วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 5 กันยายน – ตุลาคม 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 5 September – October 2026

บทความวิจัย (Research Article)

สมบัติเชิงกลและความร้อนเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย

ธนพงษ์ เชื้อฉุน[1,*], เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์[1], ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ[2] และ ประยูร สุรินทร์[3]

[1]สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[2]สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thanapong.ch@bsru.ac.th, โทรศัพท์: 095-1635164
(รับบทความ: 28 พฤษภาคม 2569; แก้ไขบทความ: 20 กรกฎาคม 2569; ตอบรับบทความ: 21 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย โดยพิจารณาผลของปริมาณเส้นใย (10–30 pph) และการบำบัดพื้นผิวเส้นใยด้วยสารละลายด่างที่มีต่อสมบัติเชิงกลสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนเชิงกล เริ่มจากการบำบัดเส้นใยชานอ้อยด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 wt.% จากนั้นผสมเส้นใยกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างมีพื้นผิวสะอาดและหยาบกว่าเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ที่แสดงการลดลงของความเข้มพีคที่สัมพันธ์กับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวเส้นใย การผสมเส้นใยชานอ้อยช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสแรงดึงและอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อนของวัสดุเชิงประกอบตามปริมาณเส้นใยที่เติม โดยค่าโมดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 325.3 MPa เป็น 955.4 MPa ขณะที่อุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อนเพิ่มจาก 87.6 °C เป็น 108.3 °C เมื่อใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างที่ปริมาณ 30 pph อย่างไรก็ตาม ความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ณ จุดแตกหัก และความต้านทานแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เพิ่มขึ้น อันเป็นผลจากการกระจุกตัวของความเค้นและการลดลงของความต่อเนื่องของเมทริกซ์พอลิเมอร์ การบำบัดพื้นผิวด้วยด่างช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงกระแทกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด ทั้งนี้ การเติมเส้นใยส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนและระดับความเป็นผลึกโดยรวมของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพียงเล็กน้อย ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างในการเป็นวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยช่วยเพิ่มความแข็งเกร็งและความต้านทานต่อการโก่งตัวจากความร้อน อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อพัฒนาวัสดุเชิงประกอบชีวภาพอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เส้นใยชานอ้อย วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ การบำบัดด้วยด่าง อุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อน

การอ้างอิงบทความ: ธนพงษ์ เชื้อฉุน, เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์, ทิพย์วรรณ หงกะเชิญ และ ประยูร สุรินทร์, "สมบัติเชิงกลและความร้อนเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อย , *“วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 5, หน้า 14-26, 2569.

วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ ปีที่ 4 ฉบับที่ 5 กันยายน – ตุลาคม 2569
Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University, Vol. 4 No. 5 September – October 2026

บทความวิจัย (Research Article)

Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of Poly(Butylene Succinate) Composites Reinforced with Bagasse Fibers

Thanapong Chuechun[1,*], Piangruetai Boonprasith[1], Tippavan Hongkachern[2] and Prayoon Surin[3]

[1]Department of Medical Science, Faculty of Allied Health Sciences, Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[2]Department of Physics, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University
[3]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology

*Corresponding Author: thanapong.ch@bsru.ac.th, Tel: 095-1635164
(Received: May 28, 2026; Revised: July 20, 2026; Accepted: July 21, 2026)

Abstract

This study investigates the preparation and properties of poly(butylene succinate) (PBS) composites reinforced with bagasse fibers, focusing on the effects of fiber loading (10–30 pph) and alkaline surface treatment on the mechanical, morphological, and thermo-mechanical properties of the composites. The fibers were treated with 5 wt.% sodium hydroxide solution, then compounded with PBS using a twin-screw extruder and hot-compression molding to produce test specimens. Morphological analysis revealed that the alkali-treated fibers exhibited a cleaner and rougher surface than untreated fibers, which was consistent with the FTIR results showing a reduction in the intensity of peaks associated with hemicellulose, lignin, and surface impurities. The incorporation of bagasse fibers increased the tensile modulus and heat deflection temperature (HDT) of the composites with increasing fiber content. The tensile modulus increased from 325.3 MPa for neat PBS to 955.4 MPa, while the HDT increased from 87.6 ℃ to 108.3 ℃ for the composite containing 30 pph alkali-treated fibers. However, tensile strength, percent elongation at break, and impact strength gradually decreased as fiber loading increased because of stress concentration and reduced matrix continuity. Alkali treatment improved the interfacial adhesion between the fibers and the PBS matrix, resulting in higher tensile strength and impact strength than those of composites containing untreated fibers. In addition, fiber incorporation had only a slight influence on the thermal behavior and overall crystallinity of PBS. These findings demonstrate that alkali-treated sugarcane bagasse fibers are promising reinforcing materials for PBS, providing enhanced stiffness and heat deflection resistance while offering a sustainable approach for valorizing agricultural waste in the development of biodegradable biocomposites.

Keywords: Poly(Butylene Succinate), Bagasse Fiber, Biocomposites, Alkali Treatment, Heat Deflection Temperature

Please cite this article as: T. Chuechun, P. Boonprasith, T. Hongkachern and P. Surin, “Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of Poly(Butylene Succinate) Composites Reinforced with Bagasse Fibers,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 5, pp. 14-26, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกและพอลิเมอร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ ด้วยสมบัติที่มีความแข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปทรงให้มีความเหมาะสมตามการใช้งาน เช่น บรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องนุ่งห่ม และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ส่งผลให้ปริมาณการผลิตและการบริโภคพอลิเมอร์ทั่วโลกเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านั้นมีต้นกำเนิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม [1,2] ด้วยปริมาณการใช้งานพอลิเมอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นก่อให้เกิดปัญหาการสะสมขยะพลาสติกที่มีผลเสียต่อระบบนิเวศอย่างรุนแรง โดยเฉพาะกลุ่มบรรจุภัณฑ์แบบใช้ครั้งเดียว (Single-Use Containers) [2]

พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (Biodegradable Polymers) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมากในฐานะทางเลือกที่มีแนวโน้มดีเพื่อทดแทนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากปิโตรเคมี เนื่องจากสามารถย่อยสลายภายใต้สิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติผ่านกิจกรรมของเอนไซม์และกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงจนเกิดการสลายตัวกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ และสารโมเลกุลขนาดเล็ก ๆ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม [1,3] กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพนี้ช่วยลดการสะสมของขยะและบรรเทามลพิษทางสิ่งแวดล้อม

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene Succinate), PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในกลุ่มอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี รวมทั้งสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้เช่นเดียวกับพอลิโอเลฟินส์ [4-6] แม้จะมีข้อดีเหล่านี้ แต่ต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ทั่วไป [7] ประกอบกับข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานที่ต้องรองรับแรงกดและสภาวะอุณหภูมิสูง เนื่องจากวัสดุพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และความแข็งเกร็ง (Stiffness) ที่จำกัด รวมถึงการเสียรูปอย่างฉับพลันเมื่อได้รับความร้อนสูง ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเหล่านี้สามารถทำได้ด้วยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น หรือการเติมสารเสริมแรง สารตัวเติม และสารปรุงแต่งอื่น ๆ [5]

การเสริมแรงเมทริกซ์พอลิเมอร์ด้วยเส้นใยธรรมชาติ เช่น ชานอ้อย ปอ ต้นไผ่ กากมะพร้าว และปอแก้ว เป็นต้น เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างมากในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ รวมถึงส่งเสริมการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งยังช่วยลดน้ำหนักและต้นทุนการผลิตของวัสดุ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรง ความหนาแน่นต่ำ ราคาประหยัด เป็นทรัพยากรหมุนเวียน และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ [8-10]

ในบรรดาเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ ชานอ้อยเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้กับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เนื่องจากหาได้ง่าย มีปริมาณมาก และมีโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสที่เหมาะสมต่อการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบ [11-14] โดยชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหีบอ้อย ซึ่งโดยทั่วไปมักถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง อาหารสัตว์ และปุ๋ยหมัก การนำเส้นใยชานอ้อยมาเสริมแรงในเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นอีกแนวทางหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ รวมทั้งยังสามารถลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียทางการเกษตร [11-13]

อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของการเสริมแรงเมทริกซ์พอลิเมอร์ด้วยเส้นใยธรรมชาติอยู่ที่ความไม่เข้ากันทางเคมีระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำและเส้นใยธรรมชาติที่ชอบน้ำ รวมทั้งเส้นใยถูกปกคลุมด้วยลิกนิน เพคติน และขี้ผึ้ง ซึ่งขัดขวางการยึดเกาะเชิงกลระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นระหว่างเฟสต่ำ [10,15-17]

บทความวิจัย (Research Article)

ด้วยเหตุนี้ จึงมีการศึกษาการบำบัดผิวเส้นใยด้วยสารละลายด่าง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งสกปรกบนพื้นผิว ซึ่งช่วยเพิ่มความหยาบของผิวเส้นใยและปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างเฟส [15-18] ผลการศึกษาพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ผสมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างมีสมบัติเชิงกลดีกว่าระบบที่ไม่ผ่านการบำบัดอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น [14-19] นอกจากนี้ การผสมเส้นใยยังสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความร้อนและการตกผลึกของพอลิเมอร์ โดยเส้นใยทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดนิวเคลียส ขณะเดียวกันเส้นใยอาจจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์และการเจริญเติบโตของผลึก ส่งผลกระทบต่อระดับความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนเชิงกลของวัสดุ [14, 20, 21]

แม้ว่าจะมีรายงานการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติหลายชนิดซึ่งรวมถึงเส้นใยชานอ้อย [22-25] แต่การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นการประเมินสมบัติเชิงกลและพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ ในขณะที่การศึกษาสมบัติทางความร้อนเชิงกล โดยเฉพาะอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อน (Heat Deflection Temperature; HDT) ยังมีรายงานค่อนข้างน้อย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยศึกษาผลของปริมาณเส้นใยและการบำบัดพื้นผิวเส้นใยด้วยด่างต่อสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พฤติกรรมทางความร้อน การตกผลึก และอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อน เพื่อสนับสนุนการเพิ่มมูลค่าของชานอ้อยในฐานะวัสดุเสริมแรงสำหรับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุ

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เม็ดพลาสติกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเกรดสัมผัสอาหาร (BioPBS™ FZ91PM) ซึ่งผลิตโดยบริษัท PTT MCC Biochem Co., Ltd. ชานอ้อยได้มาจากร้านจำหน่ายน้ำอ้อยในท้องถิ่น กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยชานอ้อยดิบถูกล้างทำความสะอาดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 ℃ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 wt.% เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากการบำบัดด้วยด่าง ชานอ้อยถูกล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีค่า pH เป็นกลาง ก่อนนำไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 ℃ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลดขนาดให้เป็นเส้นใยชานอ้อยด้วยเครื่องบดความเร็วสูง

2.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมเส้นใยชานอ้อย

เม็ดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเส้นใยชานอ้อยถูกนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 ℃ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้เส้นใยปริมาณ 0–30 ส่วนต่อพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 100 ส่วน (Parts per Hundred Polymer; pph) ดังแสดงในตารางที่ 1 และผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Labtech Engineering รุ่น LHFSI-221218) ภายใต้อุณหภูมิ 120, 130, 140 และ 135 ℃ ตั้งแต่บริเวณโซนป้อนวัตถุดิบจนถึงโซนหัวดาย ด้วยความเร็วรอบสกรู 100 rpm เส้นอัดรีดของวัสดุเชิงประกอบที่ได้ถูกทำให้เย็นด้วยน้ำ ตัดเป็นเม็ดและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 ℃ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดวัสดุเชิงประกอบขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปแบบร้อน (Hot-Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 150 ℃ ภายใต้ความดันอัด 1 MPa เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นหล่อเย็นภายใต้ความดันอัด 1 MPa เป็นเวลา 5 นาที

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 1 สัดส่วนและชื่อเรียกของวัสดุเชิงประกอบ

ตัวอย่าง	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (g)	เส้นใยชานอ้อย (BF) (pph)	เส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่าง (TBF) (pph)
PBS	100	-	-
PBS/BF10	100	10	-
PBS/BF20	100	20	-
PBS/BF30	100	30	-
PBS/TBF10	100	-	10
PBS/TBF20	100	-	20
PBS/TBF30	100	-	30

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะและการทดสอบสมบัติ

2.3.1 ศึกษาผลของการบำบัดเส้นใยชานอ้อยด้วยด่าง

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยชานอ้อยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ของ JEOL Ltd. รุ่น JSM-6610LV

ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยชานอ้อยด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) โดยใช้เครื่องของ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5 ในช่วงเลขคลื่น 500–4000 cm^{-1}

2.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องทดสอบสากล (Universal testing machine) ของ Lloyd Instruments รุ่น LR50K ตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้ความเร็วในการดึง 10 mm/min ที่อุณหภูมิ 25 ℃

ศึกษาความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength) ของวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยชิ้นงานทดสอบถูกบากร่องก่อนการทดสอบและทำให้แตกหักด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของ Yasuda Seiki Seisakusho แบบลูกตุ้ม

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) ของ NETZSCH รุ่น 200 F3 โดยใช้ช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 180 ℃ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 ℃/min และคงอุณหภูมิไว้ 1 นาที จากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงถึง -25 ℃ ด้วยอัตราเดียวกัน โดยระดับความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ถูกคำนวณจากสมการที่ 1

$$\chi\,(\%) = \Delta H_m/\Delta H_m^{\,0}\,(1-W_f) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

ΔH_m คือ ค่าเอนทาลปีการหลอมเหลวผลึกของตัวอย่าง

$\Delta H_m^{\,0}$ คือ ค่าเอนทาลปีการหลอมเหลวผลึกเชิงทฤษฎีของพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก 100%, (200 J/g สำหรับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [26])

W_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของเส้นใยชานอ้อยในวัสดุเชิงประกอบ

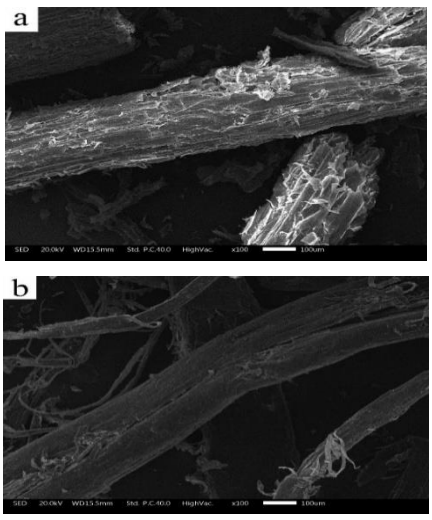
ศึกษาอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อนของวัสดุเชิงประกอบด้วยเครื่อง CEAST Vicat Auto Machine Model P/N 6970.000 ตามมาตรฐาน ASTM D648 โดยทำการทดสอบภายใต้ความเค้นดัดคงที่ 0.455 MPa และใช้อัตราการให้ความร้อน 2 ℃/min

บทความวิจัย (Research Article)

3. ผลการทดลอง

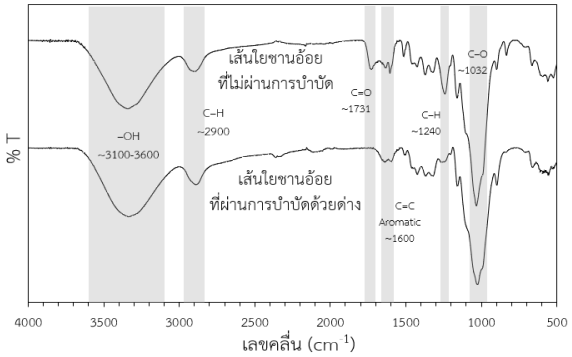
3.1 ผลของการบำบัดเส้นใยชานอ้อยด้วยด่าง

สัณฐานวิทยาของเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัดแสดงลักษณะพื้นผิวขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากมีเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ขี้ผึ้ง และสิ่งสกปรกอื่น ๆ ปกคลุมอยู่บนพื้นผิว [27] (รูปที่ 1a) อย่างไรก็ตาม ภายหลังการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 wt.% พบว่าพื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะสะอาดและหยาบมากขึ้น พร้อมทั้งเกิดการแยกตัวของเส้นใยย่อย (Fibrillation) อย่างเด่นชัด (รูปที่ 1b) ซึ่งบ่งชี้ว่าการบำบัดด้วยด่างสามารถกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ใช่เซลลูโลสบางส่วนออกจากพื้นผิวเส้นใย และมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ เนื่องจากความหยาบของพื้นผิวเส้นใยที่เพิ่มขึ้นช่วยส่งเสริมการยึดเหนี่ยวเชิงกล (Mechanical Interlocking) กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น [18, 19]



รูปที่ 1 สัณฐานวิทยาของเส้นใยชานอ้อย (a) และเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายด่าง (b)

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเส้นใยด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยภายหลังการบำบัดด้วยสารละลายด่าง



รูปที่ 2 สเปกตรัม FTIR ของเส้นใยชานอ้อย

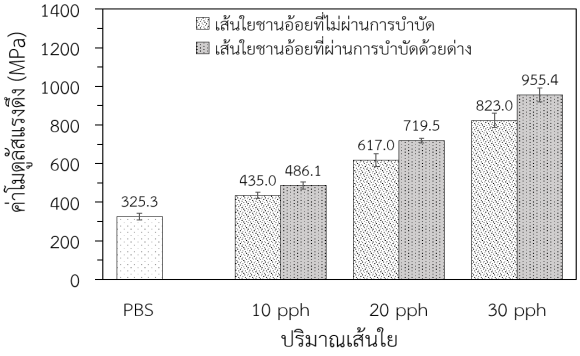
รูปที่ 2 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเส้นใยชานอ้อยก่อนการบำบัดด้วยสารละลาย NaOH โดยพบแถบการดูดกลืนกว้างในช่วงเลขคลื่นประมาณ 3200–3600 cm^{-1} ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (–OH) ที่เกี่ยวข้องกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ขี้ผึ้ง และกรดไขมัน [28] ในขณะที่พีคที่เลขคลื่นประมาณ 2917 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของพันธะ C–H ในเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่วนพีคที่ประมาณ 1732 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน นอกจากนี้ แถบการดูดกลืนบริเวณประมาณ 1600 cm^{-1} เป็นการสั่นของพันธะ C=C ในโครงสร้างอะโรมาติกของลิกนิน ขณะที่พีคที่ประมาณ 1240 cm^{-1} และ 1032 cm^{-1} มีความสัมพันธ์กับการสั่นแบบดัดงอของพันธะ C–H ของเฮมิเซลลูโลส [28] และการสั่นแบบยืดของพันธะ C–O ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน [29] ตามลำดับ ภายหลังการบำบัดเส้นใยด้วยสารละลายด่าง พบว่าความเข้มของพีคของหมู่ฟังก์ชัน O–H และพันธะ C–H

บทความวิจัย (Research Article)

เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ว่าพื้นผิวเส้นใยมีสัดส่วนของเซลลูโลสมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มของพีคที่สัมพันธ์กับพันธะ C–O, C=O และ C=C ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะพีคที่สัมพันธ์กับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน สะท้อนให้เห็นว่าการบำบัดด้วยด่างสามารถกำจัดสารประกอบเหล่านั้นและสิ่งสกปรกบนพื้นผิวเส้นใย [23, 28, 29]

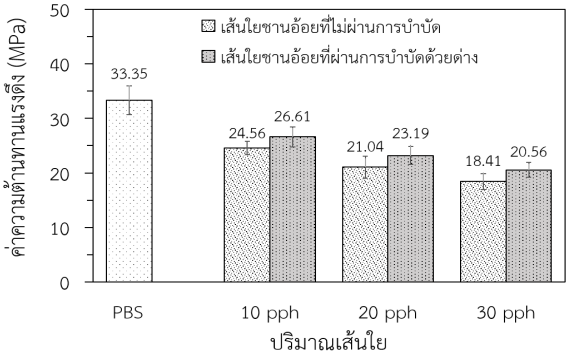
3.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบ

การผสมเส้นใยชานอ้อยส่งผลให้ค่าโมดูลัสแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย (รูปที่ 3) โดยค่าโมดูลัสแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพิ่มขึ้นจาก 325.3 MPa เป็น 823.0 MPa สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เติมเส้นใยชานอ้อย 30 pph และเพิ่มเป็น 955.4 MPa เมื่อใช้เส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่าง เนื่องจากเส้นใยมีความแข็งเกร็งสูงกว่าเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จึงช่วยเพิ่มความต้านทานการเสียรูปของวัสดุเชิงประกอบผ่านการถ่ายโอนความเค้นจากเมทริกซ์พอลิเมอร์ไปยังเฟสของเส้นใย [8, 10, 14]



รูปที่ 3 ค่าโมดูลัสแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบ

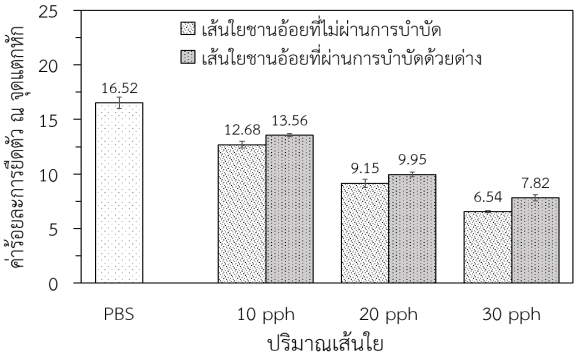
ในทางตรงกันข้าม ค่าความต้านทานแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดแตกหัก มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4 และ 5 การลดลงดังกล่าวมักเกิดจากการที่เส้นใยเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่เมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้ความต่อเนื่องของเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์ลดลง รวมถึงเกิดการกระจุกตัวของความเค้น (Stress Concentration) รอบเส้นใย และมีแนวโน้มเกิดการรวมกลุ่มของเส้นใยมากขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยสูงขึ้น [11, 12, 24] นอกจากนี้ ความแตกต่างด้านขั้วระหว่างเส้นใยชานอ้อยที่มีสมบัติชอบน้ำและเมทริกซ์พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำยังส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเฟสไม่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลดังกล่าว [23]



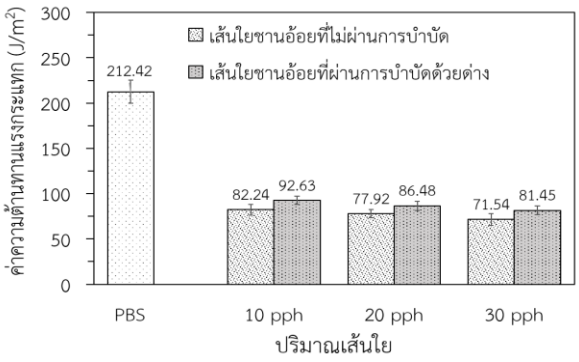
รูปที่ 4 ค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบ

ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดพื้นผิวด้วยด่างมีความต้านทานแรงดึง โมดูลัสแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดแตกหักสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการบำบัด เนื่องจากการบำบัดด้วยด่างสามารถกำจัดสิ่งสกปรกบนพื้นผิวและเพิ่มความหยาบของเส้นใย ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ดีขึ้น รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความเค้นระหว่างทั้งสองเฟส [8, 16]

บทความวิจัย (Research Article)



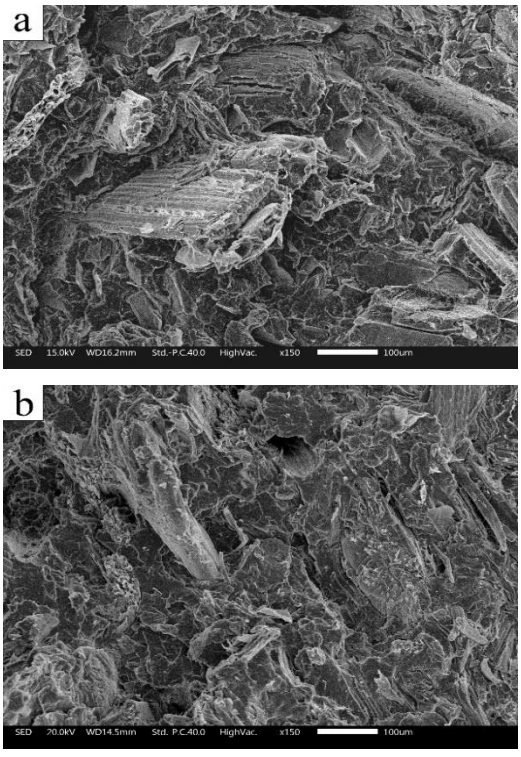
รูปที่ 5 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดแตกหักของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบ



รูปที่ 6 ค่าความต้านทานแรงกระแทกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบ

ค่าความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบผสมเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดและไม่ผ่านการบำบัดลดลงมากกว่า 50% เมื่อเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติมเส้นใยเพิ่มขึ้น (รูปที่ 6) เนื่องจากพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหนียวและความต้านทานแรงกระแทกสูง การเติมเส้นใยชานอ้อยทำให้ความเหนียวและความสามารถในการเสียรูปของเมทริกซ์พอลิเมอร์ลดลง อีกทั้งเส้นใยมีความแข็งเกร็งมากกว่าเมทริกซ์และลดความต่อเนื่องของเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีความแข็งเกร็งและความเปราะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มเกิดการรวมกลุ่มของเส้นใยมากขึ้น ทำให้การยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ไม่ดี และเอื้อต่อการเกิดรอยร้าวขนาดเล็กภายในเนื้อวัสดุ [7, 24]

อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดมีความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด เนื่องจากการบำบัดพื้นผิวช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้การถ่ายโอนและการกระจายความเค้นภายในวัสดุมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของพื้นผิวแตกหักจากการทดสอบแรงกระแทก ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (a) PBS/BF และ (b) PBS/TBF

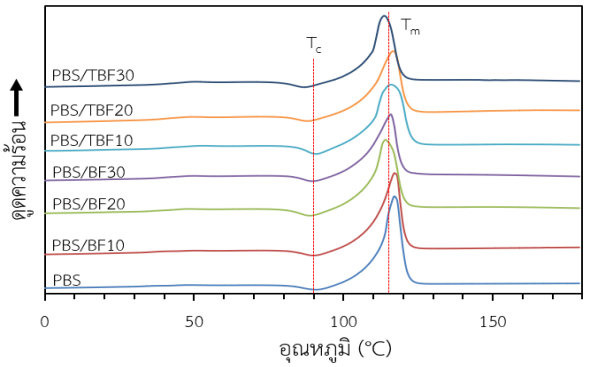
บทความวิจัย (Research Article)

โดยพบลักษณะการหลุดดึงออกของเส้นใย (Fiber Pull–Out) และการเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ในวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด แสดงถึงการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ไม่สมบูรณ์ ขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่ใช้เส้นใยที่ผ่านการบำบัดมีช่องว่างบริเวณรอยต่อลดลง สะท้อนให้เห็นถึงการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงกระแทกที่สูงกว่า

3.3 สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบ

เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมเส้นใย (รูปที่ 8) พบพีคการคายความร้อนช่วงอุณหภูมิประมาณ 87–91 °C ซึ่งสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization temperature, T_c) [20, 23] ก่อนเกิดการหลอมเหลวของผลึกพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อุณหภูมิประมาณ 113.8–117.3 °C ระดับความเป็นผลึกของวัสดุเชิงประกอบและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วงประมาณ 35–37% (ตารางที่ 2) แม้ว่าเส้นใยที่ผสมเข้าไปจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดนิวเคลียสที่ส่งเสริมการตกผลึกของเมทริกซ์พอลิเมอร์ [21] แต่ในขณะเดียวกันเส้นใยก็ขัดขวางการเติบโตของผลึก [20, 21, 26] ส่งผลให้ระดับความเป็นผลึกโดยรวมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

อุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อน (HDT) แสดงความสามารถของชิ้นงานในการต้านทานการเสียรูปภายใต้ความเค้นดัด 0.455 MPa พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์มีค่า HDT เท่ากับ 87.55 °C เมื่อเติมเส้นใยชานอ้อย ค่า HDT ของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เติมลงไป โดยการเติมเส้นใยปริมาณ 30 pph สามารถเพิ่มค่า HDT ได้ประมาณ 20 °C เนื่องจากเส้นใยช่วยเพิ่มค่าโมดูลัสและความแข็งเกร็ง ส่งผลให้วัสดุสามารถต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงกดที่อุณหภูมิสูงได้ดีขึ้น [30-32] โดยปริมาณการเติมเส้นใยมีผลโดยตรงต่อการเสียรูปอย่างชัดเจน ในขณะที่การบำบัดพื้นผิวเส้นใยส่งผลต่อค่า HDT ค่อนข้างน้อย



รูปที่ 8 เทอร์โมแกรม DSC ของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ตารางที่ 2 สมบัติทางความร้อนของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและวัสดุเชิงประกอบพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

ตัวอย่าง	T_m (°C)	T_c (°C)	ΔH_m (J/g)	χ (%)	HDT (°C)
PBS	117.3	91	72.53	36.27	87.55±0.25
PBS/BF10	117.3	90	66.54	36.60	92.57±0.21
PBS/BF20	114.0	89	60.19	36.13	104.93±0.59
PBS/BF30	116.0	89	55.36	35.99	107.73±0.23
PBS/TBF10	115.8	91	63.55	34.95	92.50±0.36
PBS/TBF20	116.7	88	60.25	36.16	104.30±0.46
PBS/TBF30	113.8	87	55.64	36.18	108.27±0.35

4. สรุปผลการทดลอง

สัณฐานวิทยาของเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีพื้นผิวสะอาดและหยาบกว่าเส้นใยชานอ้อยที่ไม่ผ่านการ

บำบัด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ที่แสดงการลดลงของความเข้มพีคที่สัมพันธ์กับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวเส้นใย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทำให้การถ่ายโอนความเค้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดมีค่าความต้านทานแรงดึง โมดูลัสแรงดึง และความต้านทานแรงกระแทกสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ไม่ผ่านการบำบัด อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณเส้นใยส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง ร้อยละการยืดตัว ณ จุดแตกหัก และความต้านทานแรงกระแทกลดลง เนื่องจากความต่อเนื่องของเมทริกซ์พอลิเมอร์ลดลงและเกิดการกระจุกตัวของความเค้นรอบเส้นใย แม้ว่าการเติมเส้นใยจะส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนและระดับความเป็นผลึกของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพียงเล็กน้อย แต่สามารถเพิ่มอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อนได้จากประมาณ 87.6 °C เป็น 108.3 °C เนื่องจากเส้นใยที่มีความแข็งเกร็งช่วยจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์และเพิ่มความต้านทานต่อการเสียรูปภายใต้ความร้อน ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้ วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยที่ผ่านการบำบัดด้วยด่างที่ปริมาณ 30 pph ให้ค่าโมดูลัสแรงดึงและอุณหภูมิการโก่งตัวจากความร้อนสูงสุด ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของชานอ้อยในฐานะวัสดุเสริมแรงจากทรัพยากรหมุนเวียนสำหรับการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบชีวภาพที่มีความแข็งเกร็งและความต้านทานต่อความร้อนเชิงกลสูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันต้นสังกัดและภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวกที่จำเป็นในการดำเนินงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] S. Huang, Q. Dong, S. Che, R. Li, and K. H. D. Tang, “Bioplastics and biodegradable plastics: A review of recent advances, feasibility and cleaner production,” *Science of The Total Environment*, vol. 969, Art. no. 178911, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178911.

[2] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Science Advances*, vol. 3, no. 7, Art. no. e1700782, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782.

[3] N. Pooja, I. Chakraborty, M. H. Rahman, and N. Mazumder, “An insight on sources and biodegradation of bioplastics: A review,” *3 Biotech*, vol. 13, no. 7, Art. no. 220, 2023. DOI: 10.1007/s13205-023-03638-4.

[4] J. Xu and B.-H. Guo, “Microbial succinic acid, its polymer poly(butylene succinate), and applications,” in *Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications*, Microbiology Monographs, vol. 14, G. G.-Q. Chen, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 347-388. DOI: 10.1007/978-3-642-03287-5_14.

[5] M. Barletta, et al., “Poly(butylene succinate) (PBS): Materials, processing, and industrial applications,” *Progress in Polymer Science*, vol. 132, Art. no.

101579, 2022. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2022.101579.

[6] M. Gigli, M. Fabbri, N. Lotti, R. Gamberini, B. Rimini, and A. Munari, "Poly(butylene succinate)-based polyesters for biomedical applications: A review," *European Polymer Journal*, vol. 75, pp. 431-460, 2016. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2016.01.016.

[7] Y. Y. Then, N. A. Ibrahim, N. Zainuddin, H. Ariffin, and W. M. Z. W. Yunus, "Oil palm mesocarp fiber as new lignocellulosic material for fabrication of polymer/fiber biocomposites," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2013, Art. no. 797452, 2013. DOI: 10.1155/2013/797452.

[8] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, and T. M. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, pp. 98-112, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.08.038.

[9] M. Jawaid and H. P. S. Abdul Khalil, "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review," *Carbohydrate Polymers*, vol. 86, no. 1, pp. 1-18, 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.04.043.

[10] T. H. Nam, S. Ogihara, H. Nakatani, S. Kobayashi, and J. I. Song, "Mechanical and thermal properties and water absorption of jute fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites," *Advanced Composite Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 241-258, 2012. DOI: 10.1080/09243046.2012.723362.

[11] Y. R. Loh, D. Sujan, M. E. Rahman, and C. A. Das, "Sugarcane bagasse — the future composite material: A literature review," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 75, pp. 14-22, 2013. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.03.002.

[12] M. A. Mahmud and F. R. Anannya, "Sugarcane bagasse — a source of cellulosic fiber for diverse applications," *Heliyon*, vol. 7, no. 8, Art. no. e07771, 2021. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07771.

[13] M. K. Zafeer, R. Prabhu, S. Rao, G. Mahesha, and K. S. Bhat, "Mechanical characteristics of sugarcane bagasse fibre reinforced polymer composites: A review," *Cogent Engineering*, vol. 10, no. 1, Art. no. 2200903, 2023. DOI: 10.1080/23311916.2023.2200903.

[14] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in Polymer Science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.

[15] M. M. Kabir, H. Wang, K. T. Lau, and F. Cardona, "Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43,

no. 7, pp. 2883-2892, 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.

[16] T. H. Nam, S. Ogihara, N. H. Tung, and S. Kobayashi, "Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 1648-1656, 2011. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.04.001.

[17] I. Elfaleh, et al., "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials," *Results in Engineering*, vol. 19, Art. no. 101271, 2023. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101271.

[18] X. Li, L. G. Tabil, and S. Panigrahi, "Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 15, no. 1, pp. 25-33, 2007. DOI: 10.1007/s10924-006-0042-3.

[19] S. Ramasamy, et al., "Processing and treatment of natural fibers as reinforcement in polylactic acid composites," *Discover Applied Sciences*, vol. 8, no. 1, Art. no. 17, 2026. DOI: 10.1007/s42452-025-07950-x.

[20] X. Yan, et al., "Crystallization and dynamic mechanical behavior of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biocomposites," *Journal of Renewable Materials*, vol. 10, no. 4, pp. 1039-1048, 2022. DOI: 10.32604/jrm.2022.017239.

[21] J. R. Araújo, W. R. Waldman, and M. A. De Paoli, "Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, no. 10, pp. 1770-1775, 2008. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.021.

[22] E. Frollini, N. Bartolucci, L. Sisti, and A. Celli, "Poly(butylene succinate) reinforced with different lignocellulosic fibers," *Industrial Crops and Products*, vol. 45, pp. 160-169, 2013. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.12.013.

[23] S. Chen, S. Li, B. Wang, C. Chen, and L. Zheng, "Preparation and performance of poly(butylene succinate) (PBS) composites reinforced with taxus residue and compatibilized with branched PBS," *Polymers*, vol. 17, no. 19, Art. no. 2597, 2025. DOI: 10.3390/polym17192597.

[24] Z. Liang, P. Pan, B. Zhu, T. Dong, and Y. Inoue, "Mechanical and thermal properties of poly(butylene succinate)/plant fiber biodegradable composite," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 115, no. 6, pp. 3559-3567, 2010. DOI: 10.1002/app.29848.

[25] P. Pei, et al., "Biocomposite optimization with NaOH-modified bagasse fiber, polybutylene succinate, and poly(lactic acid) using RSM approach," *BioResources*, vol. 18, no. 3, pp. 5683-

5702, 2023. DOI: 10.15376/biores.18.3.5683-5702.

[26] O. Platnieks, et al., "Bio-based poly(butylene succinate)/microcrystalline cellulose/nanofibrillated cellulose-based sustainable polymer composites: Thermo-mechanical and biodegradation studies," *Polymers*, vol. 12, no. 7, Art. no. 1472, 2020. DOI: 10.3390/polym12071472.

[27] N. Sgriccia, M. C. Hawley, and M. Misra, "Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 10, pp. 1632-1637, 2008. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.07.007.

[28] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 84, no. 12, pp. 2222-2234, 2002. DOI: 10.1002/app.10460.

[29] S. Rao, M. Madhushree, and K. S. Bhat, "Characteristics of surface modified sugarcane bagasse cellulose: Application of esterification and oxidation reactions," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Art. no. 24136, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-75846-8.

[30] R. Muthuraj, M. Misra, and A. K. Mohanty, "Injection molded sustainable biocomposites from poly(butylene succinate) bioplastic and perennial grass," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 3, no. 11, pp. 2767-2776, 2015. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00646.

[31] S. Yaisun and T. Trongsatitkul, "PLA-based hybrid biocomposites: Effects of fiber type, fiber content, and annealing on thermal and mechanical properties," *Polymers*, vol. 15, no. 20, Art. no. 4106, 2023. DOI: 10.3390/polym15204106.

[32] T. Tábi, T. Ageyeva, and J. G. Kovács, "Improving the ductility and heat deflection temperature of injection molded poly(lactic acid) products: A comprehensive review," *Polymer Testing*, vol. 101, Art. no. 107282, 2021. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107282.