



อิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลและต้นทุนการผลิตของวัสดุพอลิแลคติก แอซิดไบโอคอมพอสิต

ชูดิง กาเดร์* รัตนาวดี เห็ดทอง และ ต่อศักดิ์ กิตติกรรณ์
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 8038 6945 อีเมล: dingsuding.607@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.007

รับเมื่อ 9 กรกฎาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 9 กันยายน 2564 ตอรับเมื่อ 14 กันยายน 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 10 กรกฎาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุไบโอคอมพอสิตฐานพอลิแลคติกแอซิดและปรับปรุงสมบัติเชิงกล ต้นทุนการผลิต และความสามารถในการแข่งขัน โดยใช้เส้นใยเยื่อไม้ยูคาลิปตัสและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเสริมแรง จากการศึกษาพบว่า มอดุลัสต่อการดึงของวัสดุไบโอคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าสูงสุดที่ 5462 เมกะปาสคาล ในขณะที่ความแข็งแรงต่อการดึงและความต้านทานต่อการกระแทกมีค่าลดลงต่ำสุดที่ 22.76 เมกะปาสคาล และ 0.67 กิโลจูลต่อตารางเมตรที่ 35 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด การศึกษาอัตราการแพร่ของน้ำพบว่า วัสดุไบโอคอมพอสิตสามารถต้านทานการแพร่ผ่านของน้ำและค่าความต้านทานต่อการแพร่ผ่านจะลดลงเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น ในด้านต้นทุนการผลิตของวัสดุไบโอคอมพอสิตได้ทำการคำนวณราคาวัตถุดิบทั้งหมดรวมทั้งค่าผลิตงานพบว่า ต้นทุนอยู่ระหว่าง 108.68–130.28 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่ต้นทุนของพอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่ 155.44 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อพิจารณาความสามารถในการแข่งขัน (ความแข็งแรงต่อการดึง/ต้นทุนการผลิต) วัสดุไบโอคอมพอสิตที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด 1.95 เท่า

คำสำคัญ: วัสดุไบโอคอมพอสิต พอลิแลคติกแอซิด แคลเซียมคาร์บอเนต เส้นใยเซลลูโลส ไม้เทียม



Influence of Calcium Carbonate on Mechanical Properties and Production Costs of Polylactic Acid Biocomposite Material

Suding Kaday*, Rattanawadee Hedthong and Thorsak kittikorn

Division of Physical Sciences, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 8038 6945, E-mail: dingsuding.607@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.007

Received 9 July 2021; Revised 9 September 2021; Accepted 14 September 2021; Published online: 10 July 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This research was to develop formulation of polylactic acid biocomposite, and investigate their improvement of mechanical properties, production cost and competitiveness, by using a eucalyptus pulp fiber and a calcium carbonate (CaCO_3) as reinforcing fillers. According to the results, flexural modulus of biocomposites tended to increase with calcium carbonate and maximize to 5462 MPa. Meanwhile, the flexural strength and impact strength were reduced to the lowest of 22.76 MPa and 0.67 kJ/m² with CaCO_3 of 35 wt%. However, 20 wt% of CaCO_3 performed the best mechanical properties of all. The kinetic study of water diffusion rate, revealed that the PLA biocomposite incorporated CaCO_3 20 wt% could mostly resist water diffusing, and be gradually losing their resistance when CaCO_3 raising. The production cost of biocomposites was calculated from all raw material prices including utility. It was found that the cost was ranged between 108.68-130.28 baht per kilogram, while polylactic acid cost 155.44 baht per kilogram. As considered competitiveness (flexural strength/cost), the biocomposite of 20 wt% CaCO_3 showed the higher efficiency than that of neat PLA equally 1.95 times.

Keywords: Biocomposite, Polylactic Acid, Calcium Carbonate, Cellulose Fiber, Artificial Wood

Please cite this article as: S. Kaday, R. Hedthong, and T. kittikorn, "Influence of calcium carbonate on mechanical properties and production costs of polylactic acid biocomposite material," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1-11, ID. 233-175219, Jul.-Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

ในหลายปีที่ผ่านมา ได้มีการใช้ทรัพยากรพลาสติกจากแหล่งที่ไม่สามารถทดแทนได้ เช่น ปิโตรเลียม เพื่อผลิตสิ่งของเครื่องใช้ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามชีวภาพและเกิดปัญหาในการจัดการขยะที่ไม่เหมาะสม ทำให้ปัจจุบันมีนักวิจัยเริ่มหันมาสนใจที่จะศึกษาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามชีวภาพ (พลาสติกชีวภาพ) เพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามชีวภาพและลดปัญหาขยะที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน พลาสติกชีวภาพทั่วโลกมีมูลค่า 5.8 พันล้านดอลลาร์ในปี 2020 และคาดว่าจะสูงถึง 16.8 พันล้านดอลลาร์ในปี 2030 ซึ่ง CAGR เพิ่มขึ้น 11.5% จากปี 2020 ถึงปี 2030 [1] และหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic Acid; PLA) ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายเองได้เมื่อฝังกลบในดิน [2] พอลิแลคติกแอซิดมีแหล่งที่มาจากวัสดุธรรมชาติ เช่น ข้าวสาลี อ้อย หรือมันสำปะหลัง เป็นต้น และได้มีการนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมทางด้านบรรจุภัณฑ์ ทางด้านการแพทย์ ทางด้านยานยนต์ [3]–[8] เป็นต้น แต่ด้วยราคาที่แพงกว่าพลาสติกที่มาจากปิโตรเลียมประมาณ 2–4 เท่า ทำให้บางประเภทยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน

เมื่อพิจารณาทางด้านต้นทุน พอลิแลคติกแอซิดนับว่ามีราคาที่ค่อนข้างสูง จึงได้มีการหาวิธีที่จะลดต้นทุนและหนึ่งในวิธีการลดต้นทุนของพอลิแลคติกแอซิด คือ การเติมสารตัวเติมลงไป เนื่องจากราคาถูกกว่าพลาสติกและสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพลาสติกให้ดีขึ้น สารตัวเติมที่ใช้ อาทิเช่น เส้นใยเยื่อไม้ (Pulp Fiber) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและยังมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยจำพวก เส้นใยป่านศรนารายณ์ หรือเส้นใยกล้วย ถึงแม้ว่าด้านสมบัติจะต่ำกว่า จากงานวิจัยของ Sousa [9] ได้ทำการศึกษาพอลิแลคติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเยื่อไม้พบว่า ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เส้นใยเยื่อไม้สามารถเพิ่มสมบัติความแข็งแรงต่อการดึง (Tensile Strength) ประมาณ 16–24 เปอร์เซ็นต์ และจากงานวิจัยของ Mazzanti [10], Graupner

[11], Jandas [12], HUDA [13], Shih [14] ได้อธิบายในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เส้นใยธรรมชาติสามารถเสริมแรงให้กับพอลิแลคติกแอซิดได้ดี มีสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก (Impact Strength) ความแข็งแรงต่อการดึงและความต้านทานต่อการดัดงอ (Flexural) เพิ่มขึ้น

นอกจากเส้นใยยังมีงานวิจัยที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate; CaCO_3) ในการลดต้นทุนและเพิ่มสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนได้อีกด้วย เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมาจากวัสดุตามธรรมชาติ เช่น เปลือกหอย กระจก พบมากตามธรรมชาติในรูปของหินปูน ทั้งแคลเซียมคาร์บอเนตและพอลิแลคติกแอซิดต่างมีขั้วอ่อนๆ ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถที่จะกระจายตัวในพอลิแลคติกแอซิดได้ดี จากงานวิจัยของ Kumar [15] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตพบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถที่จะกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิแลคติกแอซิดและยังมีค่ากลาสแทรนซิชัน (Glass Transition; T_g) และ โมดูลัสสะสม (Storage Modulus) สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการใช้เส้นใยเยื่อไม้ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีราคาถูก หาได้ง่าย สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกล ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ลดต้นทุนการผลิตของพอลิแลคติกแอซิดได้ จึงมีความสนใจที่จะใช้ในการวิจัยนี้ โดยทำการศึกษาการแปรปรมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลและต้นทุนการผลิตของวัสดุไบโอคอมพอสิต อาทิเช่น โมดูลัสต่อการดัดงอ (Flexural Modulus) ความแข็งแรงต่อการดัดงอ (Flexural Strength) และความต้านทานต่อการกระแทก อีกทั้งได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption) ที่อุณหภูมิสูง เพื่อประเมินสมรรถนะการใช้งานในระยะยาวของผลิตภัณฑ์ที่ต้องเผชิญกับความชื้น ได้มีการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นภายในชิ้นตัวอย่าง และคำนวณราคาต้นทุน ความสามารถในการแข่งขันของวัสดุไบโอคอมพอสิต เพื่อประเมินราคาต้นทุนในการผลิตต่อสมบัติเชิงกลในแต่ละสูตร เพื่อผลิตไม้เทียมฐานพอลิแลคติกแอซิดสำหรับวัสดุตกแต่งภายในอาคาร



2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

พอลิแลคติกแอซิด (PLA เกรด 3251D) ชื่อทางการค้า Nature-Works PLA@3251D ผลิตโดยบริษัท Nature Works LLC. เส้นใยเยื่อไม้จากต้นยูคาลิปตัสซึ่งได้รับสนับสนุนจากบริษัท Siam Cement Group ก่อนนำมาใช้งานได้ทำการย่อยเส้นใยให้มีขนาดลดลงโดยใช้เครื่องบดเส้นใยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20–50 ไมครอน และความยาวประมาณ 100–500 ไมครอน และแคลเซียมคาร์บอเนตผลิตโดยบริษัท ควอลิตี้ มีเนอรัล จำกัด (มหาชน)

2.2 การเตรียมวัสดุไบโอคอมพอลสิต

อบเม็ดพอลิแลคติกแอซิดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และทำการผสมแบบหลอมในเครื่องผสมแบบปิด (Brabender® Model Mixer 350E) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 30–60 รอบต่อนาที โดยกำหนดปริมาณเส้นใย 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (วัสดุคอมพอลสิตสามารถเติมเส้นใยสูงสุดอยู่ที่ 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องด้วยมีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปด้วย จึงได้กำหนดปริมาณเส้นใยอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์) และแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ในช่วง 20–35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขั้นตอนการผสมเริ่มจากหลอมเม็ดพอลิแลคติกแอซิด 3 นาที จากนั้นเติมแคลเซียมคาร์บอเนตผสมต่อ 2 นาที สุดท้ายเติมเส้นใยและทำการผสมต่อจนครบ 10 นาที หลังผสมบดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องบดพลาสติก ทำการขึ้นรูปแผ่นขึ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (Compression Molding) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความดัน 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 2 นาที และเพิ่มความดัน 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 11 นาที สำหรับพอลิแลคติกแอซิดสามารถนำเม็ดทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดโดยไม่ต้องทำการผสมแบบหลอมในเครื่องผสมแบบปิด

2.3 การทดสอบสมบัติ

2.3.1. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ขึ้นตัวอย่างจากการทดสอบความต้านทานต่อการ

กระแทกได้ถูกนำมาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FEI Quanta 400) และได้ทำการเคลือบทองบนชิ้นตัวอย่างก่อนทำการทดสอบ

2.3.2. การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดัดงอ
ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron machine Model 3365) ที่อุณหภูมิ ห้องตามมาตรฐาน ISO 178 โดยใช้โหมด three-pointed bending ใช้ Load Cell ขนาด 1000 นิวตัน และ Support Span 64 มิลลิเมตร ทำการทดสอบไม่น้อยกว่า 7 ชิ้น รายงานค่ามอดุลัสต่อการดัดงอและความแข็งแรงต่อการดัดงอเป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยความแข็งแรงต่อการดัดงอ (σ) และมอดุลัสต่อการดัดงอ (E) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (1)–(3)

$$\sigma = \frac{3FL}{2Bh^2} \quad (1)$$

เมื่อ σ คือ ความแข็งแรงต่อการดัดงอ F คือ แรงกระทำ L คือ ระยะระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสอง h คือ ความหนา B คือ ความกว้าง

$$\varepsilon = \frac{6Yh}{L^2} \quad (2)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดต่อการดัดงอ Y คือ ระยะการดัดงอของชิ้นงาน L คือ ระยะระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสอง h คือ ความหนา

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

เมื่อ E คือ มอดุลัสต่อการดัดงอ ε คือ ความเครียดต่อการดัดงอ σ คือ ความแข็งแรงต่อการดัดงอ

ในขณะที่มอดุลัสจำเพาะ (Specific Modulus) และความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (4)–(5)

$$\text{specific modulus} = \frac{E}{\text{density}} \quad (4)$$

เมื่อ E คือ มอดุลัสต่อการดัดงอ

$$\text{specific strength} = \frac{\sigma}{\text{density}} \quad (5)$$

เมื่อ σ คือ ความแข็งแรงต่อการดัดงอ

2.3.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 180 โดยใช้เครื่อง Zwick/Roell 5102 Pendulum Impact Tester ด้วยลูกตุ้ม ขนาด 1 จูล ทำการทดสอบแบบ Charpy ขึ้นตัวอย่าง แบบบาก โดยจะบากเป็นรูปตัววี (V shape) ให้มีความลึก 2.5 มิลลิเมตร ทดสอบไม่น้อยกว่า 8 ขึ้นตัวอย่าง และรายงาน ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกในหน่วย กิโลกรัมต่อ ตารางเมตร เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยคำนวณ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกดังสมการที่ (6)

$$\text{Impact strength} = \frac{U}{A} \quad (6)$$

เมื่อ U คือ พลังงานดูดซับ และ A คือ พื้นที่หน้าตัด

2.3.4. การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 62 เตรียมตัวอย่างขนาด $30 \times 30 \times 3$ ลูกบาศก์มิลลิเมตรและทำการชั่ง น้ำหนักแรกเริ่มก่อนทำการทดสอบ ทำการทดสอบดูดซึมน้ำภายในตู้อบลมร้อน (Memmert, Germany) ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิสูงสุดที่เป็นไปได้ในการทดสอบการดูดซึมน้ำ เนื่องจากอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิแลคติกแอซิดอยู่ที่ 60–65 องศาเซลเซียส) ทำการชั่งน้ำหนักของขึ้นตัวอย่างทดสอบทุกๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้น ทำการชั่งน้ำหนักขึ้นตัวอย่างทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 96 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักขึ้นตัวอย่างจะเข้าสู่จุดสมดุล ทำการคำนวณอัตราการแพร่ผ่าน (D) [16] ตามสมการที่ (7) โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (Mt) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 2 \left(\frac{Dt}{\pi l^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

เมื่อ M_t คือ น้ำหนักการดูดซึมน้ำที่เวลาใดๆ M_∞ น้ำหนักการดูดซึมน้ำที่คงที่ t คือ เวลาใดๆ l คือ ความหนาขึ้นตัวอย่าง

$$M_t (\%) = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ W_d คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน และ W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังจากดูดซึมน้ำที่ ช่วงเวลาใดๆ

2.3.5 ความสามารถในการแข่งขัน

ความสามารถในการแข่งขัน (Competitiveness) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9)

$$\text{competitiveness} = \frac{\sigma}{\text{cost}} \quad (9)$$

เมื่อ σ คือ ความแข็งแรงต่อการดัดงอ

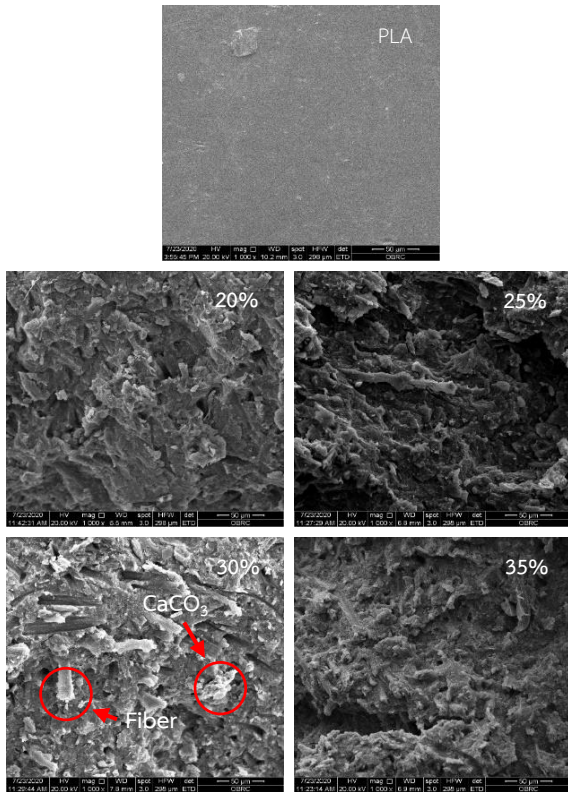
3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

จากผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่แสดงในรูปที่ 1 พบว่า วัสดุไบโอคอมพอสิตจะประกอบด้วย 2 เฟส โดยมีพอลิแลคติกแอซิดเป็นเฟสหลัก และเส้นใยเยื่อไม้กับแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นเฟสกระจาย และจากภาพถ่าย SEM จะเห็นได้ว่าอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถกระจายตัวในเนื้อพื้นพอลิแลคติกแอซิดที่ตีแต่ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า เมื่อแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากความเป็นขั้วอ่อนๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนตและการรวมตัวกันของอนุภาคจะส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงต่อการดัดงอและการกระแทกของวัสดุไบโอคอมพอสิตลดลง [17]–[19]

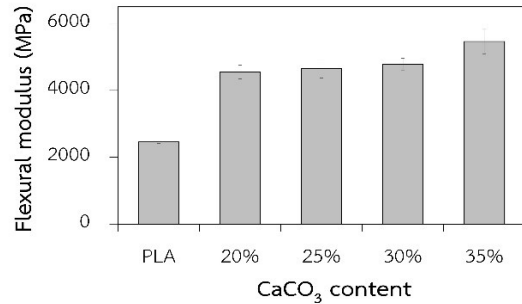
3.2 สมบัติเชิงกล

จากผลการศึกษาอิทธิพลของการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติความต้านทานต่อการดัดงอ ในรูปที่ 2–3 พบว่า มอดุลัสต่อการดัดงอของวัสดุไบโอคอมพอสิตมีแนวโน้ม



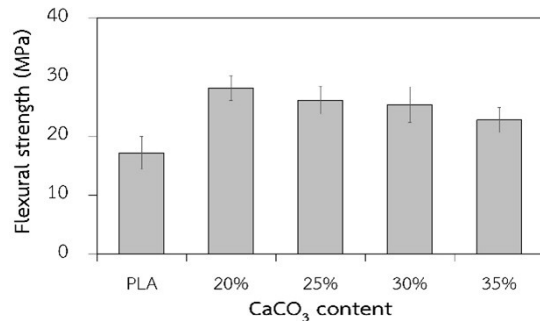
รูปที่ 1 สัณฐานวิทยาของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่มีการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอนุภาคของแข็งตึง การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับการเพิ่มของแข็งตึงลงไนวัสดุ ทำให้ความแข็งของวัสดุไบโอคอมพอสิตเพิ่มขึ้นและส่งผลให้ค่ามอดูลัสต่อการดัดงอเพิ่มขึ้นนั่นเอง ในขณะที่ค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงสุด เป็นเพราะความเข้ากันได้ดีระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตกับพอลิแลคติกแอซิด และความแข็งแรงต่อการดัดงอมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานลดลง [18]



หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($p < 0.05$)

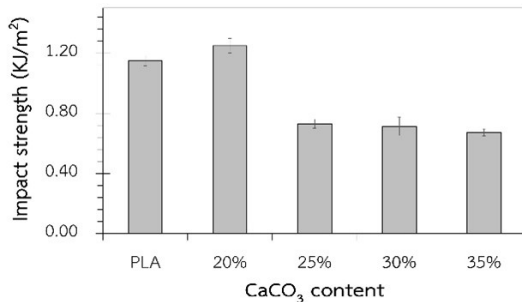
รูปที่ 2 มอดูลัสต่อการดัดงอของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่มีการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต



หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($p < 0.05$)

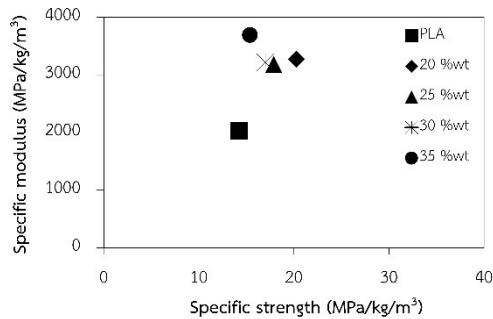
รูปที่ 3 ความแข็งแรงต่อการดัดงอของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่มีการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต

รูปที่ 4 แสดงผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกพบว่า สมบัติความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค ส่งผลให้การกระจายแรงหรือการส่งผ่านแรงภายในเนื้อวัสดุลดลง และจากงานวิจัยของ Nekhamanurak [17] ได้้อธิบายว่าจะเกิดช่องว่างระหว่างเนื้อพื้นและแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เกิดการถ่ายโอนแรงหรือการส่งผ่านแรงได้ไม่เต็ม ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงด้วยเช่นกัน



หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ($p < 0.05$)

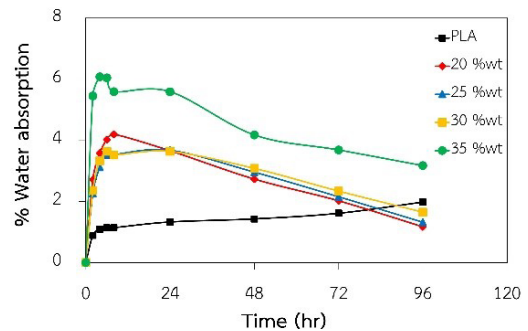
รูปที่ 4 ความต้านทานต่อการกระแทกของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่มีการแปรปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสจำเพาะและความแข็งแรงจำเพาะของวัสดุไบโอคอมพอสิต

จากรูปที่ 5 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสจำเพาะกับความแข็งแรงจำเพาะของวัสดุไบโอคอมพอสิตพบว่า ที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต ถือว่ามีสมบัติความต้านทานต่อการดัดงอที่ดีที่สุด โดยมีค่าความแข็งแรงต่อการดัดงอสูงที่สุดในขณะที่มอดุลัสต่อการดัดงอต่ำกว่า 35 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตเล็กน้อย

จากการทดสอบความต้านทานต่อการดัดงอและความต้านทานต่อแรงกระแทกจะเห็นได้ว่าวัสดุไบโอคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนตและที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตจะมีค่าสูงที่สุด สรุปสมบัติความต้านทานต่อการดัดงอและความต้านทานต่อแรงกระแทกจากมากไปน้อย 20 > 25 > 30 > 35 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 6 ค่าการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่อุณหภูมิการทดสอบ 65 องศาเซลเซียส

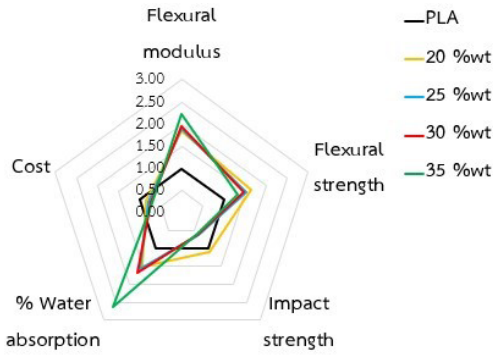
3.3 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

จากผลการศึกษาการดูดซึมน้ำของวัสดุไบโอคอมพอสิตที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า วัสดุไบโอคอมพอสิตมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด และเมื่อพิจารณาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเข้ากันได้กับพอลิแลคติกแอซิดลดลง ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถที่จะแทรกเข้าไปในวัสดุไบโอคอมพอสิตได้ง่ายกว่า หลังจากการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำวัสดุไบโอคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เป็นเพราะที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ 65 องศาเซลเซียส สูงพอที่จะทำให้ชิ้นตัวอย่างเกิดการกร่อน (Cracking) ของชิ้นตัวอย่าง ทำให้น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างลดลงนั่นเอง

ตารางที่ 1 ค่าอัตราการแพร่ผ่านของวัสดุไบโอคอมพอสิต

สูตร	อัตราการแพร่ผ่าน (ตารางเมตร/วินาที)
PLA	0.096
20 wt%	0.059
25 wt%	0.061
30 wt%	0.061
35 wt%	0.103

อัตราการแพร่ผ่านของวัสดุไบโอคอมพอสิตได้ทำการคำนวณที่อัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดนั้นคือ 4 ชั่วโมงแรกของ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของวัสดุไบโอคอมพอสิต

การทดสอบ (Slope สูงสุด) จากตารางที่ 1 แสดงค่าอัตราการแพร่ผ่านของวัสดุไบโอคอมพอสิต พบว่า 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าอัตราการแพร่ผ่านน้อยที่สุด เท่ากับ 0.059 ตารางเมตรต่อวินาที เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีในวัสดุไบโอคอมพอสิตทำให้สามารถที่จะชะลอการดูดซึมน้ำได้ดี และอัตราการแพร่ผ่านมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ความเข้ากันได้ของวัสดุไบโอคอมพอสิตลดลง ทำให้มีช่องว่างที่โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกได้ง่ายขึ้น และอัตราการแพร่ผ่านของวัสดุไบโอคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ สามารถที่จะชะลอการซึมผ่านของน้ำได้ดี ยกเว้น 35 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีอัตราการแพร่ผ่านสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด อันเนื่องจากปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากเกินไปทำให้ความเข้ากันได้ไม่ดี มีช่องว่างที่สามารถทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกซึมได้ง่ายกว่า

ราคาของพอลิแลคติกแอซิดจาก BC Polymers Marketing Co. Ltd อยู่ที่ 150 บาทต่อกิโลกรัม ราคาแคลเซียมคาร์บอเนตจากเคมีภัณฑ์อยู่ที่ 6.14 บาทต่อกิโลกรัม และเส้นใยธรรมชาติราคาอยู่ที่ 30 บาทต่อกิโลกรัม เมื่อทำการคำนวณราคาต้นทุนและค่าการผลิตงานต่อกิโลกรัม ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า พอลิแลคติกแอซิดมีราคาต้นทุนในการผลิตต่อกิโลกรัมอยู่ที่ 155.44 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่วัสดุไบโอคอมพอสิตมีต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัมอยู่ที่ 108.68-130.28 บาทต่อกิโลกรัม และเมื่อทำการเปรียบ

เทียบเชิงสัมพัทธ์ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า เมื่อพิจารณาสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุไบโอคอมพอสิตแล้วพบว่า ที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต จะมีสมบัติโดยรวมที่ดี ไม่ว่าจะเป็นความต้านทานต่อการดัดงอ ความต้านทานต่อการกระแทก และอัตราการแพร่ผ่านของน้ำที่ต่ำ

ตารางที่ 2 ราคาต้นทุนการผลิตวัสดุไบโอคอมพอสิต

สูตร	ราคาต้นทุน (บาท/กิโลกรัม)	ความสามารถในการแข่งขัน (ความแข็งแรงต่อการดัดงอ/ต้นทุนการผลิต)	อัตราความสามารถในการแข่งขัน
PLA	155.44	0.11	1.00
20 wt%	130.28	0.22	1.95
25 wt%	123.08	0.21	1.92
30 wt%	115.88	0.22	1.98
35 wt%	108.69	0.21	1.89

หมายเหตุ: ราคาต้นทุน (บาท/กิโลกรัม) ได้รวมถึงราคาวัตถุดิบและค่าผลิตงาน

จากตารางที่ 2 ในด้านความสามารถในการแข่งขัน ถึงแม้สมบัติความต้านทานต่อการดัดงอ ความต้านทานต่อการกระแทกที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต จะมีค่าสูงที่สุดในบรรดาวัสดุไบโอคอมพอสิต แต่ในด้านต้นทุนในการผลิตต่อกิโลกรัมที่ 30 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต จะมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่า และเมื่อคำนวณความสามารถในการแข่งขันพบว่า 30 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนต มีความสามารถในการแข่งขันที่ดีกว่า 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และมีความสามารถในการแข่งขันที่ดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด 1.98 เท่า

4. สรุป

สมบัติความแข็งแรงต่อการดัดงอและความต้านทานต่อการกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากความเป็นขั้วอ่อนๆ ของแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถเกิดเป็นเกาะกันเป็นกลุ่ม (Agglomerate) ที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น เห็นได้จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยา แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถที่จะกระจายตัวได้ดีในพอลิแลคติกแอซิดด้วยความที่มีขั้วอ่อนๆ

เหมือนกัน และจะเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่ม เมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้นทำให้การถ่ายโอนแรงไม่มีประสิทธิภาพ ในขณะที่ค่าการดูดซึมน้ำพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมคาร์บอเนต และอุณหภูมิในการทดสอบ 65 องศาเซลเซียสนั้นสูงพอที่สามารถทำให้ขึ้นตัวอย่างเกิดการกร่อน (Cracking) หลังจากการทดสอบ 24 ชั่วโมง เห็นได้จากน้ำหนักของขึ้นตัวอย่างที่ลดลง

ในด้านราคาหรือต้นทุนการผลิตพบว่า สารตัวเติมเส้นใยและแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถลดต้นทุนให้กับพอลิแลคติกแอซิดได้ และวัสดุไบโอคอมพอสิตมีต้นทุนการผลิตต่อกิโลกรัมที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากต้นทุนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ถูกกว่าช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ ในด้านความสามารถในการแข่งขันนั้นพบว่า ที่ 30 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการแข่งขันที่ดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด 1.98 เท่า และสูงกว่าที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาสมบัติการใช้งานไม่เทียบฐานพอลิแลคติกแอซิดที่ต้องการคุณสมบัติความแข็งแรงพบว่า ที่ 20 เปอร์เซ็นต์แคลเซียมคาร์บอเนตเหมาะสำหรับการผลิตไม่เทียบฐานพอลิแลคติกแอซิดสำหรับตกแต่งภายในอาคาร เพราะมีสมบัติความต้านทานต่อการดัดงอและความต้านทานต่อการกระแทกที่ดีที่สุด และอัตราการแพร่ผ่านของน้ำที่ต่ำ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนในเรื่องสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือในการดำเนินโครงการวิจัย และขอขอบคุณบริษัทปูนซิเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) (SCG) สำหรับการอนุเคราะห์วัสดุดิบเส้นใยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Ponnappan, P. Mandon, and E. Prasad. (2021,

Aug.). Bioplastics Market by Type (Biodegradable Plastic and Non-Biodegradable Plastic) and Application (Packaging, Agriculture, Consumer Durables, Textile, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030. Allied Market Research. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/bioplastics-market>

[2] C. G. Silva, P. A. L. Campini, D. B. Rocha, and D. S. Rosa, “The influence of treated eucalyptus microfibers on the properties of PLA biocomposites,” *Composites Science and Technology*, vol. 179, pp. 54–62, 2019.

[3] A. P. Morales, A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, V. C. Valero, and S. De La Rosa Llano, “Bamboo–Polylactic Acid (PLA) composite material for structural applications,” *Materials*, vol. 10, no. 11, pp. 1286, 2017.

[4] S. Qiu, Y. Zhou, G. I. N. Waterhouse, R. Gong, J. Xie, K. Zhang, and J. Xu, “Optimizing interfacial adhesion in PBAT/PLA nanocomposite for biodegradable packaging films,” *Food Chemistry*, vol. 334, pp. 127487, 2021.

[5] A.-M. Luchian-Lupu, T. Zaharescu, E.-M. Lungulescu, M. Răpă, and H. Iovu, “Availability of PLA/SIS blends for packaging and medical applications,” *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 172, pp. 10896, 2020.

[6] D. Notta-Cuvier, J. Odent, R. Delille, M. Murariu, F. Lauro, J. M. Raquez, B. Bennani, and P. Dubois, “Tailoring polylactide (PLA) properties for automotive applications: Effect of addition of designed additives on main mechanical properties,” *Polymer Testing*, vol. 36, pp. 1–9, 2014.



- [7] S. Knoch, F. Pelletier, M. Larose, M. G. Chouinard, M.-J. Dumont, and J. R. Tavares, "Surface modification of PLA nets intended for agricultural applications," *Colloids and Surfaces A*, vol. 598, pp. 124787, 2020.
- [8] X. Shi, X. Dai, Y. Li, J. Cao, C. Huo, and X. Wang, "Degradable Poly(lactic acid)/Metal–Organic Framework Nanocomposites Exhibiting Good Mechanical, Flame Retardant, and Dielectric Properties for the Fabrication of Disposable Electronics," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 14, pp. 3887–3894, 2017.
- [9] S. Sousa, A. P. Costa, and R. Simões, "Poly(lactic acid) composites reinforced with kraft pulp fibres: Production by a papermaking process and characterization," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 121, pp. 273–282, 2019.
- [10] V. Mazzanti, R. Pariente, A. Bonanno, A., O. Ruiz de Ballesteros, F. Mollica, and G. Filippone, "Reinforcing mechanisms of natural fibers in green composites: Role of fibers morphology in a PLA/hemp model system," *Composites Science and Technology*, vol. 180, pp. 51–59, 2019.
- [11] N. Graupner, A. S. Herrmann, and J. Müssig, "Natural and man-made cellulose fibre-reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites: An overview about mechanical characteristics and application areas," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 6–7, pp. 810–821, 2009.
- [12] P. J. Jandas, S. Mohanty, S. K. Nayak, and H. Srivastava, "Effect of surface treatments of banana fiber on mechanical, thermal, and biodegradability properties of PLA/banana fiber biocomposites," *Polymer Composites*, vol. 32, no. 11, pp. 1689–1700, 2011.
- [13] M. Huda, L. Drzal, A. Mohanty, and M. Misra, "Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) (PLA) composites: A comparative study," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 11–12, pp. 1813–1824, 2006.
- [14] Y. F. Shih and C. C. Huang, "Polylactic acid (PLA)/banana fiber (BF) biodegradable green composites," *Journal of Polymer Research*, vol. 18, no. 6, pp. 2335–2340, 2011.
- [15] V. Kumar, A. Dev, and A. P. Gupta, "Studies of poly(lactic acid) based calcium carbonate nanocomposites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 56, pp. 184–188, 2014.
- [16] B. Nekhamanurak, P. Muangtong, and N. Choothong, "Effect of Calcium Carbonate on Thermal Properties and Mechanical Properties of Reprocessed PLA/PBAT Biocomposite," *Journal of Naresuan University: Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 2465–4698, 2017.
- [17] N. Sultana and T. H. Khan, "Water absorption and diffusion characteristics of nanohydroxyapatite (nHA) and poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate-) based composite tissue engineering scaffolds and nonporous thin films," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–8, 2013.
- [18] N. G. Betancourt and D. E. Cree, "Mechanical properties of poly (lactic acid) composites reinforced with CaCO₃ eggshell based fillers,"



- MRS Advances*, vol 2, no. 47, pp. 2545–2550, 2017.
- [19] A. Teamsinsungvon, Y. Ruksakulpiwat, and K. Jarukumjorn, “Properties of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate)/calcium carbonate composites,” *Advanced Materials Research*, vol. 123–125, pp. 193–196, 2010.