ความพรุน พฤติกรรมทางความร้อน และศักยภาพทางสถาปัตยกรรมของวัสดุฉนวนที่ทำจากไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี

Porosity, Thermal Behavior, and Architectural Potential of Polyporaceae Mycelium-Based Insulation Panels

รับบทความ	26/09/2568
แก้ไขบทความ	21/11/2568
ยอมรับบทความ	21/11/2568

สุภาวรรณ ปันดิ* นฤมล สีพลไกร
สาขาสถาปัตยกรรม คณะศิลปกรรมและสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Supawan Pundi, Narumon Seeponkai
Architecture, Faculty of Arts and Architecture, Rajamangala University of Technology Lanna
Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University
Xupawan@gmail.com, narumonse@nu.ac.th
*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของแผ่นเส้นใยไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีจากภาคเหนือของประเทศไทย เพื่อประเมินศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนสำหรับงานสถาปัตยกรรมที่ยั่งยืน โดยใช้การวิเคราะห์ Simultaneous Thermal Analysis (STA) และ Brunauer–Emmett–Teller (BET)

ผลการวิเคราะห์ STA พบการสูญเสียน้ำหนักสามระยะหลัก ได้แก่ 30–150°C จากการระเหยน้ำ 200–320°C จากการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และมากกว่า 350°C จากการสลายลิกนินพร้อมการก่อตัวของชั้นถ่านที่ช่วยหน่วงไฟ DTG บ่งชี้จุดวิกฤติของการสลายตัวที่ 280–310°C ขณะที่ DTA แสดงการดูดและคายพลังงานความร้อนตามกระบวนการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน สำหรับการวิเคราะห์ BET และ BJH พบว่า แผ่นไมซีเลียมเป็นวัสดุรูพรุนขนาดกลาง มีรัศมีรูพรุนเฉลี่ย 8.8 นาโนเมตร พร้อมการกระจายรูพรุนสูงสุด 1.5–2.1 นาโนเมตร ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ 3.97 ม^2/ก. และปริมาตรรูพรุนรวม 0.0175 ลบ.ซม./ก. กราฟไอโซเทอมแบบที่ 4 บ่งชี้พฤติกรรมการดูดและคายซับที่ชัดเจน ดังนั้นแผ่นเส้นใยไมซีเลียมมีศักยภาพในการระบายอากาศ ควบคุมความชื้น และลดการถ่ายเทความร้อนเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฉนวนและผนังสำหรับอาคารประหยัดพลังงาน

***คำสำคัญ**: เส้นใยเห็ดวงศ์โพลีพอราซี แผ่นฉนวนทางเลือก วัสดุระบายอากาศ สถาปัตยกรรมยั่งยืน*

Abstract

This research investigates the thermal properties and microstructural of mycelium fiber sheets from the Polyporaceae family collected in northern Thailand, aiming to evaluate their potential as sustainable architectural insulation materials. Simultaneous Thermal Analysis (STA) and Brunauer–Emmett–Teller (BET) techniques were employed.

STA results revealed three stages of weight loss: 30–150 °C due to moisture evaporation, 200–320 °C from the decomposition of cellulose and hemicellulose, and above 350 °C from lignin degradation accompanied by char layer formation, which contributes to fire retardancy. The DTG curve indicated critical decomposition peaks at 280–310 °C, while DTA showed endothermic and exothermic events corresponding to thermal transitions. BET and BJH analyses confirmed that the mycelium sheets are mesoporous materials, with an average pore radius of 8.8 nm, and a prominent pore distribution peak at 1.5–2.1 nm, a specific surface area of 3.97 m^2/g, and a total pore volume of 0.0175 cc/g. The type-IV isotherm indicated clear adsorption and desorption behavior. These finding suggest that mycelium panels possess favorable characteristics for ventilation, moisture regulation, and thermal insulation, making them suitable for energy-efficient building applications.

***Keywords**: polyporaceae mycelium, alternative insulation panel, breathable material, sustainable architecture*

บทนำ

ปัจจุบันงานสถาปัตยกรรมมีความต้องการใช้วัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนในงานสถาปัตยกรรมเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากต้องการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร วัสดุฉนวนแบบดั้งเดิมอย่างโพลีสไตรีนขยายตัว (EPS) และใยหิน แม้จะมีสมบัติฉนวนความร้อนดี แต่ยังมีข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมเพราะต้องพึ่งพาทรัพยากรไม่หมุนเวียนและใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิตส่งผลให้เกิดพลังงานฝังตัวในระดับมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบอาคารยั่งยืน (Grazieschi et al., 2021)

ในทางกลับกัน วัสดุผสมจากเส้นใยไมซีเลียม (mycelium-based composites) ได้รับความสนใจในฐานะวัสดุชีวภาพที่เป็นทางเลือกใหม่ เนื่องจากผลิตจากเส้นใยเห็ดที่เจริญเติบโตบนวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มีคาร์บอนต่ำ ย่อยสลายทางชีวภาพได้ และใช้ทรัพยากรหมุนเวียนในการผลิต (Alaux et al., 2024) เส้นใยไมซีเลียมของเห็ดวงศ์โพลีพอราซีมีความสามารถในการยึดเกาะลิกโนเซลลูโลสได้ดี ทำให้เกิดวัสดุผสมที่มีความแข็งแรงและมีโครงข่ายเส้นใยพรุนสม่ำเสมอ โครงสร้างดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการเป็นฉนวนความร้อน การควบคุมความชื้น การถ่ายเทอากาศ รวมถึงการดูดซับเสียง ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัสดุสำหรับสถาปัตยกรรมยั่งยืน (Kuru & Aksoy, 2024) ด้วยเหตุนี้ วัสดุไมซีเลียมจึงถูกมองว่า เป็นทางเลือกที่สามารถทดแทนวัสดุฉนวนแบบดั้งเดิมซึ่งมีพลังงานฝังตัวสูง (Motamedi et al., 2025)

ในบริบทของประเทศไทย เห็ดขอนขาว (Lentinus squarrosulus) เป็นสายพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตวัสดุไมซีเลียม เนื่องจากเป็นเห็ดท้องถิ่นที่เจริญเติบโตเร็วบนวัสดุพืชมีความสามารถในการยึดเกาะและสร้างโครงข่ายเส้นใยอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยรายงานว่า ไมซีเลียมจากเห็ดขอนขาวสามารถสร้างวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ความพรุนสูง และเส้นใยสานกันอย่างสม่ำเสมอ เหมาะต่อการใช้เป็นวัสดุฉนวนและวัสดุดูดซับเสียง วัตถุดิบที่นิยมใช้คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา เนื่องจากมีลิกนินและเซลลูโลสสูงซึ่งเป็นอาหารหลักของไมซีเลียม โครงสร้างพรุนของขี้เลื่อยช่วยให้ไมซีเลียมสามารถแทรกตัว เจริญเติบโต และยึดเกาะได้ดี ส่งผลให้ได้แผ่นวัสดุที่มีโครงสร้างพรุนต่อเนื่อง เหมาะต่อการถ่ายเทอากาศและการควบคุมความชื้น อีกทั้งขี้เลื่อยไม้ยางพารายังเป็นทรัพยากรท้องถิ่นที่มีต้นทุนต่ำ และช่วยลดปริมาณของเสียในอุตสาหกรรมไม้ (Shakir et al., 2025)

การประเมินสมบัติของวัสดุไมซีเลียมจำเป็นต้องศึกษาทั้งด้านความร้อนและโครงสร้างจุลภาค เพื่อเชื่อมโยงกับประสิทธิภาพการใช้งานจริงในอาคาร เครื่องมือวิเคราะห์ความร้อนพร้อมกัน (Simultaneous Thermal Analysis: STA) ซึ่งประกอบด้วย TGA และ DSC เป็นเทคนิคที่สามารถประเมินพฤติกรรมการสลายตัวและการดูด-คายความร้อนได้ในเวลาเดียวกัน TGA ช่วยระบุช่วงอุณหภูมิที่วัสดุเริ่มเสื่อมสภาพและสลายตัว ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อความเสถียรและความทนไฟ ขณะที่ DSC วิเคราะห์การเปลี่ยนสถานะ การดูดซับ หรือคายพลังงานความร้อน ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของวัสดุเมื่อต้องเผชิญกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมจริง

ด้านโครงสร้างจุลภาค การวิเคราะห์ Brunauer–Emmett–Teller หรือ BET ได้นำมาใช้ประเมินขนาดรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรรูพรุนของวัสดุ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการระบายอากาศ การควบคุมความชื้น และสมบัติการดูดซับเสียง (De et al., 2025) การใช้ข้อมูลจาก STA และ BET ควบคู่กันสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติความร้อนและโครงสร้างภายในที่กำหนดประสิทธิภาพของวัสดุไมซีเลียมในฐานะวัสดุฉนวนชีวภาพ นอกจากนั้น ในเชิงนวัตกรรมและเทคโนโลยีโรงงานชีวภาพ (fungal biorefineries) ทำให้สามารถควบคุมกระบวนการเพาะเลี้ยงไมซีเลียมได้อย่างแม่นยำ ทั้งด้านเวลาเจริญเติบโต ความชื้น และส่วนผสมของวัสดุพืช ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติทางกล ความร้อน และการระบายอากาศที่ปรับได้ตามความต้องการ (Jones et al., 2020) วัสดุในรูปแบบนี้สามารถพัฒนาเป็นผนังระบายอากาศ วัสดุโครงสร้างน้ำหนักเบา และระบบโมดูลก่อสร้างที่ประกอบและถอดได้ง่าย ช่วยลดของเสีย และส่งเสริมการออกแบบตามแนวคิดสถาปัตยกรรมยั่งยืน (Aiduang et al., 2024)

แม้วัสดุไมซีเลียมจะมีศักยภาพสูง งานวิจัยจำนวนมากยังเน้นด้านกระบวนการผลิต หรือสมบัติเชิงกลเป็นหลัก การศึกษาที่เชื่อมโยงสมบัติทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค และสมบัติการดูดซับเสียงเข้ากับประเด็นเชิงสถาปัตยกรรมยังมีน้อย ข้อมูลเชิงปริมาณที่ใช้เปรียบเทียบวัสดุชีวภาพ และการประเมินประสิทธิภาพจริงในการใช้งานยังมีจำกัด ทำให้เกิดช่องว่างความรู้ที่ต้องการการศึกษาเพิ่มเติม

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งประเมินสมบัติทางความร้อน โครงสร้างจุลภาค และความพรุนที่เหมาะสมต่อการดูดซับเสียงของแผ่นไมซีเลียมที่ผลิตจากเห็ดขอนขาวบนขี้เลื่อยไม้ยางพารา โดยใช้ STA และ BET เพื่อสร้างฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์สำหรับการออกแบบวัสดุฉนวนชีวภาพประสิทธิภาพสูง พร้อมประเมินศักยภาพการประยุกต์ใช้ในสถาปัตยกรรมยั่งยืน เพื่อสนับสนุนการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากวัสดุก่อสร้าง

จุดประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของแผ่นเส้นใยไมซีเลียม โดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนพร้อมกัน (Simultaneous Thermal Analysis: STA) และการวัดพื้นที่ผิวด้วยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) เพื่อประเมินความเสถียรทางความร้อน ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวจำเพาะ

2. เพื่อประเมินศักยภาพของแผ่นเส้นใยไมซีเลียมในการใช้งานเป็นวัสดุฉนวนสำหรับอาคาร โดยเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ STA และ BET กับสมบัติการถ่ายเทความร้อน การควบคุมความชื้น และประสิทธิภาพเชิงสถาปัตยกรรม เพื่อสนับสนุนการออกแบบอาคารที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาคุณสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างจุลภาคของแผ่นเส้นใยไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีที่ใช้สายพันธุ์เห็ดจากสิงหลฟาร์มเห็ด ตำบลบ้านกลาง อำเภอสอง จังหวัดแพร่ โดยเพาะปลูกวัสดุจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา และประเมินศักยภาพของวัสดุในการใช้งานเป็นวัสดุฉนวนอาคารอย่างยั่งยืน การศึกษาจะครอบคลุมการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น โดยแบ่งขอบเขตออกเป็น 3 ด้านหลัก ดังนี้

ขอบเขตด้านวัสดุ ในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกเส้นใยไมซีเลียมจากเห็ดในวงศ์โพลีพอราซี โดยใช้เห็ดขอนขาว (Lentinus spp.) เป็นสายพันธุ์หลัก เนื่องจากมีอัตราการเจริญเติบโตสูง เส้นใยมีความเหนียว และสามารถเพาะเลี้ยงได้ดีในสภาพแวดล้อมท้องถิ่น วัสดุเพาะเลี้ยงใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งสารอาหารและเป็นโครงสร้างรองรับการพัฒนาของเส้นใย แม้ว่าขี้เลื่อยไม้ยางพาราจะเพิ่มความหนาแน่นและน้ำหนักของวัสดุสำเร็จรูป แต่ได้มีการปรับสัดส่วนร่วมกับวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเพื่อให้ได้สมดุลระหว่างความแข็งแรงและความหนาแน่น ทั้งนี้ เส้นใยไมซีเลียมที่เพาะเลี้ยงสมบูรณ์ได้นำไปผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นแผ่นวัสดุไมซีเลียมสำเร็จรูปตามขั้นตอนที่กำหนด เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินคุณสมบัติของวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างยั่งยืน

ขอบเขตด้านการทดสอบและวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ประเมินสมบัติของวัสดุไมซีเลียมตามมาตรฐานสากลเพื่อให้ผลวิเคราะห์มีความถูกต้องและเปรียบเทียบได้กับวัสดุศาสตร์ทั่วไป การทดสอบความร้อนด้วย Simultaneous Thermal Analysis (STA) ซึ่งรวม TGA และ DSC อ้างอิงมาตรฐาน ASTM E1131 และ ASTM E1269 โดยใช้เครื่อง NETZSCH STA 2500 Regulus เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการสลายตัวของวัสดุชีวภาพภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อยและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่กำหนด

การวัดความจุความร้อนจำเพาะ (*Cp*) ด้วยโหมด DSC ตามมาตรฐาน ASTM E1269 ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ตัวอย่างดูดซับหรือคายออก (ΔQ) กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการหาค่า *Cp*

การวิเคราะห์รูพรุนด้วยเทคนิค BET และการกระจายขนาดรูพรุนด้วย BJH อ้างอิง ISO 9277 และ ISO 15901-2 โดยใช้เครื่อง YK Scientific YK-Rise เพื่อศึกษาพื้นที่ผิวและลักษณะรูพรุนของไมซีเลียม แม้ไม่ได้ทดสอบค่าการนำความร้อนโดยตรง งานวิจัยได้นำมาตรฐานวัสดุฉนวน ASTM C518 และ ASHRAE 90.1 มาใช้เป็นกรอบประเมินศักยภาพของไมซีเลียมในฐานะวัสดุฉนวน และเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนทั่วไป เพื่อให้การวิเคราะห์มีความเป็นระบบและเชื่อมโยงกับข้อกำหนดสากลได้อย่างเหมาะสม

ขอบเขตด้านการประยุกต์ใช้เชิงสถาปัตยกรรม

การประเมินเน้นศักยภาพของแผ่นเส้นใยไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีในการเป็นวัสดุฉนวนสำหรับอาคาร โดยเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ STA และ BET กับคุณสมบัติด้านการนำและถ่ายเทความร้อน เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบอาคารที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

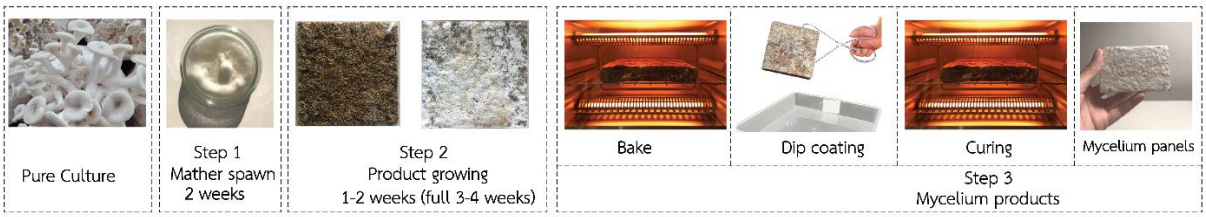
ข้อจำกัดของการศึกษา

การวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมการทดสอบสมบัติทางกล ความทนทานระยะยาว หรือการติดตั้งใช้งานจริงในอาคาร แต่เน้นการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อสร้างฐานข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้ประกอบการออกแบบสถาปัตยกรรมได้อย่างเหมาะสม

วิธีดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการจัดเตรียมวัสดุตัวอย่าง

แผ่นเส้นใยไมซีเลียม ขนาดกว้าง 155 มม. ยาว 155 มม. และความหนา 30 มม. ผลิตจากเส้นใยของเห็ดขอนขาวที่เจริญเติบโตบนส่วนผสมของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อยไม้ยางพาราผสมกับผงยิปซั่ม ดีเกลือ ปูนขาว รำอ่อน แร่ภูไมท์ แป้งข้าวเหนียว และน้ำ หลังจากทำการเพาะเชื้อ ส่วนผสมดังกล่าวนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นเวลา 14 วัน เพื่อให้เส้นใยไมซีเลียมขยายตัวเต็มพื้นที่ของวัสดุ จากนั้นทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยอ้างอิงหลักการทดสอบและควบคุมความชื้นของวัสดุฐานไม้ตามมาตรฐาน ASTM D4442 เพื่อให้ปริมาณความชื้นคงที่ก่อนการปรับสภาพวัสดุ ขั้นตอนการเคลือบผิวด้วยแป้งถั่วเขียวดัดแปรตามด้วยการอบที่ 80°C เป็นเวลา 30 นาที และบ่ม (curing) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 10 นาที ดำเนินการภายใต้กรอบแนวทางการปรับสภาพวัสดุพอลิเมอร์ เพื่อส่งเสริมกระบวนการเชื่อมขวางของโซ่พอลิเมอร์ระหว่างกลีเซอรอล แป้ง และกรดซิตริก จนได้แผ่นวัสดุที่มีความเหนียว หรือแข็งตัวเพิ่มขึ้น ขนาดสุดท้ายของแผ่นอยู่ที่กว้างประมาณ 150 มม. ยาว 150 มม. และความหนา 25 มม. โดยความหนาแน่น เท่ากับ 0.808 g/cm^3 และมีความชื้น 8.95% (ภาพ 1)



ภาพ 1 ขั้นตอนการจัดเตรียมแผ่นวัสดุเส้นใยไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี

ที่มา: ผู้วิจัย

การวิเคราะห์ทางความร้อนแบบพร้อมกัน

การวิเคราะห์ทางความร้อนแบบพร้อมกัน (Simultaneous Thermal Analysis: STA) ดำเนินการโดยใช้อุปกรณ์ Thermogravimetry (TG) และเครื่องวิเคราะห์สมบัติการเปลี่ยนแปลงเชิงพลังงานด้วยความร้อน (Differential Scanning Calorimetry หรือ DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยใช้ตัวอย่างที่มีมวลประมาณ 10 มิลลิกรัม ให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 25°C จนถึง 600°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min การวัด TG ใช้สำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงของมวลตามช่วงอุณหภูมิ ในขณะที่การวัด DSC ใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของการไหลของความร้อน เพื่อระบุสมบัติการเปลี่ยนเฟสและปฏิกิริยาทางความร้อน ทั้งในลักษณะดูดความร้อน (endothermic) และคายความร้อน (exothermic) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประเมินเสถียรภาพเชิงความร้อนและพฤติกรรมการสลายตัวของวัสดุ

การวิเคราะห์สมบัติพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุไมซีเลียม

การดูด–คายไนโตรเจน ณ อุณหภูมิ 77 เคลวิน (–196°C) ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติพรุนของวัสดุไมซีเลียมเพื่อตรวจสอบลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซ โดยใช้ทฤษฎี Brunauer–Emmett–Teller (BET) ในการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ มีหน่วยเป็น

ตารางเมตรต่อมวล 1 กรัมของวัสดุ หรือ m^2/g และใช้วิธี Barrett–Joyner–Halenda (BJH) ในการวิเคราะห์การกระจายขนาดรูพรุนและปริมาตรรูพรุนรวม ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสะท้อนถึงโครงสร้างพรุนที่เกิดจากการเจริญเติบโตของเส้นใยรา ซึ่งมีความสำคัญต่อสมบัติการทำงานของวัสดุ เนื่องจากพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีอิทธิพลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับความชื้น และการกักเก็บอากาศภายในโครงสร้างวัสดุ ทั้งนี้ ปัจจัยดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับศักยภาพในการทำหน้าที่เป็นวัสดุฉนวนความร้อนและวัสดุเชิงนิเวศสำหรับงานสถาปัตยกรรม

วิธีประเมินสมรรถนะทางสถาปัตยกรรม

การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ (physical characterization) ใช้การสังเกตด้วยตาเปล่าและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ Hitachi Scanning Electron Microscope รุ่น SU3900 เพื่อตรวจสอบพื้นผิว เนื้อสัมผัส และการกระจายตัวของเส้นใย จากนั้นประเมินความต่อเนื่องของโครงข่ายเส้นใยและความพรุน ซึ่งสะท้อนถึงความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความสามารถในการเป็นวัสดุฉนวน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal stability & Decomposition behavior) ใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TG) Differential Thermal Analysis (DTA) Derivative Thermogravimetry (DTG) และ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อวัดเสถียรภาพและพฤติกรรมการสลายตัวของวัสดุเมื่อเผชิญอุณหภูมิสูง พร้อมทั้งพิจารณาจุดสูญเสียมวลและการก่อตัวของชั้นถ่าน ซึ่งมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติทนไฟและความปลอดภัยในการใช้งานอาคาร สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างรูพรุน (Porosity & Surface area analysis) ใช้การดูด–คายซับไนโตรเจน (N_2 adsorption–desorption isotherm) พร้อมแบบจำลอง BET และ BJH เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ปริมาตรรูพรุนรวม และการกระจายขนาดรูพรุน พร้อมทั้งเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์กับสมบัติการดูดซับความชื้น การถ่ายเทความร้อน และความสามารถในการทำหน้าที่เป็นวัสดุฉนวน

ผลการศึกษา

ลักษณะทางกายภาพของวัสดุไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี

แผ่นไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี มีพื้นผิวหยาบ–เรียบผสมกัน โครงสร้างเส้นใยสานต่อกันเป็นโครงข่าย (mycelial network) ต่อเนื่องให้ความแข็งแรงและยืดหยุ่น พร้อมพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น วัสดุมีสีครีมอ่อนถึงน้ำตาลอ่อน เนื้อสัมผัสนุ่ม และยืดหยุ่น มีรูพรุนขนาดเล็ก–กลาง ที่เห็นได้ชัดโดยตาเปล่า เมื่อนำวัสดุไปถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นโครงสร้างพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยประกอบด้วยเส้นใยไมซีเลียมที่เจริญแผ่ขยายเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายสามมิติ เส้นใยเหล่านี้ทำหน้าที่ห่อหุ้มและยึดประสานอนุภาคขี้เลื่อยไม้ยางพารา ที่ช่วยเสริมสร้างความแข็งแรงให้แก่วัสดุ โครงสร้างที่ปรากฏมีลักษณะพรุนสูง โดยมีช่องว่าง (pores) ที่ไม่สม่ำเสมอในระดับหลายสิบถึงหลายร้อยไมโครเมตร พื้นผิวของวัสดุแสดงความขรุขระและไม่เรียบ สะท้อนถึงการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของเส้นใยไมซีเลียมและอนุภาคไม้ อีกทั้งยังแสดงถึงการยึดเกาะและการเจริญเติบโตของเส้นใยที่ครอบคลุมพื้นผิวอนุภาคขี้เลื่อยอย่างทั่วถึง (ภาพ 2)

ภาพ 2 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี

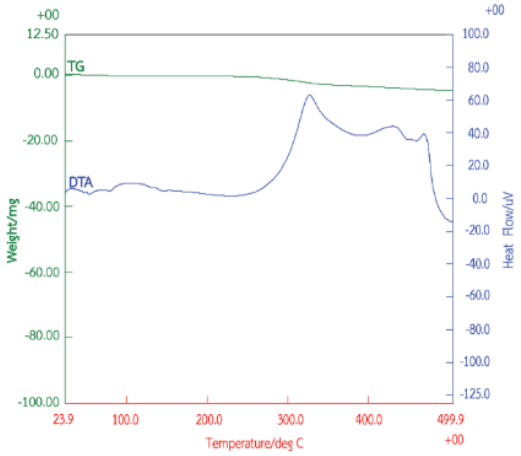
ที่มา: ผู้วิจัย

ความเสถียรและพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน

จากกราฟ TG (Thermogravimetric Analysis) ของแผ่นไมซีเลียมพบการสูญเสียน้ำหนัก 3 ระยะหลัก โดยระยะแรก (30–150°C) เป็นการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อย สาเหตุมาจากการระเหยของน้ำและสารระเหยขนาดเล็ก การสูญเสียน้ำหนักต่ำในช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไปแสดงให้เห็นว่า วัสดุมีความเสถียรในสภาวะปกติ เหมาะสมกับการใช้งานในอาคาร โดยเฉพาะในภูมิอากาศร้อนชื้น ระยะที่สอง (200–320°C) พบการสูญเสียน้ำหนักอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในโครงสร้างเส้นใย เป็นช่วงที่วัสดุสูญเสียสมบัติทางกายภาพมากที่สุด และระยะที่สาม (>350°C) เป็นการสลายตัวที่เกิดขึ้นช้าลง โดยเกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายของลิกนินและการก่อตัวของชั้นถ่าน (char residue) ซึ่งมีความสำคัญต่อการเพิ่มคุณสมบัติทนไฟ

การสลายตัวหรือการคายความร้อน

การทดสอบการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermal Analysis: DTA) พบสัญญาณ endothermic ในช่วง 50–120°C ซึ่งสอดคล้องกับการระเหยของน้ำ ต่อมาในช่วง 250–330°C พบสัญญาณ exothermic ที่สัมพันธ์กับการสลายตัวของเส้นใย ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปล่อยพลังงานและอาจส่งผลต่อการลุกไหม้ อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350°C พบว่า การสลายตัวลดลงและเกิดการสร้างชั้นถ่าน ซึ่งช่วยชะลอการลุกไหม้และเพิ่มคุณสมบัติการหน่วงไฟ สำหรับการวิเคราะห์ DTG (Derivative Thermogravimetric Analysis) แสดงพีคการสลายตัวเด่นชัดที่ประมาณ 280–310°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัสดุเริ่มสูญเสียเสถียรภาพเชิงโครงสร้างอย่างรวดเร็วในเชิงสถาปัตยกรรม ช่วงอุณหภูมินี้ถือเป็นจุดวิกฤติเมื่อวัสดุต้องเผชิญกับไฟโดยตรง (ภาพ 3)



ภาพ 3 กราฟการทดสอบทางความร้อนแบบพร้อมกันของวัสดุไมซีเลียม

ที่มา: ผู้วิจัย

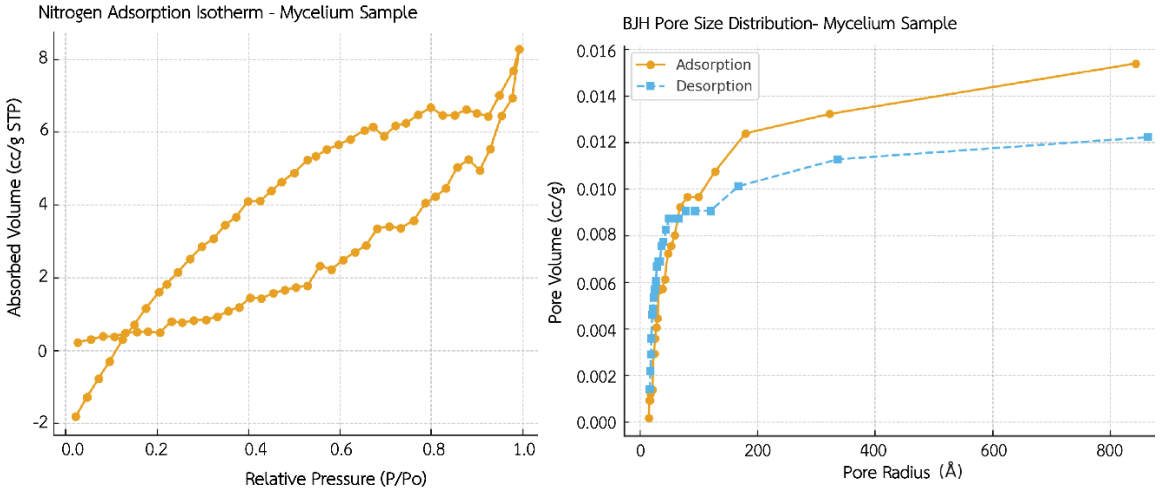
การทดสอบการไหลของความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) แสดงให้เห็นว่า การตอบสนองต่อความร้อนของวัสดุไมซีเลียมจากวงศ์โพลีพอราซีมีลักษณะสอดคล้องกับพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุชีวภาพทั่วไป โดยพบสัญญาณ endothermic ในช่วงอุณหภูมิ 50–120°C ซึ่งสัมพันธ์กับกระบวนการระเหยของน้ำและการสูญเสียความชื้นที่ยึดเหนี่ยวอยู่ภายในโครงสร้างเส้นใย ต่อมาในช่วงอุณหภูมิ 250–330°C ปรากฏสัญญาณ exothermic ที่มีความเกี่ยวข้องกับการสลายตัวขององค์ประกอบชีวภาพหลัก ได้แก่ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งถือเป็นช่วงที่วัสดุเริ่มสูญเสียเสถียรภาพเชิงความร้อนและโค รงสร้างภายในเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ระหว่างการให้ความร้อนเครื่องทดสอบได้บันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (ΔT) จากอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/min โดยมีมวลของตัวอย่าง ประมาณ 10 mg. สำหรับค่า STA ที่แสดงการสูญเสียน้ำในการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat Capacity, *Cp*) ใช้ค่าอุณหภูมิ 120°C จากการวิเคราะห์พบว่าค่า *Cp* เท่ากับ 1,100 J/kg·K

นอกจากนั้น การทดสอบการไหลของความร้อนด้วยเทคนิค DSC สามารถนำข้อมูลในการหาค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, R) ของวัสดุไมซีเลี่ยมที่มีความหนา 25 มิลลิเมตร โดยใช้ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)

เท่ากับ 0.035 W/m·K จากสูตร $R=\frac{L}{k}$ โดย L คือความหนาของวัสดุ และ k คือค่าการนำความร้อน ดังนั้น ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, R) ของแผ่นวัสดุไมซีเลี่ยม เท่ากับ 0.714 $m^2 \cdot K/W$

พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนของวัสดุไมซีเลียม

การทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนของวัสดุไมซีเลียมดำเนินการโดยใช้วิธีไอโซเทิร์มการดูดซับ-คายการดูดซับไนโตรเจน (ใช้เทคนิค Brunauer–Emmett–Teller: BET) และการวิเคราะห์การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) โดยใช้แบบจำลอง Barrett–Joyner–Halenda (BJH) ปรากฏผลการทดสอบ (ภาพ 4)



ภาพ 4 กราฟทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนของวัสดุไมซีเลียม

ที่มา: ผู้วิจัย

การทดสอบสมบัติทางรูพรุนของวัสดุไมซีเลียมแสดงให้เห็นว่า ค่ารัศมีรูพรุนเฉลี่ย (average pore radius) เท่ากับ 88.2 Å (8.8 nm.) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุรูพรุนระดับกลาง (mesoporous material) ตามเกณฑ์การจำแนกของสหภาพสากลเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ หรือ IUPAC สำหรับการกระจายขนาดรูพรุน (pore size distribution) โดยวิธี BJH พบว่า ในส่วนของ adsorption branch มีพีคหลักที่ประมาณ 21.1 Å (2.11 nm.) โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 13.2 m^2/g และ 0.024 cc/g ตามลำดับ ขณะที่ในส่วนของ desorption branch มีพีคหลักที่ประมาณ 15.6 Å (1.56 nm.) โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 20.1 m^2/g และปริมาตรรูพรุน 0.028 cc/g เมื่อประเมินพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธี BET พบว่า มีค่า 3.97 m^2/g โดยมีค่า C constant เท่ากับ 8.17 ซึ่งสะท้อนถึงแรงยึดเหนี่ยวระดับปานกลางระหว่างโมเลกุลไนโตรเจนกับผิววัสดุ รูปแบบ adsorption–desorption isotherm ที่ได้จัดอยู่ในประเภท Type IV ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุ mesoporous โดยแสดง hysteresis loop ที่ชัดเจน สื่อถึงพฤติกรรมการดูดซับและคายซับของไนโตรเจนในโครงสร้างรูพรุน

สำหรับปริมาตรรูพรุนรวม (Total Pore Volume) ในช่วงรูพรุนที่มีรัศมีน้อยกว่า 1733 Å (173.3 nm.) มีค่าเท่ากับ 0.0175 cc/g แสดงให้เห็นว่า วัสดุไมซีเลียมมีโครงสร้าง mesoporous ที่เด่นชัด และมีคุณลักษณะเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการพื้นที่ผิวจำเพาะระดับปานกลางและสมบัติการควบคุมรูพรุนอย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์รูพรุนที่เหมาะสมต่อการดูดซับเสียงของวัสดุไมซีเลียม

โครงสร้างรูพรุนของวัสดุไมซีเลียมมีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับเสียง เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียมที่สานกันแน่นสร้างรูพรุนหลายระดับตั้งแต่นาโนถึงไมโครเมตร ซึ่งเอื้อต่อการกระเจิง การเสียดทานระหว่างอากาศกับผนังรูพรุน และการแปลงพลังงานเสียงเป็นความร้อน โดยภาพ SEM แสดงให้เห็นช่องว่างระดับไมโครเมตรจำนวนมากซึ่งเหมาะต่อการดูดซับเสียงในย่านความถี่กลาง–สูง นอกจากนั้น โครงสร้างรูพรุนแบบเปิดของไมซีเลียมช่วยให้คลื่นเสียงไหลผ่านเส้นทางที่คดเคี้ยว ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ hysteresis loop บนเส้นโค้งไอโซเทอร์มที่บ่งชี้ถึงความต่อเนื่องของเครือข่ายรูพรุน แม้ค่า BET จะอยู่ในระดับ

ปานกลาง แต่พื้นผิวเส้นใยที่ขรุขระและไม่เป็นระเบียบเพิ่มความซับซ้อนของเส้นทางเสียง ส่งผลให้เกิดการสะท้อนซ้ำ และกระเจิงมากขึ้น ลักษณะดังกล่าวร่วมกับความหนาและความหนาแน่นระดับปานกลางทำให้วัสดุไมซีเลียมมีศักยภาพสูงในการเป็นวัสดุดูดซับเสียง

การประเมินสมรรถนะเชิงสถาปัตยกรรม

ด้านโครงสร้างและกายภาพ วัสดุมีโครงสร้างเส้นใยไมซีเลียมที่สานต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความยืดหยุ่น พื้นผิวมีความหยาบ–เรียบผสมกันและมีรูพรุนขนาดเล็กถึงกลาง จึงเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการน้ำหนักเบาและการถ่ายเทอากาศ

ด้านความทนทานต่อความร้อน มีเสถียรภาพในช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไป (ต่ำกว่า 150°C) ซึ่งเหมาะสมกับสภาพอากาศร้อนชื้น การสลายตัวหลักเกิดขึ้นที่ ~280–310°C แต่การเกิดชั้นถ่าน (char residue) หลัง 350°C ช่วยเพิ่มคุณสมบัติการหน่วงไฟ แสดงถึงศักยภาพในการใช้งานเป็นวัสดุภายในอาคาร

ด้านสมบัติรูพรุนและการดูดซับ จัดเป็นวัสดุ mesoporous โดยมีรัศมีรูพรุนเฉลี่ย ~8.8 nm และ isotherm ประเภท Type IV พร้อม hysteresis loop ชัดเจน มีพื้นที่ผิวจำเพาะระดับปานกลาง (3.97–20.1 m^2/g) และปริมาตรรูพรุนรวม 0.0175 cc/g เหมาะสำหรับการดูดซับความชื้นและการปรับสมดุลสภาพอากาศภายในอาคาร

ในภาพรวมเชิงสถาปัตยกรรมวัสดุไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีมีศักยภาพใช้เป็นวัสดุทดแทนฉนวนชีวภาพ (bio-based insulation) ที่มีคุณสมบัติเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ความพรุนและการเกิดชั้นถ่านช่วยเพิ่มทั้งคุณสมบัติการกันความร้อนและหน่วงไฟ เหมาะสมสำหรับงานสถาปัตยกรรมที่เน้นความยั่งยืน เช่น แผ่นผนัง ฉนวนกันความร้อน หรือวัสดุตกแต่งภายใน

การอภิปรายผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์สมบัติความร้อนและโครงสร้างรูพรุนของแผ่นไมซีเลียมแสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะเฉพาะที่มีความสำคัญต่อการใช้งานเชิงสถาปัตยกรรมและวัสดุศาสตร์ ดังนี้

ความเสถียรและพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน (STA Analysis)

การวิเคราะห์ TG พบการสูญเสียน้ำหนักสามระยะหลัก โดยระยะแรก (30–150°C) เป็นการสูญเสียน้ำหนักเพียงเล็กน้อยจากความชื้นและสารระเหย ซึ่งยืนยันถึงความเสถียรของวัสดุในช่วงอุณหภูมิการใช้งานจริง โดยเฉพาะในภูมิอากาศร้อนชื้น ระยะที่สอง (200–320°C) เกิดการสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสส่งผลต่อการสูญเสียสมบัติเชิงกลและโครงสร้าง ในขณะที่ระยะที่สาม (>350°C) เกิดการเสื่อมสลายของลิกนินพร้อมการก่อตัวของชั้นถ่าน (char residue) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติการทนไฟ นอกจากนั้น ผล DTG ยืนยันว่า จุดวิกฤติของวัสดุอยู่ในช่วง 280–310°C ซึ่งเป็นช่วงที่วัสดุเริ่มสูญเสียเสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุก่อสร้างชีวภาพอื่น ค่าอุณหภูมินี้ถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน แต่ยังต้องพิจารณาการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความทนไฟ ส่วนผล DTA พบสัญญาณ endothermic จากการระเหยของน้ำ (50–120°C) และสัญญาณ exothermic ในช่วง 250–330°C ที่สัมพันธ์กับการสลายตัวของเส้นใย ซึ่งสะท้อนถึงความเสี่ยงต่อการลุกไหม้ อย่างไรก็ตาม การก่อตัวของชั้นถ่านหลัง 350°C ช่วยหน่วงไฟและลดการลามไฟ

โครงสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิว (BET/BJH/Isotherm Analysis)

การทดสอบ BET และ BJH แสดงให้เห็นว่า วัสดุไมซีเลียมจัดอยู่ในกลุ่ม mesoporous material ตามการจำแนกของ IUPAC โดยมีรัศมีรูพรุนเฉลี่ย 8.8 nm และมีการกระจายรูพรุนหลักที่ 15–21 Å (1.5–2.1 nm.) ผล Adsorption (BJH) ให้ค่าพื้นที่ผิว 13.2 m^2/g และปริมาตรรูพรุน 0.024 cc/g ขณะที่ Desorption (BJH) ให้ค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้นที่ 20.1 m^2/g และปริมาตรรูพรุน 0.028 cc/g สะท้อนถึงโครงสร้างรูพรุนต่อเนื่องและการดูดซับ–คายซับที่สมดุล ทั้งนี้ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ที่ 3.97 m^2/g จัดว่าไม่สูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุพรุนสังเคราะห์ เช่น ซิลิกาเจล หรือ activated carbon แต่เพียงพอต่อการใช้งานในงานสถาปัตยกรรมที่เน้นการแลกเปลี่ยนความชื้นและการเป็นฉนวนความร้อน ข้อมูลจาก Isotherm ซึ่งอยู่ในลักษณะ Type IV พร้อม hysteresis loop ชัดเจน บ่งชี้ถึงการดูดซับ–คายซับน้ำในรูพรุนได้อย่างต่อเนื่อง โดยปริมาตรรูพรุนรวมทั้งหมดอยู่ที่ 0.0175 cc/g

ผลการวิเคราะห์สมบัติความร้อนและโครงสร้างรูพรุนของแผ่นไมซีเลียมชี้ให้เห็นว่า แผ่นไมซีเลียมมีคุณสมบัติเด่นในการเป็นวัสดุที่หายใจได้ (breathable material) โดยโครงสร้าง mesoporous ช่วยควบคุมความชื้นและอุณหภูมิภายในอาคาร เหมาะสำหรับการใช้เป็นฉนวนกันความร้อนและวัสดุผนังภายในในภูมิอากาศเขตร้อนชื้น นอกจากนี้ การก่อตัวของชั้นถ่านเมื่อเผชิญกับอุณหภูมิสูงยังช่วยเสริมคุณสมบัติด้านการทนไฟ แม้จะยังไม่เพียงพอต่อการผ่านมาตรฐานสากลหากไม่มีการปรับปรุงด้วยสารหน่วงไฟเพิ่มเติม ในแง่ของการควบคุมความชื้นและสมบัติทางเสียง สามารถวิเคราะห์เชิงอ้างอิงได้จากผลการทดลองทางกายภาพ ความพรุน และพื้นที่ผิวของวัสดุ (ตาราง 1)

ตาราง 1 ตารางเปรียบเทียบสมบัติการควบคุมความชื้นและสมบัติทางเสียงของแผ่นไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี

ประเด็น	**การควบคุมความชื้น (Moisture control)**	**สมบัติทางเสียง (Acoustic property)**
โครงสร้างที่เกี่ยวข้อง	โครงสร้างพรุนระดับ mesoporous (รัศมีรูพรุนเฉลี่ย ~8.8 nm)	โครงสร้างพรุน–เปิด (open-cell) และพื้นผิวขรุขระไม่เรียบ การมีรูพรุนไม่สม่ำเสมอทั้งขนาดเล็กและกลาง พร้อมโครงข่ายเส้นใยที่หนาแน่นและต่อเนื่อง ช่วยเพิ่มการกระเจิงและการดูดกลืนพลังงานเสียง
ค่าการทดสอบ	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (3.97–20.1 m^2/g) และปริมาตรรูพรุนรวม (0.0175 cc/g) บ่งชี้ว่า วัสดุสามารถดูดซับและกักเก็บไอน้ำได้ในระดับหนึ่ง	ไม่มีค่าการทดสอบค่าความสามารถในการดูดซับเสียงของวัสดุ (NRC) โดยตรง แต่ลักษณะพรุนและเส้นใยต่อเนื่องชี้ถึงศักยภาพการดูดกลืนเสียงในย่านความถี่กลาง–สูง
กลไกหลัก	การสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 30–150°C ที่มีค่าน้อย (~5%) สะท้อนว่า การดูดซับน้ำส่วนใหญ่เกิดจากความชื้นผิวและน้ำในรูพรุน ไม่กระทบต่อความเสถียรเชิงโครงสร้างของวัสดุแสดงถึงศักยภาพการทำหน้าที่เป็นวัสดุควบคุมความชื้นภายในอาคาร (moisture buffer) โดยสามารถดูดซับและคายความชื้นตามสภาวะแวดล้อมได้	ความพรุนที่เชื่อมต่อกัน (open-cell like structure) จะช่วยให้เสียงผ่านเข้าสู่รูพรุนและสูญเสียพลังงานด้วยการเสียดทาน ทำให้วัสดุมีศักยภาพใช้เป็นแผ่นดูดซับเสียงเชิงสถาปัตยกรรม

ที่มา: ผู้วิจัย

หากเปรียบเทียบศักยภาพในการใช้งานเชิงสถาปัตยกรรม วัสดุไมซีเลียมสามารถเปรียบเทียบกับวัสดุฉนวนทั่วไป เช่น โฟมพอลียูรีเทน (PU foam) เส้นใยแก้ว (glass fiber) และเส้นใยเซรามิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ตารางเปรียบเทียบสมบัติความร้อนและรูพรุนของแผ่นไมซีเลียมกับวัสดุฉนวนทั่วไป

คุณสมบัติของวัสดุ	แผ่นไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี ความหนา 25 มม. (งานวิจัยนี้)	วัสดุฉนวนทั่วไป (Ali et al., 2024)			ข้อสังเกต
		โฟมพอลียูรีเทน	เส้นใยแก้ว	เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์	
ช่วงอุณหภูมิการสูญเสียมวลหลัก (TG)	30–150°C: สูญเสียน้ำเล็กน้อย 200–320°C: สลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส >350°C: ลิกนินเสื่อมสลายและก่อตัว char	200–250°C	500–600°C	>1000°C	แผ่นไมซีเลียมมีความเสถียรในอุณหภูมิการใช้งานจริง (30–150°C) แต่ต้องปรับปรุงทนไฟเพื่อมาตรฐานสูง
จุดวิกฤติ (DTG)	280–310°C	250–300°C	450–500°C	200–500°C	ไมซีเลียมมี DTG ใกล้เคียงกับ PU Foam แต่ด้อยกว่าใยแก้วและใยเซรามิก

ตาราง 2 ตารางเปรียบเทียบสมบัติความร้อนและรูพรุนของแผ่นไมซีเลียมกับวัสดุฉนวนทั่วไป (ต่อ)

คุณสมบัติของวัสดุ	แผ่นไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซี ความหนา 25 มม. (งานวิจัยนี้)	วัสดุฉนวนทั่วไป (Ali et al., 2024)			ข้อสังเกต
		โฟมพอลียูรีเทน	เส้นใยแก้ว	เส้นใยเซรามิกไฟเบอร์	
DTA (Endothermic/ Exothermic)	Endothermic 50–120°C (การระเหยน้ำ) Exothermic 250–330°C (สลายเส้นใย)	Exothermic 250–300°C	ไม่มีสัญญาณชัด	แทบไม่มีสัญญาณ Exothermic	ไมซีเลียมมีความเสี่ยงการลุกไหม้ แต่ชั้น char ช่วยหน่วงไฟ
ประเภทรูพรุน (BET/BJH)	Mesoporous 1.5–2.1 nm.	Mesopore 2–50 nm.	Mesopore 2–50 nm.	Mesopore 2–50 nm.	แผ่นไมซีเลียมมี mesoporous ชัดเจน เหมาะกับการแลกเปลี่ยนความชื้น
พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET)	3.97 m^2/g	10–50 m^2/g	5–20 m^2/g	1–5 m^2/g	ไมซีเลียมมีค่า BET ต่ำกว่า แต่เพียงพอสำหรับการควบคุมความชื้น
ปริมาตรรูพรุน (BJH)	0.024–0.028 cc/g	0.1–0.3 cc/g	0.05–0.1cc/g	ต่ำ	แผ่นไมซีเลียมมีรูพรุนต่อเนื่องและควบคุมการแลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี
คุณสมบัติพิเศษ	ย่อยสลายได้ ระบายอากาศได้ (breathable) ควบคุมความชื้น ก่อตัว char เมื่อเจอไฟ	น้ำหนักเบา กันความร้อนดี แต่ไม่ breathable	ทนไฟสูง กันความร้อนดี แต่ก่อความระคายเคือง	ทนไฟสูงมาก ใช้งานอุตสาหกรรม	แผ่นไมซีเลียมเหมาะกับงานผนังภายในภูมิอากาศร้อนชื้นและงานฉนวนธรรมชาติ
ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, k)	0.035 W/m·K	0.035 W/m·K	0.04 W/m·K	0.06 W/m·K	แผ่นไมซีเลียมเป็นวัสดุฉนวนที่ดี
ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, R)	0.714 m^2·K/W	0.714 m^2·K/W	0.625 m^2·K/W	0.417 m^2·K/W	แผ่นไมซีเลียมมีค่า R ใกล้เคียงกับเส้นใยแก้ว เป็นตัวเลือกวัสดุฉนวนธรรมชาติ

ที่มา: ผู้วิจัย

อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แผ่นไมซีเลียมมีศักยภาพสูงสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมที่ต้องการวัสดุที่คงความยืดหยุ่น ควบคุมความชื้น และทนความร้อนระดับปานกลาง นอกจากนี้ คุณสมบัติ mesoporous ยังช่วยให้วัสดุสามารถปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้อย่างยั่งยืน แผ่นไมซีเลียมแสดงสมดุลระหว่างการควบคุมความชื้น การฉนวนความร้อน และความทนไฟทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมที่เน้นวัสดุชีวภาพและความยั่งยืน แม้จะยังไม่สามารถทดแทนโฟมพอลียูรีเทน หรือเซรามิกไฟเบอร์ในทุกด้านของสมรรถนะความร้อน แต่เป็นตัวเลือกที่มีศักยภาพสูงในงานออกแบบเชิงนิเวศวิทยา

สรุปผลการศึกษา

การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นเส้นใยไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีที่ผลิตจากเห็ดขอนขาวบนขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า วัสดุชนิดนี้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้เป็นวัสดุฉนวนเชิงสถาปัตยกรรมอย่างยั่งยืน ทั้งด้านความร้อน ความพรุน และสมรรถนะเชิงสิ่งแวดล้อม ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยวิธี STA ระบุช่วงการสูญเสียน้ำหนักที่สำคัญ 3 ระยะ ได้แก่ ระยะที่ 1 การระเหยของน้ำในช่วงอุณหภูมิ 30–150°C ระยะที่ 2 การสลายตัวของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ช่วง 200–320°C และระยะที่ 3 การเสื่อมสลายของลิกนินที่อุณหภูมิสูงกว่า 350°C ซึ่งก่อให้เกิดชั้นถ่านที่ช่วยเพิ่มสมบัติการหน่วงไฟ ผลการวิเคราะห์ DTG ชี้ให้เห็น

ช่วงอุณหภูมิการสลายตัววิกฤติที่ 280–310°C ขณะที่ผล DSC ให้ค่าความร้อนจำเพาะ (Cp) เท่ากับ 1,100 J/kg·K สะท้อนปริมาณพลังงานที่วัสดุต้องใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหนึ่งเคลวิน นอกจากนี้ ค่าความนำความร้อนที่วัดได้อยู่ที่ 0.035 W/m·K ส่งผลให้แผ่นวัสดุมีค่าความต้านทานความร้อน 0.703 m^2·K/W ซึ่งอยู่ในระดับใกล้เคียงกับวัสดุฉนวนเชิงพาณิชย์ทั่วไป

ในด้านโครงสร้างรูพรุน พบว่า วัสดุมีลักษณะเป็นระบบรูพรุนแบบ mesoporous อย่างเด่นชัด โดยมีรัศมีรูพรุนเฉลี่ย 8.8 nm และมีช่วงการกระจายรูพรุนหลักที่ 1.5–2.1 nm รูปแบบไอโซเทิร์มประเภท Type IV พร้อม hysteresis loop ที่เด่นชัดสะท้อนโครงสร้างรูพรุนเปิดต่อเนื่อง ซึ่งเอื้อต่อการกักเก็บอากาศ การระบายความชื้น และการดูดซับน้ำภายใต้สมดุล ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET เท่ากับ 3.97 m^2/g และปริมาตรรูพรุนรวม 0.0175 cc/g แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการแลกเปลี่ยนความชื้นได้อย่างเพียงพอสำหรับสภาพอาคารในภูมิอากาศร้อนชื้น ผลการสังเกตด้วย SEM ยืนยันการมีอยู่ของโครงสร้างเส้นใยสามมิติที่ยึดประสานอนุภาคไม้เกิดเป็นพื้นผิวขรุขระและรูพรุนหลายระดับ ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการถ่ายเทอากาศภายในวัสดุ รวมถึงศักยภาพในการดูดซับเสียงในช่วงความถี่ปานกลางถึงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากโครงสร้างแบบ open-cell ที่เอื้อต่อกลไกการลดพลังงานเสียงผ่านการเสียดทานและการกระเจิงภายในรูพรุน

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แผ่นไมซีเลียมจากวงศ์โพลีพอราซีมีศักยภาพสูงในการเป็นวัสดุที่หายใจได้ (breathable material) สามารถควบคุมความชื้น ลดการถ่ายเทความร้อน และเสริมสร้างคุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคาร อีกทั้งผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติทำให้เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานฉนวนเพื่อการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานและสถาปัตยกรรมเชิงนิเวศ

สำหรับข้อเสนอแนะในการยกระดับวัสดุไมซีเลียมวงศ์โพลีพอราซีให้สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิผลควรมีการประเมินสมบัติตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุฉนวนอย่างรอบด้าน ทั้งด้านความต้านทานไฟ การนำความร้อน ความทนทานต่อความชื้น และสมบัติเชิงกล เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะกับวัสดุฉนวนเชิงพาณิชย์ได้อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียง (NRC) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับเสียงตามความถี่ (SAC) ยังคงมีความสำคัญต่อการยืนยันศักยภาพของโครงสร้างรูพรุนแบบ open-cell ในการควบคุมคุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคาร

ในด้านการประยุกต์ใช้เชิงสถาปัตยกรรมควรมีการประเมินการติดตั้งจริงในรูปแบบระบบที่เหมาะสมกับคุณลักษณะของวัสดุ เช่น ระบบติดตั้งบนโครง (Cladding system) ซึ่งสามารถออกแบบเป็นแผงฉนวนที่ยึดกับโครงสร้างรองรับเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและควบคุมความชื้นบริเวณรอยต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การพัฒนาในรูปแบบระบบโมดูล (Modular system) เช่น แผงผนังเบาสำเร็จรูป หรือโมดูลฉนวนมาตรฐานจะช่วยเพิ่มความสะดวกในการติดตั้ง รื้อถอน และบำรุงรักษา การทดสอบต้นแบบในทั้งสองระบบดังกล่าวจึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินความเหมาะสมของระบบรอยต่อ การถ่ายเทความชื้น และสมรรถนะเชิงโครงสร้าง เพื่อรองรับการนำวัสดุไมซีเลียมไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอย่างยั่งยืนและเป็นระบบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน ประจำปีงบประมาณ 2568 สถานที่วิจัยห้องปฏิบัติการออกแบบสถาปัตยกรรมยั่งยืน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ห้องปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และสิงหลฟาร์มเห็ด ตำบลบ้านกลาง อำเภอสอง จังหวัดแพร่

บรรณานุกรม

Aiduang, W., Jatuwong, K., Jinanukul, P., Suwannarach, N., Kumla, J., Thamjaree, W., Teeraphantuvat, T., Waroonkun, T., Oranratmanee, R., & Lumyong, S. (2024). Sustainable innovation: Fabrication and characterization of mycelium-based green composites for modern interior materials using agro-industrial wastes and different species of fungi. *Polymers, 16*(4), 550.

Alaux, N., Vašatko, H., Maierhofer, D., Saade, M. R. M., Stavric, M., & Passer, A. (2024). Environmental potential of fungal insulation: A prospective life cycle assessment of mycelium-based composites. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 29*(2), 255–272.

Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A comprehensive review and recent trends in thermal insulation materials for energy conservation in buildings. *Sustainability*, 16(20), 8782.

De, G., Yang, L., Lee, J., Wu, Y. H., Tian, Z., & Qin, Z. (2025). Mycelium–coir-based composites for sustainable building insulation. *Journal of Materials Chemistry A, 13*, 9694–9707.

Grazieschi, G., Asdrubali, F., & Thomas, G. (2021, June). Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems, 2*, 100032.

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020, February). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design, 187*, 108397.

Kuru, Z., & Aksoy, K. (2024). A review of breathable walls and breathable paints: Innovations and sustainability in building materials. *The European Journal of Research and Development, 4* (4), 58-100.

Motamedi, S., Rousse, D. R., & Promis, G. (2025). A review of mycelium bio-composites as energy-efficient sustainable building materials. *Energies, 18*(16), 4225.

Shakir, M. A., Ahmad, M. I., Yusup, Y., Hashim, N., & Khan, M. A. (2025). From waste to wealth: Converting rubber wood sawdust into green mycelium-based composite. *Biomass Conversion and Biorefinery, 15*, 739-757.