

การศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของแกลบผสมกากกาแฟต่อสมบัติทางกลและ กายภาพของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตสำหรับโฟมบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ An influence of particle size of rice husk and spent coffee grounds on mechanical and physical properties of mycelium biocomposite for biodegradable foam packaging materials

กัลยรัตน์ พุฒวงศ์สกุล
Kanyarat Puttawongsakul
ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้าง
น้ำหนักเบา หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น
Composite Materials and Lightweight
Structures Laboratory / Faculty of
Engineering / Thai-Nichi Institute of
Technology
กรุงเทพมหานคร / ไทย
Bangkok 10250, Thailand
kanyarat.mkk@gmail.com

สุรัสวดี จามิกรณ์
Surassawatee Jamikorn
ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้าง
น้ำหนักเบา หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น
Composite Materials and Lightweight
Structures Laboratory / Faculty of
Engineering / Thai-Nichi Institute of
Technology
กรุงเทพมหานคร / ไทย
Bangkok 10250, Thailand
surassawatee@tni.ac.th

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น*
Pimpet Sratong-on
ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้าง
น้ำหนักเบา หลักสูตรเทคโนโลยีวิศวกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น
Composite Materials and Lightweight
Structures Laboratory / Faculty of
Engineering / Thai-Nichi Institute of
Technology
กรุงเทพมหานคร / ไทย
Bangkok 10250, Thailand
*Corresponding author: pimpet@tni.ac.th

บทคัดย่อ — วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต (Mycelium-based composite: MBC) ที่มีการศึกษาวิจัยในปัจจุบันทำจากซีลีเยียมและเส้นใยไมซีเลียม ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความแข็งแรง ดังนั้นเพื่อเป็นทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าและช่วยลดปริมาณวัสดุเหลือทิ้ง ในงานวิจัยนี้ได้นำแกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) แกลบบด (RHG) และกากกาแฟ (SCG) พัฒนาเป็น MBC วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคแกลบที่ผสมในกากกาแฟสำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงต่อสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC ที่อัตราส่วน SCG:RH และ SCG:RHG เท่ากับ 70:30 ในงานวิจัยดำเนินการทดสอบความต้านทานแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D1621 เป็นวัฏจักร 3 รอบและตรวจสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุ เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบน SCG:RHG มีความหนาแน่นมากกว่า SCG:RH ทำให้อนุภาคของ SCG:RHG ยึดกันติดได้ดีผ่านเส้นใยไมซีเลียมที่ทำหน้าที่เป็นกาวชีวภาพและส่งผลต่อความต้านแรงกดของ MBC/SCG:RHG ที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.212 ± 0.002 MPa คิดเป็น 29.27% ของ MBC/SCG:RH ที่ได้จากแกลบไม่บดที่สัดส่วนเดียวกัน นอกจากนี้ความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นของ MBC/SCG:RHG จากการบดแกลบส่งผลทำให้การดูดซึมน้ำต่ำลงมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำเท่ากับ 24.48% เนื่องจากการอัดแน่นของอนุภาคและเส้นใยไมซีเลียมที่หนาแน่น ทำให้น้ำซึมผ่านได้ยาก แสดงให้เห็นว่าวัสดุ MBC สามารถต่อยอดเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้รวมถึงโฟมสำหรับกันกระแทก เนื่องจากวัสดุ MBC ถูกจัดเป็นวัสดุจำพวกโฟม มีความแข็งแรงที่ใกล้เคียงกับโฟม EPS (Expanded

polystyrene foam, EPS) และเป็นแนวทางในการผลิตโฟม MBC จากกากกาแฟและแกลบให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ — กากกาแฟ, แกลบ, ไมซีเลียมคอมโพสิต, บรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้, สมบัติทางกล

ABSTRACT — Recently, mycelium-based composites (MBCs) are made from sawdust substrate, which still have low strength. In this study, MBCs were developed from co-substrate of spent coffee ground (SCG), rice husk (RH), and rice husk ground (RHG) to upcycle these organic wastes. The objective of this study is to investigate the influence of rice husk particle size, mixed with spent coffee grounds as reinforcement, on the mechanical properties and water sorptivity of MBCs made from SCG:RH and SCG:RHG at the weight ratio of 70:30. Cyclic uniaxial compression test (ASTM D1621) was conducted for 3 cycles. The water absorption test was performed by soaking MBCs into water for 96 hours. The results showed that mycelium growth on SCG:RHG was denser than on SCG:RH, resulting in better adhesion of SCG and RHG particles through the mycelium as a bio-binder. Consequently, the compressive strength of MBC/SCG:RHG was 0.212 ± 0.002 MPa, which was 29.27% higher compared to the MBC/SCG:RH produced with unground rice husk at the same ratio. Moreover, MBC/SCG:RHG

exhibited greater dry density, resulting in 24.48% lower water absorption than RH. This lower water absorption is attributed to denser particle packing and mycelial network, making water penetration more difficult. This demonstrates that MBC/SCG-RHG can be further developed into biodegradable packaging and cushioning foam with a mechanical strength comparable to EPS foam (Expanded polystyrene foam). This study provides practical guidelines for optimizing the production of MBC bio-foams from spent coffee grounds and rice husks for various packaging applications.

Keywords — Spent Coffee grounds, Rice husk, mycelium composite, biodegradable packaging, mechanical properties.

I. บทนำ

ปัจจุบันทั่วโลกประสบปัญหาเกี่ยวกับปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้น ไม่ว่าจะเป็นขยะจากอุตสาหกรรม การอุปโภคบริโภค การเกษตร อีกทั้งยังมีขยะอิเล็กทรอนิกส์และพลาสติกที่เกิดจากการเติบโตของอุตสาหกรรมซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และแนวทางในการกำจัดขยะไม่มีความยั่งยืน หลายประเทศทั่วโลกจึงเริ่มให้ความสำคัญเกี่ยวกับปัญหาขยะสหภาพยุโรปได้กำหนดนโยบายเกี่ยวกับการลดขยะพลาสติกเพื่อตอบสนองแนวทางการลดของเสียและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรให้เกิดความคุ้มค่า เพื่อลดปริมาณขยะที่ไม่ถูกรีไซเคิลลงครึ่งหนึ่งภายในปี 2030 และเปลี่ยนสังคมให้ยั่งยืนเข้าสู่ภาวะของเสียเป็นศูนย์ [1], [2]

หนึ่งในวัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือ โฟม EPS เพราะมีน้ำหนักเบา ทนความชื้นได้ดีและราคาถูก แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติได้ ทำให้กลายเป็นขยะจำนวนมาก นอกจากนั้นกระบวนการผลิตยังใช้พลังงานสูงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งห่วงโซ่ตั้งแต่กระบวนการผลิตไปจนถึงการกำจัด [3] ดังนั้นแนวคิดของวัสดุทดแทนโฟม EPS โดยการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติในรูปแบบของวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (Biocomposite) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำขยะจากการเกษตร เช่น ชานอ้อย แกลบ โดยใช้ตัวประสานเป็นเรซินหรือเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นสำหรับการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์รูปทรงต่าง ๆ จึงมีให้เห็นมากขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามวัสดุนั้นยังไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติทั้งหมด และในกระบวนการรีไซเคิลยังต้องอาศัยกระบวนการแยกขยะการเกษตรกับเรซินประสานออกจากกัน

แนวคิดของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต (Mycelium Biocomposites) โดยใช้เส้นใยไมซีเลียมที่ได้จากเห็ดราทำหน้าที่เป็นกาวธรรมชาติผสมอนุภาคของวัสดุทางการเกษตรไว้เป็นก้อนเดียวกัน แทนการใช้เรซินหรือพลาสติก ดังนั้นกระบวนการผลิตและรีไซเคิลวัสดุไม่ต้องอาศัยการแยกวัสดุเพื่อนำไปรีไซเคิล และยังสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติอย่างปลอดภัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้วัสดุ MBC ยังแสดงสมบัติที่จัดอยู่ในจำพวกโฟม [4] จึงสามารถใช้ทดแทนพลาสติกและโฟมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้

ปัจจุบันมีการบริโภคกาแฟที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กากกาแฟมีปริมาณเหลือทิ้งเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้เกิดแนวทางในการนำกากกาแฟไปย่อยสลายและใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปริมาณกากกาแฟเหลือทิ้ง เช่น ปุ๋ย สกรับผิว เชื้อเพลิงอัดแท่ง เป็นต้น [5], [6] การที่สามารถนำกากกาแฟมา

เป็นปุ๋ยบำรุงดินได้แสดงให้เห็นว่ากากกาแฟมีธาตุที่สำคัญ คือ ไนโตรเจน โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงานให้กับพืชจึงช่วยให้พืชเจริญเติบโต รวมถึงในกากกาแฟมีเอมิเซลลูโลสและเซลลูโลสที่ทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีจึงสามารถนำมาเป็นวัสดุเพาะเห็ดได้ แต่ในขณะที่กากกาแฟก็มีกรดฟีนอลิก จึงส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมทำให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ช้า [7] ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุจึงต้องมีการผสมวัสดุอื่นลงไปเพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีความแข็งแรง

แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสีข้าวและมีปริมาณสูง ในปัจจุบันมีการนำแกลบไปใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปริมาณแกลบเหลือทิ้งให้ต่ำลง เช่น ชีวมวล อาหารสัตว์ ปุ๋ย วัสดุคลุมดิน วัสดุเพาะเห็ด เป็นต้น [6], [8] แต่การที่แกลบมีปริมาณเหลือทิ้งสูงทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้ทั้งหมด จึงต้องปล่อยให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติและยังคงมีการเผาทำลายเพื่อลดปริมาณแกลบเหลือทิ้ง จากการที่แกลบสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพและใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ดได้ทางผู้วิจัยจึงสังเกตเห็นว่าสามารถนำแกลบมาพัฒนาเป็น MBC ได้ แต่การนำแกลบมาใช้เป็นวัสดุเพาะเพียงอย่างเดียวยังมีข้อจำกัดในด้านการเจริญเติบโตและปริมาณของเส้นใยไมซีเลียม เนื่องจากแกลบมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เอมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสและเอมิเซลลูโลสเป็นแหล่งพลังงานของเส้นใยไมซีเลียมช่วยให้เจริญเติบโตได้ดี แต่ในแกลบเองก็มีปริมาณของลิกนินที่สูง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเส้นใย เนื่องจากในการย่อยสลายลิกนินไมซีเลียมจะต้องใช้พลังงานในการย่อยสลายสูงส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ช้า [9], [10] จึงต้องผสมแกลบกับวัสดุอื่นเพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีขึ้น

ดังนั้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของ MBC ให้ดียิ่งขึ้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของ MBC ที่ได้จากอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟผสมแกลบสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของแกลบที่ผสมในกากกาแฟสำหรับเป็นวัสดุเสริมแรง ต่อสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC ในการศึกษานี้ควบคุมขนาดอนุภาคของแกลบด้วยระยะเวลาในการบด แบ่งเป็นวัสดุ MBC ที่ผสมแกลบที่ไม่บดและแกลบบดที่เวลา 60 วินาทีที่อัตราส่วนกากกาแฟ:แกลบเท่ากับ 70:30 เพื่อนำไปต่อยอดและพัฒนาเป็นโฟมบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้

II. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคแกลบที่ผสมในกากกาแฟสำหรับเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุ MBC ต่อสมบัติทางกลและอัตราการดูดซึมน้ำของ MBC จากอัตราส่วน SCG:RH และ SCG:RHG เท่ากับ 70:30

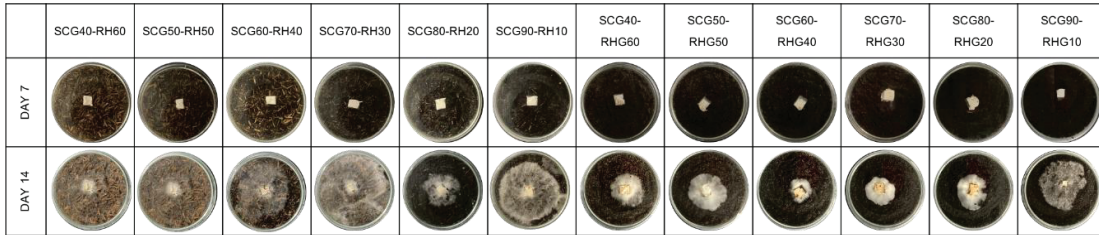
III. วิธีดำเนินการวิจัย

III.1 กระบวนการผลิตวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

เตรียมกากกาแฟ (SCG) ผสมแกลบ โดยแบ่งแกลบออกเป็น 2 ประเภท คือ 1. แกลบที่ไม่ผ่านการบด (RH) และ 2. แกลบที่ผ่านการบด (RHG) โดยนำแกลบมาล้างทำความสะอาดฝุ่นผงและนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำแกลบไปบดด้วยเครื่องบดอนุภาคประสิทธิภาพสูง Power Grinder TQ-500Y เป็นเวลา 60 วินาที ที่อัตราส่วนกากกาแฟ:แกลบเท่ากับ 70:30 และผสมน้ำ 1.5 เท่าของน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วย

หม้อนึ่งฆ่าเชื้อ (DGS-280B Portable Pressure Steam Sterilizer, China) ที่อุณหภูมิ 126 °C เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นปล่อยให้อาหารเลี้ยงเชื้อเย็นตัว จนถึงอุณหภูมิห้อง นำอาหารเลี้ยงเชื้อที่เย็นแล้วไปหยอดเชื้อเห็ดนางรมสายพันธุ์ *Pleurotus ostreatus* (ฟาร์มลัดดัลลิล จ.สระบุรี) ใช้เชื้อปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของอาหารเลี้ยงเชื้อหนึ่งฆ่าเชื้อ และบ่มให้เชื้อเจริญเติบโตเป็นเวลา 7–14 วัน ในสภาวะควบคุมที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75–85% RH อุณหภูมิ

25–28 °C ด้วยระบบ Mini Smart farm จากนั้นนำก้อนเชื้อที่ได้มาขึ้นรูปในแม่พิมพ์ที่ต้องการ ปล่อยให้เชื้อเจริญเติบโตอีกครั้งเป็นเวลา 7–14 วันในสภาวะควบคุมเดียวกัน เมื่อเส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตเต็มที่ จึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และนำไปอบเพื่อหยุดการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมและป้องกันการเกิดราอื่น

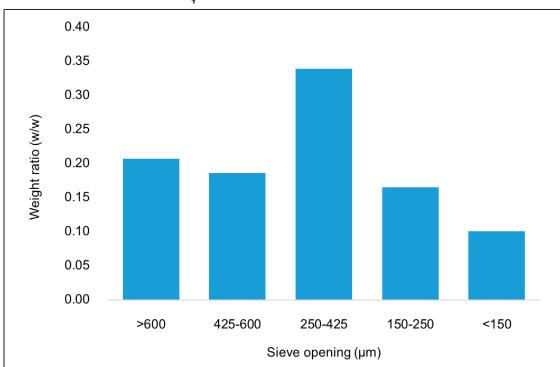


รูปที่ 1 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยงระหว่างกากกาแฟ-แกลบ (SCG-RH) และกากกาแฟ-แกลบบด (SCG-RHG) ที่อัตราส่วนต่างๆ

III.II อัตราการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนจานเพาะเชื้อ

จากรูปที่ 1 การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง SCG:RH ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน 70:30, 50:50 และ 40:60 มีการเจริญเติบโตในวันที่ 14 มากกว่าอัตราส่วนอื่น โดยสามารถเจริญเติบโตในแนวรัศมีมากกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งในอัตราส่วน 70:30 มีความหนาแน่นของเส้นใยมากที่สุด (สีขาวทึบในรูปที่ 1) และการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง SCG:RHG ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในวันที่ 14 พบว่าอัตราส่วน 70:30 มีความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียมมากที่สุด จากการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมชี้ให้เห็นว่าเส้นใยไมซีเลียมที่เจริญเติบโตบนอาหารเลี้ยงกากกาแฟ-แกลบไม่บด (SCG-RH) มีการเจริญเติบโตในแนวรัศมีที่รวดเร็วมากกว่าแกลบบด (SCG-RHG) โดยการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมที่ดีจะมีการขยายตัวในแนวรัศมีที่ดี รวมถึงความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียม ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความทึบของเส้นใยไมซีเลียมที่เกิดขึ้น เมื่อเส้นใยมีความหนาแน่นสูงเส้นใยไมซีเลียมจะมีความทึบมาก ทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงส่งผลต่อคุณสมบัติของ MBC ดังนั้นจากข้อมูลข้างต้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกอาหารเลี้ยงที่อัตราส่วน 70:30 มาทำการศึกษาสมบัติของวัสดุเพื่อพัฒนาเป็นโฟมย่อยสลายได้ต่อไป

II.III การกระจายตัวของอนุภาคแกลบที่ 60 วินาที



รูปที่ II กราฟฮิสโตแกรมการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบบด

รูปที่ II กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแกลบบดที่ 60 วินาที แสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 250–

425 μm มากที่สุด รองลงมาคือขนาดที่ใหญ่กว่า 600 μm, 425–600 μm, 150–250 μm และขนาดที่เล็กกว่า 150 μm ตามลำดับ ซึ่งอนุภาคของแกลบบดส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่าแกลบที่ไม่ผ่านการบด โดยแกลบที่ไม่ผ่านการบดมีความยาวของอนุภาคประมาณ 10 mm

II.IV การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

การทดสอบการดูดซึมน้ำปรับวิธีการทดสอบมาจากงานวิจัยของ Appels และคณะ [11] โดยขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาด 35 mm และสูง 25 mm ชั่งน้ำหนักแห้ง จากนั้นแช่ชิ้นงานลงในภาชนะที่มีน้ำกลั่นโดยระดับน้ำสูงกว่าความสูงของชิ้นงาน แล้วจึงชั่งน้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่น้ำเป็นเวลา 15, 30 และ 45 นาที และ 1, 4, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง สามารถหาค่าการดูดซึมน้ำและอัตราการดูดซึมน้ำของวัสดุได้ตามสมการที่ 1

$$\% \text{water absorption} = \frac{(m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})}{m_{\text{dry}}} \times 100\% \quad (1)$$

กำหนดให้

t_i = เวลาใด ๆ เมื่อ $i = 15, 30, 45$ นาที และ 1, 4, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง

II.V ความหนาแน่นแห้ง (Dry Density)

ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ MBC สามารถคำนวณได้จากมวลของวัสดุและปริมาตรของชิ้นงานตัวอย่าง ดังสมการที่ 2 [12]

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

กำหนดให้

ρ = ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m³)

m = น้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่าง (kg)

V = ปริมาตรของวัสดุ (m³)

II.VI การทดสอบแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D1621

ค่าความต้านทานแรงกด (Compressive Strength) เป็นหนึ่งในสมบัติของวัสดุ ใช้บอกความแข็งแรงของวัสดุจากความสามารถในการรับแรงกดเมื่อวัสดุถูกแรงกระทำตามแนวแกนและตั้งฉากกับผิวของวัสดุ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียดของวัสดุคำนวณได้จากสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ตามลำดับ [12] โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุตามมาตรฐาน ASTM D1621 [13] เพื่อดูประสิทธิภาพการรับแรงกดเบื้องต้น โดยขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างขนาด 70×70×40 mm ทดสอบความต้านทานแรงกดของวัสดุแบบวัฏจักรทั้งหมด

3 วัฏจักร/ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง Shimadzu AGX series กำหนดค่า displacement control 2.5 mm/min ค่า Stroke 6–10 mm ในโปรแกรม TRAPEZIUM LITE X และนำค่าจากการทดสอบมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียด

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

กำหนดให้

σ = ความเค้นของวัสดุ (Pa)

F = แรงกระทำที่ดึงจากกับหน้าตัดของวัสดุ (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ (m^2)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

กำหนดให้

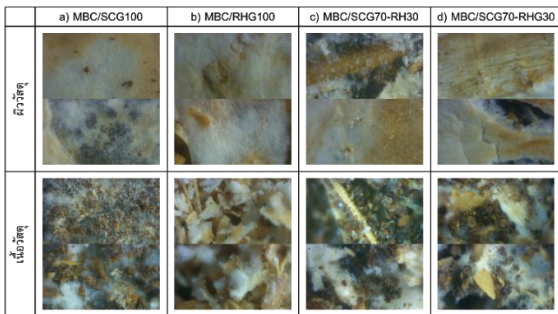
ϵ = ความเครียดของวัสดุ

Δl = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุ (m)

l_0 = ความยาวเริ่มต้นของวัสดุ (m)

III. ผลการวิจัย

III.1 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ MBC

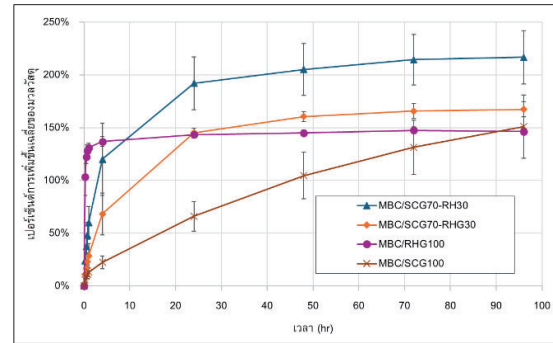


รูปที่ III ลักษณะพื้นผิวและเนื้อวัสดุของ MBC จากกล้องจุลทรรศน์

รูปที่ III (a) แสดงลักษณะของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง MBC/SCG100 เส้นใยกระจายตัวอยู่ทั่วผิวและภายในเนื้อวัสดุ แต่เส้นใยมีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุที่มีแคลบเป็นส่วนผสม รูปที่ III (b) ลักษณะของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง MBC/RHG100 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่มีความหนาแน่นมากกว่าและมีการกระจายตัวทั่วผิวของวัสดุ แต่ภายในเนื้อวัสดุมีช่องว่างมากกว่าเมื่อเทียบกับอาหารเลี้ยง MBC/SCG100 รูปที่ III (c) เส้นใยไมซีเลียมที่เจริญบนอาหารเลี้ยง MBC/SCG70-RH30 เส้นใยไมซีเลียมที่ปกคลุมพื้นผิวไม่สม่ำเสมอเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่นเนื่องจากแคลบที่ไม่บดมีขนาดอนุภาคใหญ่ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคมาก ส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ไม่ดีและมีความหนาแน่นต่ำ รูปที่ III (d) ลักษณะของเส้นใยไมซีเลียมบนอาหารเลี้ยง MBC/SCG70-RHG30 เส้นใยเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นมากกว่า MBC/SCG70-RH30 เนื่องจากการบดแคลบให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้ช่องว่างภายในเนื้อวัสดุลดลง ส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีและมีความหนาแน่นสูงขึ้น

III.11 สมบัติทางกายภาพ

III.11.1 การดูดซึมน้ำ



รูปที่ IV กราฟเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นเฉลี่ยและเวลาของ MBC

การทดสอบการดูดซึมน้ำของวัสดุจากรูปที่ IV แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักเฉลี่ยของวัสดุเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้ง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นน้ำหนักของวัสดุก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ IV ซึ่งเห็นว่า MBC/RHG100 มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด และน้ำหนักมีเพิ่มขึ้นในช่วง 4 ชั่วโมงแรกสูงที่สุด อีกทั้งยังเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจาก 24 ชั่วโมงซึ่งเร็วกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ลำดับถัดไปคือ MBC/SCG100 ที่การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมีแนวโน้มสูงขึ้นต่อเนื่องและยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัวหลังจาก 96 ชั่วโมงผ่านไปแล้ว ส่วนตัวอย่าง MBC/SCG70-RH30 แสดงเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่สูงที่สุดและเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ 48 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษานี้กับงานวิจัยของ Benchaphong และคณะ ที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ MBC ที่ได้จากเศษไม้ไผ่ กากกาแฟ และแคลบ พบว่า MBC/SCG-RH ในรูปที่ IV มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 220 % ซึ่งค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า MBC จากกากกาแฟ-แคลบจากผลการศึกษการดูดซึมน้ำที่รายงานโดย Benchaphong และคณะ (231–294%) [14]

III.11.11 ความหนาแน่นแห้ง

MBC/SCG70-RHG30 มีความหนาแน่นมากที่สุดคือ $341.458 \pm 4.096 \text{ kg/m}^3$ เนื่องจากการผสมกันระหว่างกากกาแฟที่มีขนาดอนุภาคเล็กกับแคลบบดช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับแคลบที่ไม่ผ่านการบด ทำให้เส้นใยมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นช่วยยึดเกาะอนุภาคของวัสดุได้ดี ทำให้วัสดุมีความเป็นรูพรุนต่ำซึ่งส่งผลโดยตรงกับความหนาแน่นของวัสดุทำให้วัสดุมีความหนาแน่นสูงขึ้น รองลงมาเป็น MBC/SCG100 ($313.792 \pm 9.351 \text{ kg/m}^3$) และ MBC/RHG100 ($280.484 \pm 4.428 \text{ kg/m}^3$) ตามลำดับ และ MBC/SCG70-RH30 ($245.886 \pm 1.637 \text{ kg/m}^3$) มีความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด เนื่องจากขนาดอนุภาคของแคลบมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้การเรียงตัวของอนุภาคภายในวัสดุมีช่องว่างมาก ทำให้วัสดุมีรูพรุนมาก

งานวิจัยของ Benchaphong และคณะศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของ MBC พบว่าความหนาแน่นของ MBC จากกากกาแฟและกากกาแฟผสมแคลบมีค่าประมาณ $209\text{--}379 \text{ kg/m}^3$ [14] ซึ่งใกล้เคียงกับ MBC จากงานวิจัยนี้ และเมื่อเปรียบเทียบกับโฟม EPS พบว่า MBC มีความหนาแน่นสูงกว่า โดยโฟม EPS มีความหนาแน่นอยู่ที่ $13.5\text{--}28 \text{ kg/m}^3$ [15]

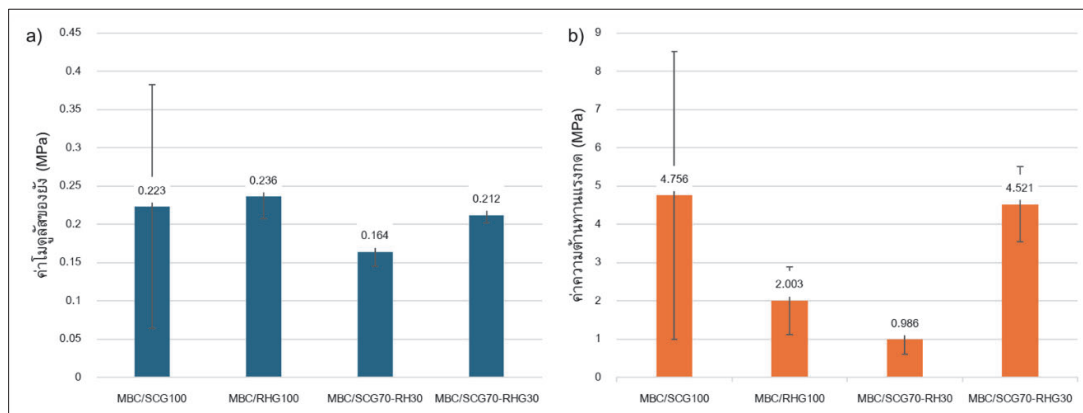
III.11.11 ความต้านทานแรงกด

จากรูปที่ V a) แสดงความต้านทานแรงกดของ MBC พบว่า MBC/RHG100 มีความต้านทานแรงกดสูงที่สุดเท่ากับ 0.236 ± 0.029

MPa รองลงมาคือ MBC/SCG100 เท่ากับ 0.223 ± 0.159 MPa, MBC/SCG70-RHG30 เท่ากับ 0.212 ± 0.010 MPa และ MBC/SCG70-RH30 เท่ากับ 0.164 ± 0.019 MPa ตามลำดับ และจากรูป V b) ค่าโมดูลัสของยังของ MBC/SCG100 สูงที่สุดเท่ากับ 4.756 ± 3.754 MPa รองลงมาคือ MBC/SCG70-RHG30 เท่ากับ 4.521 ± 0.980 MPa, MBC/RHG100 เท่ากับ 2.003 ± 0.885 MPa และค่าโมดูลัสของยังที่ต่ำที่สุดคือ MBC/SCG70-RH30 เท่ากับ 0.986 ± 0.386 MPa

งานวิจัยของ Elsacker และคณะศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกลของ MBC พบว่าขนาดอนุภาคของวัสดุส่งผลต่อความต้านทานแรงกดของ MBC โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกัญชงและแฟลกซ์ที่ไม่ผ่านการบดและบดให้ขนาดอนุภาคเล็กกว่า 5 มม พบว่า MBC ที่ได้จากกัญชงและแฟลกซ์บดมีความต้านทานแรงกดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกัญชงและแฟลกซ์ที่ไม่ผ่านการบด [15] เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Rigobello ที่ศึกษาเกี่ยวกับ

ขนาดอนุภาคของไม้ปืทที่ส่งผลต่อความต้านทานแรงกดของวัสดุ พบว่าขนาดอนุภาคส่งผลต่อความต้านทานแรงกดของวัสดุ โดย MBC จากขนาดอนุภาคในช่วง 0.75–3.0 มม มีความต้านทานแรงกดมากที่สุดเท่ากับ 306.38 MPa รองลงมาคือขนาดอนุภาคช่วง 4.0–12.0 มม และ 0.5–12.0 มม ตามลำดับ [16] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ เมื่อบดกลบจะทำให้ค่าความต้านทานแรงกดของวัสดุเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลบที่ยังไม่ผ่านการบด ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีขึ้น มีการแผ่ขยายในแนวนอนและความหนาแน่นของเส้นใยที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคของวัสดุที่ลดลงจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ ทำให้เส้นใยสามารถยึดเกาะกันได้ดีและเจริญเติบโตได้ง่ายขึ้น เส้นใยจึงมีความแข็งแรงทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคได้ดีขึ้นนำไปสู่ความต้านทานแรงกดที่สูงขึ้น



รูปที่ V a) กราฟค่าความต้านทานแรงกดของ MBC b) กราฟค่าโมดูลัสของยังของ MBC

IV. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต (MBC) จากกากกาแฟ (SCG) และกลบ (RH) โดยศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียม เพื่อพัฒนาเป็นโพลียออสลายได้จากกากกาแฟและกลบเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ กระบวนการผลิตใช้การเพาะเลี้ยงเส้นใยไมซีเลียมทำให้ MBC เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน จึงเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับนำไปใช้ทดแทนพลาสติกและโฟมในปัจจุบัน

การเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมบน MBC/RHG100 เส้นใยมีความหนาแน่นกว่าสูตรอื่น เนื่องจากการบดกลบทำให้เส้นใยเจริญเติบโตได้ดียิ่งขึ้นและสามารถยึดเกาะอนุภาคได้ดีเมื่อเทียบกับกลบที่ไม่ผ่านการบด ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยมีความความต้านทานแรงกดอยู่ที่ 0.236 ± 0.029 MPa และมีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 2.003 ± 0.885 MPa มีอัตราการดูดซึมน้ำช่วง 4 ชั่วโมงแรกสูงที่สุด จากนั้นเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำต่ำกว่า MBC อัตราส่วนอื่น ในส่วนของ MBC/SCG100 มีการเจริญเติบโตของเส้นใยสม่ำเสมอ เนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคที่ชิดกันทำให้มีรูพรุนที่ต่ำ เส้นใยไมซีเลียมสามารถยึดเกาะอนุภาคของกากกาแฟได้ดีและปกคลุมทั่วพื้นผิวและภายในวัสดุ ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานแรงกดเท่ากับ 0.223 ± 0.153 MPa และค่าโมดูลัสของยัง 4.756 ± 0.065 MPa แสดงให้เห็นว่าวัสดุมีความแข็งแรงแต่เปราะ

MBC/SCG70-RH30 มีความต้านทานแรงกดและค่าโมดูลัสของยังต่ำที่สุดเท่ากับ 0.164 ± 0.019 MPa และ 0.986 ± 0.386 MPa ตามลำดับ อีกทั้งยังมีค่าการดูดซึมน้ำมากที่สุด เพราะเส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ไม่ดี อีกทั้งยังมีความหนาแน่นของเส้นใยต่ำ เนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคแบบหลวม ๆ ทำให้เกิดช่องว่างและรูพรุนมากส่งผลต่อสมบัติของ MBC และ MBC/SCG70-RHG30 มีความแข็งแรงมากกว่า MBC/SCG70-RH30 โดยมีความต้านทานแรงกดอยู่ที่ 0.212 ± 0.010 MPa มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 4.521 ± 0.980 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับ MBC/SCG100 แต่มีความเปราะน้อยกว่า และมีการดูดซึมน้ำน้อยกว่า MBC/SCG70-RH30

MBC สามารถต่อยอดเป็นโพลีเมอร์จันท์ที่ย่อยสลายได้ทดแทนโฟม EPS ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุมีความแข็งแรงบางช่วงที่เทียบเท่ากับ EPS แต่ยังคงต้องมีการปรับปรุงค่าความต้านทานแรงกดของ MBC ให้สูงขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น โดยจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการบดกลบสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุได้ แต่อย่างไรก็ตาม MBC เป็นวัสดุคอมโพสิตชีวภาพจากธรรมชาติที่มีรูพรุนที่เกิดจากธรรมชาติ ทำให้เปรียบเทียบกับ EPS ที่ความแข็งแรงเกิดจากโครงสร้างรูพรุนด้านในหลายรูปทรง นอกจากนี้ MBC ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการดูดซึมน้ำที่สูงจึงต้องมีการพัฒนาเกี่ยวกับการดูดซึมน้ำของวัสดุ เช่น การเคลือบผิววัสดุให้มีการกักน้ำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก MSIWF 2024 และสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น [2406/A002]

เอกสารอ้างอิง

- [1] "Single-use plastics." Accessed: Jul. 21, 2025. [Online]. Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics_en
- [2] "Waste and recycling." Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/waste-and-recycling>
- [3] B. Marten and A. Hicks, "Expanded Polystyrene Life Cycle Analysis Literature Review: An Analysis for Different Disposal Scenarios," Feb. 01, 2018, *Mary Ann Liebert Inc.* doi: 10.1089/sus.2017.0015.
- [4] M. R. Islam, G. Tudryn, R. Bucinell, L. Schadler, and R. C. Picu, "Morphology and mechanics of fungal mycelium," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-13295-2.
- [5] Nespresso, "20 benefits of coffee grounds that you may not know about coffee grounds," <https://www.nespresso.com/th/en/nespresso-coffee-talk/ground-coffee?msocid=0a7109f7f1886aad0aa21b9ff0216bae>. Accessed: Mar. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.nespresso.com/th/en/nespresso-coffee-talk/ground-coffee?msocid=0a7109f7f1886aad0aa21b9ff0216bae>
- [6] นางสาวจุไรรัตน์ ฝอยถาวร, นางสาวดารากร อัคราศรี, นางสาววิไลภา อูทอง, and นายอาผู้ เบเช, "เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีค่าอย่างไร," <https://hkm.hrdi.or.th/Knowledge/detail/700>. Accessed: Aug. 05, 2025. [Online]. Available: <https://hkm.hrdi.or.th/Knowledge/detail/700>
- [7] "การปรับปรุงสภาพกากกาแฟด้วยไมโครเวฟเพื่อผลิตน้ำตาล."
- [8] P. Trail, "Rice Hull Gold - 10 On-Farm Uses of Rice Hulls," <https://www.echocommunity.org/th/resources/9f9bcb3a-ed2e-4209-bf90-38a759ff3340>. Accessed: Mar. 05, 2026. [Online]. Available: <https://www.echocommunity.org/th/resources/9f9bcb3a-ed2e-4209-bf90-38a759ff3340>
- [9] C. G. Yoo, X. Meng, Y. Pu, and A. J. Ragauskas, "The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review," *Bioresour. Technol.*, vol. 301, p. 122784, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2020.122784.
- [10] E. Elsacker, S. Vandeloock, J. Brancart, E. Peeters, and L. De Laet, "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates," *PLoS One*, vol. 14, no. 7, Jun. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0213954.
- [11] F. V. W. Appels *et al.*, "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites," *Mater. Des.*, vol. 161, pp. 64–71, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.MATDES.2018.11.027.
- [12] W. D. Callister and J. G. David Rethwisch, *MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING*, 9th ed. 2014.
- [13] "ASTM D1621-16," <https://store.astm.org/d1621-16.html>. Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: <https://store.astm.org/d1621-16.html>
- [14] A. Benchaphong *et al.*, "Assessing mycelium-based blocks utilizing *Pleurotus ostreatus* versus *Trichoderma virens*: material characterization and substrate ratios of bamboo residues, spent coffee grounds, and rice husks," *Stud. Fungi*, vol. 10, 2025, doi: 10.48130/sif-0025-0007.
- [15] The foam company, "A Guide to Understanding EPS Foam Density: SL, M, H, and VH." Accessed: Apr. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.thefoamcompany.com.au/blogs/news/a-guide-to-understanding-eps-foam-density>
- [16] A. Rigobello and P. Ayres, "Compressive behaviour of anisotropic mycelium-based composites," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10930-5.