



การศึกษากระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียนคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์
เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม

โดย

ชลธิชา อรุณรุ่งก้าวหน้าไกล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2566

STUDY OF 3D PRINTING MYCELIUM COMPOSITES USING ROBOTIC
ARM FOR ARCHITECTURAL COMPONENTS

BY

CHONTHICHA ARUNRUNGKAOKAI



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ARCHITECTURE
ARCHITECTURE
FACULTY OF ARCHITECTURE AND PLANNING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2023

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง

วิทยานิพนธ์

ของ

ชลธิชา อรุณรุ่งก้าวหน้าไกล

เรื่อง

การศึกษากระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์
เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 2 สิงหาคม พ.ศ. 2567

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชิตร์ แก้วลาย)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขาวี บุษยรัตน์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรลักษณ์ แผ่นสุวรรณ)

คณบดี

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อาสาฬห์ สุวรรณฤทธิ์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม
ชื่อผู้เขียน	ชลธิชา อรุณรุ่งก้าวหน้าไกล
ชื่อปริญญา	สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สถาปัตยกรรม สถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาวี บุษยรัตน์
ปีการศึกษา	2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สำรวจศักยภาพของการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์มาใช้ในการก่อสร้างสถาปัตยกรรม โดยมุ่งเน้นศึกษาการออกแบบและก่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียม ซึ่งเป็นวัสดุจากฐานชีวภาพธรรมชาติ สืบเนื่องมาจากงานวิจัยนี้มุ่งหวังที่จะพัฒนาแนวทางการก่อสร้างอย่างยั่งยืนเพื่อตอบสนองต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทวีความรุนแรงขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติของไมซีเลียม ซึ่งเป็นวัสดุทดแทนที่ยั่งยืน ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และผลิตได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อย่างไรก็ตามระบบและวิธีการก่อสร้างแบบเดิมนั้นประสบปัญหาเกี่ยวกับความไวต่อการปนเปื้อนของวัสดุไมซีเลียม รวมทั้งยังมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปทรงที่ซับซ้อน ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างนาน การพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์จึงเข้ามาทดแทนข้อจำกัดดังกล่าวเนื่องจากช่วยให้เกิดความแม่นยำในการขึ้นรูปทรง ลดการสัมผัสจากมนุษย์ และสามารถสร้างรูปทรงที่ถูกต้องแบบเฉพาะพื้นที่ได้อย่างรวดเร็ว

จุดประสงค์งานวิจัยนี้คือ การศึกษาและทดลองเพื่อนำเสนอกระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมโดยมีขั้นตอนการวิจัยศึกษาพัฒนาส่วนวัสดุ อุปกรณ์เครื่องมือพร้อมชุดคำสั่ง ทดลองสร้างต้นแบบชิ้นงานองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม ประเมินประสิทธิภาพการผลิต ผลการเติบโตของไมซีเลียมและความเป็นไปได้ของระบบการก่อสร้างโดยผู้วิจัยและผู้เชี่ยวชาญ สรุปผลวิจัยให้เห็นถึงทางศักยภาพ ข้อจำกัดของระบบการก่อสร้างดังกล่าว เสริมสร้างองค์ความรู้ เสนอแนวทางการออกแบบและก่อสร้างรูปแบบใหม่ให้กับวงการสถาปัตยกรรม

ผลการศึกษาพบว่าหัวเชื้อไมซีเลียมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในงานวิจัยนี้คือ หัวเชื้อไมซีเลียมจากเมล็ดข้าวฟ่างป่น ผสมดินเหนียว และน้ำ ก่อนการใช้งานดินเหนียวต้องผ่านการฆ่าเชื้อเนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมความสะอาดในทุกขั้นตอนเป็นสิ่งสำคัญมากเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการติดเชือบนชิ้นงานได้แม้ว่าวัสดุนั้นผ่านการฆ่าเชื้อก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังพบว่าการออกแบบพื้นที่ใส่เชื้อก้อนเห็ดเพิ่มเติมภายในชิ้นงานสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียมได้ดี แข็งแรง ส่งผลให้เกิดดอกเห็ด เมื่อนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้งไมซีเลียมมีการเติบโตและยึดเกาะระหว่างชิ้นงาน นำไปสู่แนวทางการออกแบบผนังผลิตอาหาร การออกแบบข้อต่อองค์ประกอบสถาปัตยกรรมเพื่อการก่อสร้างติดตั้งโดยไม่ใช้วัสดุประสานเพิ่มเติม จากผลการศึกษาดังกล่าวผู้วิจัยสรุปแนวทางการก่อสร้างได้สามแนวทาง ได้แก่ การพิมพ์สามมิติต่อหนึ่งชิ้นงานโมดูลาร์ การพิมพ์สามมิติแบบต่อเนื่องเพื่อผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น และการพิมพ์สามมิติหน้างานด้วยการบูรณาการหลายแขนงหุ่นยนต์เพื่อสร้างสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว และท้ายที่สุดผลประโยชน์จากผู้เชี่ยวชาญคิดเห็นว่างานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่สามารถนำเสนอแนวทางสู่ความยั่งยืน แต่ยังช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์จากเห็ดในประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์, สถาปัตยกรรมย่อยสลายได้, วัสดุไมซีเลียม, วัสดุจากฐานชีวภาพ

Thesis Title	STUDY OF 3D PRINTING MYCELIUM COMPOSITES USING ROBOTIC ARMS FOR ARCHITECTURAL COMPONENTS
Author	Chonthicha Arunrungraokai
Degree	Master of Architecture
Major Field/Faculty/University	Architecture Architecture and Planning Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Chawee Busayarat, Ph.D.
Academic Year	2023

ABSTRACT

This research explores the potential of robotic arm 3D printing technology in architectural construction, focusing on the design and creation of architectural components from mycelium, a natural bio-based material. The study aims to develop sustainable construction methods to address escalating environmental issues by leveraging the properties of mycelium, which is a sustainable, biodegradable material produced from agricultural waste. Traditional construction methods face challenges with mycelium contamination and forming complex shapes, leading to prolonged construction times. Robotic arm 3D printing overcomes these limitations by ensuring precise form creation, reducing human contact, and enabling the rapid construction of site-specific designs.

The objectives of this research are to study and experiment with robotic arm 3D printing of mycelium composites for architectural components. The process involves material development, tool and command setup, prototype creation, production efficiency assessment, mycelium growth evaluation, and feasibility analysis by the researcher and experts. The findings highlight the capabilities, limitations, and contributions of this construction system, providing new insights and design approaches for the architectural field.

The study found that the most effective mycelium inoculum is mashed millet-based spawns, mixed with natural clay and water. The clay must be sterilized before use, as maintaining cleanliness at every stage is crucial to prevent contamination, even after sterilization. Additionally, designing spaces within components for additional mycelium inoculum also enhances growth, strength, and mushroom production. Assembled components demonstrated mycelium growth and adhesion, leading to concepts like food-producing walls and architectural joints without additional binding materials. Based on these findings, the researcher proposes three construction approaches: 3D printing individual modular components, continuous 3D printing for larger components, and on-site 3D printing using multiple robotic arms for rapid large-scale architectural construction. Experts believe this research not only promotes sustainability but also significantly enhances the value of mushroom products in Thailand.

Keywords: Robotic 3d printing, Biodegradable architecture, Mycelium-based material, Biomaterial

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์หัวข้อการศึกษากระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตด้วย แชนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมเล่มนี้ สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์สนับสนุนจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชววิ บุษยรัตน์ รองศาสตราจารย์ ดร. พีรธร แก้วลาย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วราลักษณ์ แผ่นสุวรรณ ที่ได้กรุณาให้ คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะ และปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จเรียบร้อยด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ Design Robotic Lab คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ได้ให้ทุนโครงการสนับสนุนการสร้างนวัตกรรมและวิจัยจาก Design Robotic Lab ประจำปีการศึกษา 2566

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีและแชนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม นายพัฒนา รัตนาวาทอง นายพชร เรือนทองดี ผู้เชี่ยวชาญด้านเห็ด นางอัญญารัตน์ พัวพรรณ ที่ได้กรุณาประเมินงานวิจัย ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ ขอขอบคุณบริษัท FabCafe ที่ได้ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และให้ทดลองใช้เครื่องมือในขั้นต้น ขอขอบคุณครอบครัว คณาจารย์ ม่อน คลาวด์ ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน แนนที่คอยช่วยเหลือในยามคับขัน และเพื่อน ปริญญาโททุก ๆ ท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ที่เป็นกำลังใจให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดมา จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการจัดทำวิทยานิพนธ์ไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสามารถเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงาน ที่เกี่ยวข้อง สถาปนิก และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอรับไว้และ ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ชลธิชา อรุณรุ่งก้าวหน้าไกล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(6)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 คำถามการวิจัย	3
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย	3
1.4 สมมติฐานการวิจัย	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
1.5.1 ขอบเขตการศึกษาทฤษฎีทางวิชาการ	4
1.5.2 ขอบเขตการศึกษาวस्तุ	4
1.5.3 ขอบเขตการออกแบบ	4
1.5.4 ขอบเขตการศึกษาเทคโนโลยี	4
1.5.5 ขอบเขตการศึกษาด้านเวลาในการทำวิจัย	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย	6
1.8 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง	7

บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 สถาปัตยกรรมชั่วคราว	8
2.1.1 ระบบก่อสร้างอาคารสร้างรูป	9
2.1.2 การก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้	10
2.2 วัสดุไมซีเลียม	11
2.3 วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	12
2.3.1 วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตร	13
2.3.2 วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว	14
2.3.3 คุณสมบัติของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	18
2.4 กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	18
2.4.1 การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding)	19
2.4.2 การขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D printing)	21
2.5 การศึกษาส่วนอุปกรณ์ (Hardware)	24
2.6 การศึกษาส่วนซอฟต์แวร์ (Software)	27
2.7 การศึกษารูปทรงสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	31
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	33
3.1 รูปแบบงานวิจัย	33
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย	33
3.3 ขั้นตอนการศึกษาและทดลอง	33
3.4 การศึกษาและทดลองวัสดุ	35
3.4.1 ประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	35
3.4.2 ประเภทเชื้อไมซีเลียม	36
3.4.3 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อ	37
3.4.4 ขั้นตอนการบ่มเพาะเชื้อไมซีเลียมหลังการพิมพ์	39
3.5 การศึกษาและพัฒนาส่วนอุปกรณ์ (Hardware)	39
3.5.1 เครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	39
3.5.2 ระบบการพิมพ์สามมิติ	41
3.5.3 การพัฒนาและผลิตเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติ	43

3.6 การศึกษาและพัฒนาส่วนซอฟต์แวร์ (Software)	46
3.6.1 ชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลเป็นภาษา RAPID	47
3.6.2 ชุดคำสั่งจำลองการรับน้ำหนัก	50
3.6.3 ชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนพื้นผิวเพื่อปรับแต่งชิ้นงาน	52
3.7 ข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์	54
3.8 ขั้นตอนการพิมพ์สามมิติ	56
3.9 การประเมินผล	57
3.9.1 การประเมินโดยผู้วิจัย	57
3.9.2 การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	59
4.1 ผลการทดลองขั้นต้น	59
4.2 ผลการทดลองฆ่าเชื้อ	60
4.3 ผลการทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม	62
4.4 แนวคิดในการออกแบบรูปทรงชิ้นงาน	63
4.4.1 ขนาดของรูปทรงชิ้นงาน	63
4.4.2 โครงสร้างชิ้นงาน	63
4.4.3 พื้นที่ใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม	64
4.4.4 ข้อต่อการสำหรับการวางประกอบ	64
4.5 ผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงาน	65
4.6 ผลลัพธ์การคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรง	68
4.7 ผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน	70
4.8 ผลการเติบโตของไมซีเลียม	81
4.9 ผลการประกอบติดตั้ง	85
4.10 ผลการจำลองความเครียดแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D	89
4.11 ผลการปรับชิ้นงานอ้างอิงจากข้อมูลการคำนวณรังสีความร้อน ที่ตกกระทบผนัง	90

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปศักยภาพหัวข้อไมซีเลียม	95
5.2 สรุปคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์	96
5.3 สรุปกระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์ เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม	98
5.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมด้วยแขนหุ่นยนต์	102
5.5 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญ	106
5.5.1 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีแขนหุ่นยนต์	106
5.5.2 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด	112
5.6 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ	114
รายการอ้างอิง	116
ประวัติผู้เขียน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เปรียบเทียบศักยภาพประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในการพิมพ์สามมิติ	35
3.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุ	38
3.3 เปรียบเทียบศักยภาพเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	40
3.4 เปรียบเทียบศักยภาพระบบในการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	41
3.5 ตารางสรุปชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์	46
4.1 เปรียบเทียบศักยภาพประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในการพิมพ์สามมิติ	59
4.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์การทดลองฆ่าเชื้อวัสดุ	61
4.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์การทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม	62
4.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงาน	66
4.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการโค้งเคาะโดยส่วนเสริม Karamba3D	69
4.6 ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน	70
4.7 เปรียบเทียบผลลัพธ์ข้อต่อสำหรับการวางประกอบ	79
4.8 ตารางผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน	81
4.9 ผลการจำลองความเครียดแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D	90
5.1 สรุปผลลัพธ์ศักยภาพหัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภท	95
5.2 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงาน สถาปัตยกรรม	107
5.3 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด	113

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนดำเนินการวิจัย	6
2.1 แผนภาพวงจรของพื้นที่ว่างและสถาปัตยกรรม	8
2.2 ภาพขยายโมซีเลียมในแต่ละส่วนของหีต	11
2.3 ภาพประเภทเชื้อโมซีเลียม	12
2.4 ภาพชิ้นงานต้นแบบผลิตจากวัสดุโมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียจากการเกษตร	13
2.5 ภาพเชื้อโมซีเลียมแต่ละประเภทเมื่อผสมดินเหนียว	14
2.6 ภาพชิ้นงานต้นแบบการทดลองผสมดินเหนียวและโมซีเลียม	15
2.7 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงส่วนเชื่อมต่อดินเหนียวและเส้นใยหีต	15
2.8 ภาพชิ้นงานต้นแบบ. จาก MyCera	16
2.9 ค่าความแข็งแรงของวัสดุดินเหนียว	16
2.10 คุณสมบัติของวัสดุโมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว	17
2.11 สถาปัตยกรรมวัสดุโมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว	17
2.12 ภาพกระบวนการผลิตวัสดุโมซีเลียมคอมโพสิต	18
2.13 กรณศึกษาสถาปัตยกรรมจากวัสดุโมซีเลียม 1	19
2.14 กรณศึกษาสถาปัตยกรรมจากวัสดุโมซีเลียม 2	20
2.15 แนวคิดและกระบวนการผลิตโดยการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์	21
2.16 ภาพชิ้นงานต้นแบบจากโครงการ Mycera 2	22
2.17 กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุโมซีเลียม	23
2.18 ตารางการเปรียบเทียบกระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุโมซีเลียม	23
2.19 ภาพระบบฉีดวัสดุ	25
2.20 เครื่องพิมพ์สามมิติวัสดุดินเหนียวขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่	26
2.21 การพิมพ์ระนาบเรียบและไม่เรียบพร้อมคุณสมบัติของผลลัพธ์	27
2.22 หน้าตาซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 และส่วนเสริม Grasshopper	28
2.23 หน้าตาของส่วนเสริม Robot Component	29
2.24 หน้าตาของ ABB แผงควบคุมหุ่นยนต์สำหรับการส่งข้อมูล RAPID	30
2.25 สูตรการคำนวณความเครียดการอัดที่ยอมรับได้	30
2.26 คุณสมบัติของส่วนเติมเต็มรูปแบบต่าง ๆ	31

2.27	ค่าที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุดินเหนียว	32
2.28	ตัวอย่างชิ้นงานพิมพ์สามมิติและการศึกษาข้อต่อ	32
3.1	ภาพขั้นตอนการศึกษาทดลอง	34
3.2	ภาพหัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภทเมื่อผสมดินเหนียว	36
3.3	ลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงานและการผลิตชิ้นงานก่อนนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ	37
3.4	เครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และพื้นที่การทำงาน	43
3.5	ชิ้นส่วนสังผลิต	44
3.6	ภาพชิ้นส่วนและอุปกรณ์เครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์	44
3.7	ผลลัพธ์ก่อนการแก้ไขและภาพแนวทางการช่วยแก้ปัญหาการกระจายแรง	45
3.8	ภาพถ่ายเครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์พร้อมวัสดุ	45
3.9	ลำดับขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการพิมพ์สามมิติ	47
3.10	ระบบการทำงานชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาษา RAPID	47
3.11	ภาพเส้นทางการเคลื่อนที่พิมพ์สามมิติระนาบเรียบและระนาบไม่เรียบ	48
3.12	ภาพเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และจุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์	49
3.13	ภาพโต๊ะสำหรับวางถาดพิมพ์ชิ้นงาน	49
3.14	ภาพจำลองการทำงานและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์บนซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 และส่วนเสริม Grasshopper	50
3.15	ภาพรูปทรงสามมิติ การแสดงค่าการจำลองผลค่ารับแรงถ่ายเทและค่าความเค้นแรงอัด	51
3.16	ส่วนตัวแปรข้อมูลวัสดุที่จำเป็นต่อการคำนวณผลการรับแรงใน Karamba3D	51
3.17	การทำงานและแสดงผลการคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรงสามมิติ	52
3.18	ภาพผลลัพธ์การคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวผนัง	52
3.19	ระบบการทำงานชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวเพื่อปรับแต่งชิ้นงาน	53
3.20	ภาพถ่ายการอุดตันของหัวฉีดและเส้นชิ้นงานขาดไม่ต่อเนื่อง	54
3.21	ภาพถ่ายกระบอกอะคริลิคบรรจุวัสดุ	55
3.22	ผลลัพธ์ความผิดพลาดของการพิมพ์ที่ไม่ได้เป็นเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นเดียว	55
3.23	การแปลงรูปทรงสามมิติเป็นเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นเดียว	56
3.24	ภาพถ่ายการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์	57
4.1	ภาพส่วนเติมเต็มสีเหลืองขาวหาลมตัด	64

4.2	ภาพการออกแบบพื้นที่ใส่ก้อนเชื้อเห็ดด้านหลัง	64
4.3	ภาพตัวอย่างแนวทางการต่อประกอบชิ้นงาน	65
4.4	ภาพรูปทรงชิ้นงานจากแนวคิดการออกแบบ	65
4.5	ภาพการลดทอนเส้นการพิมพ์สามมิติรูปทรง	65
4.6	ภาพแนวคิดและผลลัพธ์การพัฒนารูปทรงชุดที่ 2	68
4.7	ผลลัพธ์การจำลองการโก่งเคาะโดยส่วนเสริม Karamba3D	69
4.8	ผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน	80
4.9	ผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน	85
4.10	ภาพแนวคิดการประกอบติดตั้งชิ้นงานในแต่ละแนวแกน	86
4.11	ภาพจำลองต้นแบบรูปทรงและการใช้งานสำหรับการออกแบบผนังเชิงพาราเมตริก	86
4.12	ภาพถ่ายการวางสองชิ้นงานชุดที่ 1 ในแต่ละแนวแกน	87
4.13	ภาพถ่ายการวางสองชิ้นงานชุดที่ 2 ในแต่ละแนวแกน	87
4.14	ภาพถ่ายการวางประกอบชิ้นงานจำนวน 9 และ 7 ชิ้นงาน	88
4.15	ภาพถ่ายการวางประกอบชิ้นงานเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์	88
4.16	ผลลัพธ์การเติบโตของไมซีเลียมระหว่างชิ้นงานเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์	88
4.17	ผลลัพธ์การยึดติดระหว่างชิ้นงานด้วยไมซีเลียม	89
4.18	ภาพจำลองความเครียดแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D	90
4.19	ตัวอย่างผนังแผงบังความร้อนและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง	91
4.20	ตัวอย่างผนังแผงปลูกดอกเห็ดและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง	92
4.21	ตัวอย่างผนังช่องเปิดและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง	93
4.22	ตัวอย่างการออกแบบผนังแผงกันแดดร่วมกับพื้นที่ปลูกดอกเห็ดและช่องเปิด	94
5.1	คุณสมบัติของผลผลิตจากการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์	96
5.2	ขั้นตอนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	98
5.3	แนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อครั้ง	99
5.4	แนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่อง	100
5.5	แนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่องและทำงานร่วมกัน	101

5.6	แนวทางการออกแบบผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้งภายนอกและภายใน	103
5.7	ภาพผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้งภายนอก	103
5.8	ภาพการออกแบบที่ปักโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุไม้1	104
5.9	ภาพการออกแบบที่ปักโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุไม้2	104
5.10	ภาพแนวทางการออกแบบอาคารชั่วคราวและผลิตในสถานที่1	105
5.11	ภาพแนวทางการออกแบบอาคารชั่วคราวและผลิตในสถานที่2	105



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน แนวคิดการก่อสร้างสถาปัตยกรรมได้เปลี่ยนแปลงจากวิธีดั้งเดิมที่ไม่ได้คำนึงถึงสิ่งแวดล้อม สู่แนวทางที่เน้นการหมุนเวียน วัสดุธรรมชาติหรือของเสียจากอุตสาหกรรมและการเกษตรที่เคยถูกมองข้ามกลับกลายเป็นที่สนใจ เนื่องจากคุณสมบัติในการนำกลับมาใช้ใหม่และการย่อยสลายได้ (Silverman, 2024) การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจากความตระหนักถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภัยธรรมชาติ ซึ่งมีสาเหตุจากกิจกรรมมนุษย์ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถึง 40% ของโลก (IEA, 2023) เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สิ่งแวดล้อม ดังนั้นสถาปนิกจึงควรลดการใช้วัสดุที่ไม่สามารถต่ออายุได้ (Non-Renewable Materials) เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Girometta, 2019) และควรพิจารณาการออกแบบสถาปัตยกรรมให้สามารถปรับตัวและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมหรือสังคม (Sheinberg, 2019) นอกจากนี้ การจัดการสิ่งปลูกสร้างเมื่อหมดอายุการใช้งานก็มีความสำคัญอย่างยิ่ง ความต้องการวัสดุที่ยั่งยืนได้กระตุ้นการพัฒนาวัสดุทางเลือกใหม่จากธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส ไม้ไผ่ ไม้ก๊อก ฟาง ทราย พลาสติกชีวภาพ โปรตีนไหม และเชื้อราเห็ดไมซีเลียม (Islam, 2017; Thorns, 2018) วัสดุเหล่านี้ตอบสนองต่อแนวคิดการหมุนเวียนได้ในทุกช่วงของวงจรชีวิต มีการปล่อยคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่ำและสามารถย่อยสลายได้ ส่งผลให้สถาปนิกและนักออกแบบเริ่มนำมาใช้ในการทดลองและพัฒนางานสถาปัตยกรรม (Almpani-Lekka, 2021; Modanloo, 2021) นำไปสู่แนวคิดสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้ในปัจจุบัน

วัสดุจากฐานชีวภาพหลากหลายชนิดดังกล่าวได้ถูกพัฒนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายของการก่อสร้างสถาปัตยกรรมชั่วคราว แต่ละวัสดุล้วนมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามวัสดุไมซีเลียมซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งแรงทนทาน ผลิตและย่อยสลายได้รวดเร็ว สามารถหาพบหรือเพาะปลูกได้ในหลายภูมิภาค รองรับวัสดุเพาะได้หลากหลาย วัสดุไมซีเลียมนี้จึงมีคุณสมบัติครบถ้วนและเป็นที่สนใจ ไมซีเลียมเป็นเส้นใยที่พันกันอย่างแน่นหนา ทำให้มีความแข็งแรงเมื่อผ่านกระบวนการทำให้แห้งด้วยความร้อน (Thorns, 2018) อีกทั้งยังสามารถปรับแต่งคุณสมบัติผ่านการผสมวัสดุเพาะอื่นๆ (Mohseni & Vieira, 2023) ส่งผลให้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมชั่วคราวได้หลากหลาย จึงเป็นทางเลือกที่โดดเด่นสำหรับการก่อสร้างที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ อีกทั้งยังเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการทดแทนวัสดุที่ไม่สามารถต่ออายุได้แบบดั้งเดิม (Non-Renewable Materials) และสามารถทำซ้ำได้อย่างไม่รู้จบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน

(Circular Economy) ถึงกระนั้น วัสดุไมซีเลียมยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความเสี่ยงในการติดเชื้อ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีชีวิต และปัญหามาตรฐานในการควบคุมคุณภาพที่ยังไม่ชัดเจน อันเป็นผลจากการเป็นวัสดุใหม่ ส่งผลให้การผลิตแต่ละครั้งมีความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ จากการศึกษาตัวอย่างชิ้นงานในห้องทดลองพบว่าหากสถาปนิกหรือนักออกแบบต้องการออกแบบรูปทรงชิ้นงานให้มีความซับซ้อนมาก ความเสี่ยงในการติดเชื้อจากรูปทรงของแม่พิมพ์นั้นจะมากขึ้นด้วยเช่นกัน และหากแม่พิมพ์นั้นไม่สามารถนำมากลับมาใช้ใหม่ได้ จะส่งผลให้เสียเวลาและวัสดุอีกด้วย (Mohseni & Vieira, 2023) ในบริบทของประเทศไทย วัสดุไมซีเลียมยังไม่ได้รับการนำมาใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลาย ขาดการผลิตวัสดุไมซีเลียมอย่างจริงจังในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อเสียและข้อจำกัดดังกล่าว แม้ว่าเห็ดในประเทศไทยจะเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูงและมีแหล่งเพาะเห็ดกระจายอยู่ในทุกจังหวัด ผู้วิจัยจึงเห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพสูงในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุไมซีเลียม หากสามารถพัฒนากระบวนการผลิตให้สามารถแก้ไขปัญหาคาดเชื้อของวัสดุไมซีเลียมและข้อจำกัดในการขึ้นรูปทรงของชิ้นงานได้ ผลลัพธ์จะนำไปสู่โอกาสในการต่อยอดและประยุกต์ใช้กับงานสถาปัตยกรรมได้หลากหลายมากขึ้น

ผู้วิจัยคิดเห็นว่าการแก้ไขปัญหาคาดเชื้อสามารถทำได้โดยการใช้เทคโนโลยีระบบอัตโนมัติหรือหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้อย่างแม่นยำ ช่วยควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิต ลดการสัมผัสหรือการต้องมีส่วนร่วมของคนอย่างใกล้ชิดกับวัสดุและชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยลดความเสี่ยงในการติดเชื้อ นอกจากนี้ การแก้ไขข้อจำกัดในการขึ้นรูปทรงของชิ้นงานสามารถทำได้โดยการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการเลือกใช้เป็นอันดับแรก ๆ หากต้องการความยืดหยุ่นและอิสระในการขึ้นรูปทรง เป็นกระบวนการผลิตที่สามารถลดการเสียวัสดุที่ไม่จำเป็น ชิ้นงานได้ตั้งแต่ชิ้นงานขนาดเล็กไปจนถึงชิ้นงานสถาปัตยกรรม ขึ้นอยู่กับเครื่องมือการพิมพ์สามมิติที่เลือกใช้ (Tay, 2017; Ghaffar, 2018; Ngo, 2018; Block, 2018) งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อทดลองใช้การพิมพ์สามมิติโดยใช้หุ่นยนต์ (Robotic Additive Manufacturing) ในการผลิตองค์ประกอบสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตดังกล่าว เป็นการผสมระหว่างระบบหุ่นยนต์ที่มีความแม่นยำและอิสระในการเคลื่อนไหว กับการพิมพ์สามมิติที่สามารถขึ้นรูปทรงได้หลากหลาย แตกต่างจากการพิมพ์สามมิติแบบดั้งเดิมที่มีข้อจำกัดในระนาบและขนาดพื้นที่พิมพ์ที่จำกัด การพิมพ์สามมิติโดยใช้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้หลายแกน มีความยืดหยุ่นสูงในการกำหนดทิศทาง ขนาด และความซับซ้อนของการพิมพ์ เป็นวิธีการผลิตที่สามารถแก้ไขข้อจำกัดต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการศึกษาเริ่มจากการศึกษาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่มีคุณสมบัติในการพิมพ์ นำมาทดลองและพัฒนาเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติ ควบคู่กับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตดังกล่าว ก่อนจะนำองค์ความรู้ที่ได้มาสังเคราะห์ร่วมกันและพัฒนาเป็นกระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมต่อไป

1.2 คำถามการวิจัย

กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ที่เหมาะสมควรมีแนวทางการออกแบบอย่างไร

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาองค์ความรู้เกี่ยวข้องในการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไมซีเลียม
2. ศึกษาการออกแบบรูปทรงของสถาปัตยกรรมเพื่อการก่อสร้างด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไมซีเลียม
3. ทดลองและเสนอแนวทางในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียม โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์
4. ประเมินผลผลิตและแนวทางการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์

1.4 สมมติฐานการวิจัย

1. รูปทรงที่ออกแบบต้องมีการเปลี่ยนรูปสูงสุดไม่เกิน 1 เซนติเมตร
2. ผนังที่ออกแบบเมื่อจำลองต้องมีค่าความเครียดแรงอัดไม่เกิน 1.33 MPa
3. เมื่อนำชิ้นงานที่พิมพ์เรียบร้อยแล้วมาบ่มในระยะเวลา 3 อาทิตย์ ชิ้นงานจะเกิดไมซีเลียมครอบคลุมพื้นที่ผิวอย่างน้อย 50% และคาดว่าเมื่อนำชิ้นงานมาวางเรียงต่อกันไมซีเลียมจะเติบโตช่วยยึดติดระหว่างชิ้นงาน
4. ผู้เชี่ยวชาญมีความคิดเห็นต่อผลลัพธ์และแนวทางไปทางบวก และมองเห็นศักยภาพในการนำไปปรับใช้ในวงการสถาปัตยกรรม

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ขอบเขตการศึกษาทฤษฎีทางวิชาการ

1. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุไม่ซีเลียมในงานสถาปัตยกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไม่ซีเลียม

1.5.2 ขอบเขตการศึกษาวัตถุ

1. ศึกษาไม่ซีเลียมที่ใช้เชื้อจากเห็ดนางรม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถเจริญเติบโตได้ง่าย มีความเสี่ยงน้อยที่จะเกิดการติดเชื้อในบริบทของประเทศไทย
2. ศึกษาวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวเท่านั้น

1.5.3 ขอบเขตการออกแบบ

1. ชิ้นงานองค์ประกอบสถาปัตยกรรมที่ถูกออกแบบมีรูปแบบการใช้งานเป็นผนังไม่รับน้ำหนักเท่านั้น เนื่องจากค่าการรับแรงอัดของวัสดุไม่เหมาะต่อการเป็นผนังรับน้ำหนัก
2. ขนาดชิ้นงานสำหรับการพิมพ์มีขนาดไม่เกิน 50x50x15 เซนติเมตร เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การพิมพ์สามมิติ

1.5.4 ขอบเขตการศึกษาเทคโนโลยี

1. เครื่องมือพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ภายในงานวิจัยนี้ใช้แขนหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB4600-40
2. การพัฒนาและเขียนชุดคำสั่งภายในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 และส่วนเสริม Grasshopper ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการทำงานที่หลากหลาย ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีส่วนเสริมหรือปลั๊กอินรองรับหลากหลายเช่น การขึ้นรูปทรงพาราเมตริก การจำลองคำนวณค่ารับแรงและค่ารังสีความร้อน รวมทั้งรองรับการใช้งานเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์
3. การเขียนชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลสามมิติให้เป็นภาษา RAPID เพื่อส่งต่อข้อมูลให้แขนหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ใช้ปลั๊กอิน Robotic Components
4. การประเมินโครงสร้างของแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ใช้ปลั๊กอิน Karamba3D ควบคู่กับกระบวนการหารูปทรงทางสถาปัตยกรรม โดยค่าความเครียดแรงอัดของวัสดุซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการจำลองและคำนวณบนปลั๊กอิน ภายในงานวิจัยนี้มีการใช้ตัวเลขอ้างอิงจากวัสดุดินเหนียวเปล่าเท่านั้น

5. การประเมินรังสีความร้อนที่ตกกระทบแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ใช้ปลั๊กอิน Ladybug ควบคู่กับกระบวนการหารูปทรงทางสถาปัตยกรรม

1.5.5 ขอบเขตการศึกษาด้านเวลาในการทำวิจัย

1. ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2566 ถึง 31 มิถุนายน พ.ศ. 2567 รวมระยะเวลาทั้งสิ้น 11 เดือน

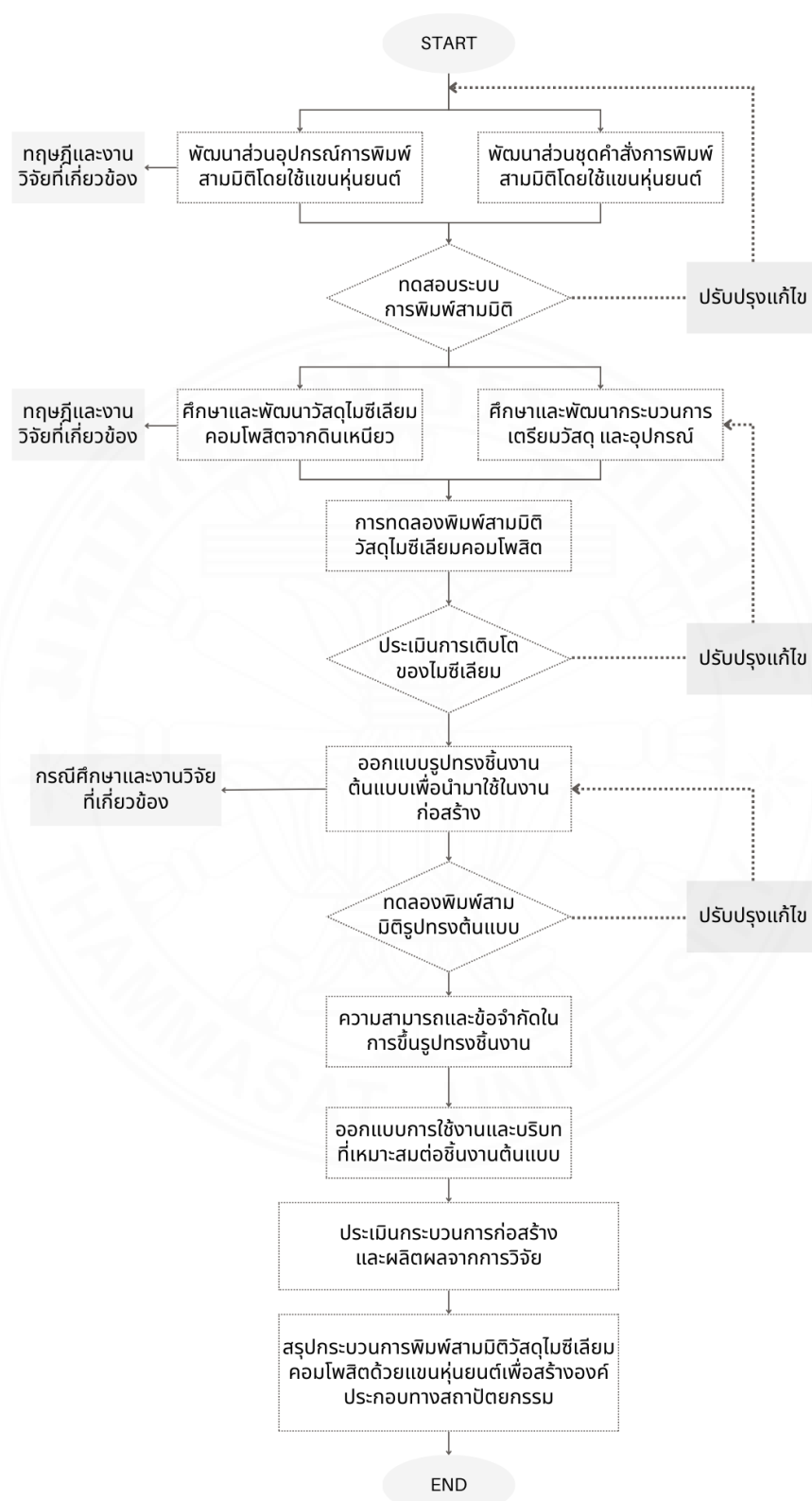
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การประเมินศักยภาพของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไม้ซีเลียมในการทำงานสถาปัตยกรรมในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา สามารถชี้ให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีให้สถาปนิก และนักออกแบบนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

2. การเสนอแนวทางการออกแบบ ก่อสร้างสถาปัตยกรรมรูปแบบใหม่ สามารถเสริมสร้างองค์ความรู้ให้กับวงการสถาปัตยกรรมในการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไม้ซีเลียมในการก่อสร้างงานสถาปัตยกรรม

3. ผลลัพธ์งานวิจัยนี้สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมหัตถ์ในประเทศไทยและเป็นทางเลือกตลาดใหม่ให้กับเกษตรกรที่ปลูกเห็ด

1.7 กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1.1 แผนดำเนินการวิจัยการออกแบบและก่อสร้างสถาปัตยกรรมชั่วคราวจากวัสดุโชนีเซียม โดยใช้การพิมพ์สามมิติด้วยเซนเซอร์. โดย ผู้วิจัย, 2567.

1.8 นิยามคำศัพท์ที่เกี่ยวข้อง

1. ไมซีเลียม (Mycelium) กลุ่มเครือข่ายเส้นใยของเห็ด ที่สามารถสร้างอาณานิคม โดยจะเกิดกระบวนการที่เส้นใยขนาดเล็กเกิดการแผ่ขยายจากหัวเชื้อของเห็ด หลังจากผ่านไประยะหนึ่งเส้นใยขนาดเล็กก็จะเริ่มเกิดการแผ่ขยายแตกกิ่งก้านออกไปแบบสุ่มคล้ายโครงข่ายกิ่งก้านต้นไม้ (Fractal Tree) (Fricker et al., 2007) เพื่อดูดซึมสารอาหาร และแพร่ขยายกักกินจนเชื่อมต่อเข้ากับวัสดุเพาะ เกิดเป็นอาณานิคมที่มีขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไมครอน จนถึงหลายเมตร

2. วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต คือ วัสดุที่เกิดจากกระบวนการที่เส้นใยเห็ดราหรือไมซีเลียมนั้น เชื่อมต่อรวมเข้ากับวัสดุเพาะ เนื่องจากต้องดูดซึมสารอาหารในการดำรงชีวิตและแผ่ขยายตัวเอง โดยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุเพาะนั้น ๆ โดยภายในงานวิจัยนี้มีการศึกษาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวเท่านั้น

3. วัสดุจากฐานชีวภาพ (Biomaterial) คือวัสดุใดๆ ก็ตามที่ได้มาจากธรรมชาติโดยตรง หรือมนุษย์สร้างขึ้น โดยคุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของวัสดุจากฐานชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติคือ ความสามารถในการย่อยสลายได้เองหรือสามารถสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ได้เมื่อหมดอายุการใช้งาน

4. วัสดุเพาะ (Substrate Material) คือวัสดุที่เป็นวัสดุฐานใด ๆ ก็ตามที่ถูกกระทำบางสิ่งบางอย่าง แต่ภายในงานวิจัยนี้วัสดุเพาะนั้นมีความหมายคือ วัสดุที่สามารถนำมาผสมเข้ากับเชื้อเห็ด และมีสารอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของไมซีเลียม โดยส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่มีฐานมาจากพืช เช่น ฟาง ชี้อ้อย เป็นต้น

5. วัสดุที่ไม่สามารถต่ออายุได้ (Non-Renewable Materials) คือ วัสดุที่ไม่สามารถสร้างใหม่ได้ในระยะเวลาอันสั้น มีจำนวนจำกัดในธรรมชาติ และการใช้งานวัสดุเหล่านี้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำมัน ถ่านหิน แร่เหล็ก เป็นต้น

6. การพิมพ์สามมิติโดยใช้หุ่นยนต์ (Robotic Additive Manufacturing) เป็นกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานโดยการเติมเนื้อวัสดุทีละชั้น โดยถูกควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแนวแกนด้วยแขนหุ่นยนต์ที่ติดตั้งเครื่องพิมพ์สามมิติ จนได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นชิ้นงานสามมิติ

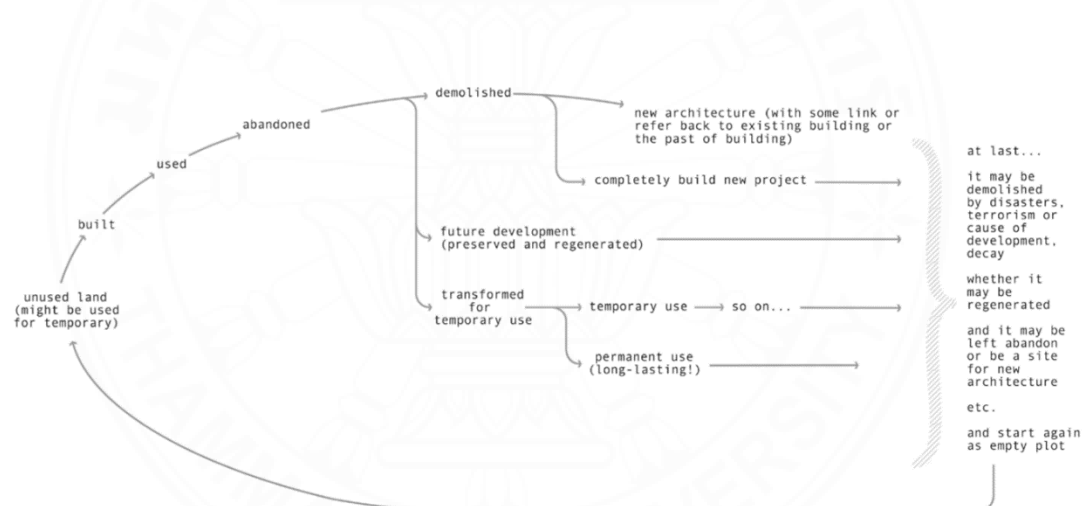
7. ภาษา RAPID เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ABB โดยเฉพาะ

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดสถาปัตยกรรมชั่วคราว

สถาปัตยกรรมมักถูกมองว่าเป็นสิ่งก่อสร้างที่มีความคงทนถาวร ซึ่งสะท้อนถึงอารยธรรมของมนุษย์ในแต่ละยุคสมัย และถูกสร้างขึ้นด้วยแนวคิดเรื่องความยั่งยืน เพื่อส่งต่อวัฒนธรรมให้คนรุ่นหลัง อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริง สถาปัตยกรรมทั้งหมดล้วนไม่คงทนถาวร และสามารถยุบพังไปตามกาลเวลา ในช่วงไม่กี่ศตวรรษที่ผ่านมา ได้มีการนิยามคำว่า "สถาปัตยกรรมชั่วคราว" ซึ่งหมายถึงสิ่งที่ไม่ยั่งยืน หากพิจารณางานสถาปัตยกรรมทั้งหมด จะพบว่างานเหล่านี้ล้วนมีอายุการใช้งานที่แตกต่างกันไป ทำให้ไม่สามารถแยกแยะสถาปัตยกรรมถาวรและชั่วคราวออกจากกันอย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.1 แผนภาพวงจรของพื้นที่ว่างและสถาปัตยกรรม. จาก สถาปัตยกรรม ช่วงเวลา ยุทธวิธีพัฒนาเมือง: สถาปัตยกรรมชั่วคราว, โดย ธัชวิทย์ สีนุกูญเรือง, 2560, *Silpakorn University e-Journal*, 37, 166.

เนื่องจากความกำกวมในการจำแนกพื้นที่หรือสถาปัตยกรรมชั่วคราว จึงได้มีการศึกษาจำแนกประเภท และจัดทำแผนภาพเพื่ออธิบายลักษณะการใช้พื้นที่แบบต่าง ๆ เช่น แผนภาพวงจรของพื้นที่ว่างและสถาปัตยกรรม ซึ่งอธิบายว่าพื้นที่ว่างอาจถูกใช้งานชั่วคราวหรือไม่ก็ตาม เมื่อถึงเวลาหนึ่งจะมีการสร้างบางสิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการใช้งานช่วงเวลาหนึ่งและจะถูกทิ้งร้างไป หลังจากนั้นมีโอกาสในการพัฒนาการใช้พื้นที่หลากหลายรูปแบบ รูปแบบแรกคือ การทุบทิ้ง ซึ่งพบได้บ่อยเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและเห็นผลชัดเจน หลังจากทุบทิ้ง สามารถพัฒนาต่อได้สองแนวทางคือ การสร้างอาคาร

ใหม่ที่บางส่วนเชื่อมโยงกับอาคารเดิม หรือไม่เชื่อมโยงกับอาคารเดิมเลย รูปแบบที่สองคือ การพัฒนาอาคารเดิมหรือปรับปรุง รูปแบบที่สามคือ การปรับเปลี่ยนไปสู่การใช้งานชั่วคราวในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งอาจนำไปสู่การใช้งานแบบถาวรได้ นับว่าใช้เวลานานกว่าสองแบบแรก อย่างไรก็ตาม ทุกแนวทางยังมีความเสี่ยงที่จะกลับกลายเป็นพื้นที่ว่าง เช่น จากภัยธรรมชาติ ภัยสงคราม หรือการผุพังย่อยสลายของอาคาร (ธัชวิทย์ สีนุญเรือง, 2560) จากแผนภาพนี้ ยังแสดงให้เห็นว่าหากพิจารณาเพียงระยะเวลาการคงอยู่ ทุกสถาปัตยกรรมจะถูกนับว่าเป็นสถาปัตยกรรมชั่วคราว ดังนั้น ควรมองถึงจุดประสงค์ในการสร้างและการใช้งานพื้นที่ประกอบด้วย เช่น ในรูปแบบที่สามที่มีการกำหนดว่าจะเป็นการใช้งานชั่วคราวเท่านั้น ไม่ว่าจะเป็นการทดลองพัฒนาพื้นที่ หรือการติดตั้งโครงสร้างชั่วคราวในระยะเวลาหนึ่ง จึงจะถูกนับว่าเป็นสถาปัตยกรรมชั่วคราว

นอกจากนี้ ยังมีการจำแนกโครงการสถาปัตยกรรมชั่วคราวตามการใช้งานและการประกอบติดตั้ง เช่น บูธจำหน่ายชั่วคราว อาคารที่พักผู้โดยสารชั่วคราว สถานที่จัดแสดงนิทรรศการหรืองานดนตรีชั่วคราว โครงการสถาปัตยกรรมชั่วคราวในงาน World Exposition ที่สามารถถอดประกอบได้ หรือแม้แต่สถานีอวกาศนานาชาติ (Jodidio, 2011) สถาปัตยกรรมทั้งหมดนี้มีแนวคิดในการออกแบบที่คล้ายกัน คือจุดประสงค์ในการสร้าง การใช้งานพื้นที่ และระยะเวลาการใช้งาน สอดคล้องกับแนวคิดของ Overmeyer (2007) ที่กล่าวว่า “สถาปัตยกรรมชั่วคราวที่ดีควรเน้นย้ำองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ ระยะเวลา งบประมาณ และรูปแบบการใช้งานที่หลากหลายทั้งหมดนี้ล้วนเป็นตัวแปรสำคัญในการสร้างสรรค์ผลงาน” ซึ่งต่อยอดแนวคิดสำคัญของสถาปัตยกรรมชั่วคราวว่าโครงการเหล่านี้ถูกพัฒนาบนแนวคิดและจุดประสงค์เพื่อการใช้งานพื้นที่ในระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะถูกถอดถอนหรือหายไป โดยสามารถก่อสร้างหรือประกอบติดตั้งได้หลายวิธี แต่ควรถูกออกแบบโดยคำนึงถึงขั้นตอนการถอดการติดตั้งหลังการใช้งานด้วย เช่น ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป (Prefabrication) และสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable Architecture) เป็นต้น

2.1.1 ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป (Prefabrication)

ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปเหมาะอย่างยิ่งสำหรับสถาปัตยกรรมชั่วคราว เนื่องจากสามารถถอนประกอบติดตั้งได้ง่ายและรวดเร็ว ระบบนี้ถูกพัฒนาขึ้นในศตวรรษที่ 19 เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ โดยมีการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ สำเร็จก่อนนำมาประกอบที่หน้างาน (Jaillon & Poon, 2009) ทำให้สามารถลดเวลาและวัสดุที่สูญเสีย โดยมีระบบประกอบติดตั้ง ได้แก่ แผ่นหล่อคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป (Precast Concrete) ที่มีการเจาะช่องสำหรับประตูและหน้าต่างล่วงหน้า ช่วยลดขั้นตอนที่หน้างาน ระบบน็อคดาวน์ (Knock

Down) ใช้การขันน็อตในการประกอบและรื้อถอน ง่ายต่อการติดตั้งและถอดออก ระบบโมดูลาร์ (Modular) รวมคุณสมบัติของการประกอบแบบ 3 มิติ ที่สามารถถอดและติดตั้งใหม่ได้อย่างสะดวก โดยใช้รถเครนในการวางชิ้นส่วนแต่ละส่วนของอาคารและประกอบด้วยการขันน็อตหรือการเชื่อมความสามารถในการถอดประกอบที่รวดเร็วและง่ายดายของระบบเหล่านี้ทำให้เหมาะสำหรับโครงการสถาปัตยกรรมชั่วคราว ซึ่งอาจต้องเปลี่ยนแปลงหรือเคลื่อนย้ายตามความจำเป็นในการใช้งาน

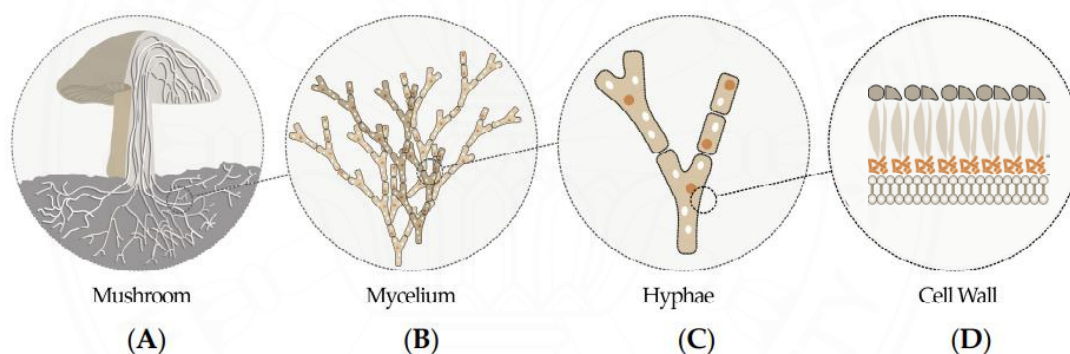
2.1.2 การก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable Architecture)

แนวคิดด้านสถาปัตยกรรมที่นอกเหนือจากการใช้ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปซึ่งพัฒนาขึ้นเพื่อความสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา วงการสถาปัตยกรรมเริ่มให้ความสำคัญกับการสร้างความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยไม่เพียงแต่ลดผลกระทบเท่านั้น แต่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป แนวคิดนี้ได้ผลักดันให้มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติมาทดแทนวัสดุที่ไม่สามารถหมุนเวียนได้ รวมถึงการสร้างสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด โดยวัสดุที่ใช้มาจากธรรมชาติ มีการกำหนดอายุการใช้งาน และเมื่อหมดอายุก็สามารถย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติได้ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) การก่อสร้างสถาปัตยกรรมที่สามารถย่อยสลายได้นี้มีข้อดีมากกว่าระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทั้งหมด ไม่ถูกนับเป็นขยะจากการก่อสร้าง ในขณะที่ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปยังคงใช้วัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น เหล็กและคอนกรีต ทำให้แม้จะสามารถรื้อถอนออกได้ ก็ยังเหลือขยะบางส่วน และเมื่อหมดอายุขัยก็จะกลายเป็นขยะจากการก่อสร้างที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ทั้งหมด

วัสดุจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ในงานสถาปัตยกรรมมีหลากหลาย เช่น ไม้ ไม้ไผ่ ไม้ก๊อก ฟาง หวายทะเลทราย พลาสติกชีวภาพจากถั่วเหลือง เซลลูโลส และไมซีเลียม (Thorns, 2018) ซึ่งแต่ละวัสดุล้วนมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป อย่างไรก็ตาม หากพูดถึงวัสดุจากธรรมชาติที่มีคุณสมบัติแข็งแรงคงทน ผลิตและย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งสามารถหาได้หรือปลูกได้ในแทบทุกพื้นที่ วัสดุไมซีเลียมถือเป็นตัวเลือกที่มีคุณสมบัติครบถ้วนที่สุดความนิยมของวัสดุไมซีเลียมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แม้จะมีข้อจำกัดทำให้โครงการส่วนใหญ่ที่ใช้วัสดุนี้เป็นเพียงศาลาหรือโครงสร้างชั่วคราว แต่เนื่องจากไมซีเลียมคือส่วนหนึ่งของเส้นใยเชื้อราเห็ดที่พันเกี่ยวกัน สร้างความแข็งแรงเมื่อถูกทำให้แห้งด้วยความร้อน (Thorns, 2018) นอกจากนี้ ยังสามารถปรับแต่งคุณสมบัติด้วยการผสมวัสดุเฉพาะอื่น ๆ ลงไป (Mohseni & Vieira, 2023) ทำให้มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรมชั่วคราวได้หลากหลาย

2.2 วัสดุไมซีเลียม

ไมซีเลียมเป็นหนึ่งในสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก (Smith & Bruhn, 1992) เนื่องจากเป็นเครือข่ายกิ่งก้านที่พัฒนาโดยเชื้อรา ซึ่งสร้างอาณานิคมบนวัสดุเพาะก่อนที่จะย่อยสลายและดูดซึมสารอาหารจากวัสดุนั้น (Garcia, 1968) ในกระบวนการสร้างอาณานิคม เส้นใยขนาดเล็กจะขยายตัวจากหัวเชื้อเห็ด และเมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มแตกกิ่งก้านออกไปคล้ายโครงสร้างกิ่งก้านต้นไม้ (Fractal tree) (Fricker et al., 2007) เพื่อดูดซึมสารอาหาร โดยเส้นใยจะปล่อยเอนไซม์สู่วัสดุเพาะ จากนั้นจะดูดซึมสารอาหารและแพร่ขยายจนเชื่อมต่อเข้ากับวัสดุเพาะ จุดที่ตัดผ่านกันจะเกิดการเชื่อมต่อเพื่อเพิ่มความแข็งแรง หากเกิดรอยแผล เส้นใยจะสร้างตัวเองขึ้นมาใหม่เพื่อซ่อมแซม (Gantenbein & Colucci, 2023) ทำให้เกิดอาณานิคมที่มีขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไมครอนจนถึงหลายเมตร ความหนาแน่นและลักษณะการแผ่ขยายของเส้นใยดังกล่าวจะถูกควบคุมโดยสารอาหารและสภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่ (Islam et al., 2017)



ภาพที่ 2.2 ภาพขยายไมซีเลียมในแต่ละส่วนของเห็ด. (A) โครงสร้างเห็ด (B) กลุ่มเส้นใยเห็ดรา (C) เส้นใยขนาดเล็ก (D) เซลล์ภายในเส้นใยขนาดเล็ก จาก Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination, โดย Mohseni et al., 2023.

จากภาพที่ 2.2 แสดงลักษณะและความสัมพันธ์ของโครงสร้างเห็ดและกลุ่มเส้นใยเห็ดหรือไมซีเลียมในแต่ละส่วน ซึ่งอาจเกิดความสับสนระหว่างเห็ดและไมซีเลียมว่าเป็นสิ่งเดียวกัน แต่แท้จริงแล้ว ไมซีเลียมเป็นเพียงส่วนหนึ่งของเห็ดที่ทำหน้าที่แผ่ขยายเพื่อดูดซึมสารอาหารจากภายนอกเท่านั้น



ภาพที่ 2.3 ภาพประเภทเชื้อไมซีเลียม. โดย ผู้วิจัย, 2566.

จากภาพที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงประเภทของหัวเชื้อไมซีเลียมตามอายุการเติบโตของเชื้อ ประกอบด้วยหัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA ที่เป็นเชื้ออ่อนที่เติบโตได้เร็ว แต่อ่อนไหวต่อการติดเชื้อมาก ซึ่งมักนำไปใช้เป็นหัวเชื้อสำหรับการแพร่ลงเมล็ดข้าวฟ่าง ถูกใช้แพร่ลงก้อนเชื้อที่อัดด้วยขี้เลื่อยหรือวัสดุอื่นเพื่อใช้ในการเพาะปลูกดอกเห็ดและการค้าขายของเกษตรกร สำหรับเชื้อเห็ดโตเต็มทีนั้นเป็นไมซีเลียมที่เติบโตเต็มที่และเชื้อแก่ที่ไม่สามารถเติบโตได้อีกเนื่องจากถูกผ่านความร้อนทำให้แห้งสนิท

2.3 วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตเกิดจากกระบวนการที่เส้นใยของเห็ดราหรือไมซีเลียมต้องการวัสดุเพาะในการดูดซึมสารอาหารและเชื่อมต่อกันเข้ากับวัสดุเพาะ เพื่อให้ไมซีเลียมและเห็ดเติบโตได้ วัสดุเพาะดังกล่าวนี้มีตั้งแต่ดินซึ่งหาได้ทั่วไป ดินเหนียวที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรง ไปจนถึงการนำของเหลือจากการเกษตรหรืออุตสาหกรรมอาหารมาใช้เป็นวัสดุเพาะ เช่น ฟาง ขี้เลื่อย ไม้กอก กากกาแฟ เปลือกส้ม และอื่น ๆ ซึ่งเมื่อนำวัสดุเพาะที่หลากหลายเหล่านี้มารวมกับไมซีเลียม ไมซีเลียมจะสามารถรวมเข้ากับวัสดุเพาะกลายเป็นวัสดุคอมโพสิตได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม ไม่ก่อให้เกิดการสร้างขยะ (Appels & Camere, 2018) ได้ผลลัพธ์เป็นวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่มีน้ำหนักเบา คุณสมบัติคล้ายโฟม (Yang & Park, 2021) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการจำแนกประเภทของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตเป็นวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตร และวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว

2.3.1 วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตร



ภาพที่ 2.4 ภาพชิ้นงานต้นแบบผลิตจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตร. สืบค้นจาก <https://www.materialincubator.com/building-on-mycelium> เมื่อวันที่ 13 ธ.ค. 66.

วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่มาจากของเสียการเกษตรมีความหลากหลายในวัสดุเพาะที่ใช้ เนื่องจากต้องมีสารอาหารเพียงพอที่สามารถให้ไมซีเลียมดูดซึมและเติบโตได้ โดยวัสดุเพาะส่วนมากนั้นมีฐานมาจากพืช (Garcia, 1968) ทุกวัสดุเพาะสามารถใช้ทดแทนกันได้ แต่จะส่งผลให้คุณสมบัติของไมซีเลียมที่เติบโตนั้นแตกต่างกันไปตามวัสดุเพาะ ในปัจจุบันการศึกษาวสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตรนั้นมีวัสดุเพาะที่เป็นที่นิยมและเห็นได้บ่อยครั้งในหลายงานวิจัย ได้แก่ วัสดุฟาง และขี้เลื่อย เนื่องจากสองวัสดุนี้เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการปลูกเห็ดในอุตสาหกรรม การปลูกเห็ดดั้งเดิมมาก่อน ส่งผลให้เมื่อต้องการศึกษาและนำวัสดุไมซีเลียมมาประยุกต์ใช้ในงานสถาปัตยกรรม ผู้วิจัยส่วนใหญ่จึงเริ่มต้นจากวัสดุเพาะที่มีความคุ้นชิน ง่ายต่อการอ้างอิง เปรียบเทียบข้อมูล และลดความเสี่ยงจากการใช้วัสดุใหม่ที่ไม่เคยศึกษามาก่อน อีกทั้งกระบวนการขึ้นรูปวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตรนั้นมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการปลูกเห็ดดั้งเดิมเป็นอย่างมาก มีข้อแตกต่างเพียงแค่ภาชนะหรือแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบให้เกิดเป็นรูปทรงที่ต้องการต่างจากการบรรจุถุงพลาสติกของการปลูกเห็ดดั้งเดิม นอกจากนี้ ยังมีกระบวนการผ่านความร้อนเพื่อให้ไมซีเลียมแห้ง หยุดการเติบโตและเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน ซึ่งไม่มีกระบวนการนี้ในการปลูกเห็ดแบบดั้งเดิม

วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียทางการเกษตรมีข้อดีคือ สามารถหาวัสดุและมีขั้นตอนการผลิตที่ง่าย โดยไม่ต้องเทคโนโลยีการผลิตอื่นเพิ่มเติม เพียงแค่มีวัสดุและแม่พิมพ์ในการขึ้นรูป แต่ข้อดีดังกล่าวก็เป็นข้อจำกัดเช่นกัน เนื่องจากหากต้องการขึ้นรูปทรงที่มีความซับซ้อน

หรือรูปทรงที่มีความแตกต่างกันจำนวนมาก จะส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิต และใช้ต้นทุนสูงในการทำแม่พิมพ์จำนวนมาก ซึ่งเทคโนโลยีที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยตรงคือ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ แต่เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติมีความจำเป็นที่ต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติและความสามารถในการพิมพ์ได้ ซึ่งวัสดุเพาะที่ฐานมาจากพืชหรือของเสียการเกษตรส่วนมากเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติดังกล่าว เป็นวัสดุที่มีความแข็ง แยกเป็นชิ้นส่วนขนาดปานกลางถึงใหญ่ ไม่สามารถรวมเป็นวัสดุเนื้อเดียวกันได้ ส่งผลให้หากต้องการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการผลิตด้วยวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตจากของเสียการเกษตร มีความจำเป็นต้องเพิ่มวัสดุอื่นเพิ่มเติมซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวัสดุประสาน เช่น ดินเหนียว น้ำ หรือสารให้ความหนืด เป็นต้น

2.3.2 วัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว

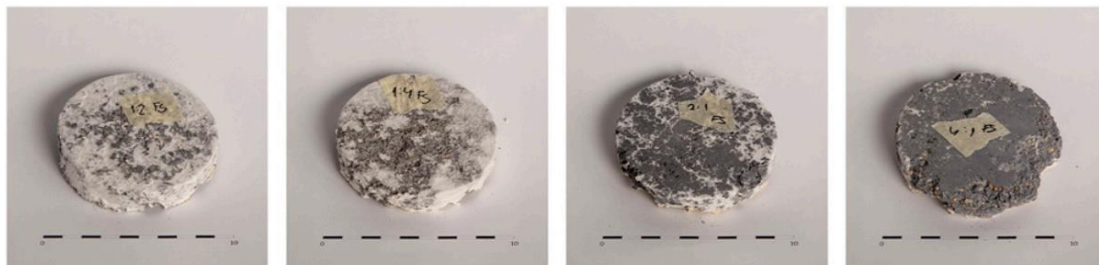


ผสมดินเหนียวและน้ำ

ภาพที่ 2.5 ภาพเชื้อไม้ซีเลียมแต่ละประเภทเมื่อผสมดินเหนียว. โดย ผู้วิจัย, 2566.

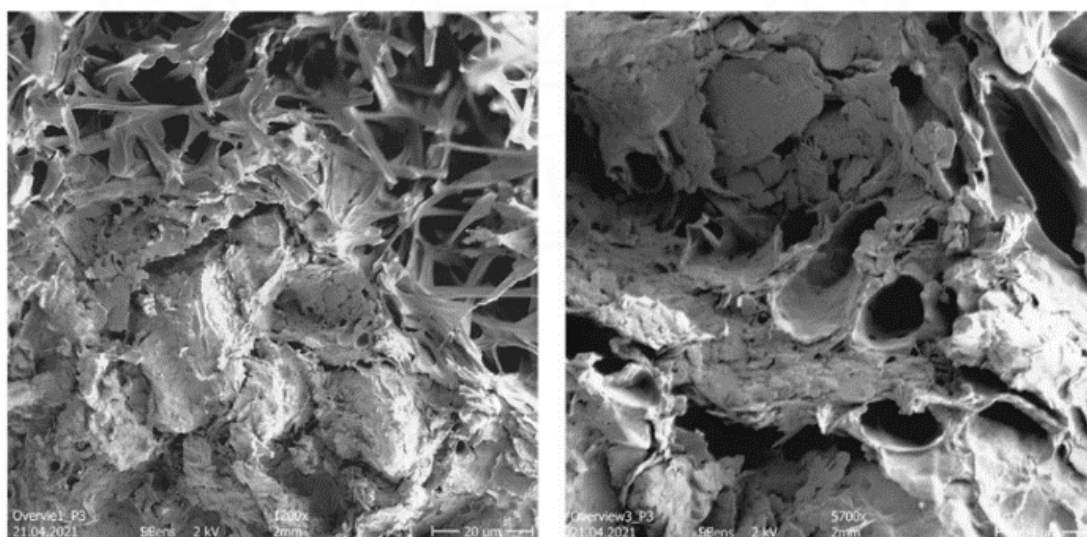
วัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุดินเหนียวให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น และตอบสนองความต้องการในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุไม้ซีเลียมให้เหมาะสมกับการใช้ในเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ในอดีตการพัฒนาวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตมักใช้กระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์เป็นหลัก แต่วัสดุเพาะเหล่านั้นมักไม่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติ ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการผลิตรูปทรงที่ซับซ้อนได้ในการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น ในขณะที่เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ที่มีความยุ่งยากใช้เวลานานหากต้องขึ้นรูปทรงที่มีความซับซ้อน (Soh, 2020; Bhardwaj, 2020) นอกจากนี้ Soh (2020) ยังระบุว่า “การพิมพ์สามมิตินั้นเป็นเทคนิคการผลิตที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมต่อการผลิตวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตแบบใช้พลังงานและงบประมาณน้อย” จากเหตุผลดังกล่าวจึงเกิดการศึกษาวัสดุประสานเพิ่มเติมเช่น ดินเหนียว เพื่อให้มีความเหลวหรือหนืดของวัสดุที่พอดี เนื้อวัสดุเกาะตัวรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ชิ้นส่วนไม่แยกเป็นชิ้น เป็นการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุให้เหมาะสมต่อการพิมพ์สามมิติ โดยในปัจจุบันงานวิจัยที่มีการศึกษาวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว ส่วนมากเป็นการศึกษาในเชิงวัสดุศาสตร์ เพื่อทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของ

วัสดุดินเหนียวผสมไมซีเลียม หรือวัดผลการเติบโตของไมซีเลียมบนวัสดุดินเหนียวเท่านั้น ส่งผลให้ผลลัพธ์ของชิ้นงานในงานวิจัยเหล่านี้มีขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่นชิ้นงานต้นแบบในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ภาพชิ้นงานต้นแบบการทดลองผสมดินเหนียวและไมซีเลียม. จาก Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination, โดย Mohseni et al., 2023.

โดยผลทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุดินเหนียวผสมไมซีเลียมจากงานวิจัย MyCera พบว่าการรวมกันระหว่างวัสดุไมซีเลียมและดินเหนียวช่วยเพิ่มความต้านทานของแรงดึงได้อย่างมีนัยสำคัญ เพิ่มขึ้นจากดินเหนียวปกติถึง 66.62% เนื่องจากไมซีเลียมทำหน้าที่เป็นตัวประสานช่วยยึดกันระหว่างอนุภาคได้ดีมากขึ้น ดังภาพที่ 2.7 รวมทั้งไมซีเลียมดังกล่าวยังเป็นส่วนเชื่อมต่อที่สามารถเติบโตแผ่ขยายเส้นใยเพื่อเชื่อมต่อยึดเหนี่ยวชิ้นงานแต่ละชิ้นให้ประสานยึดเกาะกันคล้ายวัสดุปูน (Jauk, 2022) เปรียบเสมือนข้อต่อจากธรรมชาติซึ่งสามารถสร้างตัวเองต่อเนื่องไปได้ไม่รู้จบ ดังที่แสดงให้เห็นในชิ้นงานต้นแบบภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 ภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินเหนียวและเส้นใยเห็ด. จาก MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures, โดย Julian Jauk และ Lukas Gosch, 2022.



ภาพที่ 2.8 ภาพชิ้นงานต้นแบบ. จาก MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures, โดย Julian Jauk และ Lukas Gosch, 2022.

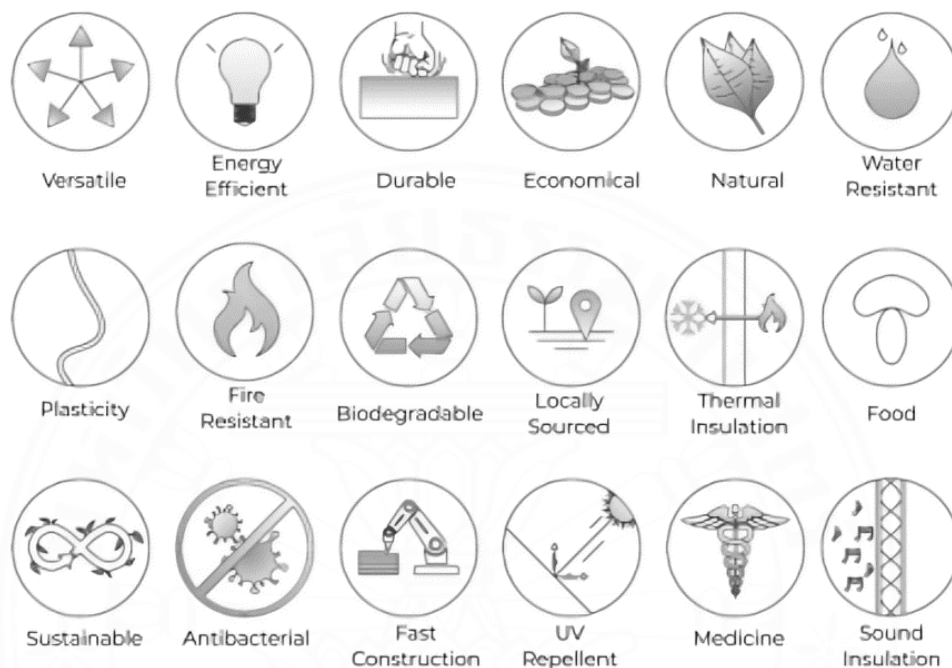
แต่ปัจจุบันคุณสมบัติเชิงกลเช่น ค่าความแข็งแรงของวัสดุ หรือค่าความเครียดแรงอัดสูงสุดของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว ยังไม่มีการทดสอบหรือมีค่าที่แม่นยำ งานวิจัยส่วนมากเป็นการศึกษาค่าความเครียดแรงอัดสูงสุดของวัสดุไมซีเลียมจากของเหลือ การเกษตรที่ถูกผลิตโดยวิธีแม่พิมพ์เท่านั้น และค่าดังกล่าวยังแปรผันตามประเภทของวัสดุเพาะด้วยเช่นกัน ผู้วิจัยจึงได้มีการทบทวนงานวิจัยที่มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลดังกล่าวของวัสดุดินเหนียว เพื่อนำมาใช้อ้างอิงในการศึกษาในงานวิจัยนี้ต่อไป พบว่าค่าแปรผันกับความสม่ำเสมอของดินเหนียว โดยภายในงานวิจัยนี้มีลักษณะคือ Stiff มีค่ารับแรงอัดอยู่ที่ 1-2 ซึ่งค่าดังกล่าวเหมาะสำหรับการเป็นผนังไม่รับน้ำหนักเท่านั้น (Toure et al., 2017)

Consistency	Unconfined Compressive Strength (tons/sq ft)
Very Soft	0 - 0.25
Soft	0.25 - 0.5
Medium	0.5 - 1
Stiff	1 - 2
Very Stiff	2 - 4
Hard	>4

ภาพที่ 2.9 ค่าความแข็งแรงของวัสดุดินเหนียวที่ทดสอบโดยไม่มีการจำกัดความดันจากภายนอก, สืบค้นจาก <https://www.engineeringcivil.com/unconfined-compressive-strength-test.html> เมื่อวันที่ 20 เม.ย. 67.

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัย Claycelium จาก IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalonia ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติวัสดุไมซีเลียมผสมดินเหนียวพบว่า เมื่อผสมไมซีเลียมร่วมกับวัสดุดินเหนียวคุณสมบัติของวัสดุจะถูกพัฒนาให้ดีขึ้นโดยผสมรวมคุณสมบัติ

ทั้งสองวัสดุไว้ด้วยกัน เช่น จากคุณสมบัติของดินเหนียวส่งผลให้วัสดุเพิ่มความคงทนแข็งแรง เพิ่มความยืดหยุ่น สามารถขึ้นรูปได้อย่างรวดเร็ว และสามารถกันความร้อนได้ดีมากขึ้น รวมถึงการเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำ กันเสียง กันรังสีความร้อน สามารถผลิตอาหารจากคุณสมบัติของไมซีเลียม และยังมีคุณสมบัติร่วมอื่น ๆ ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 คุณสมบัติของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว. จาก CLAYCELUM_ LIVING STRUCTURES, โดย Justin Sheinberg และ Mert Gönül , 2019.



ภาพที่ 2.11 สถาปัตยกรรมวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว. จาก CLAYCELUM_ LIVING STRUCTURES, โดย Justin Sheinberg และ Mert Gönül , 2019.

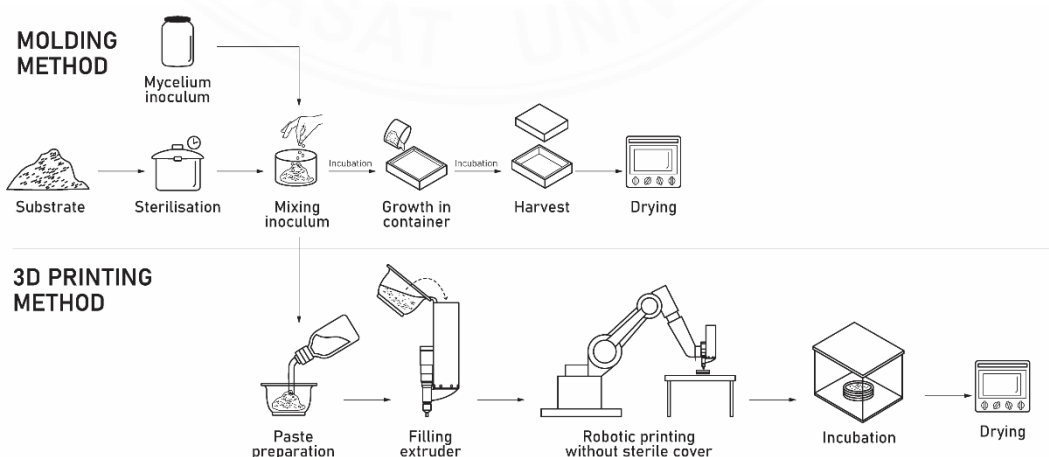
จากภาพแสดงตัวอย่างสถาปัตยกรรมวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว ซึ่งเป็นศาลาชั่วคราวภายในเมือง เป็นพื้นที่สาธารณะรวมถึงสามารถผลิตอาหารได้เช่นกัน โดยจากการ ทบทวนวรรณกรรมพบว่าวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวในการ ออกแบบขนาดใหญ่เช่นสถาปัตยกรรมยังมีจำนวนไม่มาก ผู้วิจัยจึงมองเห็นช่องว่างการวิจัยและ ต้องการศึกษานำเสนอกระบวนการสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว

2.3.3 คุณสมบัติของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

นอกเหนือจากคุณสมบัติของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่ได้กล่าวถึงข้างต้น วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตยังมียุทธศาสตร์ที่หลากหลาย ดังเช่น หลังจากผ่านการความร้อนขึ้นงานจาก วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจะมีน้ำหนักที่เบาแต่ยังคงมีความแข็งแรงและคงทนอยู่ เมื่อใช้งานแล้ววัสดุ ไมซีเลียมคอมโพสิตจะเกิดการกัดกร่อนตัวเองถูกย่อยสลายลงสู่ดิน ช่วยในการฟื้นฟูและปรับปรุง คุณภาพดิน เนื่องจากเส้นใยไมซีเลียมสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สำคัญและเพิ่มประสิทธิภาพ ในการดูดซับน้ำและสารอาหารสำหรับพืชในดิน ช่วยให้มีความต้านทานต่อโรคพืชบางชนิด เป็นแหล่ง อาหารที่สำคัญสำหรับสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในดินเช่น ไส้เดือน เป็นต้น (BioActive Soils, 2022) นอกจากนี้ ไมซีเลียมยังมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันหน้าดินพังทลาย (Zhang, 2020) คุณสมบัติเหล่านี้เป็นตัวอย่างที่ชัดเจนแสดงให้เห็นประโยชน์ของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่สามารถใช้ในการสร้างสภาพแวดล้อมที่ยั่งยืนได้ในอนาคต

2.4 กระบวนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมหรือองค์ประกอบสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียม

คอมโพสิต



ภาพที่ 2.12 ภาพกระบวนการผลิตวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต. โดย ผู้วิจัย. 2566.

กระบวนการผลิตวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในปัจจุบันมีทั้งหมด 2 วิธี ได้แก่ การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ และการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ โดยการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิตินั้นเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการศึกษาอย่างใกล้ชิดเพียงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเท่านั้น เนื่องจากความต้องการพัฒนาและก้าวข้ามข้อจำกัดของการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ จากภาพที่ 2.10 แสดงกระบวนการผลิตทั้งสองแบบซึ่งมีความแตกต่างกันเฉพาะในขั้นตอนของการขึ้นรูป แต่ขั้นตอนเตรียมวัสดุและเพาะเชื้อ รวมถึงขั้นตอนทำให้แห้งหลังขึ้นรูปนั้นยังมีความคล้ายคลึงกัน

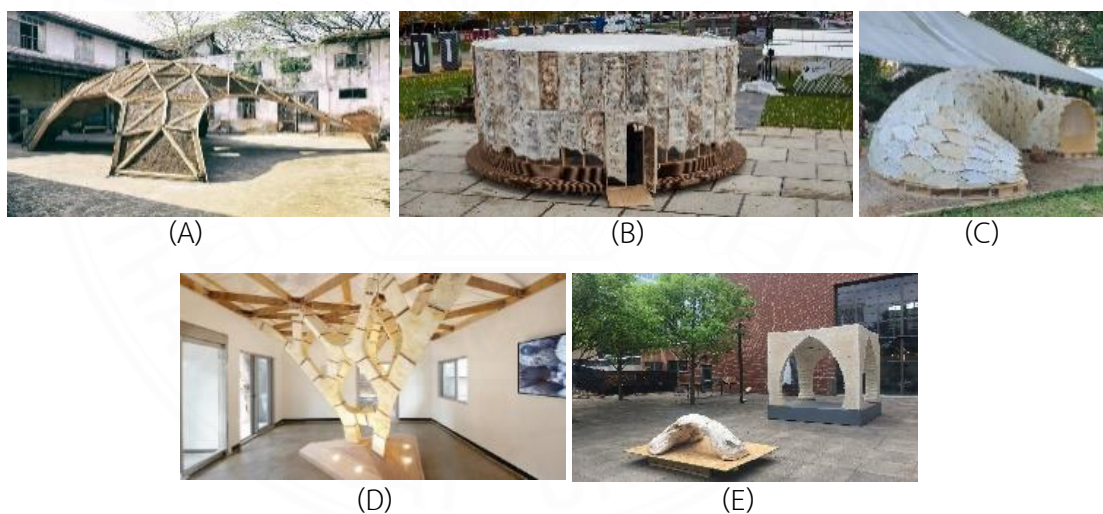
2.4.1 การขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Molding)



ภาพที่ 2.13 (ภาพซ้าย)ภาพชิ้นงาน Mycotecture ของ Phillip Ross. (ภาพขวา)ภาพชิ้นงาน Hy-Fi pavilion. สืบค้นจาก <https://www.certifiedenergy.com.au/emerging-materials/emerging-materials-mycelium-brick> เมื่อวันที่ 30 ต.ค. 66.

การขึ้นรูปวัสดุไมซีเลียมด้วยแม่พิมพ์เป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด ตั้งแต่เริ่มมีการศึกษาและทดลองใช้วัสดุไมซีเลียม เนื่องจากเป็นวิธีขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์มีกระบวนการคล้ายกับการทำก้อนเห็ดของเกษตรกร โดยมีวิธีการนำวัสดุเพาะใส่ลงในภาชนะหรือแม่พิมพ์ ก่อนใส่หัวเชื้อไมซีเลียม และทำการบ่มเพื่อให้ไมซีเลียมเติบโตภายในแม่พิมพ์นั้น แต่วิธีการนี้มีข้อควรระวังคือการติดเชื้อ เพื่อหลีกเลี่ยงการติดเชื้อกระบวนการทุกอย่างจะต้องอยู่ในการควบคุมอย่างเคร่งครัดเพื่อป้องกันการติดเชื้อทั้งอุปกรณ์ และสภาพแวดล้อม แต่ในบางครั้งบุคคลที่มีความเชี่ยวชาญในด้านการปลูกเห็ดยังพบเจอการติดเชื้อด้วยเช่นกัน (Silverman, 2024) แสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงและข้อจำกัดที่ผู้เริ่มต้นทำการศึกษาต้องพบเจอ รวมทั้งหากแม่พิมพ์ดังกล่าวมีรูปทรงที่ซับซ้อน หรือมีชอกมุมรอยหักจำนวนมาก อาจส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นเสี่ยงต่อการติดเชื้อมากขึ้นด้วยเช่นกัน เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ส่วนมากที่ถูกออกแบบและผลิตด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นรูปทรงพื้นฐาน

ไม่ซับซ้อนมากนัก เช่น ก้อนอิฐสี่เหลี่ยม แผ่นผนังขนาดเล็ก ตัวอย่างเช่นชิ้นงานในซีรีส์ Mycotecture ของ Phillip Ross จัดแสดงในนิทรรศการปี 2009 ซึ่งเป็นชิ้นงานแรก ๆ ที่นำวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตผลิตเป็นก้อนอิฐรูปทรงประสานกันประกอบเป็นผนังโค้งดังภาพซ้ายที่ 2.11 แต่ขนาดชิ้นงานยังไม่ใหญ่มากนักเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องความแข็งแรงของโครงสร้างและความสามารถในการรับน้ำหนักของก้อนอิฐไมซีเลียม ข้อจำกัดดังกล่าวนำไปสู่การประยุกต์ใช้โครงสร้างจากวัสดุเข้ามาช่วยรับน้ำหนักแทนวัสดุ ไมซีเลียม ช่วยก้าวข้ามขีดจำกัดในเรื่องของขนาด ซึ่งแสดงให้เห็นในงาน Hy-Fi pavilion ปี 2014 ของ The Living/D. Benjamin และ Arup ดังภาพขวาที่ 2.11 ซึ่งเป็นการใช้กระบวนการขึ้นรูปก้อนอิฐเช่นเดียวกับงาน ของ Phillip Ross แต่มีการพัฒนาเพิ่มส่วนของโครงสร้างไม้ด้วยความร่วมมือกับบริษัทวิศวกรโครงสร้าง Arup เข้ามาช่วยออกแบบและคำนวณการรับน้ำหนัก เกิดเป็น Pavillion ก้อนอิฐวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจำนวนประมาณ 10,000 ก้อน ประกอบติดตั้งและจัดแสดงภายนอก นับได้ว่าเป็นงานสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมที่แรกและที่เดียวที่สามารถสร้างได้ในขนาดใหญ่ที่สุดจนถึงปัจจุบัน แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้วัสดุไมซีเลียมในงานสถาปัตยกรรมได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.14 ภาพ (A) Shell Mycelium จาก BEETLES 3.3 and Yassin Areddia Design. ภาพ (B) Growing Mycelium จาก Erik Klarenbeek. ภาพ (C) MY-CO space จาก MY-CO-X. ภาพ (D) MycoTree จาก KIT Karlsruhe, ETH Zürich และ Singapore-ETH Centre. ภาพ (E) El Monolito Micelio จาก Jonathan Dessi-Olive.

จากแนวทางการออกแบบและก่อสร้างของ Hy-Fi pavilion ที่เกิดขึ้นในปี 2014 ได้ส่งผลให้งานสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมถดถุมนำกระบวนการก่อสร้างนี้ไปใช้เช่นกัน ได้แก่งาน Shell Mycelium ในปี 2016 งาน Growing pavilion ในปี 2019 และงาน MY-CO SPACE ในปี

2021 ซึ่งทั้งสามงานนี้มีกระบวนการก่อสร้างเป็นแผ่นไมซีเลียมก่อนนำมาประกอบติดตั้งร่วมกับโครงสร้างไม้และเหล็ก งาน MycoTree ในปี 2016 ที่มีการทำเป็นก้อนอิฐไมซีเลียมติดตั้งร่วมกับโครงสร้างไม้และเหล็ก และงาน El Monolito Micelio—Tactical Mycelium ในปี 2018 ที่มีการทำเป็นเสาหินขนาดใหญ่ร่วมกับโครงสร้างไม้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการก่อสร้างโดยใช้องค์ประกอบสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมร่วมกับโครงสร้างจากวัสดุอื่นเป็นวิธีที่นิยม และเป็นวิธีที่นักร้องแบบและสถาปนิกส่วนใหญ่เลือกใช้ แต่จากผลลัพธ์ของงานดังกล่าวพบว่าการพัฒนาในส่วนของรูปทรงยังมีความคล้ายคลึง และไม่แตกต่างจากกันมากนัก ส่งผลให้เกิดความต้องการมองหาทางเลือกในการขึ้นรูปวัสดุไมซีเลียมแบบใหม่เพื่อทดแทนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ จึงเกิดเป็นการทดลองนำวัสดุไมซีเลียมมาขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อ (Additive Manufacturing) หรือเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

2.4.2 การขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

การขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในงานสถาปัตยกรรมเริ่มขึ้นในปี 2563 เพื่อตอบสนองความต้องการในการพัฒนาแนวทางการผลิตใหม่และก้าวข้ามข้อจำกัดของการผลิตด้วยแม่พิมพ์ที่ไม่สามารถขึ้นรูปทรงซับซ้อนได้ ปัจจุบันมีบริษัทที่ผลิตชิ้นงานจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตเพิ่มขึ้น เช่น Ecovative บริษัทขนาดใหญ่และมีชื่อเสียงในการนำเทคโนโลยีชีวภาพและใช้ไมซีเลียมในการผลิตวัสดุที่ยั่งยืน ทดแทนพลาสติกและวัสดุอื่นๆ ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม หรือบริษัทอื่นที่มีการผลิตบรรจุภัณฑ์และเสื้อผ้าหนังจากไมซีเลียม เป็นต้น แต่บริษัทที่มีใช้การผลิตโดยการพิมพ์สามมิติสำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ เช่น เฟอร์นิเจอร์หรือสถาปัตยกรรมยังมีจำนวนไม่มาก โดย Blast Studio เป็นบริษัทที่มีชื่อเสียงโดดเด่น ในการนำวัสดุหรือขยะเหลือใช้มาผลิตเป็นเฟอร์นิเจอร์ และหนึ่งในวัสดุที่นำมาใช้คือไมซีเลียม



ภาพที่ 2.15 แนวคิดและกระบวนการผลิตโดยการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ของ Blast Studio. สืบค้นจาก <https://www.blast-studio.com/> เมื่อวันที่ 1 ธ.ค. 66.

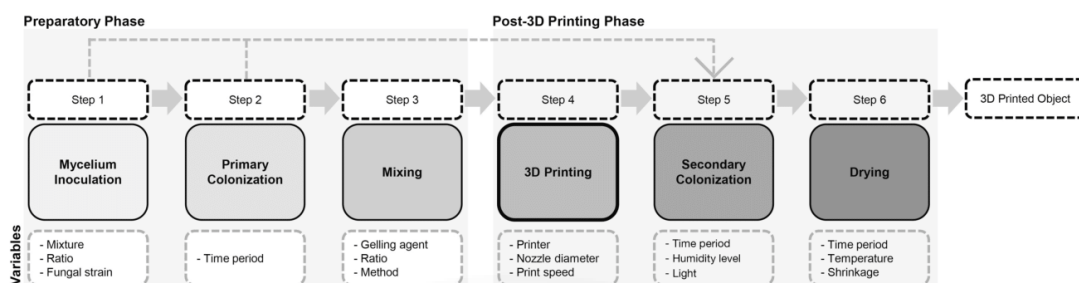
จากภาพแสดงให้เห็นถึงแนวคิดและกระบวนการผลิตโดยการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ของ Blast Studio โดยเริ่มจากการย่อวัสดุหรือขยะเหลือใช้ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนนำมาผสมกับเชื้อไมซีเลียมและวัสดุที่มีความหนืด เพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ จากนั้นใช้แขนหุ่นยนต์ที่ติดกับกระบอกฉีดวัสดุเป็นเครื่องพิมพ์สร้างชิ้นงานทีละชิ้น ก่อนจะนำมาประกอบกันและปล่อยให้ไมซีเลียมเติบโตบนชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ผลงานของ Blast Studio ส่วนใหญ่ยังคงเป็นเพียงประติมากรรมและเฟอร์นิเจอร์เท่านั้น นอกจากนี้ Blast Studio ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่เหมาะสมต่อการพิมพ์สามมิติ ซึ่งส่วนใหญ่จะพิมพ์ชิ้นงานต้นแบบในขนาดเล็ก เนื่องจากมุ่งเน้นการศึกษาเชิงวัสดุศาสตร์มากกว่าการออกแบบ อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Julian Jauk และ Lukas Gosch ในชื่อ Mycera แสดงศักยภาพของวัสดุที่ส่งผลต่อการออกแบบรูปทรงอย่างชัดเจน โดย Mycera ใช้การพิมพ์สามมิติจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในรูปทรงกลวงภายใน จากนั้นใส่เชื้อไมซีเลียมภายในและนำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาวางต่อกัน ปล่อยให้ไมซีเลียมเติบโตและยึดเกาะชิ้นงานไว้ด้วยกัน ทำหน้าที่เสมือนข้อต่อจากธรรมชาติ



ภาพที่ 2.16 ภาพชิ้นงานต้นแบบจากโครงการ Mycera. จาก MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures, โดย Julian Jauk และ Lukas Gosch, 2022.

ขั้นตอนการผลิตโดยการพิมพ์สามมิติวัสดุจากไมซีเลียมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงขั้นตอนเตรียมวัสดุ และช่วงหลังพิมพ์สามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 6 ขั้นตอน โดยเริ่มต้นด้วยการผสมวัตถุดิบกับหัวเชื้อไมซีเลียมในขั้นตอนการ Inoculation โดยเลือกสัดส่วนและสายพันธุ์เชื้อที่เหมาะสม จากนั้นทำการบ่มเชื้อไมซีเลียมในช่วง Primary Colonization เพื่อให้เชื้อไมซีเลียมเติบโตตามเวลาที่กำหนด ถัดมาคือขั้นตอน Mixing ซึ่งจะผสมด้วยวัสดุประสานเพิ่มความหนืดที่เลือก และเตรียมพร้อมสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ ในขั้นตอนการพิมพ์ ต้องมีการปรับเครื่องพิมพ์ ขนาดหัวฉีด และความเร็วในการพิมพ์เพื่อให้ได้รูปทรงที่เหมาะสม หลังจากพิมพ์จะบ่มเพิ่มเติมในขั้นตอน Secondary Colonization โดยควบคุมระดับความชื้นและแสง และสุดท้ายคือการทำแห้งหรือให้ความร้อนในขั้นตอน Drying ที่อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อลดการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุที่พิมพ์เสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งานตามต้องการ จากงานวิจัยของ Mohseni et al. ปี 2023

ได้ทำการเปรียบเทียบขั้นตอนต่าง ๆ ของงานวิจัยที่ได้ศึกษาและทดลองพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมจำนวน 8 งานวิจัย รวมถึงงาน Mycera ด้วยเช่นกัน และสามารถสรุปได้ดังตารางในรูปที่ 2.16



ภาพที่ 2.17 กระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียม จาก Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination, โดย Mohseni et al, 2023.

	Pulp Faction [29]	Tilted Arch [4]	Mycelium Matters [28]	Mycelium-Bound Composite [11]	MyCera [31]	Multi-Material Fabrication [32]	3D Printing of Biomass-Fungi Composite Material I [7]	3D Printing of Biomass-Fungi Composite Material II [20]
								
Sequence of steps	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4-5-6	3-4-1-2-5-6	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4-5-6	1-2-3-4-5-6
Step 1: Mycelium Inoculation of Agricultural Feedstock								
Mixture	Fine woodchips + paper pulp + kaolin clay	Shredded paper + wheat bran	Beechwood + paper cellulose	Bamboo fibers (500 µm)	Sawdust (<2 mm) + bleached and unbleached cellulose	Paper pulp + secondary material: sand (0.02-0.05 mm) and gravel (4-8 mm)	Ecovative GIY mixture [33]	Ecovative GIY mixture ([33])
Ratio	N/A	65-70 wt% water + 7% wheat bran (dry weight)	64 wt% water	175 g of bamboo fibers + 175 mL of water + 50 g of spawn + sawdust	N/A	N/A	400 g of Ecovative mixture + 700 mL water + 32 g flour	400 g of Ecovative mixture + 700 mL water + 32 g flour
Fungal strains	<i>Byssomerulius corium</i> + <i>Gloeophyllum</i>	<i>Pleurotus ostreatus</i> (10% of dry weight content)	<i>Trametes versicolor</i> + <i>Ganoderma resinaceum</i>	<i>Ganoderma lucidum</i>	<i>Pleurotus ostreatus</i>	<i>Ganoderma lucidum</i>	N/A	N/A
Step 2: Primary Colonization								
First incubation period	7 days	14 days	14 days	1 to 4 weeks	N/A	N/A	3-5 days	3-5 days
Step 3: Mixing								
Gelling agent	Kaolin Clay	Guar gum	Xanthan gum (3 wt%)	Chitosan	Clay	Xanthan gum	Psyllium husk powder	Psyllium husk powder
Ratio	N/A	3:50 Guar gum:water	10-80 wt% fiber-water / 5-85 wt% fiber-water	60:40 and 70:30 fiber ratios + 3 wt% chitosan solution at pH=6	7:1 clay: sawdust + 35 wt% water	11% spawn, 56% paper pulp, 1% xanthan gum, and 32% water (by weight)	100 g of primary material + 400 g of water + psyllium husk (20 g)	100 g of primary material + 400 g of water + psyllium husk (0, 10 g, 20 g, or 30 g)
Method	N/A	N/A	20 min at 400 rpm	Pounded with pestle and mortar	Mixing machine	N/A	Commercial mixer for 30 s	Commercial mixer for 15 s
Step 4: 3D Printing								
Printer	Vormvrij Lutum v4	Custom extruder	KUKA KR 15/2 6-axis industrial robot	Manually with serological syringes	Delta WASP 40100	N/A	Delta WASP 2040	Delta WASP 2040
Nozzle diameter	3.5 mm	9 mm	N/A	6 mm	4 mm	N/A	4 mm	N/A
Layer height	1.5 mm	N/A	3 mm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Print speed	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	15 mm/s + air pressure of 3.5 bar	30 mm/s
Step 5: Secondary Colonization								
Second incubation period	N/A	5 weeks + 7 days of biowelding	7 days at 26 °C	20 days	2 weeks at 24 °C	14 days	3-5 days	N/A
Step 6: Drying/Heating								
Drying period	N/A	N/A	N/A	Overnight at 40 °C	6 h at 600 °C + 2.5 h at 960 °C	N/A	4 h at 95 °C	N/A
Shrinkage	40%	N/A	N/A	3-6%	N/A	N/A	N/A	N/A

ภาพที่ 2.18 ตารางการเปรียบเทียบกระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียม จาก Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination, โดย Mohseni et al, 2023.

จากตารางการเปรียบเทียบกระบวนการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมข้างต้นพบว่าทุกงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาและพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตมีกระบวนการที่คล้ายกัน โดยทำตามขั้นตอน 1-2-3-4-5-6 แต่ Mycera มีความแตกต่าง เนื่องจากมีลำดับขั้นตอน 3-4-1-2-5-6 คือการผสมวัสดุดินเหนียวและเชื้อเห็ดเข้าด้วยกันแล้วพิมพ์โดยไม่รอให้ไมซีเลียมเดบิโตในช่วงแรก หลังจากพิมพ์เสร็จจึงใส่เชื้อเห็ดในรูปทรงกลวงเพื่อให้ไมซีเลียมเดบิโตครั้งที่สอง วิธีนี้ทำให้ไมซีเลียมเดบิโตและรวมกับดินเหนียวได้ดี เพิ่มความต้านทานแรงดึงให้กับดินเหนียวถึง 66% แสดงให้เห็นว่าวิธีนี้มีศักยภาพในการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อในด้านการประยุกต์ใช้และการออกแบบ นอกจากนี้การเตรียมวัสดุพบว่าทุกงานวิจัยต้องมีการใช้วัสดุประสาน ได้แก่ ดินเหนียว ไคโตซาน หรือแป้งเพื่อช่วยในการขึ้นรูปและมีคุณสมบัติในการพิมพ์ และมีระยะเวลาเฉลี่ยในการบ่มเชื้อไมซีเลียมที่ 7-14 วัน รวมทั้งมีค่าที่ต้องปรับระหว่างการพิมพ์ได้แก่ ค่าความสูงระหว่างชั้น ขนาดหัวพิมพ์ และความเร็ว แต่ค่าเหล่านี้ต้องมีการศึกษาและทดลองเพื่อหาความเหมาะสมต่อวัสดุภายในงานวิจัยนี้ต่อไป

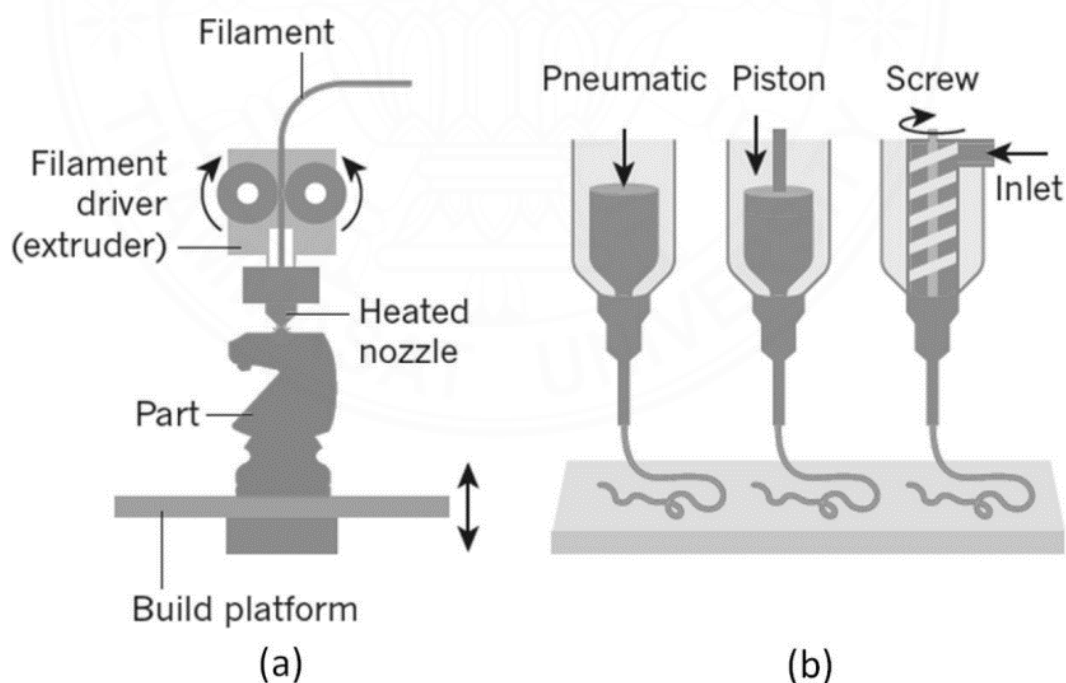
2.5 การศึกษาส่วนอุปกรณ์ (Hardware)

หลังจากการศึกษากระบวนการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต ผู้วิจัยจึงได้มีศึกษาส่วนของอุปกรณ์ หรือเครื่องมือที่ใช้ในการพิมพ์สามมิติดังกล่าว เพื่อนำไปพัฒนาส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าการพิมพ์สามมิตินั้นสามารถแบ่งประเภทตามวัสดุและเทคโนโลยีการขึ้นรูปได้ทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่ ระบบฉีดเส้นวัสดุ (Material Extrusion) ระบบเรซิน (Light Polymerized) ระบบการหลอมผงวัสดุ (Powder Bed Fusion) และระบบอัดลามิเนต (Laminated) ซึ่งแต่ละระบบนั้นมีความเหมาะสมกับการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ซึ่งการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวเป็นการพิมพ์สามมิติประเภทระบบฉีดเส้นวัสดุ

การพิมพ์สามมิติประเภทระบบฉีดเส้นวัสดุ เป็นวิธีการฉีดหรือปล่อยวัสดุออกจากหัวฉีดอย่างต่อเนื่องลงบนถาดพิมพ์ โดยฉีดทีละชั้นเพื่อขึ้นเป็นรูปทรงสามมิติ ซึ่งระบบฉีดเส้นวัสดุดังกล่าวนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคโนโลยี คือเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) และเทคโนโลยีการพิมพ์แบบ Direct Ink Writing (DIW)

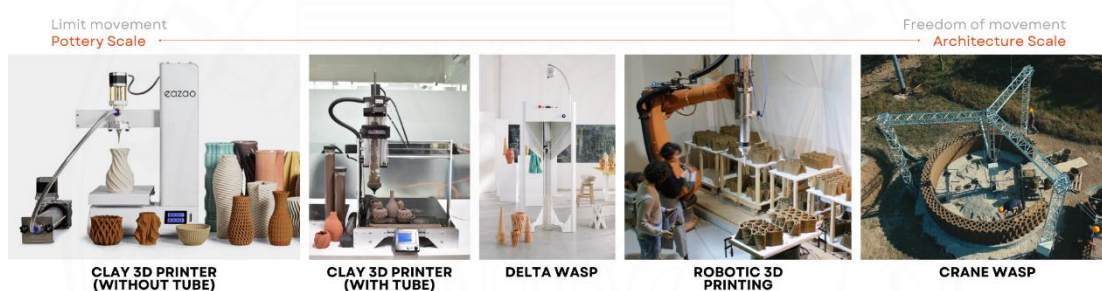
เทคโนโลยีแบบ FDM เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากการใช้งานง่าย ราคาไม่แพง ใช้ได้กับเส้นวัสดุที่ทำจากพลาสติก เทคโนโลยีนี้ทำงานโดยใส่เส้นวัสดุจากนั้นเครื่องจะทำการหลอมละลายเส้นพลาสติกด้วยเครื่องทำความร้อนบริเวณหัวฉีด และฉีดออกมาเป็นวัสดุกึ่งเหลวลงบนฐานพิมพ์ให้เกิดเป็นรูปทรงสามมิติที่ต้องการก่อนที่จะแห้งและแข็งตัว ในขณะที่เทคโนโลยีแบบ DIW จะมีการทำงานเช่นเดียวกับเทคโนโลยีแบบ FDM ที่เป็นการนำวัสดุใส่

และเครื่องจะทำการฉีดออกมาเพื่อขึ้นรูปทรง แต่จะมีความแตกต่างที่เทคโนโลยีแบบ DIW นั้นไม่มีการทำความร้อนเพื่อหลอมละลายวัสดุ แต่เป็นการฉีดวัสดุที่เหลวออกมาโดยตรง ส่งผลให้เทคโนโลยีนี้สามารถใช้ได้กับวัสดุที่ไม่ต้องการความร้อนในการหลอมละลายก่อนพิมพ์ เช่น วัสดุจากฐานชีวภาพ วัสดุจากดินเหนียว รวมถึงวัสดุโพลิเมอร์คอมโพสิตจากดินเหนียวด้วยเช่นกัน ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีวิธีการดันเนื้อวัสดุออกจากกระบอกฉีดทั้งหมด 3 วิธีดังภาพที่ 2.19 วิธีแรกคือระบบนิวเมติกส์ หรือการใช้แรงอัดอากาศในการดันเนื้อวัสดุออกมา เป็นวิธีที่สามารถผลิตอุปกรณ์ง่ายที่สุด เนื่องจากการใช้อุปกรณ์เพียงแค่สายลม ปัมป์ลมและกระบอกฉีดเพื่อส่งแรงอัดเท่านั้น วิธีที่สองคือ กระบอกลูกสูบ มีลักษณะคล้ายกับหลอดฉีดยาที่มีหัวตันภายในกระบอก เคลื่อนที่กดลงโดยใช้แรงดันในการดันเนื้อวัสดุออกมา วิธีต้องมีการใช้ระบบมอเตอร์เพื่อช่วยในการควบคุมตัวตัน และวิธีสุดท้ายคือ การฉีดโดยใช้แรงเหวี่ยงของสกรูในการฉีดเนื้อวัสดุ เป็นวิธีการที่ทำให้เนื้อวัสดุที่ฉีดออกมามีความเสถียรมากที่สุด แต่ก็เป็วิธีการที่ผลิตเครื่องมือได้ยากที่สุดเช่นกัน เนื่องจากต้องมีระบบมอเตอร์ควบคุมสองส่วน โดยแยกเป็นระบบมอเตอร์ควบคุมตัวตันดิน และระบบมอเตอร์ควบคุมสกรู ส่งผลให้มีความซับซ้อนมากขึ้นกว่ากระบอกลูกสูบ หากเปรียบเทียบทั้งสามวิธี วิธีระบบนิวเมติกส์ หรือการใช้แรงอัดอากาศ จึงเป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกในการนำมาใช้ในกระบวนการวิจัย เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว เหมาะสมกับระยะเวลาในการวิจัย



ภาพที่ 2.19 ภาพระบบฉีดวัสดุ (a) เทคโนโลยีการพิมพ์แบบ Fused Deposition Modeling (FDM) (b) เทคโนโลยี Direct Ink Writing (DIW). จาก Printing soft matter in three dimensions. โดย Ryan L. Truby และ Jennifer A. Lewis, 2016.

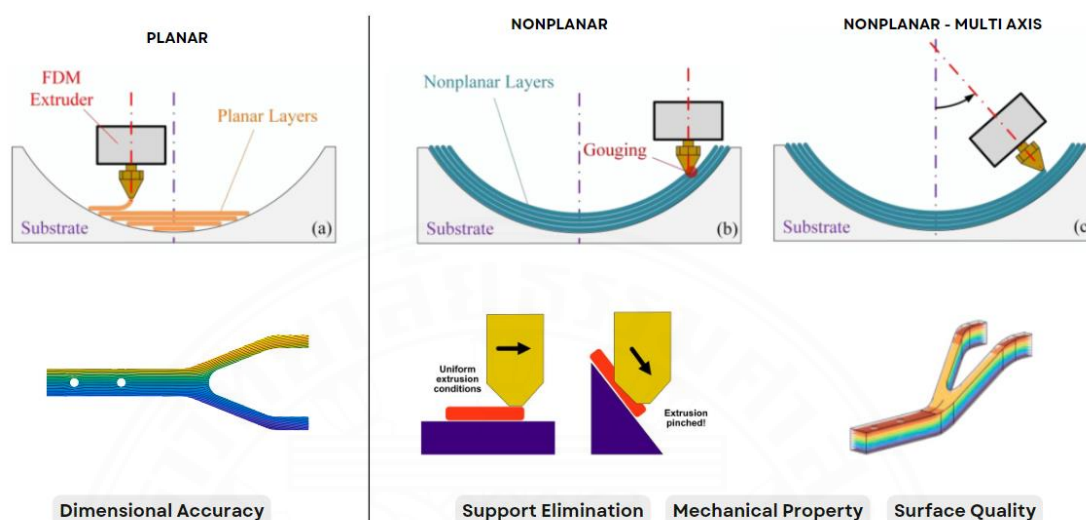
ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเครื่องพิมพ์สามมิติเพิ่มเติมพบว่าการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวสามารถใช้เครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับการพิมพ์ดินเหนียวได้ เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุมีความคล้ายคลึงกัน โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งประเภทเครื่องพิมพ์สามมิติจากดินเหนียวตามขนาดของชิ้นงานหรือผลลัพธ์ และความอิสระของการเคลื่อนที่ในแนวแกน พบว่าในปัจจุบันเครื่องพิมพ์สามมิติวัสดุดินเหนียวที่มีในท้องตลาดมีขนาดตั้งแต่ขนาดเล็กที่ใช้สำหรับการพิมพ์เครื่องปั้น แก้วกัน หรือชิ้นงานขนาดเล็ก เครื่องพิมพ์สามมิติขนาดเฟอร์นิเจอร์ ไปจนถึงเครื่องพิมพ์ในรูปแบบเครื่องขนาดใหญ่ที่สามารถพิมพ์สถาปัตยกรรมได้ทั้งหลังภายในครั้งเดียว แต่หากเปรียบเทียบความอิสระของการเคลื่อนที่พบว่าเครื่องพิมพ์สามมิติที่นิยมส่วนมากจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 3 แกนเท่านั้น ในขณะที่เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้แขนหุ่นยนต์ (Robotic 3D Printing) จะมีความอิสระในการเคลื่อนที่มากที่สุดเนื่องจากสามารถเคลื่อนที่ได้มากถึง 6 แกน สามารถแบ่งประเภทได้ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 ภาพเครื่องพิมพ์สามมิติวัสดุดินเหนียวขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่. สืบค้นจาก <https://www.certifiedenergy.com.au/emerging-materials/emerging-materials-mycelium-brick> เมื่อวันที่ 30 ต.ค. 66.

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อดีของการเคลื่อนที่ 6 แนวแกนพบว่าการพิมพ์สามมิติรูปแบบปกติที่มีการเคลื่อนที่ 3 แนวแกน เรียกว่าการพิมพ์ระนาบเรียบ (Planar) ซึ่งเป็นการพิมพ์ที่มีความแม่นยำสูง ในขณะที่การพิมพ์สามมิติมากกว่า 3 แนวแกนขึ้นไปเรียกว่าการพิมพ์ระนาบไม่เรียบ (Non Planar) (Nayyeri et al., 2022) ซึ่งการพิมพ์ในลักษณะนี้จะมีความอิสระในการขึ้นรูปทรงมากกว่า ลดการพึ่งพาส่วนสนับสนุน (Support) มีคุณภาพพื้นผิวและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Guidetti et al., 2023) เนื่องจากบางรูปทรงที่มีการโค้งเอียง การพิมพ์ระนาบไม่เรียบจะส่งผลให้ทุกชั้นของวัสดุมีความสม่ำเสมอ สามารถกระจายแรงและรับได้เท่ากัน แต่การพิมพ์ระนาบไม่เรียบมีข้อควรระวังคือหากมีการพิมพ์โดยไม่เอียงหัวพิมพ์ตามระนาบเอียงอาจเกิดการหลุดเนื้อวัสดุจากหัวพิมพ์ (Stevenson, 2020) ได้ดังภาพที่ 2.19 การพิมพ์ระนาบไม่เรียบโดยการเอียงหัวจึงมีข้อเสียมากกว่าเล็กน้อยแต่การเอียงหัวดังกล่าวต้องมีการใช้เครื่องมือที่สามารถเคลื่อนที่ได้หลายแกน เช่น แขนหุ่นยนต์ เป็นต้น

รวมทั้งต้องมีการเตรียมไฟล์การเคลื่อนที่แบบระนาบไม่เรียบ ซึ่งมีความซับซ้อนของขั้นตอนการสร้างมากกว่าการพิมพ์ปกติ

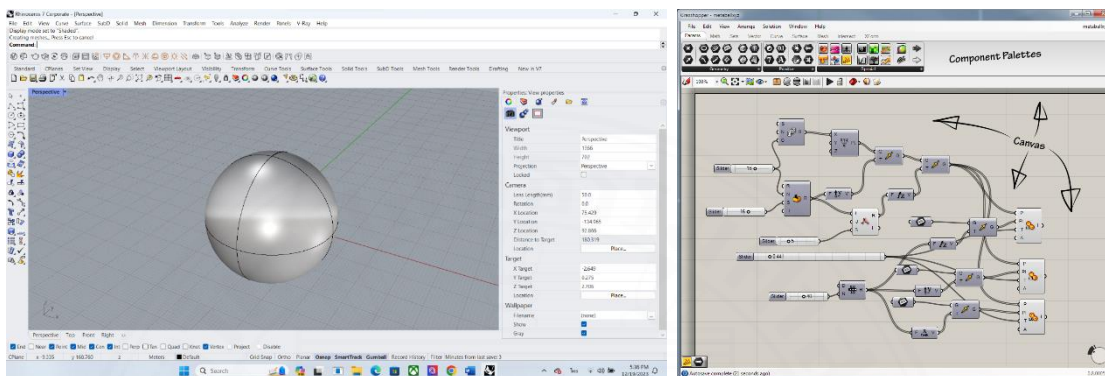


ภาพที่ 2.21 ภาพการพิมพ์ระนาบเรียบและไม่เรียบพร้อมคุณสมบัติของผลลัพธ์. ปรับปรุงโดยผู้วิจัย, 2567.

2.6 การศึกษาส่วนซอฟต์แวร์ (Software)

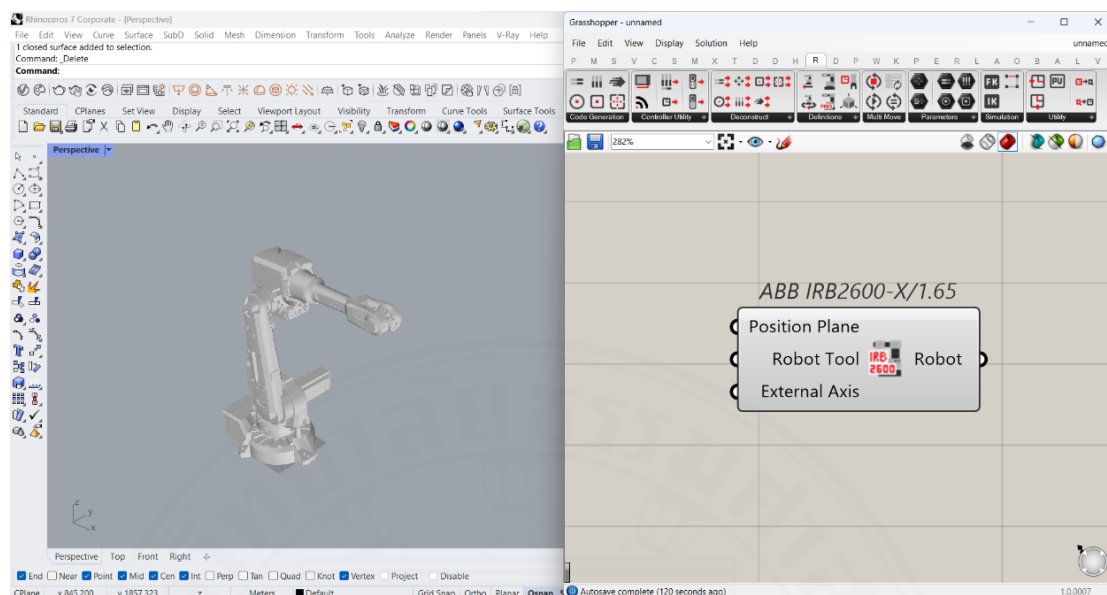
การพิมพ์สามมิตินอกเหนือจากอุปกรณ์เครื่องมือการพิมพ์สามมิติแล้วต้องมีการทำงานในส่วนซอฟต์แวร์ด้วยเช่นกัน ตั้งแต่การขึ้นรูปทรงสามมิติ การแปลงรูปทรงสามมิติดังกล่าวเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ การแปลงเส้นทางการเคลื่อนที่ให้เป็นภาษาในการสั่งการทำงานของแขนหุ่นยนต์ หรือการจำลองค่าต่าง ๆ ของรูปทรงที่ออกแบบ เป็นต้น โดยจากการศึกษาซอฟต์แวร์สำหรับการขึ้นรูปทรงสามมิติในแวดวงสถาปัตยกรรมพบว่ามีหลากหลายซอฟต์แวร์ได้แก่ SketchUp ที่เน้นการสร้างแบบจำลองสถาปัตยกรรม 3 มิติอย่างรวดเร็ว Revit Architecture ที่เน้นการสร้างและจัดการข้อมูลสถาปัตยกรรมแบบ BIM เพื่อการทำงานที่เป็นระบบ หรือ Rhinoceros 3D ที่ใช้สำหรับการออกแบบที่ซับซ้อนและการสร้างแบบจำลองที่มีความยืดหยุ่นสูง และอื่น ๆ ซึ่งแต่ละซอฟต์แวร์มีจุดเด่นแตกต่างกันไป แต่ซอฟต์แวร์ Rhinoceros 3D มีคุณสมบัติที่โดดเด่นในการสร้างรูปทรงอิสระหรือรูปทรงที่มีความซับซ้อนได้โดยง่าย เนื่องจากมีชุดเครื่องมือหรือคำสั่งที่หลากหลายให้เลือกใช้จำนวนมาก นอกจากนี้ ซอฟต์แวร์ Rhinoceros 3D มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีส่วนเสริมต่าง ๆ ที่ช่วยในการทำงานจำนวนมาก เช่น ส่วนเสริม Grasshopper ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยใน

กระบวนการออกแบบโดยการเชื่อมโยงข้อมูลและสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการจัดการข้อมูลดังกล่าว ปรับแต่งรูปทรงได้อย่างอิสระในระยะเวลาที่รวดเร็ว ช่วยให้นักออกแบบสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติเชิงพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรม รวมถึงมีปลั๊กอิน Robot Components ซึ่งเป็นส่วนเสริมรองรับการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์หรือปลั๊กอินสำหรับการจำลองอื่น ๆ เช่น Karamba3D Ladybug เป็นต้น



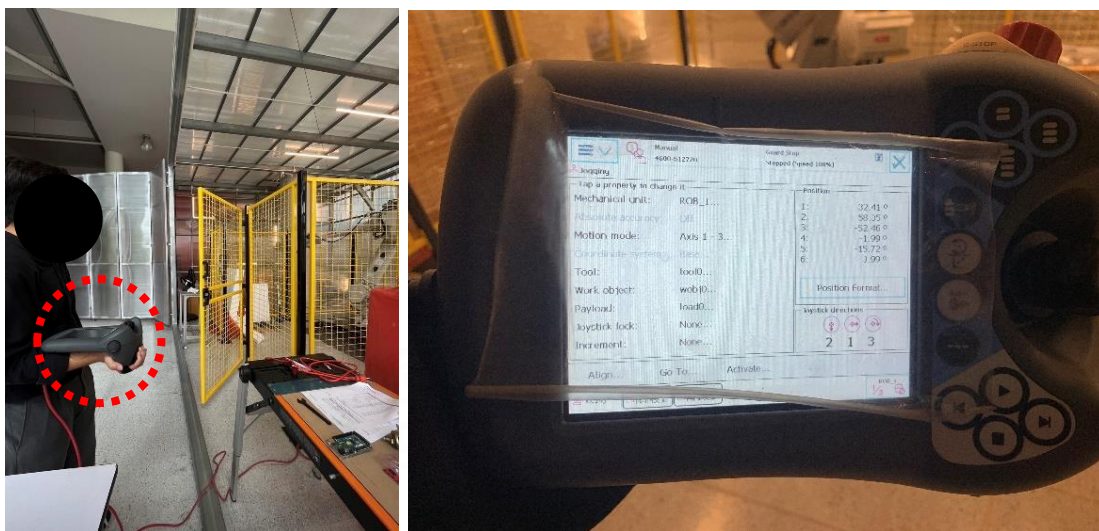
ภาพที่ 2.22 ภาพหน้าต่างซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 และส่วนเสริม Grasshopper. โดย ผู้วิจัย. 2566.

นอกจากซอฟต์แวร์ในการขึ้นรูปทรงสามมิติแล้วต้องมีการใช้ปลั๊กอินเพิ่มเติมในการแปลงข้อมูลรูปทรงสามมิติดังกล่าวเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับการควบคุมแขนหุ่นยนต์ ซึ่งปลั๊กอินดังกล่าวคือ Robot Components ที่ถูกพัฒนาภายใน Grasshopper โดย ABB เป็นส่วนเสริมที่ช่วยในการจำลองและควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ภายใน Rhinoceros 3D และ Grasshopper โดยไม่ต้องใช้ซอฟต์แวร์เพิ่มเติม Robot Components ช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างหลากหลายและมีความรวดเร็ว เช่น การสร้างเส้นทางที่หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่เพื่อทำงานกับวัตถุหรือพื้นผิวตามที่กำหนด การจำลองการเคลื่อนที่เพื่อตรวจสอบระยะเวลาการหมุนของแต่ละแกนของหุ่นยนต์ และสามารถแปลงข้อมูลสามมิติจาก Rhinoceros 3D เป็นภาษา RAPID ได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านแผงควบคุมหุ่นยนต์ในการผลิตจริง



ภาพที่ 2.23 ภาพหน้าต่างของส่วนเสริม Robot Component ระหว่างทำงานควบคู่กับ Rhinoceros 3D และ Grasshopper. โดย ผู้วิจัย. 2566.

การทำงานร่วมกับแขนหุ่นยนต์ ต้องใช้ภาษา RAPID ในการควบคุม ดังนั้นเมื่อทำการออกแบบรูปทรงบนซอฟต์แวร์ Rhinoceros 3D และแปลงข้อมูลดังกล่าวเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้ส่วนเสริม Grasshopper และปลั๊กอิน Robot Component จะต้องมีการนำออกไฟล์ข้อมูลภาษา RAPID โดยมี 2 ส่วนคือ ข้อมูลโปรแกรม (Program) การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ และข้อมูลระบบ (System) ซึ่งมีข้อมูลชื่อเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และจุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์ ก่อนนำไฟล์ข้อมูลภาษา RAPID ดังกล่าวนำเข้าแผงควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์เพื่อใช้ทำงานจริง ดังภาพ 2.24



ภาพที่ 2.24 ภาพหน้าจอของ ABB Pendant ที่ใช้ในการส่งข้อมูล RAPID เพื่อควบคุมแขนหุ่นยนต์.
โดย ผู้วิจัย. 2566.

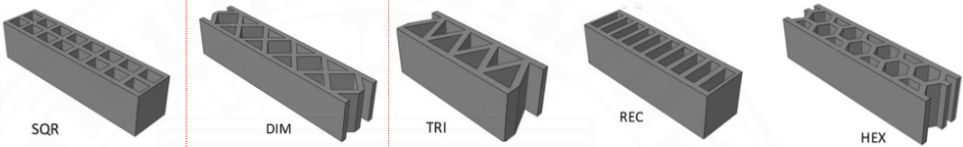
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้มีการคำนึงถึงสิ่งที่ควรจำลองบนซอฟต์แวร์เพื่อช่วยลดข้อผิดพลาดในการทำงาน ยืนยันความปลอดภัย หรือการจำลองบริบทโดยรอบ จึงได้มีการศึกษาปลั๊กอินเพิ่มเติม ได้แก่ ปลั๊กอิน Ladybug สำหรับการจำลองการวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์จากบริบททางพื้นที่โดยรอบเพื่อออกแบบรูปทรงที่มีความเหมาะสม ตอบสนองเฉพาะเจาะจงต่อพื้นที่นั้น ๆ และปลั๊กอิน Karamba3D ที่ใช้ในการจำลองแรงที่กระทำต่อรูปทรงที่ออกแบบ เพื่อคำนวณความเหมาะสมปลอดภัยของรูปทรงที่ออกแบบ ซึ่งในการจำลองดังกล่าวต้องมีการศึกษาค่าที่ใช้ในการจำลองบนซอฟต์แวร์ เช่น ค่าความเครียดการอัดที่ยอมรับได้ ใช้ในการออกแบบเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างจะไม่เกิดความเสียหายเมื่อถูกแรงอัด โดยคำนวณจากค่าความแข็งแรงในการอัดของวัสดุหารด้วยค่าปัจจัยความปลอดภัย (FoS)

$$\text{Allowable Compressive Stress} = \frac{\text{Compressive Strength}}{\text{Factor of Safety (FoS)}}$$

ภาพที่ 2.25 สูตรการคำนวณความเครียดการอัดที่ยอมรับได้. สืบค้นจาก <https://matmatch.com/learn/property/basic-stress-analysis-calculations> เมื่อวันที่ 30 พ.ค. 67.

2.7 การศึกษารูปทรงสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

นอกเหนือจากการศึกษาส่วนของอุปกรณ์และส่วนของซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้มีการศึกษาในส่วนของรูปทรงสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตดังกล่าวพบว่ารูปทรงของส่วนเติมเต็มข้าวหลามตัดมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาและศึกษาต่อ เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง ใช้ระยะเวลาและปริมาณวัสดุในการพิมพ์แต่ละชิ้นจำนวนไม่มาก รวมถึงมีค่าการนำความร้อนอยู่ในระดับที่ดีเมื่อเทียบกับรูปทรงแบบอื่น ๆ (Arceo, 2016; Kananathan at el., 2022; Alzahrani at el., 2022)



	SQR	DIM	TRI	REC	HEX
Strength	High	High	Medium	Low	High
Printing time	Medium	Medium ดีกว่า Honeycomb 30%	Fast	Fast	Slow
Material use	High	Medium	Low	Low	High
Thermal Conductivity (W/m.K)	0.131	0.122	0.146	0.170	0.130

ภาพที่ 2.26 คุณสมบัติของส่วนเติมเต็มรูปแบบต่าง ๆ. ปรับปรุงโดยผู้วิจัย. 2566.

การเลือกใช้ขนาดของหัวพิมพ์และระยะห่างระหว่างชั้นในการพิมพ์ก็มีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากหากระยะห่างระหว่างชั้นสูงเกินไปเมื่อเทียบกับขนาดของหัวพิมพ์ ดินเหนียวจะไม่รวมกันได้ ในขณะที่ระยะห่างระหว่างชั้นที่น้อยเกินไปอาจเกิดความเสี่ยงที่วัสดุชั้นซ้อนทับกัน ซึ่งอาจส่งผลให้หัวพิมพ์ตันหรือทำให้งานที่พิมพ์เสียได้ โดยค่าเฉลี่ยที่เหมาะสมพบวาระยะห่างระหว่างชั้นไม่ควรน้อยกว่าระยะครึ่งหนึ่งของขนาดหัวพิมพ์ (UNSW Making)

จากงานวิจัย Terraperforma ค้นพบค่าที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุดินเหนียว ได้แก่ เส้นเดี่ยวไม่ควรยาวเกิน 10 เซนติเมตร ต้องมีเส้นตัดเพื่อลดความเสี่ยงในการล้ม โดยจุดตัดดังกล่าวควรมีการซ้อนทับกันประมาณ 3.5 มิลลิเมตร. เพื่อช่วยลดการหดตัว การพิมพ์ระนาบตรงกันไม่ควรสูงมากเกินไปอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงการโก่งเดาะของชิ้นงาน และควรมีการออกแบบข้อต่อที่เหมาะสมเพื่อรองรับการประกอบติดตั้งชิ้นงาน ดังภาพที่ 2.27 ผู้วิจัยจึงได้ศึกษากรณีตัวอย่าง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 รูปแบบงานวิจัย

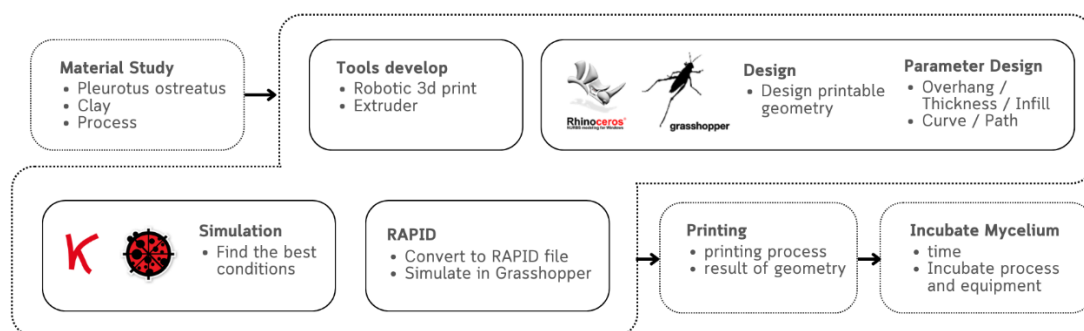
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ด้วยวัสดุไมซีเลียมมาใช้ในการสถาปัตยกรรม ในลักษณะวิจัยและพัฒนาเพื่อศึกษาหากระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีความเหมาะสมในการสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบและพัฒนารูปทรงสามมิติเพื่อการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์
2. ทดลองผลิตชิ้นงานโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมด้วยแขนหุ่นยนต์
3. ประเมินผลิตผลจากการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์
4. เสนอแนวทางในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียม โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

3.3 ขั้นตอนการศึกษาทดลอง

ขั้นตอนการศึกษาทดลองสามารถแบ่งได้เป็นการศึกษาและทดลองวัสดุ การศึกษาและพัฒนาเครื่องมือในงานวิจัย การทดลองผลิตชิ้นงาน และการบ่มเพาะเชื้อไมซีเลียมหลังการพิมพ์ แสดงขั้นตอนได้ดังภาพ



ภาพที่ 3.1 ภาพขั้นตอนการศึกษาทดลอง. โดย ผู้วิจัย, 2567.

โดยสามารถสรุปการทดลองได้ทั้งหมด 6 ครั้ง ได้แก่

1. การทดลองขั้นต้น การทดลองพิมพ์ชิ้นงานรูปทรงพื้นฐาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องพิมพ์สามมิติ
2. การทดลองนั่งฆ่าเชื้อ โดยใช้หัวเชื้อไมซีเลียม 1 ประเภทและดินเหนียวผสม 1 สัดส่วน แบ่งเป็นนั่งฆ่าเชื้อและไม่นั่งฆ่าเชื้อ เพื่อวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 1 ครั้งเมื่อครบ 1 สัปดาห์
3. การทดลองใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียม โดยใช้หัวเชื้อเห็ดที่ใส่เพิ่มเติมทีหลัง 2 ประเภทได้แก่ ก้อนเชื้อเห็ดและเชื้อเห็ดโตเต็มที่ ดินเหนียวผสม 1 สัดส่วน ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อ เพื่อวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 1 ครั้งเมื่อครบ 1 สัปดาห์
4. การทดลองวัดค่าการโค้งงอของรูปทรงที่ออกแบบก่อนการพิมพ์ โดยการจำลองภายในซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 และ Grasshopper เพื่อวัดประสิทธิภาพก่อนการพิมพ์ชิ้นงาน
5. การทดลองผลิตชิ้นงานเพื่อศึกษาผลลัพธ์การพิมพ์จากการใช้หัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภท โดยใช้หัวเชื้อไมซีเลียม 3 ประเภท ได้แก่ หัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง และหัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างป่น ดินเหนียวผสม 1 สัดส่วน ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อ เพื่อวัดประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน
6. การทดลองใช้หัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภทในการผลิต โดยใช้หัวเชื้อไมซีเลียมในการผสมดินเหนียว 3 ประเภท ได้แก่ หัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง และหัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างป่น และใช้หัวเชื้อเห็ดที่ใส่เพิ่มเติมทีหลัง 2 ประเภทได้แก่ ก้อนเชื้อเห็ดและเชื้อเห็ดโตเต็มที่ ดินเหนียวผสม 1 สัดส่วน ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อ เพื่อวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 3 ครั้ง ได้แก่ 1 วัน 1 สัปดาห์ และ 2 สัปดาห์

3.4 การศึกษาและทดลองวัสดุ

การศึกษาและทดลองส่วนวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต เพื่อเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมต่อการวิจัย โดยทำการศึกษาประเภทเชื้อไมซีเลียม ประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต และทดลองพิมพ์สามมิติโดยใช้วัสดุดินเหนียวผสมเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภท

3.4.1 ประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตมีหลากหลายประเภท โดยขึ้นอยู่กับวัสดุเพาะ งานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตออกเป็นทั้งหมด 2 ประเภทตามประเภทของวัสดุเพาะ ได้แก่ วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเหลือการเกษตร และวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากวัสดุดินเหนียว โดยวัสดุทั้งสองประเภท สามารถประเมินศักยภาพในการพิมพ์สามมิติได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1

เปรียบเทียบศักยภาพประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในการงานวิจัย

ประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต	วัสดุเพาะ	กระบวนการขึ้นรูป	ความสามารถในการพิมพ์	ข้อดี	ข้อเสีย
 จากของเหลือการเกษตร	- เชื้อเลี้ยง - ฟาง - กากกาแฟ - ดินร่วน - อื่นๆ	- แม่พิมพ์	✗	หาวัสดุได้ง่าย ราคาไม่แพง ไมซีเลียมเติบโตได้ดี	ต้องหาวัสดุเชื่อมเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถพิมพ์สามมิติได้
 จากดินเหนียว	- ดินเหนียว	- แม่พิมพ์ - พิมพ์สามมิติ	✓	หาวัสดุได้ง่าย ราคาไม่แพง ผลิตภัณฑ์มีความเฉพาะ ปรับแต่งเหมาะกับพื้นที่นั้นๆได้	ต้องศึกษาและพัฒนาวัสดุเหมาะสมต่อการพิมพ์สามมิติและอุปกรณ์มีความซับซ้อนมากกว่าการขึ้นแม่พิมพ์

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

จากตารางข้างต้นพบว่าวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตทั้งสองแบบสามารถหาวัสดุได้ง่าย ราคาไม่แพง แต่วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียวมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิจัย เนื่องจากเนื้อวัสดุมีความแข็งแรงจากการใช้ดินเหนียวเป็นวัสดุเชื่อมส่งผลให้มีความสามารถในการพิมพ์สามมิติ ซึ่งการผลิตด้วยการพิมพ์สามมิตินั้นสามารถผลิตรูปทรงที่มีความเฉพาะตัว ปรับแต่งให้มีความเหมาะสมเฉพาะเจาะจงกับบริบทพื้นที่นั้นๆ ได้ ในขณะที่วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเหลือการเกษตร มีเนื้อวัสดุเป็นผง กาก หรือเกล็ด จึงไม่มีคุณสมบัติในการการพิมพ์สามมิติ ถึงแม้จะนำวัสดุดังกล่าวผสมรวมกับน้ำก็ตาม หากต้องการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากของเหลือการเกษตรต้องมีการศึกษาวัสดุเชื่อมอื่นเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาให้มีความสามารถในการพิมพ์สามมิติ

3.4.2 ประเภทเชื้อไมซีเลียม

จากการทบทวนวรรณกรรมและสอบถามผู้เชี่ยวชาญพบว่าประเภทเชื้อไมซีเลียมสามารถแบ่งได้ตามช่วงระยะการเติบโตตั้งแต่ หัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA ซึ่งเป็นหัวเชื้อตั้งต้นที่ได้จากเชื้อเห็ด หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง ก้อนเชื้อเห็ด และเชื้อเห็ดโตเต็มที่แห้งแล้ว โดยผู้วิจัยได้นำเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภทผสมรวมกับดินเหนียวเพื่อดูผลลัพธ์ของวัสดุ ดังภาพ



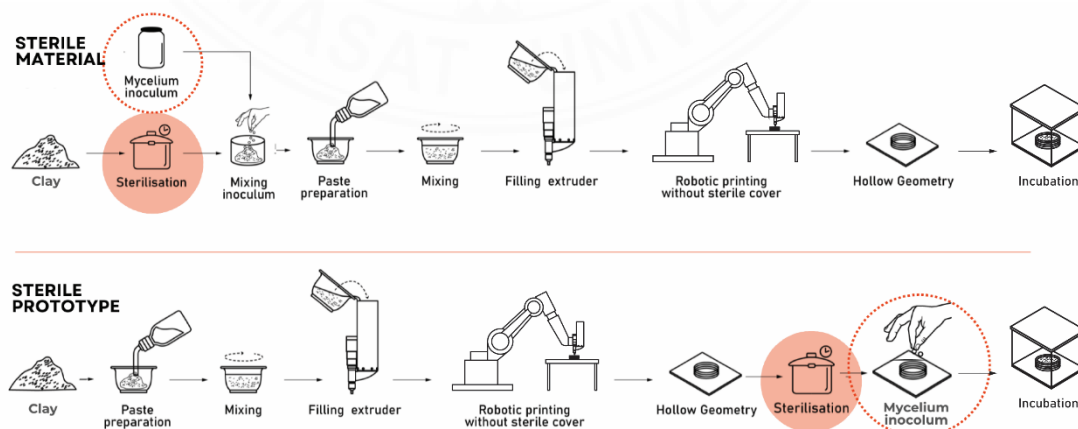
ภาพที่ 3.2 ภาพ (A) หัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA ผสมรวมกับดินเหนียว. ภาพ (B) หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างผสมรวมกับดินเหนียว. ภาพ (C) ก้อนเชื้อเห็ดปั้นผงผสมรวมกับดินเหนียว. ภาพ (D) เชื้อเห็ดโตเต็มที่ปั้นผงผสมรวมกับดินเหนียว. โดย ผู้วิจัย, 2566.

พบว่าหัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA เมื่อผสมรวมกับดินเหนียว วัสดุรวมเป็นเนื้อเดียวกัน เนียนละเอียดเหมือนดินเหนียวทั่วไป โดยใช้สัดส่วนดินเหนียว 1 กิโลกรัม ต่อหัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA 1 งานเพาะเชื้อพลาสติกขนาด 90x15 มิลลิเมตร หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างเมื่อผสมรวมกับดินเหนียว เนื้อวัสดุไม่เนียนละเอียด มีความขรุขระจากเมล็ดข้าวฟ่างที่ใส่ลงในดินเหนียว โดยใช้สัดส่วนดินเหนียว 1 กิโลกรัม ต่อหัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง 100 กรัม และระหว่างผสมต้องผสมอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เมล็ดข้าวฟ่างกระจุกตัวเกินไป ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพการพิมพ์ภายหลัง ก้อนเชื้อเห็ดและเชื้อเห็ดโตเต็มที่ก่อนการผสมต้องนำไปปั่นเป็นผงก่อน เนื่องจากก้อนเชื้อเห็ดและเชื้อเห็ดโตเต็มที่มักมีลักษณะเป็นก้อนขนาดใหญ่เกินไป หลังจากปั่นเป็นผงจึงนำมาผสมกับดินเหนียว พบว่า

ทั้งสองแบบมีเนื้อวัสดุที่คล้ายคลึงกัน โดยเนื้อวัสดุจะมีความละเอียดมากน้อยขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเชื้อเห็ดและดินเหนียว หากผสมก้อนเชื้อเห็ดหรือเชื้อเห็ดโตเต็มที่มากขึ้น เนื้อวัสดุจะมีความละเอียดน้อยลง เกิดความขรุขระจากปริมาณผงก้อนเชื้อเห็ดหรือเชื้อเห็ดโตเต็มที่ งานวิจัยนี้ใช้เพียงสัดส่วนเดียวในการศึกษาคือ ดินเหนียว 1 กิโลกรัม ต่อผงเชื้อเห็ด 500 กรัม ในอนาคตควรต้องมีการศึกษาสัดส่วนของวัสดุแต่ละรูปแบบเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดต่อไป โดยทุกประเภทต้องมีการผสมน้ำสะอาด 300 มิลลิลิตร ระหว่างผสมน้ำจะต้องควบคุมอุณหภูมิวัสดุจนกว่าเนื้อดินเหลว ไม่จับตัวเป็นก้อน เนื่องจากความเหลวของวัสดุส่งผลต่อคุณภาพการพิมพ์สามมิติเป็นอย่างมาก หากเนื้อดินไม่ละเอียดมากพอ ระหว่างการพิมพ์อาจส่งผลให้มีก้อนดินอุดตันหัวพิมพ์ ทำให้ฉีดเนื้อวัสดุไม่ออก ส่งผลให้เส้นชิ้นงานขาด ไม่ต่อเนื่องได้

3.4.3 ขั้นตอนการฆ่าเชื้อ

วัสดุไมซีเลียมเป็นสิ่งมีชีวิตที่ค่อนข้างอ่อนไหวต่อเชื้อโรคและสิ่งสกปรกภายนอก กระบวนการผลิต อุปกรณ์ต่างๆ จึงต้องมีการคำนึงถึงความสะดวก รวมถึงวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุเพาะด้วยเช่นกัน ดังนั้นดินเหนียวที่นำมาใช้ผลิตจึงควรผ่านการฆ่าเชื้อเพื่อให้วัสดุมีความสะอาด ปราศจากเชื้อโรคและสิ่งสกปรกที่อาจส่งผลให้ไมซีเลียมติดเชื้อได้ ซึ่งการฆ่าเชื้อสามารถทำได้หลายวิธี จากการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การฆ่าเชื้อรูปแบบ สเตอริไลซ์ (Sterilization) ซึ่งเป็นกระบวนการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อโรคและยับยั้งการเน่าเสียจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำลายสปอร์ของแบคทีเรีย ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2-3 ชั่วโมง โดยอ้างอิงจากกระบวนการนึ่งฆ่าเชื้อก้อนเชื้อเห็ดของเกษตรกรปลูกเห็ด นอกจากนี้เมื่อทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อสองแบบ ได้แก่ การนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงาน และการผลิตชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปนึ่งฆ่าเชื้อ สามารถแสดงกระบวนการผลิตได้ดังภาพ



ภาพที่ 3.3 ภาพลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงานและการผลิตชิ้นงานก่อนนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ. โดย ผู้วิจัย, 2566.

จากภาพลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิต การนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงาน มีกระบวนการนำวัสดุดินเหนียวไปนึ่งฆ่าเชื้อก่อนนำมาผสมเชื้อไมซีเลียม นำไปบรรจุลงเครื่องพิมพ์สามมิติ พิมพ์ชิ้นงาน และเก็บชิ้นงานเพื่อบ่มไมซีเลียม จากการนึ่งฆ่าเชื้อเพียงแค่วัสดุส่งผลให้อุปกรณ์ที่ใช้ฆ่าเชื้อ ไม่จำเป็นต้องมีขนาดใหญ่หรือเป็นเครื่องฆ่าเชื้อก่อนเห็ดเฉพาะทางที่มีราคาแพง แต่การฆ่าเชื้อวัสดุก่อนพิมพ์ ส่งผลให้กระบวนการหลังการนึ่งฆ่าเชื้อต้องมีการควบคุมความสะอาดของอุปกรณ์และพื้นที่ ไม่เช่นนั้นวัสดุ อาจมีเชื้อโรคเข้าไปปนเปื้อนได้ส่งผลให้วัสดุมีความเสี่ยงในการติดเชื้อแม้ว่าผ่านการฆ่าเชื้อมาแล้วนั่นเอง ในขณะที่การผลิตชิ้นงานก่อนนำชิ้นงานไปนึ่งฆ่าเชื้อ มีกระบวนการเตรียมวัสดุดินเหนียวที่ไม่ได้ผ่านการ ฆ่าเชื้อบรรจุลงเครื่องพิมพ์สามมิติ พิมพ์ชิ้นงาน นำชิ้นงานดังกล่าวไปนึ่งฆ่าเชื้อ ก่อนนำเชื้อไมซีเลียมมาใส่ ภายหลังและบ่มไมซีเลียม วิธีการนี้ส่งผลให้ระหว่างการผลิตไม่ต้องกังวลเรื่องความสะอาดของพื้นที่มากนัก เนื่องจากชิ้นงานที่ผลิตจะถูกนำไปฆ่าเชื้อภายหลัง แต่วิธีการนี้ไม่สามารถใส่เชื้อไมซีเลียมก่อนการพิมพ์ชิ้นงาน ได้เนื่องจากหากใส่เชื้อไมซีเลียมก่อนนำมาผ่านการฆ่าเชื้อรูปแบบสเตอริไลซ์ เชื้อไมซีเลียมจะถูกความร้อน ทำลายสปอร์อาจส่งผลให้ไมซีเลียมไม่เติบโต แสดงให้เห็นว่าลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุทั้งสองแบบ มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2

เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของลำดับขั้นตอนในการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุเพื่อใช้ในงานวิจัย

ลำดับขั้นตอน	ข้อดี	ข้อเสีย
นึ่งฆ่าเชื้อวัสดุ ก่อนนำไปผลิต ชิ้นงาน	- นึ่งฆ่าเชื้อเพียงแค่วัสดุดินเหนียว - สามารถทำได้ง่าย - สามารถใช้อุปกรณ์ขนาดเล็ก ราคาไม่แพง - ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดการพิมพ์ชิ้นงานจากปัจจัยอุปกรณ์การนึ่ง	- มีโอกาสในการติดเชื้อสูงกว่าอีกวิธีในระหว่างการพิมพ์ อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการติดเชื้อราล้ม - ต้องควบคุมความสะอาดของอุปกรณ์และพื้นที่มากกว่าปกติ
ผลิตชิ้นงาน ก่อนนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ	- โอกาสในการติดเชือน้อยกว่าอีกวิธี เนื่องจากนึ่งฆ่าเชื้อหลังจากพิมพ์ชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว	- หากพิมพ์ชิ้นงานขนาดใหญ่ต้องใช้อุปกรณ์นึ่งเฉพาะทาง ขนาดใหญ่มีราคาสูง - ต้องมีการคำนึงถึงการขนส่งไปสถานที่นึ่ง - ไม่สามารถพิมพ์วัสดุดินเหนียวผสมไมซีเลียมได้ ต้องพิมพ์เพียงแค่ดินเหนียวเท่านั้น หากผสมไมซีเลียมลงไปและนำไปนึ่ง ไมซีเลียมจะหยุดการเติบโต

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

จากตารางข้างต้นสรุปได้ว่าลำดับขั้นตอนการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงาน มีความเหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิจัย ถึงแม้วิธีการนี้จะมีโอกาสในการติดเชื้อสูงกว่าการผลิตชิ้นงานก่อนนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ แต่เป็นวิธีที่สามารถพิมพ์วัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตได้ รวมทั้งยังเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและราคาไม่แพง

3.4.4 ขั้นตอนการบ่มเพาะเชื้อไม่ซีเลียมหลังการพิมพ์

หลังจากพิมพ์ชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใส่เชื้อไม่ซีเลียมเพิ่มเติมเพื่อดูผลลัพธ์ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไม่ซีเลียมได้มากน้อยเพียงใด โดยนำก้อนเชื้อเห็ดป่นผง และเชื้อเห็ดโตเต็มที่ป่นผงมาใส่ภายในบางส่วน of ชิ้นงาน หลังจากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวเก็บภายในกล่องพลาสติก โม่โดนแสงแดดเพื่อบ่มเพาะให้เชื้อไม่ซีเลียมเติบโต อุณหภูมิประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส ความชื้นประมาณ 50-70% ให้อากาศถ่ายเทได้เล็กน้อย เนื่องจากชิ้นงานมีส่วนผสมวัสดุดินเหนียว มีความชื้น คายน้ำตลอดเวลา หากปิดกล่องสนิทจะส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความชื้นมากเกินไป เสี่ยงต่อการติดเชื้อราเขียว และใช้ระยะเวลาประมาณ 1-2 อาทิตย์ ก่อนนำชิ้นงานออกมาประกอบติดตั้ง

3.5 การศึกษาและพัฒนาส่วนอุปกรณ์ (Hardware)

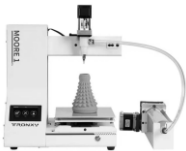
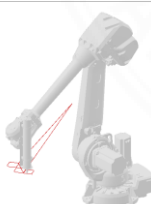
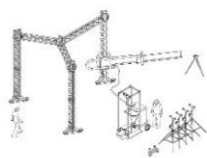
งานวิจัยนี้มีการศึกษาประเภทเครื่องมือพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิต และระบบการพิมพ์สามมิติเพื่อนำข้อมูลมาพัฒนาเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติสำหรับใช้ในงานวิจัย

3.5.1 เครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิต

ในปัจจุบันนี้ไม่มีเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตเฉพาะทาง แต่สามารถใช้เครื่องพิมพ์สามมิติวัสดุดินเหนียวทดแทนได้ เนื่องจากคุณลักษณะของวัสดุดินเหนียว และวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตภายในงานวิจัยนี้มีความคล้ายคลึงกัน จากการทบทวนวรรณกรรมเพื่อศึกษาเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตที่มีในปัจจุบันพบว่าสามารถแบ่งเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุดินเหนียวได้ตามขนาดชิ้นงานที่เครื่องสามารถผลิตได้ โดยผู้วิจัยได้ประเมินศักยภาพของเครื่องมือแต่ละประเภทเพื่อเลือกใช้งานวิจัย สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3

เปรียบเทียบศักยภาพเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตเพื่อใช้ในงานวิจัย

ประเภทเครื่องพิมพ์	ขนาดผลลัพธ์ ชิ้นงาน	จำนวนแกนการ เคลื่อนที่	ซอฟต์แวร์
 Clay 3D printer without tube	Pottery scale	3 แกน	- Ultimaker Cura - Simplify3D
 Clay 3D printer with tube	Pottery scale	3 แกน	- Ultimaker Cura - Simplify3D
 Delta WASP	Furniture scale	3 แกน	- Ultimaker Cura - Simplify3D - Wasp app
 Robotic 3d printing	Architecture scale	6 แกน	- Robot Studio - Robot component / Grasshopper - Kuka sim
 Crane WASP	Architecture scale	3 แกน	- Simplify3D - Wasp app

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

ตารางข้างต้นสรุปได้ว่าเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ (Robotic 3D Printing) เป็นเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้งานวิจัย เนื่องจากมีความสามารถในการพิมพ์ชิ้นงานในขนาดงานสถาปัตยกรรม ถึงแม้ว่า เครื่องพิมพ์สามมิตินั้นสามารถพิมพ์ชิ้นงานในขนาดงานสถาปัตยกรรมได้เช่นเดียวกันกับเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ แต่เนื่องจากเครื่องมือมีความเฉพาะทาง ขนาดใหญ่ และมีราคาค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวิจัยนี้ รวมทั้งเครื่องมือสำหรับการพิมพ์ประเภทอื่นๆ ที่มีระบบ การพิมพ์สำเร็จรูป แต่ไม่สามารถพิมพ์ชิ้นงานในขนาดใหญ่เกินขนาดเฟอร์นิเจอร์ได้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานวิจัยนี้เช่นกัน อีกทั้งเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์มีจำนวนแกนในการเคลื่อนที่มากที่สุดถึง 6 แกน ส่งผลให้มีความอิสระในการเคลื่อนไหวกว่าเครื่องมืออื่นๆ ตอบสนองต่อการพิมพ์รูปทรงชิ้นงานที่หลากหลายมากขึ้น มีซอฟต์แวร์หลากหลายในการรองรับการเขียนคำสั่งและควบคุม แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีแหล่งข้อมูลประกอบในการศึกษาจำนวนมาก แต่เนื่องจากเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ต้องมีการสั่งซื้อหรือผลิตระบบพิมพ์สามมิติก่อนนำมาติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์ที่เป็นเพียงเครื่องมือในการควบคุมการเคลื่อนที่ ผู้วิจัยจึงต้องมีการศึกษาระบบการพิมพ์สามมิติเพื่อนำข้อมูลมาใช้ประกอบการผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

3.5.2 ระบบการพิมพ์สามมิติ

การทบทวนวรรณกรรมเพื่อศึกษาระบบการพิมพ์สามมิติในปัจจุบันพบว่าระบบการพิมพ์สามมิติสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่ ระบบนิวเมติกส์หรือการใช้แรงอัดอากาศ ระบบกระบอกลูกสูบ และการฉีดโดยใช้แรงเฉือนของสกรู โดยสามารถประเมินศักยภาพของเครื่องมือแต่ละประเภทเพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมต่อการวิจัย สามารถสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4

เปรียบเทียบศักยภาพระบบในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตเพื่อใช้งานวิจัย

ระบบการพิมพ์	แรง	ความเสถียร	ความซับซ้อนของเครื่องมือ	ชิ้นส่วนเครื่องมือ
 ระบบนิวเมติกส์	แรงดัน	ปานกลาง	น้อย	- กระบอก - ปัมป์

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

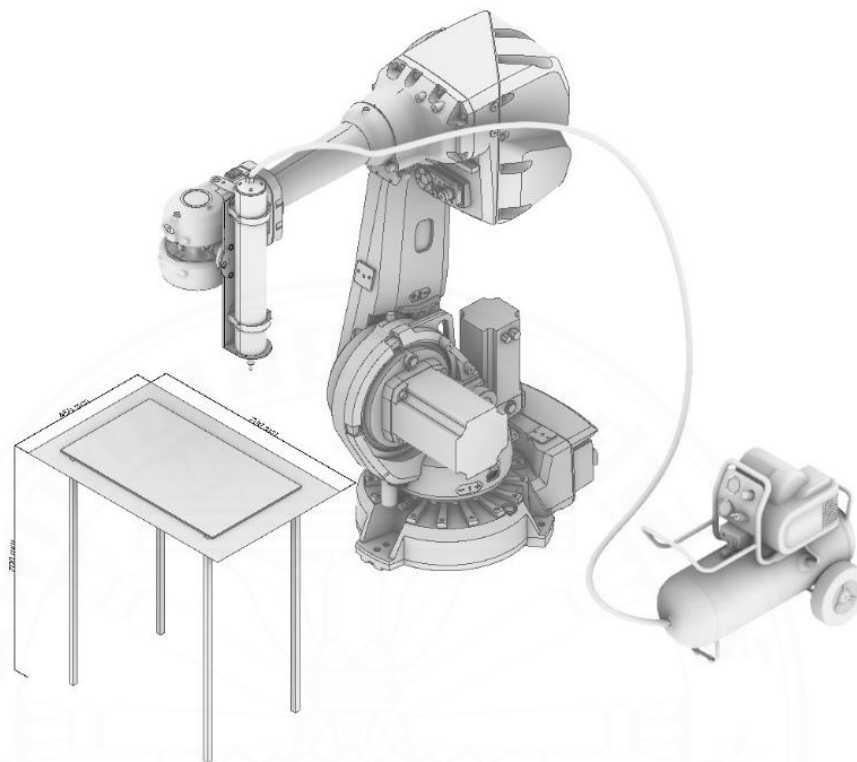
เปรียบเทียบศักยภาพระบบในการพิมพ์สามมิติวัสดุไม่ซีเลียมคอมโพสิตเพื่อใช้ในงานวิจัย

ระบบการพิมพ์	แรง	ความเสถียร	ความซับซ้อนของเครื่องมือ	ชิ้นส่วนเครื่องมือ
 ระบบกระบอก ลูกสูบ	แรงกด	ปานกลาง	ปานกลาง	- กระบอก - Stepper motor - Plunger
 การฉีดโดยใช้แรง ฉีดของสกรู	แรงเหวี่ยง	มาก	มาก	- กระบอก - Stepper motor - Plunger - Screw motor

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

ตารางข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าระบบการฉีดโดยใช้แรงเหวี่ยงของสกรูมีความเสถียรมากที่สุด แต่เป็นระบบที่มีความซับซ้อนในการผลิตมากที่สุดด้วยเช่นกันเนื่องจากต้องมีการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ 2 ตัว ในขณะที่ระบบกระบอกลูกสูบที่มีการใช้มอเตอร์ 1 ตัว และระบบนิวเมติกส์ไม่มีการใช้มอเตอร์เนื่องจากใช้แรงดันโดยตรงจากปั๊มลม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ระบบนิวเมติกส์ในการพัฒนาเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ โดยพิจารณาจากความเหมาะสมในการพัฒนาเครื่องมือต่อระยะเวลาการวิจัย ถึงแม้ระบบนิวเมติกส์มีความเสถียรการพิมพ์อยู่ในระดับปานกลาง แต่ความซับซ้อนของเครื่องมืออยู่ในระดับน้อย ใช้ชิ้นส่วนจำนวนไม่มาก และชิ้นส่วนส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปส่งผลให้สามารถผลิตได้อย่างง่ายดายและรวดเร็ว ในขณะที่ระบบอื่น ๆ มีความซับซ้อนในการผลิตมากขึ้นอาจส่งผลให้ต้องใช้เวลามากขึ้นในการพัฒนาระบบการพิมพ์สามมิติ

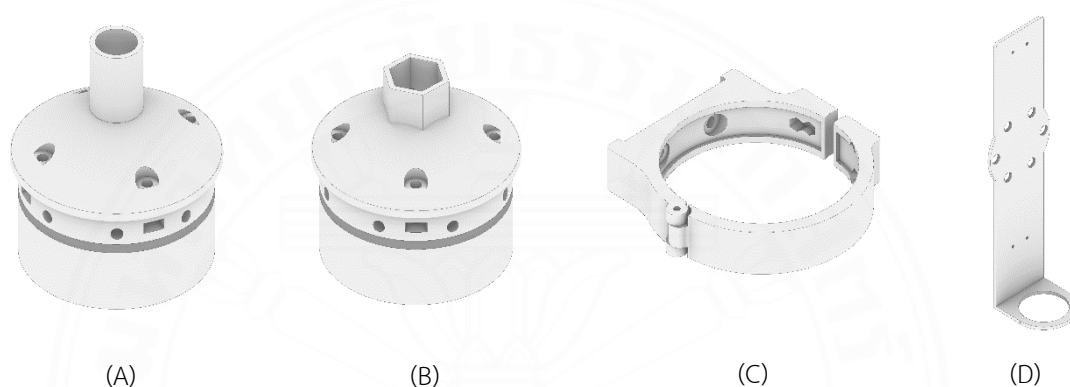
3.5.3 การพัฒนาและผลิตเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติ



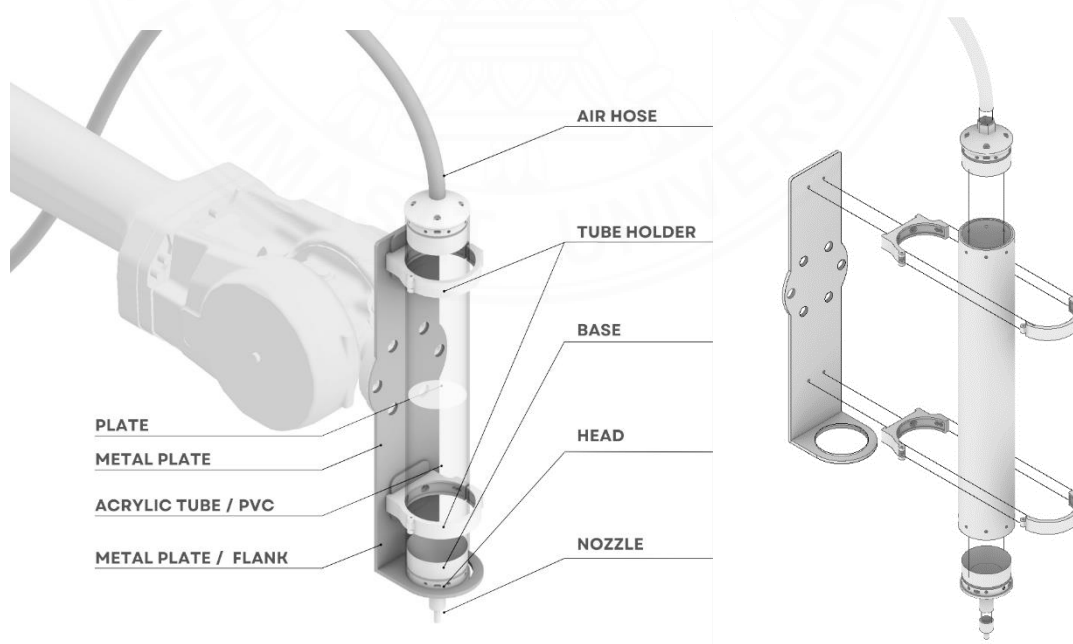
ภาพที่ 3.4 ภาพเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และพื้นที่การทำงาน. โดย ผู้วิจัย, 2566.

จากผลการเปรียบเทียบศักยภาพระบบการพิมพ์สามมิติและเลือกใช้เครื่องมือ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาประกอบการพัฒนาและผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ ABB รุ่น IRB4600-40 โดยระบบนิวเมติกส์ต้องมีอุปกรณ์คือ ปัมป์ลม ระบายความร้อนสูงสุดสูญญากาศที่ติดตั้งบน แขนหุ่นยนต์ และสายลมต่อเชื่อมระหว่างปัมป์ลมและกระบอก โดยในงานวิจัยนี้ใช้ปัมป์ลมไร้น้ำมัน ถึง 50 ลิตร แรงดันลม 8 บาร์ และสายลมขนาด 10 มิลลิเมตร เชื่อมโดยใช้ข้อต่อลมขนาด 10 มิลลิเมตร ในส่วนของกระบอกบรรจุสูญญากาศที่ติดตั้งบนแขนหุ่นยนต์ผู้วิจัยได้ทำการ ออกแบบและสั่งผลิต โดยสามารถแบ่งประเภทชิ้นส่วนอุปกรณ์ตามวิธีการผลิตได้ 2 ประเภทคือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์สำเร็จรูป ได้แก่ น็อต M5X16 มิลลิเมตร M5X25 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนล้อสปริงสแตนเลสสตีล หัวฉีดลมร้อน ขนาด 10-12 มิลลิเมตร ท่ออะคริลิกหนา 8 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สำหรับการใส่วัสดุ และชิ้นส่วนอุปกรณ์สั่งผลิตเฉพาะ ได้แก่ ชิ้นส่วนพิมพ์สามมิติด้วยพลาสติก PLA มีทั้งหมด 3 ชิ้นส่วน คือ ชิ้นส่วนหัว (Head Mount) สำหรับประกอบติดตั้งบริเวณหัวฉีดซึ่งถูกออกแบบให้มีรูสำหรับใส่น็อต M5 เพื่อยึดกับกระบอกอะคริลิกมีร่องสำหรับใส่ยาง O-Ring กันลื่นและกันอากาศเข้า บริเวณหัวฉีดถูกออกแบบให้พอดีสำหรับนำหัวฉีดลมร้อนมาติดตั้ง ชิ้นส่วนปลาย

(End Mount) มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่บริเวณปลายถูกออกแบบให้รองรับข้อต่อลมหกเหลี่ยม ขนาด 10 มิลลิเมตร สำหรับใส่สายเชื่อมต่อกับปั๊มลม ชิ้นส่วนจับกระบอกรอก (Tube Holder) จำนวน 2 ชิ้น มีลักษณะเป็นตัวยึดจับกระบอกรอกติดตั้งกับแผ่นเหล็ก ไม่ให้ขยับหรือ เอนเอียงระหว่างพิมพ์ ชิ้นงาน โดยใช้ชิ้นส่วนล๊อคสปริงสแตนเลสสำหรับยึดระหว่าง 2 ชิ้นส่วน นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแผ่นเหล็กสำหรับยึดจับเครื่องพิมพ์สามมิติและแขนหุ่นยนต์ มีการเจาะรูบริเวณกลางแผ่นเหล็ก 6 รูสำหรับยึดติดกับหน้าแขนหุ่นยนต์เจาะรูสำหรับยึดชิ้นส่วนจับกระบอกรอก และติดตั้งบริเวณปลายเพื่อรองรับหัวฉีดและน้ำหนักรถกระบอกรอกอะคริลิค ดังภาพ

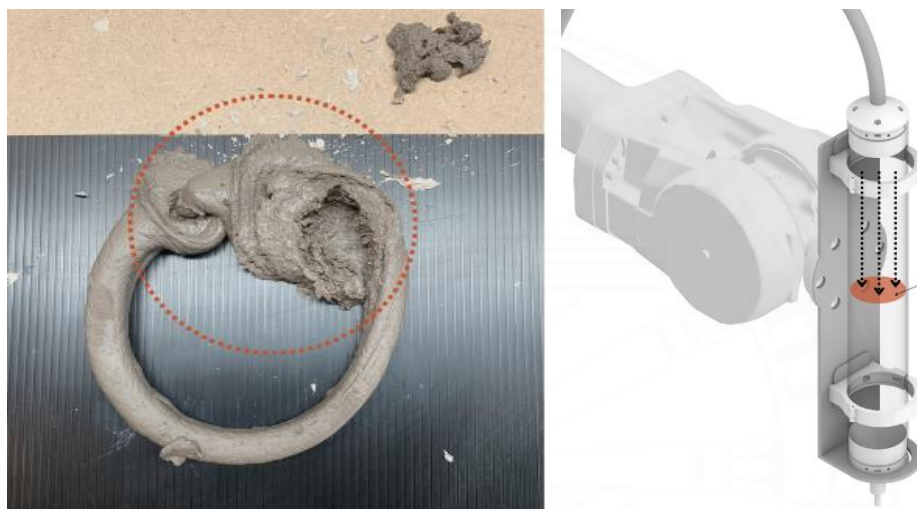


ภาพที่ 3.5 ภาพ (A) ชิ้นส่วนหัว. ภาพ (B) ชิ้นส่วนปลาย. ภาพ (C) ชิ้นส่วนจับกระบอกรอก. ภาพ (D) ชิ้นส่วนแผ่นเหล็ก. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 3.6 ภาพชิ้นส่วนและอุปกรณ์เครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์. โดย ผู้วิจัย, 2567.

ชิ้นส่วนแผ่น (Plate) ภายในกระบอกบรรจุวัสดุได้ถูกติดตั้งเพิ่มภายหลังการทดลองใช้เครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ เนื่องจากพบปัญหาแรงดันที่สัมผัสกับเนื้อดินโดยตรงบริเวณกลางเนื้อวัสดุ แรงดันไม่กระจายแรง เมื่อวัสดุเหลือน้อยระหว่างการพิมพ์ จึงมีโอกาสเสี่ยงในการเกิดระเบิดของแรงดันและฟองอากาศ ส่งผลให้ชิ้นงานเสียหายและพิมพ์ต่อไม่ได้ ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มขึ้นส่วนแผ่นดังกล่าวเพื่อให้แรงดันกระจายแรงได้ดีมากขึ้น สามารถดันแผ่นและวัสดุไปพร้อมๆกัน ดังภาพด้านล่าง



ภาพที่ 3.7 ภาพผลลัพธ์ก่อนการแก้ไขและภาพแสดงแนวทางการช่วยแก้ปัญหาการกระจายแรง. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 3.8 ภาพถ่ายเครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์พร้อมวัสดุ. โดย ผู้วิจัย, 2566.

สามารถสรุปชิ้นส่วนใช้ในการผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ วิธีการผลิต จำนวนที่ใช้ และราคาต่อชิ้นส่วนได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5

ตารางสรุปชิ้นส่วนที่ใช้ในการผลิตเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

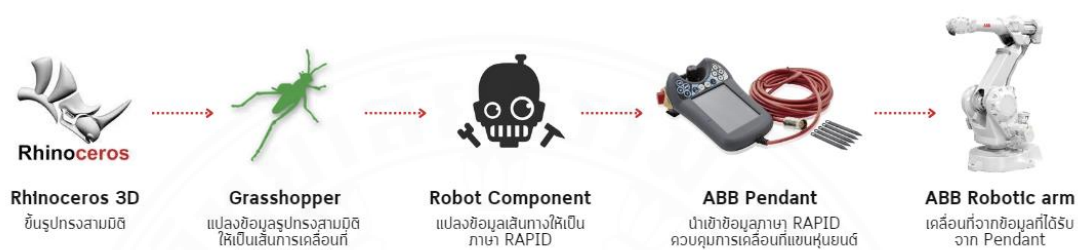
ชิ้นส่วน	การผลิต	จำนวน	ราคา (บาท)
สายลมขนาด 10 มม.	สำเร็จรูป	1	240
ข้อต่อลมขนาด 10 มม.	สำเร็จรูป	2	48
น็อต M5x16 มม.	สำเร็จรูป	16	72
น็อต M5x25 มม.	สำเร็จรูป	8	40
ชิ้นส่วนลอคสปริง สแตนเลสสตีล	สำเร็จรูป	2	32
ยาง O-ring	สำเร็จรูป	2	150
หัวฉีดลมร้อน 10, 12 มม.	สำเร็จรูป	2	70
ท่ออะคริลิกหนา 8 มม. ยาว 50 ซม.	สำเร็จรูป	1	2500
แผ่นเหล็ก 5 มม. เจาะรู ปั๊มตามแบบ	สั่งผลิต	1	1000
ชิ้นส่วน Head mount	PLA 3d print	1	-
ชิ้นส่วน End mount	PLA 3d print	1	-
ชิ้นส่วน Tube holder	PLA 3d print	1	-
รวม			4152

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

3.6 การศึกษาและพัฒนาส่วนซอฟต์แวร์ (Software)

งานวิจัยนี้มีการศึกษาเลือกใช้ซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 ส่วนเสริม Grasshopper ซึ่งเป็นส่วนเสริมใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 สามารถขึ้นรูปทรงสามมิติพารามетริก โดยการเขียนส่วนคำสั่งรูปแบบการเขียนโปรแกรมด้วยภาพ (Visual Programming Language) ทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย และรองรับปลั๊กอินเพิ่มเติมที่ผู้วิจัยเลือกใช้ ได้แก่ ปลั๊กอิน Robot Component ช่วยแปลงข้อมูลรูปทรงสามมิติและข้อมูลการเคลื่อนที่เป็นภาษา RAPID ซึ่งเป็นภาษาในการสื่อสารและควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์ รวมทั้งช่วยกำหนดรุ่นแขนหุ่นยนต์ พื้นที่การทำงาน

เครื่องมือการพิมพ์ จุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์ (Tool Center Point, TCP) และจำลองการพิมพ์สามมิติก่อนทำงานจริง เพื่อลดข้อผิดพลาดระหว่างของการเคลื่อนที่ออกนอกระยะการทำงานของแขนหุ่นยนต์ระหว่างการพิมพ์สามมิติ ปลั๊กอิน Karamba3D สำหรับการคำนวณ จำลองค่าการผิดรูปของรูปทรงก่อนพิมพ์ขึ้นงานจริง และคำนวณค่าความเครียดแรงอัดของผนังเมื่อติดตั้งขึ้นงาน ปลั๊กอิน Ladybug สำหรับการคำนวณรังสีความร้อนตกกระทบบนพื้นผิวขึ้นงานโดยนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาออกแบบรูปทรงของผนังที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

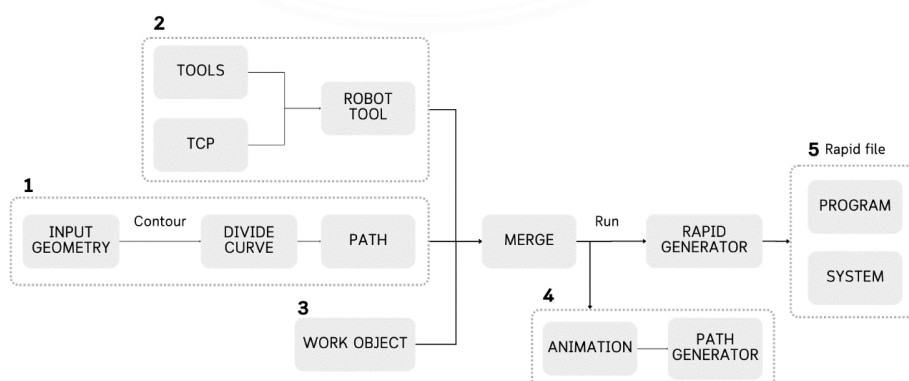


ภาพที่ 3.9 ภาพลำดับขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการพิมพ์สามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากภาพแสดงลำดับขั้นตอนการทำงานของซอฟต์แวร์สำหรับการพิมพ์สามมิติ โดยผู้วิจัยใช้ซอฟต์แวร์ RhinoCeros 7 ในการขึ้นรูปทรงสามมิติของชิ้นงาน กำหนดเครื่องมือและพื้นที่การทำงาน ใช้ส่วนเสริม Grasshopper พร้อมปลั๊กอิน Robot Component ในการแปลงข้อมูลทั้งหมดเป็นข้อมูลภาษา RAPID สำหรับนำเข้าแฟ้มควบคุมการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ผ่าน USB เพื่อสั่งการทำงานเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ต่อไป

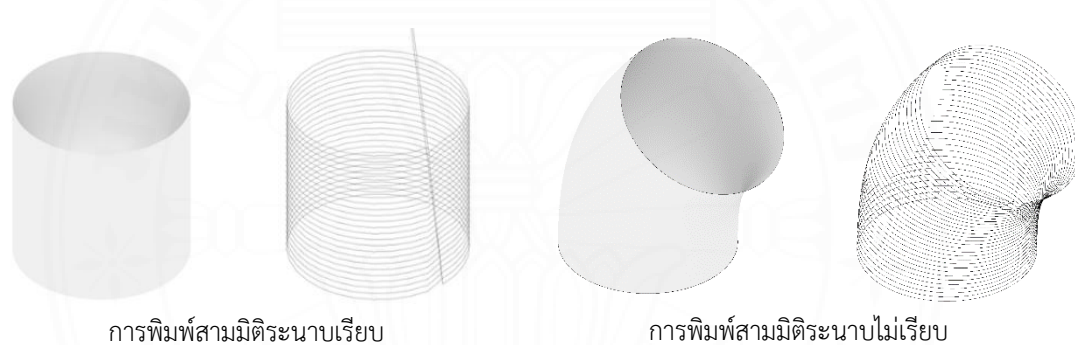
3.6.1 ชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาษา RAPID

ชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาษา RAPID ดังกล่าวมีระบบการทำงานโดยละเอียดแบ่งเป็น 5 ส่วนดังนี้



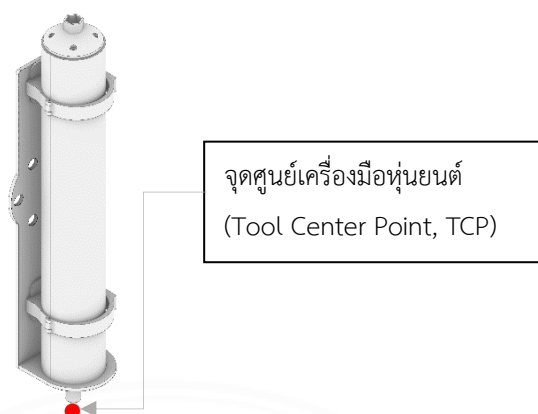
ภาพที่ 3.10 ภาพระบบการทำงานชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลให้อยู่ในภาษา RAPID. โดย ผู้วิจัย, 2566.

1. ส่วนชุดคำสั่งในการแปลงข้อมูลรูปทรงสามมิติจากซอฟต์แวร์ Rhinoceros 7 หรือรูปทรงสามมิติแบบพาราเมตริกซึ่งเขียนภายใน Grasshopper โดยตรงสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ปรับแต่งขนาดชิ้นงาน ความกว้างยาวสูง ระยะการยื่นของข้อต่อต่างๆ ได้อย่างอิสระเป็นเส้นทางสำหรับใช้เคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ โดยนำข้อมูลรูปทรงสามมิติดังกล่าวแปลงเป็นเส้นชั้น (Contour) แบ่งเส้นดังกล่าวเป็นจุดการเคลื่อนที่ ยิ่งจำนวนจุดมากการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จะแม่นยำมากขึ้นเช่นกัน โดยภายในงานวิจัยนี้ได้มีการเขียนชุดคำสั่งสำหรับแปลงข้อมูลรูปทรงสามมิติเป็นการเคลื่อนที่พิมพ์สามมิติ 2 รูปแบบได้แก่ การพิมพ์สามมิติแบบระนาบเรียบ (Planar) มีการเคลื่อนที่ 3 แกน และการพิมพ์สามมิติแบบระนาบไม่เรียบ (Non-Planar) มีการเคลื่อนที่มากกว่า 3 แกนขึ้นไป ซึ่งการพิมพ์สามมิติแบบระนาบไม่เรียบเป็นการใช้ศักยภาพของแขนหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้มากถึง 6 แกนมาช่วยพิมพ์สามมิติรูปทรงที่มีความซับซ้อนมากกว่าเครื่องพิมพ์ 3 แกนสามารถผลิตได้



ภาพที่ 3.11 ภาพเส้นทางการเคลื่อนที่พิมพ์สามมิติระนาบเรียบและระนาบไม่เรียบ.โดย ผู้วิจัย, 2566.

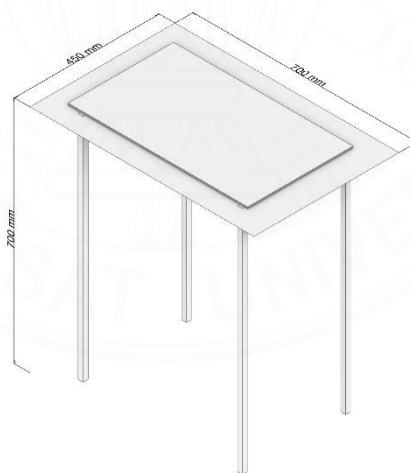
2. ส่วนชุดคำสั่งในการใส่ข้อมูลรูปทรงของเครื่องมือการพิมพ์สามมิติเพื่อจำลองการติดตั้งบนแขนหุ่นยนต์ และกำหนดจุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์บริเวณปลายหัวฉีดซึ่งต้องมีตำแหน่งตรงกับปลายหัวฉีดเครื่องมือการพิมพ์สามมิติจริง เนื่องจากหากคลาดเคลื่อนจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่คลาดเคลื่อนทั้งหมด



ภาพที่ 3.12 ภาพเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และจุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์. โดยผู้วิจัย, 2566.

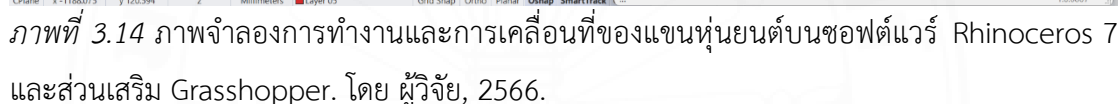
3. ส่วนชุดคำสั่งในกดปุ่มเพื่อสร้างไฟล์ RAPID เมื่อทำการแก้ไขชิ้นงานต้องทำการกดปุ่มทุกครั้ง และสไลด์บาร์สำหรับการจำลองการทำงานและการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ระหว่างพิมพ์เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดการเคลื่อนที่ออกนอกระยะแขนหุ่นยนต์

4. ส่วนชุดคำสั่งในการใส่ข้อมูลพื้นที่ทำงาน เรียกว่า WorkObject เพื่อกำหนดตำแหน่งการพิมพ์ชิ้นงานให้ตรงกับพื้นที่การทำงานจริง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้โต๊ะสำหรับวางถาดพิมพ์ชิ้นงานขนาด 45x70x70 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.13 ภาพโต๊ะสำหรับวางถาดพิมพ์ชิ้นงาน. โดย ผู้วิจัย, 2566.

5. ส่วนแสดงผลไฟล์ภาษา RAPID ซึ่งมี 2 ส่วนได้แก่ ข้อมูลโปรแกรม (Program) การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ และข้อมูลระบบ (System) ซึ่งมีข้อมูลชื่อเครื่องพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์และจุดศูนย์เครื่องมือหุ่นยนต์ โดยไฟล์ข้อมูลโปรแกรม จะต้องทำการบันทึกใหม่ทุกครั้งที่มีการแก้ไข ในขณะที่ไฟล์ข้อมูลระบบ สามารถบันทึกครั้งเดียว ใช้ได้กับหลายไฟล์ข้อมูลโปรแกรม



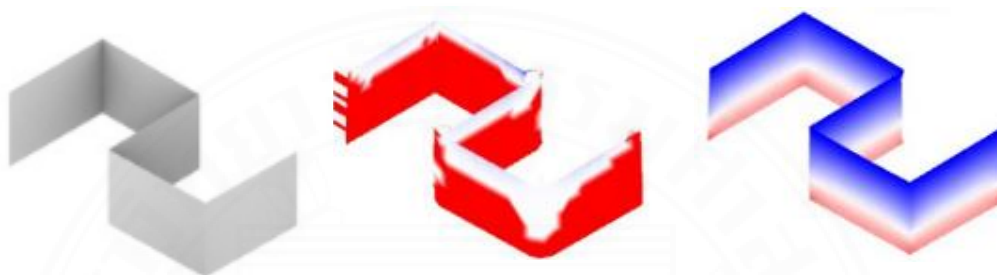
งานวิจัยนี้ใช้ปลั๊กอิน Karamba3D จำลองการรับน้ำหนักและถ่ายเทแรง
มีการคำนวณ 2 ส่วนได้แก่ การคำนวณรูปทรงที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ และการคำนวณความสามารถ
ในการรับแรงของผนังเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้ง

1. ค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุด (Maximum Displacement) ระยะทางสูงสุดที่วัสดุเปลี่ยนรูป เมื่อถูกแรงกระทำ หากผลลัพธ์ระยะทางเปลี่ยนรูปมากโอกาสเสี่ยงที่ชิ้นงานผิดรูปหรือล้มระหว่างพิมพ์มากขึ้นเช่นกัน

Ref. code: 25666516030456HRM

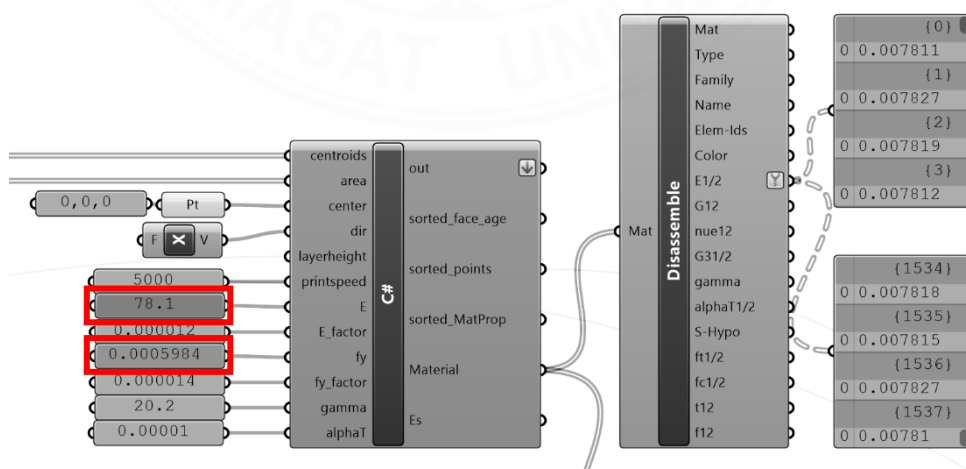
และการถ่ายเทแรงในโครงสร้างสูง บริเวณสีขาวและสีน้ำเงินหมายถึง บริเวณนั้นได้มีการรับภาระและการถ่ายเทแรงในโครงสร้างน้อยรองลงมาตามลำดับ

3. ค่าความเค้นแรงอัด (Maximum Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง การแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของวัสดุ ส่วนเสริมแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของสี โดยบริเวณสีแดงหมายถึง บริเวณนั้นได้มีการรับแรงมาก และบริเวณสีน้ำเงินหมายถึง บริเวณนั้นได้มีการรับร่น้อยรองลงมา



ภาพที่ 3.15 ภาพรูปทรงสามมิติ การแสดงค่าการจำลองผลค่ารับแรงถ่ายเทและค่าความเค้นแรงอัด, โดย ผู้วิจัย, 2567.

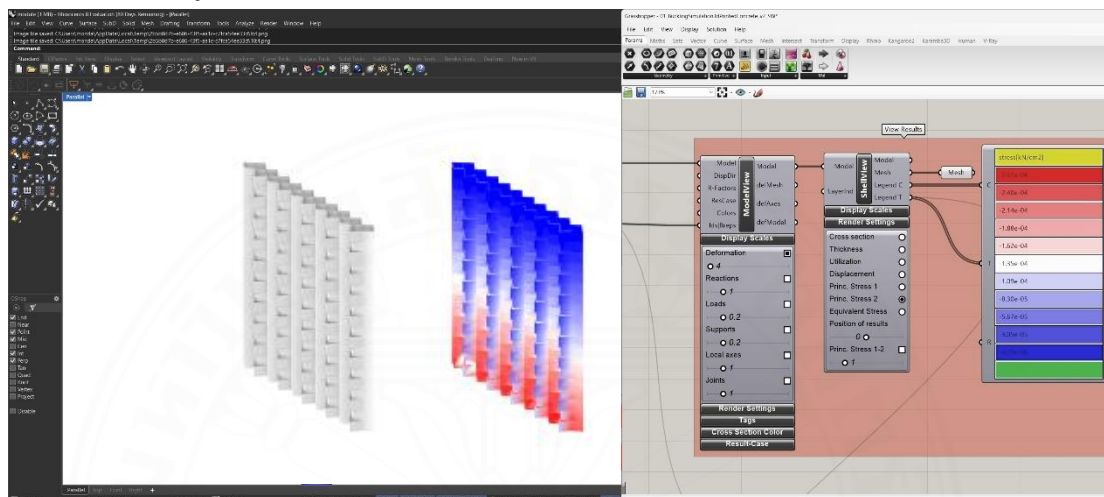
การคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติต้องใส่ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณลงในชุดคำสั่ง เพื่อความแม่นยำในการจำลองผลลัพธ์ ภายในชุดคำสั่งสำเร็จรูปต้องการข้อมูลวัสดุ 2 ค่าได้แก่ ค่า Stiffness Module[MPa] และ Compressive Strength (kPa) ซึ่งค่าดังกล่าวผู้วิจัยได้ทำการอ้างอิงจากการทบทวนวรรณกรรมการทดสอบค่ากำลังอัดวัสดุดินเหนียวมีค่าประมาณ 78-95 kPa และ 0.0005-0.001 mPa



ภาพที่ 3.16 ส่วนตัวแปรข้อมูลวัสดุที่จำเป็นต่อการคำนวณผลการรับแรงใน Karamba3D.

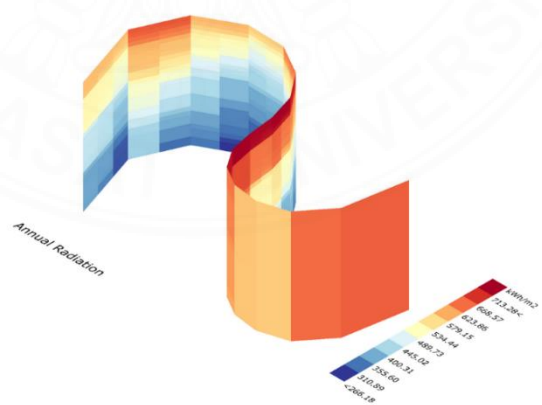
โดย ผู้วิจัย, 2567.

การคำนวณความสามารถในการรับแรงของผนังเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้ง ผู้วิจัยได้ทำการเขียนชุดคำสั่งในการนำข้อมูลรูปทรงสามมิติของชิ้นงานที่นำมาประกอบติดตั้งเป็นผนัง มาคำนวณค่าความเครียดแรงอัด เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมและความปลอดภัยในการรับน้ำหนัก ของผนังดังกล่าว โดยมีการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของสีเช่นเดียวกับการคำนวณและจำลอง การโก่งเดาะของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติ



ภาพที่ 3.17 ภาพการทำงานและแสดงผลลัพธ์การคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรงสามมิติ. โดย ผู้วิจัย, 2567.

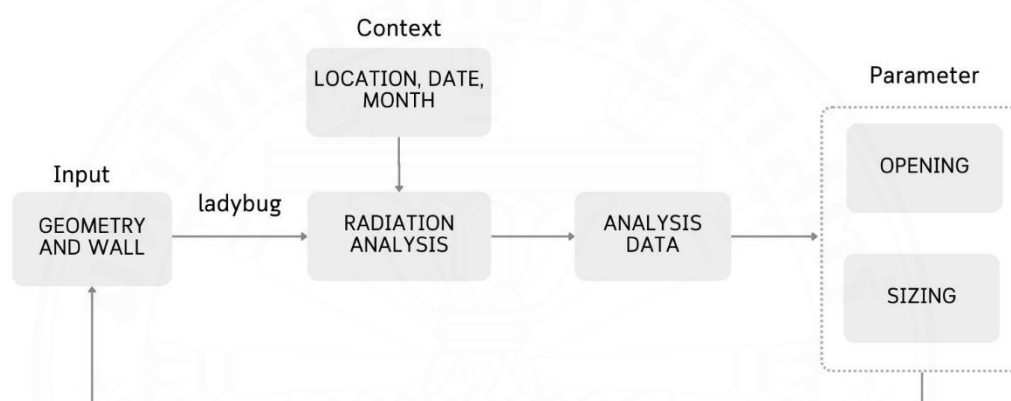
3.6.3 ชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวเพื่อปรับแต่งชิ้นงาน



ภาพที่ 3.18 ภาพผลลัพธ์การคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวผนัง. โดย ผู้วิจัย, 2567.

การปรับแต่งพารามิเตอร์ของชิ้นงานภายในงานวิจัยนี้มีการเลือกใช้ปลั๊กอิน Ladybug ภายใน Grasshopper สำหรับการจำลองการวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการการวิเคราะห์ผลกระทบของการได้รับการแผ่รังสีความร้อนที่ตกกระทบกับรูปทรงของผนังที่ออกแบบ

ก่อนนำผลวิเคราะห์ดังกล่าวมาใช้ปรับขนาดรูปทรง ระยะการยื่นของแต่ละชั้นงาน เพื่อรองรับการใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติม เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าในช่วงการเจริญเติบโตของวัสดุไมซีเลียมเพื่อเกิดดอกเห็ดนั้นไม่ควรที่จะโดนแสงแดดและความร้อนมากเกินไป จะส่งผลให้ความชื้นลดน้อย ดอกเห็ดไม่เติบโต ไมซีเลียมเริ่มแห้งและแข็งตัว ดังนั้นการออกแบบตำแหน่งของชั้นงานที่มีส่วนยื่นสำหรับใส่เชื้อก้อนเห็ดเพิ่มเติมจะต้องมีการคำนึงถึงปริมาณแสงแดดที่ตกกระทบ อีกทั้งการปรับระยะการยื่นของชั้นงานสามารถเป็นแผงบังแดดเฉพาะตัว สร้างเงา ลดความร้อนที่ตกกระทบผนัง หรือปรับระยะขนาดของช่องเปิดให้มีความเหมาะสมในแต่ละพื้นที่ใช้งานได้เช่นเดียวกัน โดยชุดคำสั่งมีการทำงานของระบบดังภาพ



ภาพที่ 3.19 ภาพระบบการทำงานชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวเพื่อปรับแต่งชั้นงาน. โดยผู้วิจัย, 2566.

จากภาพระบบการทำงานชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวเริ่มจากการนำข้อมูลชั้นงานที่ถูกวางเรียงติดตั้งเป็นผนังมาคำนวณรังสีความร้อนที่ตกกระทบพื้นที่ชั้นงาน โดยใช้คำสั่ง Radiation analysis ของปลั๊กอิน Ladybug ซึ่งต้องกำหนดข้อมูลเวลาที่ต้องการคำนวณบริบทที่ตั้งของชั้นงานเพื่อความแม่นยำในการจำลองผลลัพธ์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะถูกแสดงผลในรูปแบบของสี พื้นที่ที่ได้รับรังสีความร้อนมากจะแสดงผลสีแดง พื้นที่ที่ได้รับรังสีความร้อนน้อยจะแสดงผลสีน้ำเงินไล่ตามลำดับ จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลวิเคราะห์ดังกล่าวมาใช้ปรับขนาด ระยะการยื่น ขนาดช่องเปิดของชั้นงาน เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อรังสีความร้อนและการใช้งานเฉพาะเจาะจงสำหรับพื้นที่นั้น ๆ

3.7 ข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

หลังจากพัฒนาเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ทั้งส่วนอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้งานจริงพบว่าเครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมีข้อจำกัดในการพิมพ์ 2 ส่วนได้แก่

1. ความเสถียรในการพิมพ์ของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ เนื่องจากไม่ได้ใช้ระบบการฉีดโดยใช้แรงเฉือนของสกรู ซึ่งเป็นระบบที่มีความเสถียรสูง ถึงแม้เนื้อวัสดุไม่ได้เนียนละเอียดแต่ระบบยังสามารถพิมพ์ต่อเนื่องได้ ในขณะที่ระบบนิวเมติกส์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้มีความเสถียรอยู่ในระดับปานกลาง ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเสถียรคือความเนียนละเอียดของเนื้อวัสดุ หากเนื้อวัสดุไม่เนียนละเอียดมีการจับตัวเป็นก้อน จะส่งผลกระทบต่อโอกาสเสี่ยงในการเกิดการอุดตันหัวพิมพ์ เกิดการระเบิดของเนื้อวัสดุ และทำให้เส้นขึ้นงานขาดไม่ต่อเนื่องได้ ดังนั้น การขั้นตอนการผสมเนื้อวัสดุต้องมีความรอบคอบ เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว



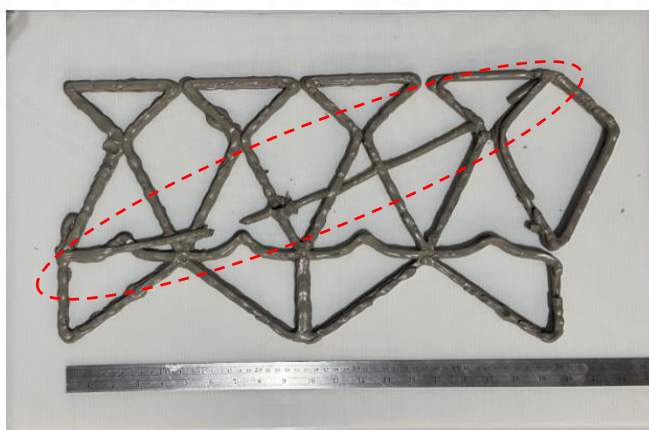
ภาพที่ 3.20 ภาพถ่ายการอุดตันของหัวฉีดและเส้นขึ้นงานขาดไม่ต่อเนื่อง โดย ผู้วิจัย, 2566.

2. ระบบการฉีดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ภายในงานวิจัยนี้เป็นระบบการบรรจุวัสดุที่มีปริมาณจำกัด คือปริมาณของขนาดกระบอกอะคริลิกยาว 50 เซนติเมตร บรรจุวัสดุได้ประมาณ 2.5 กิโลกรัม ส่งผลให้ต้องทำการเติมวัสดุลงในกระบอกอะคริลิกใหม่ทุกครั้งที่ทำการพิมพ์ชิ้นงาน ไม่สามารถเติมวัสดุเข้าเครื่องพิมพ์ได้ต่อเนื่อง ส่งผลให้เมื่อออกแบบชิ้นงานต้องคำนึงถึงรูปทรงที่สามารถพิมพ์ต่อได้ง่าย หรือรูปทรงที่สามารถแบ่งช่วงสำหรับการพิมพ์แล้วเห็นรอยต่อของรูปทรงน้อยที่สุด



ภาพที่ 3.21 ภาพถ่ายกระบอกอะคริลิกบรรจุวัสดุ, โดย ผู้วิจัย, 2566.

3. ระบบนิวเมติกส์โดยใช้ปั๊มลมภายในงานวิจัยนี้ สามารถเปิด ณ จุดเริ่มต้น และปิดเมื่อพิมพ์เสร็จสิ้นเท่านั้น ส่งผลให้ระหว่างการพิมพ์ชิ้นงานไม่สามารถหยุดพิมพ์ ณ จุดใดจุดหนึ่งก่อนเคลื่อนที่ไปพิมพ์ต่อที่จุดอื่นได้ หากต้องการสั่งปิดเปิดปั๊มลมอัตโนมัติระหว่างพิมพ์ชิ้นงานแต่ละจุด ต้องมีการพัฒนาชุดคำสั่งและศึกษาผลจากการการเปิดปิดอัตโนมัติเพิ่มเติม ผู้วิจัยจึงพัฒนาแนวทางแก้ปัญหาโดยพัฒนาชุดคำสั่งแปลงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นรูปแบบเส้นเดี่ยว (Single line) เพื่อแก้ปัญหาเส้นพิมพ์ทับซ้อน



ภาพที่ 3.22 ภาพผลลัพธ์ความผิดพลาดของการพิมพ์ที่ไม่ได้เป็นเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นเดี่ยว. โดย ผู้วิจัย, 2566.

การพัฒนาชุดคำสั่งแปลงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นรูปแบบเส้นเดี่ยวมีระบบการทำงานโดยนำเส้นชั้นที่ได้จากรูป ทำการแบ่งชุดเส้นข้อมูลดังกล่าวเป็นชุดข้อมูลเส้นลำดับคู่ และชุดข้อมูลเส้นลำดับคี่ จากนั้นทำการพลิกชุดข้อมูลเส้นลำดับคู่เพื่อสลับจุดเริ่มต้นและจุดจบ และทำการเชื่อมต่อเส้นระหว่างจุดเริ่มต้นของทั้งสองข้อมูลก่อนทำการเชื่อมเส้นทั้งหมดเพื่อเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ แสดงลำดับการทำงานได้ดังภาพ



ภาพที่ 3.23 การแปลงรูปทรงสามมิติเป็นเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นเดี่ยว. โดย ผู้วิจัย, 2567.

3.8 ขั้นตอนการพิมพ์สามมิติ

หลังจากการพัฒนาส่วนอุปกรณ์และส่วนซอฟต์แวร์ ผู้วิจัยได้มีการทดลองพิมพ์สามมิติเพื่อทดสอบเครื่องมือและระบบ โดยขั้นตอนการพิมพ์สามมิติ เริ่มจากการเตรียมพื้นที่การทำงาน ถาดพิมพ์ เตรียมวัสดุหัวเชื้อไมซีเลียมและดินเหนียว ผสมเนื้อวัสดุให้มีความละเอียด บรรจุวัสดุลงกระบอกอะคริลิก ประกอบติดตั้งเข้ากับเครื่องมือพิมพ์สามมิติที่ติดตั้งบริเวณแขนหุ่นยนต์ เชื่อมต่อสายป้อนลม หลังจากนั้นทำการเปิดปั๊มลมเพื่อทดสอบแรงดันและการฉีดเนื้อวัสดุ เมื่อวัสดุมีการฉีดต่อเนื่อง จึงทำการนำเข้าไฟล์ภาษา RAPID ได้แก่ไฟล์โปรแกรม และไฟล์ระบบเข้าแผงควบคุมแขนหุ่นยนต์เพื่อสั่งการทำงาน



ภาพที่ 3.24 ภาพถ่ายการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์. โดย ผู้วิจัย, 2567.

3.9 การประเมิน

ภายในงานวิจัยนี้มีการประเมิน 2 รูปแบบ ได้แก่ การประเมินโดยผู้วิจัยผ่านเครื่องมือ และการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ

3.9.1 การประเมินโดยผู้วิจัย

1. ประเมินรูปทรงที่ออกแบบก่อนการพิมพ์สามมิติด้วยชุดคำสั่งคำนวณและจำลองการโค้งเคาะของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติ เพื่อหลีกเลี่ยงจุดล้มเหลว โดยรูปทรงที่ออกแบบต้องมีความการเปลี่ยนรูปสูงสุดไม่เกิน 1 เซนติเมตร
2. ประเมินการรับแรงและถ่ายเทแรงของผนังโดยการจำลองความเครียดแรงอัดด้วยชุดคำสั่งคำนวณความสามารถในการรับแรงของผนังเมื่อนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้ง ซึ่งผนังที่ออกแบบเมื่อจำลองต้องมีความเครียดแรงอัดไม่เกิน 1.33 MPa เพื่อความปลอดภัย
3. ประเมินการเติบโตของไมซีเลียม เมื่อนำชิ้นงานที่พิมพ์เรียบร้อยแล้วมาบ่มในระยะเวลา 3 อาทิตย์ ชิ้นงานจะเกิดไมซีเลียมครอบคลุมพื้นที่ผิวอย่างน้อย 50% และเมื่อนำชิ้นงานมาวางเรียงต่อกันไมซีเลียมจะเติบโตช่วยยึดติดระหว่างชิ้นงาน

3.9.2 การประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ

1. ผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีและแขนงย่อยในงานสถาปัตยกรรมมีความคิดเห็นต่อผลลัพธ์แนวทางไปในทิศทางบวก และมองเห็นศักยภาพในการนำไปปรับใช้ในวงการสถาปัตยกรรม
2. ผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ดมีความคิดเห็นต่อผลลัพธ์แนวทางไปในทิศทางบวก มองเห็นศักยภาพในการนำไปปรับใช้ และมองเห็นทางเลือกตลาดใหม่



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการทดลองขั้นต้น

เมื่อพัฒนาส่วนอุปกรณ์และส่วนซอฟต์แวร์เสร็จสิ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองขั้นต้นโดยการทดสอบพิมพ์สามมิติรูปทรงพื้นฐานเพื่อหาค่าพื้นฐานที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ ได้แก่ สัดส่วนปริมาณน้ำและวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต ซึ่งทำการทดสอบสัดส่วนปริมาณวัสดุต่อปริมาณน้ำ 3 สัดส่วน ได้แก่ ปริมาณวัสดุดินเหนียว 1 กิโลกรัม หัวเชื้อไมซีเลียม 100 กรัม ต่อปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร 200 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดยปริมาณหัวเชื้อไมซีเลียมอ้างอิงจากข้อมูลและคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ และความเร็วการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่เหมาะสมต่อเนื้อวัสดุ ซึ่งทำการทดสอบ 2 ความเร็วการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้แก่ ความเร็ว 25% และ 50% ตามลำดับ สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1

เปรียบเทียบศักยภาพภาพประเภทวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในงานวิจัย

รูปทรง	ปริมาณวัสดุ	ปริมาณน้ำ	ความเร็วการเคลื่อนที่	ผลลัพธ์
 รูปทรง 1 5X5x5 ซม.	ดินเหนียว 1 กก. เชื้อไมซีเลียม 100 กรัม	น้ำสะอาด 100 มล.	25%	
 รูปทรง 2 5X5x5 ซม.	ดินเหนียว 1 กก. เชื้อไมซีเลียม 100 กรัม	น้ำสะอาด 200 มล.	25%	
 รูปทรง 3 Ø 5 ซม. X 5 ซม.	ดินเหนียว 1 กก. เชื้อไมซีเลียม 100 กรัม	น้ำสะอาด 300 มล.	25%	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

เปรียบเทียบศักยภาพประเภทวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตในการพิมพ์สามมิติเพื่อใช้ในงานวิจัย

รูปทรง	ปริมาณวัสดุ	ปริมาณน้ำ	ความเร็วการเคลื่อนที่	ผลลัพธ์
 รูปทรง 3 Ø 5 ซม. X 5 ซม.	ดินเหนียว 1 กก. เชื้อไมซีเลียม 100 กรัม	น้ำสะอาด 300 มล.	50%	

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

จากการทดลองขั้นต้นพบว่าสัดส่วนปริมาณวัสดุต่อน้ำสะอาดที่เหมาะสมต่อการพิมพ์คือสัดส่วนวัสดุดินเหนียว 1 กิโลกรัม หัวเชื้อไมซีเลียม 100 กรัม ต่อน้ำสะอาด 300 มิลลิลิตร เนื่องจากผลลัพธ์ชิ้นงานรูปทรงที่ 1 และรูปทรงที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัสดุมีปริมาณน้ำน้อยเกินไป เส้นวัสดุเกิดความหนืด และดึงรั้งเส้นชิ้นงานเข้าหากันระหว่างการพิมพ์สามมิติ ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดรูปได้ง่าย เส้นขาด และเสี่ยงต่อการล้ม ในขณะที่รูปทรงที่ 3 มีลักษณะเนื้อวัสดุที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ มีการบิดรูปน้อย หลังจากนั้นผู้วิจัยที่ได้ทำการทดสอบเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์พบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ 25% มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์ เมื่อเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่เท่ากับ 50% ชิ้นงานเกิดการล้ม ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากแขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เร็วมากเกินไป ไม่สอดคล้องกับความเร็วในการฉีดวัสดุ นอกจากนี้ การทดสอบขั้นต้นในการพิมพ์สามมิติรูปทรงพื้นฐานแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์มีความสามารถในการใช้งานจริง

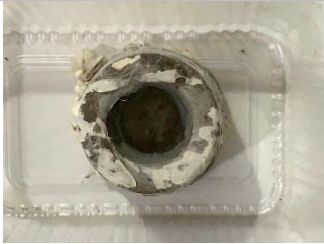
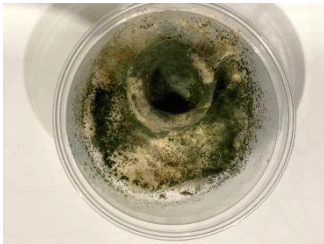
4.2 ผลการทดลองฆ่าเชื้อ

วัสดุไมซีเลียมเป็นสิ่งมีชีวิตที่ค่อนข้างอ่อนไหวต่อเชื้อโรคและสิ่งสกปรกภายนอก และผลจากจากข้อ 3.4.3 แสดงให้เห็นว่าต้องมีการนิ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงานมีความเหมาะสมเพื่อใช้ในงานวิจัย ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองนำวัสดุมาฆ่าเชื้อรูปแบบสเตอริไลซ์ซึ่งเป็นกระบวนการใช้ความร้อนในการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 110-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2-3 ชั่วโมง เปรียบเทียบผลกับการพิมพ์สามมิติวัสดุที่ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบพิมพ์ 4 ชิ้นงาน ทุกชิ้นงานใช้หัวเชื้อไมซีเลียมประเภทเดียวกันคือ หัวเชื้อไมซีเลียมในเมล็ดข้าวฟ่าง

มีสัดส่วนวัสดุ 1 กิโลกรัม ต่อน้ำสะอาด 300 มล. 1 วัสดุของชิ้นงานที่ 1 ผ่านการฆ่าเชื้อ ในขณะที่วัสดุของชิ้นงานที่ 2-4 ไม่ผ่านการฆ่าเชื้อ แสดงผลดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2

เปรียบเทียบผลลัพธ์การทดลองฆ่าเชื้อวัสดุ

การฆ่าเชื้อ	ผลลัพธ์		การเติบโต
รูปแบบสเตอร์ไลซ์ อุณหภูมิ 110- 120°C 2-3 ชั่วโมง			ไม่ซีเลียม เติบโตได้ดี
-			ไม่ซีเลียม เติบโตไม่ เติบโต ติดเชื้อ ราดำ ราเขียว
-			ไม่ซีเลียม เติบโตไม่ เติบโต ติดเชื้อ ราดำ ราเขียว
-			ไม่ซีเลียม เติบโตไม่ เติบโต ติดเชื้อ ราดำ ราเขียว

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

หลังการทดสอบผู้วิจัยได้ทำการวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 1 ครั้งเมื่อครบ 1 สัปดาห์ พบว่าชิ้นงานที่ 1 ซึ่งผ่านการฆ่าเชื้อรูปแบบสเตอริไลซ์ ไมซีเลียมมีการเติบโตได้ดี ในขณะที่ชิ้นงานที่ 2-4 ซึ่งวัสดุไม่ได้ผ่านการฆ่าเชื้อพบว่าทั้ง 3 ชิ้นงานเกิดการติดเชื้อของราเขียว และราดำซึ่งเป็นราที่เกิดจากความปนเปื้อน ไม่สะอาดของวัสดุ สรุปได้ว่าภายในงานวิจัยนี้ทุกชิ้นงานต้องมีการนึ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนนำไปผลิตชิ้นงานเพื่อเพิ่มโอกาสการเติบโตของไมซีเลียม และลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อ

4.3 ผลการทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม

จากข้อ 3.4.4. หลังจากพิมพ์ชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมเพื่อดูผลลัพธ์ว่าเชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียมได้มากน้อยเพียงใด ทดลองใช้หัวเชื้อไมซีเลียม 2 ประเภทได้แก่ ก้อนเชื้อเห็ดป่นผง และเชื้อเห็ดโตเต็มที่เป็นผงมาใส่ภายในบางส่วน of ชิ้นงานที่ถูกพิมพ์สามมิติโดยใช้หัวเชื้อไมซีเลียมในเมล็ดข้าวฟ่างผสมดินเหนียวสัดส่วนวัสดุ 1 กิโลกรัม ต่อน้ำสะอาด 300 มิลลิลิตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวเก็บภายในกล่องปิด อุณหภูมิประมาณ 28-30 องศาเซลเซียส ความชื้น 50-70% และวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 1 ครั้งเมื่อครบ 1 สัปดาห์ แสดงผลดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3

เปรียบเทียบผลลัพธ์การทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม

วัสดุพิมพ์ชิ้นงาน	หัวเชื้อไมซีเลียม	ผลลัพธ์	การเติบโตของไมซีเลียม
หัวเชื้อไมซีเลียม เมล็ดข้าวฟ่าง 100ก. ดินเหนียว 1 กก. น้ำ 300 มล.	ก้อนเชื้อเห็ดป่นผง		ไมซีเลียมเติบโตได้ดี แข็งแรงสามารถผลิตดอกเห็ดได้
หัวเชื้อไมซีเลียม เมล็ดข้าวฟ่าง 100 กรัม ดินเหนียว 1 กก. น้ำ 300 มล.	เชื้อเห็ดโตเต็มที่เป็นผง		ไมซีเลียมเติบโตเล็กน้อยในระยะแรก ชิ้นงานเกิดการติดเชื้อราเขียวอย่างรวดเร็ว

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2566.

จากผลลัพธ์การทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมและวัดผลการเติบโตของไมซีเลียม 1 ครั้งเมื่อครบ 1 สัปดาห์ พบว่าการใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียมได้จริง โดยการใส่หัวเชื้อไมซีเลียมก่อนเชื้อเห็ดป่นผง ช่วยให้ไมซีเลียมเติบโตได้ดี รวดเร็ว และไมซีเลียมมีความแข็งแรงสามารถผลิตดอกเห็ดได้ แต่การใส่เชื้อเห็ดโตเต็มที่บ้านผงพบว่าไมซีเลียมเติบโตได้เล็กน้อยในระยะแรกเท่านั้น ชี้นงานเกิดการติดเชื้อราเขียวอย่างรวดเร็ว แสดงถึงการติดเชื้อจากการปนเปื้อน ผู้วิจัยมีข้อคิดเห็นว่าอาจเกิดจากเชื้อเห็ดโตเต็มที่บ้านผงมีการเติบโตเต็มที่และแห้งตายมานาน ส่งผลมีโอกาสปนเปื้อนเชื้อโรคอื่น ๆ ก่อนนำมาใช้งาน ข้อค้นพบนี้นำไปสู่แนวทางการออกแบบรูปทรงชิ้นงานของผู้วิจัย ให้รูปทรงที่ออกแบบมีการค้ำนึ่งที่พื้นที่รองรับการใส่เชื้อไมซีเลียมก่อนเชื้อเห็ดป่นผงภายหลัง

4.4 แนวคิดในการออกแบบรูปทรงชิ้นงาน

หลังการทดลองขึ้นต้นและทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่พบประกอบกับข้อมูลแนวทางการออกแบบจากการทบทวนวรรณกรรม กรณีศึกษา และข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์จากข้อ 3.7 นำมาเป็นกรอบแนวคิดในการออกแบบรูปทรงชิ้นงานที่เหมาะสมที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ และการใช้งาน

4.4.1 ขนาดของรูปทรงชิ้นงาน

ภายในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์จากข้อ 3.7 เนื่องจากกระบอกอะคริลิกบรรจุวัสดุสามารถบรรจุปริมาณวัสดุได้จำกัด ไม่เหมาะสำหรับการพิมพ์สามมิติรูปทรงชิ้นงานขนาดใหญ่มาก จะส่งผลให้การพิมพ์ต่อรอบได้จำนวนชิ้นที่น้อยเกินไป หลังการศึกษาและทดลองพิมพ์รูปทรงขนาดต่าง ๆ งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดขอบเขตการพิมพ์ชิ้นงานไม่เกิน 50x50x15 เซนติเมตร เป็นขนาดที่มีความเหมาะสมต่อการพิมพ์สามมิติหนึ่งรอบต่อหนึ่งชิ้นงาน

4.4.2 โครงสร้างชิ้นงาน

หลังจากทำการศึกษา ทดลอง และกำหนดขนาดของรูปทรงชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนวรรณกรรมเพื่อหาลักษณะโครงสร้างหรือส่วนเติมเต็มที่มีความเหมาะสม สามารถถ่ายเทรับน้ำหนักได้ดี และไม่เสี่ยงต่อการล้มระหว่างพิมพ์ พบว่าโครงสร้างส่วนเติมเต็มแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีความเหมาะสมต่อการวิจัย เนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโครงสร้างส่วนเติมเต็มแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดมีความแข็งแรงสูง มีการกระจายแรงได้เป็นอย่างดี ใช้เวลาในการ

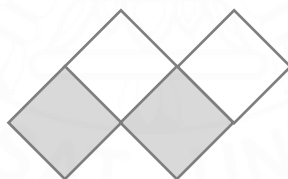
พิมพ์สามมิติไม่นานเมื่อเทียบกับโครงสร้างส่วนเดิมเต็มรูปแบบอื่นเช่น รังผึ้ง หรือสี่เหลี่ยม ส่งผลให้ใช้วัสดุพิมพ์สามมิติต่อชิ้นน้อยลง อีกทั้งข้อค้นพบงานวิจัย TERRAPERFORMA ของ Institute for Advanced Architecture of Catalonia พบว่าการพิมพ์เส้นสามมิติดินเหนียว ทุกความยาว 10 เซนติเมตร. ควรต้องมีเส้นตัดเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง โครงสร้างแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดที่มีจุดตัดเส้นและจุดหักของเส้นไม่มากหรือน้อยเกินไปจึงมีความเหมาะสม



ภาพที่ 4.1 ภาพส่วนเติมเต็มสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด. โดย ผู้วิจัย, 2567.

4.4.3 พื้นที่ใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม

ผลลัพธ์การทดลองใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมจากข้อ 4.3 แสดงให้เห็นว่า แนวทางการออกแบบรูปทรงชิ้นงานของผู้วิจัยต้องมีการคำนึงที่พื้นที่รองรับการใส่เชื้อไมซีเลียม ก่อนเชื้อเห็ดป่นผงภายหลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียมและเพิ่มโอกาสเติบโตของ ดอกเห็ด โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบให้สอดคล้องกับโครงสร้างส่วนเติมเต็มแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลาม ตัด โดยมีลักษณะเป็นพื้นที่ยื่นออกมาจากส่วนโครงสร้างเพื่อรองรับเชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม โดยพื้นที่ ส่วนนี้จะถูกนำไปปรับค่าพารามิเตอร์ระยะการยื่นโดยใช้ชุดคำสั่งคำนวณรังสีความร้อนบนพื้นผิวเพื่อ ปรับแต่งชิ้นงานจากข้อ 4.3.3 ต่อไป

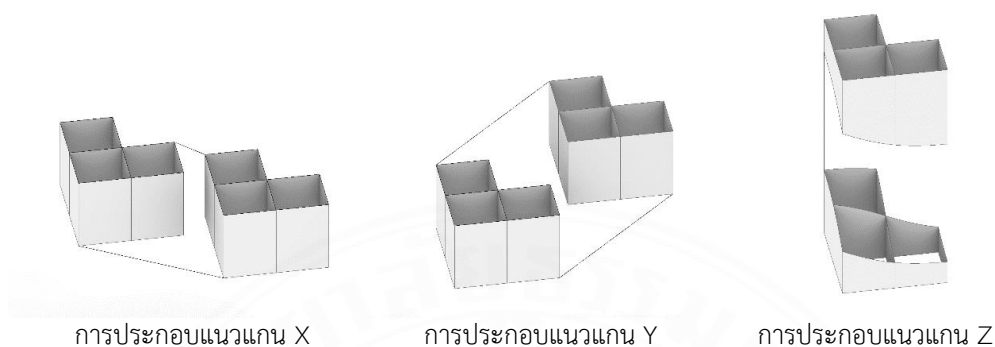


ภาพที่ 4.2 ภาพการออกแบบพื้นที่ใส่ก้อนเชื้อเห็ดภายหลัง, โดย ผู้วิจัย, 2566.

4.4.4 ข้อต่อการรับการวางประกอบ

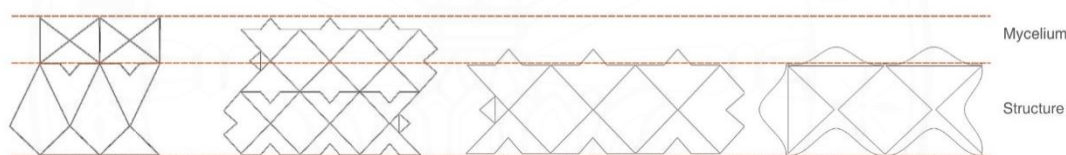
ข้อจำกัดของเครื่องมือในการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ส่งผลให้รูปทรงชิ้นงาน ที่พิมพ์สามมิติในงานวิจัยนี้มีขนาดไม่ใหญ่ และไม่สามารถพิมพ์ต่อเนื่องได้ทั้งผนังในครั้งเดียว รูปทรง ชิ้นงานในงานวิจัยนี้ต้องมีการนำมาประกอบติดตั้งเป็นผนังในทิศทางแนวขวางและแนวตั้ง จึงต้องมี การคำนึงถึงและออกแบบข้อต่อการรับการวางประกอบติดตั้งเพื่อให้ชิ้นงานสามารถวางประกอบ ติดตั้งได้อย่างพอดี ลดการคลาดเคลื่อนของชิ้นงานระหว่างประกอบ แต่การออกแบบข้อต่อต้องคำนึง เส้นทางเคลื่อนที่ให้เป็นเส้นเดียวด้วยเช่นกัน โดยผู้วิจัยได้ทบทวนวรรณกรรม ศึกษาารูปทรง

จากกรณีศึกษาและออกแบบข้อต่อสำหรับแนวแกน X และแนวแกน Y รวมทั้งมีการออกแบบรูปทรงสำหรับการพิมพ์แบบระบายไม่เรียบเพื่อเป็นข้อต่อสำหรับแนวแกน Z โดยแสดงตัวอย่างแนวทางการต่อประกอบได้ดังภาพ



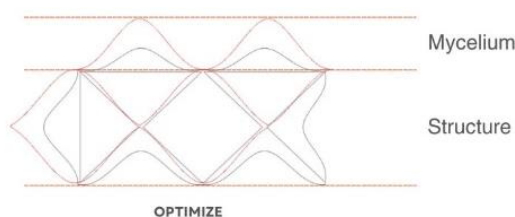
ภาพที่ 4.3 ภาพตัวอย่างแนวทางการต่อประกอบชิ้นงาน, โดย ผู้วิจัย, 2567.

4.5 ผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงาน



ภาพที่ 4.4 ภาพรูปทรงชิ้นงานจากแนวคิดการออกแบบ, โดย ผู้วิจัย, 2567.

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบชิ้นงานจากแนวคิดในการออกแบบข้อ 4.4 ผสมกับข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมและกรณีศึกษา โดยแบ่งเป็น 2 ชุดชิ้นงาน จากภาพที่ 4.3 เป็นชุดชิ้นงานแรกจำนวน 5 ชิ้นงาน เป็นรูปทรงที่ถูกศึกษาจากการทบทวนวรรณกรรมและกรณีศึกษา นำมาพัฒนาออกแบบให้มีความเหมาะสมต่อบริบท การใช้งานภายในงานวิจัย ชุดชิ้นงานที่ 2 จำนวน 5 ชิ้นงาน เป็นชุดรูปทรงที่ถูกพัฒนาและลดทอนเส้นการพิมพ์สามมิติจากผลลัพธ์ประสิทธิภาพการพิมพ์สามมิติและคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญ เนื่องจากรูปทรงมีเส้นที่ซ้อนทับมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ผู้วิจัยจึงมีการลดทอนเส้นบางส่วนแต่ยังคงหน้าที่การใช้งานของโครงสร้างไว้เช่นเดิม ดังภาพ

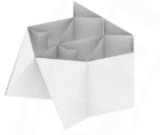
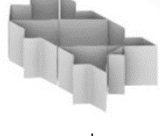
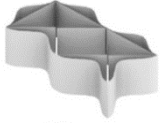
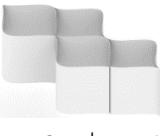


ภาพที่ 4.5 ภาพการลดทอนเส้นการพิมพ์สามมิติรูปทรง, โดย ผู้วิจัย, 2567.

รวมถึงมีการใช้ศักยภาพการเคลื่อนที่อย่างอิสระของแขนหุ่นยนต์ในการพิมพ์สามมิติ ระบายไม่เรียบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อบริบท และการใช้งานพื้นที่นั้นๆ สามารถสรุปผลลัพธ์และข้อค้นพบของแต่ละชิ้นงานได้ดังนี้

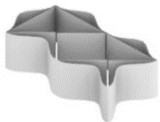
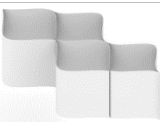
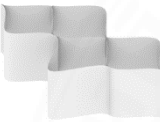
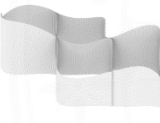
ตารางที่ 4.4

เปรียบเทียบผลลัพธ์ผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงาน

รูปทรง	ขนาด	การเคลื่อนที่	ผลลัพธ์
 ชุด 1 รูปทรง 1	30x70x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	รูปทรงจากกรณีศึกษา พบว่ารูปทรงมีขนาดใหญ่เกินขอบเขตการพิมพ์ การเอียงของผนังที่ 35 องศา ส่งผลให้เสี่ยงในการล้มระหว่างพิมพ์ ชิ้นงานมาก ข้อต่อแนวแกน X ไม่ซับซ้อน ประกอบได้ง่าย แต่ไม่มีข้อต่อแนวแกน Y
 ชุด 1 รูปทรง 2	30x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	รูปทรงจากกรณีศึกษาซึ่งถูกลดทอนขนาด พิมพ์ได้สูงมากขึ้นต่อการพิมพ์หนึ่งครั้ง การเอียงของผนังที่ 35 องศา ส่งผลให้เสี่ยงในการล้มระหว่างพิมพ์ชิ้นงานมาก ข้อต่อแนวแกน X ไม่ซับซ้อน ประกอบได้ง่าย แต่ไม่มีข้อต่อแนวแกน Y
 ชุด 1 รูปทรง 3	30x45x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	ลดทอนจากรูปทรงที่ 2 ลดการเอียง แต่รูปทรงมีขนาดใหญ่เกินไป ส่งผลให้พิมพ์สามมิติจำนวนชิ้นน้อย ข้อต่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงแต่มีขนาดเล็กและรอยหยักมากเกินไป มีความเสี่ยงมากในการประกอบติดตั้งไม่พอดี
 ชุด 1 รูปทรง 4	15x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	ข้อต่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงแต่มีขนาดเล็กและรอยหยักมากเกินไป มีความเสี่ยงมากในการประกอบติดตั้งไม่พอดี
 ชุด 1 รูปทรง 5	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	ปรับเส้นตรงเป็นเส้นโค้ง ลดรอยหยัก ประกอบติดตั้งได้ง่ายขึ้น แต่มีเส้นเกินความจำเป็นมากเกินไป ต้องมีการลดทอนเส้นการเคลื่อนที่
 ชุด 2 รูปทรง 6	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระบายเรียบ	รูปทรงถูกลดทอนเส้นที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้ประหยัดวัสดุในการพิมพ์แต่ละชิ้น ข้อต่อในแนวแกน X มีการค้ำยันด้านเดียว ข้อต่อในแนวแกน Y สามารถประกอบได้อย่างพอดี

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

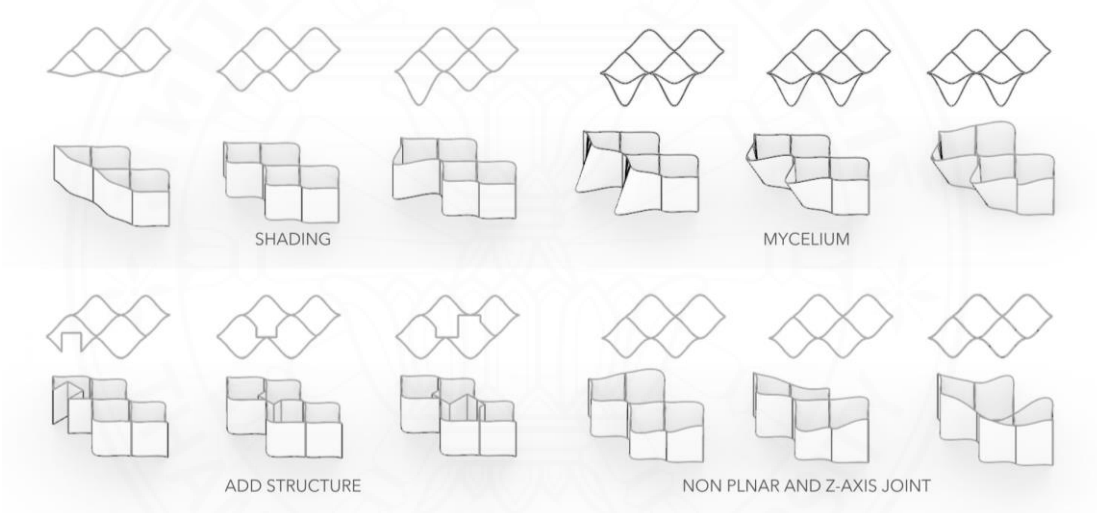
เปรียบเทียบผลลัพธ์ผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงาน

รูปทรง	ขนาด	การเคลื่อนที่	ผลลัพธ์
 ชุด 1 รูปทรง 5	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบเรียบ	ปรับเส้นตรงเป็นเส้นโค้ง ลดรอยหยัก ประกอบติดตั้งได้ง่ายขึ้น แต่มีเส้นเกินความจำเป็นมากเกินไป ต้องมีการลดทอนเส้นการเคลื่อนที่
 ชุด 2 รูปทรง 6	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบเรียบ	รูปทรงถูกลดทอนเส้นที่ไม่จำเป็น ส่งผลให้ประหยัดวัสดุในการพิมพ์แต่ละชิ้น ข้อต่อในแนวแกน X มีการค้ำยันด้านเดียว ข้อต่อในแนวแกน Y สามารถประกอบได้อย่างพอดี
 ชุด 2 รูปทรง 7	25x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบเรียบ	รูปทรงที่ถูกพัฒนาจากรูปทรงที่ 6 สามารถปรับระยะการยื่นของพื้นที่รองรับการใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมและสามารถเป็นแผงกันสร้างเงาให้ผนัง
 ชุด 2 รูปทรง 8	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบ	รูปทรงที่ถูกพัฒนาโดยออกแบบข้อต่อในแนวแกน Z ใช้เส้นการพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบเพื่อให้เกิดข้อต่อสูงขึ้นจากชิ้นงานสามารถพลิกประกอบติดตั้งกันได้อย่างพอดี
 ชุด 2 รูปทรง 9	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบ	รูปทรงที่ถูกพัฒนาโดยออกแบบข้อต่อในแนวแกน Z ใช้เส้นการพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบเพื่อให้เกิดข้อต่อสูงขึ้นจากชิ้นงานสามารถพลิกประกอบติดตั้งกันได้อย่างพอดี
 ชุด 2 รูปทรง 10	20x35x15 ซม.	การพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบ	รูปทรงที่ถูกพัฒนาออกแบบโดยคำนึงถึงช่องเปิดระหว่าง 2 ชิ้นงาน เพื่อรองรับการใช้งานในพื้นที่ที่ต้องการช่องเปิด รับแสง

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

สรุปผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงานที่นำการทดลองพิมพ์สามมิติมีทั้งหมด 10 รูปทรง และชุดรูปทรงที่ 2 คาดว่าเป็นผลลัพธ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาพัฒนาและออกแบบเป็นองค์ประกอบสถาปัตยกรรม ซึ่งชุดรูปทรงที่ 2 เป็นการพัฒนาจากรูปทรงที่ 5 โดยทำการลดทอนเส้นที่เกินความจำเป็น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบรูปทรงจากรูปทรงดังกล่าวนี้เพิ่มเติม

เพื่อหาความเป็นไปในการนำไปปรับใช้งาน สามารถพัฒนาเป็น 4 แนวทางการออกแบบดังภาพที่ 4.6 แนวคิด Shading คือรูปทรงที่มีการยื่นของชิ้นงานเพื่อทำหน้าที่เป็นแผงกันแดด สร้างเงดเงาให้กับผนัง เพื่อลดรังสีความร้อนบนพื้นผิว แนวคิด Mycelium มีความคล้ายคลึงกับแนวคิดแรก แต่เปลี่ยนการใช้งานจากการบังแดดเป็นพื้นที่ใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติมให้ไมซีเลียมเติบโตได้ดีมากขึ้นและเกิดดอกเห็ด แนวคิด Add Structure คือการปรับเส้นโครงสร้างภายในชิ้นงานเพื่อรองรับการใส่โครงสร้างจากวัสดุอื่น เช่นเสาไม้ หรือเหล็ก เป็นต้น เพื่อทำหน้าที่รับน้ำหนักแทนผนังจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตซึ่งเป็นผนังไม่รับน้ำหนัก และแนวคิด Non Planar ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อการผลิตโดยการพิมพ์ระนาบไม่เรียบ ทำหน้าที่เป็นข้อต่อในแนวแกน Z เพิ่มความแข็งแรงในการประกอบติดตั้งระหว่างชิ้นงาน โดยหลังการออกแบบ และคัดเลือกรูปทรงขั้นต้น ผู้วิจัยได้นำรูปทรงดังกล่าวมาคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติ เพื่อทดสอบความเหมาะสมของรูปทรงอีกชั้น

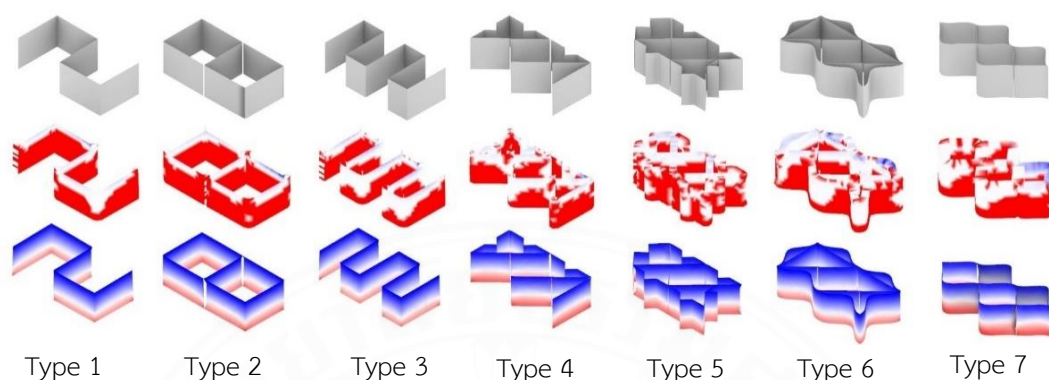


ภาพที่ 4.6 ภาพแนวคิดและผลลัพธ์การพัฒนารูปทรงชุดที่ 2, โดย ผู้วิจัย, 2567.

4.6 ผลลัพธ์การคำนวณและจำลองการโก่งเดาะของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติ

กระบวนการนี้เป็นการนำรูปทรงที่ถูกคัดเลือกขั้นต้นมาคำนวณและจำลองการโก่งเดาะที่มีโอกาสเกิดขึ้นระหว่างพิมพ์สามมิติ เป็นการจำลองก่อนการพิมพ์สามมิติจริงภายในส่วนเสริม Grasshopper และปลั๊กอิน Karamba3D เพื่อวัดประสิทธิภาพชิ้นงานก่อนการพิมพ์ ประเมินความเสี่ยงที่รูปทรง โดยประเมินจากค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุด ซึ่งไม่ควรเกิน 1 เซนติเมตร จากข้อมูลการทบทวนวรรณกรรม ผลลัพธ์ที่ได้นอกเหนือจากค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุดนั้นมีการแสดงค่าการรับแรงที่เกี่ยวกับการถ่ายเทในโครงสร้างและค่าความเค้นแรงอัด แสดงผลในรูปแบบค่าสี

บริเวณสีแดงหมายถึงพื้นที่บริเวณนั้นมีการรับแรงและมีค่าความเค้นแรงอัดมาก พื้นที่สีน้ำเงินมีการรับแรงและมีค่าความเค้นแรงอัดน้อยรองลงมาตามลำดับ



ภาพที่ 4.7 ผลลัพธ์การจำลองการโก่งเดาะโดยส่วนเสริม Karamba3D เพื่อใช้ในงานวิจัย, โดย ผู้วิจัย, 2567.

ตารางที่ 4.5

ตารางเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการโก่งเดาะโดยส่วนเสริม Karamba3D เพื่อใช้ในงานวิจัย

รูปทรง	Maximum Displacement (cm.)	Min Stress (kN/cm ²)	Max Stress (kN/cm ²)
Type 1	0.145	-10.4%	12970.2%
Type 2	0.126	-9.4%	10353.6%
Type 3	0.134	-10.4%	5373.4%
Type 4	0.129	-9.0%	4079.7%
Type 5	0.129	-9.1%	4989.4%
Type 6	0.129	-10.4%	4194.2%
Type 7	0.134	-8.6%	4585.4%

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

จากตารางการเปรียบเทียบผลลัพธ์การจำลองการโก่งเดาะของรูปทรง 7 รูปทรง ตั้งแต่รูปทรงพื้นฐานถึงรูปทรงที่ถูกคัดเลือกจากข้อ 4.5 พบว่ายิ่งรูปทรงมีเส้นและจุดตัดมาก จะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุดลดน้อยลง เห็นได้จากผลลัพธ์ค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุดของ

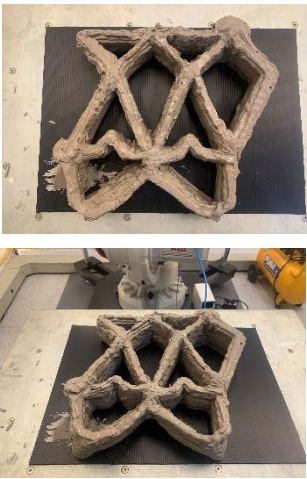
รูปทรงที่ 1 และรูปทรงที่ 2 ที่มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของชิ้นงานทั้งหมดพบว่ารูปทรงแบบที่ 4 แบบที่ 5 แบบที่ 6 และ แบบที่ 7 มีค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุดและค่าความเค้นแรงอัดที่เหมาะสม สามารถพิมพ์ได้ มีความเสี่ยงต่อการพิมพ์ผิดพลาดจากการล้นของวัสดุน้อย แต่ผู้วิจัยคิดเห็นว่ารูปทรงที่ 7 มีศักยภาพในการศึกษาและพัฒนาต่อ เนื่องจากรูปทรงที่ 7 ได้ทำการลดทอนเส้นเคลื่อนที่ที่เกินความจำเป็นออก ช่วยประหยัดวัสดุในการพิมพ์ ถึงแม้ค่าการเปลี่ยนรูปของวัสดุสูงสุดมากขึ้นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ไม่เกิน 1 เซนติเมตร

4.7 ผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

หลังการจำลองการโค้งงอของรูปทรงเมื่อพิมพ์สามมิติ ผู้วิจัยได้นำรูปทรงที่ผ่านการคัดเลือกดังกล่าวมาทดลองพิมพ์สามมิติผลิตชิ้นงานจริง และทำการศึกษาผลลัพธ์การพิมพ์จากการใช้หัวฉีดโมซีเลียมแต่ละประเภท โดยใช้หัวฉีดโมซีเลียม 3 ประเภท ได้แก่ หัวฉีดเห็ดในรุ่น PDA หัวฉีดเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง และหัวฉีดเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างปั่น ผสมดินเหนียว 1 สัดส่วน ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อ เพื่อวัดประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน โดยประเมินความเสี่ยงในการฉีกและเกิดลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานจากการใช้วัสดุแต่ละประเภท ความสามารถในการพิมพ์สามมิติตรงตามรูปทรงที่ถูกออกแบบบนซอฟต์แวร์ รวมถึงผลการใช้งานของข้อต่อที่ออกแบบ โดยสามารถสรุปผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นของแต่ละชิ้นงานได้ดังตารางต่อไปนี้

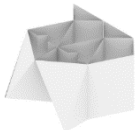
ตารางที่ 4.6

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวฉีด โมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 1.1 ขนาด: 30x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟ่าง		บางจุดเกิดการล้น เส้นพิมพ์ไม่ สม่ำเสมอเนื่องจากเมล็ดข้าวฟ่าง ในดินอุดตันหัวฉีด และจุด เชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้าง เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุล้น ระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความหนา มากเกินไป

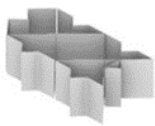
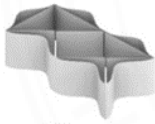
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 1.2 ขนาด: 30x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	 	บางจุดเกิดการล้น เส้นพิมพ์ไม่ สม่ำเสมอเนื่องจากเมล็ดข้าว ฟางในดินอุดตันหัวฉีด และจุด เชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้ำ เคลื่อนที่เข้า ส่งผลให้วัสดุชั้น ระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความ หนาเกินไป รวมถึง ระยะห่างระหว่างชั้นที่ 5 มม. สูงเกินไป เส้นพิมพ์ระหว่างชั้น จึงไม่มั่นคงแข็งแรง
 รูปทรงที่ 2 ขนาด: 30x45x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	 	ขนาดของชิ้นงานมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้พิมพ์ชิ้นงานจำนวนชั้น ไม่มากต่อการพิมพ์หนึ่งครั้ง และเส้นพิมพ์ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเมล็ดข้าวฟางในดิน อุดตันหัวฉีด

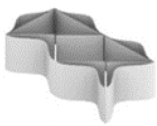
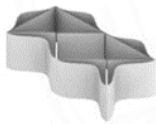
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 3 ขนาด: 15x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	 	เส้นพิมพ์ไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก เมล็ดข้าวฟางในดินอุดตัน และ จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการ ค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุ ล้นระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความ หนาเกินไป
 รูปทรงที่ 4.1 ขนาด: 20x30x15 ซม. หัวฉีด: 10 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	 	เส้นพิมพ์ไม่สม่ำเสมอเนื่องจาก เมล็ดข้าวฟางในดินอุดตัน และ จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการ ค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุ ล้นระหว่างพิมพ์ อีกทั้งเส้นทับ ซ้อนมากเกินไป ส่งผลให้เส้น บางจุดทับซ้อนรวมเป็นเส้น เดียวกัน เส้นจึงเกิดความหนา มากเกินไป

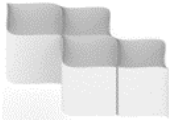
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไม้ซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 4.2 ขนาด: 20x30x15 ซม. หัวฉีด: 10 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน วุ้น PDA	 	เส้นพิมพ์มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากใช้เชื้อในวุ้น PDA วัสดุมีเนื้อเนียนละเอียด แต่ใช้หัวฉีดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. ส่งผลให้เส้นมีขนาดเล็กลงเมื่อพิมพ์ชั้นสูงๆ เส้นเริ่มห่างออกจากกัน และจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุล้นระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความหนามากเกินไป
 รูปทรงที่ 4.3 ขนาด: 20x30x15 ซม. หัวฉีด: 10 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน วุ้น PDA	 	ผลลัพธ์เช่นเดียวกับรูปทรงที่ 4.2

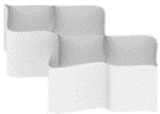
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 5.1 ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	พิมพ์ได้สูงมากขึ้นเนื่องจากลดทอนเส้นการเคลื่อนที่ประหยัวัสดุ และเส้นพิมพ์สม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากปั่นเชื้อในเมล็ดข้าวฟางให้มีขนาดเล็กลง ไม่เกิดการอุดตันหัวพิมพ์ แต่จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุล้นระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความหนาเกินไป
 รูปทรงที่ 5.2 ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	พิมพ์ได้สูงมากขึ้นเนื่องจากลดทอนเส้นการเคลื่อนที่ประหยัวัสดุ เส้นพิมพ์สม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากปั่นเชื้อในเมล็ดข้าวฟางให้มีขนาดเล็กลง ไม่เกิดการอุดตันหัวพิมพ์ และสามารถแก้ปัญหาการค้ำของจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้น ไม่เกิดการล้นของวัสดุ เส้นมีความเสถียร

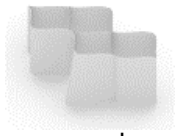
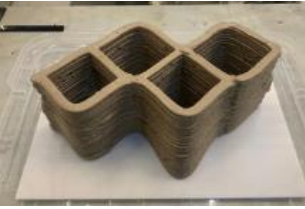
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 6.1 ขนาด: 25x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์คล้ายคลึงรูปทรงที่ 5.2 แต่รูปทรงนี้สามารถพิมพ์ระยะยื่นของชิ้นงานได้มากขึ้นโดยไม่ล้ม แต่จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุล้นระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความหนาเกินไป และเมื่อพิมพ์ชั้นสูงๆ อาจมีการดึงเนื้อวัสดุให้เอนเข้าไปในบางจุดเนื่องจากดินเริ่มแห้ง
 รูปทรงที่ 6.2 ขนาด: 25x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์คล้ายคลึงรูปทรงที่ 6.1 แต่สามารถแก้ปัญหาการค้ำของจุดเชื่อมต่อระหว่างชั้น ไม่เกิดการล้นของวัสดุ เส้นมีความเสถียรมากขึ้น

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 7 ขนาด: 25x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์คล้ายคลึงรูปทรงที่ 6.2 แต่ชิ้นงานสามารถพิมพ์รูปทรงที่มีความเอียงไม่เกิน 15 องศาได้ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความสามารถในการออกแบบและพิมพ์สามมิติรูปทรงที่มีความโค้งได้
 รูปทรงที่ 8.1 (ไม่ระนาบ) ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์การพิมพ์ชิ้นงานโค้งข้อต่อในแนวแกน Z แบบไม่ระนาบเพื่อทดสอบศักยภาพในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์หลายแกน พบว่าสามารถพิมพ์ชิ้นงานได้เสถียรต่อเนื่อง แต่เนื่องจากการพิมพ์แบบไม่ระนาบและไม่เอียงหัวพิมพ์ส่งผลให้บางจุดที่มีความชันมาก หัวพิมพ์มีการปาดโดนผิวเส้นชิ้นงานบางส่วน

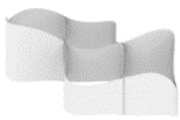
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 8.2 (ไม่ระนาบ) ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์คล้ายคลึงรูปทรงที่ 8.1 แต่จุดเชื่อมต่อระหว่างชั้นมีการค้ำ เคลื่อนที่ช้า ส่งผลให้วัสดุชั้นระหว่างพิมพ์ เส้นเกิดความหนาเกินไป
 รูปทรงที่ 9.1 (ไม่ระนาบ+เอียงหัว) ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	 	ผลลัพธ์การพิมพ์ชิ้นงานโค้งข้อต่อในแนวแกน Z แบบไม่ระนาบและเอียงหัวพิมพ์ ส่งผลให้หัวพิมพ์ไม่ปาดโดนผิวเส้น ชิ้นงาน แต่การเอียงหัวส่งผลให้แรงดันไม่สม่ำเสมอในบางจุดระหว่างการพิมพ์ ส่งผลให้เส้นไม่เสถียร บางจุดวัสดุเส้น เส้นหนาเกินไป รวมทั้งเกิดข้อผิดพลาดของชุดคำสั่ง ส่งผลให้เกิดเส้นซ้อนระหว่างพิมพ์

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตารางผลประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงาน

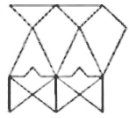
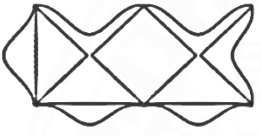
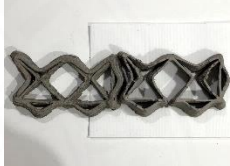
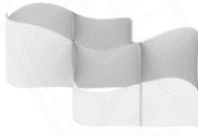
รูปทรง	หัวเชื้อ ไมซีเลียม	ผลลัพธ์ชิ้นงาน	ข้อค้นพบ
 รูปทรงที่ 9.2 (ไม่ระนาบ+เอียงหัว) ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	 	ผลลัพธ์เช่นเดียวกับรูปทรงที่ 9.1
 รูปทรงที่ 10 (ไม่ระนาบ) ขนาด: 20x35x15 ซม. หัวฉีด: 12 มม. ระยะห่างชั้น: 4.5 มม.	เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	 	ผลลัพธ์เช่นเดียวกับรูปทรงที่ 8.1

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

นอกเหนือการวัดประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงานโดยประเมินความเสถียรในการฉีดและเกิดลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานจากการใช้วัสดุแต่ละประเภท ผู้วิจัยได้ทำการวัดประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงานโดยวิเคราะห์ผลการใช้งานของข้อต่อที่ออกแบบเพื่อเป็นข้อมูลประกอบการเลือกและพัฒนาารูปทรงต่อไปด้วยเช่นกัน สามารถสรุปผลการใช้งานของข้อต่อชิ้นงาน ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7

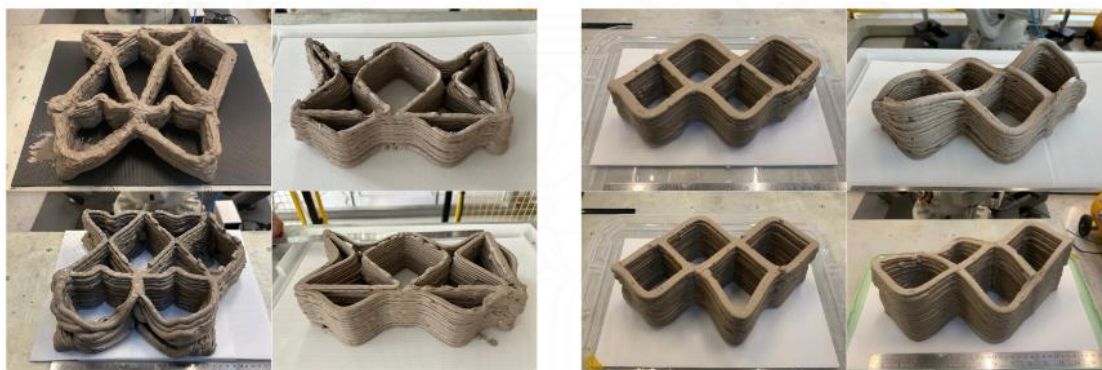
เปรียบเทียบผลลัพธ์ข้อต่อสำหรับการวางประกอบ

รูปทรง	ทิศทางการประกอบ	ผลลัพธ์
 ข้อต่อรูปทรง 1	แนวแกน X และ แนวแกน Y	
 ข้อต่อรูปทรง 2	แนวแกน X และ แนวแกน Y	
 ข้อต่อรูปทรง 3	แนวแกน X และ แนวแกน Y	
 ข้อต่อรูปทรง 4	แนวแกน X และ แนวแกน Y	
 ข้อต่อรูปทรง 5	แนวแกน Z	

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

จากการทดลองพิมพ์สามมิติชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ผลของข้อต่อพบว่ารูปทรงที่ 1 ซึ่งเป็นรูปทรงจากกรณีศึกษา มีลักษณะข้อต่อแนวแกน X ไม่ซับซ้อนสามารถต่อได้ง่าย แต่เนื่องจากเส้นพิมพ์สามมิติยาวเกินไปไม่มีจุดตัดส่งผลให้ไม่มั่นคงแข็งแรง อีกทั้งไม่มีข้อต่อในแนวแกน Y ส่งผลให้เมื่อต้องการประกอบในแนวแกน Y ต้องทำการพลิกชิ้นงานประกอบชนกัน ข้อต่อของรูปทรงที่ 2 จึงมีการพัฒนาจากรูปทรงที่ 1 โดยเพิ่มข้อต่อในแนวแกน Y และเพิ่มข้อต่อเล็กในแนวแกน X ทั้งสองจุดทำหน้าที่เป็นข้อต่อและเสริมจุดค้ำเพิ่มความแข็งแรงให้เส้นที่เกิดข้อผิดพลาดของรูปทรงที่ 1 แต่พบว่าข้อต่อมีขนาดเล็กและรอยหยักมากเกินไป เมื่อพิมพ์สามมิติเนื้อดินมีความหนา ส่งผลให้มีความเสี่ยงมากในการประกอบติดตั้งไม่พอดี ข้อต่อรูปทรงที่ 3 จึงมีการปรับเปลี่ยนเส้นให้มีความโค้ง

เนื่องจากข้อผิดพลาดรอยหยักที่มากเกินไปของรูปทรงที่ 2 เมื่อพิมพ์สามมิติพบว่าข้อต่อรูปทรงนี้สามารถนำมาประกอบติดตั้งได้ทั้งแนวแกน X และแนวแกน Y แต่เนื่องจากได้รับข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญพบว่าลักษณะรูปทรงดังกล่าวเกิดเส้นที่เกินความจำเป็น ส่งผลให้ใช้ปริมาณวัสดุมากในการพิมพ์สามมิติแต่ละชิ้น จึงต้องมีการลดทอนเส้นลงแต่ยังคงความแข็งแรงและพื้นที่การใช้งาน พัฒนาเป็นข้อต่อของรูปทรงที่ 4 ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับข้อต่อของรูปทรงที่ 3 สามารถประกอบได้ในแนวแกน X และ แนวแกน Y เช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าแนวแกน X ถูกค้ำยันระหว่างชิ้นงานเพียงด้านเดียว แต่การออกแบบดังกล่าวช่วยลดทอนเส้น ประหยัดวัสดุในการพิมพ์แต่ละชิ้น ส่งผลให้พิมพ์ชิ้นงานได้สูงมากขึ้นต่อการพิมพ์ในแต่ละครั้ง นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบบข้อต่อรูปทรงที่ 5 ซึ่งทำหน้าที่เป็นข้อต่อในแนวแกน Z โดยออกแบบเส้นการพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบเพื่อให้เกิดข้อต่อที่สามารถนำชิ้นงาน 2 ชิ้นพลิกประกอบติดตั้งกันอย่างพอดี



ภาพที่ 4.8 (ภาพซ้าย) ภาพรูปทรงชุดที่ 1. (ภาพขวา) ภาพรูปทรงชุดที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากการทดลองผลิตชิ้นงานจริง สามารถสรุปผลลัพธ์ประสิทธิภาพการพิมพ์ชิ้นงานโดยประเมินจากความเสถียรในการฉีดลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานจากการใช้หัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภท และผลการใช้งานของข้อต่อที่ออกแบบพบว่ารูปทรงชุดที่ 2 หรือตั้งแต่รูปทรงที่ 5 ถึงรูปทรงที่ 10 มีผลลัพธ์ประสิทธิภาพการพิมพ์ระดับดีถึงดีมาก ทั้งในส่วนของรูปทรงที่มีการลดทอนเส้นที่เกิดการซ้อนทับมากเกินไป ลดเส้นทางการเคลื่อนที่ ประหยัดวัสดุในการพิมพ์แต่ละชิ้น ส่งผลให้พิมพ์ได้สูงมากขึ้น รวมทั้งมีการออกแบบข้อต่อในการประกอบทุกแนวแกน ข้อต่อไม่ซับซ้อน สามารถประกอบติดตั้งได้ง่าย ลดความเสี่ยงการประกอบติดตั้งไม่พอดีจากขนาดเส้น แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำรูปทรงดังกล่าวมาใช้เป็นรูปทรงตั้งต้นในการออกแบบผนังพารามเมตริก นอกจากนี้ยังพบว่าการเลือกใช้ประเภทหัวเชื้อไมซีเลียมส่งผลต่อคุณภาพของการพิมพ์อย่างชัดเจน จากรูปทรงชุดที่ 1 ชิ้นงานมีการเลือกใช้หัวเชื้อไมซีเลียมจากเมล็ดข้าวฟ่าง พบว่าลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานที่เกิดขึ้น มีอนุภาคไม่สม่ำเสมอ เกิดความหยابบนพื้นผิวลักษณะขรุขระ เส้นพิมพ์ไม่เสถียร และบางจุดเส้นเกิดการขาดเนื่องจากขนาดอนุภาคของเมล็ดที่ใหญ่ทำให้เกิดการอุดตันในหัวพิมพ์ ส่งผลให้คุณภาพชิ้นงานลดลง

ในขณะที่ชิ้นงานที่มีการเลือกใช้หัวเชื้อไมซีเลียมจากวุ้น PDA พบว่าลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานที่เกิดขึ้นมีความเสถียรในระดับดี เนื่องจากวุ้น PDA ถูกปั่นเป็นน้ำก่อนนำไปผสมวัสดุดินเหนียว ส่งผลให้ไม่มือนุภาคขนาดใหญ่ที่จะก่อให้เกิดการอุดตันหัวพิมพ์ สามารถพิมพ์ได้อย่างสม่ำเสมอเรียบเนียน แต่เนื่องจากวุ้น PDA มีอนุภาคขนาดเล็กเมื่อต้องการผสมกับดินเหนียว จึงต้องใช้ปริมาณวุ้น PDA มาก ส่งผลให้ต้นทุนสูงขึ้น ในการทดลองพิมพ์สามมิติผลิตรูปทรงชุดที่ 2 ผู้วิจัยจึงได้มีการทดลองนำหัวเชื้อไมซีเลียมจากเมล็ดข้าวฟ่างมาผ่านการปั่นให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงก่อนผสมวัสดุดินเหนียวช่วยให้กระจายตัวได้ดีขึ้น พบว่าลักษณะเส้นพิมพ์ของชิ้นงานที่เกิดขึ้นมีความเสถียรในระดับดี มีความเสถียรในการพิมพ์ ผู้วิจัยจึงได้เลือกหัวเชื้อไมซีเลียมจากเมล็ดข้าวฟ่างปั่นเป็นหัวเชื้อไมซีเลียมที่เหมาะสมสำหรับใช้ภายในงานวิจัยนี้

4.8 ผลการเติบโตของไมซีเลียม

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาประสิทธิภาพของหัวเชื้อไมซีเลียมชนิดต่าง ๆ ในการผลิตพิมพ์สามมิติ โดยวัดประสิทธิภาพจากปริมาณเติบโตของไมซีเลียม และการไม่ติดเชื้อ ทดลองโดยใช้วิธีการผสมหัวเชื้อไมซีเลียมกับดินเหนียว 3 ประเภท ได้แก่ หัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง และหัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างปั่น เพิ่มเติมด้วยหัวเชื้อเห็ดที่ใส่เพิ่มเติมภายหลังอีก 2 ประเภท คือ ก้อนเชื้อเห็ดและเชื้อเห็ดโตเต็มที่ ก่อนนำดินเหนียวมาผสมกับหัวเชื้อไมซีเลียมดังกล่าวในอัตราส่วน 1:1 ผ่านกระบวนการนึ่งฆ่าเชื้อ และวัดผลการเติบโตของไมซีเลียมทุก 1 สัปดาห์ จำนวน 2 ครั้ง สามารถสรุปผลลัพธ์ได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.8

ตารางผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน

หัวเชื้อไมซีเลียม	หัวเชื้อไมซีเลียมเพิ่ม	1 สัปดาห์	2 สัปดาห์	ข้อค้นพบ
เชื้อในเมล็ดข้าวฟ่าง	ไม่ใส่			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมีการเติบโตจากเมล็ดข้าวฟ่างได้ดี แต่เมื่อสัปดาห์ที่ 2 เมล็ดข้าวฟ่างดังกล่าวมีการติดเชื้อราเขียวภายในเมล็ดก่อนแพร่สู่ชิ้นงาน

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ตารางผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน

หัวเชื้อ ไมซีเลียม	หัวเชื้อไมซี เลียมเพิ่ม	1 สัปดาห์	2 สัปดาห์	ข้อค้นพบ
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	ไม่ใส่			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมีการเติบโตเล็กน้อย และสัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมมีการจับกลุ่ม แต่เกิดการติดเชื้อราเขียวก่อน
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง	ไม่ใส่			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมีการเติบโตช้า และสัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมยังคงเติบโตเล็กน้อย และติดเชื้อราเขียว
เชื้อในวุ้น PDA	ไม่ใส่			ไมซีเลียมมีอัตราการเติบโตน้อยมาก เติบโตภายในเนื้อวัสดุไม่เติบโตออกมาภายนอกชิ้นงาน
เชื้อในวุ้น PDA	ไม่ใส่			ไมซีเลียมมีอัตราการเติบโตน้อยมาก เติบโตภายในเนื้อวัสดุไม่เติบโตออกมาภายนอกชิ้นงาน
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	ไม่ใส่			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมีการเติบโตเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมเติบโตเล็กน้อย และมีการติดเชื้อราเขียว

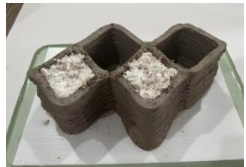
ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ตารางผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน

หัวเชื้อ ไมซีเลียม	หัวเชื้อไมซี เลียมเพิ่ม	1 สัปดาห์	2 สัปดาห์	ข้อค้นพบ
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมี การเติบโตภายใน ชิ้นงานได้ดี สัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมเติบโตและจับ ตัวเป็นโฟม แต่มีการติด เชื้อของราเขียวบนพื้น ผิวชิ้นงาน
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			ผลลัพธ์คล้ายกับชิ้นงาน ก่อนหน้านี้ แต่ลักษณะ การเติบโตของไมซีเลียม จะไม่กระจุกตัวเป็น ก้อน ภายในชิ้นงาน
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียมมี การเติบโตภายใน ชิ้นงานได้ดี สัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมเติบโตและจับ ตัวเป็นโฟมบน ผิวชิ้นงานดีแต่ยังคงการ ติดเชื้อของราเขียวบน ผิวชิ้นงานเช่นเดิม
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางป่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			ผลลัพธ์คล้ายชิ้นงาน ก่อนหน้านี้ แต่ไมซีเลียม เติบโตและเกาะกิน ผิวชิ้นงานได้มากกว่า

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ตารางผลการเติบโตของไมซีเลียมบนชิ้นงาน

หัวเชื้อ ไมซีเลียม	หัวเชื้อไมซี เลียมเพิ่ม	1 สัปดาห์	2 สัปดาห์	ข้อค้นพบ
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	ก้อนเชื้อ เห็ด และ เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง			สัปดาห์ที่ 1 ไมซีเลียม ภายในชิ้นงานมีการ เติบโตได้ดีมาก แต่เมล็ด ข้าวฟางติดเชื้อราเขียว สัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียม เติบโตบนพื้นผิววัสดุได้ ดีมาก จับตัวเป็นก้อน โฟม เป็นสัญญาณการ จะเกิดดอกเห็ด
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	ก้อนเชื้อ เห็ด และ เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟาง			ผลลัพธ์คล้ายชิ้นงาน ก่อนหน้านี้ ไมซีเลียมมี การเติบโตภายในได้ดี แต่ยังเกิดเชื้อราเขียว
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			ไมซีเลียมมีการเติบโต ช้าและปริมาณค่อนข้าง น้อย รวมทั้งมีการติด เชื้อราเขียว
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			ผลลัพธ์คล้ายกับชิ้นงาน ก่อนหน้านี้
เชื้อใน เมล็ดข้าว ฟางปั่น	ก้อนเชื้อ เห็ด			สัปดาห์ที่ 2 ไมซีเลียมมี การเติบโตได้ดีและเร็ว มาก เกิดการจับตัวเป็น ก้อนโฟม เป็นสัญญาณ การจะเกิดดอกเห็ด

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

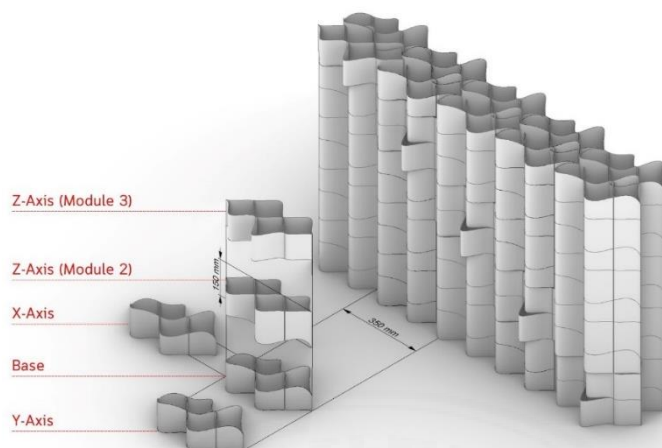


ภาพที่ 4.9 (ภาพซ้าย) ภาพชิ้นงานสำหรับวัดผลการเติบโตชุดที่ 1. (ภาพขวา) ภาพชิ้นงานสำหรับวัดผลการเติบโตชุดที่ 2. โดย ผู้วิจัย, 2567.

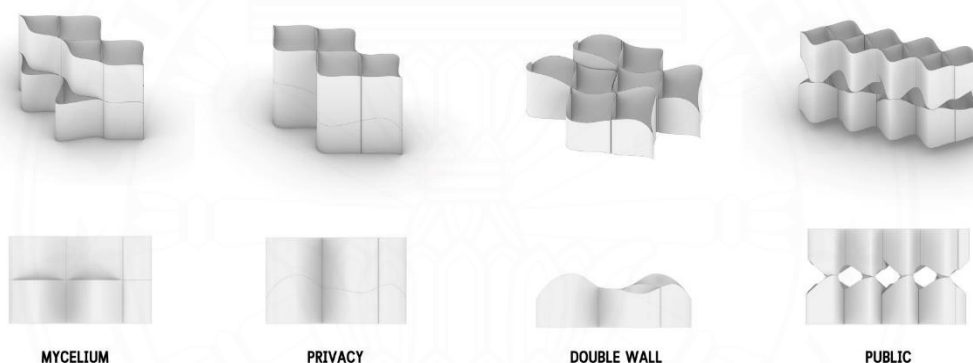
จากการทดลองพบว่าชิ้นงานสำหรับวัดผลการเติบโตชุดที่ 1 ที่เลือกใช้หัวเชื้อเห็ดเมล็ดข้าวฟ่าง ส่งผลให้ไมซีเลียมเติบโตได้ระยะแรก แต่เมื่อผ่านไปเมล็ดข้าวฟ่างเป็นปัจจัยที่ทำให้ติดเชื้อได้เช่นกัน การเลือกใช้หัวเชื้อเห็ดวุ้น PDA ไม่ส่งผลให้เกิดการเติบโตของไมซีเลียมออกมานอกผิวชิ้นงาน รวมทั้งการไม่ใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติม ส่งผลให้เมื่อดินแห้ง ไมซีเลียมจะเริ่มหยุดการเติบโตเช่นกัน ในขณะที่ชิ้นงานสำหรับวัดผลการเติบโตชุดที่ 2 มีการใช้เชื้อเห็ดเมล็ดข้าวฟ่างป่น ส่งผลให้ไมซีเลียมที่เติบโตบนพื้นผิวลดลง แต่ให้ประสิทธิภาพการเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างชัดเจน อีกทั้งลดการติดเชื้อจากเมล็ดข้าวฟ่างลงได้บางส่วน ถึงแม้จะเกิดราเขียวอยู่และการใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติมส่งผลให้ไมซีเลียมยังสามารถเติบโตได้แม้ดินจะเริ่มแห้ง สรุปได้ว่าปริมาณไมซีเลียมบนพื้นผิวไม่สามารถเติบโตได้ถึง 50% แต่บริเวณที่ทำการใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติมมีการเติบโตของไมซีเลียมดีมาก และมีการเกิดของดอกเห็ด

4.9 ผลการประกอบติดตั้ง

ผู้วิจัยได้นำรูปทรงดังกล่าวมาทดลองวางประกอบติดตั้งในแต่ละแนวแกนทั้งแนวแกน x, y และ z เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบผนังเชิงพารามเมตริกและเป็นต้นแบบการแบ่งชิ้นงานสำหรับเตรียมผลิต เนื่องจากเครื่องมือในงานวิจัยนี้ไม่สามารถพิมพ์ชิ้นงานผนังได้ภายในครั้งเดียว



ภาพที่ 4.10 ภาพแนวความคิดการประกอบติดตั้งชิ้นงานในแต่ละแนวแกนโดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 4.11 ภาพจำลองต้นแบบรูปทรงและการใช้งานสำหรับการออกแบบผนังพาราเมตริก. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากภาพแสดงให้เห็นถึงแนวทางและความเป็นไปได้ของต้นแบบรูปทรงและการใช้งาน เพื่อนำต้นแบบรูปทรงดังกล่าวมาเป็นรูปทรงตั้งต้นและเป็นแนวทางในการการออกแบบผนังเชิงพาราเมตริก โดยแบบที่ 1 รูปทรงจะมีการยื่นเพื่อรองรับการใส่ซี่เหลื่อมมากกว่าปกติได้ ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนี้มีการเติบโตของไมซีเลียมได้ดี และอาจเกิดดอกเห็ด แบบที่ 2 เป็นชิ้นงานตั้งต้นวางซ้อนกัน เกิดเป็นผนังที่บเหมาะกับพื้นที่ที่ต้องการความเป็นส่วนตัว แต่ยังสามารปรับระยะการยื่นของผนัง เกิดเป็นแผงกันแดดภายในตัวเอง ลดรังสีความร้อนที่กระทบผนัง แบบที่ 3 คือการวางซ้อนในแนวแกน Y เหมาะกับพื้นที่ที่ต้องการกันความร้อนหรือเสียงรบกวน รวมถึงเพิ่มความสามารถในการรับแรงมากขึ้น และแบบที่ 4 เป็นการทดลองออกแบบช่องเปิดสำหรับพื้นที่ที่ไม่ต้องการความเป็นส่วนตัวมาก หรือต้องการเปิด รับแสงแดด ลม เข้าอาคาร

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวางประกอบติดตั้งของชิ้นงานในแต่ละแนวแกนตามแนวคิดการประกอบดังกล่าว โดยจากภาพแสดงให้เห็นประกอบติดตั้งของรูปทรงชุดที่ 1 และรูปทรงชุดที่ 2 พบว่าสามารถนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้งได้จริงในแต่ละแนวแกน



ภาพที่ 4.12 ภาพถ่ายการวางสองชิ้นงานชุดที่ 1 ในแต่ละแนวแกน. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายการวางสองชิ้นงานชุดที่ 2 ในแต่ละแนวแกน. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากการทดสอบประกอบติดตั้งระหว่าง 2 ชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงได้นำชิ้นงานอื่นทั้งหมดจำนวน 9 ชิ้นงานมาประกอบติดตั้งด้วยเช่นกัน พบว่าชิ้นงานสามารถวางประกอบติดตั้งได้ดีในทุกแนวแกน รวมถึงชิ้นงานที่ถูกออกแบบเพื่อเป็นข้อต่อในแนวแกน Z พบว่าสามารถประกอบติดตั้งได้อย่างพอดีเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 4.14 หลังจากประกอบติดตั้งผู้วิจัยได้วัดผลการเติบโตของไมซีเลียมที่เชื่อมระหว่างชิ้นงานเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์พบว่าไมซีเลียมมีการเติบโตระหว่างชิ้นงานและเกิดดอกเห็ดบริเวณระหว่างชิ้นงาน และภายในชิ้นงานด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.14 ภาพถ่ายการวางประกอบชิ้นงานจำนวน 9 และ 7 ชิ้นงาน. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายการวางประกอบชิ้นงานเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 4.16 ผลลัพธ์การเติบโตของไมซีเลียมระหว่างชิ้นงานเมื่อผ่านไป 1 สัปดาห์. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากภาพแสดงให้เห็นผลลัพธ์การเติบโตของไมซีเลียมที่ได้ทำการใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมภายใน มีการเติบโตได้ดี แผ่ขยายจับตัวเป็นก้อนแข็งแรงจนเกิดการเติบโตของดอกเห็ดในหลายบริเวณเมื่อผ่านการบ่มเพียง 1 สัปดาห์ โดยจากข้อสมมติฐานการวิจัยที่คาดว่าเมื่อนำชิ้นงานมาวางเรียงต่อกันไมซีเลียมจะเติบโตช่วยยึดติดระหว่างชิ้นงานไม่ให้ขยับ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าว โดยการนำชิ้นงาน 2 ชิ้นงานที่ถูกติดตั้ง และมีการเติบโตของไมซีเลียมหลังผ่านไป 2 สัปดาห์ มาทำการยกขึ้นในแนวแกน Z เพื่อดูผลลัพธ์ว่าไมซีเลียมที่เติบโตสามารถช่วยยึดติดระหว่างชิ้นงานไม่ให้ขยับหรือร่วงได้หรือไม่ ค้นพบว่าไมซีเลียมที่เติบโตสามารถยึดติดระหว่างชิ้นงานไม่ให้ขยับได้จริงในทุกแนวแกน ดังนั้นเมื่อนำกระบวนการนี้ไปทำการก่อสร้างจริง คาดว่าไมซีเลียมจะเติบโตยึดเกาะระหว่างทุกชิ้นงาน ส่งผลให้สามารถติดตั้งชิ้นงานได้โดยไม่ต้องใช้วัสดุผสมเพิ่มเติม

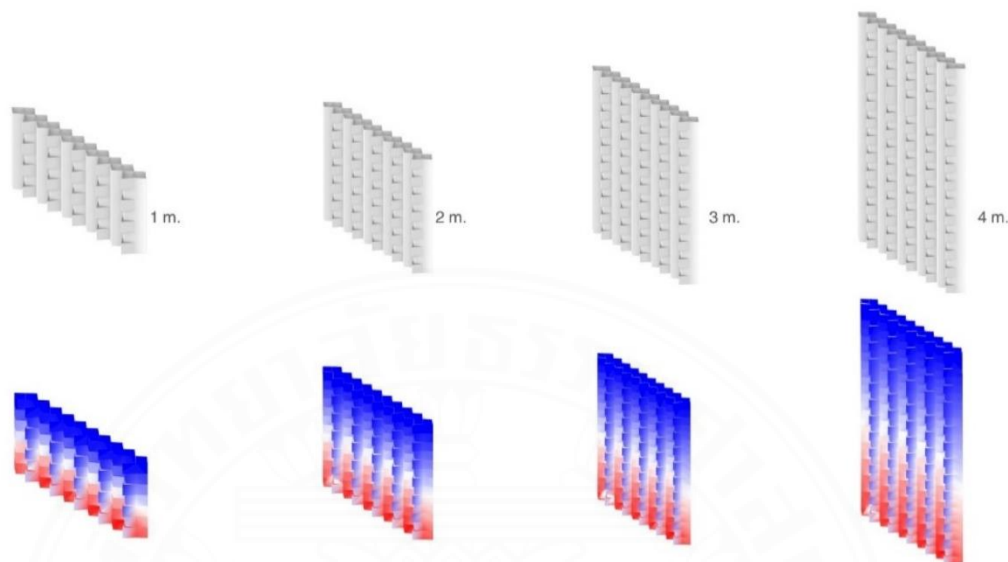


ภาพที่ 4.17 ผลลัพธ์การยึดติดระหว่างชิ้นงานด้วยไมซีเลียม. โดย ผู้วิจัย, 2567.

4.10 ผลการจำลองความเครียดแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D

จากการศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและคำนวณพบว่าวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตที่มีการใช้ดินเหนียวมีค่าความเครียดแรงอัดที่ยอมรับได้คือ 1.33 MPa ผู้วิจัยจึงได้ทดลองนำชิ้นงานวางเรียงต่อเป็นผนังและจำลองความเครียดแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D เพื่อหาความสูงของผนังที่เหมาะสมและปลอดภัยต่อการใช้งาน พบว่าความสูงของผนังที่เหมาะสมคือ 3 เมตร ไม่ควรเกิน 4 เมตรเนื่องจากค่าความเค้นแรงอัดที่จำลองได้คือ 1.44 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความเครียดแรงอัด

ที่ยอมรับได้ โดยแสดงผลในรูปแบบค่าสี พื้นที่ที่แสดงผลสีแดงคือพื้นที่ที่ได้มีความเค้นแรงอัดมาก ดังภาพและตารางต่อไปนี้



ภาพที่ 4.18 ภาพจำลองความเค้นแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D. โดย ผู้วิจัย, 2567.

ตารางที่ 4.9

ผลการจำลองความเค้นแรงอัดโดยส่วนเสริม Karamba3D เพื่อใช้ในงานวิจัย

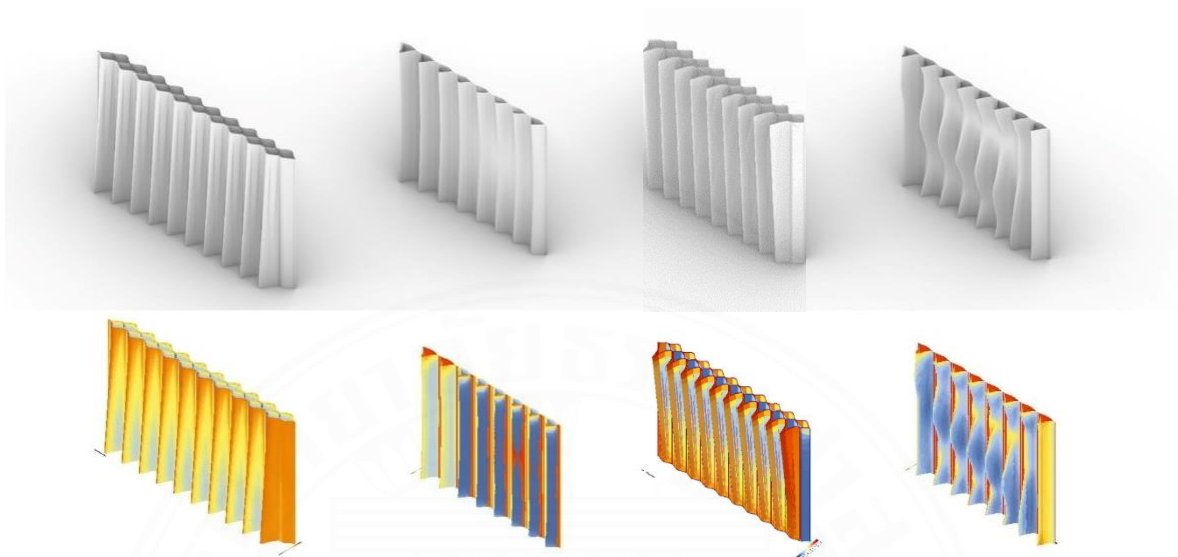
ความสูง	Compressive Stress (MPa)
1 เมตร	0.22
2 เมตร	0.43
3 เมตร	0.84
4 เมตร	1.44

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

4.11 ผลการปรับชิ้นงานอ้างอิงจากข้อมูลการคำนวณรังสีความร้อนที่ตกกระทบผนัง

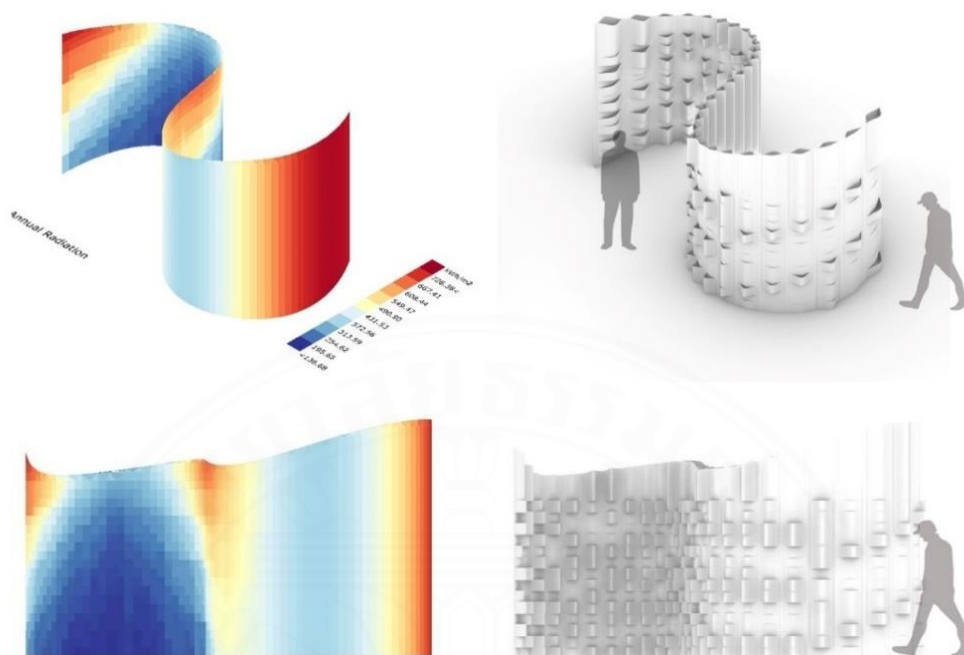
ผู้วิจัยได้นำแนวทางในการพัฒนาออกแบบผนังเชิงพารามตริกจากหัวข้อ 4.9 มาพัฒนาชุดคำสั่งภายในส่วนเสริม Grasshopper เพื่อขึ้นรูปทรงผนังตาม 4 แนวคิดดังกล่าว รวมทั้งมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของผนังแต่ละแนวคิดโดยใช้ปลั๊กอิน Ladybug ในการอ้างอิงข้อมูลการวิเคราะห์คำนวณรังสีความร้อนที่ตกกระทบกับรูปทรงของผนังที่ออกแบบมาปรับชิ้นงานให้มีความแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองออกแบบความเป็นไปได้ของผนังเพื่อจำลอง

ผลลัพธ์การปรับชิ้นงาน รูปทรงของผนังของแต่ละแนวคิดและแสดงค่ารังสีความร้อนบนพื้นผิวที่ได้รับได้ดังต่อไปนี้



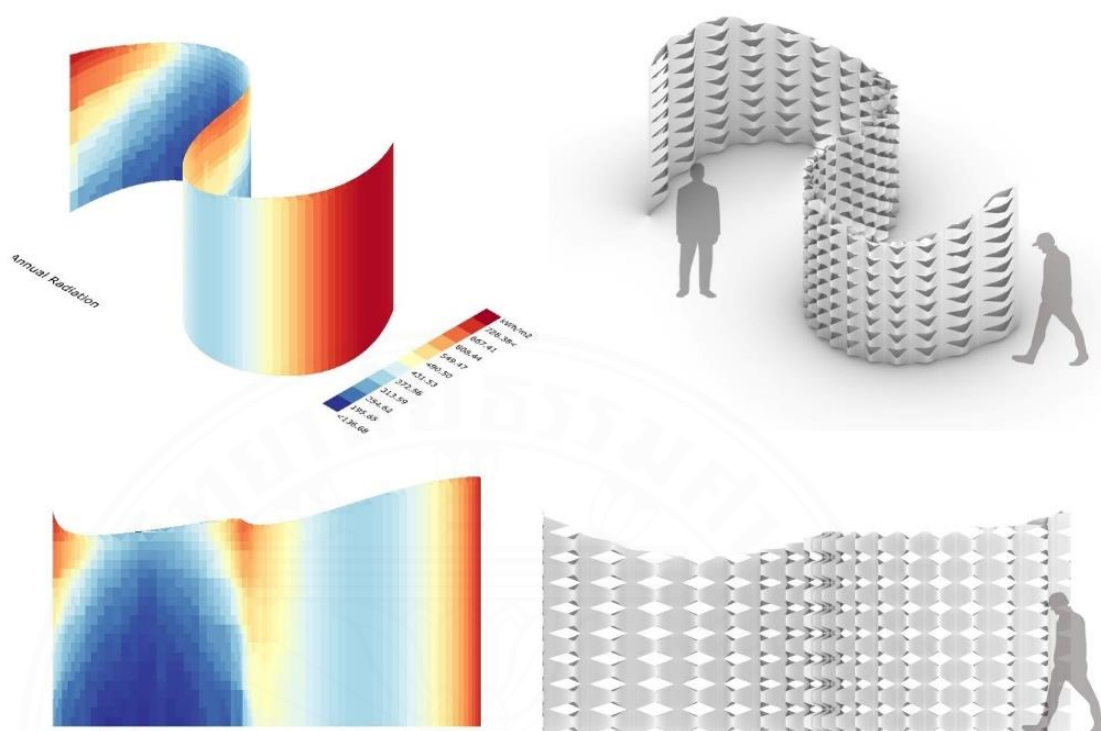
ภาพที่ 4.19 ตัวอย่างผนังแผงบังความร้อนและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง. โดยผู้วิจัย, 2567.

ผนังจากแนวคิดในการทำแผงบังความร้อน โดยจากภาพแสดงให้เห็นตัวอย่างของผนังที่มีระยะการยื่นของผนังแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน เพื่อทำหน้าที่บังแสงแดด ลดรังสีความร้อนที่ตกกระทบผิว โดยพื้นที่ที่มีการยื่นมากจะเกิดเงา ค่าสีในการแสดงผลการจำลองรังสีความร้อนด้วยปลั๊กอิน Ladybug จึงมีค่าสีน้ำเงินซึ่งหมายถึงพื้นที่บริเวณนี้ได้รับค่ารังสีความร้อนน้อย ในขณะที่พื้นที่ที่มีระยะการยื่นน้อย หรือเป็นผนังเรียบ ค่าสีจากการแสดงผลรังสีความร้อนจะแสดงผลเป็นสีแดง หมายถึงพื้นที่บริเวณนี้ได้รับรังสีความร้อนมาก โดยผู้วิจัยจะนำตัวอย่างต้นแบบผนังดังกล่าวนี้ไปบูรณาการร่วมกับการออกแบบสถาปัตยกรรมในแต่ละบริบทต่อไป



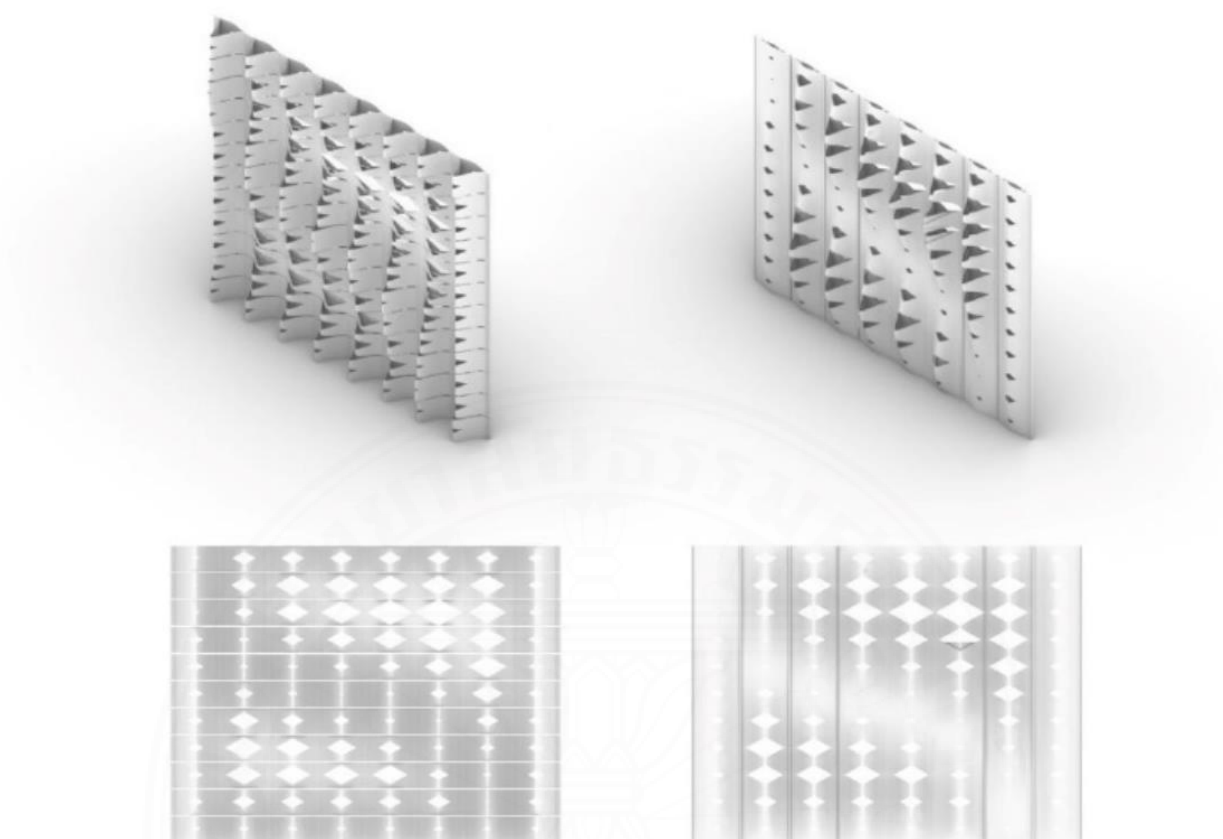
ภาพที่ 4.20 ตัวอย่างผนังแผงปลูกดอกเห็ดและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง. โดย ผู้วิจัย, 2567.

นอกเหนือจากการยื่นเพื่อบังแสงแดด ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบระยะยื่นดังกล่าวเฉพาะบางชั้นส่วนเพื่อทำหน้าที่รองรับเป็นพื้นที่ใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติม เนื่องจากผลการทดลองพบว่าหากมีพื้นที่ใส่เชื้อไมซีเลียมเพิ่มเติมจะเพิ่มประสิทธิภาพการเติบโตของไมซีเลียม และเพิ่มโอกาสการเกิดดอกเห็ดได้ จากภาพสามารถแบ่งชั้นงานเป็นชั้นงานสำหรับการเติบโตของไมซีเลียมพร้อมดอกเห็ด และชั้นงานสำหรับการเติบโตเฉพาะไมซีเลียม โดยแนวคิดนี้สามารถนำไปออกแบบเป็นผนังผลิตอาหารภายในสถาปัตยกรรมได้



ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างผนังช่องเปิดและจำลองรังสีความร้อนผิวผนัง.โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากการออกแบบรูปทรงพิมพ์และทดลองพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบพบว่าสามารถนำมาออกแบบเป็นช่องเปิดภายในผนังได้เช่นกัน เนื่องจากเมื่อออกแบบช่องเปิด และต้องแบ่งชิ้นงานสำหรับการผลิตหากพิมพ์สามมิติระนาบเรียบจะผลิตได้ค่อนข้างยาก การพิมพ์สามมิติระนาบไม่เรียบได้โดยใช้แขนหุ่นยนต์จึงสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบช่องเปิดโดยอ้างอิงข้อมูลการวิเคราะห์คำนวณรังสีความร้อนที่ตกกระทบกับรูปทรงของผนังที่ออกแบบจากปลั๊กอิน Ladybug มาใช้กำหนดขนาดของช่องเปิดให้มีขนาดช่องเปิดเล็กใหญ่ในแต่ละพื้นที่ได้ตามบริบทของพื้นที่และความต้องการ ดังภาพ 4.19 นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทดลองออกแบบโดยรวมทั้งสามแนวคิดที่กล่าวมาได้เป็นตัวอย่างต้นแบบผนังดังรูปที่ 4.20 ซึ่งมีระยะยื่นของผนังเช่นเดียวกับแผงบังแดด แต่มีการเจาะช่องเปิด และออกแบบพื้นที่ใส่เชื้อเพลิงเพิ่มเติมเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 4.22 ตัวอย่างการออกแบบผนังแผงกันแดดร่วมกับพื้นที่ปลูกดอกเห็ดและช่องเปิด โดย ผู้วิจัย, 2567.

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษากระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียนคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม ได้ดำเนินการศึกษาและทดลองเชิงวัสดุ การพัฒนาส่วนเครื่องมือซอฟต์แวร์ และออกแบบรูปทรงสำหรับการผลิตชิ้นงานสำหรับพิมพ์สามมิติ และผ่านการทดสอบผลิตชิ้นงานจริง แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือและซอฟต์แวร์มีความสามารถในการใช้งานจริง พร้อมเสนอกระบวนการผลิตที่บูรณาการวัสดุชีวภาพ เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติโดยใช้แขนหุ่นยนต์ ผสมกับการออกแบบองค์ประกอบสถาปัตยกรรมเชิงพารามетริก เสริมสร้างองค์ความรู้ให้กับวงการสถาปัตยกรรมในการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว เนื่องจากปัจจุบันมีการศึกษาและทดลองนำวัสดุไมซีเลียนคอมโพสิตมาใช้ในการผลิตด้วยระบบการพิมพ์สามมิติจำนวนไม่มากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาและผลิตชิ้นงานในขนาดของงานสถาปัตยกรรม ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้จึงช่วยเติมเต็มช่องว่างการวิจัยดังกล่าว อีกทั้งการทดลองผลิตและประเมินศักยภาพชี้ให้เห็นข้อดีและข้อจำกัดของเทคโนโลยีให้สถาปนิก นักออกแบบนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป และชี้ให้เห็นทางเลือกตลาดใหม่ให้กับเกษตรกรปลูกเห็ด สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับอุตสาหกรรมเห็ดภายในประเทศไทย

5.1 สรุปศักยภาพหัวเชื้อไมซีเลียน

ตารางที่ 5.1

สรุปผลลัพธ์ศักยภาพหัวเชื้อไมซีเลียนแต่ละประเภท

ประเภทเชื้อไมซีเลียน	ความแข็งแรงของเชื้อ	ความสามารถในการพิมพ์	การติดเชื้อ	ระยะเวลาไมซีเลียนเติบโต	ปริมาณไมซีเลียนที่เติบโต
หัวเชื้อเห็ดในรุ่น PDA	มาก	ดีมาก	น้อย	ไม่เติบโต	ไม่เติบโต
หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่าง	มาก	ปานกลาง	ปานกลาง	เร็ว	มาก
หัวเชื้อเห็ดในเมล็ดข้าวฟ่างปั่น	มาก	ดีมาก	ปานกลาง	เร็ว	มาก
ก้อนเชื้อเห็ด	ปานกลาง	ดี	มาก	ปานกลาง	ปานกลาง
เชื้อเห็ดโตเต็มที่	น้อย	ดี	มาก	ไม่เติบโต	ไม่เติบโต

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนวัสดุที่มีความเหมาะสมมากที่สุดภายในงานวิจัยนี้คือ ใช้ปริมาณวัสดุดินเหนียว 1 กิโลกรัม หัวเชื้อไมซีเลียม 100 กรัม ต่อปริมาณน้ำ 300 มิลลิลิตร และจากการศึกษาการเลือกใช้เชื้อไมซีเลียมสำหรับการพิมพ์สามมิติและทดลองผลิตชิ้นงานจริง พบว่าลักษณะทางกายภาพของหัวเชื้อและขนาดของอนุภาคมีผลต่อประสิทธิภาพการพิมพ์และคุณภาพของชิ้นงานอย่างชัดเจน โดยหัวเชื้อไมซีเลียมในเมล็ดข้าวฟ่างที่ถูกบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง มีความเหมาะสมในการใช้งานสูงสุด เนื่องจากช่วยลดการอุดตันของหัวพิมพ์ ลดความหยาบของพื้นผิวส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานเรียบเนียนและมีคุณภาพดี แม้ว่าหัวเชื้อเมล็ดข้าวฟ่างจะมีอัตราการเติบโตสูงสุด แต่ขนาดอนุภาคของเมล็ดที่ใหญ่ทำให้เกิดการอุดตันในหัวพิมพ์ ส่งผลให้คุณภาพชิ้นงานลดลง อนุภาคไม่สม่ำเสมอ เกิดความหยาบบนพื้นผิว ดังนั้นการบดเมล็ดข้าวฟ่างให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงก่อนผสมช่วยให้กระจายตัวได้ดีขึ้น และลดปัญหาดังกล่าว แม้ว่าอัตราการเติบโตของไมซีเลียมบนพื้นผิวชิ้นงานจะลดลงเล็กน้อย แต่สามารถยอมรับได้ในแง่ของประสิทธิภาพโดยรวม นอกจากนี้ผู้วิจัยคิดเห็นว่าหัวเชื้อไมซีเลียมประเภทหัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA และก้อนเชื้อเห็ดยังสามารถนำไปศึกษาและพัฒนาต่อได้ เนื่องจากหัวเชื้อเห็ดในวุ้น PDA ที่บดเป็นน้ำก่อนผสมกับดินเหนียว ทำให้อนุภาคกระจายตัวสม่ำเสมอส่งผลให้พื้นผิวชิ้นงานเรียบเนียน ความสามารถในการพิมพ์ดีมาก เพียงแต่ผลลัพธ์ไมซีเลียมไม่เติบโตบนพื้นผิวชิ้นงานที่ผู้วิจัยค้นพบนั้นมาจากการผสมวัสดุเพียงสัดส่วนเดียว เช่นเดียวกันก้อนเชื้อเห็ดเมื่อนำมาบดมีลักษณะอนุภาคและประสิทธิภาพการพิมพ์คล้ายหัวเชื้อไมซีเลียมในเมล็ดข้าวฟ่างบด หากมีการศึกษาและทดลองเพิ่มเติมในเรื่องของสัดส่วนหัวเชื้อไมซีเลียมดังกล่าวต่อวัสดุดินเหนียว คาดว่าจะได้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น เนื่องจากการทดลองนำก้อนเชื้อเห็ดมาใส่ภายในชิ้นงานภายหลังมีอัตราการเติบโตของไมซีเลียมดีมาก

5.2 สรุปคุณสมบัติของผลิตผลจากการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์



FLEXIBILITY



LOCAL RESOURCE



REGENERATE



FOOD PRODUCE



BIODEGRADABLE

ภาพที่ 5.1 คุณสมบัติของผลิตผลจากการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมโดยใช้แขนหุ่นยนต์โดย. ผู้วิจัย, 2567.

วิจัยนี้เผยให้เห็นถึงศักยภาพของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตในฐานะวัสดุก่อสร้างเหมาะสำหรับงานสถาปัตยกรรมที่เน้นความยั่งยืน เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และตอบสนองต่อแนวทางการออกแบบเชิงสมัยใหม่ โดยจากการทดลองผลิตชิ้นงานจริงและประเมินผลผลิตของชิ้นงานดังกล่าวพบว่าคุณสมบัติและจุดเด่นของผลลัพธ์งานวิจัยนี้คือ

ความสามารถในการพิมพ์สามมิติ: การใช้วัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตโดยใช้ดินเหนียวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ลดขยะจากแม่พิมพ์ ยืดหยุ่นสูง สามารถสร้างชิ้นงานที่มีรูปทรงอิสระโดยไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ เหมาะสำหรับงานออกแบบเชิงพารามเมตริกที่ต้องการความหลากหลายตอบสนองต่อรูปทรงอิสระสามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงตามสภาพพื้นที่ได้อย่างลงตัว

การใช้วัสดุเข้าถึงได้ง่าย: ไมซีเลียมหรือเส้นใยเห็ด ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของวัสดุชนิดนี้ สามารถเพาะปลูกได้จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และดินเหนียวสามารถหาได้ทั่วไปตามธรรมชาติ วัตถุดิบเหล่านี้ล้วนมีราคาไม่แพง ช่วยลดต้นทุนการผลิต และลดปัญหามลพิษจากการขนส่งวัสดุจากแหล่งไกล

ความสามารถในการสร้างและซ่อมแซมตัวเอง: จากการทดลองผลิตชิ้นงานและบ่มไมซีเลียม พบว่าไมซีเลียมสามารถเติบโตและซ่อมแซมตัวเองบทรชิ้นงานได้จริง เมื่อนำชิ้นงานมาประกอบติดตั้ง ไมซีเลียมยังคงเติบโตต่อเนื่อง คาดว่าจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง ช่วยยืดอายุการใช้งานของชิ้นงาน ลดความจำเป็นในการบำรุงรักษา และช่วยให้โครงสร้างสามารถฟื้นฟูตัวเองได้ในกรณีที่เกิดความเสียหาย

ความสามารถในการผลิตอาหาร: การออกแบบพื้นที่ใส่เชื้อเห็ดเพิ่มเติมภายในโครงสร้างชิ้นงาน พบว่าพื้นที่บริเวณดังกล่าวมีการเติบโตของดอกเห็ดได้จริง สามารถเป็นแหล่งอาหาร และเป็นแนวทางสอดคล้องกับหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียน ช่วยลดปัญหาความมั่นคงทางอาหาร ส่งเสริมการเกษตรยั่งยืนและเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลได้

ย่อยสลายทางชีวภาพ: ไมซีเลียมและดินเหนียวล้วนเป็นวัสดุย่อยสลายทางชีวภาพเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน วัสดุสามารถคืนสู่ธรรมชาติได้โดยไม่ก่อมลพิษ ต่างจากวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิมที่สร้างปัญหาขยะมูลฝอยและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

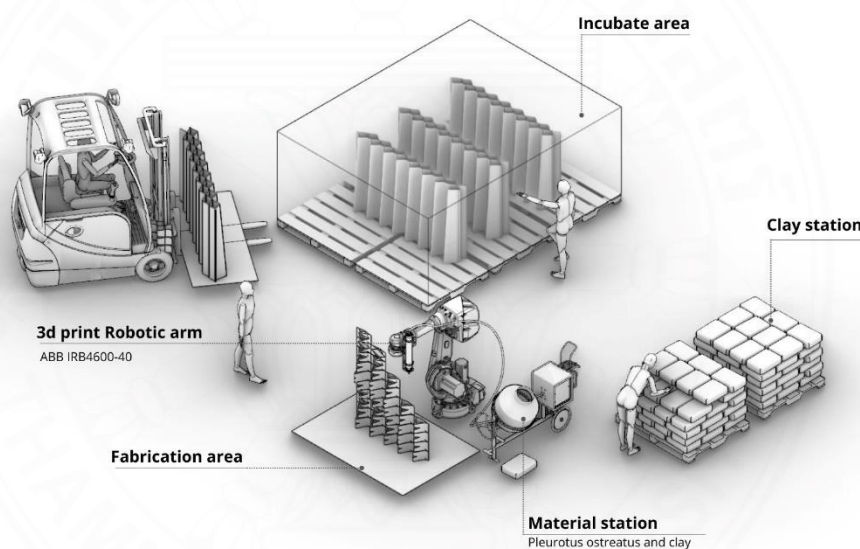
5.3 สรุปกระบวนการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์เพื่อสร้างองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม



ภาพที่ 5.2 ภาพขั้นตอนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์. โดย ผู้วิจัย, 2567.

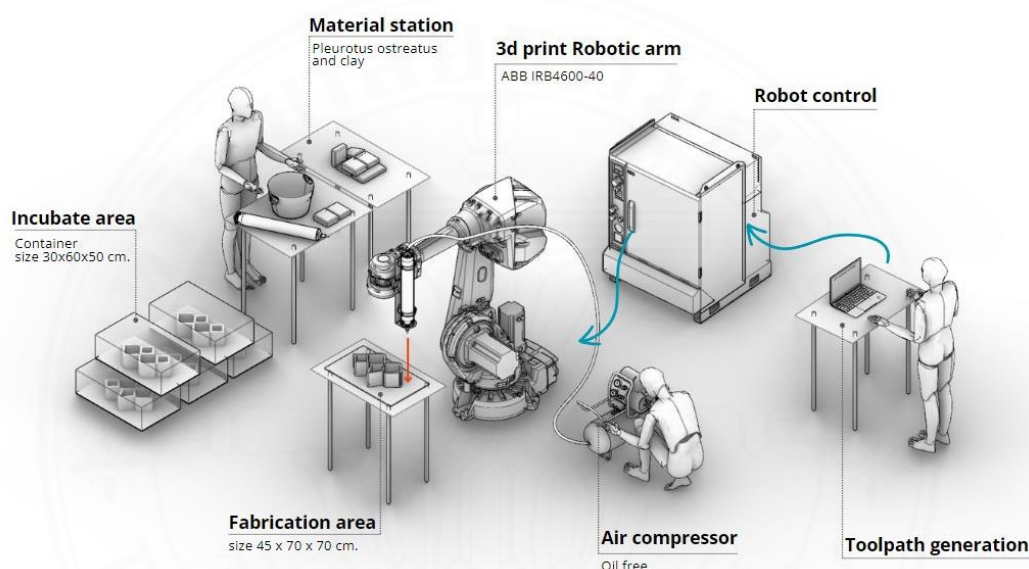
ภาพขั้นตอนก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ แสดงให้เห็นกระบวนการ ขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ เตรียมวัสดุ การนั่งฆ่าเชื้อ การพิมพ์ และการบ่มเชื้อ ก่อนนำไปติดตั้งจริง ซึ่งในช่วงขั้นตอน Pre การระมัดระวังในเรื่องของความสะอาดนั้นยังไม่เข้มงวดมากนัก แต่เมื่อวัสดุผ่านการนั่งฆ่าเชื้อแล้ว ในขั้นตอน Pro ควรต้องมีการจัดการ เตรียมพื้นที่ที่สะอาดและปลอดภัย จากภาพแสดงจุดสีแดง หมายถึงต้องระมัดระวังสูง แต่เนื่องจากพื้นที่ทำงานระหว่างพิมพ์สามมิติของผู้วิจัยเป็นพื้นที่เปิดขนาดใหญ่ ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมความสะอาดได้เท่าที่ควร คาดว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการติดเชื้อในบางส่วน ถึงแม้จะมีการควบคุมความสะอาดในขั้นตอนอื่น ๆ อย่างเข้มงวด โดยในขั้นตอนการนั่งถึงการผลิตควรที่จะทำภายในวันเดียวกันเพื่อลดปัจจัยเสี่ยงที่เชื้อโรคอื่น ๆ บนวัสดุหากทิ้งไว้นานเกินไป หลังจากผลิต ในขั้นตอน Post ต้องมีการเก็บชิ้นงานในพื้นที่ปิดเป็นระยะเวลา 7-14 วัน เพื่อให้เชื้อเริ่มเติบโต ก่อนนำชิ้นงานไปติดตั้งใช้งาน และปล่อยให้ไมซีเลียมเติบโตต่อไป โดยจากการศึกษาและทดลองจริงพบว่าขั้นตอนที่ต้องมีความรอบคอบและระมัดระวังเป็นพิเศษคือขั้นตอนตั้งแต่การนำวัสดุที่ผ่านการนั่งฆ่าเชื้อมาผสม และทำการพิมพ์ชิ้นงาน เนื่องจากการทำงานกับแขนหุ่นยนต์ที่มีขนาดใหญ่ พื้นที่การทำงานร่วมกับแขนหุ่นยนต์ส่วนใหญ่จึงมีขนาดค่อนข้างกว้างและเป็นพื้นที่เปิด เพื่อให้ถ่ายเทอากาศได้ ส่งผลให้การควบคุมความสะอาดระหว่างกระบวนการผลิตเป็นไปได้ยาก ดังนั้นหากต้องการผลิตชิ้นงานจากวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต

ควรมีการคำนึงถึงพื้นที่การทำงานระหว่างการผลิต โดยพื้นที่ปิดจะมีความเหมาะสมมากที่สุด และ ขั้นตอนหลังการพิมพ์ชิ้นงานต้องมีการคำนึงถึงวิธีการขนย้ายชิ้นงานเพื่อนำไปบ่มเชื้อไมซีเลียมในพื้นที่ ปิดอีกครั้ง เนื่องจากหลังการพิมพ์ชิ้นงาน เนื้อวัสดุจะยังมีความเหลวไม่แข็งตัว ส่งผลให้หากมีการ เคลื่อนย้ายรุนแรง ชิ้นงานอาจเกิดโอกาสเสี่ยงในการล้มเช่นกัน แนวทางแก้ไขที่เหมาะสมควร ออกแบบพื้นที่ทำงานให้มีพื้นที่สำหรับบ่มชิ้นงานไม่ไกลจากพื้นที่พิมพ์สามมิติ ลดการขนย้ายน้อยที่สุด อีกทั้งเมื่อนำชิ้นงานไปประกอบติดตั้ง ควรต้องมีการดูแลชิ้นงานอยู่เป็นประจำโดยการพรมน้ำทุกวัน วันละครั้ง เพื่อให้ชิ้นงานยังคงความชื้น มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมให้ไมซีเลียมคงการเติบโต โดย ขั้นตอนการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมด้วยการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขน หุ่นยนต์สามารถแสดงแนวทางการทำงานได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.3 ภาพแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อครั้ง. โดย ผู้วิจัย, 2567.

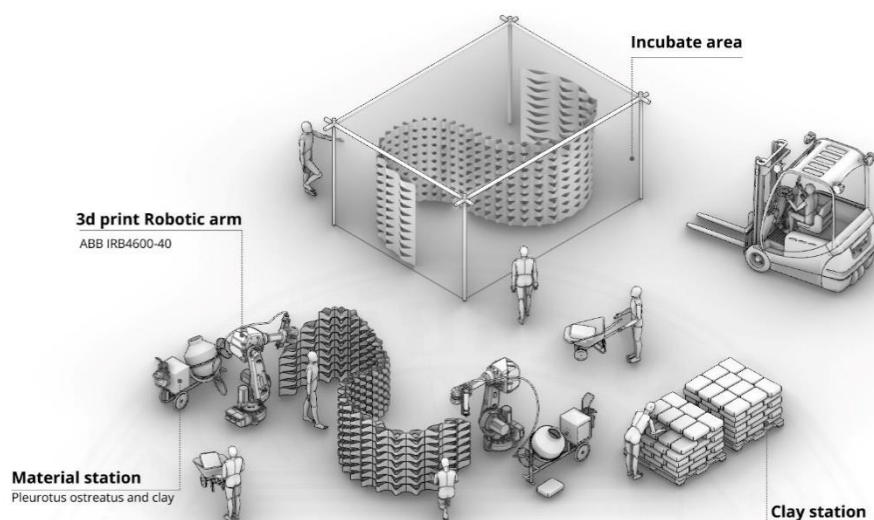
จากภาพแสดงแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ที่เครื่องมือการพิมพ์สามมิตียังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดการพิมพ์ ส่งผลให้แนวทางการก่อสร้างต้องมีขั้นตอนในการเตรียมพื้นที่ผสมและบรรจุวัสดุลงกระบออะคริลิค รวมทั้งต้องมีพื้นที่และอุปกรณ์รองรับการเก็บชิ้นงานเพื่อการบ่มไมซีเลียม 1-3 สัปดาห์ เช่นกล่องปิดขนาดใหญ่ ก่อนนำชิ้นงานแต่ละชิ้นไปประกอบติดตั้งเป็นผนังหรือองค์ประกอบสถาปัตยกรรมอื่นที่หน้างานจริงตามลำดับ ส่งผลให้วิธีนี้ต้องมีการคำนึงถึงวิธีการขนส่งชิ้นงานไปยังสถานที่ติดตั้งด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5.4 ภาพแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่อง. โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากภาพจำลองแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่อง เลือกใช้เครื่องมือในการผสมปูนพร้อมระบบดันเนื้อวัสดุด้วยแรงดันแบบสำเร็จรูปของตัวเครื่อง ส่งผลให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง สามารถพิมพ์ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และผลิตได้รวดเร็วมากขึ้นกว่าระบบเดิม เนื่องจากไม่จำเป็นต้องผสมวัสดุ และบรรจุวัสดุใหม่ทุกครั้งหลังการพิมพ์ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาค่อนข้างมาก นอกจากนี้แนวทางการก่อสร้างรูปแบบนี้เป็นการพิมพ์ชิ้นงานในพื้นที่ปิด และทำการบ่มเก็บชิ้นงานขนาดใหญ่ ก่อนขนส่งไปยังพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อทำการติดตั้งต่อไป วิธีการนี้จึงต้องมีการออกแบบพื้นที่เก็บชิ้นงานเพื่อบ่มไมซีเลียม เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ไม่สามารถเก็บภายในกล่องปิดได้ แต่วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถพิมพ์ชิ้นงานขนาดใหญ่ขึ้นจากระบบเดิม มีข้อเสียคือต้องมีการคำนึงถึงวิธีการขนส่ง

ขึ้นงานไปยังพื้นที่ติดตั้ง เนื่องจากขึ้นงานมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น รวมถึงเพิ่มโอกาสเสี่ยงที่ขึ้นงานจะเกิดความเสียหายระหว่างการขนส่งด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 5.5 ภาพแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่องและทำงานร่วมกัน, โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากภาพจำลองแนวทางการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไมซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ระบบพิมพ์ต่อเนื่องและติดตั้งแขนหุ่นยนต์ที่หน้างานจริง เป็นการพัฒนาระบบการก่อสร้างการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและสามารถผลิตสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ได้ ด้วยการบูรณาการกับการใช้งานร่วมกันระหว่างหลายแขนหุ่นยนต์ หรือการใช้แขนหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จะส่งผลให้สามารถผลิตและก่อสร้างในสถานที่จริงได้ ลดกระบวนการขนย้ายและประกอบติดตั้งชิ้นงาน ที่ต้องผลิตชิ้นงานจากสถานที่หนึ่งมาติดตั้งที่สถานที่จริง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานมาก ลดข้อจำกัดเรื่องของขนาดชิ้นงานที่เกิดจากข้อจำกัดการขนส่ง สามารถก่อสร้างสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ในระยะเวลาที่รวดเร็ว แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ระหว่างการพิมพ์ขึ้นงาน การควบคุมความสะอาดของพื้นที่บริเวณโดยรอบทำได้ค่อนข้างยาก รวมทั้งการเก็บชิ้นงานเพื่อป้อนให้ไมซีเลียมเติบโตต้องมีการออกแบบวิธีการคลุมชิ้นงานหรือสร้างพื้นที่คลุมชิ้นงานขนาดใหญ่ชั่วคราว อาจตามมาด้วยค่าใช้จ่ายที่มากขึ้น และต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายและวิธีการขนย้ายแขนหุ่นยนต์ไปติดตั้งที่หน้างานด้วยเช่นกัน

5.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไม้ซีเลียมด้วยแขนหุ่นยนต์

จากข้อมูลสรุปคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ชิ้นงานที่ได้จากการวิจัย และข้อมูลแนวทางในการก่อสร้างสถาปัตยกรรมจากวัสดุไม้ซีเลียมโดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ ผู้วิจัยคิดเห็นว่ามีศักยภาพในการออกแบบและใช้งานได้หลากหลาย ตั้งแต่งานองค์ประกอบสถาปัตยกรรมขนาดเล็ก เช่น ผนังไม่รับน้ำหนัก ผนังตกแต่งภายใน ผนังกั้นภายในอาคาร แต่ชิ้นงานที่อยู่ภายในอาคารควรผ่านความร้อนเพื่อให้ไม้ซีเลียมแห้งแข็งตัวก่อนนำไปใช้งาน ในกรณีที่ต้องการรักษาให้ไม้ซีเลียมสามารถเติบโตได้ต่อไป ควรเลือกพื้นที่ที่ไม่เย็นเกินไป มีความชื้น หรือมีการกั้นกระจกเพื่อกักเก็บความชื้นให้ไม้ซีเลียมยังเติบโตได้ต่อไป งานสถาปัตยกรรมชั่วคราว ได้แก่ ศาลาเอนกประสงค์ชั่วคราว ร้านค้าชั่วคราว สถาปัตยกรรมใช้งานด้านเกษตรกรรม เช่น ผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้งสามารถออกแบบเป็นพื้นที่ฟาร์มเห็ด แหล่งสร้างอาหารได้ ตอบรับกับแนวทางการแก้ปัญหาความยั่งยืนทางอาหาร หรือสถาปัตยกรรมผลิตอาหารพร้อมพื้นที่คุณภาพดิน งานสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ เช่น อาคารชั่วคราวในงานมหกรรมวันพืชสวนโลกสำหรับจัดแสดงในพื้นที่ภายนอก เพื่อนำเสนอนวัตกรรมการนำเห็ดมาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้าง เมื่อหมดอายุการใช้งานการจัดการจะไม่มีขยะหลงเหลือ อาคารสามารถย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกเหนือจากการก่อสร้างผนังไม่รับแรงเพียงอย่างเดียว สามารถนำผนังดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุอื่นเช่น ไม้ หรือเหล็ก เพื่อให้โครงสร้างวัสดุอื่นทำหน้าที่รับน้ำหนักจากหลังคาหรือโครงสร้างอื่นแทน เป็นแนวทางที่สามารถสร้างนำไปใช้ออกแบบที่พักอาศัยต้นทุนไม่แพงเนื่องจากสามารถหาวัสดุได้ในท้องถิ่น ที่ปลูกเงินในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบพื้นที่บางส่วนจากที่กล่าวมาเพื่อให้เห็นแนวทางการนำไปประยุกต์ใช้ ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5.6 ภาพแนวทางการออกแบบผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้งภายนอกและภายใน. โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 5.7 ภาพผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้งภายนอก. โดย ผู้วิจัย, 2567.

ทั้งสองภาพแสดงให้เห็นแนวทางการออกแบบผนังผลิตอาหารหรือสวนแนวตั้ง โดยมีบริบทเป็นพื้นที่ส่วนกลางภายในอาคารชุด เนื่องจากในปัจจุบันการออกแบบสถาปัตยกรรมโดยคำนึงความมั่นคงทางอาหารเป็นเรื่องที่กำลังถูกพูดถึงอย่างแพร่หลาย ผู้วิจัยจึงได้ทำการเสนอผนังผลิตเห็ดซึ่งผนังดังกล่าวนอกเหนือจากผลิตอาหาร ยังสามารถทำหน้าที่เป็นแผงกันแดด หรือช่องเปิดได้เช่นกัน

รวมทั้งผนังดังกล่าววนนอกเหนือจากการปลูกเห็ด ยังมีคุณสมบัติคล้ายกระถางซึ่งรองรับการปลูกพืชผักสวนครัวได้เช่นกัน



ภาพที่ 5.8 ภาพการออกแบบที่พักโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุไม้ 1, โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 5.9 ภาพการออกแบบที่พักโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุไม้2, โดยผู้วิจัย, 2567.

แนวทางการออกแบบที่ปักโดยประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างวัสดุไม้ เพื่อทำหน้าที่เป็นโครงสร้างในการรับน้ำหนักของผ้าเพดาน และหลังคา เนื่องจากผนังชิ้นงานภายในงานวิจัยนี้ไม่สามารถเป็นผนังรับน้ำหนักได้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและแนวทางที่สามารถสร้างนำกระบวนการก่อสร้างนี้ไปใช้ออกแบบที่ปักอาศัยต้นทุนไม่แพง เนื่องจากสามารถหาวัสดุได้ในท้องถิ่น อีกทั้งไม่ซีเลียมมีคุณสมบัติในการเติบโตซ่อมแซม ระหว่างการประกอบชิ้นงานไม่ต้องมีการใช้วัสดุเชื่อมเพิ่มเติม ผนังบางส่วนของที่ปักมีการออกแบบช่องเปิดและออกแบบผนังผลิตเห็ดและผักสวนครัว ทำหน้าที่เป็นแหล่งอาหารให้กับผู้อยู่อาศัยได้เช่นกัน



ภาพที่ 5.10 ภาพแนวทางการออกแบบอาคารชั่วคราวและผลิตในสถานที่, โดย ผู้วิจัย, 2567.



ภาพที่ 5.11 ภาพแนวทางการออกแบบอาคารชั่วคราวและผลิตในสถานที่2, โดย ผู้วิจัย, 2567.

จากการพัฒนาระบบการก่อสร้างการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วย แขนหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นและสามารถผลิตสถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ในสถานที่จริงได้ โดยการบูรณาการกับการใช้งานร่วมกันระหว่างหลายแขนหุ่นยนต์ หรือการใช้แขนหุ่นยนต์ที่สามารถ เคลื่อนที่ได้ ผู้วิจัยคิดเห็นว่าจะสามารถนำกระบวนการก่อสร้างนี้มาใช้ในการออกแบบอาคารขนาดใหญ่ เช่น อาคารชั่วคราวในงานจัดแสดงมหกรรมพืชสวนโลก ซึ่งเป็นงานจัดแสดงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับ กระบวนการผลิต นวัตกรรม และผลิตภัณฑ์จากการเกษตรที่ยั่งยืน ผู้วิจัยคิดเห็นว่าผลลัพธ์จาก งานวิจัยนี้เป็นการบูรณาการระหว่างวัสดุชีวภาพ การออกแบบพารามetriks และการใช้เทคโนโลยีการ พิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ แสดงให้เห็นถึงการนำแนวทางเกษตรกรรมเห็ดมาประยุกต์ใช้ผ่าน เทคโนโลยีการผลิตเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ และสถาปัตยกรรมที่แสดงออกถึงแนวคิดความยั่งยืนทาง สิ่งแวดล้อม และแทรกสอดการแก้ปัญหาเรื่องความยั่งยืนทางอาหารผ่านกระบวนการออกแบบ

5.5 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญ

การประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญภายในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ การประเมินด้วย ผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้แขนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรมหรือผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบ สถาปัตยกรรมเชิงพารามetriks และการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด ผู้วิจัยได้เรียนเชิญ นาย พชร เรือนทองดี ตำแหน่ง Digital Fabrication Director บริษัท Desire Synthesis ในฐานะ ผู้เชี่ยวชาญในการประเมินด้านการใช้เครื่องมือสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ มาให้การประเมินงานวิจัยเมื่อ วันที่ นาย พัฒนา รัตนาวาทอง ตำแหน่ง Associate, Senior Digital Technology Specialist ในฐานะผู้เชี่ยวชาญในการประเมินด้านการออกแบบสถาปัตยกรรมเชิงพารามetriks พร้อมผู้เข้าร่วมให้ ความคิดเห็นอีก 2 ท่านได้แก่ นาย พงศกร วัฒนเวชรัตน์ ตำแหน่ง Computational Design Specialist นางสาวณัฏฐ์ธีรา นาคพงษ์ ตำแหน่ง Junior Sustainability Researcher จากบริษัท A49 Architects เมื่อวันที่ 10 มิถุนายน 2567 และ นาง อัญญารัตน์ พัวพรรณ วิทยากรจากกลุ่ม Young Smart Farmer ในฐานะผู้เชี่ยวชาญในการประเมินด้านการพัฒนาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต เมื่อวันที่ 15 มิถุนายน 2567

5.5.1 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงาน สถาปัตยกรรม

ชุดคำถามในการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ใน งานสถาปัตยกรรมมีดังนี้

1. ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการได้มาซึ่งผลลัพธ์รูปทรงและผนังที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติกับเทคโนโลยีที่ใช้ในงานวิจัยนี้
 2. ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการทดลองและพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์
 3. ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงกระบวนการออกแบบรูปทรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์
 4. ความท้าทายที่เกี่ยวข้องหากนำผลิตผลหรือเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างจริง
 5. มองเห็นศักยภาพและการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมด้วยแขนหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างหรืออื่น ๆ อย่างไร
 6. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม
- สามารถสรุปผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรมได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พชร เรือนทองดี	ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการได้มาซึ่งผลลัพธ์รูปทรงและผนังที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติกับเทคโนโลยีที่ใช้ในงานวิจัยนี้	ผู้ประเมินคิดเห็นว่างานวิจัยมีความน่าสนใจ เป็นการบูรณาการระหว่างวัสดุชีวภาพ การออกแบบพารามетริก และการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ กระบวนการได้มาซึ่งผลลัพธ์รูปทรงและผนังที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติกับเทคโนโลยีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมในระดับหนึ่ง เนื่องจากข้อจำกัดขนาดและปริมาณที่สามารถพิมพ์ได้ต่อครั้งของเครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ ส่งผลให้กลายเป็นกรอบจำกัดในการออกแบบรูปทรงชิ้นงาน แต่จากผลลัพธ์การออกแบบรูปทรงชิ้นงานดังกล่าวผู้ประเมินมองเห็นศักยภาพในการผนวกรวมกับวัสดุอื่น เช่น เหล็กเส้นเอสซีจีที่มีการผลิตจากวัสดุรีไซเคิลในการนำไปใส่บริเวณรูของชิ้นงานที่มีการออกแบบเพื่อให้เป็นโครงสร้างรับน้ำหนักในระหว่างที่ไมซีเลียมเติบโตช่วยยึดเพื่อความแน่น มั่นคงให้ชิ้นงาน ในกระบวนการวิจัยและ

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนงหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พชร เรือนทองดี	ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการได้มาซึ่งผลลัพธ์รูปทรงและผนังที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติกับเทคโนโลยีที่ใช้ในงานวิจัยนี้	ประเมินผลลัพธ์ในส่วนของวัสดุมีความเหมาะสมสอดคล้องกับผลลัพธ์การวิจัย สามารถเห็นความเกี่ยวข้องของตัวแปรและผลลัพธ์การเติบโตของไม้ซีเลียมได้ชัดเจน แต่การนำเสนอการนำไปใช้งานควรต้องมีการออกแบบโดยดึงศักยภาพของวัสดุไม้ซีเลียมมากขึ้น เช่น การออกแบบโดยอิงบริบทภายนอก เช่น แหล่งน้ำ นำเสนอผ่านรูปที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของการเติบโตไม้ซีเลียมบริเวณใกล้แหล่งน้ำ และบริเวณที่รับความร้อน เป็นต้น เช่น แหล่งน้ำ นำเสนอผ่านรูปที่แสดงให้เห็นความแตกต่างของการเติบโตไม้ซีเลียมบริเวณใกล้แหล่งน้ำ และบริเวณที่รับความร้อน เป็นต้น
	ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการทดลองและพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไม้ซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนงหุ่นยนต์	ผู้ประเมินการออกแบบผนังเชิงพาราเมตริกมีความเหมาะสมต่อผลลัพธ์ที่ได้ แต่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการลดทอนเส้นพิมพ์ที่ผู้วิจัยทำการศึกษา โดยผู้ประเมินมีข้อเสนอแนะในการเพิ่มประสิทธิภาพของเส้นพิมพ์ภายในโดยใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์แรงที่กระทำต่อโครงสร้างชิ้นงานโดยละเอียด ก่อนนำค่าที่ได้มาใช้อ้างอิงประกอบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์เส้นที่มีความเฉพาะเจาะจงและสามารถรับแรงดีที่สุด
	ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงกระบวนการออกแบบรูปทรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการพิมพ์สามมิติด้วยแขนงหุ่นยนต์	ผู้ประเมินมีข้อเสนอแนะในการศึกษาการพิมพ์รูปแบบไม่ระนาบ โดยทำการออกแบบและพิมพ์ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มากขึ้นเพื่อให้สามารถประเมินผลจากการพิมพ์รูปแบบไม่ระนาบได้อย่างชัดเจนมากขึ้น เช่น การสร้างโครงสร้างช่องโค้ง (Arch) ขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพการพิมพ์ของเครื่องมือพิมพ์สามมิติด้วยแขนงหุ่นยนต์ได้ดีมากขึ้น

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนงหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พชร เรือนทองดี	ความท้าทายที่เกี่ยวข้องหากนำผลิตผลหรือเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์ไปใช้ในงานก่อสร้างจริง	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าไมซีเลียมเป็นวัสดุที่ค่อนข้างใหม่ กลุ่มลูกค้าที่มีความเข้าใจในวัสดุ และมีความต้องการนำไปปรับใช้จึงยังมีไม่มากในปัจจุบัน เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างแบบดั้งเดิม ต้องมุ่งไปที่กลุ่มลูกค้าที่มีความสนใจในเรื่องนี้โดยเฉพาะ อีกทั้งการใช้เทคโนโลยีแขนหุ่นยนต์มีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญในการตัดสินใจลงทุน ซึ่งเป็นปัญหาที่การพิมพ์สามมิติด้วยวัสดุคอนกรีตพบเจอเช่นเดียวกัน
	มองเห็นศักยภาพและการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมด้วยแขนหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างหรืออื่น ๆ อย่างไร	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าผลลัพธ์งานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เพื่อสื่อสารเรื่องความยั่งยืน และรักษาสีแวดล้อมผ่านตัววัสดุภายในสถาปัตยกรรมได้อย่างชัดเจน คิดเห็นว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ออกแบบภายในงานที่มีการสื่อสารเรื่องความยั่งยืน เช่น การนำไปใช้ออกแบบอาคารจัดแสดงงานพืชสวนโลก หรืองานอื่น ๆ ที่มีการแสดงนวัตกรรมรักษ์สิ่งแวดล้อม
	ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าเนื้อหาของวิจัยอาจมีการออกแบบผลลัพธ์ที่ประยุกต์ใช้ในบริบทที่มีขนาดใหญ่ เช่นในระดับของเมือง เป็นแนวทางในอนาคตเพื่อให้เห็นความเป็นไปได้ของผลลัพธ์หากมีการศึกษาและพัฒนาต่อ

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พัฒนา รัตนนาวาทอง และผู้เข้าร่วมให้ ความคิดเห็น	ข้อดีข้อเสียและความ เหมาะสมของ กระบวนการได้มาซึ่ง ผลลัพธ์รูปทรงและผนังที่ เหมาะสมสำหรับการพิมพ์ สามมิติกับเทคโนโลยีที่ใช้ ในงานวิจัยนี้	ผู้ประเมินคิดเห็นว่ากระบวนการได้มาซึ่งผลลัพธ์ รูปทรงและผนังที่เหมาะสมสำหรับการพิมพ์สามมิติกับ เทคโนโลยีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเหมาะสม แต่ใน กระบวนการประเมินผลลัพธ์รูปทรงที่มีการจำลอง การโก่งเดาะและความปลอดภัยในการติดตั้ง ใน ปัจจุบันผู้วิจัยมีการใช้ค่าความเครียดแรงอัดของวัสดุ โดยอ้างอิงจากวัสดุหินเหนียว ควรต้องมีการทดสอบ เปรียบเทียบชิ้นงานที่มีขนาดรูปทรงเดียวกัน มีพื้นที่ พื้นผิวเท่ากัน เพื่อวัดค่าของวัสดุหินเหนียวผสมไมซี เลียมโดยเฉพาะ ให้ได้ผลการประเมินที่มีความ แม่นยำมากที่สุด ในกระบวนการวิจัยและประเมินผล ลัพธ์ในส่วนของวัสดุมีความเหมาะสม สอดคล้องกับ ผลลัพธ์การวิจัย สามารถเห็นความเกี่ยวข้องของตัว แปรและผลลัพธ์การเติบโตของไมซีเลียมได้ชัดเจน
	ข้อดีข้อเสียและความ เหมาะสมของ กระบวนการทดลองและ พัฒนาเทคโนโลยีการ พิมพ์สามมิติวัสดุไมซี เลียมคอมโพสิตด้วยแขน หุ่นยนต์	ผู้วิจัยคิดเห็นว่าผู้วิจัยมีการเริ่มศึกษาการออกแบบ ชิ้นงานขนาดเล็กเพื่อนำมาประกอบติดตั้งเนื่องจาก ข้อจำกัดของเครื่องมือการพิมพ์สามมิติด้วยแขน หุ่นยนต์ ส่งผลให้การออกแบบถูกจำกัดในกรอบ ควร ลองย้อนกลับกระบวนการออกแบบโดยเริ่มจากการ ออกแบบผนังเชิงพาราเมตริกก่อน ถึงทำการตัด ลดทอนเป็นชิ้นงานสำหรับการผลิต อาจได้ผลลัพธ์ที่ เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น
	ข้อเสนอแนะในการ ปรับปรุงกระบวนการ ออกแบบรูปทรงเพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพการพิมพ์ สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์	ผู้ประเมินคิดเห็นว่ากระบวนการออกแบบรูปทรง ควรต้องมีการกำหนดกรอบของรูปทรงให้มีความ ชัดเจนมากขึ้น รวมทั้งตั้งศักยภาพของวัสดุไมซีเลียม มาใช้ในเชิงออกแบบมากขึ้น เช่น การกำหนดผลลัพธ์ หรือสีของไมซีเลียมที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ของ ชิ้นงาน โดยกำหนดปัจจัยบางอย่าง จะส่งผลให้งานมี ความน่าสนใจมากขึ้น

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนหุ่นยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พัฒนา รัตนาวาทอง และผู้เข้าร่วมให้ ความคิดเห็น	ความท้าทายที่ เกี่ยวข้องหากนำ ผลิตผลหรือเทคโนโลยี การพิมพ์สามมิติวัสดุ ไมซีเลียมคอมโพสิต ด้วยแขนหุ่นยนต์ไปใช้ ในงานก่อสร้างจริง	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าจากคุณสมบัติของวัสดุและชิ้นงาน ในช่วงแรกของการนำไปประยุกต์ใช้กับงาน สถาปัตยกรรมจะเป็นการออกแบบเป็นงาน สถาปัตยกรรมเชิงทดลอง ระยะเวลาสั้น ติดตั้งแสดง ศักยภาพของนวัตกรรมเท่านั้น เนื่องจากเป็นวัสดุใหม่ ต้องมีการใช้งาน เก็บข้อมูลการใช้งานในระยะยาว ข้อมูลความคงทนในระยะยาว การบำรุงรักษา หรือการ ยอมรับผ่านกฎหมาย เพื่อให้ถูกยอมรับก่อนที่จะถูก นำไปออกแบบเป็นสถาปัตยกรรมถาวร หรือ สถาปัตยกรรมขนาดใหญ่ อีกทั้งการใช้เทคโนโลยีแขน หุ่นยนต์ในปัจจุบันยังมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง ลูกค้ำ หรือนักลงทุนอาจต้องการแรงจูงใจในการตัดสินใจ ลงทุน และควรต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของ ความปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์เพิ่มเติม มีการเก็บ ข้อมูลหลังการใช้งาน หรือขอใบรับรองเพื่อรับประกัน ความปลอดภัย เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับวัสดุและ ชิ้นงาน
	มองเห็นศักยภาพและ การนำเทคโนโลยีการ พิมพ์สามมิติวัสดุไมซี เลียมด้วยแขนหุ่นยนต์ ไปประยุกต์ใช้ในการ ก่อสร้างหรืออื่น ๆ อย่างไร	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้สามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการออกแบบสถาปัตยกรรมเพื่อ ตอบสนองเรื่องความยั่งยืนทางอาหารได้ เนื่องจากใน ปัจจุบันเรื่องการออกแบบสถาปัตยกรรมที่สามารถผลิต อาหารแบบครบวงจรเป็นกระแสที่ถูกพูดถึงอย่าง แพร่หลาย และในอนาคตมีแนวโน้มที่จะเพิ่มความ เข้มข้นขึ้นและถูกให้ความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งผู้ประเมินให้ข้อคิดเห็นเพิ่มเติมว่าสามารถนำไป พัฒนาโดยเน้นเรื่องความเป็นฉนวนกันความร้อน แผ่น ซับเสียงใช้ภายในอาคารได้อีกด้วย

ตารางที่ 5.2 (ต่อ)

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการใช้เทคโนโลยีหรือแขนงทุนยนต์ในงานสถาปัตยกรรม

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
พัฒนา รัตนนาททอง และผู้เข้าร่วมให้ ความคิดเห็น	ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	ควรทำการศึกษาและเก็บข้อมูลการเติบโตของ ไมซีเลียมบนชิ้นงาน และการใช้งานจริงหลังจาก ระยะเวลา 3 สัปดาห์ที่ผู้วิจัยได้ทำการวัดผลและ ประเมิน เช่น ระยะเวลา 1 เดือน 1 ปี เพื่อประเมิน ชิ้นงานว่ายังมีความสามารถในการเติบโตของไมซีเลียม หรือไม่ หรือต้องมีการบำรุงรักษาเพิ่มเติมอย่างไร

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

5.5.2 ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด

ชุดคำถามในการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ดมีดังนี้

1. ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการพัฒนาวัสดุไมซีเลียมเพื่อการ
ผลิตในงานวิจัยนี้
 2. ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงกระบวนการพัฒนาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต
เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณภาพดีขึ้น
 3. มองเห็นศักยภาพและการนำไปประยุกต์ใช้ของวัสดุนี้อย่างไร
 4. มองเห็นโอกาสในการสร้างธุรกิจต่อยอดจากผลิตผลงานวิจัยนี้หรือไม่
 5. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม
- สามารถสรุปผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3

ผลการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญด้านการเพาะเห็ด

ผู้เชี่ยวชาญ	คำถามผู้วิจัย	ผลการประเมิน
อัญญารัตน์ พัวพรรณ	ข้อดีข้อเสียและความเหมาะสมของกระบวนการพัฒนาวัสดุไมซีเลียมเพื่อการผลิตในงานวิจัยนี้	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าเป็นกระบวนการผลิตวัสดุไมซีเลียมที่น่าสนใจ เนื่องจากโดยปกติเกษตรกรจะมีการทำเพียงก้อนเห็ดแนวทางนี้อาจนำไปปรับใช้กับเกษตรกรที่มีแบบเดิมได้ รวมทั้งกระบวนการศึกษาเชื้อไมซีเลียมและผลลัพธ์การพิมพ์ มีความเหมาะสม แสดงให้เห็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการเลือกใช้เชื้อไมซีเลียมแต่ประเภทได้ชัดเจน สามารถเป็นแนวทางประกอบสำหรับการเลือกใช้ประเภทเชื้อไมซีเลียมในงานอื่นๆ ได้ต่อไป
	ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงกระบวนการพัฒนาวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิต เพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณภาพดีขึ้น	ผู้ประเมินให้ความคิดเห็นเพิ่มเติมว่าควรมีการศึกษาและทดลองผลลัพธ์จากระยะเวลาการนั่งฆ่าเชื้อต่อการติดเชื้อเพิ่มเติมเพื่อหาระยะเวลาการนั่งฆ่าเชื้อที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเภทเชื้อนั้น ๆ หรือในส่วนของวัสดุมีการเพิ่มวัสดุที่เลื่อยผสมดินเหนียวเพิ่มเนื่องจากดินเหนียว เนื่องจากดินเหนียวเมื่อระเหยน้ำจะเริ่มแห้งเร็วเกินไป ซีลีเยจะทำหน้าที่อุ้มน้ำเพิ่มความชื้นให้ชิ้นงาน คาดว่าจะส่งผลให้ไมซีเลียมมีการเติบโตได้ดีมากขึ้น
	มองเห็นศักยภาพและการนำไปประยุกต์ใช้ของวัสดุนี้อย่างไร	ผู้ประเมินมองเห็นศักยภาพว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผนังสวนขนาดย่อมภายในบ้าน อาคารห้องชุดที่มีพื้นที่จำกัด หรือนำไปผลิตเฟอร์นิเจอร์ แผงลอยสำหรับการจัดแสดงโชว์ในงานต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงการใช้งานวัสดุที่มีความยั่งยืน ไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อม
	มองเห็นโอกาสในการสร้างธุรกิจต่อยอดจากผลผลิตงานวิจัยนี้อย่างไร	ผู้ประเมินคิดเห็นว่าการผลิตผลจากงานวิจัยนี้สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์จากเห็ดได้อย่างมาก เนื่องจากปกติเกษตรกรมีการขายเพียงแค่ก้อนเห็ดในราคาก้อนละ 10-12 บาท ในขณะที่ผลิตผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงนวัตกรรม การออกแบบที่นำไปตกแต่งอาคารได้ การใช้งานที่ยังสามารถผลิตดอกเห็ดได้เช่นเดียวกับก้อนเห็ดแต่เพิ่มการออกแบบและความสวยงามส่งผลให้เป็นแรงจูงใจให้ผู้บริโภคตัดสินใจซื้อได้
	ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม	ผู้ประเมินให้คำแนะนำเพิ่มเติมในการเร่งการเติบโตของไมซีเลียม สามารถเพิ่มสารอาหารลงไปเพื่อเร่งการเจริญเติบโต แต่ต้องมีการศึกษาผลที่เกิดจากการใส่สารอาหารแต่ละประเภทด้วยเช่นกัน

หมายเหตุ. โดยผู้วิจัย, 2567.

5.6 ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเชิงวัสดุ เนื่องจากมีการศึกษาสัดส่วนวัสดุดินเหนียวและหัวเชื้อไมซีเลียมแต่ละประเภทเพียงรูปแบบเดียวของแต่ละสูตรผสม ควรมีการศึกษาอย่างลึกซึ้งเพิ่มเติมเพื่อหาสัดส่วนวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในสภาพอากาศประเทศไทย หรือทดลองใช้ประเภทหัวเชื้อไมซีเลียมรูปแบบอื่น เช่น หัวเชื้อแบบน้ำ เป็นต้น อีกทั้งในงานวิจัยนี้ไม่มีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตจากดินเหนียว หรือเปรียบเทียบคุณสมบัติกับวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตประเภทอื่น หากต้องการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างจริงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลโดยใช้เครื่องมือวัดตามมาตรฐานต่อไป

2. ข้อจำกัดในสภาพแวดล้อมในการทำงาน การควบคุมความสะอาดของพื้นที่ทำงานระหว่างพิมพ์สามมิติในปัจจุบันยังไม่มีความเข้มงวดรัดกุมมากพอ เนื่องจากเป็นพื้นที่เปิดขนาดใหญ่ ส่งผลให้อาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการติดเชื้อ แม้ว่าจะทำการนิ่งฆ่าเชื้อวัสดุก่อนการพิมพ์ก่อนหน้านี้ ควรต้องมีการออกแบบพื้นที่การทำงานให้รัดกุมและควบคุมความสะอาดได้

3. ส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ผู้วิจัยผลิตยังมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณวัสดุที่สามารถบรรจุสำหรับการฉีดในแต่ละครั้งมากที่สุดเพียง 2.5 กิโลกรัม ในอนาคตควรที่จะพัฒนาให้สามารถเชื่อมต่อสายฉีดวัสดุกับกระบอกฉีดได้โดยตรง เพื่อให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง หรือใช้เครื่องพิมพ์สามมิติขนาดใหญ่เฉพาะทาง ลดข้อจำกัดขนาดของรูปทรงที่พิมพ์ได้ต่อครั้ง ดังภาพการจำลองแนวทางการก่อสร้างในข้อ 5.3

4. ส่วนของซอฟต์แวร์ การจำลองภายในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการโค้งงอของรูปทรงเพื่อประเมินความแข็งแรงระหว่างพิมพ์สามมิติ และการจำลองการรับแรงอัดมีการใช้ค่าความเครียดแรงอัดของวัสดุในชุดคำสั่ง Karamba3D อ้างอิงจากวัสดุดินเหนียวเปล่าเท่านั้น งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการทดสอบเพื่อวัดผลค่าความเครียดแรงอัดของวัสดุดินเหนียวผสมไมซีเลียม ในอนาคตควรมีการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติเชิงกลดังกล่าวด้วยเครื่องมือวัดตามมาตรฐานและนำค่าที่ได้มาใช้ในการประกอบการจำลองภายในซอฟต์แวร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้นต่อไป รวมทั้งการจำลองการรับแรงอัดในอนาคตต้องมีการคำนวณความแข็งแรงของโครงสร้าง จำลองการรับแรงของชิ้นงานโมดูลาร์เมื่อนำมาประกอบติดตั้งโดยละเอียดตามแต่รูปทรงของสถาปัตยกรรมที่ออกแบบ

5. การพิมพ์ระนาบไม่เรียบ ส่วนของชุดคำสั่งในการควบคุมการพิมพ์ระนาบไม่เรียบพร้อมเอียงหัวพิมพ์ต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อแก้ไขปัญหาเส้นซ้อนทับระหว่างชั้นของชิ้นงาน และต้องมีการศึกษาค่าตัวแปรเพิ่มเติม เช่น ค่าการเอียงของหัวพิมพ์ ค่าความเร็วการเคลื่อนที่ระหว่างเอียง เป็นต้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียรแม่นยำมากที่สุด รวมทั้งในอนาคตควรต้องมีการทดลองพิมพ์ระนาบไม่เรียบด้วยชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น จากคำแนะนำของผู้เชี่ยวชาญ เนื่องจากขนาด

ของชิ้นงานภายในงานวิจัยนี้มีขนาดไม่ใหญ่มาก ผลลัพธ์การพิมพ์ระนาบไม่เรียบจึงไม่สามารถวัดและประเมินผลการพิมพ์ระนาบไม่เรียบได้อย่างชัดเจน

6. การออกแบบรูปทรงผนัง ผู้วิจัยคิดเห็นว่าในอนาคตควรมีการออกแบบและพัฒนาให้มีการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น หรือทดลองปรับการใช้งานเป็นองค์ประกอบสถาปัตยกรรมอื่น ๆ เช่น โครงสร้าง หรือช่องเปิดรูปแบบอื่น มองหาความเป็นไปได้อื่นนอกเหนือจากแนวทางการนำเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวัสดุไมซีเลียมคอมโพสิตด้วยแขนหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้ภายในหัวข้อ 5.4 เพื่อนำแนวทางก่อสร้างในงานวิจัยนี้ไปปรับใช้ในวงการสถาปัตยกรรมต่อไป



รายการอ้างอิง

หนังสือและบทความในหนังสือ

- Fricker, M., Boddy, L., & Bebbber, D. (2007). *In Biology of the fungal cell*. (8th ed.) Heidelberg: Springer Berlin.
- Klaus, O. (2007). *Urban Pioneers: Temporary Use and Urban Development in Berlin*. Berlin: Jovis.
- Philip, J. (2011). *Temporary Architecture Now!*. Cologne: TASCHEN.

บทความวารสาร

- ธัชวิทย์ สีนุกูญเรือง. (2560). สถาปัตยกรรม ช่วงเวลา ยุทธวิธีพัฒนาเมือง: สถาปัตยกรรมชั่วคราว. *Silpakorn University e-Journal*, 37(3), 160-178.
- Alzahrani, A., Alghamdi, A., & Basalah, A. (2022). Computational Optimization of 3D-Printed Concrete Walls for Improved Building Thermal Performance. *Buildings*, 12, 2267.
- Almpani-Lekka, D., Pfeiffer, S., Schmidts, C., & Seo, S. (2021). A review on architecture with fungal biomaterials: The desired and the feasible. *Fungal Biol Biotechnol*, 8(17), 2-8.
- Appels, F., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wosten, H. (2018). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Des*, 161, 64–71.
- Block, P., Mele, T., Liew, A., DeJong, M., Escobedo, D., & Ochsendorf, J. (2018). Structural design, fabrication and construction of the Armadillo vault. *Struct. Eng*, 96, 10–20.

- Bitting, S., Derme, T., Lee, J., Mele, T. V., Dillenburger, B., & Block, P. (2022, April 14). Challenges and Opportunities in Scaling up Architectural Applications of Mycelium-Based Materials with Digital Fabrication. *Biomimetics*, 7(2), 2-10.
- Garcia, S. B. (1968). Cell wall chemistry, morphogenesis, and taxonomy of fungi. *Annu. Rev. Microbio*, 22(1), 87–108.
- Gantenbein, S., Colucci, E., Käch, J., Trachsel, E., Coulter, F., Rühs, P. A., Masania, K., & Studart, A. (2023). Three-dimensional Printing of Mycelium Hydrogels into Living Complex Materials. *Nat. Mater*, 2023(22), 128–134.
- Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M. (2018). Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, *Autom. Constr*, 2018(93), 1–11.
- Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., Pellegrini, M., & Savino, E. (2019). Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability* 2019, 11(1), 281, 1-16.
- Guidetti, X., Balta, E., Nagel, Y., Yin, H., Rupenyan-Vasileva, A., & Lygeros, J. (2023). Stress Flow Guided Non-Planar Print Trajectory Optimization for Fused Filament Fabrication of Anisotropic Polymers. *Additive Manufacturing*, 72(2023), 1-5.
- Islam, M. R., Tudryn, G., & Bucinell, R. et al. (2017). Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Sci Rep* 7, 13070, 1-9.
- Jaillon, L., & Poon, C. (2014). Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. *Automation Constr*, 39, 195–202.
- Jauk J., Gosch L., Vašatko H., Christian I., Klaus A., & Stavric M. (2022). MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures. *International Journal of Architectural Computing*, 20(1), 31-40.
- Kananathan, J., Mahendran, S., Kadirgama, K., Devarajan, R., & Rahman, M. (2022). Comprehensive investigation and prediction model for mechanical properties of coconut wood–polylactic acid composites filaments for FDM 3D printing. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, 75-100.

- Li, K., Jia, J., Wu, N., & Xu, Q. (2022, November 17). Recent advances in the construction of biocomposites based on fungal mycelia. *Bioeng. Biotechnol*, 10, 1-8.
- Mohseni, A., Vieira, F. R., Pecchia, J. A., & Gürsoy, B. (2023). Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: Material Compositions, Workflows, and Ways to Mitigate Contamination. *Biomimetics* 2023, 8, 257.
- Nayyeri, P., Zareinia, K., & Bougherara, H. (2022). Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119, 1-26.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng* 2018, 143, 172–196.
- Smith, M. L., Bruhn, J. N. & Anderson, J. B. (1992). The fungus *Armillaria bulbosa* is among the largest and oldest living organisms. *Nature* 356, 428, 2-10.
- Tay, Y. W. D., Tay, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual Phys. Prototyp*, 12(3), 261–276.
- Toure, P., Sambou, V., Faye, M., Thiam, A., Adj, M., & Azilnon, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering*, 13, 8-12.
- Zhang, X., Fan, X., Han, C., Wang, C., & Yu, B. (2020). Improving Soil Surface Erosion Resistance by Fungal Mycelium. *Acta Geotechnica*, 18(2), 1-19.
- Yang, L., Park, D., & Qin, Z. (2021). Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: A Review. *Front. Mater*, 8(737377), 2-17.

วิทยานิพนธ์

- ELSACKER, V, E. (2021). *MYCELIUM MATTERS; An interdisciplinary exploration of the fabrication and properties of mycelium-based materials*. (Doctor's Thesis). Vrije Universiteit Brussel.

Karimjee, Z. M. (2014). *Biodegradable Architecture; Finite Construction for Endless Futures* (Master's Thesis). Ontario. Azrieli School of Architecture and Urbanism.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

Arceo, F. (2016) *Infill Patterns; Which is the Strongest one for 3D printing*. Retrieved April 1, 2024, from <https://3dsolved.com/infill-patterns-which-is-the-strongest-one-for-3d-printing/>

BioActive Soils. (2022). " *WHY MYCELIUM IS IMPORTANT.*" Retrieved 7 December, 2023, from <https://www.bioactivesoils.co.nz/why-mycelium-is-important/>

Civil Engineering Portal. *UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH TEST*. Retrieved April 20, 2024, from <https://www.engineeringcivil.com/unconfined-compressive-strength-test.html>.

Ecovative Design. (2018). "*The Mycelium Bio- fabrication Platform.*" Retrieved 7 December, 2023, from <https://ecovatedesign.com/>.

Stevenson, K. (2020). *It Really Is Possible To 3D Print Non-Planar*. Retrieved April 20, 2024, from <https://www.fabbaloo.com/2020/09/it-really-is-possible-to-3d-print-non-planar>

Lidia.ratoi. (2017). *TERRA PERFORMA*. Retrieved 13 December, 2023, <https://iaac.net/project/terraperforma/>

MatMatch. *Basic Stress Analysis Calculations*. Retrieved May 30, 2024, from <https://matmatch.com/learn/property/basic-stress-analysis-calculations>

Naagendran, C. R., Van de Worp, M., Marengo, M., Dubor, A., Cabay, E., Ibrahim, A., Thomas, T., Ratoi, L., Giraud, L., Chukkappali, S., & Tayefi, L. (2017). *Structural Principles for 3D Printing Unfired Clay*. Retrieved December 1, 2023, from <https://www.iaacblog.com/programs/structural-principles-3d-printing-unfired-clay/>

Prusa Research a.s. (2023). *Infill patterns*. Retrieved April 1, 2024, from https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130

- Silverman, J. (2023). *Growing the Future: Navigating the Fungal Architecture Landscape*. Retrieved 7 December, 2023, from <https://medium.com/@jesi0018/growing-the-future-navigating-the-fungal-architecture-landscape>
- Superflux. (2014). *Mycotecture (Phil Ross)*. Retrieved 7 December, 2023, from <https://www.moma.org/interactives/exhibitions/2013/designandviolence/mycotecture-phil-ross/>
- Thorns, E. (2018). *Biodegradable Materials the Construction Industry Needs to Know About*. Retrieved 14 December, 2023, from <https://www.archdaily.com/893552/8-biodegradable-materials-the-construction-industry-needs-to-know-about>
- UNSW Making. *3D Clay Printing Basics*. Retrieved January 1, 2024, from https://www.making.unsw.edu.au/learn/clay_printing/
- Vos, J., Shaun Wu, S., Preisinger, C., Tam, M., & Neng, X. N. (2020). *Buckling Simulation for 3D Printing in Fresh Concrete*. Retrieved April 1, 2024, from <https://karamba3d.com/examples/buckling-simulation-for-3d-printing-in-fresh-concrete/>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

ชลธิชา อรุณรุ่งก้าวหน้าไกล

วุฒิการศึกษา

ปีการศึกษา 2564: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สถาปัตยกรรม)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ทุนการศึกษา

พ.ศ.2566: ทุนโครงการสนับสนุนการสร้างนวัตกรรม

และวิจัยจาก Design Robotic Lab

ประจำปีการศึกษา 2566

