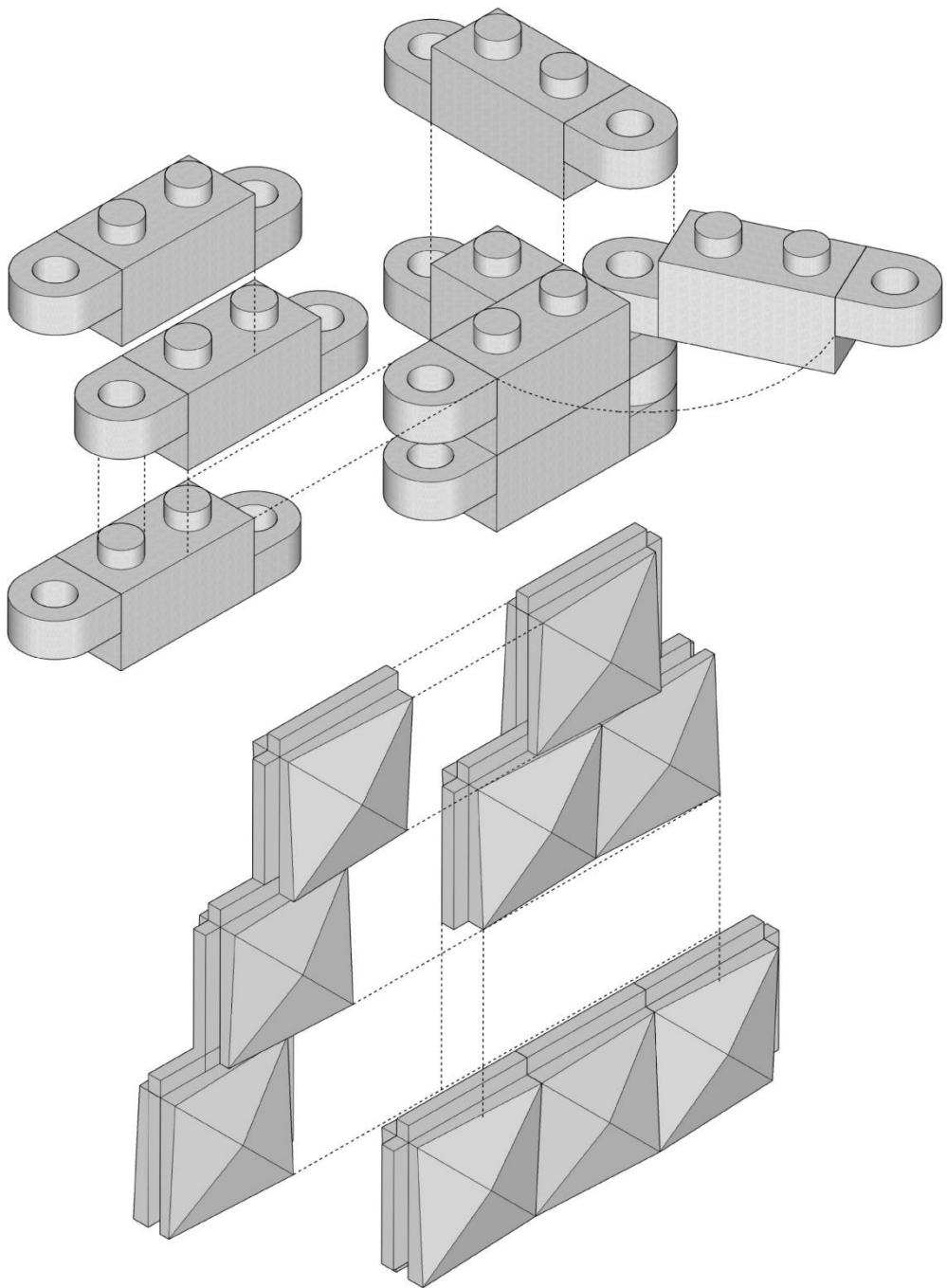




แนวทางการออกแบบวัสดุก่อผนังทางสถาปัตยกรรมโดยใช้ไมซีเลียม

The design approaches for architectural masonry material utilizing mycelium

ภูมิ ทรัพย์ไพบุลย์กิจ¹ และ กานต์ คำแก้ว²

Poom Subpaiboonkit¹ and Karn Khamkaew²

Received: 2024-06-27

Revised: 2025-01-20

Accepted: 2025-02-04

บทคัดย่อ

การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบวัสดุก่อสร้างด้วยไมซีเลียม (เส้นใยเชื้อรา) มุ่งเน้นการพัฒนาแนวทางสร้างวัสดุที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยนำเสนอคุณสมบัติพิเศษของไมซีเลียม เช่น น้ำหนักเบา ความยืดหยุ่น และการเจริญเติบโตตามธรรมชาติ ซึ่งข้อจำกัดสำคัญของไมซีเลียม คือ ความสามารถในการรับแรงอัดที่ต่ำ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว การออกแบบวัสดุจึงแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ (1) บล็อกแบบมีเดือยและช่องเสียบเดือย และ (2) บล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีร่องและลิ้น ซึ่งช่วยให้สามารถประกอบวัสดุได้ทั้งในแนวตั้งและแนวนอนโดยไม่ต้องใช้ซีเมนต์ ผลการศึกษา พบว่า บล็อกไมซีเลียมขนาดเล็กมีความหนาแน่นน้อยกว่าและน้ำหนักเบากว่า แต่สามารถรับแรงดัดได้มากกว่า ทำให้เหมาะสำหรับการออกแบบโครงสร้างที่ต้องการความยืดหยุ่นและการเสริมความแข็งแรงด้วยวัสดุอื่น ๆ เช่น ไม้ไผ่ สามารถพัฒนาต่อยอดในการสร้างผนังทรงโค้งหรือเส้นรูปผนังโค้งสวยงามและมีอิสระในการออกแบบมากขึ้น ในขณะที่บล็อกขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากกว่าและสามารถรับแรงอัดได้ดี แต่มีความสามารถในการรับแรงบิดได้น้อยกว่า จึงเหมาะสำหรับการนำมาพัฒนาใช้ในวัสดุก่อที่ต้องการความมั่นคงและความแข็งแรง มีความหนาและใช้การตกแต่งเพื่อความสวยงามที่พื้นผิวแทน นอกจากนี้ การออกแบบแม่พิมพ์ยังมีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกายภาพและการออกแบบของไมซีเลียม พบว่า การใช้แม่พิมพ์ที่ซับซ้อนเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเสียหาย ดังนั้นการออกแบบที่เรียบง่ายจึงช่วยเพิ่มความแข็งแรงในด้านการรับแรงดัดของไมซีเลียม และการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม เช่น อะคริลิกใสหรือวัสดุทดแทนอะคริลิกใส จะช่วยลดต้นทุนในการผลิตและปรับปรุงกระบวนการผลิตได้ รวมถึงการนำเสนอแนวทางใหม่ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืนจากไมซีเลียมสำหรับอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: ไมซีเลียม อิฐมวลเบา ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ วัสดุก่อ ผนังก่อ

¹ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

(Faculty of Architecture, Chiang Mai University)

ผู้เขียนหลัก (corresponding author) E-mail: poom.sub@cmu.ac.th

² คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

(Faculty of Architecture, Chiang Mai University)

Abstract

The study on mycelium-based construction materials focuses on creating sustainable and eco-friendly designs by leveraging mycelium's unique properties such as light weight, flexibility, and natural growth. However, its low compressive strength is a limitation. To address this, two main designs are proposed: (1) mortise and tenon joints, and (2) square blocks with grooves and tongues for vertical and horizontal assembly without cement. Smaller mycelium blocks are lightweight, less dense, and can withstand greater bending stress, making them suitable for flexible structural designs that can incorporate materials like bamboo. These blocks also allow for more creative design freedom, such as curved walls. Larger blocks, while heavier and better at bearing compressive forces, are less torsion-resistant, making them more appropriate for sturdy construction with aesthetic surface decorations. Additionally, mold design plays a crucial role in the material's physical properties; simpler molds help improve bending resistance while choosing cost-effective alternatives like replacing clear acrylic can reduce manufacturing costs. Moreover, the study offers promising insights for developing sustainable construction materials from mycelium for future applications.

Keywords: mycelium, lightweight brick, bioproducts, masonry, brick wall

บทนำ

การก่อสร้างทางสถาปัตยกรรมในรูปแบบผนังก่อนั้น ตั้งแต่อดีตนิยมใช้อิฐมอญ หรืออิฐแดงในการก่อสร้างผนัง ด้วยเหตุผล คือ เป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาง่าย และแข็งแรง มีการผลิตอิฐมอญใช้กันภายในครัวเรือนอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ อิฐมอญหรืออิฐแดงมีข้อด้อยในเรื่องของน้ำหนักที่มาก ต้องใช้ปูนก่อหรือซีเมนต์ในการก่อผนัง รวมถึงอิฐมอญยังมีความสมบัติเรื่องการอมความร้อน ซึ่งอาจจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในบ้านสูง และเป็นวัสดุที่ไม่ดูดซับเสียง (Pattavong, 2011) จึงไม่สามารถดูดซับเสียงจากภายนอกบ้านได้ ปัจจุบันจึงนิยมหันมาใช้อิฐมวลเบาในการก่อสร้างแทน เนื่องจากมีน้ำหนักเบากว่าอิฐมอญต่อตารางเมตร (Jain, Jain & Mandokar, 2018) แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านราคาของวัสดุ ด้านรูปทรงที่ปรับแต่งได้น้อย กรรมวิธีผลิตที่ใช้พลังงานสูง อีกทั้ง ยังต้องใช้วัสดุปูนซีเมนต์ในการผลิตก่ออิฐมวลเบาและการเชื่อมต่อประสานซึ่งได้จากหินธรรมชาติ ทำให้การใช้อิฐมวลเบาที่แม้ว่าจะมีน้ำหนักที่เบากว่าอิฐมอญ แต่มีองค์ประกอบหลายส่วนที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งทางเลือกของวัสดุที่สามารถใช้ทดแทนการทำผนังก่อจากอิฐมวลเบาที่น่าสนใจ คือ วัสดุจากธรรมชาติที่มาจากการเกษตร ส่วนใหญ่ใช้ทำในรูปแบบการผสมสัดส่วนของวัสดุเหลือใช้ทางเกษตร เช่น ข้าวโพด แกลบ ให้เข้ากับวัสดุก่อที่ทำจากซีเมนต์ เพื่อลดต้นทุนการซีซีเมนต์ทำวัสดุก่อผนัง

อีกทางเลือกหนึ่ง คือ การใช้วัสดุจากโยรา (ไมซีเลียม) ที่ส่วนประกอบทั้งหมดเป็นส่วนผสมจากธรรมชาติโดยไม่ซีซีเมนต์เป็นส่วนผสม โดยวัสดุไมซีเลียมมีความสมบัติโดดเด่นในการปรับเปลี่ยนรูปทรงได้ตามการออกแบบโดยใช้ข้อได้เปรียบของการเจริญเติบโตของไมซีเลียมตามธรรมชาติ นอกจากนั้น การให้สารอาหารที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งเป็นเศษจากผลิตผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด และซีลี้อย ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มคุณสมบัติในการรับน้ำหนัก หรือคุณสมบัติด้านเพิ่มความยืดหยุ่น การใช้สารอินทรีย์ที่เป็นผลผลิตจากการเกษตรกรรมเป็นการช่วยลดปริมาณขยะจากเกษตรกรรม และลดการเผาซากขยะและยังเป็นการสร้างคุณสมบัติต่าง ๆ มาทดแทนข้อด้อยของวัสดุไมซีเลียมได้อีกด้วย คุณสมบัติด้านน้ำหนักเบาซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สามารถเทียบทดแทนอิฐมวลเบาในรูปแบบผนังก่อได้เป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นที่สุดของไมซีเลียม แม้ว่าจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักและคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ น้อยกว่าอิฐมวลเบา แต่ด้วยความที่วัสดุไมซีเลียมมีน้ำหนักน้อยกว่านั้นจะสามารถช่วยลดต้นทุนการทำโครงสร้างเสริมในขณะเดียวกันวัสดุไมซีเลียมก็มีความสามารถในการป้องกันไฟได้ดี สามารถดูดซับเสียง มีลักษณะยืดหยุ่น ย่อยสลายง่าย และรวดเร็ว ไม่สร้างสารพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Aiduang et al., 2022a; Aiduang et al., 2022b)

เพื่อหาแนวทางการพัฒนาด้านนวัตกรรมทางเลือกของวัสดุทดแทนในด้งานสถาปัตยกรรมก่อสร้าง จึงเกิดการศึกษาถึงรูปแบบที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อทางสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียม ที่มีศักยภาพในการต่อยอดเป็นวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถพัฒนาสู่วัสดุก่อผนังด้วยผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ยั่งยืนได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปแบบที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อประเภทผนังทางสถาปัตยกรรมจากไมซีเลียม
2. เพื่อสร้างต้นแบบวัสดุก่อสร้างประเภทผนังก่อจากไมซีเลียมในการต่อยอดเป็นวัสดุทดแทน

การทบทวนวรรณกรรม

แนวคิดการทดลองและคัดเลือกคุณสมบัติวัสดุประสานที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อสร้างประกอบด้วย 3 แนวคิดหลัก ได้แก่ แนวคิดเรื่องคุณสมบัติการทำวัสดุก่อสร้างประเภทผนังก่อ แนวทางการศึกษาเปรียบเทียบและคัดเลือกคุณสมบัติวัสดุประสานที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อสร้างประเภทผนังก่อ และแนวคิดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุก่อสร้างและผลิตภัณฑ์เพื่อการทดสอบ นำไปสู่แนวทางการสร้างต้นแบบวัสดุประสานเส้นใยรา ดังนี้

1. คุณสมบัติวัสดุก่อสร้างประเภทผนังก่อ

การเลือกคุณสมบัติวัสดุประสานที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อสร้างประเภทผนังก่อใช้แนวความคิดเดียวกับอิฐมวลเบา (ดังภาพที่ 1) กล่าวคือ อิฐมวลเบามีลักษณะทางกายภาพและเชิงกลที่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของวัสดุกลุ่มโมซีเลียมซึ่งมีน้ำหนักเบา มีขนาดใหญ่ ก่อสร้างได้เร็วต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างเมื่อเทียบกับอิฐมอญหรืออิฐดินเผาขนาดมาตรฐาน (Klinkhachon et al., 2022) อิฐมวลเบามีความสามารถในการรับแรงอัด (compression) ได้ดีและถูกใช้อย่างแพร่หลายในการก่อเป็นผนังอาคาร อย่างไรก็ตามปัญหาของอิฐมวลเบาอยู่ที่การต้องใช้น้ำก่อนระหว่างก่ออิฐ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นของอิฐมวลเบาที่มีเนื้อเป็นรูพรุนมากกว่าอิฐมอญ รวมไปถึงอิฐมวลเบานั้นรับแรงด้านข้าง (lateral force) ได้น้อยเนื่องจากรับแรงเฉือนได้น้อย (Rotsin, 2010) อิฐมวลเบามีความสามารถในด้านการป้องกันความร้อนและเสียงมากกว่าอิฐมอญ (Dorlo, 2009) อย่างไรก็ตาม ในแง่ของการออกแบบทางสถาปัตยกรรม การปรับแต่งได้น้อยและข้อจำกัดทางด้านรูปทรง (Klinkhachon et al., 2022) รวมถึงการใช้วัสดุซีเมนต์และแร่ธาตุผสมต่าง ๆ ที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมนั้น คือ ข้อด้อยหลักของอิฐมวลเบา จากการต้องใช้น้ำซีเมนต์และหินปูนเป็นส่วนประกอบสำหรับผลิตซีเมนต์ ซึ่งได้จากการสกัดภูเขาหินธรรมชาติ ก่อนที่จะนำเข้าสู่โรงงานการผลิตซีเมนต์ คอนกรีต และส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อผลิตอิฐมวลเบา ซึ่งถือว่าเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่สร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุดอุตสาหกรรมหนึ่ง (WBCSD, 2002)

วัสดุโมซีเลียมนั้นมีคุณสมบัติเรื่องน้ำหนักเบาที่โดดเด่นกว่าอิฐมวลเบา ในขณะที่อิฐมวลเบามีน้ำหนักประมาณ 490 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เทียบกับอิฐมอญที่มีน้ำหนักถึง 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Jain, Jain & Mandokar, 2018) ผลิตภัณฑ์ก่อนจากวัสดุโมซีเลียมมีน้ำหนักเพียงแค่ประมาณ 43 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Hoeven, 2020) ซึ่งน้อยกว่าอิฐมอญถึงเกือบ 40 เท่าและน้อยกว่าอิฐมวลเบาถึง 12 เท่า นั่นหมายความว่าความเมื่อเทียบกับอิฐมวลเบาแล้ว วัสดุโมซีเลียมแม้ว่าจะมีความสามารถในการรับน้ำหนักและคุณสมบัติเชิงกลต่าง ๆ น้อยกว่าอิฐมวลเบา วัสดุโมซีเลียมมีน้ำหนักเบากว่าช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างเสริม ในขณะที่เดียวกันวัสดุโมซีเลียมยังมีความสามารถในการป้องกันไฟได้ดี (Fisher, 2010) มีลักษณะยืดหยุ่น ไม่สร้างสารพิษ และมีคุณสมบัติในการดูดซับเสียง (sound insulation) และดูดซับความร้อนใกล้เคียงกับวัสดุประเภท โฟมสังเคราะห์ (synthetic foams) และ แผ่นฉนวนกันความร้อน (insulation boards) ซึ่งมีราคาสูงและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Aiduang et al., 2022a; Aiduang et al., 2022b)



ภาพที่ 1 สรุปการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของวัสดุก่อเพื่อเป็นแนวทางการออกแบบ

ที่มา: ปรับปรุงจาก Aiduang et al. (2022a; 2022b); Dorlo (2009); Fisher (2010); Hoeven (2020); Klinkhachon et al. (2022); Rotsin (2010) และ WBCSD (2002)

2. คุณสมบัติวัสดุไมซีเลียมที่มีผลต่อการสร้างวัสดุก่อ

จากงานทดลองของ Aiduang, et al., (2022a) พบว่า การจับคู่วัสดุไมซีเลียมที่มีสารตั้งต้นเส้นใยเป็นขี้เลื่อย (sawdust) และมีชนิดเห็ดเป็นเห็ดตีนปลอก (lentinus sajor-caju) มีคุณสมบัติที่สร้างการรับแรงอัดในวัสดุไมซีเลียมได้ดีกว่าการใช้สารตั้งต้นเป็นเปลือกข้าวโพด (corn husk) และฟางข้าว (rice straw) จับคู่กับเห็ดชนิดอื่น ๆ ยกตัวอย่าง เช่น Ganoderma fornicatum, Ganoderma williamsianum และ Schizophyllum commune อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติในด้านความยืดหยุ่นและการยืดหดตัวนั้นมีค่าน้อยที่สุดในการจับคู่วัสดุไมซีเลียมที่มีสารตั้งต้นเส้นใยเป็นขี้เลื่อย และมีชนิดเห็ดเป็นเห็ดตีนปลอกเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น และเห็ดชนิดอื่น ๆ ในขณะเดียวกัน การจับคู่วัสดุสารตั้งต้นเส้นใยเป็นเปลือกข้าวโพดและเห็ดตีนปลอกนั้นให้คุณสมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่นและการยืดหดตัวได้ดีกว่า ซึ่งเป็นคุณสมบัติหลักที่ต้องการในการออกแบบวัสดุก่อ แต่มีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า (Aiduang et al., 2022a)

ดังนั้น การออกแบบวัสดุก่อจากเส้นไมซีเลียมที่มีศักยภาพมากที่สุด คือ สารตั้งต้นเส้นใยที่เป็นเปลือกข้าวโพด (corn husk) และมีชนิดเห็ดเป็นเห็ดตีนปลอก (lentinus sajor-caju) ซึ่งคุณสมบัติวัสดุไมซีเลียมที่มีลักษณะทดแทนข้อด้อยของวัสดุก่อแบบทั่วไป คือ กำลังรับแรงดัด (flexural strength) กำลังรับแรงดึง (tensile strength) และกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ซึ่งสารตั้งต้นเส้นใย (substrates) และชนิดเห็ด (fungal species) ที่นำมาใช้ จะถูกคัดเลือกโดยคุณสมบัติดังที่กล่าวมาข้างต้นให้สอดคล้องกับคุณสมบัติทางการออกแบบที่เน้นเรื่องการตั้งอยู่ได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้ปูนขาว ความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อน และความสามารถในการยับยั้งปรับเปลี่ยนรูปทรงของผนังได้

3. การเตรียมวัสดุก่อสร้างและผลิตภัณฑ์เพื่อการทดสอบ

การเตรียมขนาดวัสดุก่อสร้างและผลิตภัณฑ์เพื่อการทดสอบเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ และหาขนาดที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบ โดยเน้นความคงทนความแข็งแรงของวัสดุให้เป็นไปตามมาตรฐานและคุณสมบัติของการเป็นวัสดุก่อสร้าง ซึ่งการทดสอบวัสดุ หมายถึง วิธีการในการทดสอบหรือตรวจสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของตัววัสดุ ไม่ว่าจะเป็น คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ซึ่งหมายถึงพฤติกรรมอย่างหนึ่งของวัสดุ ที่สามารถแสดงออกมาเมื่อมีแรงจากภายนอกมากระทำต่อวัสดุ รวมทั้ง

คุณสมบัติทางเคมี (chemical properties) ซึ่งหมายถึง การเกิดปฏิกิริยาเคมีและองค์ประกอบทางเคมี และอีกหนึ่งสมบัติได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เช่น การดูดซึมน้ำ ความชื้น และความสามารถในการรับแรงอัด เป็นต้น โดยมีงานวิจัยที่ทำการทดสอบไว้อย่างหลากหลาย ดังนี้

1. การศึกษาของ Phonphuak (2018) ได้ทำการทดสอบรูปแบบของก้อนอิฐจากวิธีการขึ้นรูปอ้างอิงจากการผลิตอิฐแบบชาวบ้านในพื้นที่ โดยเติมเถ้าขานอ้อย แกลบข้าว และขี้เลื่อย มีการกำหนดการทดสอบ 5 ด้านเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของอิฐที่สามารถนำไปเป็นวัสดุทดแทน คือ ทดสอบการหดตัวค่าการดูดซึมน้ำ ค่าความพรุนตัว ความหนาแน่น ทดสอบความแข็งแรง และ ลักษณะพื้นผิวของอิฐ

2. การศึกษาสมบัติของอิฐมวลเบา ที่มีส่วนผสมของขี้เลื่อยและผักตบชวาของ Chongphonsit & Yamkam (2013) เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทำอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของขี้เลื่อยและผักตบชวา โดยการขึ้นรูปแบบวัสดุทดสอบ คือ อิฐมวลเบา ที่มีส่วนผสมของขี้เลื่อยและผักตบชวาตามขนาดมาตรฐานอิฐมวลเบา กำหนดให้ใช้การทดสอบสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้อง 2 ด้าน คือ ความต้านแรงอัดและอัตราการดูดซึมน้ำ

3. การศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์แผ่นยิปซัม ประเภทท่อนไฟผสมเส้นใยจากใบต้นข้าวโพดสำหรับใช้ในอาคารประหยัดพลังงาน โดย Chusit & Nilat (2018) เพื่อพัฒนาแผ่นยิปซัมประเภทท่อนไฟที่ผสมเส้นใยข้าวโพด การศึกษานี้มีใช้รูปแบบการขึ้นรูปแผ่นทดสอบตามมาตรฐานแผ่นยิปซัมทั่วไป โดยกำหนดให้ทำการทดสอบคุณสมบัติเชิงกล 6 ด้านตามวัตถุประสงค์ คือ ความสามารถในการทนแรงกดแตก ความต้านทานการดึงตะปู การแอ่นตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4. การศึกษาอิฐมวลเบาผสมฟางข้าวเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน โดย Chitiat, Charoennetkun & Anusiri (2013) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติเชิงกายภาพของอิฐมวลเบาผสมฟางข้าว เพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน โดยการขึ้นรูปแบบวัสดุทดสอบอ้างอิงกับขนาดของอิฐมวลเบา กำหนดให้มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้อง 5 ด้าน คือ กำลังต้านทานแรงอัด กำลังต้านทานแรงดัด การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น และการนำความร้อน

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากข้างต้น จะเห็นว่าวิธีการทดสอบวัสดุนั้นมีอยู่มากมายตามคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุและตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ซึ่งปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบวัสดุจากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า รูปแบบของการขึ้นรูปวัสดุสำหรับทดสอบนั้นมีลักษณะที่หลากหลาย โดยมีลักษณะไม่ตายตัวอยู่ที่นักวิจัยว่าจะเลือกอ้างอิงกับมาตรฐานและแนวคิดการออกแบบแบบใดที่เหมาะสมกับงานวิจัย รวมถึงการออกแบบส่วนผสมในการขึ้นรูปที่สอดคล้องกับรูปทรงวัสดุทดสอบ ในปัจจุบันยังไม่มีหรือนำไมซีเลียมาพัฒนาเป็นวัสดุก่อตามรูปแบบมาตรฐาน และไม่มีหรือนำวัสดุดังกล่าวมาทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะทางกายภาพอย่างแพร่หลาย นอกเหนือจากการพัฒนาไมซีเลียเป็นวัสดุทางสถาปัตยกรรมประเภทวัสดุอัดประกอบ (composite board) (Jiranukul et al., 2024) สำหรับการออกแบบและพัฒนาวัสดุก่อทางสถาปัตยกรรมโดยใช้ไมซีเลียจึงต้องใช้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานเป็นวัสดุก่อเป็นหลัก ได้แก่ ความหนาแน่น (density) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และความสามารถในการรับแรงดัด (flexural strength) เพื่อหาความเป็นไปได้ในการออกแบบและพัฒนารูปทรงและขนาดของวัสดุก่อจากไมซีเลียจากการก่อขึ้นไปในแนวทางตั้งและการรับน้ำหนักกดทับ

ระเบียบวิธีวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้ เป็นการศึกษาเชิงคุณภาพแบบผสมผสานที่ใช้การวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) รวมกับองค์ความรู้การออกแบบทางสถาปัตยกรรมประกอบ เพื่อพัฒนาแนวทางการออกแบบเพื่องานสถาปัตยกรรมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสามารถพัฒนาวัสดุก่อสร้างผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ยั่งยืนได้ โดยมีวิธีการ 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

ขั้นที่ 1 การทบทวนวรรณกรรมและสรุปข้อดีข้อเสียเพื่อพัฒนารูปแบบวัสดุก่อ

ขั้นที่ 2 การออกแบบต้นแบบในห้องปฏิบัติการด้วยโปรแกรมออกแบบสามมิติก่อนการสร้างต้นแบบจริง ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 ศึกษาขนาด ปริมาตรและรูปทรงของอิฐมวลเบาเพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการขึ้นรูปร่างและขนาดของวัสดุไมซีเลียม

2.2 กำหนดหน้าตัดและปริมาตรพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุก่อจากวัสดุไมซีเลียมให้มีความสัมพันธ์กับขนาดของอิฐมวลเบา

2.3 ดำเนินการออกแบบ โดยใช้โปรแกรมขึ้นรูปสามมิติ (sketchup) สำหรับงานสถาปัตยกรรม โดยออกแบบ 2 รูปแบบ ได้แก่ วัสดุก่อที่มีรูปทรงและการประกอบสร้างใกล้เคียงกับอิฐมวลเบามาตรฐานและรูปแบบวัสดุก่อที่มีรูปทรง เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างผนังประเภทฉนวนและงานออกแบบเชิงจินตภาพ

2.4 พัฒนาวัสดุก่อตามคุณสมบัติที่ต้องการโดยเพิ่มข้อมูลการออกแบบ เพื่อทดแทนข้อด้อยในอิฐมวลเบาและเสริมข้อจำกัดของวัสดุไมซีเลียม

2.5 พัฒนาแบบจนถึงขั้นตอนสุดท้ายและพัฒนาออกแบบแม่พิมพ์ (mold)

2.6 ออกแบบแม่พิมพ์ตามรูปร่างของชิ้นงาน

ขั้นที่ 3 การผลิตชิ้นงานตามแม่พิมพ์ด้วยการเพาะเชื้อไมซีเลียมในแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Aiduang et al. (2022a) และ Jiranukul et al. (2024) โดยใช้การจับคู่วัสดุไมซีเลียมที่มีสารตั้งต้นเส้นใยเป็นขี้เลื่อย (sawdust) และมีชนิดเห็ดเป็นเห็ดตีนปลอก (lentinus sajor-caju) ที่มีคุณสมบัติที่สร้างการรับแรงอัดในวัสดุได้ดีกว่าการเพาะไมซีเลียมด้วยสารตั้งต้นและเห็ดชนิดอื่น ๆ โดยมีรายละเอียดการเตรียมวัสดุและวิธีการดังนี้

3.1 การเตรียมหัวเชื้อไมซีเลียมใช้เมล็ดข้าวฟ่างเป็นแหล่งอาหาร เริ่มจากต้มเมล็ดข้าวฟ่างเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็นลง จากนั้นนำเมล็ดข้าวฟ่างต้มแล้ว 100 กรัม ใส่ในขวดแก้วพร้อมสำลีปิดปากขวด ขวดถูกนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 20 นาที แล้วปล่อยให้เย็นลงในอุณหภูมิห้องอย่างช้า ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นย้ายเชื้อไมซีเลียม (ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร) ที่ได้จากการเพาะเชื้อบริสุทธิ์ของเห็ด L. sajor-caju บน Potato Dextrose Agar (PDA) ไปยังขวดแก้วขนาด 325 มิลลิลิตร (5 เชื้อต่อขวด) หลังจากนั้นขวดที่ได้รับการใส่หัวเชื้อจะถูกบ่มเป็นเวลา 2 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 30°C เพื่อให้เมล็ดข้าวฟ่างถูกปกคลุมด้วยไมซีเลียมทั้งหมดเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อ

3.2 งานวิจัยใช้สัดส่วนขี้เลื่อยร้อยละ 100 เป็นเส้นใยตั้งต้นและผสมถูกเติมด้วยรำข้าวร้อยละ 5 แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 1 แคลเซียมซัลเฟตร้อยละ 2 และโซเดียมซัลเฟตร้อยละ 0.2 ความชื้นในแต่ละส่วนผสมถูกปรับให้มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 โดยการเติมน้ำ จากนั้นนำส่วนผสมแต่ละชนิด 700 กรัม ใส่ถุงโพลีโพรพิลีนที่มีขนาดกว้าง 3.5 นิ้ว และยาว 12.5 นิ้ว ถูกถูกปิดผนึกอย่างแน่นหนา ถุงที่ปิด

ผืนกึ่งเหล่านี้ถูกนำไปใส่ในวงแหวนโพลีไวนิลคลอไรด์และปิดด้วยกระดาษก่อนจะนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นฆ่าเชื้อ ปล่อยให้เย็นลงในอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วใส่หัวเชื้อไมซีเลียม 5 กรัม ลงบนส่วนบนของวัสดุเพาะในแต่ละถุง ถุงที่ได้รับการใส่หัวเชื้อจะถูกบ่มที่อุณหภูมิ 30 °C และพบว่าเส้นใยเชื้อราปกคลุมวัสดุเพาะหลังการบ่มเป็นเวลา 35 วัน

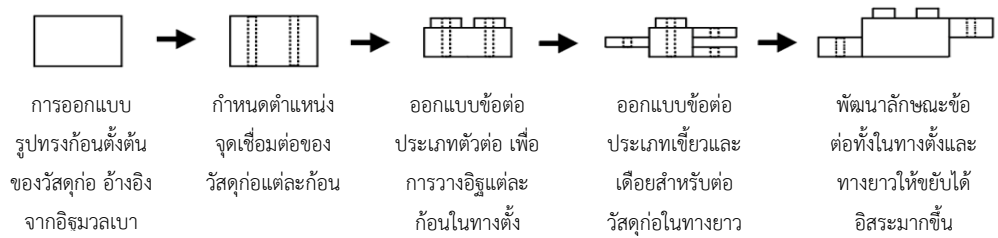
3.3 หลังจากนั้นเชื้อไมซีเลียมจากการเพาะจะถูกย้ายไปยังแม่พิมพ์ที่ได้ออกแบบและผลิตไว้จากชั้นตอนข้างต้น จากนั้นทำการอัดเย้นโดยใช้เครื่องอัด Shop press ZX0901 E-1 จากประเทศไต้หวัน ขั้นตอนการอัดเย้นนี้ใช้แรงอัดที่ควบคุมไว้ที่ 2 MPa เป็นเวลาที่แม่นยำ 10 นาที หลังจากการอัดเย้น แม่พิมพ์ถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 3 สัปดาห์เพื่อให้ตัวอย่างพัฒนาต่อไป จากนั้นนำตัวอย่างออกและบ่มต่ออีก 7 วัน หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกย้ายอย่างระมัดระวังไปยังเตาอบที่อุณหภูมิ 70 °C เพื่อให้แห้งอย่างสมบูรณ์

3.4 แกะบล็อกไมซีเลียมออกจากแม่พิมพ์หลังจาก 3 สัปดาห์เพื่อนำบล็อกมาทดสอบขั้นที่ 4 ทดสอบวัสดุเพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพของบล็อกจากไมซีเลียม โดยการหาความ สามารถในการรับแรงอัด (compressive strength) และกำลังรับแรงดัด (flexural strength) และอภิปรายผล

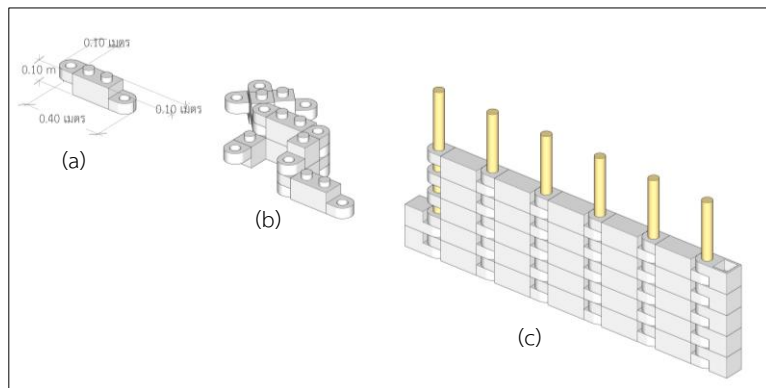
ผลการวิจัย

ผลการทดลองวัสดุก่อผนังจากไมซีเลียม พบว่า วัสดุสามารถขึ้นรูปได้ตามแม่พิมพ์ที่ออกแบบไว้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน รูปทรงที่ได้มีความคงรูปเหมาะสมต่อการใช้งาน และมีน้ำหนักเบากว่าอิฐมวลเบา สอดคล้องกับลักษณะเฉพาะตัวของวัสดุไมซีเลียมที่มีความสามารถในการป้องกันไฟได้ดี สามารถดูดซับเสียง มีลักษณะยืดหยุ่น ไม่สร้างสารพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Attias et al., 2019) โดยในการศึกษานี้จะใช้แนวคิดการออกแบบวัสดุก่อผนังจากไมซีเลียม ที่อ้างอิงกับลักษณะพื้นฐานตามแบบของอิฐมวลเบาในการเป็นต้นแบบ เพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับเพาะเลี้ยงวัสดุไมซีเลียม ให้มีรูปร่างตามการออกแบบเพื่อใช้เป็นผนังก่อ ที่จะเส้นทางเลือกในการใช้วัสดุไมซีเลียมแทนอิฐมวลเบา สามารถออกแบบได้ 2 รูปแบบ (ดังตารางที่ 1) ดังนี้

1. รูปแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ เป็นการออกแบบวัสดุก่อที่มีรูปทรงใกล้เคียงกับวัสดุก่ออิฐมวลเบามาตรฐาน มีขนาดยาว 40 x 10 x 10 เซนติเมตร มีปริมาตรประมาณ 4,200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาตรประมาณครึ่งหนึ่งของอิฐมวลเบาขนาดเล็มาตรฐาน (9,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ใช้แนวคิดการขึ้นรูปจากก้อนสี่เหลี่ยมวัสดุมวลเบา พัฒนาด้วยการเสริมช่องเสียบเดือย (mortise) และเดือย (tenon) เพิ่มเสริมความแข็งแรงด้วยไม้ไผ่ ปรับปรุงเรื่องรูปทรงที่ใช้ข้อได้เปรียบเรื่องน้ำหนักเบาของวัสดุไมซีเลียม เป็นตัวหลักในการออกแบบ ทำให้รูปทรงที่ออกแบบมีปริมาตรที่น้อยกว่าอิฐมวลเบาและสามารถเชื่อมกันด้วยข้อต่อโดยไม่ต้องใช้วัสดุซีเมนต์ในการเชื่อมต่อ วัสดุตัวอย่างรูปแบบที่ 1 นี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในงานก่อผนังที่มีลักษณะคล้ายอิฐมวลเบามาตรฐาน เน้นความแข็งแรง โดยสามารถปรับลูกเล่นความโค้งของผนังตามความต้องการได้ (ดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3) จากการทดลองเพาะเชื้อไมซีเลียม พบว่า รูปแบบของบล็อกไมซีเลียมแบบที่ 1 มีข้อต่อและสลักเดือยในการประกอบสร้างมาก เมื่อใช้ปริมาตรของวัสดุเทียบเท่าอิฐมวลเบามาตรฐานนั้นทำให้ไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ดี และไม่สมบูรณ์เต็มแม่พิมพ์ ทำให้บล็อก เดือยและส่วนประกอบต่าง ๆ ไม่แข็งแรง

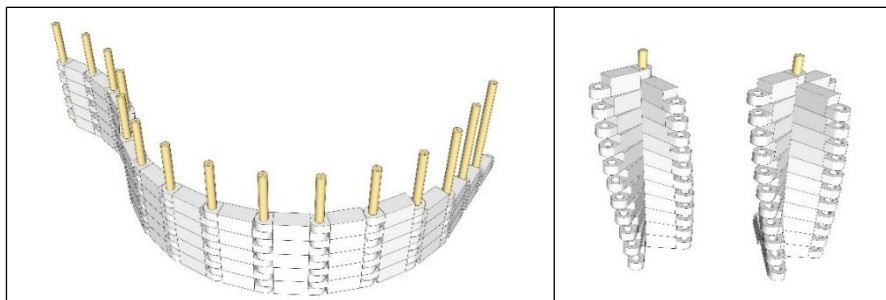


ภาพที่ 2 ไคอะแกรมสรุปการพัฒนาต้นแบบของวัสดุก่อรูปแบบที่ 1
ที่มา: Author



ภาพที่ 3 การออกแบบโดยใช้โปรแกรมขึ้นรูปสามมิติ (sketchup) รูปแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ: (a) แสดงขนาดมาตรฐาน
ต่อหนึ่งก้อน (b) แสดงถึงลักษณะการใช้ประโยชน์จากข้อต่อที่ออกแบบไว้ในทางก่อวัสดุขึ้นในทางตั้งและทางนอนแบบอิสระ
และ (c) แสดงถึงการใช้ข้อต่อด้านข้างเพื่อเสริมโครงสร้างอื่น ๆ อย่างเช่นไม้ไผ่ กรณีต้องการเสริมความแข็งแรงผนังในทางตั้ง

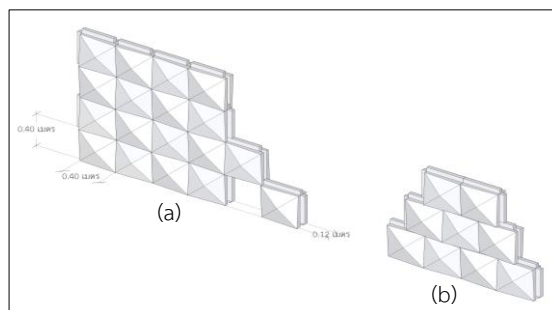
ที่มา: Author



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการออกแบบโดยใช้ช่องข้อต่อด้านข้างเป็นตัวเสริมโครงสร้าง เป็นข้อต่อจุดหมุนที่เปิดโอกาสให้ก่อบล็อก
ไม้ซีเลียมในแนวโค้งหรือการก่อสร้างลูกเล่นในทางตั้งเพิ่มเติม เพื่อความสวยงามได้

ที่มา: Author

2. รูปแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาด $40 \times 40 \times 12$ เซนติเมตร (ดังภาพที่ 5) มีปริมาตรประมาณ 19,200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีปริมาตรใกล้เคียงกับอิฐมวลเบาขนาดใหญ่ (18,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร) ใช้แนวคิดมาจากการคลี่คลายก้อนอิฐมวลเบาโดยอ้างอิงปริมาตรและขนาดของอิฐมวลเบาขนาดใหญ่และพัฒนาจากลักษณะลวดลายสามเหลี่ยมและเส้นตัด ออกแบบให้สามารถเชื่อมกันด้วยลิ้นและร่องเป็นข้อต่อหลักโดยไม่ต้องใช้วัสดุซีเมนต์ เพื่อให้วัสดุก่อแต่ละก้อนเมื่อวางผสานกันจะป้องกันการเกิดช่องว่างระหว่างก้อนวัสดุ และเมื่อวางต่อกันจะเกิดลวดลายเส้นสามเหลี่ยมพื้นผิวฉนวนที่ช่วยเรื่องความสวยงาม (ดังภาพที่ 4) สามารถเป็นตัวสะท้อนเสียงได้ ข้อดี คือ มีขนาดเทียบเท่าอิฐมวลเบาทั่วไป แต่มีน้ำหนักที่น้อยกว่า วัสดุตัวอย่างรูปแบบที่ 2 นี้ เหมาะสำหรับการนำมาเป็นผนังตกแต่งเพื่อความสวยงาม เป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง อีกทั้งวัสดุต้นแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก ด้วยลักษณะของข้อต่อเป็นลิ้นและร่องทำให้การก่อสร้างและเคลื่อนย้ายผนังสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่ง ควบคุมการเอียงกันของวัสดุได้โดยง่าย

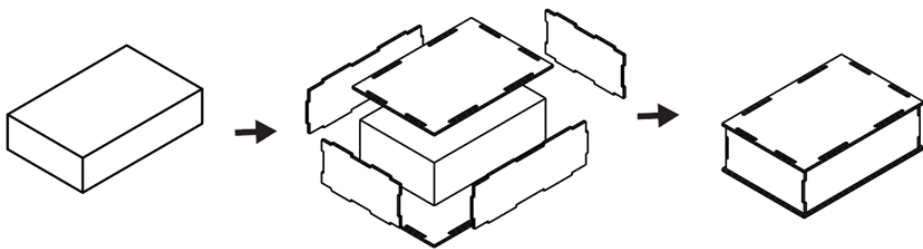


ภาพที่ 5 การออกแบบโดยใช้โปรแกรมขึ้นรูปสามมิติ (sketchup) รูปแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส: (a) แสดงการต่อกันวัสดุในทางตั้งและทางนอนรูปแบบตาราง (stack bond) และ (b) แสดงการต่อกันวัสดุในทางตั้งและทางนอนในรูปแบบสับหว่าง (stretcher bond)

ที่มา: Author

จากการออกแบบรูปทรงวัสดุจากจากโมซีเลียม ดังตารางที่ 1 เพื่อเป็นทางเลือกแทนอิฐมวลเบานั้นพบว่า สามารถเพิ่มคุณสมบัติและแก้ไขข้อด้อยของวัสดุโมซีเลียม ได้แก่ (1) ออกแบบเพิ่มข้อต่อประสานวัสดุก่อแต่ละชั้นในตัวเอง โดยไม่ต้องพึ่งปูนก่อ (2) ออกแบบให้เกิดความหลากหลายในการสร้างเป็นผนัง ด้วยคุณสมบัติด้านความไม่จำกัดของรูปทรง (3) ออกแบบองค์ประกอบที่ช่วยรับน้ำหนักแทนวัสดุโมซีเลียม เช่น การเพิ่มช่องสำหรับใส่โครงสร้างเสริมด้านข้างเพื่อช่วยรับน้ำหนัก (4) ออกแบบเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนและเสียง และ (5) ออกแบบเพื่อสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบได้อย่างหลากหลาย ส่งเสริมรูปลักษณ์แปลกใหม่ในด้านความสวยงามและความคิดสร้างสรรค์

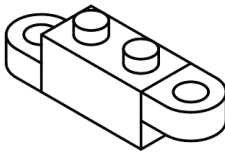
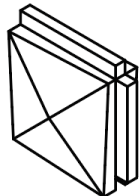
ซึ่งจากการออกแบบทำให้สามารถสร้างแม่พิมพ์ที่เป็นแม่แบบในการเพาะเลี้ยงวัสดุโมซีเลียม เพื่อสร้างผนังก่อให้มีรูปแบบตามด้วยการใช้วัสดุหลักในการเป็นต้นแบบ คือ แผ่นอะคริลิกสีที่ จะทำให้มองเห็นการเจริญเติบโตของโมซีเลียม อีกทั้ง ความหนาของแผ่นอะคริลิกช่วยให้ตัววัสดุยังคงรูปได้ในระหว่างที่เชื้อกำลังเจริญเติบโตเข้าสู่รูป ซึ่งจุดต่อเชื่อมระหว่างอะคริลิกแต่ละด้านจะออกแบบให้เป็นซีฟ้น ทำให้สามารถแกะถอดประกอบได้ทุกด้าน (ดังภาพที่ 6)



ภาพที่ 6 การสร้างแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปผนังก่อจากวัสดุไมซีเลียม โดยใช้วัสดุอะคริลิกใสที่ทำให้มองเห็นการเจริญเติบโตภายใน และการออกแบบข้อต่อแม่พิมพ์ที่สามารถแกะออกได้ทุกด้าน

ที่มา: Author

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติ ต้นแบบเพื่อสร้างแม่พิมพ์สำหรับเพาะเลี้ยงวัสดุไมซีเลียม

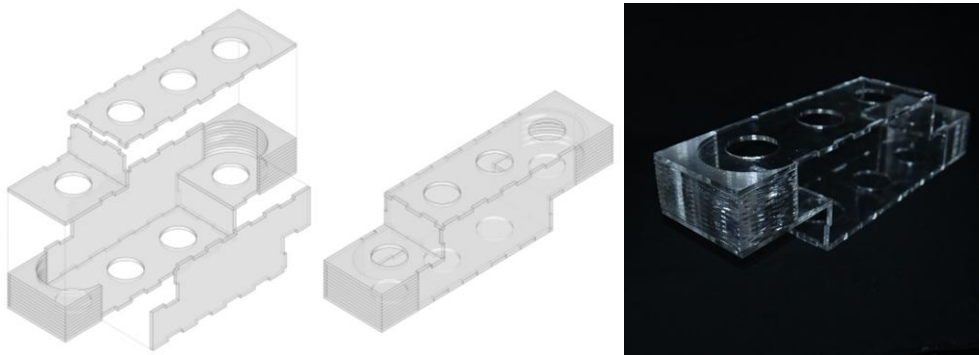
คุณสมบัติ / รูปแบบ	 รูปแบบที่ 1 แบบมวลเบาทัวต่อ	 รูปแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส
1. การก่อรูป	ก่อรูปจากก้อนอิฐมวลเบามาตรฐาน พัฒนารูปแบบโดยการออกแบบเพิ่มช่องสำหรับใส่โครงสร้างอื่น ๆ เสริม เพื่อแก้ข้อด้อยของการรับแรงอัดของไมซีเลียม แก้ปัญหาการต้องไขปูนกาวในอิฐ ด้วยการออกแบบข้อต่อที่ต่อชิ้นงานแต่ละชิ้นได้ง่าย และเพิ่มศักยภาพในการทำผนังที่มากกว่าการเป็นเส้นตรงและเส้นฉากที่พบในอิฐและอิฐมวลเบาทั่วไป	ก่อรูปจากก้อนอิฐมวลเบามาตรฐาน พัฒนารูปแบบเพื่อใช้ประโยชน์จากน้ำหนักเบาและความสามารถในการดูดซับเสียง ข้อต่อแบบลิ้นและร่องออกแบบมาเพื่อแก้ปัญหาคาการไขปูนกาวในอิฐมวลเบา และลดความเสียหายที่เกิดขึ้นยังเพิ่มคุณสมบัติด้านความงามและการดูดซับเสียง
2. การประกอบสร้าง	เป็นวัสดุก้อนขนาดเล็กเทียบเท่าอิฐมวลเบาขนาดเล็ก มีการออกแบบเดียวแบบตัวต่อเพื่อวางบล็อกแต่ละก้อนต่อกันขึ้นไปทางตั้งได้สะดวก ด้านข้างมีการออกแบบช่องสำหรับใส่โครงสร้างเสริมอย่างเช่นไม้ไผ่ เพื่อทำให้บล็อกแต่ละก้อนสามารถวางซ้อนทับกันในแนวนอนได้ (ดังภาพที่ 3)	ออกแบบให้มีลักษณะการต่อวางเพินกันสูงขึ้นโดยที่ไม่มีโครงสร้างเสริมโดยใช้หน้าตัดและน้ำหนักของตัวบล็อกเอง ผ่านการประกอบสร้างสูงขึ้นและต่อกันในแนวข้างผ่านระบบร่องลิ้น
3. น้ำหนัก	มีปริมาตรที่ใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา แต่มีน้ำหนักเบากว่าจากธรรมชาติของวัสดุไมซีเลียม	มีปริมาตรที่ใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา แต่มีน้ำหนักเบากว่าจากธรรมชาติของวัสดุไมซีเลียม
4. การพัฒนาด้านความสวยงามเชิงสถาปัตยกรรม	มีองค์ประกอบบล็อกที่สนับสนุนการก่อวัสดุเพื่อความสวยงามจากการใส่โครงสร้างช่วยพยุง ทำให้บล็อกมีอิสระไม่จำเป็นต้องก่อเพื่อเป็นผนังเส้นตรงในแนวนอนหรือแนวตั้ง (ดังภาพที่ 4)	ลักษณะของร่องขึ้นจำกัดให้บล็อกต้องเรียงต่อกันขึ้นไปตามแนวตั้งและแนวนอนของบล็อก แต่สามารถพัฒนาลวดลายและลักษณะพื้นผิวได้

ที่มา: Author

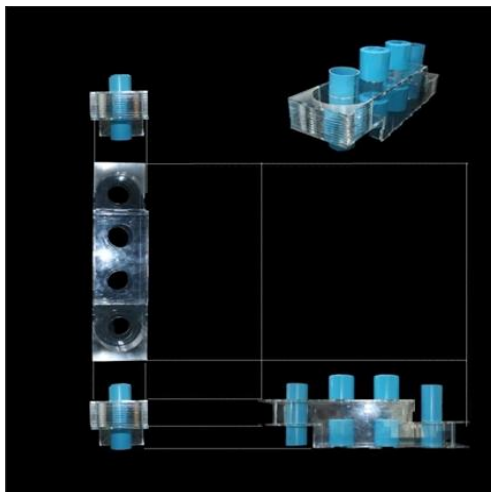
รูปแบบแม่พิมพ์ในการสร้างวัสดุทดสอบจากการวิเคราะห์เรื่องวัสดุและข้อจำกัดสามารถออกแบบแม่พิมพ์ได้ 2 ต้นแบบ คือ แม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ และ แม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีรายละเอียดและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แต่ละรูปแบบ ดังนี้

1. แม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ

การออกแบบแม่พิมพ์อีฐมวลเบาตัวต่อนั้นออกแบบจากลักษณะมาตรฐานของอิฐมวลเบาที่จำหน่ายในปัจจุบันซึ่งเป็นลักษณะก้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุก่อจากวัสดุไมซีเลียม โดยลักษณะของการทำแม่พิมพ์มี 2 รูปแบบ คือ แบบหัวเหลี่ยม และแบบหัวโค้ง แต่เนื่องจากแม่พิมพ์แบบหัวเหลี่ยมมีข้อจำกัดด้านความเหลี่ยมทำให้การติดตั้งประกอบยาก และข้อจำกัดด้านการหมุนปรับข้อต่อ มีความซับซ้อนในการทำแม่พิมพ์ จึงพัฒนาเป็นแม่พิมพ์แบบหัวโค้งที่แก้ไขข้อจำกัดต่าง ๆ และนำไปใช้เป็นต้นแบบแม่พิมพ์ในการสร้างแม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปผนังก่อจากวัสดุไมซีเลียม (ดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8)



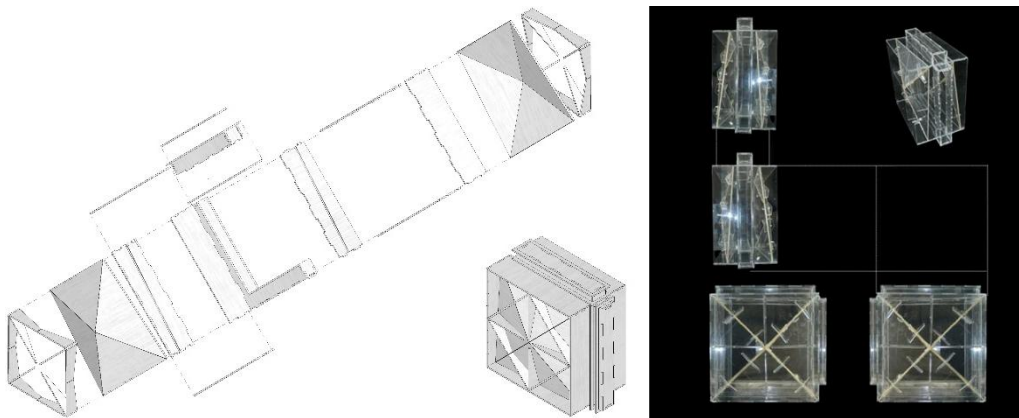
ภาพที่ 7 การออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นแม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ (แบบหัวโค้ง)
ที่มา: Author



ภาพที่ 8 แม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 1 แบบมวลเบาตัวต่อ
ที่มา: Author

2. แม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส

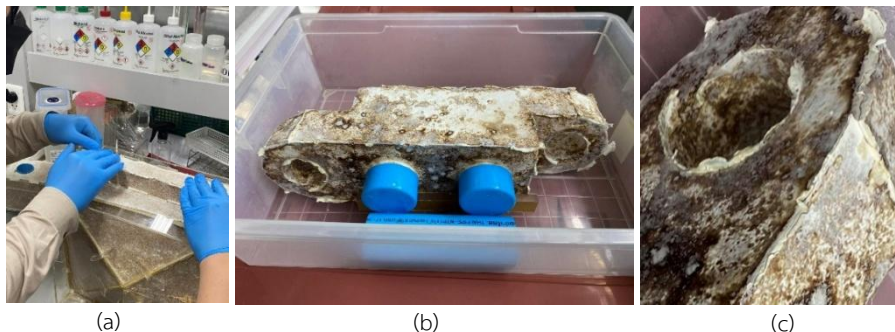
การออกแบบแม่พิมพ์แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยคำนึงถึงรูปทรงของข้อต่อต่าง ๆ ที่จะใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างชิ้น ช่องโครงสร้างเสริมที่ช่วยเรื่องความแข็งแรงและรายละเอียดช่องที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อรูปแบบนี้แม่พิมพ์วัสดุก่อนนี้ เลือกใช้แผ่นอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถมองเห็นการเจริญเติบโตของเชื้อภายในได้ ซึ่งความหนาของแผ่นอะคริลิกจะช่วยให้ตัววัสดุยังคงรูปได้ในระหว่างที่เชื้อกำลังเจริญเติบโตเข้ารูป โดยลักษณะของการทำแม่พิมพ์ครั้งแรกทำเป็นลักษณะแบบก้อนสี่เหลี่ยมที่มีมุมบิดไปมา มีชิ้นส่วนในการประกอบมาก แต่พบข้อจำกัด คือ รูปทรงที่บิดจะมีความซับซ้อนในการทำแม่พิมพ์เมื่อต้องทำหลาย ๆ ชิ้นมาประกอบกันทำให้ ความยืดหยุ่นในการประกอบมีน้อย และมีความเสี่ยงที่แต่ละชิ้นที่ประกอบเข้าด้วยกันมีข้อบกพร่อง จึงพัฒนาเป็นแบบก้อนเหลี่ยมที่ลดทอนรูปทรงให้ประกอบง่ายขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาด้านความไม่แข็งแรงของแม่พิมพ์และความซับซ้อนของรูปทรง แต่ยังคงรูปร่างในการประกอบไว้เช่นเดิม (ดังภาพที่ 9)



ภาพที่ 9 การออกแบบแม่พิมพ์และชิ้นแม่พิมพ์จากต้นแบบที่ 2 แบบบล็อกสี่เหลี่ยมจัตุรัสทรงตรง

ที่มา: Author

อย่างไรก็ตาม การทำแม่พิมพ์เพาะเลี้ยงวัสดุไมซีเลียม (ดังภาพที่ 10) ยังพบปัญหาที่สามารถแก้ไขและพัฒนาต่อยอดได้ คือ การปรับลดรูปแบบที่มีความซับซ้อน และการปรับใช้วัสดุอื่นที่มีรูปแบบที่บดบังแสงแทนอะคริลิกที่มีราคาสูงร่วมกับการคาดคะเนการเจริญเติบโตของวัสดุไมซีเลียม ที่เชื้อจะเจริญเติบโตเต็มแม่พิมพ์ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างต้นแบบการพัฒนาวัสดุก่อสร้างชีวภาพประสานเส้นใยรา ที่มีศักยภาพในการต่อยอดเป็นวัสดุทดแทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถพัฒนาสู่วัสดุก่อสร้างผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ยั่งยืนได้



ภาพที่ 10 รูปต้นแบบก้อนผนังก่อจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แม่พิมพ์จากการออกแบบ และปัญหาที่พบจากการแกะแม่พิมพ์
(a) แสดงปัญหาในการถอดแกะแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่และมีส่วนประกอบมาก (b) และ (c) ภาพแสดงให้เห็นถึงขอบที่ไม่เรียบของก้อนไมซีเลียมที่เจริญเติบโตลามออกแม่พิมพ์ที่ไม่แข็งแรง
ที่มา: Author

ผลการทดสอบวัสดุ

การทดสอบบล็อกไมซีเลียมที่แกะจากแม่พิมพ์ตามรูปทรงที่กำหนดไว้ เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ และเทียบคุณสมบัติกับวัสดุบล็อกเชิงพาณิชย์ต่าง ๆ ได้ผลดังนี้

1. ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุบล็อกไมซีเลียมที่ผลิตจาก *L. sajor-caju* ผสมกับซีเมนต์ในการศึกษานี้ พบว่า ค่าความหนาแน่นที่มีความแตกต่างกันระหว่างวัสดุบล็อกไมซีเลียมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยวัสดุบล็อกไมซีเลียมแบบที่ 2 มีค่าความหนาแน่น ($351.44 \pm 11.71 \text{ Kg/m}^3$) มากกว่าวัสดุบล็อกไมซีเลียมแบบที่ 1 ($311.28 \pm 8.32 \text{ Kg/m}^3$) อย่างมีนัยสำคัญ (ดังตารางที่ 2) โดยวัสดุบล็อกไมซีเลียมแบบที่ 2 มีขนาดและปริมาตรมากกว่าแบบที่ 1 ซึ่งอาจเป็นเพราะพฤติกรรมการเจริญเติบโตของไมซีเลียมในปริมาตรวัสดุที่ต่างกัน เกี่ยวข้องกับความสามารถของไมซีเลียมในการครอบคลุมและเข้าถึงสารอาหารภายในวัสดุ โดยมีรายงานว่า ปริมาตรวัสดุที่น้อยกว่าจะมีการกระจายตัวของสารอาหารที่สม่ำเสมอมากกว่า และมีความต้านทานน้อยกว่า ทำให้ไมซีเลียมเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในระยะเวลาเดียวกันเมื่อเทียบกับปริมาตรที่มากกว่า ในกรณีที่มีปริมาตรวัสดุมาก ความหนาแน่นของวัสดุอาจทำให้การเข้าถึงสารอาหารช้าลง ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและการครอบคลุมของไมซีเลียม (Ghazvinian & Gursoy, 2022; Teeraphantuvat et al., 2024; Yang et al., 2021) อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นของบล็อกไมซีเลียมทั้ง 2 รูปแบบนี้มีค่าน้อยกว่าบล็อกเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น ๆ ซึ่งส่งผลทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการก่อสร้างอาคารที่จะช่วยลดภาระการรับน้ำหนักของโครงสร้างของอาคารได้

2. กำลังรับแรงอัด (compressive strength)

ผลการทดลองในการศึกษานี้ พบว่า ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในการบีบอัดขึ้นอยู่กับรูปร่างและรูปทรงของวัสดุบล็อกไมซีเลียม โดยค่าความแข็งแรงในการบีบอัดของแบบที่ 2 ($0.883 \pm 0.04 \text{ MPa}$) สูงกว่าแบบที่ 1 ($0.383 \pm 0.03 \text{ MPa}$) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบที่ 2 มีความสามารถในการรับแรงบีบอัดได้ดีกว่าแบบที่ 1 สอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาซึ่งระบุว่ารูปร่าง รูปทรง รวมถึงปริมาตรมีผลต่อค่าความแข็งแรงในการบีบอัด โดยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จะทำให้มีความหนาแน่นที่สูงขึ้น และส่งผลให้ความแข็งแรงในการบีบอัดจะดีขึ้นตามไปด้วย (Elsacker et al., 2019; Ghazvinian & Gursoy, 2022; Voutetaki &

Mpalaskas, 2024) นอกจากนี้ ยังมีรายงานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความหนาแน่น และคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการบีบอัด (Bahrami & Rashid, 2023; Xu & Garrecht, 2024) โดยวัสดุที่มีหนาแน่นกว่าหรือมีปริมาตรมากกว่า สามารถทนต่อการยุบตัวและการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างได้ดีกว่า เพราะมีปริมาตรและความหนาแน่นวัสดุที่มากขึ้นช่วยกระจายแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการรับแรงอัด อย่างไรก็ตาม ค่าความแข็งแรงในการบีบอัดของบล็อกไมซีเลียมในการศึกษานี้ ยังมีคุณสมบัติไม่เทียบเท่ากับวัสดุบล็อกชนิดอื่น ๆ (ดังตารางที่ 2) เนื่องจากยังไม่ได้มีการพัฒนาเสริมความแข็งแรงในด้านการออกแบบ จึงส่งผลให้บล็อกไมซีเลียมจากการศึกษาในครั้งนี้ทั้ง 2 แบบ มีคุณสมบัติที่ยังไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้เป็นวัสดุก่อที่ต้องทนแรงบีบอัดสูงด้วยตนเอง

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบบล็อกไมซีเลียมจากการศึกษากับวัสดุบล็อกเชิงพาณิชย์

วัสดุ	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ตารางเมตร)	กำลังรับแรงอัด (MPa)	กำลังรับแรงดัด (MPa)
บล็อกไมซีเลียมจากการศึกษา			
แบบที่ 1	311.28 ± 8.32 a	0.383 ± 0.03 b	2.25 ± 0.12 a
แบบที่ 2	351.44 ± 11.71 a	0.883 ± 0.04 a	0.84 ± 0.02 b
บล็อกเชิงพาณิชย์อื่น ๆ (Costigan & Pavia, 2009; Lachheb, Youssef & Younsi, 2023; Mostafa & Uddin, 2015; Wei, Wu & Yang, 2020)			
อิฐมวลเบา (lightweight concrete)	1,200 – 1,600	21 – 64.1	7.6 – 9.2
อิฐจากเศษพลาสติก (plastic waste bricks)	1,200	17.96	9.01
อิฐดินอัด (compressed earth blocks)	1860	3.33 – 5.92	0.49 – 0.95
อิฐตัวต่อหรืออิฐประสาน (interlocking bricks)	1,500	12	2.5
อิฐมอญ (clay bricks)	1,700-1,900	20-35	3-6

หมายเหตุ: ผลลัพธ์ คือ ค่าเฉลี่ย, ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันในแต่ละรูปแบบของวัสดุ ถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญตาม Duncan’s multiple range test ($p \leq 0.05$)

3. กำลังรับแรงดัด (flexural strength)

ค่าความแข็งแรงในการดัดของบล็อกไมซีเลียมในการศึกษานี้ พบว่า บล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 1 มีค่าความแข็งแรงในการดัด (2.25 ± 0.12 MPa) สูงกว่าบล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 2 (0.84 ± 0.02 MPa) อย่างมีนัยสำคัญ (ดังตารางที่ 2) โดยมีรายงานจากการศึกษาก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงในการดัด (Rigobello et al., 2022; Teeraphantuvat et al., 2024; Voutetaki & Mpalaskas, 2024) โดยอาจเกิดจากบล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 1 ที่มีปริมาตรน้อยกว่า จะช่วยให้เส้นใยไมซีเลียมสามารถเจริญเติบโตได้ครอบคลุมพื้นที่ของวัสดุได้มากกว่า ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างเส้นใยที่แข็งแรงและสม่ำเสมอ ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงในการดัดโค้ง แต่ในกรณีของวัสดุที่มีปริมาตรมากกว่า เช่น บล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 2 การกระจายตัวของเส้นใยไมซีเลียมอาจไม่ทั่วถึงเมื่อมีระยะ

ฟักตัวเท่ากัน ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงที่น้อยกว่า ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาฟักตัวอาจจะเพิ่มค่าความแข็งแรงในการตัดสำหรับวัสดุที่มีรูปร่างรูปทรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับบล็อกเชิงพาณิชย์อื่น ๆ พบว่า บล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 1 มีค่ามากกว่า อิฐดินอัด (Compressed Earth Blocks) (0.49 – 0.95 MPa) (ดังตารางที่ 2) จึงส่งผลทำให้มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า และมีค่าความแข็งแรงในการรับแรงดัดไม่เทียบเท่าวัสดุบล็อกเชิงพาณิชย์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนารูปร่างรูปทรงของบล็อกไมซีเลียม ควรพิจารณาด้านการเสริมความยืดหยุ่นเพื่อเพิ่มค่าความแข็งแรงในการดัดให้เทียบเท่ากับวัสดุบล็อกเชิงพาณิชย์ชนิดอื่น ๆ เพื่อที่สามารถนำไปใช้ทดแทนได้ในอนาคต

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาแนวทางการออกแบบวัสดุก่อทางสถาปัตยกรรมโดยใช้ไมซีเลียม ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบที่เหมาะสมกับการทำวัสดุก่อทางสถาปัตยกรรมจากไมซีเลียม (วัสดุใยประสาน) และเพื่อสร้างต้นแบบวัสดุก่อจากไมซีเลียมในการต่อยอดเป็นวัสดุทดแทน พบว่า คุณสมบัติด้านน้ำหนักเบา ดูดซับเสียง และความยืดหยุ่นของการเจริญเติบโตของไมซีเลียม เป็นข้อได้เปรียบของวัสดุที่นำมาใช้ออกแบบรูปทรงและการใช้ประโยชน์ของวัสดุก่อในลักษณะต่าง ๆ โดยการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของบล็อกไมซีเลียมทั้งสองรูปแบบ พบประเด็นสำคัญดังนี้

1. ด้านรูปทรงและขนาด

รูปทรงและขนาดของบล็อก มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุก่อ ปริมาตรของรูปทรงมีผลต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียมในแม่พิมพ์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของวัสดุไมซีเลียมในขั้นตอนการแกะออกจากแม่พิมพ์ บล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 1 หรือบล็อกในรูปแบบเล็กมีความหนาแน่นน้อยกว่ามีน้ำหนักที่น้อยกว่ารูปแบบที่ 2 เกิดจากการเจริญเติบโตและกินสารอาหารในแม่พิมพ์ได้ดีกว่ารูปแบบที่ 2 ทำให้ตัวบล็อกวัสดุมีน้ำหนักน้อยกว่าแบบที่ 2 ประโยชน์ของวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าคือมีความสามารถในการลดน้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้างได้ดีกว่า และช่วยลดงบประมาณในการทำโครงสร้างเสริมในการพัฒนาบล็อกไมซีเลียมเพื่องานสถาปัตยกรรมได้

อย่างไรก็ตาม บล็อกขนาดเล็กมีความสามารถในการรับแรงได้น้อยกว่า เนื่องจากมีขนาดหน้าตัดที่เล็กกว่า ทำให้การออกแบบพัฒนาบล็อกขนาดเล็กสามารถพัฒนารูปทรงของผนังได้หลากหลาย ตามการออกแบบทางสถาปัตยกรรม สามารถเพิ่มลูกเล่นในการก่อหรือจัดวางได้มากกว่าบล็อกขนาดใหญ่ แต่อาจจะต้องพัฒนาจุดเชื่อมต่อบล็อกเพื่อเสริมโครงสร้างความแข็งแรง เช่น การใช้ไม้ไผ่ ใ้กับผนังเพื่อทดแทนการรับน้ำหนักและรับแรงอัดเพิ่มเติมให้กับบล็อก โดยเฉพาะรูปแบบที่ 1 การใช้คุณสมบัติด้านนี้ในการออกแบบระบบข้อต่อและเดือย จะสามารถเสริมโครงสร้างและนำเสนอวิธีการต่อเชื่อมบล็อกแต่ละก้อนโดยไม่ใช้ซีเมนต์ในการต่อประสาน โดยใช้วิธีทำช่องสำหรับใส่โครงสร้างเสริมที่ปลายของก้อนทั้งสองด้าน ซึ่งนอกจากช่วยให้วัสดุก่อวางขึ้นเป็นแนวตั้งได้ตรงได้อย่างมั่นคงแข็งแรงแล้ว ยังเปิดโอกาสให้วัสดุก่อวางต่อกันเป็นแนวโค้งหรือแนวนอนต่าง ๆ เพื่อการออกแบบสถาปัตยกรรมในอนาคตได้

2. การเจริญเติบโตของไมซีเลียม

เนื่องจากประสิทธิภาพของบล็อกไมซีเลียมจะขึ้นอยู่กับการเจริญเติบโตของไมซีเลียมตามปริมาตรและรูปทรงที่เหมาะสม จากการทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดแสดงให้เห็นว่า บล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 1 มีความสามารถในการรับแรงดัดได้มากกว่ารูปแบบที่ 2 อย่างมาก โดยมีคุณสมบัติเกือบเทียบเท่าอิฐมอญมาตรฐาน (ดังตารางที่ 2) ซึ่งเกิดจากความสมบูรณ์ของการเจริญเติบโตของไมซีเลียมที่เหมาะสมกับ

ปริมาตรและรูปทรงของบล็อก ทำให้เส้นใยมีประสิทธิภาพในการเติบโตและสร้างความแข็งแรงในการดัดโค้ง บิดรูปได้ดีกว่ารูปแบบที่ 2 ทำให้ความสามารถในการดัดและบิดโค้งของบล็อกไมซีเลียมนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการก่อผนังให้มีรูปทรงต่าง ๆ ตามการออกแบบได้ดีกว่า บล็อกเชิงพาณิชย์อื่น ๆ

3. หน้าตัดและความหนา

บล็อกที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่และมีความหนามาก ทำให้ก้อนวัสดุรับแรงอัดได้ดี เหมาะสมกับการนำมาพัฒนาใช้เป็นวัสดุก่อ จากการทดสอบบล็อกรูปแบบที่ 2 ซึ่งมีขนาดใหญ่ มีขนาดหน้าตัดและความหนา มากกว่ารูปแบบที่ 1 ทำให้มีน้ำหนักมากกว่าและรับแรงอัดได้ดีกว่า เหมาะกับการออกแบบพัฒนาเป็นวัสดุก่อ ที่ต้องการความแข็งแรงมั่นคงของผนัง โดยไม่จำเป็นต้องมีการทำโครงสร้างเสริม ใช้จำนวนก้อนน้อยต่อหนึ่ง พื้นที่ในการก่อสร้าง แต่ใช้เวลาในการผลิตมากกว่าและต้นทุนในการผลิตสูงกว่า ซึ่งอาจเกิดความไม่เหมาะสม ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม พื้นที่หน้าตัดขนาดใหญ่ของบล็อกไมซีเลียมรูปแบบที่ 2 สร้าง โอกาสให้มีการออกแบบลวดลายหรือพื้นผิว เพื่อการตกแต่งและความสวยงามตามต้องการได้

4. การออกแบบแม่พิมพ์

เนื่องจากรูปทรงของวัสดุและแม่พิมพ์ต้องอ้างอิงกับลักษณะการเจริญเติบโตของไมซีเลียม ที่ต้องการ อากาศและพื้นที่ในการเจริญเติบโตที่เหมาะสม พบว่า พื้นที่และขนาดของวัสดุก่อจะต้องมีปริมาตรไม่ใหญ่ มาก ซึ่งจะมีผลต่อความสมบูรณ์ในการเจริญเติบโตของไมซีเลียมภายในแม่พิมพ์ ยิ่งแม่พิมพ์มีปริมาตรมาก การเจริญเติบโตของไมซีเลียมจะเป็นไปได้ช้า ทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดและความยืดหยุ่นของวัสดุ น้อยลง รูปแบบของบล็อกต้องไม่มีความซับซ้อน หรือเกิดขอกมุม ซึ่งจะทำให้ไมซีเลียมเจริญเติบโตได้ไม่ สมบูรณ์ หรือมีจุดอับที่ทำให้บรรยากาศทำให้ไมซีเลียมไม่สามารถเติบโตได้ แต่เกิดข้อจำกัดในการพัฒนา รูปทรงที่สวยงามหรือกลไกในการติดตั้งที่มีความซับซ้อน อย่างไรก็ตาม การออกแบบลักษณะของรูปทรงที่ไม่ ซับซ้อน แต่เพิ่มการออกแบบกลไกในการติดตั้ง เช่น การใช้สลักหรือใช้ลิ้น รวมถึงการทำให้วัสดุมีลวดลาย หรือผิวอนุต่ำด้วยตัวเอง นอกจากจะทำให้เกิดวัสดุก่อมีรูปทรงที่ซับซ้อนน้อย ยังสามารถตอบโจทย์เรื่องความ สวยงามและความแข็งแรง สามารถพัฒนาต่อยอดวัสดุก่อไมซีเลียมสำหรับเป็นวัสดุทดแทนการก่อสร้างทาง สถาปัตยกรรมในอนาคตได้มากขึ้น

สรุปผลการศึกษา

ลักษณะการก่อรูปของวัสดุไมซีเลียม เป็นลักษณะของการเพาะเลี้ยงเชื้อกับสารอาหารให้ เจริญเติบโตไปตามการก่อรูปทรงที่กำหนด พบว่า รูปทรงและรูปร่างของบล็อกไมซีเลียมมีผลต่อความแข็งแรง และประสิทธิภาพในการรับแรงอัดและแรงดัดของบล็อกไมซีเลียม โดยขึ้นอยู่กับรูปร่างและรูปทรงของบล็อก ดังนั้นลักษณะของแม่พิมพ์จึงต้องอ้างอิงกับรูปทรงและขนาดของบล็อกไมซีเลียมอย่างเหมาะสม ต้องมี ลักษณะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียม และแม่พิมพ์ต้องแกะออกได้หลังจากที่วัสดุไมซีเลียมเติบโต ตามขนาดที่ต้องการ สามารถสรุปมีรายละเอียดการสร้างต้นแบบและแม่พิมพ์วัสดุก่อผนังโดยไมซีเลียม ใน การต่อยอดเป็นวัสดุทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ 6 ข้อ ดังนี้

1. วัสดุของแม่พิมพ์ต้องมีลักษณะใสหรือโปร่งแสง เพื่อให้ผู้ทดลองได้สังเกตการเจริญเติบโตของวัสดุ ไมซีเลียมหลังจากที่นำเชื้อบรรจุลงในแม่พิมพ์ และระบุข้อผิดพลาด สิ่งผิดปกติของวัสดุไมซีเลียมในแม่พิมพ์ได้

2. วัสดุของแม่พิมพ์ต้องมีลักษณะเรียบลื่น เนื่องจากป้องกันการยึดเกาะระหว่างวัสดุไม่ซีลียัมกับตัวแม่พิมพ์ ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในช่วงการแกะวัสดุออกจากแม่พิมพ์
3. วัสดุแม่พิมพ์ต้องไม่เป็นวัสดุอินทรีย์ เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของวัสดุไม่ซีลียัมที่จะเจริญผลสานไปกับวัสดุอินทรีย์ของแม่พิมพ์
4. วัสดุแม่พิมพ์ต้องมีความแข็งแรง ทนต่อการขยายตัวของวัสดุไม่ซีลียัม และต้องคงรูปไว้ได้ตามรูปแบบ
5. รูปแบบของก้อนวัสดุ และแม่พิมพ์จะต้องไม่มีความซับซ้อน ไม่มีซอก ซอหักข้อต่อที่ยากต่อการเข้าถึง ซึ่งจะสร้างปัญหาในการเจริญเติบโตของเชื้อ
6. แม่พิมพ์ต้องแกะได้ทุกด้านและแกะออกได้สะดวก ป้องกันการฉีกขาดหรือหักของวัสดุ

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาของรูปทรงของวัสดุก่อและการทำแม่พิมพ์ พบข้อจำกัดด้านการออกแบบดังนี้

1. การออกแบบข้อต่อเพื่อเป็นจุดหมุนและรองรับโครงสร้างไม้ไผ่เสริม พบว่า เป็นแนวทางที่ช่วยเพิ่มความโดดเด่นและเอกลักษณ์เฉพาะตัวให้กับวัสดุจากไม้ซีลียัม โดยสามารถสร้างความโค้งงอของวัสดุที่เชื่อมต่อกันจนเกิดเป็นผนังได้อย่างน่าสนใจ แต่มีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงของข้อต่อทรงโค้ง ซึ่งเกิดจากความบางและความยาวของข้อต่อที่ยื่นออกมา หากไม้ซีลียัมเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ในบริเวณที่เปราะบาง อาจส่งผลต่อความแข็งแรงหรือทำให้ข้อต่อฉีกขาดระหว่างการถอดวัสดุออกจากแม่พิมพ์วัสดุ
2. การใช้เต็ยรูปวงกลมด้านบน พบว่า หากมีความยาวหรือความสูงมากเกินไป จะส่งผลต่อความแข็งแรงในการเชื่อมต่อระหว่างเต็ยและก้อนวัสดุ
3. การเลือกวัสดุสำหรับทำแม่พิมพ์ พบว่า เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบ เช่น ควรใช้วัสดุที่โปร่งแสง มีความแข็งแรงทนต่อการขยายตัวของไม้ซีลียัม และสามารถถอดออกได้ง่าย หากเต็ยมีรูปทรงที่ซับซ้อนเกินไป จะทำให้ไม่สามารถสร้างแม่พิมพ์ได้อย่างเหมาะสม ตลอดจนจากการทดลองใช้อะคริลิกใส เนื่องจากมีความแข็งแรงและสามารถสังเกตการเจริญเติบโตของไม้ซีลียัมได้ง่าย แต่มีราคาสูง และการออกแบบรูปทรงวัสดุที่เป็นเส้นโค้งหรือรูปทรงอิสระทำให้ต้องใช้ปริมาณวัสดุแม่พิมพ์มากขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนวัสดุที่สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน การพิจารณาการทดลองด้วยวัสดุที่โปร่งแสงที่ยังพอสังเกตการเจริญเติบโตได้ หรือวัสดุใสที่บางลง แต่ยังคงความแข็งแรงและควบคุมรูปทรงของการเจริญเติบโตของเชื้อได้ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการทดสอบในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Aiduang, W. et al. (2022a). Amazing fungi for eco-friendly composite materials: a comprehensive review. *Journal of Fungi*, 8(8), 842-870.
- Aiduang, W. et al. (2022b). Mechanical, physical, and chemical properties of mycelium-based composites produced from various lignocellulosic residues and fungal species. *Journal of Fungi*, 8(11), 1125-1146.
- Attias, N. et al. (2019). Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *The Design Journal*, 22, 1647-1657.

- Bahrami, A. & Rashid, P. S. M. (2023). A state-of-the-art review on axial compressive behavior of concrete-filled steel tubes incorporating steel fiber and GFRP jacketing. **Buildings**, 13(3), 729-765.
- Chitiat, P., Charoennetkun, C. & Anusiri, M. (2013). It muan bao phasom fang khao phuea pen chanuan kaan khwam ron. (In Thai) [Lightweight bricks mixed with rice husks for thermal insulation]. In Damnet, S. (Ed.). **Proceeding, The 10th KU KPS National Conference**. (pp. 1414-1421). Bangkok: Kasetsart University.
- Chongphonsit, O. & Yamkam, C. (2013). **Kansueksa sombat khong it muan bao thi mi suanphasom khong khi lueai lae phaktopchawa**. (In Thai) [A case study: properties of lightweight brick mixed with sawdust and water hyacinth] (Master's thesis). Bangkok: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.
- Chusit, P. & Nilat, N. (2018). **Rai ngan wichai kan phatthana phalittaphan phaen yipsam praphet thon fai phasom senyai chak bai ton khaophot sam rap chai nai akhan prayat phalangnan**. (In Thai) [Research report on the development of fire-resistant composite gypsum sheets reinforced with cornstalk fiber for energy-efficient building]. Bangkok: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.
- Costigan, A. & Pavia, S. (2009). Compressive, flexural and bond strength of brick/lime mortar masonry. Rome, **Proceeding, The International Conference on Protection of Historic Constructions (PROHITEC09)** (pp. 1609-1615). Leiden: University of Leiden.
- Dorlo, N. (2009). Watsadu muan bao thi chai nai ngan utsahakam kosang. (In Thai) [Lightweight materials used in the construction industry]. **Princess of Naradhiwas University Journal**, 1(3), 48-62.
- Elsacker, E. et al. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **PLoS One**, 14(7), 1-20.
- Fisher, A. (2010). **Industrial-strength fungus**. Retrieved May 7, 2024, from <https://time.com/archive/6596915/industrial-strength-fungus/>
- Ghazvinian, A. & Gursoy, B., (2022). Mycelium-based composite graded materials: assessing the effects of time and substrate mixture on mechanical properties. **Biomimetics**, 7(2), 48-62.
- Hoeven, D. V. D. (2020). **Mycelium as a construction material**. Retrieved May 7, 2024, from <https://www.biobasedpress.eu/2020/04/mycelium-as-a-construction-material/>
- Inthabut, N. (2018). **Nawattakam it blok prasan tanthan khwam ron chak fang khao lae thao klaep**. (In Thai) [Innovative heat-resistant interlocking bricks made from rice straw and rice husk ash]. Nonthaburi: The Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Research Promotion Fund 2019.

- Jain, U., Jain, M. & Mandaokar, S. (2018). Comparative study of AAC blocks and clay bricks and costing. **International Journal of Research in Engineering, Science and Management**, 1(9), 539-543.
- Jiranukul, P. et al., (2024). Comparative evaluation of mechanical and physical properties of mycelium composite boards made from lentinus sajor-caju with various ratios of corn husk and sawdust. **Journal of Fungi**, 10(9), 634-653.
- Klinkhachon, T. et al. (2022). Phon khong watsadu poz zo lan thao klaep to sombat khong it muan bao. (In Thai) [The effect of rice husk ash pozzolan on the properties of lightweight bricks]. **Journal of Science and Science Education**, 5(2), 182-190.
- Lachheb, M., Youssef, N. & Younsi, Z. (2023). A comprehensive review of the improvement of the thermal and mechanical properties of unfired clay bricks by incorporating waste materials. **Buildings**, 13(9), 2314-2343.
- Mostafa, M. & Uddin, N. (2015). Effect of banana fibers on the compressive and flexural strength of compressed earth blocks. **Buildings**, 5(1), 282-296.
- Nonthasen, P. et al. (2022). Kan phatthana khonkrit muan bao doi mi suanphasom chak fang khao lae maiphai. (In Thai) [Development of lightweight concrete with components from rice husks and bamboo]. **Journal of Science and Technology**, Rajabhat Maha Sarakham University, 7(1), 23-42.
- Pattavong, N. (2011). **Phanang phai nok samrap ban diao thi mo som kap prathet khet ron rhuen**. (In Thai) [External walls for detached homes that are suitable for tropical countries] (Master's thesis). Bangkok: Chulalongkorn University.
- Phonphuak, N. (2018). **Rai ngan wichai chabap sombun nawattakam watsadu kosang thi pen mit kap sing waed lom kan phalit it mon doi chai watsadu chiwa muan phuea khwam yangyuen khong watsadu kosang**. (In Thai) [Complete research report: innovation in eco-friendly building materials: the production of traditional bricks using biomass materials for the sustainability of building materials]. Maha Sarakham: Thailand Research Fund 2018.
- Rigobello, A., Colmo, C. & Ayres, P. (2022). Effect of Composition Strategies on Mycelium-Based Composites Flexural Behaviour. **Biomimetics**, 7(2), 53-62.
- Rotsin, K. (2010). Korani sueksa panha naeo thang kan kaekhai kan taekrao khong phanang it muan bao. (In Thai) [A case study of a crack problem and remedies in light-weight brick walls]. **Journal of Industrial Technology**, 6(1), 28-32.
- Teeraphantuvat, T. et al. (2024). Improving the physical and mechanical properties of mycelium-based green composites using paper waste. **Polymers**, 16(2), 262-280.
- Voutetaki, M. E. & Mpalaskas, A. C. (2024). Natural fiber-reinforced mycelium composite for innovative and sustainable construction materials. **Fibers**, 12(7), 57-86.

- WBCSD. (2002). **The cement sustainability initiative: our agenda for action report**. Geneva: World Business Council for Sustainable Development.
- Wei, H., Wu, T. & Yang, X. (2020). Properties of lightweight aggregate concrete reinforced with carbon and/or polypropylene fibers. **Materials**, 13(3), 640-660.
- Xu, T. & Garrecht, H. (2024). Effects of mixing techniques and material compositions on the compressive strength and thermal conductivity of ultra-lightweight foam concrete. **Materials**, 17(11), 2640-2569.
- Yang, L., Park, D. & Qin, Z. (2021). Material function of mycelium-based bio-composite: a review. **Frontiers in Materials**, 8, <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.737377>.