

เม็ดพลาสติกชีวภาพผสมกากกาแฟ : จากวัสดุเหลือใช้สู่บรรจุภัณฑ์รักษ์โลก

Bioplastic Pellets Mixed with Spent Coffee Grounds: From Waste Materials to Eco-Friendly Packaging

กนกศักดิ์ ลอยเลิศ^{1*} โกเมศ สัตยาวิรุฬ¹ สุกัญญา นิตยอนต์¹ ศิริพร เตังรัง¹ นภัตสร เลียบวัน¹
Kanoksak Loiloes^{1*} Komate Satyawut¹ Sukanya Nitayon¹ Siriporn Tengrung¹
Napatsorn Leabwan¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำกากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาเป็นส่วนผสมในพลาสติกชีวภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าของกากกาแฟ และประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหาร ดำเนินการทดลองระหว่างเดือนตุลาคม 2565 ถึงเดือนกันยายน 2567 ณ กองวิจัยพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของกากกาแฟ พบว่ากากกาแฟประกอบด้วยคาร์บอน 70.87% และออกซิเจน 25.92% เป็นองค์ประกอบหลัก จากการทดลองสกัดกากกาแฟด้วยเอทานอล ความเข้มข้น 95% อบที่อุณหภูมิ 105°C จนแห้งสนิท ขึ้นรูปเม็ดพลาสติกผสม (PLA) ด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติก ช่วงอุณหภูมิของบาร์เรล 190-215°C แปรปริมาณกากกาแฟ 0 3 5 7 9 11 และ 13% (สูตร P0-P6) เพื่อคัดเลือกเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร จากการทดลอง พบว่าสูตร P3 รูปร่างเม็ดพลาสติกผสมรูปทรงสมมาตร (ทรงกระบอก) ค่าการหลอมไหลให้ค่าสูงสุดที่ 300 ก./10นาที่ เหมาะสำหรับการขึ้นรูปขึ้นงาน การสูญเสียมวลหรือการสลายตัว 97.30% และน้ำหนักคงเหลือที่ 600°C 2.72% จากนั้นขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก พบว่า ค่าแรงเชิงกล คือค่าการต้านแรงดึงขาด 37.21 เมกะปาสคาล ส่วนการยืดตัวของชิ้นทดสอบ 4.44% โมดูลัสของยัง 1.52 กิกะปาสคาล และความแข็ง 79.98 เอชเอสดี ค่าพลังงานพื้นผิว 36.34 มิลลิวัตต์/ม. ส่งผลต่อการเกิดพันธะมีขั้วที่ต่ำ และมีค่ามุมสัมผัสโดยภาพรวมดีที่สุด โดยมุมสัมผัสหยดน้ำที่ 25 และ 60°C เท่ากับ 86.4° และ 80.3° ตามลำดับ มุมสัมผัสเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 64.9° และมุมสัมผัสไดโอไอโดมีเทน เท่ากับ 43.7° ส่วนการดูดซับน้ำของชิ้นงานระยะเวลา 14 สัปดาห์ พบว่า ชิ้นงานสูตร P1-P6 มีแนวโน้มการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เติมลงไปพลาสติก PLA สำหรับการแพร่กระจายของสารภายใต้เงื่อนไขที่ทดสอบ สนับสนุนการใช้งานสำหรับการสัมผัสอาหารด้วยสารจำลองอาหาร กลุ่มน้ำกรด และแอลกอฮอล์เจือจางที่ 60°C และกลุ่มไขมันที่ 25°C ทั้งนี้ ไม่ควรขยายผลไปสู่การสัมผัสอาหารประเภทไขมันที่อุณหภูมิสูงกว่าเงื่อนไขทดสอบเมื่อใช้งานจริง จากนั้นทดลองขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก ได้แก่ ถ้วยและช้อนส้อม พบว่า สามารถฉีดขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ได้สมบูรณ์ โดยมีต้นทุนการผลิตเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟ 14.88 บาท/100 ก.

คำสำคัญ: บรรจุภัณฑ์; เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก; เม็ดพลาสติก; กากกาแฟ

¹ กองวิจัยพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹ Postharvest and Processing Research and Development Division, Phahonyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

Abstract

This research studied the utilization of spent coffee grounds, an agricultural waste, as an additive in bioplastics to increase the value of spent coffee grounds and apply them as packaging for food products. The trial was conducted between October 2022 and September 2024 at the Postharvest and Processing Research and Development Division, Department of Agriculture. Studying the elemental analysis and main components of spent coffee grounds found that spent coffee grounds contain 70.87% carbon and 25.92% oxygen. In an experiment involving the extraction of spent coffee grounds with 95% ethanol, drying at a temperature of 105°C until completely dry, and forming mixed plastic pellets (PLA) using a plastic pellet mixer. The barrel temperature range was 190-215°C with spent coffee grounds contents of 0%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, and 13% (P0–P6). To select the plastic pellets mixed with spent coffee grounds that have the most suitable properties for application as food packaging, experiments were conducted. It was found that formula P3 has a symmetrical (cylindrical) shape. The maximum melt flow value is 300 g/10 min, which is suitable for shaping the workpiece. The mass loss or degradation rate is 97.30%, while residual weight at 600°C is 2.72%. The samples were then shaped using a plastic injection molding machine. The mechanical strength properties measured were as follows: tensile strength at break of 37.21 MPa, elongation of 4.44%, Young's modulus of 1.52 GPa, and hardness of 79.98 HSD. The surface energy formula P3 has a value of 36.34 mN/m, resulting in low polar bond formation, and has the best overall contact angle value. The water drop contact angles at 25 and 60°C were 86.4° and 80.3°, respectively. The ethylene glycol contact angle was 64.9° and the diiodomethane contact angle was 43.7°. As for the water absorption of the workpieces over 14 weeks, it was found that the P1-P6 formula workpieces tended to increase water absorption. Increased with the amount of spent coffee grounds added to PLA plastic. The migration limits of substances under specified conditions confirm compliance for food contact with aqueous, acidic, and low-alcoholic simulants at 60°C, and fatty food simulants at 25°C. However, it is strictly advised that these findings not be extrapolated to fatty food applications at temperatures exceeding the tested parameters during actual usage. The material was molded into food containers, specifically cups and cutlery, using a plastic injection molding machine. The results showed that the packaging could be perfectly formed. The production cost for the spent coffee grounds infused plastic resin was 14.88 THB per 100 grams.

Keywords: Packaging; plastic injection molding machine; plastic pellet; Spent coffee grounds.

บทนำ

อุตสาหกรรมกาแฟไทยมีมูลค่าสูงถึง 30,000 ล้านบาท ปริมาณการบริโภคกาแฟโดยเฉลี่ยของคนไทยอยู่ที่ 1.2 กิโลกรัม/คน/ปี หรือประมาณ 300 แก้ว/คน/ปี และคาดว่าแนวโน้มของการบริโภคกาแฟเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (Tangtenglam and Chatkaewnapanon, 2022) การบริโภคกาแฟ 1 แก้วจะสร้างกากกาแฟประมาณ 9-18 ก. ส่งผลให้ร้านกาแฟทั่วไปมีปริมาณกากกาแฟเหลือทิ้งกว่า 20 กก./วัน/สาขา ซึ่งสามารถประมาณกากกาแฟเหลือทิ้งจากทั่วประเทศมากกว่า 290,000 ตัน/ปี (อีลส์คอฟฟ์, 2568) กากกาแฟมีความชื้นและน้ำหนักสูง ทำให้การขนย้ายและการกำจัดมีต้นทุนสูง หากไม่มีระบบจัดการที่เหมาะสมอาจก่อภาระด้านสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม กากกาแฟเป็นชีวมวลที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ในแนวทาง upcycle โดยการคัดแยก เก็บรวบรวม และทำให้แห้ง เพื่อเตรียมเป็นวัตถุดิบเสริมในวัสดุพอลิเมอร์ นำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่ม เช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์จากสีธรรมชาติของกากกาแฟ และลดการพึ่งพาวัสดุใหม่จากปิโตรเคมี

พลาสติกโดยทั่วไปที่ผลิตนั้นเป็นแบบวัสดุใช้ครั้งเดียวทิ้ง (single-use materials) ผลิตจากปิโตรเคมีไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ส่วนใหญ่ถูกฝังกลบหรือทิ้งลงในแม่น้ำไหลลงสู่มหาสมุทร ส่งผลต่อการปนเปื้อนในมหาสมุทรระดับอนุภาคไมโคร แม้กระนั้นยังมีความพยายามในการลดผลกระทบของพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพต่อสภาพแวดล้อมในระดับสากล โดยการหันมาใช้วัสดุรีไซเคิล วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ รวมถึงบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพแทนพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมีภายในปี ค.ศ. 2030 พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจและการลงทุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถพัฒนาได้ทั้งในรูปแบบชีวภาพและ/หรือย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับชนิดวัสดุและเงื่อนไขการทดสอบ (Oliveira et al., 2021) อีกทั้งการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนมีศักยภาพลดการพึ่งพาฟอสซิล และอาจช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในบางกรณีเมื่อพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Youngjae and Kim, 2014)

PLA เป็นวัสดุชีวฐานที่มีการผลิตและใช้งานสูง สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการเทอร์โมพลาสติกทั่วไป โดยมี Tg ประมาณ 58°C ในขณะที่ Tg ของ LDPE คือ -25°C ค่า Tg ที่สูงส่งผลให้ PLA ทนอุณหภูมิสูง และมีความแข็งแรงมากกว่า LDPE (Gordon, 2013) การพัฒนา PLA สำหรับงานฉีดขึ้นรูปที่ต้องการความคงรูปและรอบการผลิตสั้น จำเป็นต้องเลือกเกรดเรซินให้เหมาะสม หรือใช้สารก่อผลึกเพื่อส่งเสริมการตกผลึกระหว่างการขึ้นรูป กระบวนการฉีดเข้าแม่พิมพ์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้แพร่หลายสำหรับผลิตภัณฑ์รูปทรงซับซ้อนและความแม่นยำสูง อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุชีวภาพที่ผสมสารเติมหรือเส้นใยสั้นได้ (รังรอง, 2557; Chaitanya and Singh, 2017) การผสม PLA กับเทคโนโลยีและส่วนผสมต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมี เชิงกล กายภาพ และชีวภาพ เป็นแนวทางสำคัญในการขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุชีวฐาน และลดการพึ่งพาพลาสติกจากปิโตรเคมี โดยการทดแทนการใช้เรซินปิโตรเคมีบางส่วนและลดปริมาณพลาสติกสังเคราะห์ที่เข้าสู่ระบบของเสียซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Kaci et al., 2013)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพัฒนาเม็ดพลาสติกชีวภาพ PLA ผสมกากกาแฟ เพื่อฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานต้นแบบสำหรับบรรจุภัณฑ์ โดยใช้กากกาแฟซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นสารเติมเพื่อเพิ่มมูลค่าและลดการทิ้งของเสีย พร้อมสร้าง “เอกลักษณ์ทางประสาทสัมผัส” ของบรรจุภัณฑ์ผ่าน โทนสีธรรมชาติและกลิ่นกาแฟอ่อน ๆ ซึ่งมีศักยภาพในการเพิ่มการยอมรับของผู้บริโภคเมื่อพิจารณาพร้อมกับสมบัติการใช้งานของ

วัสดุด้านการขึ้นรูปและความคงรูปของชิ้นงาน ทั้งนี้ยังสะท้อนแนวคิด upcycle และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าเพื่อสนับสนุนภาพลักษณ์บรรจุกษัตริย์โลก

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ

1.1 คัดเลือกกากกาแฟเหลือทิ้งโดยไม่มีสิ่งปลอมปนสำหรับเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตบรรจุภัณฑ์ โดยทำการผึ่งกากกาแฟให้แห้งหรืออบที่อุณหภูมิ 60°ซ เป็นเวลา 3 ชม. หรือจนกว่ากากกาแฟจะแห้ง

1.2 นำกากกาแฟที่ได้จากข้อ 1.1 ร้อนด้วยตะแกรงขนาด 100 เมช (เบอร์100) สำหรับเตรียมเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ หลังจากทำการร่อนกากกาแฟเสร็จเก็บไว้ในถุงพลาสติก LDPE แบบ ziplock เพื่อกันความชื้น

1.3 วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของกากกาแฟด้วยชุดเครื่องมือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FESEM) โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของกากกาแฟที่กำลังขยาย 3 ระดับ คือ 100 1,000 และ 4,000 เท่า และเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (Energy dispersive X-ray Spectrometer: EDS)

1.4 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกากกาแฟ ได้แก่ การละลายในน้ำร้อน การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% ลิกนิน ปริมาณเถ้า ตามมาตรฐานการทดสอบอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อและกระดาษ (TAPPI) เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ตามวิธีการทดสอบของ National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-510-42618 method)

1.5 สกัดน้ำมันออกจากกากกาแฟด้วยเอทานอลชนิดเกรดอาหาร (food grade) ความเข้มข้น 95% โดยใช้กากกาแฟ 300 ก./เอทานอล 2,000 มล. ต้มที่อุณหภูมิ 90°ซ เป็นเวลา 1 ชม. (ระบบปิด) จากนั้นแยกกากกาแฟจากเอทานอลที่ต้ม นำกากกาแฟที่ได้อบที่อุณหภูมิ 105°ซ จนแห้งสนิท รอให้เย็นและเก็บในถุงลามิเนต ชนิดฟิล์มอาบไอโลหะ (Metalized film)

2. การผลิตเม็ดพลาสติกผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน

2.1 การผลิตเม็ดพลาสติกผสม

2.1.1 ผลิตเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติก (Plastic compounding machine) ช่วงอุณหภูมิของบาร์เรล 190-215°ซ (อบเม็ดพลาสติก PLA ที่อุณหภูมิ 80°ซ อย่างน้อย 6 ชม. ก่อนการผลิตเม็ดพลาสติกผสม) วางแผนการทดลองแบบ RCBD 7 กรรมวิธี 3 ซ้ำ ดังนี้

กรรมวิธีที่ 1 เม็ดพลาสติก PLA (neat PLA; ชุดควบคุม)

กรรมวิธีที่ 2 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 3% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

กรรมวิธีที่ 3 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 5% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

กรรมวิธีที่ 4 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 7% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

กรรมวิธีที่ 5 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 9% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

กรรมวิธีที่ 6 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 11% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

กรรมวิธีที่ 7 เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 13% โดยน้ำหนักของกากกาแฟ

(ใช้สัญลักษณ์แทนกรรมวิธีที่ 1 คือ P0 ถึงกรรมวิธีที่ 7 คือ P6 ตามลำดับ)

2.1.2 ศึกษาสมบัติของเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟ (ยกเว้นกรรมวิธีที่ 1 ไม่ต้องผสมเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องผสมเม็ดพลาสติก ทดสอบสมบัติเม็ดพลาสติกได้โดยตรง) โดยบันทึกข้อมูล ดังนี้ การหลอมไหลของเม็ดพลาสติก (MFR) (ตามวิธีการทดสอบของ Yodthong and Srihanam, 2015) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (TGA) (ตามวิธีการทดสอบของ Xiao et al., 2022)

2.2 การขึ้นรูปชิ้นงาน (dog bone)

2.2.1 นำเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟจากข้อ 2.1.1 รวมถึงชุดควบคุม ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) ทั้งหมด 7 กรรมวิธี 3 ซ้ำ โดยตั้งอุณหภูมิของบาร์เรล 180-190-195-180-220-220-180°C แรงดันในการฉีด 110.0 เมกะปาสกาล อุณหภูมิแม่พิมพ์ 120°C สำหรับระยะเวลาในการฉีด (pack time) แรงดันฉีด (packing pressure) และระยะเวลาการหล่อเย็น (cooling time) คือ 8 วินาที 40 เมกะปาสกาล และ 40 วินาที ตามลำดับ

2.2.2 เปิดแม่พิมพ์ และปลดชิ้นงานจากแม่พิมพ์ จากนั้นแยกรูปแบบทางวิ่งของพลาสติก (runner layout) ออกจากชิ้นงาน เก็บชิ้นงาน (specimen) ไว้ในถุงพลาสติก LDPE แบบ ziplock สำหรับนำไปทดสอบ

2.2.3 ศึกษาสมบัติของชิ้นงาน ดังนี้ แรงดึงขาด %การยืดตัว (ASTM D638-14) ความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) (ISO 180) ความแข็งของพอลิเมอร์ (shore D) (ASTM D-2240) การดูดซับน้ำ (ตามวิธีการของ Delicado et al., 2022) และการแพร่กระจาย/การเคลื่อนย้ายสารออกจากอาหาร (JETRO 2008)

2.2.4 คัดเลือกกรรมวิธีที่ให้สมบัติที่ดีที่สุด 1 กรรมวิธีสำหรับผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์

3. การผลิตบรรจุภัณฑ์

นำเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟจากกรรมวิธีที่ให้สมบัติที่ดีที่สุด 1 กรรมวิธี ขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine) โดยใช้สภาวะการขึ้นรูปเช่นเดียวกับ ข้อ 2) เปิดแม่พิมพ์ และปลดชิ้นงานจากแม่พิมพ์ เก็บชิ้นงาน (specimen) ไว้ในถุงพลาสติก LDPE แบบ ziplock

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟ

1.1 วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของกากกาแฟ

วิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบของกากกาแฟด้วยชุดเครื่องมือ FESEM/EDS พบว่า โครงสร้างของกากกาแฟที่สกัดและไม่สกัดน้ำมันกากกาแฟออกที่กำลังขยาย 3 ระดับ คือ 100 1,000 และ 4,000 เท่ากากกาแฟที่สกัดน้ำมันออก พื้นผิวของกากกาแฟที่สกัดน้ำมันออกขรุขระน้อยกว่ากากกาแฟที่ไม่ผ่านการสกัดน้ำมัน (Figure 1) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าระหว่างกากกาแฟทั้งสองแบบ พบว่า สีของกากกาแฟที่สกัดน้ำมันออกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นเกิดจากการดึงเอาน้ำมันกากกาแฟออก โดยสีของน้ำมันที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพจะยังคงเป็นสีน้ำตาล และมีกรดไขมันอิสระปนอยู่มาก (Xiao et al., 2022) เมื่อวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมีพบว่า การมีคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบที่สูงส่งผลให้กากกาแฟมีศักยภาพในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ดีรวมตัวกับพอลิเมอร์ได้ดี และสามารถทนต่ออุณหภูมิในการทดสอบขึ้นรูปพอลิเมอร์ได้ ส่วนวัตถุดิบสำหรับการผลิตการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ที่ดี คือ ต้องมีความสามารถในการรวมตัวกับพอลิเมอร์ได้ดี และทน

อุณหภูมิในการหลอมขึ้นรูปพอลิเมอร์เนื่องจากมี คาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณที่สูง โดยพบปริมาณธาตุ ดังนี้ คาร์บอน (C) 70.87% ออกซิเจน (O) 25.92% โพแทสเซียม (K) 2.35% แคลเซียม (Ca) 0.62% และแมกนีเซียม (Mg) 0.24%

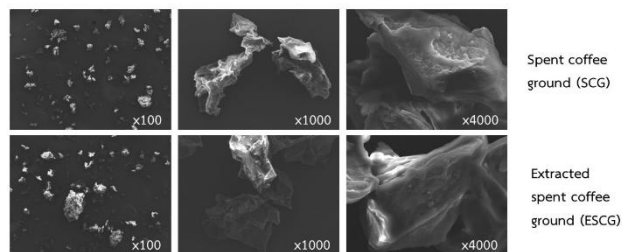


Figure 1 Field emission scanning electron microscopy (FESEM) images, taken at 100x, 1000x, 4000x and with scale markers of 100 μ m, 10 μ m and 1 μ m, of the fracture surfaces of spent coffee grounds (SCG) and extracted spent coffee grounds (ESCG)

1.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกากกาแฟ

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟสำหรับเป็นวัตถุดิบในการผลิตบรรจุภัณฑ์ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีบ่งชี้สมบัติเบื้องต้นของกากกาแฟ เช่น การละลายในน้ำร้อน และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% รวมถึงปริมาณลิกนินเพื่อเป็นแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กากกาแฟเป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ โดยพบ เซลลูโลส 5.72% เฮมิเซลลูโลส 29.49% การละลายในน้ำร้อน 13.7% การละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1% 50.3% ลิกนิน 32.2% และปริมาณเถ้า 1.3%

การสกัดกากกาแฟเพื่อแยกเอาน้ำมัน(ที่ยังไม่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี) ออกจากกากกาแฟ พบว่า อัตราส่วนกากกาแฟ 100 ก. ได้น้ำมัน 4 มล. และกากกาแฟที่สกัดได้ 80 ก. เนื่องจาก การสกัดแยกน้ำมันออกจากกาแฟนั้นเป็นการแยกสารประกอบต่างๆ และกรดไขมันอิสระที่ได้ ออกมาในปริมาณค่อนข้างสูงด้วยสารที่มีขี้ ส่งผลให้ผงกากกาแฟที่ได้ไม่เกิดกลิ่นหืนเพื่อใช้สำหรับเป็น วัตถุดิบตั้งต้น (raw material) ในกระบวนการแปรรูป รวมถึงสามารถเก็บรักษากากกาแฟในระยะ เวลานานยิ่งขึ้น (Al-Hamamre et al., 2012)

2. การผลิตเม็ดพลาสติกผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน

จากการทดลองสามารถฉีดเม็ดพลาสติกผสม (compound) จำนวน 6 สูตร ได้แก่ สูตร P1- P6 ส่วน neat PLA (P0) ไม่ต้องฉีดซ้ำ เนื่องจากเม็ดพลาสติกที่นำมาฉีดนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 127,300 ดาลตัน (เกรด 4043D) (Ortenzi et al., 2020) ลักษณะของเม็ดพลาสติกผสมที่ผลิตได้เป็นรูปทรงกระบอก เมื่อผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก ยกเว้นเม็ดพลาสติกผสมสูตร P5 และ P6 เม็ดพลาสติกผสมที่ได้รูปร่างแบน เกิดจากการผสมกากกาแฟในสัดส่วนมากจนเกินไป ส่งผลต่อการฉีดผ่านหัวตาย (die) แต่ยังสามารถผลิตเม็ดพลาสติกผสมได้ (Figure 2) โดยพอลิเมอร์เกรดนี้มีน้ำหนักโมเลกุล 127,300 ดาลตันเหมาะสำหรับการขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแม่พิมพ์ วัสดุหลอมของ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประพฤติตัวเหมือน ของไหลนอนนิวโตเนียน (non-Newtonian fluids) ประเภทซูโดพลาสติก (pseudoplastic) (รังรอง, 2557) ส่วนค่าการหลอมไหล (MFR) ของเม็ดพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (P0-P3) จากนั้นลดลงและเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง (P4-P6) โดยสูตร P3 ให้ค่าสูงสุดที่ 300 ก./10นาที เกิดจาก

การเติมปริมาณกากกาแฟในอัตราส่วนที่ต่างกัน รวมถึงสกรูสำหรับช่วยหลอมเม็ดพลาสติกหลอมพลาสติกได้ยากและใช้เวลานานจากปริมาณกากกาแฟที่ผสมในเม็ด PLA ปริมาณที่มากเกินไป (Figure 3) โดยการเพิ่มปริมาณกากกาแฟสูงขึ้นส่งผลต่อความหนืดของวัสดุหลอม (PLA) เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราเย็นลดลง จนถึงจุดสมดุล ค่าความหนืดของวัสดุหลอมลดลง อัตราเย็นเพิ่มขึ้น (รังรอง, 2557)

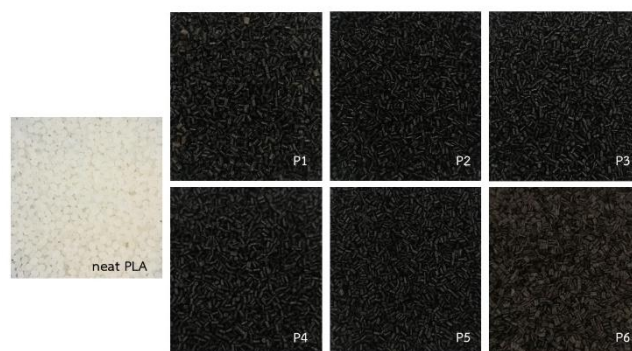


Figure 2 The physical appearance of extruded PLA composite strands compared with neat PLA: (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

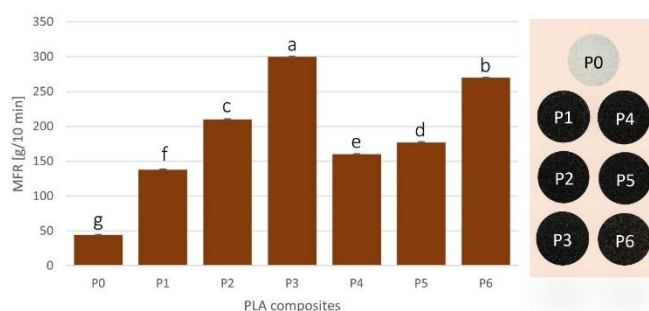


Figure 3 The effect of ESCG contents on the melt flow rate (MFR) of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG) pellets: (P0) neat PLA; (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

ปริมาณความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เหลือ (Residual weight) กับอุณหภูมิของพลาสติกผสมกากกาแฟในปริมาณ 3 5 7 9 11 และ 13% ที่อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{นาท}$ พบว่า เมื่อปริมาณกากกาแฟเพิ่มขึ้น การสูญเสียมวลหรือการสลายตัวลดลง (degradation) และการสูญเสียน้ำหนักลดลง เพื่อให้ทราบถึงการสลายตัวของพลาสติกจนเหลือแต่กากกาแฟ (Table 1) โดยช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ neat PLA (P0) อยู่ในช่วง $300\text{--}390^{\circ}\text{C}$ เมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟสูงขึ้นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกผสม P1-P6 อยู่ในช่วง $280\text{--}380^{\circ}\text{C}$ (Figure 4a) เนื่องจากการเติมกากกาแฟจะลดความเสถียรทางความร้อนของ PLA ลง (Delicado et al., 2021) และความชื้นที่อยู่ภายในพลาสติกถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกช่วงอุณหภูมิ 120°C (hydrophilic group) ในขณะที่เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบที่สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ($>200^{\circ}\text{C}$) ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของสาร (Xiao et al., 2022) ในการทดลองได้สกัดน้ำมันจาก

กากกาแฟออกอาจส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในการสลายตัวของสาร (peak temperature) สลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้นได้ โดยเอมิเซลลูโลสสลายตัว 280°ซ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเซลลูโลสสลายตัว 364.33°ซ และลิกนิน สลายตัวอุณหภูมิมากกว่า 364.33°ซ (Figure 4b) สอดคล้องกับ Xiao et al.(2022) กล่าวว่า การสลายตัวเอมิเซลลูโลสเกิดในช่วงอุณหภูมิ 200-340°ซ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเซลลูโลสสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 310-380°ซ และการสลายตัวของลิกนินเกิดในช่วงอุณหภูมิกว้างมากที่ 200-550°ซ และเมื่อพิจารณาการสลายตัวอย่างสมบูรณ์ของพลาสติกทุกสูตร พบว่า การสลายตัวเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 300°ซ โดยปริมาณกากกาแฟที่เติมในปริมาณน้อยในสูตร P1-P3 อุณหภูมิการสลายตัวค่อนข้างสูง ส่งผลต่อการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ (Table 1) เนื่องจากวัสดุที่มีความคงตัวทางความร้อนใกล้เคียงกับ neat PLA เพียงพอสำหรับการแปรรูปวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) (Delicado et al., 2021) โดยการวิเคราะห์ TGA/DTG เป็นการวิเคราะห์หาความเสถียรทางความร้อน องค์ประกอบของส่วนผสมและพฤติกรรมการสลายตัวของพลาสติก

Table 1 Thermal degradation parameter, degradation, and residual weight form TGA and DTG analysis for neat PLA and its composites

sample	Peak temperature (°C)	Degradation (%)	Residual weight at 600 °C (%)
P0	374.00	99.53	0.47
P1	364.33	98.47	1.48
P2	358.50	97.76	2.26
P3	357.67	97.30	2.72
P4	351.00	95.79	4.24
P5	348.17	95.17	4.90
P6	347.17	94.54	5.12

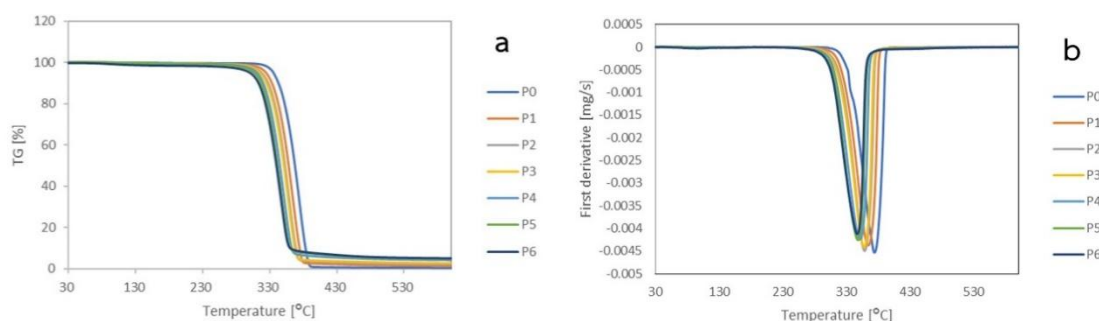


Figure 4 TGA/DTG curves for neat PLA and its composites. (a) Thermogravimetric analysis (TGA) curves and (b) first derivative (DTG) of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG) pellets: (P0) neat PLA; (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

เทอร์โมแกรมที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของความร้อน (heat flow) และอุณหภูมิหรือกราฟ DSC ของเม็ดพลาสติกผสมนั้น พบว่า เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงประเภทแบบคายความร้อน เนื่องจากการเกิดผลึก (Tc) ขึ้นจากเม็ดพลาสติกทั้ง 7 สูตรที่มีการปล่อยพลังงานความร้อนออกมา (Figure 5) โดยการเพิ่มปริมาณกากกาแฟเป็นส่วนผสมในเม็ดพลาสติกส่งผลให้ค่าอุณหภูมิสถานะคล้าย

แก้ว (T_g) ลดลงจาก 65.18 เหลือ 62.35 $^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากน้ำมันกากกาแฟที่อาจจะลดลงเหลืออยู่บางส่วน ส่งผลต่อพอลิเมอร์ฐาน (Delicado et al., 2021) และพบอุณหภูมิการเกิดผลึกให้ความร้อน (T_{cc}) จากการเติมกากกาแฟในเม็ดพลาสติก (P1-P6) มีค่า 156.53 ถึง 158.03 $^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้เกิดผลึก (T_c) ของเม็ดพลาสติก PLA ลดลงด้วย ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ลดลงเล็กน้อยจากสูตร P1-P6 เปรียบเทียบกับสูตร P0 (Table 2)

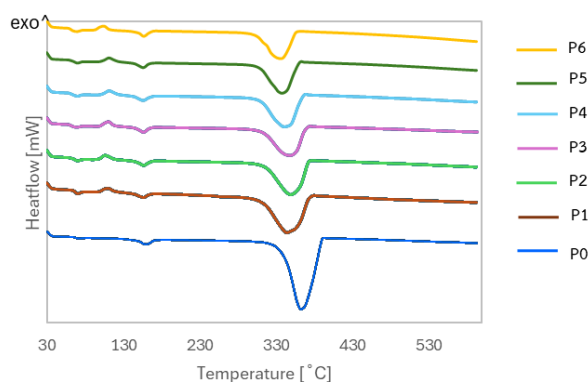


Figure 5 Differential scanning calorimetry (DSC) thermograms of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG) pellets containing second heating

Table 2 Glass transition temperature (T_g), crystallization temperature (T_c), cold crystallization temperature (T_{cc}) and melting temperature (T_m) from DSC analysis for neat PLA and its composites

sample	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)
P0	65.18	69.63	-	159.77
P1	64.76	99.96	108.85	156.53
P2	64.04	98.80	107.38	157.97
P3	63.60	101.56	109.32	158.01
P4	62.72	101.74	112.03	156.82
P5	63.89	101.84	111.49	156.83
P6	62.35	94.73	103.22	158.03

จากการทดลองขึ้นรูปชิ้นงาน (dog bone shape) จำนวน 7 สูตร จากเม็ดพลาสติก PLA และเม็ดพลาสติกผสม (compound) พบว่า สามารถขึ้นรูปขึ้นทดสอบได้จำนวน 7 สูตร (P0-P6) โดยสูตร P4-P6 ขึ้นรูปได้ยากกว่าสูตรที่เหลือ เนื่องจากเม็ดพลาสติกผสมมีลักษณะแบนและขรุขระจากปริมาณของกากกาแฟที่มากเกินไป รวมถึงใช้ระยะเวลาในการขึ้นรูปที่นานอีกด้วย (Figure 6) จากนั้นทดสอบแรงดึงขาดและการยืดตัวของชิ้นงาน พบว่า ค่าความต้านแรงดึงขาดจากสูตร P1-P6 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับ P0 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกากกาแฟส่งผลให้การยืดตัวของโมเลกุล PLA ลดลง ส่วนการยืดตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มคงที่ในสูตร P1-P3 เนื่องจากผลของรูปร่างเม็ดพลาสติกผสมของสูตร P1-P3 รูปทรงสมมาตร (ทรงกระบอก) เสถียรกว่า P4-P6 (แบนและขรุขระ) (Figure 7) โดยแรงยืดเหนียวของพันธะของพลาสติก PLA จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟที่มากเกินไป รวมถึงเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของกากกาแฟทำให้ความต้านแรงดึงขาดลดลง 40% ส่งผลต่อการนำไปใช้

เป็นวัสดุเชิงประกอบได้ไม่เต็มที่ (Xiao et al., 2022) ทดสอบค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของชิ้นงาน พบว่า มอดูลัสของยังสูตร P3 มีค่า 1.52 กิกะปาสคาล โดยค่ามอดูลัสของยังที่สูงส่งผลให้เกิดความแข็งตึง (stiffness) สูงตามไปด้วย ทำให้วัสดุนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างวัสดุได้น้อย ซึ่งค่าที่สูงย่อมดีกว่าค่าที่ต่ำ ส่วนค่าความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงาน พบว่า สูตร P3 มีค่า 79.98 เอชเอสดี (Table 3) ถึงแม้สูตร P5 จะมีค่าสูงสุดแต่เนื่องจากสูตร P4-P6 ลักษณะรูปร่างเม็ดพลาสติกผสมที่ไม่สมมาตร และการขึ้นรูปที่ยาก ส่งผลโดยตรงต่อการขึ้นรูปชิ้นงาน



Figure 6 Visual appearance of the injection-molded pieces of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG): (P0) neat PLA; (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

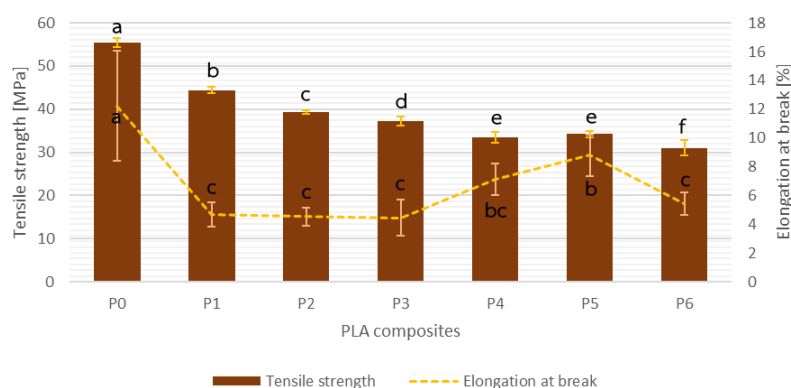


Figure 7 The effect of ESCG contents on the tensile strength and elongation at break of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG) pellets: (P0) neat PLA; (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

Table 3 Mechanical properties of the injection-molded pieces of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG)

sample	Modulus (GPa)	Hardness (HSD)
P0	1.48cd	80.21b
P1	1.45d	79.71bc
P2	1.41e	79.98bc
P3	1.52bc	79.98bc

sample	Modulus (GPa)	Hardness (HSD)
P4	1.52bc	79.12bc
P5	1.59a	81.46a
P6	1.53b	78.85c

^{a-e} Difference letter in the same column indicates a significant difference among the samples ($p < 0.05$)

ทดสอบพลังงานพื้นผิว (surface energy) ของชิ้นงาน พบว่า สูตร P1 และ P3 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 35.70 และ 36.34 มิลลิวัตต์/ม. ตามลำดับ (Figure 8a) ส่งผลต่อการเกิดพันธะมีขั้ว (polar component) ที่ต่ำ เนื่องจากพลังงานพื้นผิวประกอบด้วย polar component เช่น พันธะไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งถ้าค่า polar component มีค่าต่ำแสดงให้เห็ความชอบน้ำต่ำ (โสรญา, 2560) สำหรับมุมสัมผัสใช้สารที่อยู่ในสถานะของเหลว 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ (25 และ 60°C) เอทิลีนไกลคอล (polar liquid) และไดโอโดมิเทน (non-polar liquid) ในการทดสอบเพื่อหามุมสัมผัส (contact angle) โดยมุมสัมผัสที่ 90° ขึ้นไปมีสมบัติที่ดีในการทนต่อสารที่มีขั้วและไม่มีขั้ว พบว่า สูตร P3 ค่ามุมสัมผัสโดยภาพรวมดีที่สุด โดยมุมสัมผัสหยดน้ำที่ 25 และ 60°C เท่ากับ 86.4° และ 80.3° ตามลำดับ มุมสัมผัสเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 64.9° และมุมสัมผัสไดโอโดมิเทน เท่ากับ 43.7° (Figure 8b-8e) ซึ่งการทดสอบมุมสัมผัสหยดน้ำที่อุณหภูมิแตกต่างกันนั้นเพื่อทดสอบความสามารถในการทนต่อการสัมผัสของน้ำที่อุณหภูมิสูงขึ้นสำหรับพลาสติกชีวภาพ การทดสอบมุมสัมผัสเอทิลีนไกลคอลเพื่อทดสอบการทนต่อของเหลวที่มีขั้ว และการทดสอบมุมสัมผัสไดโอโดมิเทนเพื่อทดสอบการทนต่อของเหลวที่ไม่มีขั้ว โดยชิ้นงาน P3 เหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ โดยค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของมุมสัมผัสที่ทดสอบด้วยสาร 3 ชนิด มีค่าสูงไปหาลำดับตามลำดับ ดังนี้ มุมสัมผัสหยดน้ำ > มุมสัมผัสเอทิลีนไกลคอล ≥ มุมสัมผัสไดโอโดมิเทน (Parreidt et al., 2017)

ทดสอบการดูดซับน้ำ (water uptake) ของชิ้นงานระยะเวลา 14 สัปดาห์ พบว่า ชิ้นงานสูตร P1-P6 มีแนวโน้มการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณกากกาแฟที่เติมลงไปในพลาสติก PLA โดยสูตร P6 มีค่าสูงสุด (Figure 9) เนื่องจากกากกาแฟมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบไปด้วยอนุภาคลิโนเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) เมื่อเพิ่มปริมาณกากกาแฟสูงขึ้นหมู่ไฮดรอกซิลจะเข้าไปจับกับหมู่ไฮโดรเจนของน้ำสูงขึ้น ส่งผลให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเข้าไปยังชิ้นทดสอบได้ แต่สูตร P0 (neat PLA) หมู่ไฮโดรเจนจับกับหมู่ไฮดรอกซิลภายในอนุภาคของ PLA เอง ส่งผลให้การดูดซับน้ำจากภายนอกสู่ภายในชิ้นทดสอบน้อยมาก (Delicado et al., 2022) ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ จากการทดสอบการขึ้นรูปเม็ดพลาสติกผสม (ค่าการหลอมไหล(MFR) ความเสถียรของวัสดุ(TGA/DTG) การเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุ(DSC)) และการขึ้นรูปชิ้นงานและทดสอบ (แรงดึงขาดและการยืดตัว มอดูลัสของยัง ความแข็ง มุมสัมผัส พลังงานพื้นผิว การดูดซับน้ำ) จึงเลือกพลาสติกผสมสูตร P3 ที่มีสมบัติโดดเด่นสำหรับการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์

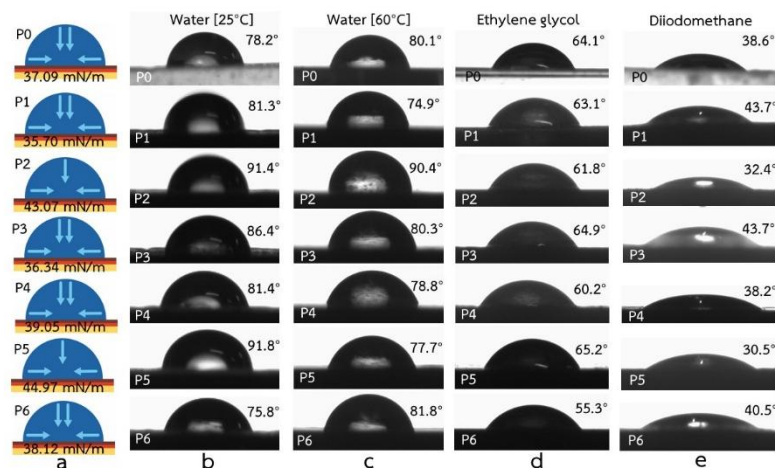


Figure 8 Surface energy of the injection-molded pieces (a), contact angle of polar (b,c,d) and nonpolar liquids (e) on the injection-molded pieces

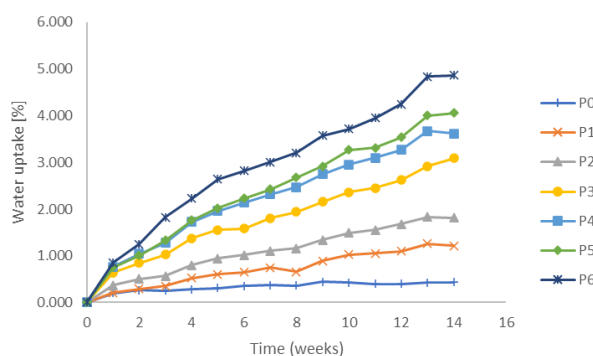


Figure 9 Water uptake of the injection-molded pieces made of polylactide (PLA)/extracted spent coffee grounds (ESCG): (P0) neat PLA; (P1) PLA+3%ESCG; (P2) PLA+5%ESCG; (P3) PLA+7%ESCG; (P4) PLA+9%ESCG; (P5) PLA+11%ESCG; (P6) PLA+13%ESCG

จากการทดสอบการแพร่กระจายของสารที่เป็นส่วนประกอบของภาชนะบรรจุ (migration test) (ตามมาตรฐาน JETRO 2008) ซึ่งเป็นการทดสอบการเคลื่อนย้ายสารจากชิ้นทดสอบไปยังสารจำลองอาหาร (น้ำ, สารละลายกรดอะซิติก 4%, สารละลายเอทานอล 20% ที่ 60°ซ และนอร์มัลเฮปแทน ที่ 25°ซ) พบว่า ปริมาณสารตกค้างหลังการระเหย (evaporation residue) อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (ไม่เกิน 5 มก./ดม³) และเมื่อทดสอบการแพร่สี (color migration) ภายใต้อาหารจำลองเดียวกัน ไม่พบการละลายของสี ทั้งนี้ผลการทดสอบภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว สนับสนุนการใช้งานบรรจุภัณฑ์ในกรณีการสัมผัสอาหารที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°ซ (น้ำ กรด และแอลกอฮอล์) และ 25°ซ (ไขมัน) ตามเงื่อนไขที่ทดสอบ

3. การผลิตบรรจุภัณฑ์

ชิ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกผสมสูตร P3 ในรูปแบบของถ้วยและช้อนส้อมด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก พบว่า สามารถฉีดขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ได้สมบูรณ์ ลดปริมาณการใช้เม็ดพลาสติก PLA ลงได้ 70% ความร้อนได้ 60°ซ กลิ่นหอมอ่อนๆ จากกากกาแฟ สีสันบรรจุภัณฑ์มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวให้ความรู้สึกรักษ์โลกและใกล้ชิดธรรมชาติมากยิ่งขึ้น (Figure 10) นอกจากนี้เม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟที่ได้ยัง

สามารถผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ได้อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น แก้วกาแฟเย็น กล่องบรรจุอาหาร จานชาม เป็นต้น



Figure 10 Packaging made from injection-molded plastic mixed with P3 formula

ต้นทุนการผลิตเม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ

เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟสูตร P3 (เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 7%) ราคา 14.88 บาท/100 ก. ถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก PLA (P0) ราคา 16 บาท/100 ก. (โดยรวมต้นทุนวัตถุดิบ (พลาสติก PLA) ต้นทุนแรงงาน และค่าใช้จ่ายในการผลิต)

สรุปผลการทดลอง

การเตรียมกากกาแฟเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบผสมพลาสติก PLA สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์จากกากกาแฟ เริ่มจากสกัดน้ำมันจากกากกาแฟด้วยเอทานอล 95% เพื่อลดน้ำมันหรือสารระเหยที่อาจก่อให้เกิดกลิ่นหืน แล้วอบแห้งกากกาแฟให้แห้ง จากนั้นผลิตเม็ดพลาสติกผสมกากกาแฟจำนวน 6 สูตร และ neat PLA (P0) พบว่า สูตร P3 (เม็ดพลาสติก PLA ผสมกากกาแฟ 7%) ให้สมบัติโดยรวมเหมาะสมสำหรับการเป็นสูตรนำร่องของการฉีดขึ้นรูป โดยพิจารณาร่วมกันทั้งความสามารถในการขึ้นรูปและความสม่ำเสมอของเม็ดพลาสติก สมบัติเชิงกล (แรงดึงขาด การยืดตัว โมดูลัสของยัง และความแข็ง) ความเสถียรภาพทางความร้อนจาก TGA/DSC และสมบัติพื้นผิวจากพลังงานพื้นผิวและมุมสัมผัส เมื่อทดสอบการแพร่กระจายของสารที่เป็นส่วนประกอบของภาชนะบรรจุ พบว่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานที่กำหนด จึงสามารถผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อใช้บรรจุอาหารที่อุณหภูมิไม่เกิน 60°C (น้ำ กรด และแอลกอฮอล์) และ 25°C (ไขมัน) ได้ มีต้นทุนการผลิตเม็ดพลาสติก PLA สูตร P3 ราคา 14.88 บาท/100 ก. (โดยรวมต้นทุนวัตถุดิบ (พลาสติก PLA) ต้นทุนแรงงาน และค่าใช้จ่ายในการผลิต) จากการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่ากากกาแฟเป็นวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในพลาสติก PLA ให้สมบัติที่ดีในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบที่หลากหลาย และช่วยเพิ่มมูลค่ากากกาแฟให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุทนร้อนในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ประเภทคอมโพสิตหลายชั้น (ชั้นในเป็นบรรจุภัณฑ์ทนร้อนและชั้นนอกเป็นวัสดุจากพลาสติก PLA) ได้ในอนาคต

การนำไปใช้ประโยชน์

1. นำเสนอผลงานการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 63 ประจำปี 2568 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน สาขาอุตสาหกรรมเกษตร วันที่ 4-6 มีนาคม 2568 ภาคโปสเตอร์ และ e-Proceedings หน้า 692-699.
2. ใช้เป็นวัสดุรักษ์โลกแทนพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป โดยผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ สามารถใช้กับเครื่องจักรพลาสติกแบบดั้งเดิม โดยภาคธุรกิจไม่ต้องปรับเปลี่ยนหรือต้องลงทุนเครื่องจักรใหม่

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2566-2567 ขอขอบคุณข้าราชการ พนักงานราชการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- รังรอง ยกसान. 2557. พลาสติกชีวฐาน: โครงสร้าง สมบัติ การแปรรูป และการใช้ประโยชน์. พิมพ์ครั้งที่ 1. Asia Digital การพิมพ์ จำกัด. กรุงเทพฯ.
- โสรญา เรืองดิษฐ์. 2560. การดัดแปลงเมมเบรนพอลิซิลิโคนสำหรับการแยกแก๊ส CO₂/CH₄ โดยเทคนิคพลาสมากระแสดตรง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- อีลล์คอฟฟ์. 2568. กาแฟกับเศรษฐกิจหมุนเวียน: เปลี่ยนของเสียให้เป็นทรัพยากรเพื่อโลกที่ยั่งยืน. แหล่งข้อมูล: <https://www.hillkoff.shop/content/26635/>. สืบค้น: 2 กุมภาพันธ์ 2569.
- Al-Hamamre, Z., S. Foerster, F. Hartmann, M. Kröger, and M. Kaltschmitt. 2012. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. *Fuel* 96: 70–76.
- ASTM International. 2021. Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness. ASTM D2240-15.
- ASTM International. 2022. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM D638-14.
- Chaitanya, S. and I. Singh. 2017. Processing of PLA/sisal fiber biocomposites using direct- and extrusion-injection molding. *MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES* 32(5): 468-474.
- Delicado, E.T., S. Fiori, S. Torres-Gine, J. Gomez-Caturla, N. Montanes, and L. Sanchez-Nacher. 2021. Improving the Mechanical Ductility and Toughness of Injection-molded Polylactide Pieces by the Dual Incorporation of Liquor Waste Derived Spent Coffee Grounds and Oligomers of Lactic Acid. *Research Square*: 1-37.
- Delicado, E. T., S. Fiori, J. Gomez-Caturla, N. Montanes, L. Sanchez-Nacher, and S. Torres-Giner. 2022. Valorization of Liquor Waste Derived Spent Coffee Grains for the Development of Injection-Molded Polylactide Pieces of Interest as Disposable Food Packaging and Serving Materials. *Foods* 11(1162): 1-26.
- Gordon, L. R. 2013. Edible, Biobased and Biodegradable Food Packaging Materials, pp. 49-86. *In* Gordon, L. R. *Food Packaging: Principle and Practice*. 3rd ed. CRC Press, Inc., USA.
- ISO International. 2019. Plastics - Determination of Izod impact strength. ISO 180: 2019.
- Japan External Trade Organization (JETRO). 2008. Specifications, Standards and Testing Methods for Foodstuffs, Implements, Containers and Packaging, Toys, Detergents. 2008.

- Kaci, M., A. Benhamida, L. Zaidi, N. Touati, and C. Remili. 2013. Photodegradation of Poly(Lactic acid)/Organo-Modified Clay Nanocomposites under Natural Weathering Exposure, pp. 281-312. *In* Clara and Sossio. Ecosustainable Polymer Nanomaterials for Food Packaging. 1st ed. CRC Press, Inc., USA.
- National Renewable Energy Laboratory. 2008. Laboratory Analytical Procedure, Technical Report, NREL/TP-510-42618.
- Oliveira, G., C. Passos, P. Ferreira, M. Coimbra, and I. Gonçalves. 2021. Coffee By-Products and Their Suitability for Developing Active Food Packaging Materials. *Foods* 10(683): 1-17.
- Ortenzi, M.A., S. Gazzotti, B.M. Muntal, Stefano, A., S. Antenucci, S. Camazzola, L. Piergiovanni, H. Farina, G.D. Silvestro, and L. Verotta. 2020. Synthesis of Polylactic Acid Initiated through Biobased Antioxidants: Towards Intrinsically Active Food Packaging. *Polymers* 12(1183): 1-14.
- Parreidt, T. S., M. Schmid, and C. Hauser. 2017. Validation of a Novel Technique and Evaluation of the Surface Free Energy of Food. *Foods* 6(31): 1-14.
- Tangtenglam, S. and Y. Chatkaewnapanon. 2022. Bloggers in Online Media of the Decision to Café in Chiang Mai. *International Journal of Sociologies and Anthropologies Science Reviews (IJSASR)* 2(5): 1-8.
- Xiao, Z., X. Hou, S. Hwang, and H. Li. 2022. The biocomposites properties of compounded poly(lactic acid) with untreated and treated spent coffee grounds. *Applied Polymer*: 1-11.
- Yodthong, B. and P. Srihanam. 2015. Influence of chain extender on thermal properties and melt flow index of stereocomplex PLA. *Polymer Testing*: 1-22.
- Youngjae, B. and Y.T. Kim. 2014. Bioplastic for Food Packaging: Chemistry and Physics, pp. 353-368. *In* Jung, H. H. *Innovations in Food Packaging*. 2nd ed. Academic Press, Inc., USA.