

วัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยผักตบชวา

กมลชนก รอดวินิจ¹ ธนพงษ์ เชื้อฉุน^{1,*}
ณัฐวุฒิ รัตนธรรมวัฒน์¹ เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์¹
รัตน์สุภา ธรรมาภรณ์¹

¹สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพฯ

*Corresponding author e-mail: thanapong_ch@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณของเส้นใย และการบำบัดพื้นผิวของเส้นใยผักตบชวาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยเริ่มจากการบำบัดผิวเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการผสมเส้นใยผักตบชวาในปริมาณ 10 20 30 และ 40 ส่วนต่อร้อยส่วน กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ และฉีดขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป จากการศึกษาพบว่าการบำบัดพื้นผิวเส้นใยผักตบชวาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถขจัดสารประกอบบลิกกินินและเฮมิเซลลูโลส เส้นใยผักตบชวาสามารถปรับปรุง modulus ของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย แต่อย่างไรก็ตามค่าการทนแรงดึงและการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลงตามปริมาณเส้นใย การบำบัดพื้นผิวเส้นใยผักตบชวาช่วยปรับปรุงการยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ เส้นใยผักตบชวา/ วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์

Poly (butylene succinate) Composites Reinforced with Water Hyacinth Fiber

Kamonchanok Rodwinit¹ Thanapong Chuachun^{1,*}
Nattawoot Rattanathamwat¹ Piangruetai Boonprasith¹
Ratsupa Thammapun¹

¹Industrial Chemistry Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdej-chaopraya Rajabhat University, Bangkok

*Corresponding author e-mail: thanapong_ch@hotmail.com

Abstract

In this research, effect of fiber content and surface treatment of water hyacinth fiber on mechanical properties of poly (butylene succinate) composites were studied. The surface of water hyacinth fiber was treated with sodium hydroxide solution. After that, water hyacinth fiber with a variety of contents (10, 20, 30 and 40 pph) were mixed with poly (butylene succinate) in a twin-screw extruder and the mixed compound fabricated with an injection molding machine. From this studies, lignin and hemicellulose could be excreted by the surface treatment of water hyacinth fiber with sodium hydroxide solution. Hyacinth fiber was improved modulus of poly (butylene succinate) composites, which increased when content of fiber increased. However, tensile strength and elongation at break of poly (butylene succinate) composites was decreased when fiber content increased. Surface treatment of water hyacinth fiber was improved adhesive to polymer matrix, mechanical properties of composites had increased significantly.

Keywords: poly (butylene succinate)/ water hyacinth fiber/ polymer composites

บทนำ

ด้วยปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยอยู่ในรูปที่เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนยานยนต์ บรรจุภัณฑ์อาหาร อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า และเครื่องนุ่งห่ม เป็นต้น ด้วยปริมาณการใช้งานพลาสติกที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ขยะพลาสติกเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน โดยวิธีการกำจัดขยะพลาสติกมี 2 วิธีหลักๆ ด้วยกัน คือการเผาซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ และการฝังกลบซึ่งต้องใช้พื้นที่เป็นจำนวนมาก และที่สำคัญขยะพลาสติกมีอายุในการย่อยสลายนาน ด้วยปัญหาดังกล่าวการหันมาใช้พลาสติกชีวภาพซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะลดปัญหาขยะพลาสติก

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นวัสดุพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยอาศัยจุลินทรีย์ช่วยในการย่อยสลาย (รังสิมา และคณะ, 2552) พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดของวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเคมี เช่น พอลิคาโพรแลคโตน พอลิไกลโคลิกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เป็นต้น และวัตถุดิบที่มาจากชีวมวล เช่น พอลิไฮดรอกซีวาลิเอต พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต และพอลิแลคติกแอซิด เป็นต้น

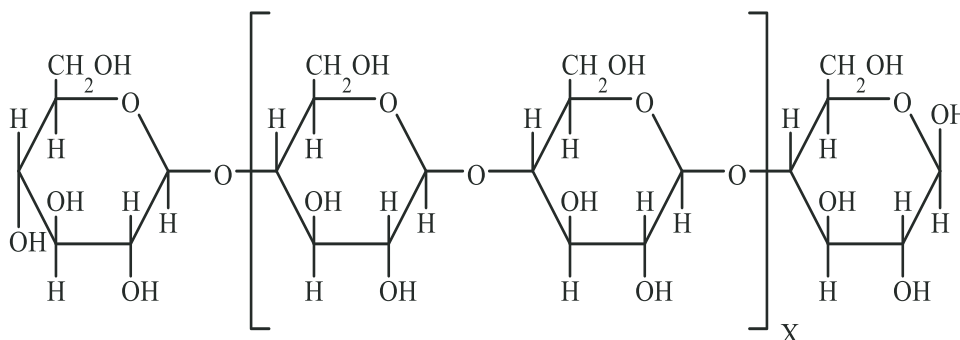
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate), PBS เป็นอะลิฟา

ติกพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างกรดซัคซินิก (Succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) (รังสิมา และคณะ, 2552) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีข้อดี คือสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงโดยไม่เสียสภาพ สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ได้ เช่นเดียวกับพอลิโพลีเอทิลีน แต่อย่างไรก็ตามพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีราคาสูง เมื่อนำมาใช้ในขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น การเติมสารฟิลเลอร์ หรือสารเสริมแรงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุน และยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและทางความร้อนได้อีกด้วย โดยเฉพาะการเติมสารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยจากธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหมุนเวียนในธรรมชาติ สามารถย่อยสลายได้ และมีราคาถูก

เส้นใยธรรมชาติมีองค์ประกอบหลัก คือเซลลูโลส (Pérez *et al.*, 2002) ซึ่งเป็นไฮโมพอลิแซคคาไรด์ ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยมอนอแซคคาไรด์ชนิด β -D-glucopyranose เชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาว โดยโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และการจัดเรียงของสายโซ่โมเลกุลมีความเป็นระเบียบ แต่ละสายโซ่นั้นถูกเชื่อมด้วยพันธะไฮโดรเจน ส่งผลให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกและความแข็งแรงสูง นอกจากนี้เส้นใยมีส่วนประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและสารประกอบลิกนิน

และทำให้เส้นใยธรรมชาติมีสภาพขี้สูง

เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซีเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลเซลลูโลส

การนำเส้นใยที่มาจากธรรมชาติมาทำเป็นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มีข้อจำกัดที่สำคัญ คือความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใย เพราะสภาพขี้ที่มีความแตกต่างกัน โดยพอลิเมอร์มีสภาพขี้ต่ำ ในขณะที่เส้นใยธรรมชาติมีสภาพขี้สูงและที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติจะถูกหุ้มด้วยสารประกอบลิกนิน ยิ่งทำให้การยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของเมทริกซ์พอลิเมอร์กับเส้นใยธรรมชาติลดลง และส่งผลให้การกระจายแรงและสมบัติเชิงกลลดลง (Sawpan *et al.*, 2011) การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของเส้นใยและเมทริกซ์จะมีบทบาทสำคัญ และมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการอธิบายคุณลักษณะสมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบ ถ้าหากว่าในแต่ละชั้นเฟสมีการเกาะยึดกันไม่ดี ทำให้เกิดการกระจายแรงได้น้อย ซึ่งส่งผลทำให้วัสดุเชิงประกอบที่ได้มีคุณสมบัติทางกลที่

แย่ (Wang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2011) สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง หลายปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดแนวของอินเตอร์เฟซ เนื่องมาจากการมีอยู่ของหมู่ไฮโดรฟิลิก ไฮดรอกซิล โดยความชอบน้ำซึ่งเป็นธรรมชาติของไฮโดรฟิลิกนี้ เป็นอุปสรรคต่อการเกิดปฏิกิริยากับเมทริกซ์ ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร การดัดแปลงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารอัลคาไลน์ที่มีฤทธิ์เป็นด่างแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) หรือโซดาไฟ ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลเซลลูโลส ซึ่งสารอัลคาไลน์จะทำให้ความหนาของพื้นผิวเพิ่มมากขึ้นในบริเวณ อดัสนฐานเซลลูโลส ไมโครโมเลกุลจะถูกแยกออกจากกัน ทำให้มีระยะห่างกันมากขึ้นและยังทำให้หมู่ไฮโดรฟิลิกไฮดรอกซิล ลดลง ช่วยเพิ่ม

คุณสมบัติความต้านทานความชื้น (Moisture resistance) ให้กับเส้นใย นอกจากนี้ยังช่วยกำจัดบางส่วนของเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพกทินแวกซ์ และน้ำมันที่ครอบคลุมบริเวณพื้นผิวเส้นใยออกไปอีกด้วย (Li *et al.*, 2007) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการขจัดลิกนินด้วยการบำบัดพื้นผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Aziz & Ansell, 2004; Edeerozey *et al.*, 2000) ทำให้พื้นผิวเส้นใยสะอาด ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านความเค้นระหว่างเซลล์เพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้ เป็นการนำเส้นใยผักตบชวา (Water hyacinth fiber, WHF) เป็นเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้จากวัชพืชลอยน้ำที่มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา มีราคาถูก สามารถย่อยสลายได้ มาทำการดัดแปลงพื้นผิวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ ด้วยการนำเส้นใยผักตบชวามาเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยทำการศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยและการบำบัดพื้นผิวของเส้นใยผักตบชวาที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ เส้นใยผักตบชวา

วิธีการทดลอง

วัสดุ/สารเคมี

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (BioPBS FZ9 1 PM, PTT MCC Biochem Company

Limited) ผักตบชวา และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (เกรดการค้า)

การเตรียมเส้นใยผักตบชวา

นำผักตบชวามาหั่นให้มีขนาดเล็ก แล้วอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ล้างให้สะอาดด้วยน้ำ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นให้เป็นเส้นใยด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง ทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดพื้นผิวด้วยเครื่อง FT-IR (Universal ATR Polarization Accessory for Frontier FT-IR, PerkinElmer)

การผสมวัสดุเชิงประกอบ

นำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยผักตบชวา อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วผสมในอัตราส่วนพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 100 ส่วน ต่อเส้นใยผักตบชวา 0 – 40 ส่วน ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวทวนอนคู่ (Labtech engineering รุ่น LHFS-221218) โดยใช้อุณหภูมิในแต่ละโซนเท่ากับ 110 120 130 และ 120 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที

การขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ

นำวัสดุเชิงประกอบขึ้นรูปขึ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบการทนแรงดึงตาม ASTM D638 ด้วยเครื่องฉีดยูพลาสติก

(Mini-JECTOR รุ่น 45) โดยใช้อุณหภูมิแต่ ละโซน ดังนี้ Metering zone 190 องศา เซลเซียส และ Nozzle zone 190 องศา เซลเซียส

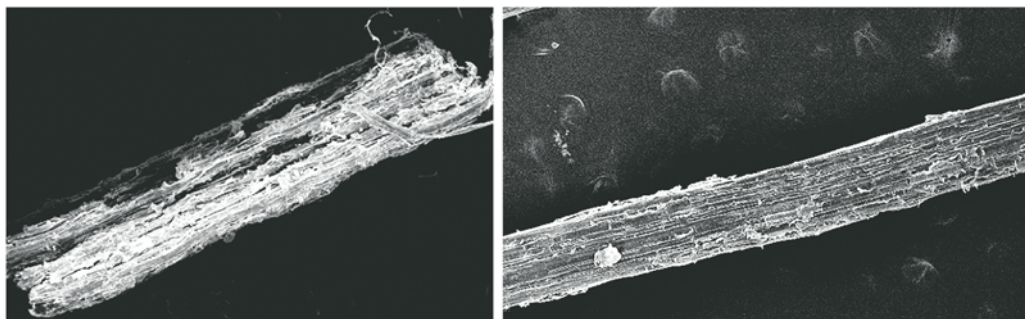
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติการทนแรงดึงของ วัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติ เชิงกล (Universal testing machine, Chun yen machine รุ่น CY-6040A4) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ใช้ Load ขนาด 500 กิโลกรัม ใช้ความเร็วในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที

ผลการทดลอง

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใย ผักตบชวา จะมีสารประกอบลิกนินห่อหุ้ม อยู่ ซึ่งส่งผลให้พื้นผิวเส้นใยมีความขรุขระดัง ภาพที่ 2 หลังจากการบำบัดพื้นผิวเส้นใย ผักตบชวาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าพื้นผิวเส้นใยมีความเรียบสม่ำเสมอ มากขึ้น เนื่องจากเกิดหลุดออกของสาร

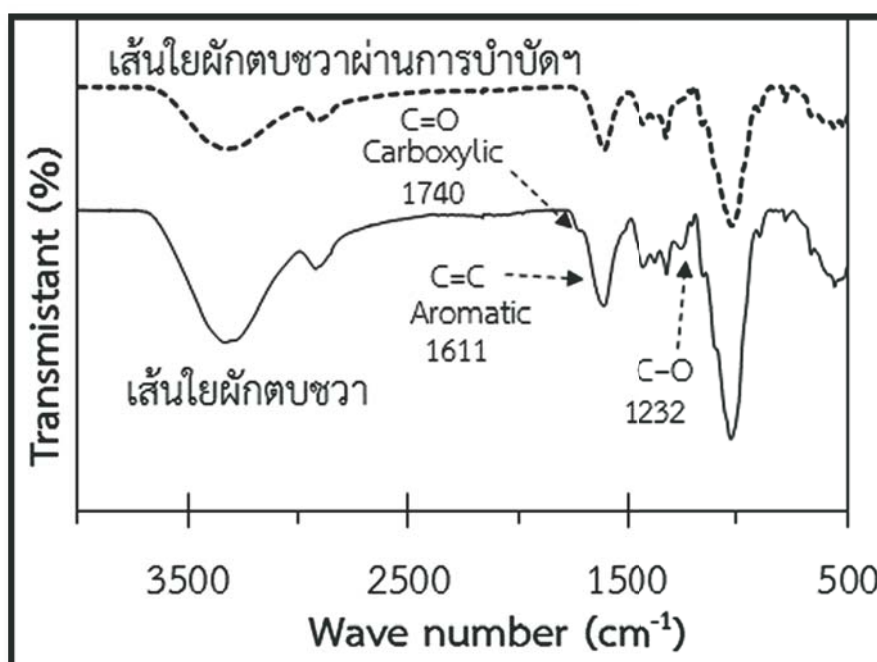
ประกอบลิกนิน ยืนยันได้จากสเปกตรัม FT-IR ของเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่าน การบำบัดผิวด้วยสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ ดังภาพที่ 3 เมื่อสังเกต สเปกตรัมของผักตบชวาจะพบพีคการสั่น ของพันธะ C=C ของหมู่เอโรมาติกของ สารประกอบลิกนินที่ตำแหน่ง $1,611\text{ cm}^{-1}$ ในลักษณะซ้อนเหลื่อมกันกับพีคการสั่นของ พันธะ C=O ของหมู่เอซิติลในโมเลกุลของ เฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่ง $1,740\text{ cm}^{-1}$ และ ยังพบพีคการสั่นของ C-O ของหมู่เอซิติล ในลิกนินที่ตำแหน่ง $1,232\text{ cm}^{-1}$ ในขณะที่ สเปกตรัมของผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดผิว ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ กลับไม่ พบพีคการสั่นของพันธะ C=O ของหมู่เอซิติลในโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่ง $1,740\text{ cm}^{-1}$ เช่นเดียวกับพีคการสั่นของ C-O ของหมู่เอซิติลในลิกนินที่ตำแหน่ง $1,232\text{ cm}^{-1}$ ส่วนความสูงของพีคที่ตำแหน่ง $1,611\text{ cm}^{-1}$ ลดลง เนื่องมาจากลิกนินถูก ขจัดออกไปซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sgriccia (2008)



ก)

ข)

ภาพที่ 2 สัณฐานวิทยาของเส้นใยผ้าทอชวา ก) ไม่ผ่าน ข) ผ่านการบำบัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



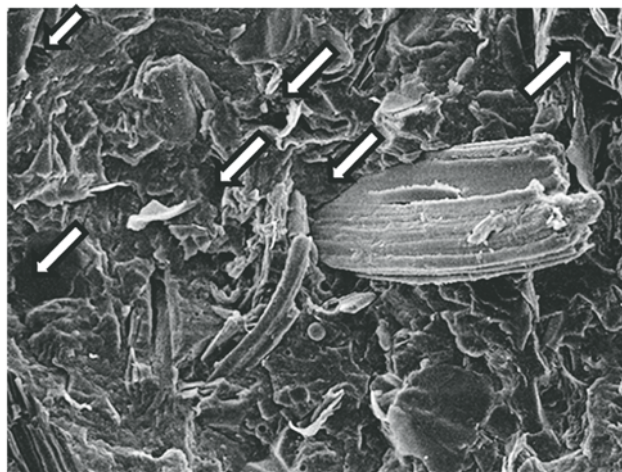
ภาพที่ 3 สเปกตรัม FT-IR ของเส้นใยผ้าทอชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการบำบัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยผักตบชวา พบว่าเส้นใยผักตบชวาสามารถปรับปรุงมอดูลัสของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยการถ่ายโอนแรงกระทำจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ไปสู่เส้นใย โดยมอดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตามค่าการทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่เติมลงไปจะ

เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้ความต่อเนื่องของเนื้อเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nam (2011) และความเข้ากันไม่ได้ระหว่างเส้นใยผักตบชวาที่มีความเป็นขี้สูงกับเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ทำให้การยึดเกาะที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสไม่ดีและก่อให้เกิดช่องว่าง ดังภาพที่ 4

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยผักตบชวา

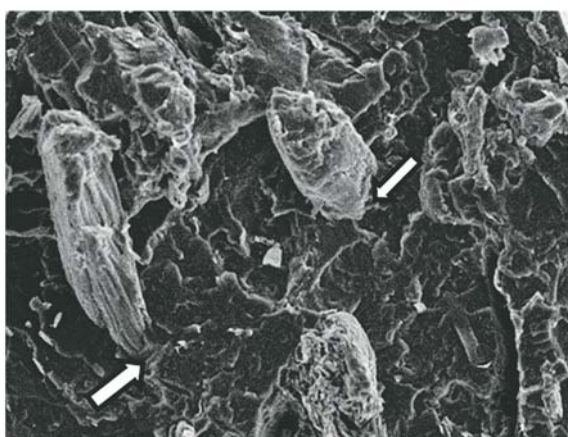
ปริมาณเส้นใย (pph)	การบำบัดเส้นใย	ค่าการทนแรงดึง (MPa)	ค่าการยืดตัว (%)	มอดูลัส (MPa)
0	-	39.44 ± 1.77	223.43 ± 17.47	4.95 ± 0.21
10	-	32.20 ± 0.32	11.64 ± 0.23	6.96 ± 0.26
	✓	34.62 ± 0.31	12.83 ± 0.15	7.74 ± 0.24
20	-	30.34 ± 0.37	8.51 ± 0.33	9.21 ± 0.19
	✓	32.14 ± 0.28	9.62 ± 0.32	9.94 ± 0.24
30	-	28.09 ± 0.29	6.72 ± 0.29	10.64 ± 0.39
	✓	29.53 ± 0.35	7.65 ± 0.35	10.96 ± 0.24
40	-	26.23 ± 0.25	5.74 ± 0.27	12.26 ± 0.31
	✓	28.37 ± 0.17	6.58 ± 0.33	12.91 ± 0.30



ภาพที่ 4 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยผักตบชวา ไม่ผ่านการบำบัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาค่าการทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดและมอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวัสดุ

เชิงประกอบที่มีเส้นใยผักตบที่ไม่ผ่านการบำบัด เนื่องจากพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านการบำบัดจะมีความสม่ำเสมอ ทำให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ดีขึ้น ช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสลดลง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/เส้นใยผักตบชวา ผ่านการบำบัดผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

สรุปผลการทดลอง

เส้นใยผักตบชวาสามารถปรับปรุงมอดูลัสของพอลิเมอร์ที่ลื่นซัคซิเนตให้สูงขึ้นตามปริมาณเส้นใย อย่างไรก็ตามการทนแรงดึงและค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่ลื่นซัคซิเนตลดลงตามปริมาณเส้นใย การบำบัดพื้นผิวเส้นใยผักตบชวากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถจัดสรรประกอบลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ทำให้พื้นผิวเส้นใยมีความสม่ำเสมอและส่งผลให้เกิดการยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ดี และสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

รังสิมา ชลคุป วีรศักดิ์ สมิตธิพงษ์ และกล้าณรงค์ วีรอต. (2552). **วัสดุชีวภาพรักษ์โลก**. นนทบุรี: หจก. มณีสฟิล์ม.

Aziz, S.H., & Ansell, M.P. (2004). The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: part 1 – polyester resin matrix. **Composites Science and Technology**, 64(9), 1219-1230.

Edeerozey, A.M.M., Akil, H.M., Azhar, A.B., & Ariffin, M.I.Z. (2007). Chemical modification of kenaf fibers, **Materials Letters**, 61(10), 2023-2025.

Kim, H.-S., Lee, B.-H., Lee, S., Kim, H.-J., & Dorgan, J. (2011). Enhanced interfacial adhesion, mechanical, and thermal properties of natural flour-filled biodegradable polymer biocomposites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 104(1), 331-338.

Li, X., Tabil, L.G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatment of natural fibre for use in natural fibre-reinforced composites: a review. **Polym Environ**, 1, 25-33.

Nam, T.H., Ogihara, S., Tung, N.H., & Kobayashi, S. (2011). Mechanical and thermal properties of short coir fibre reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites. **Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering**, 5(6), 251-262.

- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., de la Rubia, T., & Martínez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. **International Microbiology**, 5(2), 53-63.
- Sawpan, M.A., Pickering, K.L., & Fernyhough, A. (2011). Effect of fibre treatments on interfacial shear strength of hemp fibre reinforced polylactide and unsaturated polyester composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 42(9), 1189-1196.
- Sgriccia, N., Hawley, M.C., & Misra, M. (2008). Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 39(10), 1632-1637.
- Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., & Crerar, W. (2007). Pre-treatment of flax fibres for use in rotationally molded biocomposites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 26(5), 447-463.