-D 256 โดยใช้ Load ในการใช้แรง 4 จูลด้วยใช้เครื่อง Pendulum impact tester ยี่ห้อ Zwick รุ่น 5102.2004J ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว Morphology โดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่แตกหักหลังการทดสอบ Tensile Testing ที่เคลือบทองด้วยวิธี Sputtering โดยมีสภาวะในการศึกษา SEM ที่ค่าความต่างศักย์ 20 kV ในสภาวะสุญญากาศ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ยี่ห้อ Cam Scan รุ่น MX2000และมีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบธาตุของชิ้นงานวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX)

5. ผลและวิจารณ์

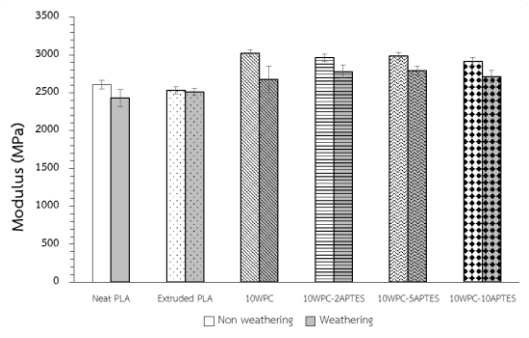
ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงด้วยเทคนิคTGAต่างๆ ทั้งก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ เป็นเวลา 120 ชั่วโมงแสดงในตารางที่ 1 พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว (T_{onset}) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดที่มีการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ไม่มีการปรับปรุงผิว (10-WPC) เนื่องจากสารเชื่อมประสาน APTES มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่าผงไม้และพอลิแลคติกแอซิดเมื่อสร้างอันตรกิริยาเชื่อมประสานอยู่ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงไม้ จึงช่วยหน่วงให้วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าปริมาณขี้เถ้าที่เหลืออยู่หลังการทดสอบนั้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมประสาน APTES ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวผงไม้ เนื่องจากซิลิกาที่อยู่ในโครงสร้างของสารเชื่อมประสาน APTES นั้นจะเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของซิลิกอนและเหลืออยู่ในรูปขี้เถ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเชื่อมประสาน APTES ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นให้กับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ พบว่าอุณหภูมิการเริ่มสลายตัว (T_{onset}) ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ หลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ มีค่าต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงก่อนการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ เนื่องมาจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศนั้น วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงจะได้รับรังสี UV ทำให้เกิดการสลายตัวจากการเกิด photo-oxidation ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการตัดขาดส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุลดลง ทั้งนี้พบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES 10% ก่อนการทดสอบความคงทนต่อสภาวะอากาศจะมีค่า % weight loss ค่อนข้างน้อยคือ 49.65% เนื่องจากเกิดการยึดติดกันที่ดีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงไม้แดงที่ดีทำให้เสถียรภาพทางความร้อนวัสดุเสริมองค์ประกอบ พอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงดีขึ้น เกิดเป็นขี้เถ้าปกคลุมผิวทำให้ไม่เกิดการสลายตัวต่อไป แต่เมื่อชิ้นงานผ่านสภาวะการทดสอบความคงทนต่ออากาศทำให้สายโซ่พอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวทำให้ยึดติดกับผงไม้แดงได้ไม่ดี ผงไม้แดงที่มีอยู่มากในวัสดุเสริมองค์ประกอบจึงเกิดการสลายตัวทางความร้อนทำให้ %weight loss วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงในอัตราส่วน 10%wt ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย APTES ลดลงอย่างมาก

ตารางที่ 1 : แสดงผลที่ได้จากการทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ (Accelerated weathering test) เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

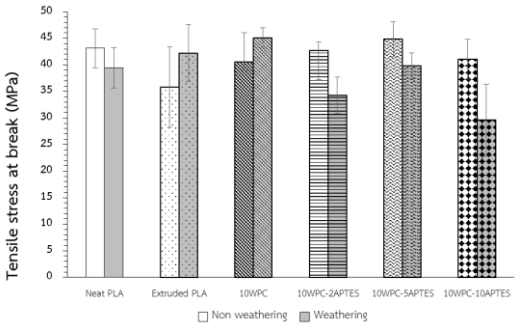
วัสดุ (Materials)	T_{onset} (°C)		T_{end} (°C)		$T_{inflection}$(°C)		Weight loss (%)	
	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering
พอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Neat PLA)	332.07	318.17	365.92	351.36	356.69	340.43	97.73	96.37
พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด(Extruded PLA)	323.73	305.76	357.36	339.72	347.25	331.87	96.45	96.39
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% (10-WPC)	311.13	305.65	346.59	343.29	334.15	332.31	90.44	90.75
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10%ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES2%(10-WPC-2APTES)	328.92	305.46	364.89	347.96	352.83	332.42	91.47	91.54
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES5% (10-WPC-5APTES)	328.36	308.47	365.33	346.20	353.84	333.57	90.81	91.58
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES10% (10-WPC-10APTES)	316.89	314.08	368.65	353.84	350.92	341.62	49.65	88.95

รูปที่ 1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงด้วยเทคนิคTGA ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ เป็นเวลา 120 ชั่วโมง จากรูปที่ 1(a) และ 1 (b) พบว่า ค่า Young's modulus และค่า Tensile stress at break ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ไม่มีการปรับปรุงผิว (10-WPC) เนื่องจากสารเชื่อมประสาน APTES สามารถเกิดอันตรกิริยากับผงไม้และพอลิแลคติกแอซิดจึงทำให้

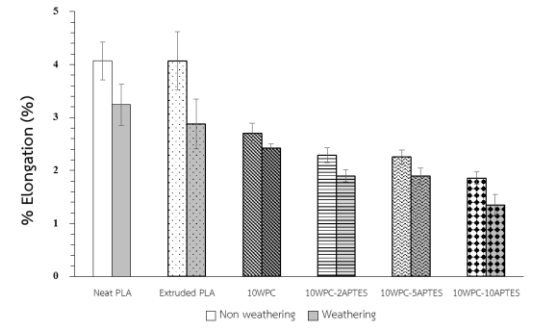
ผงไม้จึงช่วยถ่ายโอนแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี เนื่องจากสารเชื่อมประสาน APTES สามารถเกิดอันตรกิริยากับผงไม้และพอลิแลคติกแอซิดจึงทำให้ผงไม้จึงช่วยถ่ายโอนแรงระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี และพบว่าค่า Young's modulus และค่า Tensile stress at break ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 ของน้ำหนักผงไม้จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงอัตราส่วนของสารเชื่อมประสาน APTES ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่จากรูปที่ 1(c) และ 1 (e) พบว่าค่า % Elongation และค่า % Flexural strain ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารละลาย APTES มีค่าลดลงกว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ไม่มีการปรับปรุงผิว (10-WPC) อย่างชัดเจน เนื่องจากการมีผงไม้ในลักษณะที่เป็นอนุภาคทรงกลมผสมอยู่ในพอลิเมอร์ทำให้เกิดการขัดขวางการดึงยืดของชิ้นงานพลาสติก จากรูปที่ 1(d) พบว่าค่า Flexural strength ของพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการอัดรีด (Extrude PLA) และวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง10% ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคของผงไม้แดงมีลักษณะเป็นรูปแท่งสั้นหลายเหลี่ยมจึงไม่ได้ช่วยในการรับแรงที่เป็นแรงดัดชิ้นงานให้โค้งงอเหมือนการเติมสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใยยาว และจากรูปที่ 1 (f) พบว่าค่า Izod impact strength ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง10% ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆมีค่าลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านการอัดรีด (Extruded PLA) เนื่องจากอนุภาครูปแท่งสั้นหลายเหลี่ยมของผงไม้ไม่ได้ปรับปรุงความสามารถในการรับแรงกระแทกโดยฉับพลันได้ดี เมื่อนำชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงไปทำการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM G154 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบที่ 50 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดจำนวน 10 cycle ซึ่งใน 1 cycle จะประกอบไปด้วยการสัมผัสกับรังสี UV เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และมีการสัมผัสไอน้ำอีก 4 ชั่วโมง รวมเป็นเวลา 120 ชั่วโมง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 1 (a) 1 (b) และ 1(c) พบว่าค่า Young's modulus ค่า Tensile stress at break และค่า % Elongation at break ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงมีค่าลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ ทั้งนี้เนื่องมาจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศนั้น ชิ้นงานจะได้รับรังสี UV ทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวแบบ photo-oxidation ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการตัดขาดออกจากกันจนมีขนาดสั้นลงส่งผลต่อการยึดติดกันของพอลิแลคติกแอซิดกับผงไม้แดงลดลงจึงทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดต่ำลงไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ ภายหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศดังแสดงในรูปที่ 2 ที่แสดงรอยแตกและช่องว่างระหว่างเฟสของเมตริกซ์ของพอลิเมอร์และผงไม้แดง และสอดคล้องกับผลการทดสอบ DSC ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ หลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ พบว่ามีค่าความเป็นผลึกลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้จากรูปที่ 1 (d) 1 (e) และ 1(f) พบว่าค่า Flexural strength ค่า % Flexural strain และค่า Izod impact strength ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง10% ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยภายหลังจากการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ



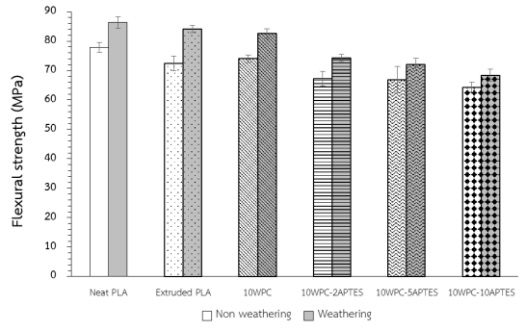
(a) แสดง Young' modulus (MPa) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



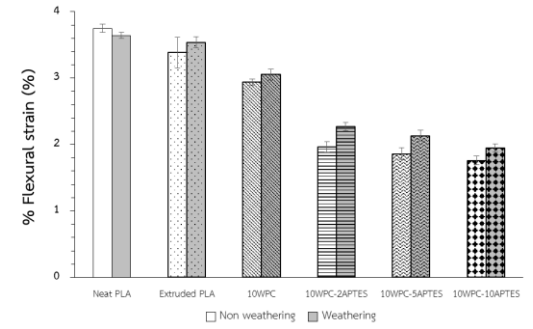
(b) แสดง Tensile stress at break (MPa)ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



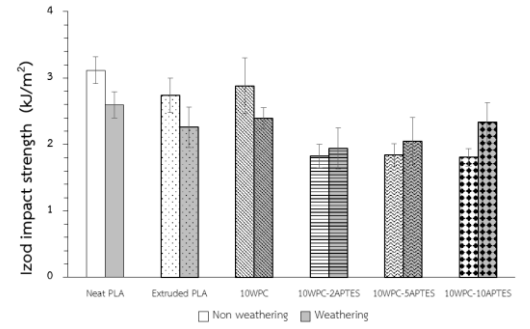
(c) แสดง % Elongation (%) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



(d) แสดง Flexural strength (MPa) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



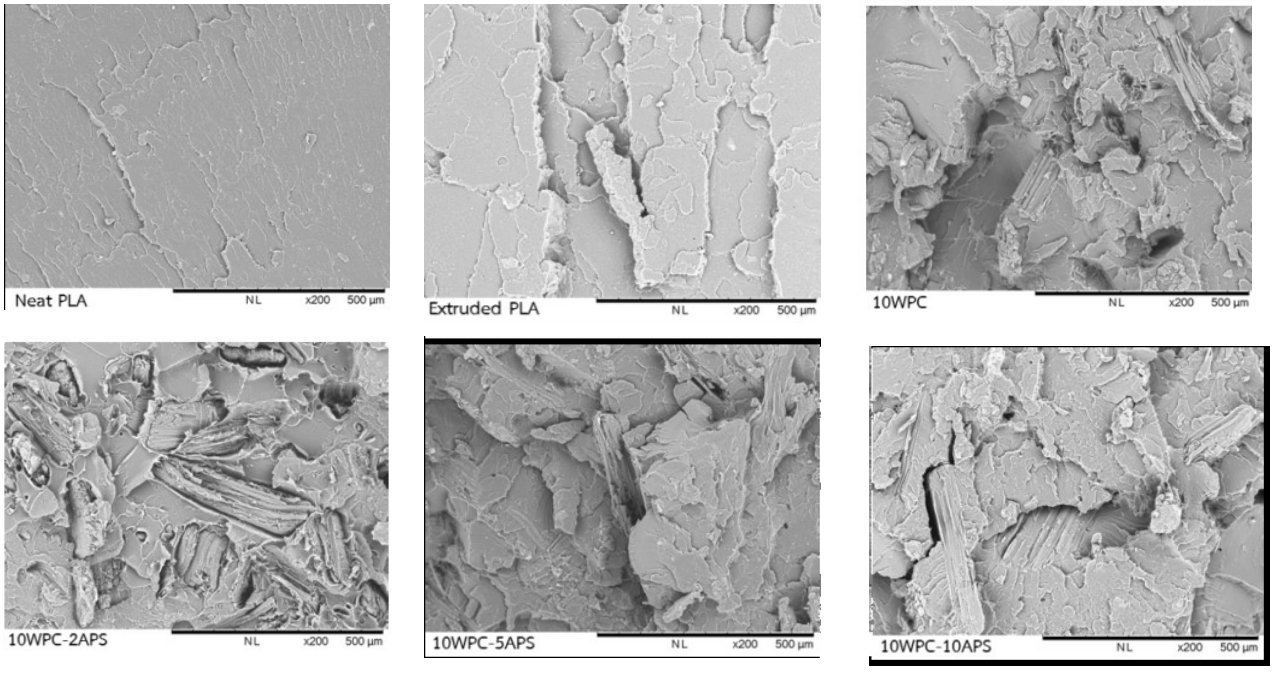
(e) แสดง % Flexural strength (%) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง



(f) แสดง Izod impact strength (kJ/m^2) ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน APTES ต่างๆก่อนและหลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง

รูปที่ 1: แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วนสารเชื่อมประสาน APTES ต่างๆ ก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ (Accelerated weathering test) เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

ในขณะที่วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ไม่ได้มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีค่า Flexural strength ค่า % Flexural strain และค่า Izod impact strength ลดลงภายหลังจากการทดสอบสภาวะอากาศ เนื่องจากการสลายตัวของ PLA ทำให้การยึดติดกันของพอลิแลคติกแอซิดกับผงไม้แดงลดลง จึงทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดต่ำไปด้วย ในขณะที่วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ส่งผลให้เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านการต้านทานการดัดโค้งงอของชิ้นงานและต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดง10% ที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ ภายหลังจากการทดสอบสภาวะอากาศ ทั้งนี้เมื่อทำการวัดค่าเฉดสีเพื่อศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของสีโดยรวม (ΔE) ภายหลังจากการทดสอบสภาวะอากาศ 120 ชั่วโมง พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Neat PLA) มีค่า ΔE เท่ากับ 17.52$\pm$10.73 และพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด(Extruded PLA) มีค่า ΔE เท่ากับ 33.19$\pm$17.23 ในขณะที่วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่ไม่มีการปรับปรุงผิวผงไม้ด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีค่า ΔE เท่ากับ 6.67$\pm$3.93 และวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วน 2%, 5% และ10% โดยน้ำหนักของผงไม้มีค่า ΔE เท่ากับ 10.07$\pm$8.18, 11.66$\pm$6.21 และ 10.46$\pm$4.57 เนื่องจากผงไม้แดงที่เติมเข้าไปนั้นช่วยทำหน้าที่ UV absorber ที่จะดูดกลืนแสง UV แทนการดูดกลืนแสงของสายโซ่ของพอลิเมอร์ ส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดเกิดปฏิกิริยา photo-oxidation ได้น้อยลง จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉดสีมากเหมือนชิ้นงานพอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด



รูปที่ 2 : ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆ หลังผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ (Accelerated weathering test) เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 : แสดงผลที่ได้จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES ที่อัตราส่วนต่างๆก่อนและหลังการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศ (Accelerated weathering test) เป็นเวลา 120 ชั่วโมง

วัสดุ (Materials)	T_g (°C)		T_{cc} (°C)		T_{m1}(°C)		T_{m2}(°C)		$\%X_c$ (%)	
	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering	Before weathering	After weathering
พอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์ (Neat PLA)	62.136	61.988	117.518	111.193	152.473	159.410	151.421	159.368	23.67	26.69
พอลิแลคติกแอซิดที่ผ่านกระบวนการอัดรีด(Extruded PLA)	61.956	62.030	113.348	108.609	151.651	159.423	150.672	1593.282	29.39	29.35
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% (10-WPC)	62.462	61.225	106.957	110.096	151.708	158.803	150.839	159.194	29.98	25.48
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10%ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES 2% (10-WPC-2APTES)	62.048	61.393	110.102	109.102	150.842	159.281	150.832	159.271	33.14	29.81
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES 5% (10-WPC-5APTES)	62.013	61.472	107.104	106.923	150.421	159.283	150.404	159.349	31.86	30.78
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่อัตราส่วน 10% ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย APTES 10% (10-WPC-10APTES)	61.055	61.930	106.926	106.501	150.335	158.859	150.332	159.349	30.522	29.670

6. สรุปผล

วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นตามปริมาณสารเชื่อมประสาน APTES ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวผงไม้แดง แต่เมื่อชิ้นงานผ่านการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมงพบว่าวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES มีเสถียรภาพทางร้อนที่ต่ำลงโดย เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเกิดการสลายตัวอันเนื่องมากจากแสง UV และการจำลองสภาวะน้ำฝนในการทดสอบ การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิแลคติกแอซิดและวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES พบว่าค่า Young's modulus และค่า Tensile stress at break และค่า % Elongation ของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยเชื่อมประสาน APTES มีการลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานAPTES แต่พบว่าค่า Flexural strength ค่า % Flexural strain และค่า Izod impact strength วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยเชื่อมประสาน APTES ภายหลังจากการทดสอบสภาวะอากาศ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของสารเชื่อมประสาน APTES ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวของผงไม้เพิ่มสูงขึ้น การผสมอนุภาคผงไม้แดงจึงสามารถรับแรงกระแทกและแรงต้าทานการดัดโค้งงอได้ดี วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้แดงที่มีการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสาน APTES โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉดสีการทดสอบความคงทนต่อสภาพอากาศเป็นเวลา 120 ชั่วโมง จึงน่าจะเป็นทางเลือกในการนำมาใช้ในงานวัสดุตกแต่งอาคารที่เป็นมิตรกับธรรมชาติ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินวิจัยที่ใช้ในการจัดซื้อวัสดุและสารเคมี รวมถึงการใช้เครื่องมือขึ้นรูปและทดสอบจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Datta, R., et al., 2006, "Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies-a review", Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 81, pp. 1119- 1129.

[2] Dányádi. L., et al., 2006, "Wood flour filled PP composites: adhesion, deformation, failure", Polymer Advanced Technology, 17, pp. 967–974.

[3] Pukánszky B., 1992, "Effect of interfacial interactions on the deformation and failure properties of PP/$CaCO_3$ composites", New Polymer Materails, 3, pp. 205–217.

[4] Faludi, G., et al., 2013, "Improving interfacial adhesion in pla/wood biocomposites", Composites Science and Technology, 89, pp. 77–82.

[5] Oksman, K., et al., 2003, "Natural fibers as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites", Composites Science and Technology, 63, pp. 1317-1324.

[6] Yanjun X., et al., 2010, "Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites", A review. Composites: Part A, 41, pp. 806–819.