

การพัฒนาไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตจากกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าว: อิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อโครงสร้างความพรุนและสมบัติวัสดุ Development of Mycelium Biocomposites from Recycled Paper and Coconut Coir: Effects of Mixing Ratio on Porous Structure and Material Properties

กุลณัฐ สาริกฤติ

ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างน้ำหนักเบา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
1771/1 ถ.พัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ

2461150092@tni.ac.th

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น*

ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างน้ำหนักเบา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
1771/1 ถ.พัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ

*Corresponding author: pimpet@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (MBC) จากกระดาษรีไซเคิล (RP) และขุยมะพร้าว (CC) เพื่อประเมินคุณสมบัติเบื้องต้นสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกรองฝุ่น โดยศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อโครงสร้างความพรุนและสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของวัสดุ อัตราส่วนผสมที่ศึกษา ได้แก่ RP100:CC0, RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30 และ RP60:CC40 ชิ้นงานเพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิ 25-30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% และอบแห้งที่ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อหยุดการเจริญเติบโตของไมซีเลียม จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างความพรุนด้วยเทคนิค X-ray Micro-Computed Tomography (X-ray Micro-CT) ร่วมกับการทดสอบการดูดซึมน้ำ ความต้านทานแรงกด และความหนาแน่น ผลการทดสอบพบว่าค่าความพรุนลดลงจาก 58.98% ใน RP100:CC0 เหลือ 31.33% ใน RP60:CC40 ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มลดลง โดย RP90:CC10 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด $227.14 \pm 1.24\%$ ขณะที่ RP70:CC30 ต่ำสุด $143.34 \pm 1.58\%$ ที่เวลา 96 ชั่วโมง ด้านสมบัติเชิงกล RP100:CC0 ให้ค่าความต้านทานแรงกดสูงสุด 1.02 ± 0.34 MPa และโมดูลัสยืดหยุ่น 0.50 ± 0.13 MPa โดยค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณขุยมะพร้าว ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความแตกต่างของโครงสร้างรูพรุนมีแนวโน้มส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะในการกรอง โดยโครงสร้างรูพรุนแบบเปิดและเชื่อมต่อกันช่วยเพิ่มการไหลผ่านของอากาศ ในขณะที่รูพรุนแบบปิดและการเชื่อมต่อที่ลดลงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับอนุภาค

คำสำคัญ: ไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต, กระดาษรีไซเคิล, ขุยมะพร้าว, ความพรุน

their preliminary properties for air filtration applications. The study investigates the effects of varying mixing ratios on the porous structure, physical properties, and mechanical performance of the materials. The analyzed ratios include RP100:CC0, RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30, and RP60:CC40. Specimens were cultivated under controlled conditions at a temperature of 25-30°C and relative humidity of 75-85%, followed by oven-drying at 90°C for 24 hours to deactivate mycelial growth. The porous structure was characterized using X-ray Micro-Computed Tomography (X-ray Micro-CT), complemented by water absorption, compressive strength, and density tests. Experimental results revealed that porosity decreased from 58.98% in RP100:CC0 to 31.33% in RP60:CC40, leading to a downward trend in water absorption. RP90:CC10 exhibited the highest water absorption at $227.14 \pm 1.24\%$, while RP70:CC30 recorded the lowest at $143.34 \pm 1.58\%$ after 96 hours. Regarding mechanical properties, RP100:CC0 yielded the maximum compressive strength of 1.02 ± 0.34 MPa and an elastic modulus of 0.50 ± 0.13 MPa, with values decreasing as the coconut coir content increased. The findings suggest that variations in the pore structure significantly influence filtration performance. Specifically, open and interconnected porous structures facilitate airflow, whereas closed pores and reduced connectivity enhance particle-trapping efficiency.

Keywords: Mycelium biocomposites, Recycled paper, Coconut coir, Porosity

ABSTRACT

This research aims to develop Mycelium Bio-Composites (MBC) derived from Recycled Paper (RP) and Coconut Coir (CC) to evaluate

I. บทนำ

การพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจากทรัพยากรหมุนเวียนเป็นแนวทางสำคัญในการลดการพึ่งพาวัสดุจากปิโตรเคมีและสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน แม้ว่าวัสดุชีวภาพหลายชนิดจะถูกนำมาศึกษาเพื่อทดแทนวัสดุสังเคราะห์ แต่ยังคงมีข้อจำกัดด้านความคงรูป ความแข็งแรงเชิงกล และการควบคุมโครงสร้างภายใน [1]-[3] ขณะเดียวกันปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยเฉพาะ PM2.5 ยังคงเป็นปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข แม้แผ่นกรอง HEPA จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุสังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ยาก [4]-[6] โดยวัสดุกรองจำเป็นต้องมีโครงสร้างพรุนที่เหมาะสม เนื่องจากความพรุนและการเชื่อมต่อของรูพรุนมีผลต่อประสิทธิภาพการกรองและความดันตกคร่อม [7]-[9]

หนึ่งในวัสดุทางเลือกที่ได้รับความสนใจคือ ไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (Mycelium Bio-Composite, MBC) เป็นวัสดุชีวภาพที่ผลิตจากไมซีเลียม (Mycelium) ซึ่งเปรียบเสมือนส่วนรากของเห็ดรา เส้นใยไมซีเลียมทำหน้าที่เป็นตัวประสานตามธรรมชาติ เชื่อมยึดวัสดุอินทรีย์ให้เกิดโครงสร้างสามมิติที่มีความพรุนและพื้นที่ผิวภายใน [10]-[12] โครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะคล้ายวัสดุของแข็งโครงสร้างพรุนแบบเซลลูลาร์ และสามารถปรับสมบัติได้ผ่านชนิดของวัสดุเพาะเลี้ยง [13]-[14] ไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ดีบนวัสดุอินทรีย์หลายชนิด เช่น ขุยมะพร้าว เปลือกถั่ว แก้วบด ชีลื้อ กากกาแฟ รวมถึงวัสดุเหลือทิ้งอย่างกระดาษรีไซเคิล [12], [14]-[15] โดยกระดาษรีไซเคิลมีปริมาณเซลลูโลสสูงและมีโครงสร้างเส้นใยละเอียด ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียม [13], [15] อย่างไรก็ตาม การใช้เพียงชนิดเดียวอาจทำให้วัสดุเกิดการหดตัวระหว่างการอบแห้ง [17] ในขณะที่ขุยมะพร้าวเป็นวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่สามารถใช้เป็นวัสดุเพาะเลี้ยงไมซีเลียมได้ แต่การใช้ในสัดส่วนสูงอาจลดการยึดเกาะของเส้นใย [12], [26] ดังนั้นการผสมกระดาษรีไซเคิลกับขุยมะพร้าวจึงมีศักยภาพในการปรับสมดุลระหว่างการเจริญเติบโตของไมซีเลียม ความคงรูป และโครงสร้างความพรุนของ MBC [10]-[11], [23]

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้าจะรายงานศักยภาพของ MBC ในด้านวัสดุฉนวน วัสดุก่อสร้างและการกรองฝุ่นละออง [10]-[12], [18]-[20] แต่การศึกษาที่เชื่อมโยงโครงสร้างความพรุนกับการพัฒนาเป็นวัสดุกรองฝุ่น PM2.5 ตามมาตรฐานสากลยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยก่อนหน้าส่วนใหญ่มุ่งเน้นผลลัพธ์เชิงการใช้งาน ขณะที่การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างความพรุนกับสมบัติวัสดุยังมีจำกัด งานวิจัยนี้จึงมุ่งเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าวต่อโครงสร้างความพรุนและสมบัติเชิงกายภาพของไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุกรองฝุ่นชีวภาพอย่างยั่งยืนในอนาคต

II. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมระหว่างกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าวในวัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตต่อโครงสร้างความพรุนคุณสมบัติทางกลและกายภาพของวัสดุ สำหรับพัฒนาเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตเป็นวัสดุกรองฝุ่นในขั้นตอนต่อไปของงานวิจัย

III. วิธีดำเนินการวิจัย

III.1 กระบวนการขึ้นรูปไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต

III.1.1 การเตรียมวัสดุเพาะเลี้ยง

วัสดุตั้งต้นถูกเตรียมโดยการย่อยกระดาษรีไซเคิลให้มีขนาดเล็ก จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งตามอัตราส่วนที่กำหนด นำกระดาษรีไซเคิลแช่น้ำเป็นเวลา 3 วันเพื่อให้เส้นใยอ่อนตัวและแตกเป็นเยื่อได้ง่าย ขณะที่ขุยมะพร้าวแช่น้ำเป็นเวลา 1.5 ชั่วโมงเพื่อลดฝุ่นและเพิ่มความชุ่มชื้น ก่อนนำวัสดุทั้งสองชนิดมาผสมกันให้สม่ำเสมอ หลังจากนั้นดำเนินการผสมกระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper, RP) และขุยมะพร้าว (Coco Coir, CC) ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำหนักแห้ง โดยกำหนดน้ำหนักแห้งรวมต่อถุงเพาะเท่ากับ 200 กรัม จำนวน 5 อัตราส่วนได้แก่ RP100:CC0, RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30 และ RP60:CC40

III.1.2 การฆ่าเชื้อและการผสมหัวเชื้อไมซีเลียม

นำไปฆ่าเชื้อโดยการนึ่งด้วยเครื่อง Portable Pressure Steam Sterilizer รุ่น DGS-280B ที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 45 นาที [21]-[22] หลังจากการฆ่าเชื้อวัสดุถูกย้ายเข้าสู่ตู้ปลอดเชื้อและปล่อยให้เย็นตัวเป็นเวลา 10-12 ชั่วโมง จากนั้นจึงผสมหัวเชื้อไมซีเลียมสายพันธุ์ *Pleurotus ostreatus* ในอัตราร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุทั้งหมดหลังฆ่าเชื้อ เพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถกระจายตัวและยึดเกาะกับกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าวได้อย่างทั่วถึง

III.1.3 การเพาะเลี้ยงและการขึ้นรูป

วัสดุผสมที่ได้ถูกนำไปเพาะเลี้ยงในฟาร์มทดลองแบบควบคุมสภาพแวดล้อมด้วยระบบ Mini Smart Farm โดยรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25-30°C [21] และความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% [23] จนเส้นใยไมซีเลียมเจริญกระจายเต็มวัสดุ ใช้เวลาประมาณ 21-30 วัน จากนั้นนำมาขึ้นรูปในแม่พิมพ์และเพาะเลี้ยงต่ออีก 14-30 วัน เพื่อให้โครงสร้างของไมซีเลียมยึดเกาะและคงรูปได้ดี สุดท้ายชิ้นงานถูกนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน Binder รุ่น Redline RF115 ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหยุดการเจริญเติบโตของไมซีเลียม

III.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลและกายภาพ

III.2.1 ความพรุน (Porosity)

ชิ้นงานทดสอบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 mm และความสูง 25.4 mm โดยขึ้นรูป MBC ด้วยแม่พิมพ์ที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์สามมิติ จากนั้นชิ้นงาน MBC ถูกนำไปวิเคราะห์ความพรุนด้วยเครื่องเทคนิค X-ray Micro Computed Tomography (Micro-CT, Bruker Skyscan 1273, USA) เพื่อนำมาดำเนินการถ่ายภาพกำหนดความละเอียดของภาพอยู่ที่ 70 μm ภายใต้แรงดันหลอดเอกซเรย์ 50 kV และกระแสไฟฟ้า 0.1 mA ข้อมูลภาพจากเทคนิค X-ray Micro-CT สามารถสร้างภาพสามมิติและนำภาพมาวิเคราะห์รูพรุนด้วยเทคนิค Image processing อย่างง่ายด้วยโปรแกรม ImageJ เพื่อคำนวณค่าความพรุนเชิงปริมาตร (Volume Based Porosity) โดยคำนวณค่าความพรุนจากสมการที่ 3.1

$$V_{\text{pore}} = \left(\frac{A_{\text{pore}} \times t_{\text{slice}}}{V_{\text{total}}} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

เมื่อ A_{pore} คือพื้นที่หน้าตัดของรูพรุน (mm^2), t_{slice} คือความหนาของชั้นภาพ (mm) และ V_{total} คือปริมาตรรวมของชั้นภาพ (mm^3) โดยคำนวณ V_{total} จากสมการที่ 3.2

$$V_{\text{total}} = A_{\text{crop}} \times t_{\text{slice}} \times N_{\text{slice}} \quad (3.2)$$

เมื่อ A_{crop} คือพื้นที่หน้าตัดของแต่ละชั้น (mm^2) และ N_{slice} คือจำนวนชั้นภาพที่นำมาวิเคราะห์

III.III.III ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นแห้งของวัสดุ MBC ถูกคำนวณหลังจากชิ้นงานถูกอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยคำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 3.3

$$\rho = \frac{M_{\text{dry}}}{V_{\text{dry}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ M_{dry} และ V_{dry} คือมวลของ MBC (kg) และปริมาตร (m^3)

III.III.III การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การทดสอบดำเนินการโดยปรับปรุงจากวิธีการของ Appels และคณะ [24] mm โดยขึ้นรูป MBC ด้วยแม่พิมพ์ที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm และความสูง 25 mm จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้นก่อนแช่ชิ้นงานในน้ำกลั่น และนำออกมาชั่งน้ำหนักที่เวลา 15, 30, 45 และ 60 นาที และ 2, 4, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง โดยคำนวณค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ 3.4

$$WA(\%) = \frac{W_{\text{wet}} - W_{\text{dry}}}{W_{\text{dry}}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยที่ W_{wet} คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังการแช่น้ำ (g) และ W_{dry} คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบในสภาพแห้งสนิท (g)

III.III.IV ความต้านทานแรงกด (Compressive Strength)

การทดสอบความต้านทานแรงกดดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบสากล Shimadzu รุ่น AGS-X Series ตามมาตรฐาน ASTM D1621 [25] ชิ้นงาน MBC ถูกขึ้นรูปให้มีความกว้างและยาวอยู่ที่ 70 mm และความสูงอยู่ที่ 40 mm เงื่อนไขในการทดสอบถูกกำหนดตามมาตรฐานทดสอบดังนี้ 1. ควบคุมอัตราการกระจัดของการกดต่อนาที (Displacement Control) อยู่ที่ 2.5 mm/min และ 2. กำหนดระยะการกด (Stroke) อยู่ในช่วง 13-15 mm

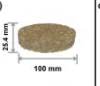
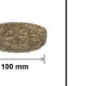
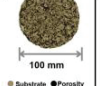
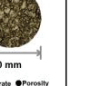
III.III.V การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical Analysis)

ผลการทดลองถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อประเมินความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างอัตราส่วนผสมของกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าวที่แตกต่างกัน โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ และเมื่อพบความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ด้วยวิธี Tukey's Honestly Significant Difference (Tukey HSD) เพื่อจัดกลุ่มความแตกต่างของตัวอย่าง ทั้งนี้ในการทดลองแต่ละอัตราส่วนเตรียมตัวอย่างจำนวน 5 ซ้ำ ($n = 5$)

IV. ผลการวิจัย

IV.I ความพรุน (Porosity)

X-ray micro-CT images					
	RP100:CC0	RP90:CC10	RP80:CC20	RP70:CC30	RP60:CC40
After reconstruction	a) 	b) 	c) 	d) 	e) 
2D cross-section at mid-plane	f) 	g) 	h) 	i) 	j) 
	Substrate Porosity 58.98%	Substrate Porosity 50.15%	Substrate Porosity 45.41%	Substrate Porosity 36.54%	Substrate Porosity 31.33%

รูปที่ 1. ภาพสามมิติและภาพตัดขวางของวัสดุ MBC/RP-CC จากเทคนิค X-ray micro-CT ที่อัตราส่วน RP:CC ต่างกัน

จากรูปที่ 1 ภาพ X-ray Micro-CT แสดงว่าค่าความพรุนเชิงปริมาตร (% โดยปริมาตร) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนขุยมะพร้าว โดยตัวอย่าง RP100:CC0 ให้ค่าความพรุนสูงสุด 58.98% ดังแสดงในภาพสามมิติและภาพตัดขวางสองมิติในรูปที่ 1(a, f) เมื่อเพิ่มขุยมะพร้าวเป็น 10, 20, 30 และ 40 wt.% ค่าความพรุนลดลงเป็น 50.15%, 45.41%, 36.54% และ 31.33% ตามลำดับ ดังปรากฏในรูปที่ 1(b-e, g-j) โดยการเติมขุยมะพร้าว 40 wt.% ทำให้ค่าความพรุนลดลงประมาณ 46.9% เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้กระดาษรีไซเคิลเพียงอย่างเดียว การลดลงของค่าความพรุนสามารถอธิบายได้จากลักษณะของขุยมะพร้าวที่เป็นเส้นใยหยาบและมีความแข็ง ส่งผลให้โครงสร้างวัสดุมีความหนาแน่นมากขึ้นและลดปริมาตรช่องว่างระหว่างอนุภาค ซึ่งสอดคล้องกับภาพตัดขวางในรูปที่ 1(f-j) ที่แสดงการลดลงของบริเวณรูพรุนอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มสัดส่วนขุยมะพร้าว แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าที่ระบุว่าวัสดุตั้งต้นที่มีขนาดหยาบและความแข็งแรงสูงมีแนวโน้มทำให้โครงสร้างวัสดุมีความพรุนลดลงจากการอัดแน่นของโครงสร้าง [21], [26]

แม้ว่าตัวอย่าง RP100:CC0 จะมีค่าความพรุนรวมสูงที่สุด แต่โครงสร้างรูพรุนส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูพรุนแบบเปิดและเชื่อมต่อกัน (open and interconnected pores) ดังที่สังเกตได้จากภาพตัดขวางในรูปที่ 1(i) ซึ่งเกิดจากลักษณะเส้นใยของกระดาษรีไซเคิลที่เอื้อต่อการแทรกตัวของเส้นใยโพลีเอทิลีนและการก่อเกิดช่องทางรูพรุนต่อเนื่อง ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนขุยมะพร้าวมีแนวโน้มเพิ่มสัดส่วนของรูพรุนแบบปิด (closed pores) และลดการเชื่อมต่อยุ่ของรูพรุนภายในวัสดุ [14] ดังแสดงในรูปที่ 1(g-j) ทั้งนี้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความพรุนรวมเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับลักษณะการเชื่อมต่อของรูพรุนและโครงสร้างภายในของวัสดุด้วย [27]

IV.II ความหนาแน่น (Density)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของ MBC/RP-CC มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนของขุยมะพร้าวใน

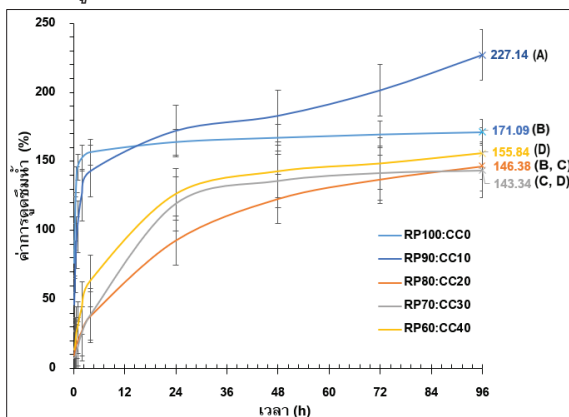
ตัวอย่าง โดยตัวอย่าง RP100:CC0 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุดเท่ากับ 251.35 ± 7.53 kg/m³ ขณะที่การเพิ่มสัดส่วนของขุยมะพร้าวเป็น 10, 20, 30 และ 40 wt.% ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงเป็น 185.02 ± 2.47 , 168.02 ± 5.85 , 147.17 ± 7.45 และ 134.83 ± 1.67 kg/m³ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนของวัสดุตั้งต้น (RP:CC) มีผลต่อค่าความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 98.53% และ R^2 (adj) เท่ากับ 98.24% เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey พบว่าแต่ละอัตราส่วนอยู่ในกลุ่มที่แตกต่างกันทั้งหมด (A-E) แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการวิเคราะห์ความพรุนจากภาพ X-ray micro-CT พบว่าค่าความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับทั้งโครงสร้างรูพรุนและคุณสมบัติของวัสดุตั้งต้น โดยแม้ว่าการเพิ่มสัดส่วนของขุยมะพร้าวจะทำให้ค่าความพรุนรวมลดลง แต่ค่าความหนาแน่นกลับลดลงตามไปด้วย ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าความหนาแน่นรวมของวัสดุไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณรูพรุนเพียงอย่างเดียว พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความแตกต่างของความหนาแน่นแท้ (Absolute Density) และลักษณะการจัดเรียงของเส้นใย โดยขุยมะพร้าวมีความหนาแน่นแท้ต่ำและมีโครงสร้างเส้นใยหยาบ ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวที่หลวมและลดมวลต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุ แม้ว่าค่าความพรุนรวมจะลดลงก็ตาม [26], [28]

ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของ MBC/RP-CC เป็นผลจากปัจจัยร่วมระหว่างการจัดเรียงของโครงสร้างรูพรุนและคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ระบุว่าความหนาแน่นรวมของวัสดุคอมโพสิตจากเส้นใยธรรมชาติถูกควบคุมโดยทั้งลักษณะของรูพรุนและความหนาแน่นแท้ของวัสดุตั้งต้น [14]

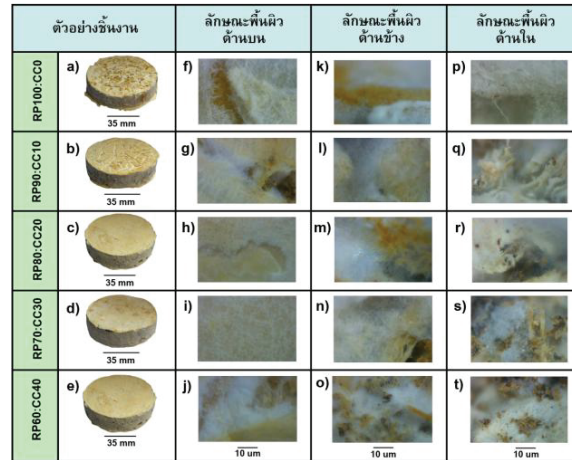
IV.III การดูดซึมน้ำ (Water Absorption)



รูปที่ II. กราฟแสดงการดูดซึมน้ำของวัสดุ MBC/RP-CC ในแต่ละอัตราส่วนตามระยะเวลา

จากรูปที่ II พบว่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นก่อนเข้าสู่สภาวะใกล้คงที่ โดยที่เวลา 96 ชั่วโมง RP90:CC10 ให้ค่าสูงสุด $227.14 \pm 1.24\%$ ขณะที่ RP70:CC30 ต่ำสุด $143.34 \pm$

1.58% อย่างไรก็ตาม RP60:CC40 ไม่ได้ให้ค่าต่ำสุด แม้มีความพรุนต่ำที่สุด พฤติกรรมดังกล่าวอธิบายได้จากโครงสร้างรูพรุน โดย RP100:CC0 มีรูพรุนแบบเปิดและเชื่อมต่อกันจึงเข้าสู่สมดุลได้รวดเร็ว ขณะที่ RP90:CC10 มีโครงสร้างซับซ้อนขึ้นทำให้น้ำแทรกซึมต่อเนื่อง นอกจากนี้ขุยมะพร้าวที่มีลิกนินสูงอาจมีผลต่อการดูดซึมน้ำ ส่งผลให้การดูดซึมน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความพรุนรวมเพียงอย่างเดียว

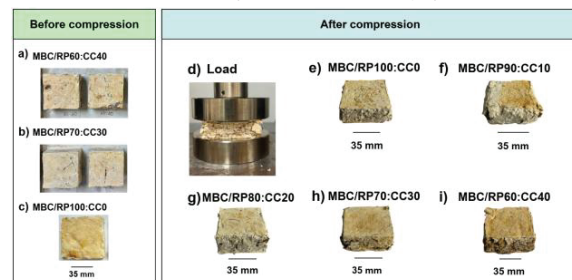


รูปที่ III. ภาพจาก Digital Microscope ที่กำลังขยาย 500x ของวัสดุ MBC/RP-CC ที่อัตราส่วน RP:CC ต่างกัน

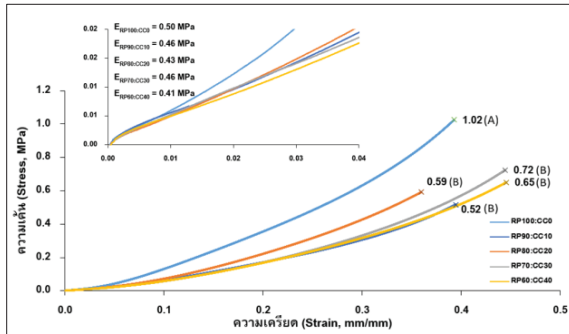
ขุยมะพร้าวซึ่งมีลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก อาจมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการดูดซึมน้ำ ส่งผลให้การดูดซึมน้ำไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความพรุนรวมเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม RP60:CC40 ไม่ได้ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำสุด แม้ว่าจะมีค่าความพรุนต่ำที่สุด โดยจากภาพโครงสร้างในรูปที่ III(i,t) ซึ่งแสดงโครงสร้างภายในของตัวอย่าง RP60:CC40 พบว่ายังมีช่องว่างภายในบางส่วนที่สามารถกักเก็บน้ำได้ ขณะที่ RP70:CC30 และ RP80:CC20 แสดงโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องมากกว่า ส่งผลให้ RP60:CC40 ดูดซึมน้ำได้มากกว่า

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงว่าสัดส่วนของวัสดุตั้งต้นมีผลต่อการดูดซึมน้ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแบบจำลองมีค่า R^2 เท่ากับ 86.18% และ R^2 (adj) เท่ากับ 83.42% และการทดสอบ Tukey (95%) พบว่าตัวอย่างแต่ละอัตราส่วนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยแสดงด้วยตัวอักษร (A-D) ในรูปที่ II

IV.IV ความต้านทานแรงกด (Compressive Strength)



รูปที่ IV. ลักษณะวัสดุ MBC/RP-CC ก่อน-หลังการทดสอบแรงอัด



รูปที่ V. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด ของวัสดุ MBC/RP-CC ที่อัตราส่วน RP:CC แตกต่างกัน

จากรูปที่ IV(a-c) และกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปที่ V พบว่า MBC/RP-CC ทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมไม่เชิงเส้น ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุพูนแบบเซลล์ลู่วอร์ โดยการรับแรงอัดเกิดจากการโค้งงอและการยุบตัวของผนังเซลล์ [7] โดย RP100:CC0 ให้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด 1.02 ± 0.34 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 0.50 ± 0.13 MPa ขณะที่ RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30 และ RP60:CC40 ให้ค่าความต้านทานแรงอัด 0.52 ± 0.13 , 0.59 ± 0.14 , 0.72 ± 0.14 และ 0.65 ± 0.10 MPa ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) แสดงว่าสัดส่วนของวัสดุตั้งต้นมีผลต่อค่าความต้านทานแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 72.41% และ R^2 (adj) เท่ากับ 66.89% และจากการทดสอบ Tukey พบว่า RP100:CC0 อยู่ในกลุ่ม A ขณะที่อัตราส่วนอื่นอยู่ในกลุ่ม B แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผล X-ray micro-CT พบว่าสมบัติเชิงกลไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความพูนรวมเพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมต่อของรูพูนและความต่อเนื่องของโครงข่ายไมซีเลียม [14] โดย RP100:CC0 มีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันดี ส่งผลให้การกระจายความเค้นสม่ำเสมอ ขณะที่การเพิ่มขุยมะพร้าวทำให้โครงข่ายไม่สม่ำเสมอและลดความต่อเนื่องของโครงข่ายรับแรง [26] พฤติกรรมดังกล่าวอาจเกี่ยวข้องกับการยึดเกาะของเส้นใยและความสม่ำเสมอของโครงสร้างซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทแรงและค่าความแข็งแรงของวัสดุ

สภาพชิ้นงานหลังการทดสอบแรงอัดในรูปที่ IV(d-i) แสดงว่า RP100:CC0 มีการแตกร้าวเด่นชัด ขณะที่อัตราส่วนที่มีขุยมะพร้าวสูงขึ้นมีแนวโน้มการยุบตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยไม่พบการแตกหักฉับพลันในทุกอัตราส่วน

V. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตจากกระดาษรีไซเคิล (RP) และขุยมะพร้าว (CC) โดยพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อโครงสร้างความพูน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ ในอัตราส่วน RP100:CC0, RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30 และ RP60:CC40

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray micro-CT แสดงให้เห็นว่าค่าความพูนเชิงปริมาตรมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนขุยมะพร้าว โดยลดลงจาก 58.98% ใน RP100:CC0 เป็น 31.33% ใน RP60:CC40 คิด

เป็นการลดลงประมาณ 46.9% สะท้อนว่าการเพิ่มขุยมะพร้าวมีผลต่อการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในวัสดุ

แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซึมน้ำ โดยตัวอย่าง RP100:CC0, RP90:CC10, RP80:CC20, RP70:CC30 และ RP60:CC40 ให้ค่าการดูดซึมน้ำ 171.09 ± 0.68 %, 227.14 ± 1.24 %, 146.38 ± 1.52 %, 143.34 ± 1.58 % และ 155.84 ± 0.30 % ตามลำดับ โดยวัสดุที่มีโครงสร้างรูพูนและการเชื่อมต่อของรูพูนสูงมีแนวโน้มดูดซึมน้ำได้มากกว่า อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างค่าความพูนรวมกับการดูดซึมน้ำไม่ได้เป็นเชิงเส้น เนื่องจากยังขึ้นอยู่กับลักษณะการเชื่อมต่อของรูพูนภายในวัสดุ

ในด้านสมบัติเชิงกลภายใต้แรงอัด วัสดุทุกอัตราส่วนแสดงพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบแบบไม่เชิงเส้นตามลักษณะของวัสดุพูน โดย RP100:CC0 ให้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดที่ 1.02 ± 0.34 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 0.50 ± 0.13 MPa ขณะที่อัตราส่วนอื่นให้ค่าความต้านทานแรงอัดอยู่ในช่วง 0.52-0.72 MPa และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 0.41-0.46 MPa

โดยรวมแล้ว อัตราส่วน RP และ CC มีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างความพูน การดูดซึมน้ำ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ MBC/RP-CC ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบวัสดุกรองฝุ่นที่ต้องการสมดุลระหว่างการไหลของอากาศและความแข็งแรงเชิงโครงสร้าง ผลการศึกษาชี้ว่าโครงสร้างความพูนและการเชื่อมต่อของรูพูนมีอิทธิพลต่อสมบัติวัสดุและแนวโน้มสมรรถนะการกรอง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [18]-[20] และอาจส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหลและการกักเก็บอนุภาค

VI. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตจากกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าว (MBC/RP-CC) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนผสมต่อโครงสร้างความพูน สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมของวัสดุตั้งต้นมีอิทธิพลต่อโครงสร้างความพูน โดยการเพิ่มสัดส่วนขุยมะพร้าวทำให้ค่าความพูนลดลงและส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพและเชิงกล รวมถึงพฤติกรรมการดูดซึมน้ำและความสามารถในการรับแรงอัด เมื่อพิจารณาสมดุลของสมบัติด้านความพูน การดูดซึมน้ำและความแข็งแรงเชิงกล พบว่าอัตราส่วน RP80:CC20 และ RP70:CC30 มีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกรองฝุ่น เนื่องจากให้โครงสร้างรูพูนที่ต่อเนื่องเพียงพอต่อการไหลของอากาศ และยังคงความแข็งแรงเชิงโครงสร้างในระดับที่เหมาะสม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าอัตราส่วนผสมระหว่างกระดาษรีไซเคิลและขุยมะพร้าวเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมโครงสร้างและสมบัติวัสดุ ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและพัฒนา MBC/RP-CC เพื่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกรองฝุ่น โดยในอนาคตจะมีการประเมินประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นละออง PM2.5 ภายใต้มาตรฐานการทดสอบ NIOSH 42 CFR Part 84 เพื่อยืนยันศักยภาพของวัสดุในการใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach, and J. Hroudová. "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials

- composed of renewable resources." *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.012> (accessed Jan. 5, 2026).
- [2] S. Jones, F. Mautner, S. Luenco, A. Bismarck, and M. John. "Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review." *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397> (accessed Jan. 5, 2026).
- [3] A. Islam, H. K. Choudhury, and S. Das. "Biodegradable materials for sustainable development: A review." *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120341> (accessed Jan. 5, 2026).
- [4] Institute of Environmental Sciences and Technology (IEST). *IEST-RP-CC001: HEPA and ULPA Filters*. USA: IEST, 2015.
- [5] International Organization for Standardization. *ISO 29463: High-efficiency filters and filter media for removing particles from air*. Geneva, Switzerland: ISO, 2011.
- [6] ASHRAE. *ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2017: Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size*. Atlanta, GA, USA: ASHRAE, 2017.
- [7] L. J. Gibson and M. F. Ashby. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1999.
- [8] F. V. W. Appels, J. van den Brandhof, H. Wösten, and M. van der Sanden. "Fungal mycelium materials: Mechanical properties and microstructure." *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.040> (accessed Jan. 6, 2026).
- [9] J. Vaclavik, P. Elsacker, L. Geltmeyer, E. De Laet, and L. De Clerck. "Advancing mycelium-based composites: Integrating strength optimization and porosity control." *Materials Today Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100325> (accessed Jan. 7, 2026).
- [10] F. Mautner, S. A. Bismarck, and M. John. "Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics." *Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03985-5> (accessed Jan. 10, 2026).
- [11] S. Attias, M. Danai, and D. Ezov. "Mycelium-based materials: A review of their fabrication, properties, and applications." *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117739> (accessed Jan. 10, 2026).
- [12] P. Elsacker, L. Vandeloock, A. Van Wylick, J. De Laet, and E. Peeters. "Mycelium-coir-based composites for sustainable construction materials." *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109058> (accessed Feb. 1, 2026).
- [13] M. Jones, A. Bhat, J. Wang, T. Moinuddin, and A. Bismarck. "Mechanical, physical and chemical properties of mycelium-based composites." *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.055> (accessed Feb. 2, 2026).
- [14] M. Haneef, L. Ceseracciu, M. Canale, I. Bayer, J. Heredia-Guerrero, and A. Athanassiou. "Advanced materials from fungal mycelium: Fabrication and tuning of physical properties." *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/srep41292> (accessed Feb. 4, 2026).
- [15] H. Yang, S. Kim, and J. Kim. "Effect of cellulose-rich substrates on fungal mycelium growth and composite formation." *Industrial Crops and Products*. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112616> (accessed Feb. 4, 2026).
- [16] S. T. Lee, H. J. Kim, and J. H. Lee. "Effect of lignin-rich natural fibers on moisture resistance of bio-composites." *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.002> (accessed Feb. 4, 2026).
- [17] T. Teeraphantuvat et al. "Improving the physical and mechanical properties of mycelium-based green composites using paper waste." *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym16020262> (accessed Feb. 4, 2026).
- [18] A. Jiang, Y. Chen, and Z. Liu. "Mycelium-based biofilters for airborne particulate matter adsorption." *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123663> (accessed Feb. 4, 2026).
- [19] R. H. Yang, Y. Zhang, J. Wang, and L. Chen. "Numerical investigation of porous bio-based filters for PM2.5 capture." *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07580> (accessed Feb. 4, 2026).
- [20] T. Lee and J. Choi. "Mycelium-composite panels for atmospheric particulate matter adsorption." *Results in Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100208> (accessed Feb. 6, 2026).
- [21] F. V. W. Appels et al. "Fabrication factors influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites." *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027> (accessed Feb. 6, 2026).
- [22] H. Jones et al. "Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire resistance." *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.092> (accessed Feb. 6, 2026).
- [23] C. Madusanka et al. "A review of recent advances in fungal mycelium-based composites." *Discovery Materials*. <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00062-y> (accessed Feb. 6, 2026).
- [24] ASTM C373-18. *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018.
- [25] ASTM D1621-16. *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- [26] M. Elsacker, S. Vandeloock, A. Brancart, E. Peeters, and L. De Laet. "Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates." *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954> (accessed Feb. 6, 2026).
- [27] P. Sratong-on et al. "Mycelium biocomposites from spent coffee grounds, rice husk, and recycled paper for temporary eco-road guideposts: Microstructure-property relationships, fire resistance, and outdoor durability." *Composites Part C: Open Access*. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2026.100699> (accessed Feb. 6, 2026).
- [28] A. Ashori, A. Nourbakhsh, and M. Karegarfard. "Effect of fiber geometry and loading on the physical and mechanical properties of wood-plastic composites." *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.028> (accessed Feb. 6, 2026).