

Research Article

สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านการซึมผ่านของฟิล์ม
คอมโพสิตชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลตด้วยการเติม
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและกลีเซอรอล

**Mechanical, Thermal and Barrier Properties of Poly(butylene adipate-co-terephthalate)
Biocomposite Films Incorporated with Nano-Calcium Carbonate and Glycerol**

กรรณิการ์ ยิ้มหาค^a และ อัจฉรีย์ยา นพวิญญวงค์^{b*}
Kannika Yimnak^a and Atchareeya Nopwinyuwong^{b*}

^a ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

^a Field of Industrial Technology, School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Pakkret, Nonthaburi 11120, Thailand.

^b สาขาการจัดการธุรกิจอาหาร (ต่อเนื่อง) คณะการจัดการธุรกิจอาหาร สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี 11120

^b Department of Food Business Management (Continuing Program), Faculty of Food Business Management, Panyapiwat Institute of Management, Pakkret, Nonthaburi 11120, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-03-15

Revised: 2024-09-22

Accepted: 2024-10-03

Keywords:

PBAT;

Nano-calcium carbonate;

bioplastic;

food packaging;

plastic film

This research aims to improve the mechanical, thermal and barrier properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) bioplastic by compounding with nano-calcium carbonate (CaCO_3) and glycerol. Firstly, the compounding pellets were prepared by incorporating 5, 7 and 10 wt% CaCO_3 and 5 parts per hundred of resin (phr) of glycerol using a twin-screw extruder. Then, these pellets were processed into films using blown film extrusion. It found that the addition of 5 wt% CaCO_3 into PBAT (PBAT5C) resulted in increasing tensile strength and melting temperature of PBAT. It can also reduce oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR) compared with PBAT films. In addition, the inclusion of 5 phr of glycerol in PBAT5C (PBAT5G5C) improved the dispersion of nano-calcium carbonate within the PBAT film, resulting in substantial improvements in the mechanical, thermal and barrier properties of the PBAT5G5C film compared with the PBAT5C film. Therefore, the PBAT5G5C film is suitable for use as a packaging film for food products that require low OTR and WVTR. This provides an alternative to replace conventional plastics that are difficult to decompose.

© 2025 Yimnak, K. and Nopwinyuwong, A. Recent Science and Technology published by Rajamangala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author.

E-mail address: atchareyanop@pim.ac.th

Cite this article as:

Yimnak, K. and Nopwinyuwong, A. 2025. Mechanical, Thermal and Barrier Properties of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Biocomposite Films Incorporated with Nano-Calcium Carbonate and Glycerol. *Recent Science and Technology* 17(1): 262509.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านการซึมผ่านของฟิล์มพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) ด้วยการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและกลีเซอรอล โดยขั้นแรกเป็นการเตรียมเม็ดพลาสติกคอมพาวนด์ที่ผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5, 7 และ 10 โดยน้ำหนัก และกลีเซอรอล 5 ส่วนในร้อยส่วนด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม จากผลการทดลองพบว่า การผสมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (PBAT5C) ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง และอุณหภูมิหลอมเหลวของ PBAT เพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PBAT นอกจากนี้การเติมกลีเซอรอล 5 ส่วนในร้อยส่วนลงไปร่วมด้วย (PBAT5C5G) ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทั่ว PBAT ส่งผลให้สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PBAT5C ดังนั้นฟิล์มที่พัฒนาได้จึงเหมาะต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำต่ำ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทดแทนการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก

คำสำคัญ: พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต, นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต, พลาสติกชีวภาพ, บรรจุภัณฑ์อาหาร, ฟิล์มพลาสติก

1. บทนำ

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ที่สังเคราะห์จากพลาสติกมอนอเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ กรดเทเรฟทาเลต (terephthalic acid) กรดอะดิพิค (adipic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ซึ่งมีสมบัติด้านความยืดหยุ่นสูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำสูง แต่มีความแข็งแรงทางกลต่ำ เมื่อเทียบกับพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) (Hemsri *et al.*, 2020) สำหรับสมบัติทางด้านความร้อน PBAT มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) อยู่ที่ช่วง 100-120 องศาเซลเซียส (Arruda *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015) การขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ PBAT สามารถทำได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ เหมือนกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการอัดรีด (extrusion) กระบวนการเป่า (blow molding) หรือ กระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์ (injection molding) เป็นต้น ในปัจจุบัน PBAT ได้ถูกนำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น ฟิล์มยืดสำหรับห่ออาหาร ถูหิ้ว ถูขยะ เป็นต้น สำหรับการนำ PBAT มาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสอาหารโดยตรงหรือบรรจุภัณฑ์ปฐมภูมิ (primary packaging) ตัวอย่างเช่น ฟิล์มห่อหรือถูสำหรับบรรจุอาหารเบเกอรี่ ขนมปังอบ ขนมขบเคี้ยว ซ็อคเก็ต และลูกกวาด ควรปรับปรุงสมบัติของ PBAT บางประการเพื่อช่วยปกป้องคุ้มครองอาหารให้ปลอดภัยในระหว่างการขนส่ง และช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารให้นานขึ้น เช่น ความแข็งแรงทางกล ความทนทานต่อความร้อน ความสามารถในการป้องกัน

การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ เป็นต้น (Hernandez, 1997; Wei *et al.*, 2015)

แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ ทั้งพบในรูปของหินปูน หินอ่อน ซอล์ค แร่แคลไซต์ เป็นต้น หรือพบในสัตว์ เช่น เปลือกหอย กระดุก เป็นต้น โดยแคลเซียมคาร์บอเนต มีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาว มีความสว่างสูง ไม่ละลายน้ำ ราคาถูก มีสมบัติไม่เป็นพิษและสามารถสัมผัสกับอาหารได้ (EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS), 2011) นิยมใช้เป็นสารตัวเติม (filler) เพื่อลดต้นทุน หากต้องการใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุต้องทำการลดขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตให้มีขนาดเล็กกลง หรืออยู่ในระดับนาโน จึงทำให้นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตนิยมนำไปใช้กับงานหลากหลายในรูปแบบของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น การเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพอลิพรอพิลีนเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล (Chan *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2006) และการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อน (Kim *et al.*, 2008; Nekhamanurak *et al.*, 2014; Aframehr *et al.*, 2017) เป็นต้น

สมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ได้นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลักของพอลิเมอร์และสารตัวเติมแล้ว ยังขึ้นกับการกระจายตัวที่ดีและสม่ำเสมอของสารตัวเติมในเนื้อพอลิเมอร์นั้น ๆ ด้วย โดยการปรับปรุงการผสมของพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถทำได้โดยการเลือกกระบวนการการผสมที่เหมาะสมแล้ว การทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดลดลงและสามารถไหลได้ง่ายจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติมในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีมากขึ้น (Avolio *et al.*, 2018; Shaari *et al.*, 2021; George *et al.*,

2023) งานวิจัยการใช้พลาสติกไซเซออร์ของ Avolio *et al.* (2018) ด้วยการเติมพลาสติกไซเซออร์ประเภทเอสเทอร์โอลิโกเมอร์ของกรดแลคติกแอซิด (esterified oligomers of L-lactic acid, OLAs) ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA และแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า การเติมพลาสติกไซเซออร์ช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตได้ดีในเฟสของ PLA และช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล โดยเฉพาะการยึดตัวของ PLA

จากการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ว่าการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงในพอลิเมอร์ จะช่วยเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ให้กับพอลิเมอร์ ได้แก่ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ เป็นต้น และการเติมกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ยังช่วยลดความหนืดในกระบวนการการผสมพลาสติก ซึ่งช่วยให้เกิดการผสมหรือการกระจายตัวของสารเติมแต่งในเนื้อพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น ซึ่งจากการศึกษาเบื้องต้นยังไม่พบรายงานการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ร่วมกับสารเติมแต่งนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและกลีเซอรอลใน PBAT เพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

2.1.1 การเตรียมเม็ดพลาสติก PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃

เตรียมผสมเม็ดพลาสติก PBAT (Ecoflex® F blend C1200, Germany) กลีเซอรอล (99.5% purity) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NPCC101, Behn Meyer, Thailand) โดยการอบไล่ความชื้นเม็ด PBAT ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสมตามสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (WNM รุ่น TSJ-35A, China) ที่อุณหภูมิจากส่วนป้อนถึงหัวตาย 130-200 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 400-600 รอบต่อนาที และอัตราการป้อน 40-90 รอบต่อนาที จากนั้นนำเส้นพลาสติกที่ได้มาตัดเป็นเม็ดพลาสติกที่มีความยาว 2.5 มิลลิเมตร

2.1.2 การเตรียมฟิล์มพลาสติก PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃

เตรียมฟิล์มพลาสติก PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ โดยการนำเม็ดพลาสติกที่เตรียมได้จากข้อ 2.1.1 มาทำการอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (TPBI Model SE-45 Serial no. E001/15, Thailand) สภาวะในการขึ้นรูปจากส่วนป้อนถึงหัวตายอุณหภูมิ 130-200 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 200-400 รอบต่อนาที อัตราการเข้าม้วน 100-200 รอบต่อนาที และมีการควบคุมความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 50-60 ไมโครเมตร

Table 1 Samples and constituents of PBAT, PBAT/CaCO₃, and PBAT/Glycerol/CaCO₃ pellets.

Sample	PBAT (wt%)	CaCO ₃ (wt%)	Glycerol (phr)	Abbreviation Formula
PBAT	100	-	-	PBAT
PBAT-5CaCO ₃	95	5	-	PBAT5C
PBAT-7CaCO ₃	93	7	-	PBAT7C
PBAT-10CaCO ₃	90	10	-	PBAT10C
PBAT-5G-5CaCO ₃	95	5	5	PBAT5G5C
PBAT-5G-7CaCO ₃	93	7	5	PBAT5G7C
PBAT-5G-10CaCO ₃	90	10	5	PBAT5G10C
PBAT-10G-5CaCO ₃	95	5	10	PBAT10G5C

2.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

2.2.1 การตรวจสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

นำเม็ดพลาสติก PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ มาทำการตรวจสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI) อ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1238 เพื่อวัดความสามารถในการไหลขณะหลอมเหลวของกระบวนการขึ้นรูปของ PBAT และ PBAT เมื่อมีการเติม CaCO₃ และกลีเซอรอล โดยนำเม็ดพลาสติกตัวอย่างมาอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาตรวจสอบค่าดัชนีการหลอมไหลด้วยเครื่องวัดดัชนีการไหลขณะหลอม (MF30, INSTRON, USA) ในสภาวะการตรวจสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และน้ำหนักกดทับเท่ากับ 2.16 กิโลกรัม โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.2.2 การทดสอบสมบัติทางกลในโหมดแรงดึง

นำตัวอย่างฟิล์ม PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ ที่เตรียมได้ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 2 เซนติเมตร และความยาว 10 เซนติเมตร นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติทางกล Tensile Tester (C610H Auto Tensile Tester, Labthink, China) เพื่อให้ทราบค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) (หน่วยเมกะปาสคาล, MPa) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (elongation at break) (หน่วย %) และค่ามอดุลัส (modulus) (หน่วยเมกะปาสคาล, MPa) ในแนวขนานกับเครื่อง (machine direction, MD) และในแนวขวางเครื่อง (cross direction, CD) กำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดสอบ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 882-02 โดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 50 กิโลนิวตัน ดึงด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะในการทดสอบ 5 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ

2.2.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry

การตรวจสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส: อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) (DSC1 STARe, Mettler Toledo, Switzerland) โดยให้ความร้อนกับฟิล์มตัวอย่างตั้งแต่อุณหภูมิ -80 ถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำให้เย็น (cooling) ตั้งแต่อุณหภูมิ 250 ถึง -80

องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการทำให้เย็น เท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยทำการทดลองภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งมีอัตราการไหลของก๊าซ เท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที

2.2.4 การตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ตัดตัวอย่างฟิล์ม PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ ให้เป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำไปปรับสภาวะที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดความหนาของตัวอย่างแต่ละแผ่นด้วยไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอลก่อนนำไปตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (ASTM D3985) ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (8001, Illinois, USA) ที่สภาวะอุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0

2.2.5 การตรวจสอบสภาพการซึมผ่านได้ของไอน้ำ

ตัดตัวอย่างฟิล์ม PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ ให้เป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำไปปรับสภาวะในเดซิเคเตอร์ซึ่งบรรจุซิลิกาเจล เป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดความหนาของตัวอย่างแต่ละแผ่นด้วยไมโครมิเตอร์แบบดิจิตอลก่อนนำไปตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (ASTM F1249) ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Permatran-W 3/34, Mocon, USA) ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50

2.2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม โดยนำตัวอย่างฟิล์ม PBAT, PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ มายึดลงบนเทปคาร์บอนที่ติดบนสตัปอลูมิเนียม และนำไปเคลือบด้วยทองหรือแพลตตินัมภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อนำมาตรวจสอบการกระจายตัวของ CaCO₃ (เฟสกระจายตัว) บนแผ่นฟิล์มตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM รุ่น JEOL JSM7800F, JAPAN) โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง 0.5 กิโลวัตต์

2.2.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล และความแปรปรวน ANOVA (Analysis of variance) และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม IBM® SPSS® Statistics Version 24

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

การเตรียมเม็ดพลาสติก PBAT/CaCO₃ และ PBAT/Glycerol/CaCO₃ พบว่าสามารถเตรียมเม็ดพลาสติก PBAT/CaCO₃ ได้ทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นคือที่ร้อยละ 5 7 และ 10 โดยน้ำหนัก (%wt) สำหรับการเตรียมเม็ดพลาสติก PBAT/Glycerol/CaCO₃ พบว่าการเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 ส่วนในร้อยส่วน (parts per hundred of resin, phr) ช่วยทำให้เม็ดพลาสติกมีความสามารถในการไหลที่ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และส่งผลให้อุณหภูมิในการขึ้นรูปลดลง (Ayoub *et al.*, 2021) แต่เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลจาก 5 phr เป็น 10 phr พบว่าไม่สามารถเตรียมเม็ดพลาสติกได้ เนื่องจากการไหลของเม็ดพลาสติกหลอมเหลวที่มากเกินไป ดังนั้นเม็ดพลาสติกที่เตรียมได้ คือ PBAT5C, PBAT7C, PBAT10C, PBAT5G5C, PBAT5G7C และ PBAT5G10C และเมื่อนำเม็ดพลาสติกดังกล่าวมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มพลาสติก พบว่าตัวอย่าง PBAT5C, PBAT7C, PBAT10C, PBAT5G5C และ PBAT5G7C สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ ยกเว้นตัวอย่าง PBAT5G10C ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เนื่องจากความเหลวของเม็ดพลาสติกขณะขึ้นรูปเป็นฟิล์มมากเกินไป ทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลวต่ำ (melt strength) จึงไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม ดังนั้นฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่เตรียมได้ คือ PBAT5C, PBAT7C, PBAT10C, PBAT5G5C, PBAT5G7C

3.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

3.2.1 การตรวจสอบค่าดัชนีการหลอมไหล

จากการตรวจสอบค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) พบว่า MFI ของเม็ดพลาสติก PBAT มีค่าประมาณ 11.3 กรัมต่อ 10 นาที (g/10 min) เมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ลงไปใน PBAT ที่ระดับความเข้มข้น 5 7 และ 10 %wt พบว่าค่า MFI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงประมาณ 16.2-18.3 g/10 min ทั้งนี้เนื่องจากนาโน

แคลเซียมคาร์บอเนต เป็นสารตัวเติมในระดับนาโนเมตรที่สามารถเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่ PBAT หลอมเหลว ขณะการไหลไปตามแรงเฉือนระหว่างการขึ้นรูปเป็นเม็ดพลาสติกคอมพาวด์ในกระบวนการอัดรีดได้ จึงทำให้ค่าดัชนีการหลอมไหลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Tuteja *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2011; Shelesh-Nezhad *et al.*, 2013; Nekhamanurak *et al.*, 2014) และเมื่อพิจารณาที่การเติมปริมาณกลีเซอรอลที่ระดับความเข้มข้น 5 และ 10 phr พบว่าค่าดัชนีการหลอมไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมอยู่ในช่วงประมาณ 18.6-32.1 g/10 min ดังภาพที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จึงส่งผลให้เม็ดพลาสติกที่ได้มีความหนืดลดลง โดยเฉพาะเม็ดพลาสติกคอมพาวด์ PBAT5G10C และ PBAT10G5C ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ เนื่องจากค่าดัชนีการหลอมไหลที่มากเกินไป ทำให้ความแข็งแรงของพลาสติกเมื่ออยู่ในสถานะหลอมเหลวต่ำ (melt strength) จึงไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม

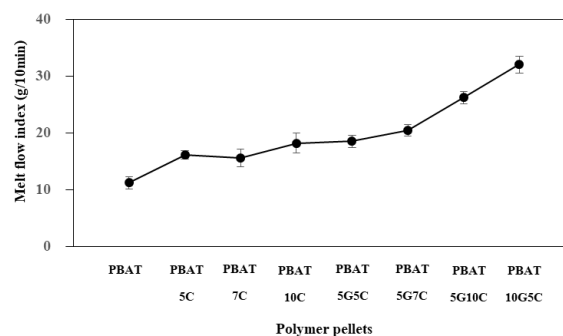
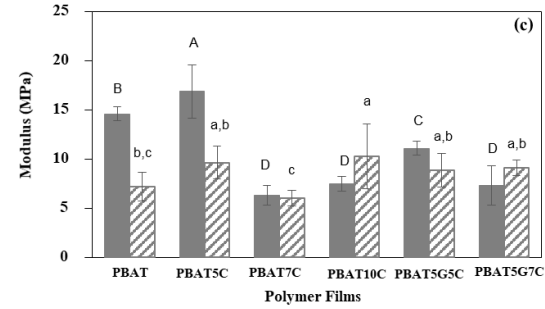
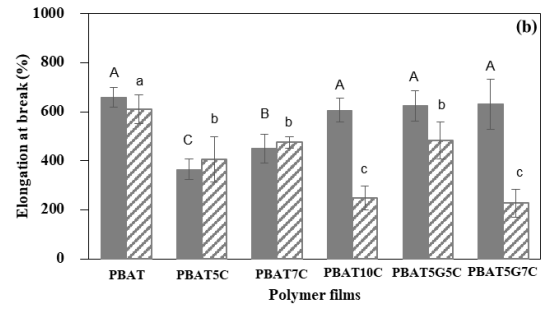
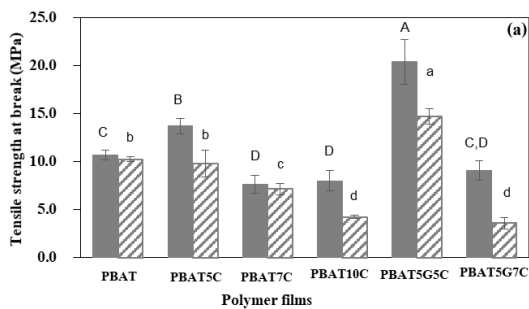


Figure 1 Melt flow index of PBAT, PBAT/CaCO₃, and PBAT/Glycerol/CaCO₃ pellets.

3.2.2 การทดสอบสมบัติทางกลในโหมดแรงดึง

ผลจากการตรวจสอบสมบัติทางกลของฟิล์มด้วยโหมดแรงดึง (ภาพที่ 2) แสดงกราฟค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) (ภาพที่ 2a) ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (elongation at break) (ภาพที่ 2b) และค่ามอดุลัส (modulus) (ภาพที่ 2c) ทั้งในแนวนานกับเครื่อง (machine direction, MD) และในแนวขวางเครื่อง (cross direction, CD) พบว่า ฟิล์ม PBAT มีค่าความต้านทานแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัส ในแนวนานกับเครื่อง (MD) เท่ากับ 10.7 MPa 695.3% และ 14.6 MPa ตามลำดับ และในแนวขวางเครื่อง (CD) เท่ากับ 10.3 MPa 609.9% และ 7.2 MPa ตามลำดับ และเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ลงไปใน PBAT ที่ระดับความเข้มข้น 5 7 และ 10 %wt พบว่าที่ 5 %wt CaCO₃ ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึง และค่ามอดุลัส

เพิ่มขึ้นเป็น 13.7 MPa และ 16.9 MPa ในแนว MD และ 9.8 MPa และ 9.6 MPa ในแนว CD ส่วนค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ทั้งแนว MD และ CD มีค่าลดลงเป็น 365.1% และ 404.7% ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcement material) จึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้กับ PBAT และส่งผลให้ค่าการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chan *et al.* (2002) และ Aframehr *et al.* (2017) แต่เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เพิ่มขึ้นเป็น 7–10 %wt พบว่าค่าความแข็งแรงของฟิล์มมีค่าลดลง ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และการกระจายตัวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT ลดลง ส่งผลให้สมบัติทางกลมีแนวโน้มที่ลดลงไปด้วย และเมื่อพิจารณาที่การเติมกลีเซอรอลที่ปริมาณ 5 phr ลงใน PBAT/CaCO₃ พบว่าค่าสมบัติทางกลมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความเข้มข้นเดียวกัน โดยเฉพาะ PBAT5G5C มีค่าความต้านทานแรงดึง ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสในแนว MD เท่ากับ 20.4 MPa 624.0% และ 11.1 MPa ตามลำดับ และแนว CD เท่ากับ 14.7 MPa 482.0 % และ 8.8 MPa ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลลงไปช่วยให้เกิดการกระจายตัวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของฟิล์ม PBAT5G5C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงภาพที่ 6 ซึ่งการกระจายตัวที่ดีของ CaCO₃ จะช่วยรับแรงจากภายนอก และขวางการเคลื่อนที่ของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความต้านทานแรงดึง และค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น (Rodriguez-Gonzalez *et al.*, 2004; Yimnak *et al.*, 2020; Shaari *et al.*, 2021)



■ แนว MD ▨ แนว CD

Figure 2 Tensile properties of PBAT, PBAT/CaCO₃, and PBAT/Glycerol/CaCO₃ films.

ABCD different letters in a column are significantly different level ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test

abcd different letters in a column are significantly different level ($p < 0.05$) according to Duncan's multiple range test

3.2.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วย

เทคนิค Differential scanning calorimetry

จากผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของฟิล์มด้วยโหมดแรงดึง พบว่าฟิล์มที่มีแนวโน้มสมบัติทางกลที่ดี ได้แก่ ฟิล์ม PBAT5C, PBAT7C, PBAT5G5C และ PBAT5G7C จึงได้นำฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวมาตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) จากภาพที่ 3a เมื่อพิจารณาการให้ความร้อนกับฟิล์มตัวอย่างช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส พบว่าสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PBAT แสดงพีคดูดความร้อนปรากฏ 3 ตำแหน่งที่อุณหภูมิ -35.3 50.7 และ 112.8 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิหลอมเหลวช่วงที่ 1 (melting temperature, T_{m1}) และอุณหภูมิหลอมเหลวช่วงที่ 2 (T_{m2}) ตามลำดับ เนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนอ่อน (soft segment) คือ Polybutylene adipate (PBA) และส่วนแข็ง (rigid segment) คือ Polybutylene

terephthalate (PBT) จึงทำให้มีการหลอมผลึกเกิดขึ้น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเป็นของ PBA (T_{m1}) และการหลอมผลึกช่วงที่ 2 เป็นของ PBT (T_{m2}) (Chivrac *et al.*, 2006; da Silva *et al.*, 2017) สำหรับการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT ที่ปริมาณความเข้มข้น 5 และ 7 %wt พบว่าค่า T_g และ T_{m2} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณความเข้มข้น 5 %wt (PBAT5C) มีค่า T_g และ T_{m2} เพิ่มขึ้นเป็น -33.5 และ 115.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง ที่อนุภาคมีความแข็งเมื่อเติมลงใน PBAT จึงไปช่วยเพิ่มสมบัติทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น (Sahebian and Mosavian, 2019) และเมื่อพิจารณาการเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 phr ลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต PBAT5G5C และ PBAT5G7C ค่า T_g มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว โดยมีค่าประมาณ -34.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลมาจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ PBAT จึงทำให้สมบัติความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า T_{m2} พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ PBAT5G5C ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 123.2 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลช่วยให้เกิดกระจายตัวที่ดีของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต จึงช่วยเพิ่มสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้มากขึ้น จากภาพที่ 3b เมื่อพิจารณาการเย็นตัวของฟิล์มตัวอย่างช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง -50 องศาเซลเซียส พบว่า PBAT มีอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) เท่ากับ 67.3 องศาเซลเซียส และเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตลงไป ใน PBAT พบว่า T_c ของ PBAT5C และ PBAT7C เพิ่มขึ้นเป็น 71.0 และ 73.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ทำให้เหนี่ยวนำให้เกิดการตกผลึกเร็วขึ้น (Jiang *et al.*, 2007; Lv *et al.*, 2008) เมื่อพิจารณาการเติมปริมาณกลีเซอรอลลงไป ในพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่า T_c ของ PBAT5G5C และ PBAT5G7C มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีค่า T_c เพิ่มขึ้นเป็น 80.0 และ 83.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

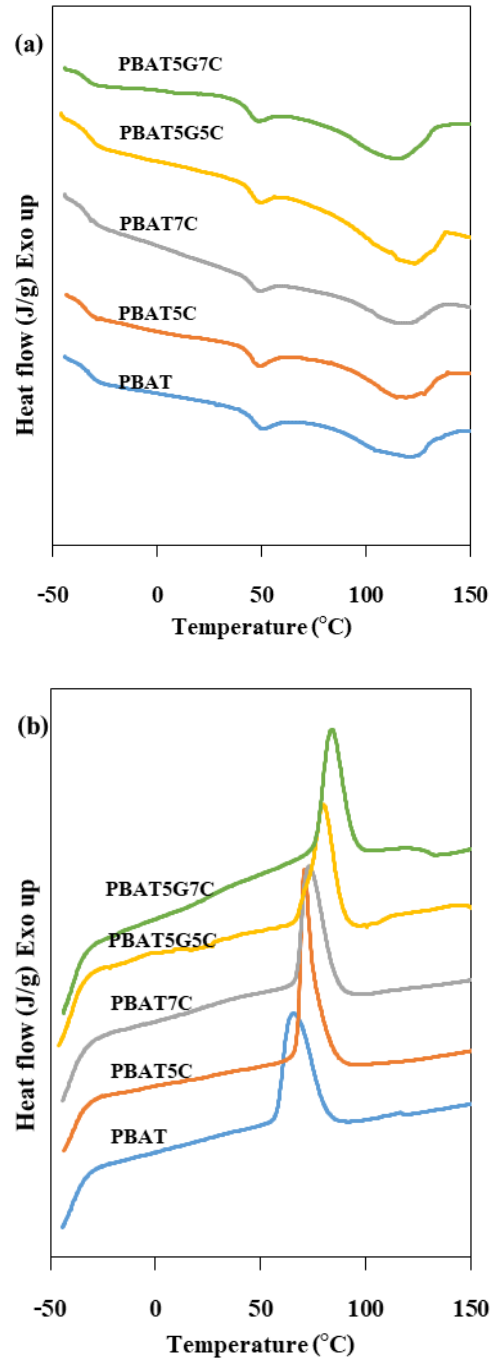


Figure 3 DSC thermograms of PBAT, PBAT/CaCO₃ and PBAT/Glycerol/CaCO₃ films: (a) heating cycle and (b) cooling cycle.

3.2.4 การตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ผลการตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ PBAT มีค่าประมาณ 1373.3 ลูกบาศก์เซนติเมตร/ตารางเมตร x 1 วัน (cm³/m².day) และเมื่อเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT พบว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าลดลง โดยเฉพาะที่ปริมาณ

ความเข้มข้นของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต 5 %wt มีค่าประมาณ 996.7 cc/m².day และเมื่อพิจารณาการเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 phr ลงในฟิล์มคอมโพสิตโดยเฉพาะ PBAT5G5C ค่าสภาพการซึมผ่านไต่ของก๊าซออกซิเจนลดลงเป็น 436.0 cm³/m².day ดังภาพที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT และการเติมกลีเซอรอลซึ่งช่วยให้การกระจายตัวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT ได้ดีขึ้น ช่วยลดพื้นที่ว่างของฟิล์มในการแพร่ผ่านก๊าซออกซิเจน และช่วยเพิ่มระยะทางในการเดินทางของก๊าซออกซิเจนผ่านฟิล์ม PBAT มากขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง (Aframehr *et al.*, 2017; Venkatesan and Rajeswari, 2019)

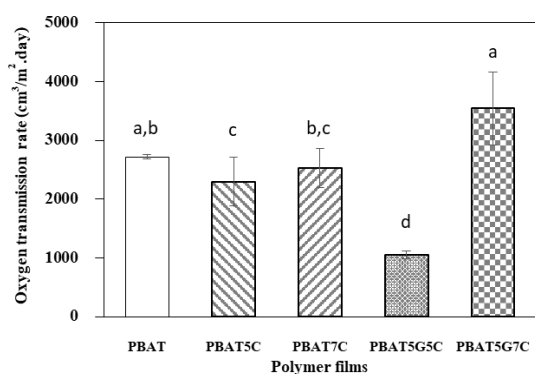


Figure 4 Oxygen transmission rate of PBAT, PBAT/CaCO₃, and PBAT/Glycerol/CaCO₃ films.

3.2.5 การตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ผลการตรวจสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของ PBAT มีค่าประมาณ 58.4 กรัมต่อตารางเมตร x 1 วัน (g/m².day) ซึ่งเมื่อทำการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 54.5–54.7 g/m².day และเมื่อพิจารณาการเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 phr โดยเฉพาะ PBAT5G5C ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเป็น 45.4 g/m².day ดังภาพที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการกระจายตัวได้ดี จึงช่วยลดพื้นที่ว่างของฟิล์มในการแพร่กระจาย และช่วยเพิ่มระยะทางในการซึมผ่านของไอน้ำ จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง (Hale *et al.*, 2001; Spence *et al.*, 2011)

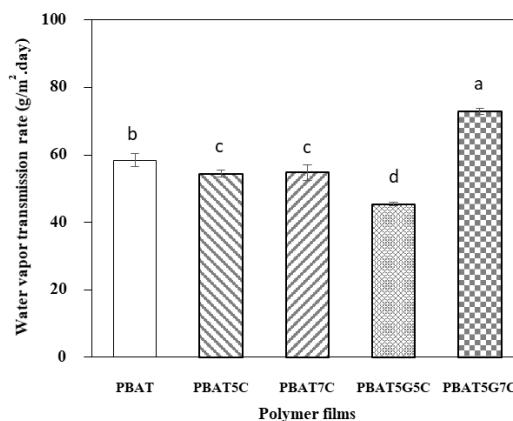


Figure 5 Water vapor transmission rate of PBAT, PBAT/CaCO₃, and PBAT/Glycerol/CaCO₃ films.

3.2.6 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพที่ 6 พบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 50-100 นาโนเมตร สำหรับพื้นผิวของ PBAT พบว่าเป็นฟิล์มพื้นผิวเรียบที่มีการหลอมเหลวของเม็ดพลาสติกได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมโพสิต PBAT5C ซึ่งมีการผสม CaCO₃ ที่ระดับความเข้มข้น 5 %wt พบว่าอนุภาคของ CaCO₃ มีการกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม PBAT แบบกระจายตัว และมีการเกาะกลุ่มกันเล็กน้อย โดยนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่กระจายตัวทั่ว PBAT นี้จะทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมแรง จึงทำให้สมบัติทางกลในโหมดแรงดึงสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเติมกลีเซอรอลปริมาณ 5 phr ลงในฟิล์มคอมโพสิต PBAT5G5C พบว่าพื้นผิวของฟิล์มมีความเรียบมากขึ้น และมีการกระจายตัวของ CaCO₃ ที่พื้นผิวของฟิล์ม PBAT มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์คอมโพสิต PBAT/CaCO₃ ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีหลอมไหลของ PBAT5G5C ที่มีค่ามากกว่า PBAT5C จึงทำให้ลักษณะของสัณฐานวิทยาเปลี่ยนแปลงไปและช่วยเพิ่มให้เกิดการผสมระหว่างเฟสหลัก PBAT (matrix phase) และเฟสเสริมแรง CaCO₃ (reinforcement phase) ได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงทางกลเพิ่มขึ้น และอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำลดลงด้วย

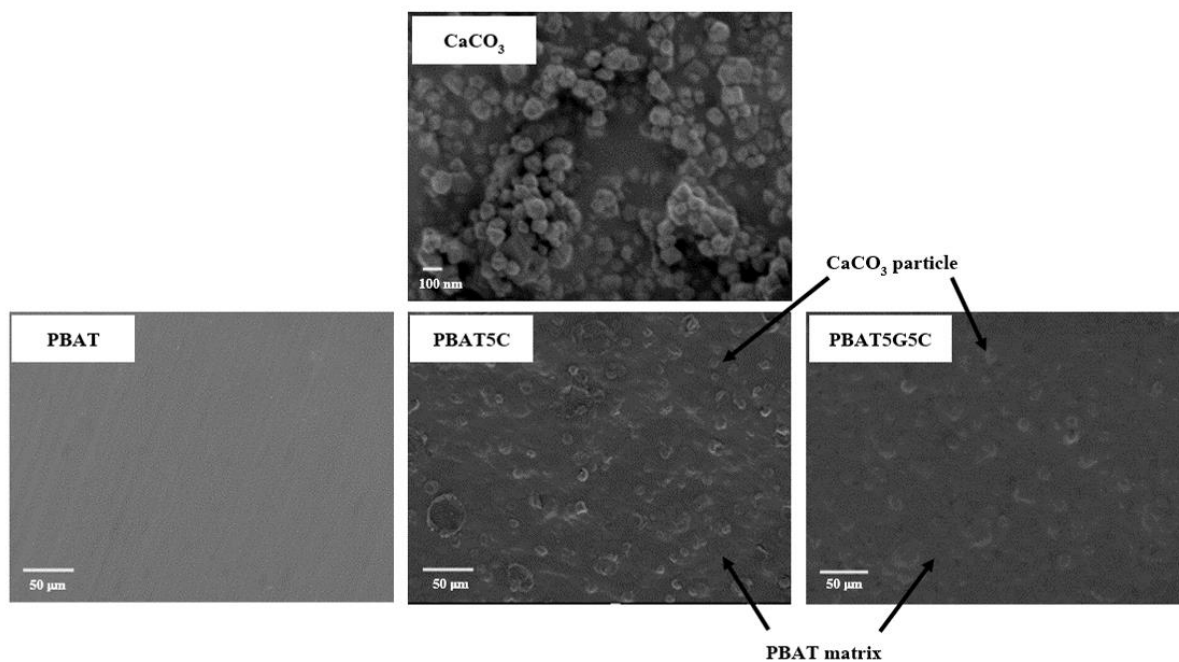


Figure 6 Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) of calcium carbonate particle ($\times 50,000$ magnification) and surface of PBAT, PBAT/ CaCO_3 , and PBAT/Glycerol/ CaCO_3 films ($\times 3,000$ magnification).

4. สรุป

จากการพัฒนาสูตรฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ด้วยการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและกลีเซอรอลเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพพอลิবিวทีลีนอะดิเปต-โค-เทเรฟทาเรท พบว่าเม็ดพลาสติก PBAT และ PBAT/ CaCO_3 สามารถทำการเป่าขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งสูตรที่มีการเติมกลีเซอรอลที่ปริมาณ 5 phr สำหรับการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลที่มากขึ้นไปที่ 10 phr ส่งผลให้ความแข็งแรงของพลาสติกหลอมเหลวต่ำจึงไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเติมกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติก-ไซเซอร์นอกจากช่วยให้ความหนืดลดลงและง่ายต่อกระบวนการขึ้นรูปแล้ว กลีเซอรอลยังช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลของฟิล์มด้วย โดยเฉพาะฟิล์ม PBAT5G5C มีค่าความต้านทานแรงดึงในแนว MD เท่ากับ 20.4 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าฟิล์ม PBAT และ PBAT/ CaCO_3 ($p < 0.05$) สำหรับสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ พบว่าการเติมนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจะช่วยเพิ่มสมบัติทางความร้อนให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิตทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวเพิ่มขึ้น และการเติมกลีเซอรอลในระบบโดยเฉพาะฟิล์ม PBAT5G5C มีสมบัติทางความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการเติมกลีเซอรอลช่วยทำให้เกิดกระจายตัวที่ดีของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับสมบัติด้านการซึมผ่าน

ของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์ม PBAT5G5C พบว่ามีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มเท่ากับ $436.0 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ และ $45.4 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ตามลำดับซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างฟิล์มอื่น ($p < 0.05$) จากเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น การเติมกลีเซอรอลช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตใน PBAT ได้ดีขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ว่างของฟิล์มในการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำลดลง หรือเพิ่มการขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำมากขึ้นซึ่งพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FESEM) ดังนั้นฟิล์ม PBAT5G5C จึงเหมาะสมกับการขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่สามารถประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้ เนื่องจากมีความแข็งแรงต่อแรงดึง มีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้น มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นสูง และมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำต่ำ ซึ่งก๊าซออกซิเจนและไอน้ำจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจัดว่าเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร หากป้องกันได้จะช่วยในการยืดอายุของอาหารได้นานขึ้น ฉะนั้นจึงเหมาะต่อการนำมาใช้บรรจุผลิตภัณฑ์อาหารประเภทที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบหรือมีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม เช่น เบเกอรี่ ขนมปังอบ คุกกี้ และขนมขบเคี้ยว เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และการอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการ การใช้เครื่องมือในการทดสอบวิเคราะห์ผลต่าง ๆ จากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และ คณะอุตสาหกรรมเกษตร คณะนวัตกรรมเกษตร สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

6. เอกสารอ้างอิง

- Aframehr, W. M. , Molki, B. , Heidarian, P. , Behzad, T. , Sadeghi, M. and Bagheri, R. 2017. Effect of calcium carbonate nanoparticles on barrier properties and biodegradability of polylactic acid. **Fibers and Polymers** 18(11): 2041-2048.
- Arruda, L. C. , Magaton, M. , Bretas, R. E. S. and Ueki, M.M. 2015. Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends. **Polymer Testing** 43(2): 27-37.
- Avolio, R., Castaldo, R., Avella, M., Cocca, M., Gentile, G. , Fiori, S. and Errico, M.E. 2018. PLA-based plasticized nanocomposites: Effect of polymer/ plasticizer/ filler interactions on the time evolution of properties. **Composites Part B: Engineering** 152: 267-274.
- Ayoub, A. , Treasure, T. , Hansen, L. , Nypelö, T. , Jameel, H. , Khan, S. , Chang, H.M. Martin, A. H. and Venditti, R.A. 2021. Effect of plasticizers and polymer blends for processing softwood kraft lignin as carbon fiber precursors. **Cellulose** 28(2): 1039-1053.
- Chan, C.M., Wu, J., Li, J.X. and Cheung, Y.K. 2002. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites. **Polymer** 43(10): 2981-2992.
- Chivrac, F. , Kadlecová, Z. , Pollet, E. and Avérous, L. 2006. Aromatic copolyester-based nanobiocomposites: elaboration, structural characterization and properties. **Journal of Polymers and the Environment** 14(4): 393-401.
- da Silva, N.M.C., Correia, P.R.C., Druzian, J.I., Fakhouri, F.M. , Fialho, R. L. L. and de Albuquerque,

E.C.M.C. 2017. PBAT/TPS composite films reinforced with starch nanoparticles produced by ultrasound. **International Journal of Polymer Science** 5: 1-10.

EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). 2011. Scientific Opinion on re-evaluation of calcium carbonate (E 170) as a food additive. **EFSA Journal** 9(7): 2318.

George, J., Poulouse, A.M., Chandran, A. and Somashekar, A. A. 2023. Influence of plasticizer on the dielectric properties of polypropylene/ carbon black composites. **Materials Today: Proceedings**. Available Source: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.297>, March 22, 2023.

Hale, W. R. , Dohrer, K. K. , Tant, M. R. and Sand, I. D. 2001. A diffusion model for water vapor transmission through microporous polyethylene/ CaCO₃ films. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 187-188: 483-491.

Hemsri, S., Puttiwanit, K., Saeaug, K. and Satung, P. 2020. Low density polyethylene/poly(butylene adipate-co-terephthalate) films: Effect of a compatibilizer on morphology and properties. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 965(1): 1-7.

Hernandez, R. J. 1997. Food Packaging Materials, Barrier Properties, and Selection, pp. 296-365. In Valentas, K.J., Rotstein, E. and Singh, R.P., eds. **Handbook of Food Engineering Practice**. CRC Press, New York.

Jiang, L., Zhang, J. and Wolcott, M.P. 2007. Comparison of polylactide/ nano-sized calcium carbonate and polylactide/ montmorillonite composites: reinforcing effects and toughening mechanisms. **Polymer** 48(26): 7632-7644.

Kim, H.S., Park, B.H., Choi, J.H. and Yoon, J.S. 2008. Mechanical properties and thermal stability of poly (L-lactide)/calcium carbonate composites. **Journal of Applied Polymer Science** 109(5): 3087-3092.

Li, G. , Shankar, S. , Rhim, J.W. and Oh, B. Y. 2015. Effects of preparation method on properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) films.

- Food Science and Biotechnology** 24(5) : 1679-1685.
- Liang, J.Z., Tang, C.Y., Zhou, L., He, L. and Tsui, C.P. 2011. Melt density and flow property of PDLLA/nano-CaCO₃ bio-composites. **Composites Part B: Engineering** 42(7): 1897-1900.
- Lv, Z., Hu, C., Xue, J. and Dou, T. 2008. Effect of zeolite 5A on the crystalline behavior of polypropylene (PP) in PP/ β -nucleating agent system. **Polymer composites** 29(12): 1291-1296.
- Nekhamanurak, B., Patanathabutr, P. and Hongsrphan, N. 2014. The influence of micro-/ nano-CaCO₃ on thermal stability and melt rheology behavior of poly (lactic acid). **Energy Procedia** 56: 118-128.
- Rodriguez-Gonzalez, F. J., Ramsay, B.A. and Favis, B. D. 2004. Rheological and thermal properties of thermoplastic starch with high glycerol content. **Carbohydrate Polymers** 58(2): 139-147.
- Sahebian, S. and Mosavian, M.H. 2019. Thermal stability of CaCO₃/polyethylene (PE) nanocomposites. **Polymers and Polymer Composites** 27(7): 371-382.
- Shaari, N.Z.K., Abd Rahman, N., Taha, A.R., Alauddin, S.M. and Akhbar, S. 2021. Enhancement of strength and flexibility of high- density polyethylene using rubber leaves. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 1053(1): 1-11.
- Shelesh-Nezhad, K., Orang, H. and Motallebi, M. 2013. Crystallization, shrinkage and mechanical characteristics of polypropylene/ CaCO₃ nanocomposites. **Journal of Thermoplastic Composite Materials** 26(4): 544-554.
- Spence, K.L., Venditti, R.A., Rojas, O.J., Pawlak, J.J. and Hubbe, M.A. 2011. Water vapor barrier properties of coated and filled microfibrillated cellulose composite films. **BioResources** 6(4): 4370-4388.
- Tuteja, A., Duxbury, P.M. and Mackay, M.E. 2007. Multifunctional nanocomposites with reduced viscosity. **Macromolecules** 40(26) : 9427-9434.
- Venkatesan, R. and Rajeswari, N. 2019. Nanosilica-reinforced poly (butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposites: preparation, characterization and properties. **Polymer Bulletin** 76(9): 4785-4801.
- Wei, D., Wang H., Xiao H., Zheng A. and Yang Y. 2015. Morphology and mechanical properties of poly(butylene adipate- co- terephthalate) potato starch blends in the presence of synthesized reactive compatibilizer or modified poly(butylene adipate- co- terephthalate) . **Carbohydrate Polymers** 123: 275-282.
- Yang, K., Yang, Q., Li, G., Sun, Y. and Feng, D. 2006. Morphology and mechanical properties of polypropylene/calcium carbonate nanocomposites. **Materials Letters** 60(6): 805-809.
- Yimnak, K., Thipmanee, R. and Sane, A. 2020. Poly (butylene adipate-co-terephthalate)/thermoplastic starch/zeolite 5A films: Effects of compounding sequence and plasticizer content. **International Journal of Biological Macromolecules** 164: 1037-1045.