

โฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ดผสมผสานกับกากกาแฟ กากชา และเปลือกไข่

ธนะพัฒน์ จันทรเด่นดวง^{1*}, ปภาวิญญ์ กลิ่นสุวรรณ¹, ทิพย์ไหมทอง จันทรเด่นดวง¹, นัฐวุฒิ บุญยสิน², หนึ่งนิตย์ วัฒนวิเชียร³,
และภัทรญา กลิ่นทอง¹

¹ โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

² ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ (ไบโอเทค) ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

³ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

* Corresponding author: thanapat.cha_g33@mwit.ac.th

บทคัดย่อ

เศษของเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั่วโลก กาแฟและชาเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดของเสียประเภทกากกาแฟและกากชาในปริมาณมาก งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยเห็ด (Mycelium-based Bio foams) โดยใช้กากกาแฟ (C) กากชา (T) และเปลือกไข่บด (E) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตรผสมผสานกับเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*, PO) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*, PP) ทำหน้าที่เป็นกาวชีวภาพยึดวัสดุชีวมวลเข้าด้วยกัน โดยทำการทดลองปรับอัตราส่วนเชื้อเห็ดที่ 10%, 25% และ 35% และเติมเปลือกไข่บดที่ 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนเชื้อเห็ดที่ 25% ทำให้โครงข่ายเส้นใยหนาแน่นและมีความหนาสูงสุด โดยสูตรกากชาผสมเปลือกไข่บด 10% มีความหนาเฉลี่ยสูงสุด คือ $2.70 \pm 0.19 \mu\text{m}$ เมื่อใช้เชื้อเห็ดนางรมและ $2.63 \pm 0.12 \mu\text{m}$ เมื่อใช้เชื้อนางฟ้า การเติมเปลือกไข่บด 10% ช่วยเร่งการเจริญของเส้นใย ขณะที่ระดับ 20–30% กระตุ้นการออกดอกเห็ด แต่ทำให้เส้นใยเห็ดหยุดการเจริญเติบโต เส้นใยเห็ดทั้ง 2 ชนิดเจริญได้ดีในกากชามากกว่ากากกาแฟ การเลือกสูตรที่เหมาะสมทำให้ได้โฟมชีวภาพต้นแบบที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ขึ้นรูปง่าย และย่อยสลายได้ในดินและในคอมโพสท์ สามารถประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเพื่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตเช่น แผ่นโฟม บรรจุภัณฑ์ และวัสดุกันกระแทก ทดแทนการใช้โฟมหรือพลาสติกทั่วไป สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals : SDGs) ด้านการผลิตและบริโภคที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ไมซีเลียม / โฟมชีวภาพ / กากกาแฟ / กากชา / เปลือกไข่

Prototype Bio foams from Mushroom Mycelium Integrated with Spent Coffee Grounds, Tea Waste, and Eggshells

Thanapat Chandenduang^{1*}, Paphawich Klinisuan¹, Tipmhaithong Chandenduang¹, Nattawut Boonyuen²,
Nungnit Wattanavichean³, and Pattaraya Klinthong¹

¹ Mahidol Wittayanusorn School, Nakhon Pathom, Thailand

² The National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), Thailand Science Park, Thailand

³ Faculty of Science, Mahidol University, Thailand

* Corresponding author: thanapat.cha_g33@mwit.ac.th

Abstract

Agricultural waste has become a critical environmental concern worldwide. Coffee and tea, as widely consumed beverages, generate substantial amounts of organic residues, specifically spent coffee grounds and tea waste. This study aims to develop bio foams using mushroom mycelium as a natural binder to consolidate biomass materials derived from agricultural waste: spent coffee grounds (C), tea waste (T), and ground eggshells (E). Two mushroom species, *Pleurotus ostreatus* (PO) and *Pleurotus pulmonarius* (PP), were used as biological binders. The study investigated the effects of varying mycelium inoculation rates (10%, 25%, and 35%) and eggshell content (10%, 20%, and 30% by weight) on Bio foam structural development. Results indicated that a 25% mycelium inoculation led to denser mycelial networks with the greatest thickness. The tea waste formulation with 10% eggshell content yielded the highest average thickness: $2.70 \pm 0.19 \mu\text{m}$ for PO and $2.63 \pm 0.12 \mu\text{m}$ for PP. The addition of 10% ground eggshell enhanced mycelial growth, while higher concentrations (20–30%) promoted premature fruiting, which in turn inhibited further mycelial development. Both mushroom species exhibited better growth in tea waste compared to coffee grounds. The optimal formulations produced lightweight, durable, moldable, and biodegradable bio foams, suitable for use in eco-friendly applications such as foam panels, packaging materials, and cushioning products. This development aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in promoting sustainable production and consumption practices.

Keywords: Mycelium / Bio foams / Coffee Grounds / Tea Waste / Eggshells

1. บทนำ

ปัญหาของเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นประเด็นสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเศรษฐกิจในระดับโลก รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากการเพิ่มของประชากรอย่างต่อเนื่องทำให้มีความต้องการบริโภคสินค้าเกษตรสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดของเสียจากภาคการเกษตรในปริมาณมาก มีงานวิจัยระบุว่าปริมาณของเสียทางการเกษตรเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 5-10% ต่อปีและคาดการณ์ว่าภายในปี พ.ศ. 2568 ปริมาณของเสียดังกล่าวจะสูงถึง 2.2 ล้านล้านตันต่อปี [1] หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมของเสียเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเมื่อมีการกำจัดด้วยวิธีการเผา ซึ่งทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลพิษทางอากาศ เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM2.5) ที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงต้องพัฒนานวัตกรรมที่สามารถนำของเสียทางการเกษตรกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด หนึ่งในแนวทางที่ได้รับความสนใจคือ การพัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมของเห็ด (Mushroom Mycelium-based Bio foams) ซึ่งเป็นวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตโดยใช้วัสดุชีวมวลเหลือทิ้งเป็นวัสดุรองรับ (substrate) และใช้เส้นใยไมซีเลียมของเห็ดทำหน้าที่เป็นกาวประสานอนุภาคของวัสดุเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง และมีสมบัติทางกลที่เหมาะสม โฟมชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดมีข้อดีหลายประการคือน้ำหนักเบา มีความทนทานสูง เป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง ต้นทุนการผลิตต่ำและย่อยสลายทางชีวภาพได้เร็วกว่าวัสดุสังเคราะห์ เช่น โฟมโพลีสไตรีนหรือพลาสติกทั่วไป เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ แผ่นฉนวนกันความร้อน-เย็น วัสดุกันกระแทก อิฐมวลเบา แผ่นบอร์ด เฟอร์นิเจอร์ และโครงสร้างทางสถาปัตยกรรม [2] Kohphaisansombat และคณะ ศึกษาผลของปริมาณเส้นใยสับปะรดต่อสมบัติทางกายภาพ ทางกล และทางเคมีของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตโดยใช้กากกาแฟเป็นวัสดุรองรับ และเสริมเส้นใยสับปะรดในสัดส่วน 10%, 20%, และ 30% ผลการศึกษาพบว่าวัสดุที่มีเส้นใยสับปะรด 10% มีความหนาแน่นและทนแรงอัดสูงสุด ขณะที่วัสดุที่มีเส้นใยสับปะรด 30% มีความสามารถในการทนแรงดัด ดูดซับน้ำ และกันเสียงได้ดีที่สุด [3] การพัฒนาโฟมชีวภาพจากเส้นใยเห็ดจึงเป็นแนวทางที่ยั่งยืนเนื่องจากกระบวนการผลิตใช้พลังงานต่ำและจัดเป็นการนำของเสียทางการเกษตรมาใช้ทำวัสดุใหม่ที่มีมูลค่าและสามารถใช้ทดแทนวัสดุแบบดั้งเดิม เช่น โฟม พลาสติก และไม้ ในงานด้านฉนวนกันความร้อนและเสียง

กากกาแฟเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีแนวโน้มการบริโภคเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี มีรายงานว่าทั่วโลกมีปริมาณกากกาแฟที่ถูกทิ้งมากถึงประมาณ 54 ล้านตันต่อปี และกากกาแฟประมาณ 5.82 ล้านตันต่อปี [4,5] สำหรับประเทศไทย ความนิยมในการบริโภคกาแฟและชาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยคนไทยบริโภคกาแฟเฉลี่ยปีละ 90,000 ตัน หรือประมาณ 1.5 แก้วต่อวัน และบริโภคชาเฉลี่ย 0.93 กิโลกรัมต่อคนต่อปี [6,7] การบริโภคที่เพิ่มขึ้นนี้นำไปสู่การสะสมของกากกาแฟและกากชาในปริมาณมาก ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากโรงงานแปรรูปและร้านจำหน่ายเครื่องดื่ม นอกจากของเสียจากกากกาแฟและกากชาแล้ว เปลือกไข่ยังจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งอีกประเภทหนึ่งที่เกิดขึ้นในปริมาณมากทั่วโลก เนื่องจากไข่เป็นแหล่งโปรตีนราคาถูกและบริโภคได้ง่าย โดยไข่ไก่หนึ่งฟองมีน้ำหนักเฉลี่ย 40-60 กรัม ซึ่งเปลือกไข่คิดเป็นประมาณ 9-12% ของน้ำหนักทั้งหมด หรือประมาณ 4-6 กรัมต่อฟอง ในปี พ.ศ. 2562 มีรายงานว่าทั่วโลกมีการบริโภคไข่สูงถึง 95,421.6 ล้านฟอง ส่งผลให้เกิดเปลือกไข่มากถึง 382-573 ล้านกิโลกรัมต่อปี และคาดว่าปริมาณการบริโภคจะเพิ่มขึ้นเป็น 107,004 ล้านฟองภายในปี พ.ศ. 2571 เปลือกไข่มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) คิดเป็นสัดส่วน 94-97% ซึ่งแคลเซียม (Ca) เป็นธาตุอาหารสำคัญที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ด โดยมีบทบาทในการสร้างโครงสร้างของผนังเซลล์ และการควบคุมกระบวนการทางชีวภาพต่าง ๆ เช่น การดูดซึมสารอาหารและการผลิตเอนไซม์ [8] องค์ประกอบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเปลือกไข่ในฐานะวัสดุเสริมที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ร่วมกับของเสียจากการแปรรูปกาแฟและชาเพื่อพัฒนาวัสดุชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เห็ดเป็นเซลล์ยูคาริโอตที่ไม่สามารถสังเคราะห์อาหารได้เอง (Heterotroph) ดำรงชีวิตด้วยการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ (Saprophytism) โดยปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ในสิ่งแวดล้อมและดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์ เห็ดเจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25-40 °C และต้องการออกซิเจนสำหรับการเจริญเติบโต กระบวนการเจริญเติบโตของเห็ดเริ่มต้นจากสปอร์ที่ถูกปลดปล่อยจากดอกเห็ด เมื่อสปอร์ตกลงในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะงอกเป็นเส้นใยระยะแรก หรือไฮฟา (Hypha) ซึ่งเรียกว่าเส้นใยขั้นที่ 1 (Primary Mycelium) ต่อมาเส้นใยจากสปอร์ที่มีเพศต่างกันจะรวมตัวกัน

เป็นเส้นใยชั้นที่ 2 (Secondary Mycelium) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการยึดเกาะวัสดุและปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอาหารภายนอกเซลล์ เมื่อเส้นใยเหล่านี้รวมเป็นกลุ่มหนาแน่นเรียกว่าไมซีเลียม (Mycelium) และสามารถพัฒนาเป็นเส้นใยชั้นที่ 3 (Tertiary Mycelium) เพื่อสร้างดอกเห็ด โดยกระบวนการเจริญของเส้นใยเห็ดได้รับอิทธิพลจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความชื้นประมาณ 70% การถ่ายเทอากาศที่เหมาะสม มีแสงในปริมาณต่ำ และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 5-7 ปัจจุบันมีการใช้เส้นใยไมซีเลียมจากเห็ดหลายชนิดในการพัฒนาวัสดุชีวภาพ ได้แก่ เห็ดในสกุลเห็ดนางรม (*Pleurotus*) เห็ดหลินจือ (*Ganoderma*) เห็ดกาบหอย (*Trametes*) เห็ดขอนแดง (*Pycnoporus*) เห็ดหางไก่ (*Polyporus*) เห็ดแชมปิญอง (*Agaricus*) เห็ดหอม (*Lentinula*) เห็ดในสกุลเห็ดนางรม 2 ชนิดคือเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*) เป็นเห็ดที่นิยมเพาะเลี้ยงในประเทศไทยเนื่องจากสามารถเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น เส้นใยของเห็ดทั้งสองชนิดนี้สามารถเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 24-32 °C และ 28-38 °C ตามลำดับ โดยเส้นใยของเห็ดนางรมมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานได้ดี ในขณะที่เส้นใยของเห็ดนางฟ้าภูฐานสามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ด โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ได้แก่ กากกาแฟและกากชา ซึ่งยังมีการศึกษาในลักษณะนี้อย่างจำกัด โดยเฉพาะในกรณีของกากชาซึ่งยังไม่มีรายงานการศึกษาที่ครอบคลุมถึงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับในงานวัสดุชีวภาพ ข้อได้เปรียบของกากกาแฟและกากชาคือ เป็นชีวมวลที่มีอนุภาคขนาดเล็กสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการบด จึงช่วยลดการใช้พลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่น นอกจากนี้งานวิจัยยังมุ่งเน้นการศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมในการเติมเปลือกไข่บด เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโฟมชีวภาพ และเพิ่มปริมาณแคลเซียม (Ca) ซึ่งเป็นธาตุอาหารสำคัญที่มีบทบาทต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*) ผลจากการศึกษานี้จะนำไปสู่การพัฒนาสูตรวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโฟมชีวภาพที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้เป็นวัสดุทางเลือกในการทดแทนโฟมและพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยาก อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุบรรจุภัณฑ์ การออกแบบเชิงนิเวศ (eco-design) และสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ด้านการผลิตและบริโภคอย่างยั่งยืน

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาสูตรและกระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ด โดยใช้กากกาแฟ กากชา และเปลือกไข่เป็นวัสดุรองรับ
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติในเบื้องต้นทางกายภาพ ทางกล และการย่อยสลายของโฟมชีวภาพต้นแบบที่ผลิตโดยใช้เชื้อเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*)

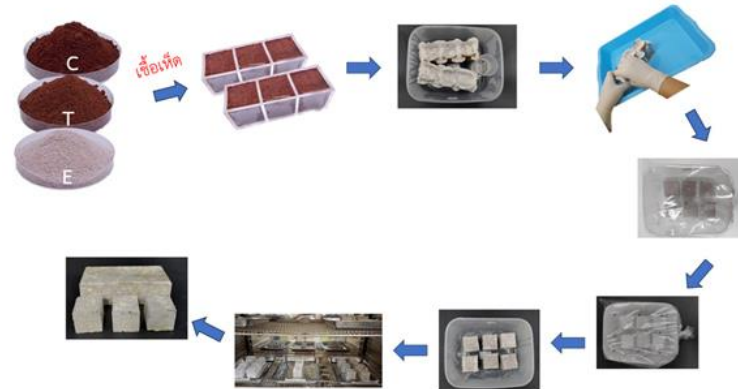
3. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาสูตรการผลิตและศึกษาคุณสมบัติของโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ดโดยมีขอบเขตของการศึกษาดังนี้

1. ใช้กากกาแฟ กากชา และเปลือกไข่เป็นวัสดุรองรับ ใช้เส้นใยเห็ดนางรมและนางฟ้าเป็นกาวชีวภาพประสานอนุภาคของวัสดุรองรับเข้าด้วยกัน ทำการผสม ขึ้นรูป และบ่มในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิ 25-30°C
2. การผลิตตัวอย่างทดสอบใช้แม่พิมพ์ขนาด 5x5x5 cm³ สำหรับขึ้นรูปตัวอย่างเพื่อทดสอบ SEM ความหนาแน่น ความทนแรงอัด และการย่อยสลายในดินและในคอมโพสท์ และใช้แม่พิมพ์ขนาด 5x10x20 cm³ สำหรับขึ้นรูปตัวอย่างเพื่อใช้ทดสอบความทนแรงดัด

4. วิธีการศึกษา

4.1 การศึกษาเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ด



รูปที่ 1 แสดงกระบวนการผลิตโฟมชีวภาพย่อยสลายได้จากเส้นใยเห็ด

รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนและกระบวนการผลิตโฟมชีวภาพจากเส้นใยเห็ดเริ่มต้นด้วยการเตรียมวัสดุรองรับ (substrate) ซึ่งประกอบด้วยกากกาแฟ (C) หรือกากชา (T) ผสมกับเปลือกไข่บด (E) และสารอาหารตามสูตรที่กำหนด จากนั้นทำการฆ่าเชื้อวัสดุรองรับโดยนึ่งที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 20 นาที ก่อนนำมาใช้งาน เตรียมเชื้อเห็ดด้วยการนำออกจากถุงเพาะเห็ด บีบให้แตก และชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนด อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมดถูกทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ 70% ทำการผสมวัสดุรองรับที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วกับเชื้อเห็ดในภาชนะที่เตรียมไว้ ค่อย ๆ เติมน้ำปราศจากไอออน (deionized water, DI) เพื่อเพิ่มความชื้น จนกระทั่งวัสดุสามารถจับตัวเป็นก้อนได้จึงอัดส่วนผสมเข้าแม่พิมพ์และวางลงในกระบะบ่ม วางถ้วยน้ำขนาดเล็กเพื่อรักษาระดับความชื้นภายในกระบะบ่ม คลุมด้วยถุงพลาสติกและรัดปากถุงให้แน่น เจาะรูขนาดเล็กด้านบน 10-15 รูเพื่อให้เกิดการถ่ายเทอากาศ บ่มที่อุณหภูมิ $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งเส้นใยไมซีเลียมเจริญเต็มที่บนพื้นผิวด้านบน จากนั้นแกะวัสดุออกจากแม่พิมพ์และกลับด้านวางลงในกระบะบ่มเดิม คลุมด้วยถุงพลาสติกอีกครั้งและดำเนินการบ่มต่อไปจนกระทั่งเส้นใยไมซีเลียมกระจายตัวเต็มที่ทั่วทุกด้าน หรือเริ่มมีการเกิดปุ่มดอกเห็ดขนาดเล็กจึงนำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

การศึกษาสัดส่วนของเส้นใยไมซีเลียมที่เหมาะสมทำโดยเตรียมวัสดุผสมในแต่ละรอบน้ำหนักรวม 400 กรัม โดยแบ่งออกเป็นดังนี้: (i) วัสดุรองรับ ประกอบด้วยกากชาผสมกับเปลือกไข่บด 10% (T90E10) และสารอาหาร 45 กรัมและ (ii) เชื้อเห็ด โดยปรับสัดส่วนการใช้เชื้อเห็ดที่ระดับ 10%, 25% และ 35% โดยน้ำหนักของวัสดุรองรับ ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างและขนาดของเส้นใยไมซีเลียมในตัวอย่างโฟมชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM; JOEL, JSM-7800F) เลือกสัดส่วนเชื้อเห็ดที่เหมาะสมมาทำการทดลองเพิ่มเติมโดยปรับสัดส่วนของเปลือกไข่บดเป็น 10%, 20% และ 30% โดยน้ำหนักของวัสดุรองรับ ในขั้นตอนสุดท้ายทำการผลิตตัวอย่างโฟมชีวภาพต้นแบบจากกากกาแฟ และกากชา โดยเลือกสัดส่วนเชื้อเห็ดและเปลือกไข่บดที่เหมาะสมสำหรับผลิตตัวอย่างโฟมชีวภาพเพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ เชิงกลและการย่อยสลายต่อไป

4.2 ทดสอบคุณสมบัติของโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ด

4.2.1 ลักษณะโครงสร้างและขนาดเส้นใยไมซีเลียม (Mycelium structure and thickness)

ทำการอบตัวอย่างโฟมชีวภาพต้นแบบให้แห้งก่อนตัดตัวอย่างให้เป็นชิ้นขนาดเล็กประมาณ $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ วางบนแผ่นสำหรับติดตัวอย่าง ติดด้วยเทปคาร์บอน ฉาบผิวตัวอย่างด้วยทองคำเพื่อทำใหตัวอย่างนำไฟฟ้าที่สภาวะสุญญากาศ ส่องดูลักษณะ

โครงสร้างของเส้นใยเห็ดด้วยกล้อง SEM ถ่ายภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า ทำการวัดขนาดของเส้นใยเห็ดจากภาพ SEM กำลังขยาย 500 เท่าด้วยโปรแกรม ImageJ

4.2.2 ค่าความหนาแน่น (Density)

ทำการรอบตัวอย่างโพลิเมอร์ให้แห้ง วัดมิติ (กว้าง ยาว สูง) ด้วยเวอร์เนียร์ดิจิตอล (ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 500-738-10) ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง คำนวณความหนาแน่น โดยใช้สูตร $\rho = m/v$ (เมื่อ ρ = ความหนาแน่น หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) m = มวล หน่วยเป็นกรัม (g) V = ปริมาตร หน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3))

4.2.3 ความทนแรงอัด (Compression strength)

ทำการรอบตัวอย่างโพลิเมอร์ให้แห้ง วัดมิติ (กว้าง ยาว สูง) ด้วยเวอร์เนียร์ดิจิตอล ทดสอบความทนแรงอัดด้วยเครื่อง Universal Testing Machine คำนวณค่าความทนแรงอัด โดยใช้สูตร $\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}$ (เมื่อ σ_c = ความทนแรงอัด หน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) แล้ว $\times 100$ เพื่อเปลี่ยนหน่วยเป็น KPa (เมื่อ F_{max} = แรงอัดสูงสุดที่ตัวอย่างรับได้ จนกระทั่งแตกหัก หน่วยเป็นนิวตัน (N) A = พื้นที่รับแรงอัดของตัวอย่าง หน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (cm^2))

4.2.4 ความทนแรงดัด (Flexural strength) แบบ 3 จุด (Three-point bending)

ทำการรอบตัวอย่างโพลิเมอร์ให้แห้ง วัดมิติ (กว้าง ยาว สูง) ด้วยเวอร์เนียร์ดิจิตอล ทดสอบความทนแรงดัดโดยใช้เครื่อง Universal testing machines (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AGX-V) คำนวณค่าความทนแรงดัดโดยใช้สูตร $F = \frac{3FL}{2Wh^2}$ (เมื่อ F = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตก หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (kg/cm^2) L = ระยะห่างระหว่างบารองรับตัวอย่าง หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) W = ความกว้างของตัวอย่าง หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) h = ความสูงหรือความหนาของตัวอย่าง หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm))

4.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพในดิน (Biodegradation in soil)

ทำการรอบตัวอย่างโพลิเมอร์ให้แห้ง ชั่งน้ำหนัก ฝัตัวอย่างโพลิเมอร์ที่ทราบน้ำหนักตั้งต้นลงในกล่องพลาสติกที่ใส่ดินธรรมชาติ ปรับให้มีความชื้นประมาณ 50-55% ใช้ดิน 2 กิโลกรัมต่อโพลิเมอร์ 1 ก้อน ปิดฝากล่องพลาสติกแล้ววางในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ $25 \pm 5^\circ\text{C}$ สภาวะการทดสอบอ้างอิงมาตรฐาน ISO 17556 [9] ติดตามผลการย่อยสลายของตัวอย่างทดสอบในดิน ทุก 2 สัปดาห์ คลุกดินและเติมน้ำเล็กน้อยเพื่อปรับความชื้นหากดินแห้งเกินไป ติดตามผลการย่อยสลายเป็นเวลา 6 เดือน หากมีขึ้นตัวอย่างเหลือออกมาทำความสะอาดแล้วอบตัวอย่างที่ 65°C จนแห้งสนิท ชั่งน้ำหนัก และคำนวณ % การย่อยสลายในดินจากน้ำหนักที่หายไปโดยใช้สูตร $\% \text{การย่อยสลายในดิน} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100$ (เมื่อ W_1 = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนทดสอบ หน่วยเป็นกรัม (g) W_2 = น้ำหนักหลังการทดสอบ หน่วยเป็นกรัม (g))

4.2.6 การย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะคอมโพสท์ (Biodegradable in compost)

เตรียมขยะอินทรีย์สังเคราะห์ประกอบด้วย กะหล่ำปลี 25% ผักกาดขาว 25% กิ่งไม้ 15% ขุยมะพร้าว 15% ปุ๋ยหมัก 20% ใส่ลงในกล่องพลาสติกมีฝาปิด ฝัตัวอย่างโพลิเมอร์ที่ทราบน้ำหนักตั้งต้นลงในขยะอินทรีย์สังเคราะห์ ใช้ขยะอินทรีย์ 2 กิโลกรัมต่อโพลิเมอร์ 1 ก้อน ปิดฝากล่องแล้ววางไว้ในตู้ที่ควบคุมอุณหภูมิอ้างอิงมาตรฐาน ISO 16929 ดังนี้ วันที่ 2-7 อุณหภูมิ $60-75^\circ\text{C}$ วันที่ 8-28 อุณหภูมิระหว่าง 55 และ $65 \pm 5^\circ\text{C}$ วันที่ 29-56 อุณหภูมิระหว่าง 50 ± 5 และ $60 \pm 5^\circ\text{C}$ วันที่ 57-70 อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C วันที่ 71-84 อุณหภูมิต่ำกว่า 45°C เพื่อเลียนแบบสภาวะของระบบหมักขยะอินทรีย์ [10] ทำการทดสอบต่อเนื่อง 2 รอบ เพื่อติดตามผลการย่อยสลายเป็นเวลา 6 เดือน ทำการคลุกส่วนผสมทุก 2 สัปดาห์ เติมน้ำเล็กน้อยเพื่อปรับความชื้นหากปุ๋ยหมักแห้งเกินไป หากมีขึ้นตัวอย่างเหลือให้เก็บออกมาทำความสะอาด แล้วอบตัวอย่างที่ 65°C จนแห้งสนิท ชั่งน้ำหนัก และคำนวณ % การย่อยสลายในคอมโพสท์จากน้ำหนักที่หายไปโดยใช้สูตร $\% \text{การย่อยสลายในคอมโพสท์} = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100$ เมื่อ W_1 = น้ำหนักเริ่มต้นก่อนทดสอบ หน่วยเป็นกรัม (g) W_2 = น้ำหนักหลังการทดสอบ หน่วยเป็นกรัม (g)

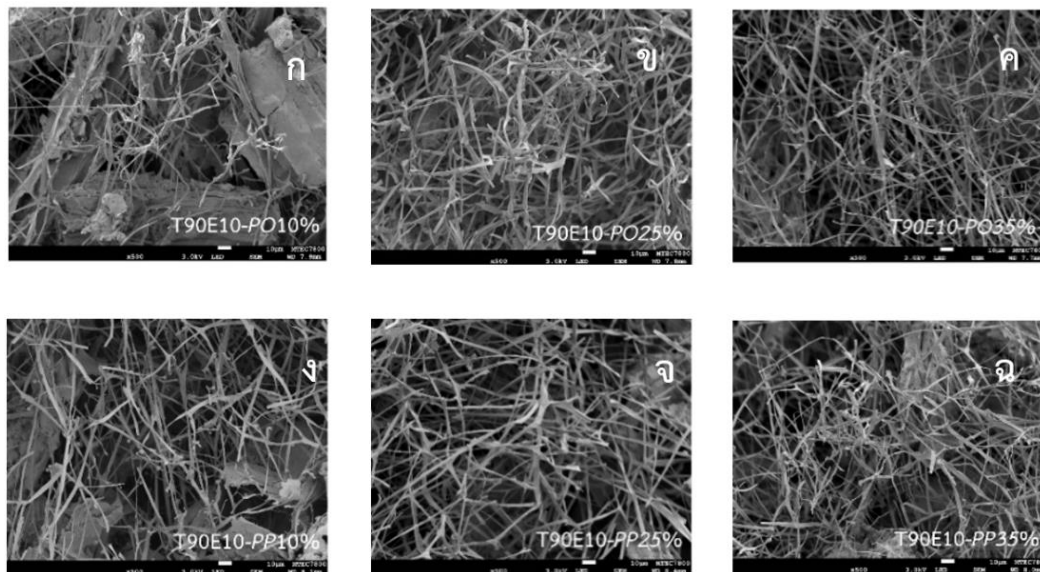
4.3 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ผลการทดลองถูกนำเสนอในรูปแบบ ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) ดำเนินการในโปรแกรม Microsoft Excel 2019 โดยใช้ฟังก์ชัน AVERAGE และ STDEV การแสดงผลข้อมูลในรูปกราฟใช้ ค่าเฉลี่ย และมีแถบค่าคลาดเคลื่อน (Error bars) ซึ่งแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง ได้ทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ผ่านเครื่องมือ Data Analysis/ ANOVA: Single Factor ในโปรแกรม Microsoft Excel 2019 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 ($p \leq .05$)

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการศึกษาเพื่อหาสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโฟมชีวภาพต้นแบบจากเส้นใยเห็ด

รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของตัวอย่างโฟมชีวภาพที่ผลิตจากเชื้อเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*) ในระดับความเข้มข้นของเชื้อเห็ด 10%, 25% และ 35% โดยใช้กากชา (T) ร่วมกับเปลือกไข่บด (E) 10% เป็นวัสดุรองรับ พบว่าเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดทั้งสองชนิดเจริญเป็นโครงสร้างร่างแห ครอบคลุมอนุภาควัสดุรองรับอย่างทั่วถึง ในระดับความเข้มข้นเชื้อเห็ดที่ 10% (รูปที่ 2 ก และ ง) พบเส้นใยมีโครงสร้างตาข่ายที่ค่อนข้างบางและมีความหนาแน่นต่ำกว่าอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับระดับความเข้มข้นเชื้อเห็ดที่ 25% (รูปที่ 2 ข และ จ) และ 35% (รูปที่ 2 ค และ ฉ) ตามลำดับ ผลการวัดขนาดเส้นใยไมซีเลียมแบบสุ่มจำนวน 10 จุด ด้วยโปรแกรม ImageJ พบว่าการใช้เชื้อเห็ดที่ระดับความเข้มข้น 25% ให้เส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยสูงสุดโดยมีค่าความหนาเส้นใยเฉลี่ย $2.70 \pm 0.19 \mu\text{m}$ สำหรับเชื้อเห็ดนางรม และ $2.63 \pm 0.12 \mu\text{m}$ สำหรับเชื้อเห็ดนางฟ้าภูฐานตามที่แสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แสดง SEM แสดงโครงสร้างเส้นใยในกากชาผสมเปลือกไข่บด 10% (T90E10) ปรับสัดส่วนเชื้อเห็ดนางรม (PO) (ก) 10% (ข) 25% (ค) 35% และเชื้อเห็ดนางฟ้า (PP) (ง) 10% (จ) 25% (ฉ) 35%

ตารางที่ 1 ผลของสัดส่วนเชื้อเห็ดต่อความหนาของเส้นใยไมซีเลียม

สัดส่วนเชื้อเห็ด	ความหนาของเส้นใยไมซีเลียม (μm)	
	เชื้อเห็ดคนางรม	เชื้อเห็ดนางฟ้า
10%	$1.73^e \pm 0.10$	$2.15^c \pm 0.19$
25%	$2.70^a \pm 0.19$	$2.63^a \pm 0.12$
35%	$1.89^d \pm 0.13$	$2.35^b \pm 0.29$

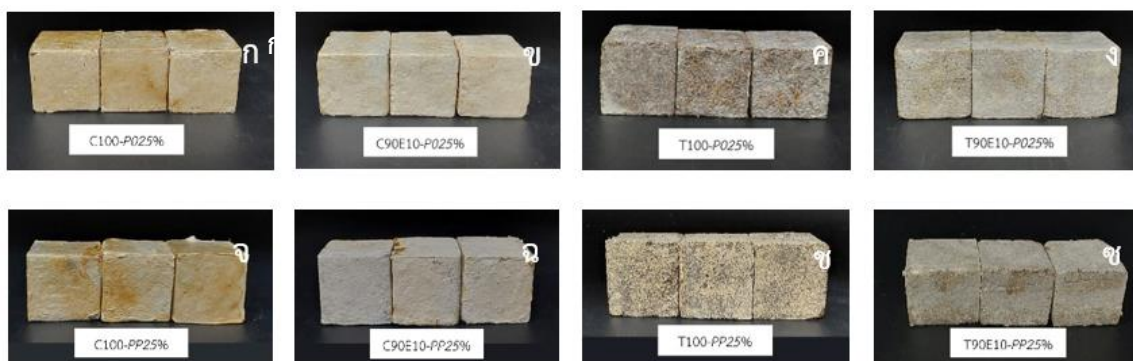
หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวสดมภ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ในการทดลองที่มีการปรับสัดส่วนของเปลือกไข่บดเป็น 10%, 20% และ 30% ร่วมกับกากชาเป็นวัสดุรองรับ พบว่าการเติมเปลือกไข่บดมีผลต่อการปรับค่า pH ของวัสดุให้เป็นกลางมากขึ้น โดยเดิมกากชามีค่า pH เท่ากับ 5.56 และเพิ่มขึ้นเป็น 6.59, 6.76 และ 6.84 เมื่อเติมเปลือกไข่บดในสัดส่วน 10%, 20% และ 30% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมเปลือกไข่บดในสัดส่วน 10% สามารถกระตุ้นการเจริญของเส้นใยไมซีเลียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เส้นใยแผ่ขยายและครอบคลุมทั่วทั้งวัสดุรองรับอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 3 ก) ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนของเปลือกไข่บดเป็น 20% และ 30% มีแนวโน้มกระตุ้นให้เส้นใยเห็ดเข้าสู่ระยะการสร้างดอกส่งผลให้เส้นใยหยุดเจริญและไม่สามารถแผ่ขยายจนเต็มแม่พิมพ์เกิดเป็นโครงสร้างของเส้นใยที่มีการเจริญไม่สม่ำเสมอ (รูปที่ 3 ข และ ค)



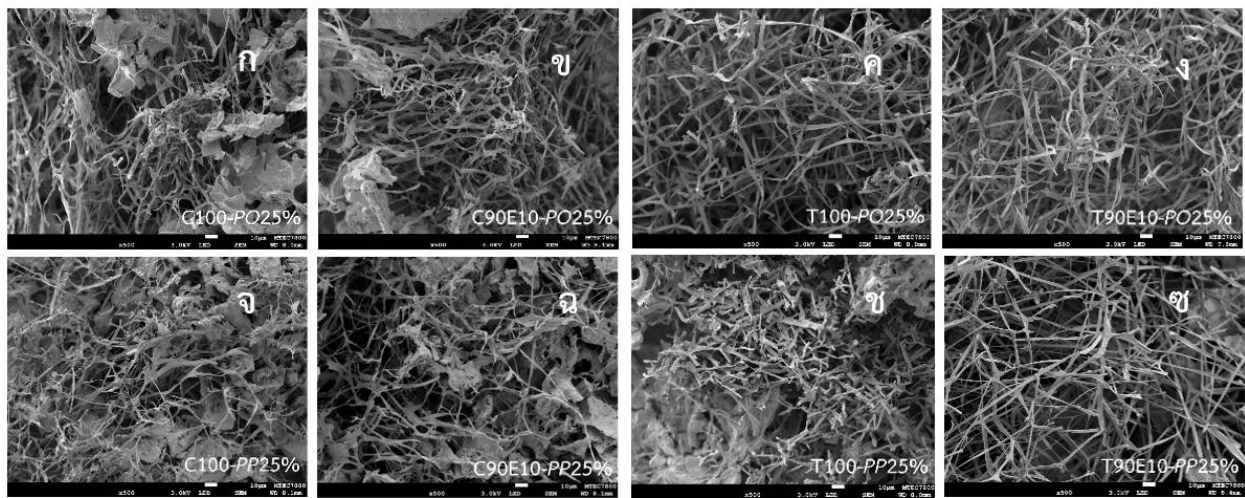
รูปที่ 3 แสดงโฟมชีวภาพต้นแบบจากกากชา (T) ผสมเปลือกไข่บด (E) ที่ระดับ (ก) 10% (ข) 20% และ (ค) 30%

5.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของโฟมชีวภาพจากเส้นใยเห็ด



รูปที่ 4 แสดงผลิตภัณฑ์โฟมชีวภาพต้นแบบใช้เชื้อเห็ดคนางรม (PO) 25% ปรับวัสดุรองรับ (ก) C100 (ข) C90E10 (ค) T100 (ง) T90E10 และใช้เห็ดนางฟ้า (PP) 25% ปรับวัสดุรองรับ (ฉ) C100 (ช) C90E10 (ฌ) T100 (ฎ) T90E10

ผลจากการติดตามการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) และเห็ดนางฟ้าภูฐาน (*Pleurotus pulmonarius*) ในวัสดุรองรับสูตรต่าง ๆ ที่ถูกอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ขนาด $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ พบว่าการใช้กากกาแฟ (C) เป็นวัสดุรองรับต้องใช้ระยะเวลาการบ่มประมาณ 45–60 วันเพื่อให้เส้นใยเจริญครอบคลุมวัสดุได้อย่างสมบูรณ์ในขณะที่วัสดุรองรับที่ใช้กากชา (T) ใช้เวลาน้อยกว่าอยู่ที่ประมาณ 35–40 วัน อย่างไรก็ตามการเติมเปลือกไข่บด (E) ในสัดส่วน 10% ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดทั้งสองชนิดให้เร็วขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดระยะเวลาการบ่มให้เหลือเพียง 30–33 วัน ทั้งนี้ลักษณะของการเจริญของเส้นใยไมซีเลียมในวัสดุรองรับแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ เส้นใยที่เจริญในกากกาแฟมีลักษณะการรวมตัวเป็นโครงข่ายที่หนาแน่นบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดชั้นไมซีเลียมที่เด่นชัดบนผิวภายนอก (รูปที่ 4 ก, ข, จ และ ฉ) ขณะที่เส้นใยไมซีเลียมที่เจริญในกากชามีแนวโน้มกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่ววัสดุรองรับโดยไม่พบการก่อตัวของชั้นไมซีเลียมหนาบริเวณผิวหน้า (รูปที่ 4 ค, ง, ช และ ซ)



รูปที่ 5 แสดง SEM แสดงโครงสร้างเส้นใยในตัวอย่างโคมชีวภาพใช้เชื้อเห็ดนางรม (PO) 25% ปรับวัสดุรองรับ (ก) C100 (ข) C90E10 (ค) T100 (ง) T90E10 และใช้เห็ดนางฟ้า (PP) 25% ปรับวัสดุรองรับ (จ) C100 (ฉ) C90E10 (ช) T100 (ซ) T90E10

รูปที่ 5 แสดงลักษณะโครงสร้างเส้นใยไมซีเลียมภายในตัวอย่างโคมชีวภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งพบว่าชนิดของวัสดุรองรับมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อความหนาแน่นของเส้นใยไมซีเลียม โดยเส้นใยของเห็ดทั้งสองชนิดที่เจริญบนกากกาแฟ (รูปที่ 5 ก และ จ) มีความหนาแน่นของโครงข่ายเส้นใยน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุรองรับที่เป็นกากชา (รูปที่ 5 ค และ ข) การเติมเปลือกไข่บดในสัดส่วน 10% ลงในกากกาแฟ (รูปที่ 5 ช และ ฉ) และกากชา (รูปที่ 5 ง และ ซ) ส่งผลให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญและประสานกันเป็นโครงข่ายร่างแหที่มีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้โคมชีวภาพที่ได้จากทุกสูตรมีน้ำหนักเบา โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.26–0.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของวัสดุรองรับพบว่ากากกาแฟมีน้ำหนักมากกว่ากากชาประมาณ 35% อย่างไรก็ตามการเติมเปลือกไข่บด 10% ลงในกากกาแฟไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อน้ำหนักรวมของวัสดุ ทำให้โคมชีวภาพที่ผลิตจากกากกาแฟ 100% (C100) และสูตรผสมเปลือกไข่บด 10% (C90E10) มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ขณะที่การเติมเปลือกไข่บดในกากชาในสูตร T90E10 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้กากชา 100% (T100)

ตารางที่ 2 ผลของวัสดุรองรับต่อความหนาแน่นของตัวอย่างโม่ชีวภาพ

วัสดุรองรับ	ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	เชื้อเห็ดนางรม	เชื้อเห็ดนางฟ้า
C100	0.44 ^a ±0.01	0.37 ^b ±0.00
C90E10	0.44 ^{a,c} ±0.01	0.37 ^{b,c} ±0.01
T100	0.27 ^f ±0.02	0.29 ^e ±0.02
T90E10	0.32 ^d ±0.01	0.35 ^d ±0.00

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวนอนมี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P ≤ 0.05)

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของโม่ชีวภาพแสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งเห็นว่าโม่ชีวภาพสูตร T90E10 มีค่าความทนแรงอัดและแรงดัดสูงสุด โดยมีค่าทนแรงอัดอยู่ในช่วง 193-222 KPa ขณะที่สูตร C100 และ T100 มีค่าความทนแรงอัดอยู่ในช่วง 124-155 KPa และสูตร C90E10 มีค่าความทนแรงอัดต่ำสุดอยู่ที่ 92.3-94.2 KPa ในการทดสอบความทนแรงดัดใช้ตัวอย่างขนาด 5x5x20 cm³ จึงต้องตัดตัวอย่างขนาด 5x10x20 cm³ พบว่าโม่ชีวภาพที่ใช้กากกาแฟเป็นวัสดุรองรับ (C100 และ C90E10) มีความเปราะและแตกหักระหว่างการตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้า ในขณะที่โม่ชีวภาพที่ใช้กากชาเป็นวัสดุรองรับ (T100 และ T90E10) สามารถตัดได้โดยไม่แตกหักจึงใช้เป็นตัวอย่างทดสอบได้และพบว่า T90E10 มีค่าความทนแรงดัดสูงกว่า T100 ประมาณ 2 เท่า

ตารางที่ 3 ผลของวัสดุรองรับต่อค่าความทนแรงอัด (Compression strength) และความทนแรงดัด (Flexural strength)

วัสดุรองรับ	ความทนแรงอัด (KPa)		ความทนแรงดัด (KPa)	
	เชื้อเห็ดนางรม	เชื้อเห็ดนางฟ้า	เชื้อเห็ดนางรม	เชื้อเห็ดนางฟ้า
C100	155.5 ±19.1	146.0 ±13.5	-*	-*
C90E10	92.3 ±4.0	94.2 ±10.3	-*	-*
T100	146.8 ±5.6	124.6 ±39.0	31.7 ±1.2	34.8 ±0.9
T90E10	193.2 ±9.3	221.9 ±11.9	63.9 ±2.2	63.1 ±4.0

* ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากตัวอย่างแตกเมื่อถูกตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้า

ตารางที่ 4 แสดงผลการย่อยสลายพบว่าโม่ชีวภาพทุกสูตรย่อยสลายได้ในทั้งสองสภาวะ โดยมีแนวโน้มของอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับวัสดุรองรับเรียงลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ C100 > T100 ≈ C90E10 > T90E10 และพบว่าตัวอย่างโม่ชีวภาพต้นแบบมีอัตราการย่อยสลายในดินอยู่ในช่วง 48–62% ที่ระยะเวลาทดสอบ 168 วัน ในขณะที่ตัวอย่างโม่ชีวภาพต้นแบบย่อยสลายได้ 81–94% ในระบบคอมโพสท์ซึ่งเป็นสภาวะเลียนแบบการหมักขยะอินทรีย์มีอุณหภูมิทดสอบอยู่ในช่วง 50–75°C

ตารางที่ 4 เปอร์เซนต์การย่อยสลายในดินและในคอมโพสท์ของตัวอย่างโม่ชีวภาพต้นแบบสูตรต่างๆ

วัสดุ รองรับ	อัตราการการย่อยสลายในดิน			อัตราการการย่อยสลายในคอมโพสท์		
	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ 168 วัน	% การ ย่อยสลาย	ก่อนทดสอบ	หลังทดสอบ 168 วัน	%การ ย่อยสลาย
C100			61.39			93.49
C90E10			54.45			85.39
T100			52.61			89.11
T90E10			48.45			81.01

6. สรุปผลการศึกษา

ผลจากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าสูตรที่เหมาะสมสำหรับการผลิตโม่ชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดนางรมและเห็ดนางฟ้า คือการใช้สัดส่วนเชื้อเห็ดที่ระดับ 25% ซึ่งส่งผลให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่มีความหนาแน่นสูงและได้เส้นใยมีความหนาแน่นสูงสุด การเติมเปลือกไข่บดในระดับ 10% สามารถเร่งการเจริญของเส้นใยไมซีเลียมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณเปลือกไข่บดเป็น 20% และ 30% ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นการสร้างดอกเห็ด แต่ทำให้เส้นใยไมซีเลียมลดอัตราการเจริญเติบโต และเข้าไปสู่ระยะการสร้างดอกเห็ดแทน ผลการวิเคราะห์ค่า pH (ความเป็นกรด-ด่าง) แสดงให้เห็นว่าเปลือกไข่บดสามารถปรับค่า pH ของวัสดุรองรับให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางมากขึ้น โดยกากขามีค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 5.56 เป็น 6.59 เมื่อเติมเปลือกไข่บด 10% ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าช่วง pH ใกล้เคียงกับ 7.0 เป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของไมซีเลียมในสกุล เห็ดนางรมเนื่องจากช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหาร [11] นอกจากนี้เปลือกไข่บดยังเป็นแหล่งแคลเซียม (Ca) ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญและเสริมสร้างโครงสร้างเส้นใย อย่างไรก็ตามการเติมในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลให้เส้นใยเข้าสู่ระยะสร้างดอกเห็ดเร็วขึ้น [8] ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควรพิจารณาในการออกแบบสูตรของวัสดุรองรับ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดนางรมและเห็ดนางฟ้าสามารถเจริญเติบโตบนวัสดุรองรับที่ทำจากกากกาแฟและกากชา ได้ โดยโม่ชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมผสมกากกาแฟใช้ระยะเวลาการบ่มนานกว่าโม่ชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมผสมกากชาและเส้นใยมักเจริญหนาแน่นบริเวณพื้นผิวของวัสดุรองรับมากกว่า เนื่องจากกากกาแฟมีอนุภาคขนาดเล็กและละเอียดส่งผลให้เกิดการอัดตัวแน่นเมื่อถูกอัดลงแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปซึ่งลดช่องว่างระหว่างอนุภาคและจำกัดปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต่อการเจริญของเส้นใย ส่วนกากชาประกอบ ด้วยอนุภาคที่มีขนาดหลากหลายทั้งแบบผงละเอียดและท่อนหยาบที่มีรูพรุน ส่งผลให้มีช่องว่าง

ระหว่างเพื่อการแลกเปลี่ยนก๊าซได้ดี ทำให้มีออกซิเจนเพียงพอที่สนับสนุนให้เส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดีกว่ากากกาแฟ การเติมเปลือกไข่บด 10% ส่งผลให้น้ำหนักและความหนาแน่นของโฟมชีวภาพต้นแบบที่ใช้กากกาแฟเป็นวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โฟมชีวภาพต้นแบบจากกากกาแฟทั้งแบบที่ผสมและไม่ผสมเปลือกไข่มีโครงสร้างเส้นใยไมซีเลียมที่รัดตัวของวัสดุรองรับไว้อย่างหนาแน่น ทำให้สามารถตัดได้ด้วยเลื่อยไฟฟ้า โฟมชีวภาพต้นแบบสูตรกากกาแฟผสมเปลือกไข่ 10% (T90E10) มีค่าความทนต่อแรงอัดและแรงดัดสูงสุด อย่างไรก็ตาม โฟมชีวภาพสูตรนี้มีอัตราการย่อยสลายในดินและในระบบคอมโพสต่ำที่สุดคือ 48.45% และ 81.01% (ที่ระยะเวลา 168 วัน) ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างร่างแหของเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดทั้งสองชนิดในสูตร T90E10 ประสานกันอย่างหนาแน่นส่งผลให้โฟมชีวภาพที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความแข็งแรงสูงแต่ใช้เวลาย่อยสลายนานกว่า

ผลการศึกษาที่น่าสนใจเสนอข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับการปรับปรุงประกอบของวัสดุรองรับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโฟมชีวภาพจากเส้นใยไมซีเลียมของเห็ดที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมควบคู่ไปกับความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดปริมาณของเสียทางการเกษตรและสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างรอบด้านควรมีการศึกษาปัจจัยเพิ่มเติม เช่นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุรองรับและผลิตภัณฑ์ ค่าการดูดซึมน้ำและความชื้น ตลอดจนสมบัติเชิงความร้อน เพื่อยกระดับประสิทธิภาพและความเหมาะสมของวัสดุสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Aiduang, W., Chanthaluck, A., Kumla, J., Jatuwong, K., Srinuanpan, S., Waroonkun, T., Oranratmanee, R., Lumyong, S., & Suwannarach, N. (2022). Amazing Fungi for Eco-Friendly Composite Materials: A Comprehensive Review. *J. Fungi*, 8(8), 842. <https://doi.org/10.3390/jof8080842>.
- [2] Alemu, D., Tafesse, M., & Mondal A. K. (2022). Mycelium-based composite: The future sustainable biomaterial. *International Journal of Biomater*, 2022, 8401528. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/8401528>.
- [3] Kohphaisansombat, Jongpipitaporna, Y., Laoratanakulb, P., Tantipaibulvuta, S., Euanorasetra, J., Rungjindamai, N., Chuaseeharonnachaid, C., Kwantongd, P., Somrithipold, S., & Nattawut B. (2024). Fabrication of mycelium (oyster mushroom)-based composites derived from spent coffee grounds with pineapple fibre reinforcement. *Mycology*, 15 (4), 665–682. <https://doi.org/10.1080/21501203.2023.2273355>.
- [4] McClure, P. (2023). Waste coffee grounds make concrete 30% stronger. *New Atlas*. <https://newatlas.com/materials/waste-coffee-grounds-make-concrete-30-percent-stronger>.
- [5] Negi, P., Kumar, Y., Sirohi, R., Singh, S., Tarafdar, A., Pareek, S., Awasthi, M. K., & Sagar, N. A. (2022). Advance in bioconversion of spent tea leaves to value-added products. *Bioresource Technology*, 346, 126409.
- [6] มติชนออนไลน์. (ม.ป.ป.). คนไทยกินกาแฟปีละ 9 หมื่นตัน แต่ตลาดมีไม่พอ โลกร้อนเป็นเหตุ ผลิตได้น้อย ราคาพุ่ง. https://www.matichon.co.th/economy/news_4664373.
- [7] ข่าวสด ออนไลน์. (ม.ป.ป.). “รายงานพิเศษ - หนูนชชาวไทยเจาะตลาดโลก พาณิชย์กระตุ้นใช้เอฟทีเอ”. https://www.khaosod.co.th/economics/news_4989568.
- [8] Tang, Z. -X., Shi L. -E., Jiang Z. -B., Bai, X. -L. & Ying R.-F. (2023). Calcium Enrichment in Edible Mushrooms: A Review. *J. Fungi*, 9, 338. <https://doi.org/10.3390/jof9030338>.
- [9] ISO 17556:2019-Plastics-Determination of the Ultimate Aerobic Biodegradability in Soil.
- [10] ISO 20200 Plastics — Determination of the degree of disintegration of plastic materials under composting conditions in a laboratory-scale test.
- [11] Aditya, R.S., Neeraj, Jarial, R.S., Jarial, K. & Bhatia J.N. (2024). Comprehensive Review on Oyster Mushroom Species (Agaricomycetes): Morphology, Nutrition, Cultivation and Future Aspects. *Heliyon*, 10, e26539.