

การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง สาकुเสริมแรงด้วยเส้นใยใบสับปะรด

ศรียุดา จันศิริ¹ จงจิตร์ หิรัญลาภ¹ สุเมธ สติตบุญอนันต์^{1*} ชัยพร สุภาหิตานุกุล¹ และโจเซฟ เคดารี²
srisuda.j@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, sumezt_k@yahoo.com¹
chaiporn.sup@gmail.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี

Received: October 30, 2024 Revised: December 10, 2024 Accepted: December 20, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการผลิตและวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล ทางความร้อน และต้นทุนวัสดุของคอมโพสิต PLA/TPS และ PLA/TPSW โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) ผลิตจากแป้งสาकुและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอรอล ขณะที่ (TPSW) ใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล ปริมาณ TPS และ TPSW ถูกกำหนดไว้ที่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนัก ผสมกับ PLA และ PALF ที่ 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, และ 10% โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า PLA/TPS มีดัชนีการหลอมไหลและความหนาแน่นสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการไหล เพื่อการขึ้นรูปที่ดีกว่าและความหนาแน่นที่เหมาะสม นอกจากนี้ PLA/TPS ยังมีการดูดซึมน้ำสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างที่เชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริกของ TPSW ขณะที่การรีโทเกรเดชันทำให้การดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากความแข็งและความเปราะที่เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลของ PLA/TPS ดีกว่า โดยการเพิ่มปริมาณ PALF ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดึงและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการกระจายแรงที่ดีขึ้น ในขณะที่ PLA/TPSW แสดงการปรับปรุงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายของเส้นใยไม่สม่ำเสมอและการตกผลึกซ้ำซ้อน แม้ว่า PALF ที่เพิ่มขึ้นจะลดความแข็งแรงดึงในทั้งสองคอมโพสิต แต่การลดลงใน PLA/TPSW ชัดเจนกว่า การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (SEM) ชี้ให้เห็นถึงปัญหาในการยึดเกาะและการกระจายตัวของเส้นใยที่ไม่ดี ส่งผลให้เกิดปัญหา Fiber pull-out ในสมบัติทางความร้อน การเติม PALF 10% ใน PLA/TPSW ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการตกผลึก (Tc) และเปอร์เซ็นต์การตกผลึก (% Crystallization) ในขณะที่ PLA/TPS มีผลน้อยกว่า โดยรวม PLA/TPS แสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่า โดยเฉพาะในตัวอย่างที่มีการเติม PALF 10 %wt เมื่อ PLA/TPS:PALF (10%) ถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ จะมีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด ทำให้เหมาะสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์ โดยมีอุณหภูมิการใช้งานสูงสุดไม่เกิน 50 °C

คำสำคัญ: เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เส้นใยใบสับปะรด กรดโพลิแลคติก การเสริมแรงวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ สมบัติทางกายภาพทางกลและทางความร้อน

Development of bio-composite material from polylactic acid blended with thermoplastic from sago starch and reinforced with pineapple leaf fiber

Srisuda Junsiri¹, Jongjit Hirunlabh¹, Sumate Sathibunanan^{1*}, Chaiporn Supahitanukul¹,
and Joseph Khedari²

srisuda.j@ptu.ac.th¹, jongjit.hirunlabh@hotmail.com^{1*}, sumezt_k@yahoo.com¹
chaiporn.sup@gmail.com¹, joseph.khedari@hotmail.com²

¹Faculty of Engineering and Technology, Pathumthani University

²Faculty of Science and Technology, Bangkokthonburi University

Received: October 30, 2024 Revised: December 10, 2024 Accepted: December 20, 2024

Abstract

This study analyzes the effects of pineapple leaf fiber (PALF) content on the physical, mechanical, and thermal properties of PLA/TPS and PLA/TPSW composites and material cost. Thermoplastic starch (TPS) is derived from sago starch with glycerol as a plasticizer, while TPSW incorporates water with glycerol. The proportions of TPS and TPSW were set at 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight, combined with PLA and PALF at 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10% by weight. Results show that PLA/TPS exhibits higher melt flow index and density, indicating better flowability and suitable density. Additionally, PLA/TPS has slightly higher water absorption due to the cross-linked structure of TPSW, while retrogradation reduces water absorption due to increased rigidity and brittleness. The mechanical properties of PLA/TPS are higher with increased PALF content. This significantly enhances resistance to bending and impact due to improved stress distribution, while PLA/TPSW shows minor improvements because of uneven fiber distribution and recrystallization. Increased PALF content reduces tensile strength in both composites. This reduction is more pronounced in PLA/TPSW, as SEM analysis indicates poor adhesion and fiber distribution leading to fiber pull-out. In thermal properties, adding 10% PALF to PLA/TPSW enhances crystallization temperature (T_c) and crystallinity percentage, with lesser effects observed in PLA/TPS. Finally, PLA/TPS demonstrates better physical and mechanical properties, especially with 10% PALF and exhibits the lowest material costs, PLA/TPS composite at PALF (10%) can be molded via injection machine into cups, making it suitable for commercial development with a maximum service temperature not exceeding 50 degrees Celsius.

Keywords: Thermoplastic starch, Pineapple leaf fiber, Polylactic acid, Reinforced biocomposites, Physical mechanical and thermal properties.

1. บทนำ

การใช้พลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลต ในการผลิตบรรจุภัณฑ์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการจากอุตสาหกรรมและผู้บริโภค [1] ส่งผลให้เกิดปริมาณขยะพลาสติกมหาศาลที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง ขยะพลาสติกเหล่านี้ใช้เวลาย่อยสลายกว่า 450 ปี ทำให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ และการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาพลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติได้รับการส่งเสริมเพื่อบรรเทาปัญหานี้ แม้ว่าต้นทุนการผลิตจะยังสูงอยู่ก็ตาม [2]

พอลิแลกติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ เช่น แป้งหรือกรดแลคติก มีสมบัติการย่อยสลายตามธรรมชาติ [3] กระบวนการผลิตเริ่มจากการสกัดแป้งจากวัสดุต่าง ๆ เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด หรืออ้อย เพื่อผลิตกรดแลคติก โดยหมักด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จากนั้นกรดแลคติกจะถูกพอลิเมอไรเซชันแบบพอลิคอนเดนเซชันเพื่อสร้าง PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง [4] เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ (TPS) เป็นวัสดุที่ได้จากแป้งซึ่งหลอมขึ้นรูปได้เมื่อถูกความร้อน จึงเป็นวัสดุชีวภาพทางเลือกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] แป้งดิบมีข้อจำกัดในการใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติก เนื่องจากมีโครงสร้างที่มีพันธะไฮโดรเจนและความเป็นผลึกสูง ทำให้หลอมขึ้นรูปยากเพื่อแก้ไขปัญหานี้ TPS ผลิตจากแป้งธรรมชาติที่ผ่านการแปรสภาพด้วยพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ซึ่งช่วยลดความเป็นผลึกและทำให้หลอมได้ง่ายขึ้น [6] เส้นใยสับปะรด (Pineapple Fiber) เป็นวัสดุธรรมชาติที่สกัดจากใบของต้นสับปะรด ซึ่งมีสมบัติทางกลที่โดดเด่น โดยมีค่าความแข็งแรง (Tensile Strength) อยู่ในช่วง 200-600 MPa ความยืดหยุ่น (Elasticity) ระหว่าง 3.5-5.5 GPa และมีความหนาแน่น (Density) ประมาณ 1.3-1.5 g/cm³ [7] วัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (Bicomposite Materials) คือวัสดุที่ประกอบจากวัสดุชีวภาพ โดยมีวัสดุฐานเป็น

พลาสติกชีวภาพ เช่น พอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หรือเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และวัสดุเสริมแรงจากเส้นใยธรรมชาติ เช่น เส้นใยสับปะรด [8] เส้นใยปอ หรือเส้นใยผักตบชวา ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน การรวมกันนี้ทำให้วัสดุคอมโพสิตชีวภาพมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น และช่วยลดการใช้วัสดุจากปิโตรเคมีและปัญหาขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใยสับปะรดต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ รวมถึงต้นทุนทางวัสดุ โดยมีเป้าหมายในการลดต้นทุนของ PLA ผ่านการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาเรซและเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาเรซนี้ผลิตจากการพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) ของแป้งโดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) และน้ำ พร้อมการตัดแปลงโครงสร้างแป้งแบบเชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริก

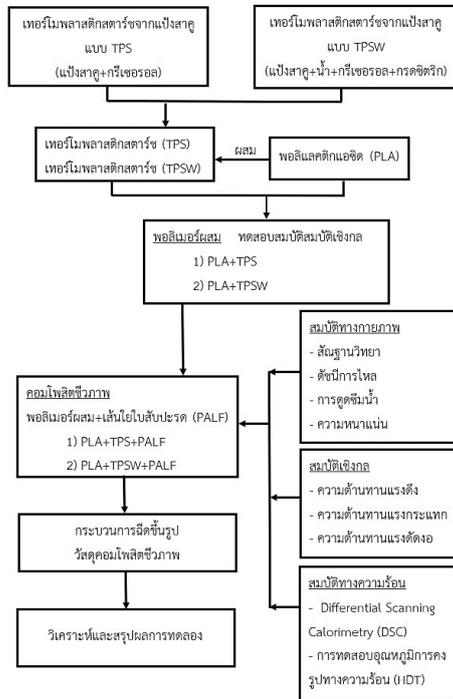
2. ระเบียบวิธีวิจัย

ศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA/TPS และ PLA/TPSW โดยเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ ซึ่งผลิตจากแป้งสาคูและใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในขณะที่ TPSW จะใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล เพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ ปริมาณ TPS และ TPSW ถูกกำหนดไว้ที่ 0%, 5%, 10%, 15%, และ 20% โดยน้ำหนัก โดยจะถูกผสมกับ PLA และเส้นใยสับปะรด (PALF) ที่มีปริมาณ 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, และ 10% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการตัดแปลงโครงสร้างแป้งแบบเชื่อมขวาง (Cross-link) ด้วยกรดซิตริกของ TPSW เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของปริมาณเส้นใย PALF ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกลทางความร้อน และศึกษาต้นทุนวัสดุของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ

2.1 ขั้นตอนการวิจัย

2.1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัย



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1.2 วัสดุและสารเคมี

การศึกษาใช้แป้งสาธูจากวิสาหกิจชุมชน สาธูบ้านกะโสม จังหวัดนครศรีธรรมราช PLA รุ่น 3251D จาก Nature Work LLC (USA) และเส้นใยใบสับปะรด (PALF) จากวิสาหกิจชุมชนบ้านคา จังหวัดราชบุรี สารเคมีที่ใช้ได้แก่กลีเซอรอลจาก Fisher Scientific UK Ltd. ($\geq 99\%$ AR grade) น้ำกลั่นจาก RCI Labscan Ltd. โซเดียมไฮดรอกไซด์จาก LOBA Chemie PVT Ltd. (98% AR grade) กรดไฮโดรคลอริกจาก LOBA Chemie PVT Ltd. (35.4% AR grade) และกรดซิติริกจาก Quality Reagent Chemical นิวซีแลนด์ (99.5% AR grade)

2.1.3 ขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช แบบ (TPS)

การเตรียม TPS จากแป้งสาธูใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยเริ่มอบแป้งที่ 60 °C เวลา 24 hr ผสมแป้ง 70 g กับกลีเซอรอล 30 g ที่ 250 r/min นาน 5 min แล้วเก็บในโถดูดความชื้น

24 hr หลังจากนั้นบดด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้งที่ 120 °C เป็นเวลา 2 min ก่อนขึ้นรูปด้วยการขึ้นรูปแบบอัดที่อุณหภูมิ 120 °C แรงดัน 60 ton นาน 1 min ระบายความร้อน 30 s และบดให้มีขนาด 1-3 mm แล้วเก็บในถุง PE

2.1.4 ขั้นตอนการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช แบบ (TPW)

การเตรียม TPSW ใช้วิธี Cross Link โดยผสมแป้งสาธู 10 g กับน้ำ 100 g ในชามสแตนเลส ตั้งในอ่างน้ำร้อนที่ 90 °C เวลา 15 min เติมกรดซิติริก 10% โดยน้ำหนักแป้ง ที่ 90 °C เป็นเวลา 20 min ปรับ pH เป็นต่างด้วย 1 M (NaOH) จนค่า pH เท่ากับ 11 เติมกลีเซอรอล 30% ที่ 90 °C เวลา 10 min ปรับ pH เป็นกลางด้วย 1 M (HCl) เเทลงในแม่พิมพ์ อบที่ 80 °C เวลา 24 hr บดลดขนาด 1-3 mm และเก็บในถุง PE

2.1.5 ขั้นตอนการผลิตพอลิเมอร์ผสมของ PLA/TPS และ PLA/TPSW

การผลิตพอลิเมอร์ผสม PLA กับ TPS และ TPSW ใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 เริ่มจากอบ PLA TPS และ TPSW ที่ 70 °C เป็นเวลา 4 hr จากนั้นผสมที่อุณหภูมิ 160-180 °C ด้วยความเร็ว r/min เป็นเวลา 2.5 min โดยมี TPS และ TPSW ในอัตราส่วน 5% 10% 15% และ 20% โดยน้ำหนัก แล้วฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบ

2.1.6 ขั้นตอนการผลิตวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ

การผลิตวัสดุคอมโพสิตชีวภาพเริ่มด้วยการอบ PLA, TPS, TPSW ที่ 70 °C และ PALF ที่ 80 °C เป็นเวลา 4 hr จากนั้นผสมแห้ง PLA/TPS และ PLA/TPSW กับ PALF ในสัดส่วน 0-10 %wt ด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติกแบบเหวี่ยงที่ 60 r/min นาน 5 min แล้วนำไปผสมในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่ 160-180 °C เป็นเวลา 2.5 min คอมปาวด์ที่ได้ถูกรีดและตัดเป็นชิ้นเล็ก 1-2 mm ก่อนนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ที่ 160-180 °C ความเร็วฉีด 50 cm³/min แรงดัน 700 bar ส่วนผสมแสดงในตารางที่ 1

2.2 ขั้นตอนวิเคราะห์ทดสอบ

2.2.1 การทดสอบสัณฐานวิทยา

การทดสอบสัณฐานวิทยาตามมาตรฐาน ISO 16700:2016 เริ่มด้วยการตัดตัวอย่างขนาด $120 \times 10 \times 4$ mm แช่ไนโตรเจนเหลว ติดบนแผ่นคาร์บอน และเคลือบทองคำในสุญญากาศ 20-30 min จากนั้นวิเคราะห์ด้วย SEM ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410 LV ที่การขยาย 350 และ 1,000 เท่า ที่แรงดันไฟฟ้า 10 kV

2.2.2 การทดสอบดัชนีการไหล

การทดสอบดัชนีการไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 เริ่มจากบดชิ้นงานเป็นผงและชั่งน้ำหนัก 8 g ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบ ใส่ die, piston และตัวอย่าง ควบคุมเวลาใส่ 1 min รอ preheat 4-6 min ใส่ตุ้มน้ำหนักบน piston ให้พลาสติกไหลจาก die เป็นเวลา 10 s พักชิ้นงาน 30 min แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณ MFI

2.2.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำตามมาตรฐาน ASTM D570 ประเมินความสามารถในการดูดซึมน้ำของพลาสติก โดยเริ่มจากการอบชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 24 hr แล้วชั่งน้ำหนักก่อนการดูดซึมน้ำ จากนั้นแช่ชิ้นทดสอบในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 hr หลังจากนั้นนำชิ้นจากน้ำและเช็ดให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักหลังการดูดซึมน้ำ

2.2.4 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM D792 เริ่มจากการผลิตชิ้นงานสี่เหลี่ยมหนา 4 mm น้ำหนัก 12-13 g ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานในอากาศ และจุ่มในน้ำกลั่น บันทึกน้ำหนักขณะอยู่ในน้ำ และคำนวณความถ่วงจำเพาะเพื่อหาค่าความหนาแน่น

2.2.5 การทดสอบความทนแรงดึง

การทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 527 ใช้เครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานดัมเบลล์ขนาด $10 \times 170 \times 4$ mm ตั้งค่าทดสอบที่ความยาวอ้างอิง 50 mm และความเร็ว 5

mm/min ใช้เครื่อง UTM รุ่น Hounsfield H50KS บันทึกความเค้น-ความเครียด และพล็อตกราฟเพื่อคำนวณ Young's modulus และ % Elongation at break

2.2.6 การทดสอบความทนแรง

กระแทก

การทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ISO 180 ใช้เครื่อง Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานขนาด $10 \times 80 \times 4$ mm จากนั้นบากตัววี 45° และพักที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมงก่อนทดสอบด้วยเครื่อง Izod Impact Tester รุ่น CEST 6542 โดยปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระทบและบันทึกค่าพลังงานเพื่อคำนวณความทนแรงกระแทก

2.2.7 การทดสอบความทนแรง

ดัดงอ

การทดสอบความทนแรงดัดตามมาตรฐาน ISO 179 Type 1 ใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป Sodick-Plustech รุ่น TR80EH2 ผลิตชิ้นงานขนาด $12.7 \times 63.5 \times 3.17$ mm จากนั้นใช้เครื่อง UTM รุ่น Hounsfield H50KS โดยกดแรงที่จุดกึ่งกลาง และจุดรองรับห่างจากกึ่งกลาง 16 เท่าของความหนา ทดสอบจนแตกหักหรือเปลี่ยนรูป บันทึกข้อมูล

2.2.8 การทดสอบ DSC

การทดสอบสมบัติทางความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D3418 ใช้ประเมินจุดหลอมเหลว (T_m) และสมบัติการตกผลึกของ PLA และคอมโพสิตชีวภาพโดยใช้ถาดอะลูมิเนียมสำหรับ ตัวอย่างและอ้างอิง ให้ความร้อนที่อัตรา 20 °C/min เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงความร้อนและระบุ T_m , T_g และสมบัติการตกผลึก

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของคอมโพสิตชีวภาพ PLA/TPS: PALF และ PLA/TPSW: PALF

สูตร	อัตราส่วนผสม (%wt)	รหัสตัวอย่าง	พอลิแลกติกแอซิด (%wt)	เทอร์โมพลาสติกสตาติค (%wt)				เส้นใยใบสับปะรด (PALF) (%wt)
				แป้งสาเก	กลีเซอรอล	น้ำ	กรดซิตริก	
PLA	100	A	100.00	-	-	-	-	-
TPS	100	B	-	70.00	30.00	-	-	-
TPSW	100	C	-	8.77	2.63	87.72	0.88	-
PLA/TPS: PALF	100 : 0	D2-0	90.00	7.69	2.31	-	-	0
	98 : 2	D2-2	88.20	7.54	2.26	-	-	2
	96 : 4	D2-4	86.40	7.38	2.22	-	-	4
	94 : 6	D2-6	84.60	7.23	2.17	-	-	6
	92 : 8	D2-8	82.80	7.08	2.12	-	-	8
	90 : 10	D2-10	81.00	6.92	2.08	-	-	10
PLA/TPSW: PALF	100 : 0	E2-0	90.00	0.88	0.26	8.77	0.09	0
	98 : 2	E2-2	88.20	0.86	0.26	8.60	0.09	2
	96 : 4	E2-4	86.40	0.84	0.25	8.42	0.08	4
	94 : 6	E2-6	84.60	0.82	0.25	8.25	0.08	6
	92 : 8	E2-8	82.80	0.81	0.24	8.07	0.08	8
	90 : 10	E2-10	81.00	0.79	0.24	7.89	0.08	10

2.2.9 การทดสอบ HDT

การทดสอบ HDT ตาม ASTM D648-01 ใช้ชิ้นงานขนาด 127 × 13 × 3 mm และเครื่อง HDT แบบดัดงอ 3 จุดควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำมันซิลิโคน โดยตั้งอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 2 °C/min และใช้ความดัน 0.455 MPa หรือ 1.82 MPa ขึ้นอยู่กับประเภทการทดสอบ จากนั้นบันทึกอุณหภูมิเมื่อชิ้นงานโก่งตัว 0.25 mm เพื่อประเมินสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

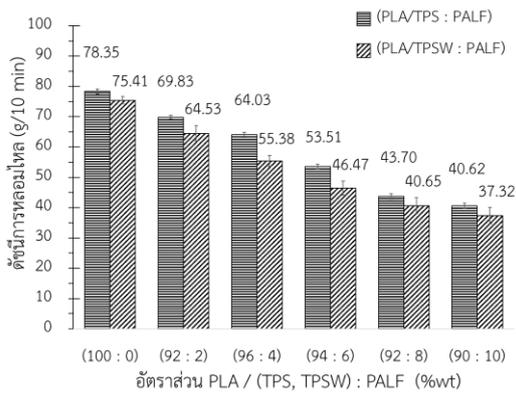
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพบว่า ความต้านทานแรงดึงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดย PLA บริสุทธิ์ (รหัส A) มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 52.35 MPa ขณะที่ TPS (รหัส B) และ TPSW (รหัส C) อยู่ที่ 28.14 MPa และ 24.32 MPa ตามลำดับ ในอัตราส่วน PLA/TPS 80:20 (รหัส D4) และ PLA/TPSW 80:20 (รหัส E4) ความต้านทานแรงดึงลดลงเหลือ 30.59 MPa และ 34.39 MPa เนื่องจาก

การไม่เข้ากันระหว่างเฟส ส่วนอัตราส่วน 90:10 ของ PLA/TPS (รหัส D2) มีความต้านทาน 45.56 MPa และ PLA/TPSW (รหัส E2) มีความต้านทาน 39.98 MPa สูงกว่าค่าเฉลี่ยของ TPSW บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วน 90:10 เพื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด 0-10% PALF

3.1 ผลการทดสอบดัชนีการหลอมไหล

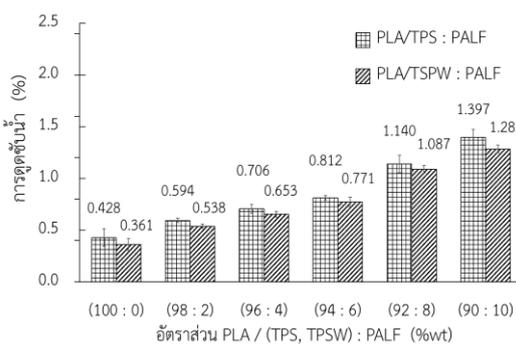
การเติมเส้นใยสับปะรด (PALF) ทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) ของ PLA/TPS และ PLA/TPSW ลดลง เนื่องจากเส้นใยเพิ่มความหนืดโดยไปขัดขวางการไหลและทำให้การเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ยากขึ้น ค่า MFI ของ PLA/TPS ลดจาก 78.35 g/10 min (D2-0) เป็น 40.62 g/10 min (D2-10) และ PLA/TPSW ลดจาก 75.41 g/10 min (E2-0) เป็น 37.32 g/10 min (E2-10) การลดลงมากขึ้นใน PLA/TPSW เกิดจากโครงสร้างที่แข็งและหนาแน่นของ TPSW ขัดขวางการกระจายตัวของเส้นใย PALF นอกจากนี้ การลดค่า MFI ช่วยเพิ่มเวลาการตกผลึก



รูปที่ 2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหลของคอมโพสิต

3.2 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ

การเพิ่มปริมาณเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) ทำให้ PLA/TPS และ PLA/TPSW ดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น โดย PLA/TPS ดูดซับน้ำมากกว่า PLA/TPSW ในทุกตัวอย่าง ตัวอย่าง D2-0 เริ่มที่ 0.428% และเพิ่มเป็น 1.397% ใน D2-10 ส่วน E2-0 เริ่มที่ 0.361% และเพิ่มเป็น 1.283% ใน E2-10 การดูดซับน้ำเกิดจากโครงสร้างรูพรุนและหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเส้นใย PLA/TPSW ดูดซับน้ำน้อยลงจากกระบวนการรีโทรเกรดชันของแป้ง ซึ่งทำให้โครงสร้างเม็ดแป้งแข็งและหนาแน่นขึ้น อัตราการดูดซับน้ำของ PLA/TPS ที่มี PALF 10 %wt ยังคงอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ไม่เกิน 2.0 %



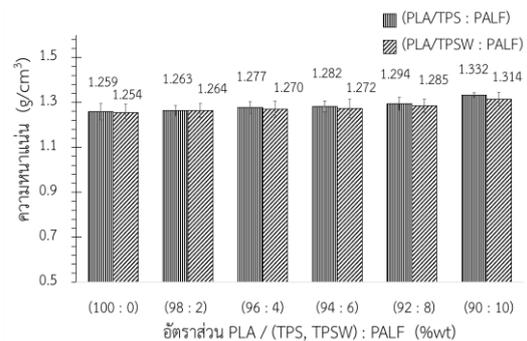
รูปที่ 3 การทดสอบการดูดซับน้ำของคอมโพสิต

3.3 ผลการทดสอบความหนาแน่น

PLA/TPS และ PLA/TPSW ที่ไม่มีการเติมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันที่ 1.256 g/cm³ และ 1.254 g/cm³ ตามลำดับ

โดย PLA/TPS มีความหนาแน่นสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากไม่มีการเกิดรีโทรเกรดชัน ใน TPS ซึ่งช่วยให้โครงสร้างวัสดุมีความสม่ำเสมอ ขณะที่ PLA/TPSW ที่ผ่านกระบวนการรีโทรเกรดชัน ที่มีการจัดเรียงโมเลกุลแป้งใหม่ ส่งผลให้โครงสร้างแข็งและเปราะมากขึ้น จึงมีความหนาแน่นลดลงเล็กน้อย

การเติมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (PALF) ที่มีความหนาแน่นประมาณ 1.5 g/cm³ ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุคอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ใน PLA/TPS ความหนาแน่นเพิ่มจาก 1.259 g/cm³ (D2-0) เป็น 1.332 g/cm³ (D2-10) และใน PLA/TPSW จาก 1.254 g/cm³ (E2-0) เป็น 1.314 g/cm³ (E2-10) การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจาก PALF ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น โดย PLA/TPS ที่ผสม PALF 10 %wt มีความหนาแน่นสูงสุดตามที่แสดงในรูปที่ 4



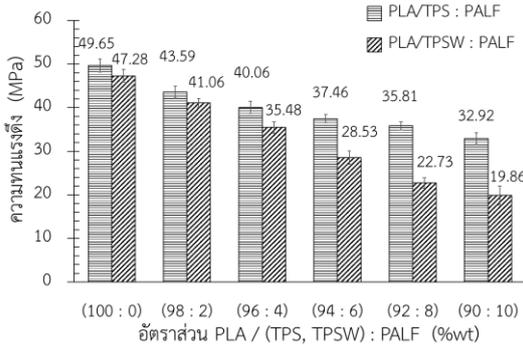
รูปที่ 4 การทดสอบความหนาแน่นของคอมโพสิต

3.4 ผลการทดสอบความทนแรงดึง

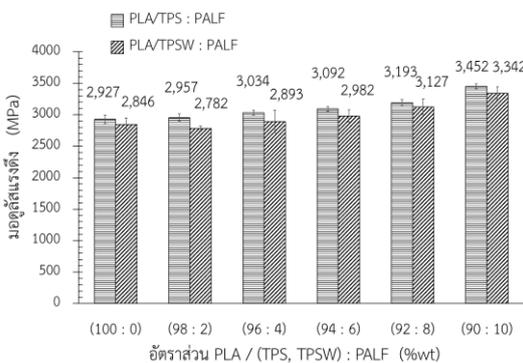
PLA/TPS มีความทนต่อแรงดึงสูงกว่า PLA/TPSW ที่ 49.65 MPa และ 47.28 MPa ตามลำดับ เนื่องจากกลีเซอรอลใน TPS ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและการยึดเกาะกับ PLA ส่วน TPSW เกิดรีโทรเกรดชันทำให้วัสดุแข็งและเปราะ [10] การเพิ่ม PALF 10 %wt. ใน PLA/TPS ลดค่าความทนแรงดึงจาก 49.65 MPa เป็น 32.92 MPa เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์และเส้นใยไม่ดี ผลการวิเคราะห์ SEM ยืนยันการกระจายตัวและการหลุดของเส้นใยเป็นสาเหตุหลัก [11] สำหรับ PLA/TPSW (E2-10) ที่มีการ

เติม PALF 10 %wt ค่าโมดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 3,342 MPa แสดงให้เห็นว่าเส้นใยช่วยเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ อย่างไรก็ตาม PLA/TPSW ยังคงมีค่าโมดูลัสต่ำกว่า PLA/TPS ที่ผสม PALF เนื่องจากการเกิดริโพรเกรเดชันในแป้งและการตกผลึกซ้ำใน TPSW ทำให้วัสดุแข็งและเปราะมากขึ้น แสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6

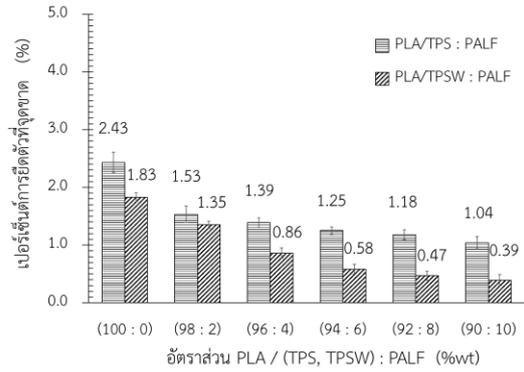
การวิเคราะห์การยึดตัวที่จุดขาดพบว่า PLA/TPS (D2-0) มีค่าการยึดตัว 2.43% สูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) ที่ 1.83% ความยืดหยุ่นดึกกว่าของ PLA/TPS เกิดจากการเจลาติไนซ์ การเพิ่ม PALF 10% โดยน้ำหนักใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ทำให้ค่าการยึดตัวลดลงเหลือ 1.04% และ 0.39% ตามลำดับในรูปที่ 7 เนื่องจาสมบัติการยึดตัวต่ำของ PALF และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ การวิเคราะห์ SEM ยืนยันถึงปัญหาการกระจายตัวและการหลุดของเส้นใย ซึ่งลดประสิทธิภาพการเชื่อมต่อทางกลของวัสดุ ในรูปที่ 8



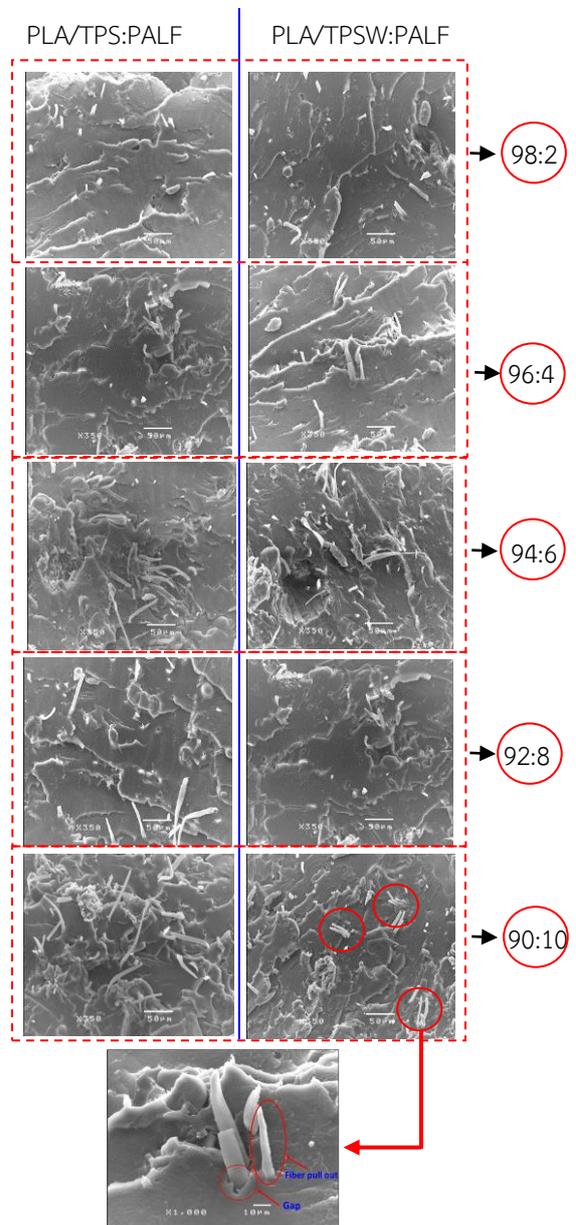
รูปที่ 5 ค่าความทนแรงดึงของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 6 โมดูลัสแรงดึงของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่จุดขาดของคอมโพสิตชีวภาพ

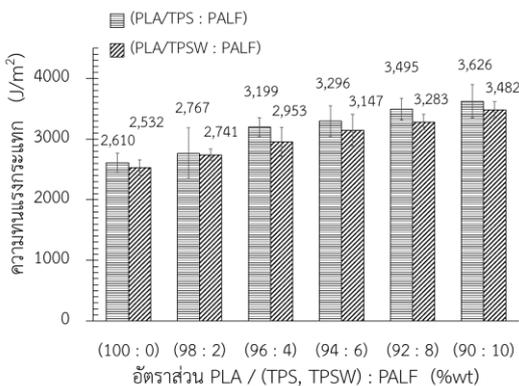


รูปที่ 8 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (SEM)

3.5 ผลการทดสอบความทนแรงกระแทก

PLA/TPS (D2-0) มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) โดยมีค่าความทนแรงกระแทก (Impact Strength) 2,610 J/m² และ 2,532 J/m² ตามลำดับ เนื่องจาก TPSW มีการใช้ทั้งน้ำและกลีเซอร์อลทำให้เกิดการตกผลึกช้าและวัสดุมีความแข็งและเปราะมากขึ้น ส่งผลให้การกระจายตัวของ TPSW ใน PLA ไม่ดีเท่า TPS ที่ใช้กลีเซอร์อลอย่างเดียว

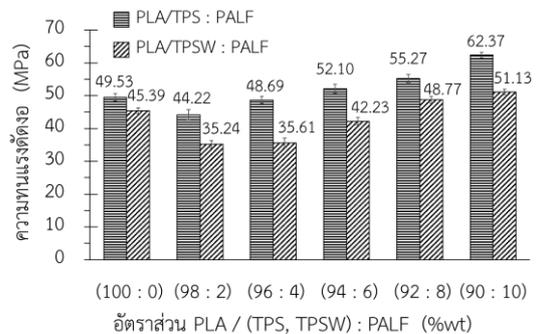
การเพิ่มปริมาณเส้นใยไบสับปะรด (PALF) 10 %wt ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ส่งผลให้ค่า Impact Strength ของทั้งสองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย PLA/TPS ที่มี PALF (D2-10) เพิ่มขึ้นเป็น 3,626 J/m² ขณะที่ PLA/TPSW ที่มี PALF (E2-10) เพิ่มขึ้นเป็น 3,482 J/m² การเพิ่ม PALF ช่วยให้วัสดุทนทานต่อแรงกระแทกดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยดูดซับและกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงป้องกันการแพร่กระจายของรอยแตกในคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม การเพิ่มค่า Impact Strength ใน PLA/TPSW ยังคงต่ำกว่า PLA/TPS เนื่องจากเจลาตินในเซชัน ใน TPSW ทำให้วัสดุแข็งและเปราะมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกระจายแรงและการดูดซับแรงกระแทกลดลง แม้จะมีการเติมเส้นใย เพื่อเพิ่มการเชื่อมต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ PLA/TPS ที่ผสม PALF 10 %wt มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงสุด [12] แสดงในรูปที่ 9



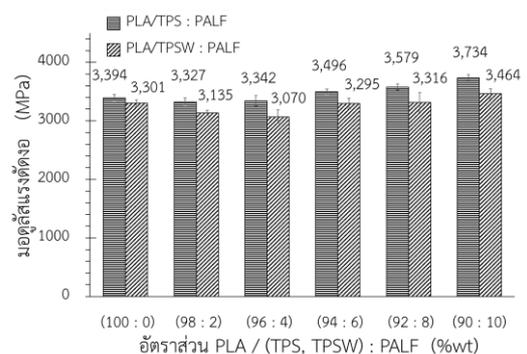
รูปที่ 9 ค่าความทนแรงกระแทกของคอมโพสิตชีวภาพ

3.6 ผลการทดสอบความทนแรงดัดงอ

PLA/TPS (D2-0) มีค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus สูงกว่า PLA/TPSW (E2-0) เนื่องจาก TPS กระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับ PLA ขณะที่ TPSW เกิดริโทเกรเดชันทำให้แปงตกผลึกและวัสดุเปราะมากขึ้น การเพิ่มเส้นใยสับปะรด (PALF) 10 %wt ใน PLA/TPS (D2-10) ทำให้ค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 62.37 MPa และ 3,734 MPa ตามลำดับ เนื่องจาก PALF ช่วยถ่ายเทแรงและป้องกันการแตกหัก ส่วน PLA/TPSW (E2-10) มีค่า Flexural Strength และ Flexural Modulus เพิ่มขึ้นเป็น 51.08 MPa และ 3,464 MPa แต่ยังคงต่ำกว่า PLA/TPS เนื่องจากกระบวนการริโทเกรเดชันในแปง ที่ทำให้วัสดุเปราะและการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่ไม่สม่ำเสมอ การศึกษา SEM พบว่าการจัดเรียงตัวของเส้นใย PALF ใน PLA/TPS สอดคล้องกับทิศทางการรับแรงดัดงอ ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงดัดงอและทำให้ PLA/TPS ทนทานกว่าวัสดุ PLA/TPSW แสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ค่าความทนแรงดัดงอของคอมโพสิตชีวภาพ



รูปที่ 11 ค่ามอดูลัสแรงดัดงอของคอมโพสิตชีวภาพ

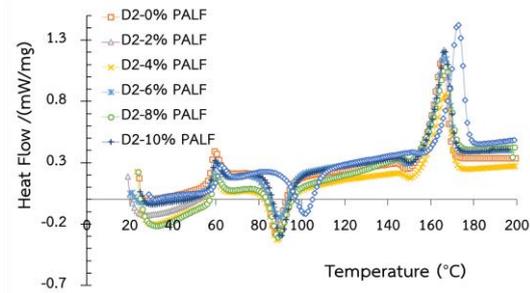
3.7 ผลการทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

การศึกษาผลกระทบของ TPS และ TPSW ที่ผสมกับ PLA แสดงให้เห็นความแตกต่างในสมบัติของวัสดุ โดย PLA/TPSW (E2-0) มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity) สูงกว่า PLA/TPS (D2-0) ที่ 16.77% และ 18.02% ตามลำดับ แม้อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Tc และ Tm) ของ PLA/TPS จะสูงกว่า โดยค่า Tc และ Tm ของ PLA/TPS (D2-0) คือ 83.40 °C และ 167.20 °C ขณะที่ PLA/TPSW (E2-0) คือ 82.27 °C และ 165.10 °C การเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้จากน้ำใน TPSW ทำหน้าที่เป็น nucleating agent ช่วยกระตุ้นกระบวนการตกผลึก

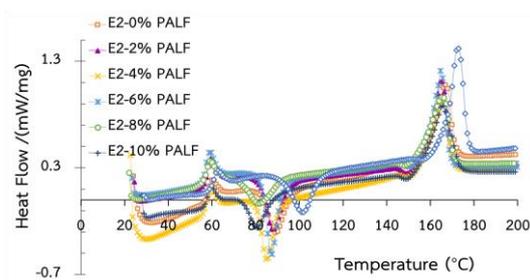
ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงแก้ว (Tg) ใน PLA/TPS และ PLA/TPSW ค่อนข้างคงที่ โดยใน PLA/TPS ค่า Tg ลดลงจาก 58.20 °C ใน D2-0 เป็น 58.00 °C ใน D2-2 ขณะที่ PLA/TPSW ลดลงจาก 57.70 °C ใน E2-0 เป็น 57.10 °C ใน E2-2 แสดงว่าเส้นใย PALF ไม่มีผลกระทบต่อ Tg แต่ช่วยเพิ่มความเคลื่อนไหวของโมเลกุลพอลิเมอร์

อุณหภูมิการตกผลึก (Tc) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย PLA/TPS ค่า Tc เพิ่มขึ้นจาก 85.40 °C ใน D2-0 เป็น 90 °C ใน D2-10 และ PLA/TPSW ค่า Tc เพิ่มขึ้นจาก 82.27 °C ใน E2-0 เป็น 89.20 °C ใน E2-10 การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากเส้นใย PALF ที่ทำหน้าที่เป็น nucleating agent ช่วยเร่งกระบวนการตกผลึก

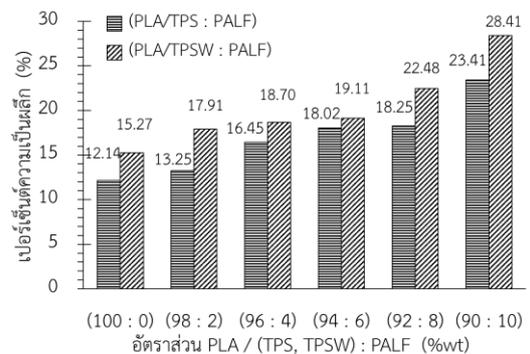
อุณหภูมิลดลงเล็กน้อย (Tm) ของ PLA/TPS ลดลงเล็กน้อยจาก 167.20°C ใน D2-0 เป็น 166.40°C ใน D2-10 ขณะที่ PLA/TPSW คงที่ที่ประมาณ 165.60°C แสดงให้เห็นว่าเส้นใย PALF ไม่มีผลต่อการลดอุณหภูมิของวัสดุ ค่า % Crystallinity ของ PLA/TPS เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยลดลงก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ในทางกลับกัน PLA/TPSW แสดงการตกผลึกที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบขึ้นของโมเลกุลพอลิเมอร์จากการเติม PALF การวิเคราะห์ DSC แสดงในรูปที่ 12-14



รูปที่ 12 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงค่า Tg, Tc และ Tm ของระบบ PLA/TPS:PALF



รูปที่ 13 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงค่า Tg, Tc และ Tm ของระบบ PLA/TPSW:PALF

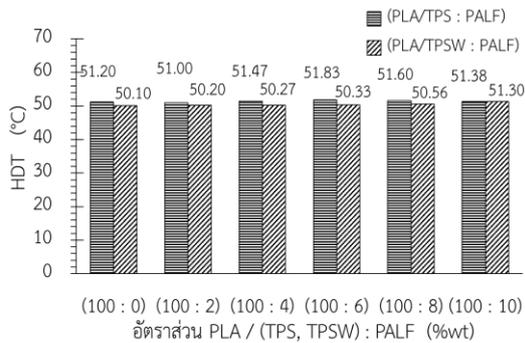


รูปที่ 14 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของคอมโพสิตชีวภาพ

3.8 ผลการทดสอบ Heat Distortion Temperature (HDT)

ผลการทดลองพบว่าค่าความทนความร้อนสูงสุด (HDT) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) บริสุทธิ์อยู่ที่ 53.73 °C การเติมเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ (TPS) และเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่ใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ (TPSW) พร้อมกับการเพิ่มเส้นใยไบสัปเกรด (PALF) ทำให้ค่า HDT เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 50.10 °C

ถึง 51.83 °C โดยความแตกต่างระหว่างตัวอย่างที่มีและไม่มีเส้นใยมีนัยสำคัญน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า TPS, TPSW และปริมาณเส้นใย PALF ไม่มีผลกระทบต่อค่า HDT อย่างมีนัยสำคัญ[12] แสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 การวิเคราะห์ HDT ของคอมโพสิตชีวภาพ

4. การศึกษาต้นทุนการผลิตถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตถ้วยคอมโพสิตชีวภาพจากราคาจำหน่ายวัตถุดิบ พบว่า PLA มีราคา 175 THB/kg แป้งสาคุ 20 THB/kg กลีเซอรอล 32 THB/kg น้ำกลั่น 18 THB/kg กรดซิตริก 42 THB/kg และเศษเส้นใยใบสับปะรด 17 THB/kg

จากอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 1 สำหรับการผลิต PLA 100% ต้นทุนรวมวัตถุดิบอยู่ที่ 99.0 บาทต่อ 10 ชิ้น ขณะที่ PLA/TPS และ PLA/TPSW อยู่ที่ 84.0 THB และ 85.0 THB ตามลำดับ

การใช้ไฟฟ้าสำหรับ PLA (100 %wt.) คือ 10.25 kWh, PLA/TPS (90:10 %wt.) 11.3 kWh, และ PLA/TPSW (90:10 %wt.) 12 kWh ซึ่งมีต้นทุนไฟฟ้าที่ 43 THB, 47 THB, และ 50 THB ตามลำดับ

ต้นทุนค่าแรงงานสำหรับ PLA (100 %wt.) อยู่ที่ 23 THB, PLA/TPS (90:10 %wt.) 27 THB, และ PLA/TPSW (90:10 %wt.) 47 Baht การวิเคราะห์ต้นทุนรวมการผลิตต่อ 10 ชิ้น พบว่า PLA 100% มีต้นทุนรวมสูงสุดที่ 165 THB, PLA/TPS (90:10) ที่ 158 THB, และ PLA/TPSW (90:10) สูงสุดที่ 182 THB โดย PLA/TPS (90:10) มีต้นทุนต่ำที่สุดต่อชิ้นที่ 15.8 THB ขณะที่ PLA/TPSW (90:10) มีต้นทุนสูงสุดที่ 18.2 THB เนื่องจากการใช้วัสดุเสริม

และกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนกว่า ถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ แสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ถ้วยคอมโพสิตชีวภาพ PLA/TPS 10% PALF

5. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลของปริมาณเส้นใยใบสับปะรด (PALF) ต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางความร้อนของคอมโพสิต PLA/TPS และ PLA/TPSW โดย TPS ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และ TPSW ใช้น้ำร่วมกับกลีเซอรอล พบว่า PLA/TPS มีดัชนีการหลอมไหล (MFI) 78.35 g/10 min และความหนาแน่น 1.256 g/cm³ ในขณะที่ PLA/TPSW มี MFI 75.41 g/10 min และความหนาแน่น 1.254 g/cm³ PLA/TPS มีการดูดซึมน้ำสูงกว่า เนื่องจาก TPSW แข็งและเปราะจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน แต่ทั้งสองสูตรยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือไม่เกิน 2.0%

ในด้านสมบัติเชิงกล PLA/TPS มีความทนแรงดึง 49.65 MPa และความทนแรงกระแทก 2,610 J/m² สูงกว่า PLA/TPSW ที่ 47.28 MPa และ 2,532 J/m² ตามลำดับ ความทนต่อแรงดัดงอของ PLA/TPS เพิ่มขึ้นจาก 49.53 MPa เป็น 62.37 MPa เมื่อเพิ่ม PALF ในขณะที่ PLA/TPSW เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 45.38 MPa เป็น 51.08 MPa การเติม PALF ลดค่าความทนแรงดึงในทั้งสองคอมโพสิต โดย PLA/TPSW มีการลดลงที่ชัดเจนกว่า

สำหรับสมบัติทางความร้อน การเติม PALF 10% ใน PLA/TPSW รักษาค่า T_g ที่ 58 °C และเพิ่มค่า T_c ในทั้งสองระบบ ซึ่งบ่งชี้ว่า PALF กระตุ้นการตกผลึกส่งผลให้ % Crystallinity ของ PLA/TPSW เพิ่มขึ้นชัดเจน ขณะที่ PLA/TPS มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยรวม PLA/TPS แสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลที่ดีกว่า PLA/TPSW โดยเฉพาะใน

ตัวอย่างที่เติม PALF 10% และมีต้นทุนการผลิตต่ำสุดที่ 15.8 บาทต่อชิ้น ทำให้ PLA/TPS เหมาะสำหรับการพัฒนาในเชิงพาณิชย์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณมหาวิทยาลัยปทุมธานี ที่สนับสนุนทุนการศึกษา ระดับปริญญาเอก และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี สำหรับการให้ความอนุเคราะห์ให้อุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Chu J, Yin X, He M, Ouyang W, Lin C, Liu X. Substance flow analysis and environmental release of antimony in the life cycle of polyethylene terephthalate products. *Journal of Cleaner Production*. 2021;291:125252.

[2] Wang Y, Hu T, Zhang W, Lin J, Wang Z, Lyu S, Tong H. Biodegradation of polylactic acid by a mesophilic bacteria *Bacillus safensis*. *Chemosphere*. 2023;318:137991.

[3] Yu J, Xu S, Liu B, Wang H, Qiao F, Ren X, Wei Q. PLA bioplastic production: From monomer to the polymer. *European Polymer Journal*. 2023;193:112076.

[4] Mistry AN, Kachenchart B, Wongthanoj A, Somwangthanoj A, Luepromchai E. Rapid biodegradation of high molecular weight semi-crystalline polylactic acid at ambient temperature via enzymatic and alkaline hydrolysis by a defined bacterial consortium. *Polymer Degradation and Stability Journal*. 2022;202:110051.

[5] Qin Q, Yang Y, Yang C, Zhang L, Yin H, Yu F, Ma J. Degradation and adsorption behavior of biodegradable plastic PLA under conventional weathering conditions. *Sci Total Environ*. 2022; 842:156775.

[6] Pulgarin HLC, Caicedo C, López EF. Effect of surfactant content on rheological, thermal, morphological and surface properties of thermoplastic starch (TPS) and polylactic acid (PLA) blends. *Heliyon*. 2022;8(10).

[7] Sayeed MMM, Sayem ASM, Haider J, Akter S, Habib MM, Rahman H, Shahinur S. Assessing mechanical properties of jute, kenaf, and pineapple leaf fiber-reinforced polypropylene composites: Experiment and modelling. *Polymers*. 2023;15:830.

[8] Suteja J, Firmanto H, Soesanti A, Christian C. Properties investigation of 3D printed continuous pineapple leaf fiber-reinforced PLA composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022;35(11):2052-61.

[9] Chotiprayon P, Chaisawad B, Yoksan R. Thermoplastic cassava starch/poly (lactic acid) blend reinforced with coir fibres. *International journal of biological macromolecules*. 2020;156 :960-8.

[10] Srithep Y, Hongkhaum N, Takhot P. Characterization of bioplastics poly (lactic acid) blended with thermoplastic starch. *RMUTP Research Journal*. 2020;14(2):98-109

[11] Kongsong P, Hokking S, Wiwasuk A, Masae M. The mechanical properties of thermoplastic starch/poly (lactic acid) blends filled with durian peel ash. *Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal*. 2021; 13(2):357-68. (in Thai)

[12] Manshor M, Anuar H, Aimi MN, Fitrie MA, Nazri WW, Sapuan S, et al. Mechanical, thermal and morphological properties of durian skin fibre reinforced PLA biocomposites. *Materials & Design*. 2014;59:279-86.