

การพัฒนาสมบัติทางกลและการชะลอการไหม้ไฟของ วัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังและกระดาษรีไซเคิล An improvement of mechanical properties and flame-retardant properties of mycelium bio-composite using cassava starch and recycled paper

นิรชา สุนทรโฆษิต

ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างน้ำหนักเบา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
1771/1 ถ.พัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ
2461150043@tni.ac.th

พิมพ์เพชร สระทองอุ่น*

ห้องวิจัยวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างน้ำหนักเบา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
1771/1 ถ.พัฒนาการ แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง
กรุงเทพฯ
*Corresponding author: pimpet@tni.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลและความสามารถในการชะลอการไหม้ไฟของวัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (MBC) โดยใช้ไมซีเลียมสายพันธุ์ *Pleurotus ostreatus* ซึ่งเพาะเลี้ยงจากกระดาษรีไซเคิลร่วมกับแป้งมันสำปะหลังเป็นสารประสาน ผู้วิจัยได้ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกล ได้แก่ ความหนาแน่นมวลรวม สมบัติการดูดซึมน้ำ สมบัติการไหม้ไฟตามมาตรฐาน UL-94 และความต้านทานแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D 1621 ผลการวิจัยพบว่าสัดส่วนแป้งมันสำปะหลังมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของ MBC โดยตัวอย่าง RP-90:CS-10 มีความหนาแน่นเฉลี่ยสูงสุด ($413.444 \pm 31.113 \text{ kg/m}^3$) และมีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยต่ำสุด ($154.911 \pm 0.990\%$) ด้านความปลอดภัยจากอัคคีภัย ตัวอย่าง RP-80:CS-20 และ RP-90:CS-10 สามารถผ่านการทดสอบการไหม้ไฟแนวตั้งในระดับ V-0 เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังช่วยส่งเสริมการเกิดชั้นถ่านป้องกันความร้อน และด้านความแข็งแรงพบว่าตัวอย่าง RP-60:CS-40 ให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉลี่ยสูงสุดถึง $5.17 \pm 1.57 \text{ MPa}$ ส่งผลให้ MBC ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการเป็นวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและปลอดภัยสูงในอุตสาหกรรมก่อสร้าง

คำสำคัญ: ไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต, แป้งมันสำปะหลัง, กระดาษรีไซเคิล, การชะลอการไหม้ไฟ

ABSTRACT

This study aimed to enhance the mechanical properties and flame-spread resistance of mycelium-based biocomposites (MBC) using the mycelium of *Pleurotus ostreatus* cultivated on recycled paper substrate with cassava starch serving as a binder. The physical and mechanical properties were evaluated, including bulk density, water absorption, flammability performance according to the UL-94, and compressive strength in accordance with ASTM D 1621. The results indicated that the proportion of cassava starch significantly influenced the performance of the MBC. The RP-90:CS-10 sample exhibited the highest average bulk density ($413.444 \pm$

31.113 kg/m^3) and the lowest average water absorption ($154.911 \pm 0.990\%$). In terms of fire safety, the RP-80:CS-20 and RP-90:CS-10 samples achieved a V-0 rating in the vertical burning test, as cassava starch promoted the formation of a protective char layer acting as a thermal barrier. Regarding mechanical performance, the RP-60:CS-40 sample demonstrated the highest average compressive strength of $5.17 \pm 1.57 \text{ MPa}$. These findings suggest that the developed MBC possesses strong potential as an environmentally friendly and highly fire-safe alternative material for applications in the construction industry.

Keywords: Mycelium Bio-Composite, Cassava Starch, Recycled Paper, Flame Retardant

I. บทนำ

ปัจจุบันความปลอดภัยด้านอัคคีภัยเป็นประเด็นวิกฤตในการพัฒนาวัสดุก่อสร้าง เนื่องจากฉนวนและวัสดุตกแต่งอาคารส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิยูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (RPUF) ซึ่งแม้จะมีประสิทธิภาพด้านความร้อนดีเยี่ยม แต่มีข้อจำกัดด้านการติดไฟง่าย การปลดปล่อยก๊าซพิษขณะเผาไหม้ และเมื่อหมดอายุไขการใช้งานแล้วกลายเป็นขยะอาคาร (Construction waste) เนื่องจาก RPUF ไม่สามารถย่อยสลายในสิ่งแวดล้อมได้ [1] นอกจากนี้จากปัญหาภาวะโลกร้อนที่มุ่งใช้วัตถุดิบและพลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุดจึงได้เกิดแนวคิดอาคารสีเขียว (Green Building) ที่มุ่งมุ่งหมายเพื่อผลักดันให้เกิดการแสวงหาวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในอาคารหนึ่งในวัสดุที่ตอบสนองแนวความคิดนี้คือ วัสดุคอมโพสิตชีวภาพ (Biocomposite) อาทิเช่น Wood Plastic Composites (WPC) หรือกลุ่มไม้เทียมที่มีใช้ในอาคารอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากการผสมผสานข้อดีที่เป็นของเหลือจากงานไม้และเรซิน และยังปราศจากปัญหาปลวกกัดกินอาคาร อย่างไรก็ตาม WPC ยังคงพึ่งพาสารเคลือบหน่วงไฟและใช้พลังงานสูงในการรีไซเคิลแยกส่วนประกอบเส้นใยไม้และเรซิน ดังนั้นการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตชีวภาพที่ตอบโจทย์

ทั้งด้านความปลอดภัยความยั่งยืนสำหรับงานอาคารสีเขียวจึงเป็นสิ่งจำเป็น

วัสดุไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (MBC) ได้รับความสนใจในฐานะวัสดุทางเลือกที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง และย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยมีค่าการนำความร้อน (0.04-0.08 W/m·K) ใกล้เคียงกับ RPUF แต่โดดเด่นกว่าด้านความปลอดภัยเนื่องจากไม่ปล่อยก๊าซพิษเมื่อเผาไหม้ [2]-[5], [12] ประสิทธิภาพของ MBC ขึ้นอยู่กับการเลือกสายพันธุ์ไมซีเลียมและวัสดุเพาะเลี้ยง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไมซีเลียมเห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ เพาะเลี้ยงได้เกือบทุกฤดูกาลของประเทศไทย และเจริญเติบโตได้ดีบนวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) โดยเฉพาะกระดาษรีไซเคิลที่มีเซลลูโลส (Cellulose) สูง ซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงและชะลอการหน่วงไฟได้ดี [6] อย่างไรก็ตาม เพื่อแก้ปัญหาความไวต่อความชื้นและการหดตัวของกระดาษรีไซเคิล การใช้สารประสาน (Binder) จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มเสถียรภาพเชิงโครงสร้างให้แก่ MBC

แป้งมันสำปะหลังเป็นสารประสานธรรมชาติที่มีต้นทุนต่ำและเป็นแหล่งคาร์บอน (Carbon Source) ที่มีศักยภาพในการหน่วงไฟ [7] เมื่อได้รับความร้อน แป้งจะเกิดกระบวนการเจลลิตไนเซชัน (Gelatinization) และคายน้ำร่วมกับปฏิกิริยาคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เพื่อก่อตัวเป็นชั้นถ่าน (Char Layer) ที่ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ใจกลางวัสดุ [8] องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังที่มีอะไมโลส (Amylose) ประมาณ 17% ช่วยสร้างโครงข่ายชั้นถ่านที่หนาแน่นผ่านโครงสร้างเชิงเส้น ขณะที่อะไมโลเพกทิน (Amylopectin) ประมาณ 83% ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวและการพองตัวเชิงโครงสร้าง [9]-[11] ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะจุลภาคและพฤติกรรมการกักไฟ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนา MBC จากไมซีเลียมสายพันธุ์ *Pleurotus ostreatus* ร่วมกับกระดาษรีไซเคิลและแป้งมันสำปะหลัง เพื่อยกระดับสมบัติทางกลและประสิทธิภาพการชะลอการหน่วงไฟ สำหรับการใช้งานเป็นวัสดุก่อสร้างทางเลือกที่ปลอดภัยและยั่งยืน

II. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลและความสามารถในการชะลอการหน่วงไฟของ MBC จากกระดาษรีไซเคิลร่วมกับแป้งมันสำปะหลังเป็นวัสดุเพาะเลี้ยงและสารประสาน เพื่อประเมินศักยภาพของ MBC ในการเป็นวัสดุทางเลือก

III. วิธีดำเนินการวิจัย

III.1 กระบวนการขึ้นรูปไมซีเลียมไบโอคอมโพสิต (*Mycelium Bio-Composite: MBC*)

III.1.1 การเตรียมวัสดุเพาะเลี้ยง

กระดาษรีไซเคิล (Recycled Paper: RP) จากสำนักงานที่ไม่ผ่านกระบวนการกำจัดหมักถูกนำไปย่อยละเอียดด้วยเครื่องทำลายเอกสาร แล้วนำไปต้มในน้ำอุณหภูมิ 80°C ปริมาตร 1,600 ml เป็นเวลา 5 นาที เพื่อปรับสภาพโครงสร้างเส้นใยเซลลูโลสให้คลายตัว จากนั้นผสมแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch: CS) ตราปลาไทย 5 ดาว ตามสัดส่วนน้ำหนักแห้ง 5 สัดส่วน ได้แก่ RP-60:CS-40, RP-70:CS-30, RP-80:CS-20, RP-90:CS-10 และ RP-100:CS-0 โดยต้มต่อเป็นเวลา 15

นาที เพื่อให้แป้งมันสำปะหลังเกิดกระบวนการเจลลิตไนเซชันและทำหน้าที่เป็นตัวประสานเคลือบเส้นใยกระดาษ วัสดุเพาะเลี้ยงจะถูกนึ่งฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Portable Pressure Steam Sterilizer (รุ่น DGS-280B) ที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 45 นาที และพักให้เย็นตัวในตู้ปลอดเชื้อเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน

III.1.2 การผสมหัวเชื้อไมซีเลียม

ผสมหัวเชื้อไมซีเลียมสายพันธุ์เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus*) ที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน มกษ. 2507-2559 ลงในวัสดุเพาะเลี้ยงในสัดส่วน 10% โดยน้ำหนักแห้ง ป้อนในโรงเลี้ยงที่ควบคุมสภาวะแวดล้อม (อุณหภูมิ 25-30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75-85% และการถ่ายเทอากาศ) ผ่านระบบ Mini Smart Farm จนเส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตครอบคลุมวัสดุทั้งหมด จากนั้นนำวัสดุบรรจุลงแม่พิมพ์และกดด้วยน้ำหนัก 500 g เพื่อให้โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ เพาะเลี้ยงต่อจนเส้นใยไมซีเลียมเจริญเติบโตเต็มแม่พิมพ์ ก่อนนำออกจากแม่พิมพ์แล้วอบด้วยตู้อบ (redLINE by BINDER รุ่น RF115) ที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อหยุดการเจริญเติบโตของเส้นใยไมซีเลียมและกำจัดความชื้นจนได้เป็น MBC ที่สมบูรณ์

III.2 การทดสอบสมบัติทางกลและกายภาพ

III.2.1 ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk Density)

การทดสอบดำเนินการโดยคำนวณความหนาแน่นจากน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการอบด้วยตู้อบ redLINE by BINDER รุ่น RF115 ต่อปริมาตรของชิ้นงาน

III.2.2 สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

การทดสอบปรับปรุงจากวิธีการของ Appels และคณะ [4] โดยขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 mm และความสูง 25 mm จากนั้นชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน ก่อนแช่ในภาชนะบรรจุ น้ำกลั่น 150 mL แล้วนำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนักที่เวลา 15, 30, 45, 60 นาที และ 2, 4, 24, 48, 72, 96 ชั่วโมง โดยคำนวณการดูดซึมน้ำจากสมการที่ 1

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{(m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}})}{m_{\text{dry}}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ m_{wet} = น้ำหนักเปียกของชิ้นงานในแต่ละช่วงเวลา (g)
 m_{dry} = น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นงาน (g)

III.2.3 สมบัติการหน่วงไฟ (Flame-Retardant Properties)

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน UL-94 [13] โดยขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบที่มีขนาดความกว้างและความหนาอยู่ที่ 13 mm และความยาวอยู่ที่ 125 mm และนำไปทดสอบ ดังนี้

1) การเผาไหม้แนวนอน (Horizontal Burn: HB)

ท่าเครื่องหมายบนชิ้นงานที่ระยะ 25 mm และ 75 mm จากปลายชิ้นงาน แล้ววางชิ้นงานในแนวนอนที่ความสูงจากพื้น จากนั้นให้เปลวไฟที่ระยะห่างจากปลายชิ้นงาน 10 mm ด้วยปืนจุดแก๊สเป็นเวลา 30 วินาที ก่อนนำออก แล้วประเมินระดับการเผาไหม้ตามเงื่อนไขในตารางที่ 1.

ตารางที่ I. การจัดระดับการเผาไหม้แนวนอน (Horizontal Burn)

ความหนาของชิ้นงาน (T)	เงื่อนไข
$T \leq 3 \text{ mm}$	อัตราการไหม้ $\leq 75 \text{ mm/min}$
$3 \text{ mm} \leq T \leq 13 \text{ mm}$	อัตราการไหม้ $\leq 40 \text{ mm/min}$ หากอัตราการไหม้ $> 40 \text{ mm/min}$ จะไม่มีการทดสอบการเผาไหม้แนวตั้งต่อ

2) การเผาไหม้แนวตั้ง (Vertical Burn: VB)

วางชิ้นงานในแนวตั้งฉากสูงจากพื้น จากนั้นให้เปลวไฟที่ระยะห่างจากปลายด้านล่างชิ้นงาน 10 mm ด้วยปืนจุดแก๊สเป็นเวลา 5 วินาที ก่อนนำออก 5 วินาที โดยทำซ้ำจำนวน 5 รอบ เมื่อครบจึงสังเกตลักษณะการไหม้ไฟต่ออีก 60 วินาที แล้วประเมินระดับการเผาไหม้ตามเงื่อนไขในตารางที่ II.

ตารางที่ II. การจัดระดับการเผาไหม้แนวตั้ง (Vertical Burn)

เงื่อนไข	V-0	V-1	V-2
ระยะเวลาเผาไหม้ของชิ้นงานหลังให้เปลวไฟ (s)	≤ 10	≤ 30	≤ 30
ระยะเวลาเผาไหม้รวม 5 รอบ ของชิ้นงาน (s)	≤ 50	≤ 250	≤ 250
ระยะเวลาเกิด Afterglow ของชิ้นงาน (s)	≤ 30	≤ 60	≤ 60
การหยดของเปลวไฟ	ไม่มี	ไม่มี	มี

III.IV ความต้านทานแรงกด (Compressive Strength)

การทดสอบดำเนินการด้วยเครื่อง Shimadzu's AGS-X Series Universal Test ตามมาตรฐาน ASTM D 1621 [14] โดยขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความกว้างและยาวอยู่ที่ 70 mm และความสูงอยู่ที่ 40 mm ขณะดำเนินการทดสอบใช้ค่าควบคุมดังนี้ การควบคุมอัตราการเคลื่อนที่ต่อเวลา (Displacement Control) ที่ 2.5 mm/min และระยะเคลื่อนที่สูงสุด (Stroke) 20 mm

III.IV.V การประยุกต์ใช้ข้อมูลทางสถิติ (ANOVA และ Tukey)

ในงานวิจัยนี้ ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและทางกลของ MBC จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab ผ่านการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละสัดส่วนการทดลอง ในกรณีที่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จะดำเนินการเปรียบเทียบเชิงซ้อน (Post-hoc Comparison) รายคู่ด้วยวิธีของ Tukey (Tukey's HSD Test) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ P-Value < 0.05 เพื่อยืนยันอิทธิพลของสัดส่วนแบริ่งมันสำปะหลังที่มีต่อสมบัติของ MBC

III.IV.VI การทดสอบสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีน (Iodine-Starch Complex Test)

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความเสถียรและยืนยันการไม่ชะละลายของแบริ่งมันสำปะหลังออกจากโครงสร้าง MBC ดำเนินการโดยนำน้ำที่ผ่านการแช่ชิ้นงานนาน 24 ชั่วโมง ปริมาตร 1 mL มาหยดด้วยสารละลายไอโอดีนจำนวน 2 หยด เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีผ่านการทำปฏิกิริยากับอะไมโลส พร้อมเปรียบเทียบผลกับชุดควบคุม ได้แก่ น้ำเปล่า สารละลายแบริ่งมันสำปะหลัง และเจลแบริ่งมันสำปะหลังในสภาวะต่าง ๆ เพื่อประเมินการคงอยู่ของแบริ่งมันสำปะหลังในโครงสร้าง MBC

IV. ผลการวิจัย

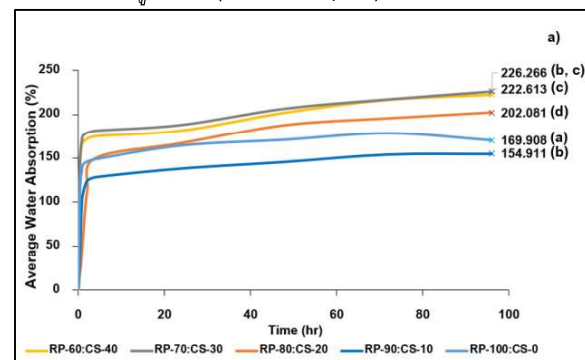
IV.I ความหนาแน่นมวลรวม (Bulk Density)

ผลการทดสอบความหนาแน่นมวลรวมเฉลี่ยของ MBC พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.001) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey โดยตัวอย่าง RP-90:CS-10 มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ $413.444 \pm 31.113 \text{ kg/m}^3$ และถูกจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับ RP-100:CS-0 ($396.497 \pm 12.691 \text{ kg/m}^3$) (กลุ่ม a) เนื่องจากการใช้แบริ่งมันสำปะหลังในสัดส่วนดังกล่าวทำหน้าที่เป็นสารประสานที่ช่วยเติมเต็มช่องว่างระหว่างโครงข่ายเส้นใยไมซีเลียมและเส้นใยเซลลูโลสจากกระดาษรีไซเคิลได้อย่างเหมาะสม ส่งผลให้โครงสร้างภายในเกิดการอัดตัวที่หนาแน่น

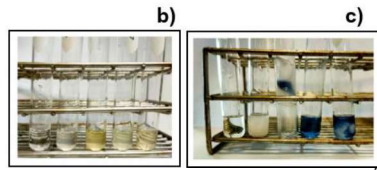
อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่มีสัดส่วนแบริ่งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นเฉลี่ยมีความผันผวน โดยในตัวอย่าง RP-80:CS-20 (กลุ่ม b) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยที่ $332.970 \pm 28.873 \text{ kg/m}^3$ ก่อนจะกลับมาเพิ่มขึ้นในตัวอย่าง RP-70:CS-30 ($347.645 \pm 21.314 \text{ kg/m}^3$) (กลุ่ม b) แสดงให้เห็นว่าปริมาณแบริ่งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อลักษณะการเจริญเติบโตและการสานตัวของเส้นใยไมซีเลียมภายใน MBC ส่งผลให้การอัดตัวของโครงสร้างภายในมีความแตกต่างกันในทางตรงกันข้าม ตัวอย่าง RP-60:CS-40 (กลุ่ม c) กลับมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำที่สุดเพียง $247.195 \pm 23.472 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งการลดลงของความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญนี้คาดว่าเป็นผลมาจากพฤติกรรมของอะไมโลเพกทินที่มีสัดส่วนประมาณ 83% ในแบริ่งมันสำปะหลัง ซึ่งส่งเสริมการพองตัวของเม็ดแบริ่งมันสำปะหลังในระหว่างกระบวนการเจลาติไนเซชัน โดยเมื่อได้รับความร้อนในขั้นตอนการอบแห้ง ไออนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง MBC จะสร้างแรงดันและทำให้เกิดการขยายตัวของปริมาตร ส่งผลให้เกิดโพรงอากาศภายในโครงสร้างมากขึ้น [8]-[9]

ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับ RPUF ที่มีความหนาแน่นในช่วง 30-100 kg/m^3 [5], [16] จะเห็นได้ว่า MBC ยังคงมีความหนาแน่นเฉลี่ยที่สูงกว่า ซึ่งเป็นประเด็นที่ควรได้รับการพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มศักยภาพในการเป็นวัสดุน้ำหนักเบาสำหรับการใช้งานในอนาคต

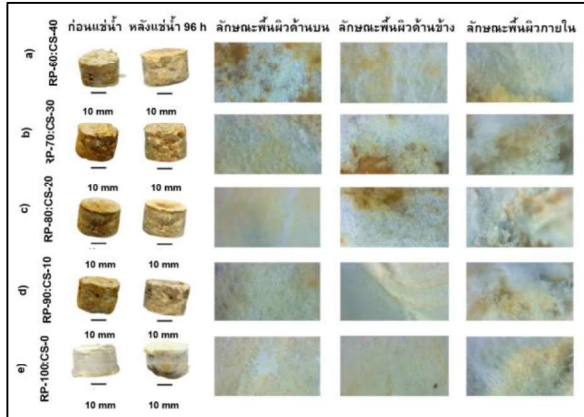
IV.II สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)



รูปที่ I.-a) อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยตามระยะเวลาของ MBC



รูปที่ I-b) การทดสอบสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีนในน้ำแช่ MBC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
รูปที่ I-c) การทดสอบสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีนในชุดควบคุม แป้งมันสำปะหลังในสภาวะต่าง ๆ



รูปที่ II. การเปรียบเทียบทางกายภาพก่อนและหลังการทดสอบ และลักษณะการสลายตัวของเส้นใยไมซีเลียมในตำแหน่งต่าง ๆ ของ MBC

จากรูปที่ I.-a) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.05) โดยตัวอย่าง RP-90:CS-10 (กลุ่ม b) มีอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยต่ำที่สุด ($154.911 \pm 0.990\%$) เนื่องจากปริมาณแป้งมันสำปะหลังในระดับที่เหมาะสมช่วยกระจายตัวเป็นสารยึดประสานลดช่องว่างระหว่างโครงข่ายเส้นใยไมซีเลียม และจำกัดการแพร่ซึมของน้ำเข้าสู่โครงสร้าง ขณะที่ตัวอย่าง RP-70:CS-30 (กลุ่ม b และ c) แสดงค่าสูงสุด ($226.266 \pm 1.262\%$) ซึ่งสัมพันธ์กับสมบัติชอบน้ำของหมู่ไฮดรอกซิลและการพองตัวของอะไมโลเพกทินที่เพิ่มการกักเก็บน้ำภายในโครงสร้าง [9]-[10], [15] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มแป้งมันสำปะหลังเป็น 40% ในตัวอย่าง RP-60:CS-40 (กลุ่ม c) อัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยกลับลดลงแม้จะมีความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำไม่ได้แปรผันตรงกับ ความหนาแน่นเพียงอย่างเดียว แต่อาจเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังภายใน MBC ด้วย โดยเมื่อสัดส่วนแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น อาจเกิดการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่แน่นขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างอิสระลดลง และจำกัดการแพร่ของน้ำเข้าสู่ภายในโครงสร้าง [17]

จากรูปที่ II.-a) - II.-e) แสดงโครงข่ายไมซีเลียมที่สานตัวหนาแน่นในตำแหน่งต่าง ๆ ของ MBC และก่อให้เกิดชั้นผิวภายนอกที่ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันเชิงกายภาพ โดยหลังแช่น้ำ 96 ชั่วโมง MBC ยังคงสภาพสมบูรณ์ไม่เกิดการหลุดลอก นอกจากนี้ การทดสอบสารประกอบเชิงซ้อนไอโอดีนในน้ำแช่ MBC เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ I.-b) เรียงจากซ้ายไปขวา: น้ำเปล่า, RP-60:CS-40, RP-70:CS-30, RP-80:CS-20 และ RP-90:CS-10) แตกต่างจากชุดควบคุมแป้งมันสำปะหลังในสภาวะต่าง ๆ (รูปที่ I.-c) เรียงจากซ้ายไปขวา: น้ำเปล่า,

แป้งมันสำปะหลังละลายน้ำ, เจลแป้งมันสำปะหลัง, น้ำจากการแช่เจลดแป้งมันสำปะหลัง และเจลดแป้งมันสำปะหลังผสมน้ำ) ที่เกิดสีน้ำเงินเข้มจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส ซึ่งยืนยันว่าแป้งมันสำปะหลังไม่เกิดการชะละลายออกจากโครงสร้าง [15] ดังนั้นการดูดซึมน้ำของ MBC จึงเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ร่วมกันของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสของกระดาษรีไซเคิล แป้งมันสำปะหลัง และโครงข่ายเส้นใยไมซีเลียม

IV.III สมบัติการหน่วงไฟ (Flame-Retardant Properties)



รูปที่ III. พฤติกรรมการหน่วงไฟของ MBC ขณะและหลังทดสอบ VB Test ตามมาตรฐาน UL-94

ตารางที่ III. สมบัติการทนไฟของ MBC ตามมาตรฐาน UL-94

	HB Test	VB Test	Average Burning Time (s)	Total Burning Time (s)	Average Afterglow Time (s)	Drip	Average Char Area (mm ²)
RP-60:CS-40	✓	-	5.4	27	>60	-	142.689 (c)
RP-70:CS-30	✓	-	18	90	>60	-	400.070 (b, c)
RP-80:CS-20	✓	V-0	3.8	19	7.6	-	730.476 (a)
RP-90:CS-10	✓	V-0	1.8	9	10.2	-	657.180 (a, b)
RP-100:CS-0	✓	-	4.4	22	>60	-	133.996 (a, b)

หมายเหตุ : เครื่องหมาย '✓' คือ ผ่านการทดสอบ

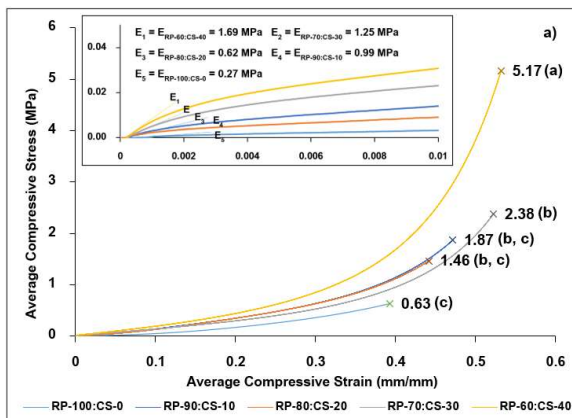
เมื่อเปรียบเทียบกับ RPUF ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ระดับ HB และ VB ตามมาตรฐาน UL-94 [23] พบว่า MBC สามารถผ่านเกณฑ์ระดับ HB อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการเผาไหม้ในแนวตั้งเพิ่มเติม พบว่าพฤติกรรมการหน่วงไฟของ MBC แตกต่างกันอย่างชัดเจนตามสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลัง ดังตารางที่ III. และรูปที่ III. โดยตัวอย่าง RP-80:CS-20 (รูปที่ III.-c)) และ RP-90:CS-10 (รูปที่ III.-d)) ผ่านเกณฑ์ระดับ V-0 สัมพันธ์กับการก่อตัวของชั้นถ่านที่หนาและ

ต่อเนื่องบนผิว MBC ซึ่งชั้นถ่านดังกล่าวทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อน ลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เนื้อวัสดุ และจำกัดการเข้าถึงของออกซิเจน ส่งผลให้เปลวไฟดับได้รวดเร็วและไม่ลุกลามต่อเนื่อง [7], [17]-[18]

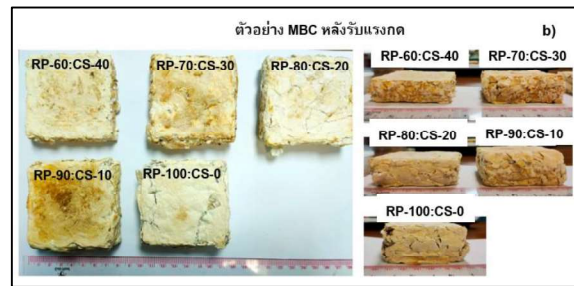
การก่อตัวของชั้นถ่านนี้เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังอย่างอะไมโลส ซึ่งมีโครงสร้างพอลิเมอร์แบบสายตรงเอื้อต่อการจัดเรียงตัวและเชื่อมข้ามสายโซ่ (Cross-Linking) ได้ดีกว่าโครงสร้างแบบกิ่งก้านของอะไมโลเพกทิน โดยเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาคายน้ำภายในสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งเสริมกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและการพัฒนาโครงสร้างชั้นถ่านที่ต่อเนื่องและมีความหนาแน่นสูง เพียงพอที่จะทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันทางกายภาพ [7], [22] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเชิงซ้อนด้วยวิธี Tukey (ตารางที่ III.) ที่ยืนยันว่าตัวอย่าง RP-80:CS-20 และ RP-90:CS-10 มีพื้นที่การก่อตัวของชั้นถ่านเฉลี่ยสูงที่สุดและมีความแตกต่างจากกลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.001) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งเสริมให้ MBC สามารถผ่านเกณฑ์ระดับ V-0 ได้

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการกันหน่วงไฟขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสม เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังเกินระดับเหมาะสม ทำให้ปริมาณเชื้อเพลิงอินทรีย์ในโครงสร้างเพิ่มขึ้นและเกิดการสลายตัวไวขึ้น ขณะที่ชั้นถ่านไม่สามารถพัฒนาได้อย่างเพียงพอในการยับยั้งการลุกลามของเปลวไฟ

IV. IV ความต้านทานแรงกด (Compressive Strength)



รูปที่ IV.-a) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉลี่ยกับความเครียดเฉลี่ย



รูปที่ IV.-b) ลักษณะทางกายภาพของ MBC หลังการทดสอบในมุมมองด้านบนและด้านข้างตามลำดับ

จากการทดสอบพฤติกรรมการต้านทานแรงกดในรูปที่ IV.-a) พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-Value < 0.001) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (One-way ANOVA) โดยตัวอย่าง RP-60:CS-40 (กลุ่ม a) ให้ค่าความต้านทานแรงกดเฉลี่ยและโมดูลัสของยังเฉลี่ยสูงที่สุดคือ 5.17 ± 1.57 MPa และ 1.69 ± 2.79 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ RP-100:CS-0 (กลุ่ม c) มีค่าต่ำที่สุด (0.63 ± 0.16 MPa และ 0.27 ± 0.39 MPa ตามลำดับ) ผลลัพธ์นี้เน้นย้ำถึงบทบาทของสารประสานจากแป้งมันสำปะหลังที่ช่วยเสริมความสามารถในการรับและกระจายแรงภายในโครงข่ายเส้นใยไมซีเลียม [10]-[11]

สำหรับตัวอย่าง RP-90:CS-10 (กลุ่ม b และ c) แม้จะมีความหนาแน่นเฉลี่ยสูงที่สุด แต่กลับแสดงค่าความต้านทานแรงกดเฉลี่ยและโมดูลัสของยังเฉลี่ยในระดับปานกลาง (1.87 ± 0.70 MPa และ 0.99 ± 1.63 MPa ตามลำดับ) พร้อมปรากฏรอยแยกขนาดเล็กบนพื้นผิวหลังการทดสอบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการส่งถ่ายแรงภายในโครงสร้างยังเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับสัดส่วนแป้งมันสำปะหลังที่สูงกว่า (รูปที่ IV.-b)) ขณะที่ตัวอย่าง RP-80:CS-20 (กลุ่ม b และ c) มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจสัมพันธ์กับช่วงองค์ประกอบที่ไม่เอื้อต่อการพัฒนาความต่อเนื่องของโครงสร้างพอลิเมอร์ผสม [24] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนแป้งมันสำปะหลังเป็น 30-40% (ตัวอย่าง RP-60:CS-40 และ RP-70:CS-30) (กลุ่ม b) ความต้านทานแรงกดเฉลี่ยและโมดูลัสของยังเฉลี่ยกลับเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด พร้อมลักษณะการยุบตัวโดยไม่แตกหักฉับพลัน (รูปที่ IV.-b)) ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทของอะไมโลเพกทินที่สามารถดูดซับและกระจายแรงกดภายในวัสดุ [10], [24]

เมื่อเปรียบเทียบกับ RPUF ที่มีความต้านทานแรงกดในช่วง 0.002-48 MPa [5], [16] MBC ที่พัฒนาขึ้นจึงมีศักยภาพในการเป็นวัสดุชีวภาพทางเลือกที่ให้สมดุลระหว่างความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความยั่งยืนได้อย่างเหมาะสม

V. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

สัดส่วนแป้งมันสำปะหลังส่งผลต่อสมบัติของ MBC อย่างมีนัยสำคัญ (P-Value < 0.001) โดยตัวอย่าง RP-90:CS-10 มีความหนาแน่นเฉลี่ยสูงสุด (413.444 ± 31.113 kg/m³) จากการเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยอย่างเหมาะสม ขณะที่ ตัวอย่าง RP-60:CS-40 มีความหนาแน่นเฉลี่ยต่ำสุด (247.195 ± 23.472 kg/m³) เนื่องจากโครงสร้างฟองตัวเป็นโพรงอากาศจากอิทธิพลของอะไมโลเพกทินในขั้นตอนการอบแห้ง ด้านความคงทน แม้มีการดูดซึมน้ำสูงแต่โครงสร้างวัสดุมีความเสถียร ไม่พบการชะละลายของแป้งมันสำปะหลัง สำหรับการหน่วงไฟ สัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง 10-20% สามารถผ่านเกณฑ์ระดับ V-0 ตามมาตรฐาน UL-

94 โดยการสร้างชั้นถ่านที่หนาและต่อเนื่องของอะไมโลส ซึ่งช่วยตัดวงจรความร้อนและออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่สูงเกินไปจะเพิ่มเชื้อเพลิงอินทรีย์และเร่งการสลายตัวด้วยความร้อนจนประสิทธิภาพลดลง ในด้านสมบัติทางกล ตัวอย่าง RP-60:CS-40 ให้ความต้านทานแรงกดเฉลี่ยและค่าโมดูลัสเฉลี่ยสูงสุด (5.17 ± 1.57 MPa และ 1.69 ± 2.79 MPa ตามลำดับ) โดยแป้งมันสำปะหลังช่วยกระจายแรงภายในโครงข่ายเส้นใยไมซีเลียมและแสดงพฤติกรรมการยุบตัวแบบค่อยเป็นค่อยไป

VI. สรุปผลการวิจัย

การพัฒนา MBC จากกระดาษรีไซเคิลและแป้งมันสำปะหลังเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับวัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน โดยสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติได้ตามสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลัง ดังนี้ สัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง 10-20% เหมาะสำหรับงานที่เน้นการชะลอการหน่วงไฟตามมาตรฐาน UL-94 ขณะที่สัดส่วนแป้งมันสำปะหลัง 30-40% เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและน้ำหนักเบา ทั้งนี้ การพัฒนาในอนาคตควรเน้นการปรับปรุงด้านการดูดซึมน้ำเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] Y. Yuan et al., "Surface modification of multi-scale cuprous oxide with tunable catalytic activity towards toxic fumes and smoke suppression of rigid polyurethane foam," *Applied Surface Science*, vol. 556, no. 149792, 2021.
- [2] M. Jones et al., "Mycelium Composites: A review of Engineering Characteristics and Growth Kinetics," *Journal of Bionanoscience*, vol. 11, pp. 241-257, 2017.
- [3] M. Jones et al., "Thermal Degradation and Fire Properties of Fungal Mycelium and Mycelium - Biomass Composite Materials," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 17583, 2018.
- [4] F. Appels et al., "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites," *Materials & Design*, vol. 161, pp. 64-71, 2019.
- [5] M. Jones et al., "Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review," *Materials and Design*, vol. 187, no. 108397, 2020.
- [6] นาวิน กันทวิ, "การแปรรูปกระดาษรีไซเคิลสำหรับประยุกต์ใช้เป็นโฟมกันลามไฟย่อยสลายได้ด้วยไมซีเลียมคอมโพสิต," วศ.บ. (วิศวกรรมยานยนต์), สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 2567.
- [7] T. C. Mokhena et al., *Biomaterials as Green Flame Retardants*, Singapore: Springer Nature, 2024.
- [8] Y. Xia et al., "Facile fabrication of starch-based, synergistic intumescent and halogen-free flame retardant strategy with expandable graphite in enhancing the fire safety of polypropylene," *Industrial Crops and Products*, vol. 184, no. 115002, 2022.
- [9] A. L. Charles et al., "Influence of Amylopectin Structure and Amylose Content on the Gelling Properties of Five Cultivars of Cassava Starches," *Journey of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 52, no. 7, pp. 2717 – 2725, 2025.
- [10] J. H. Han et al., "Impact of the Amylose/Amylopectin Ratio of Starch-Based Foams on Foaming Behavior, Mechanical Properties, and Thermal Insulation Performance," *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2003.
- [11] K. C. Liew et al., "Physico-mechanical properties of particleboard made from seaweed adhesive and tapioca starch flour," *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, vol. 15, pp. 199-203, 2018.
- [12] C. Madusanka et al., "A review of recent advances in fungal mycelium based composites," *Discovery Materials*, 2024.
- [13] Boedeker Plastics, Inc., "UL94 Fire Retardant Testing Overview," [Online]. Available: https://www.boedeker.com/Technical-Resources/Technical-Library/UL94-Fire-Retardant-Testing-Overview?srsltid=AfmBOorx7_mYUK5MOVt1jNbdrToirmJPB402KXYgiGjSTupR53EuFOA. [Accessed: August 3, 2025].
- [14] ASTM INTERNATIONAL Designation: D 1621 – 00, "Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics," [Online]. Available: <https://file.yizimg.com/175706/2012010316223441.pdf> [Accessed: February 19, 2026].
- [15] M. G. Lomeli-Ramirez et al., "Chemical and Mechanical Evaluation of Bio-composites Based on Thermoplastic Starch and Wood Particles Prepared by Thermal Compression," *BioResources*, vol. 9, no. 2, pp. 2960-2974, 2014.
- [16] W. Aiduang et al., "physical, and chemical properties of mycelium-based composites produced from various lignocellulosic residues and fungal species," *Journal of Fungi*, vol. 8, no. 1125, 2022.
- [17] N. Shao et al., "Effect of starch-based flame retardant on the thermal degradation and combustion properties of reconstituted tobacco sheet," *Cellulose*, vol. 28, no. 2, pp. 741-755, 2021.
- [18] K. W. Choi et al., "Mechanically sustainable starch-based flame-retardant coating on polyurethane foams," *Polymers*, vol. 13, no. 8, 1286, April 2021.
- [19] Y. Chen et al., "High-amylose starch-based gel as green adhesive for plywood: Adhesive property, water-resistance, and flame-retardancy," *Carbohydrate Polymers*, vol. 339, no. 122247, 2024.
- [20] M. N. Prabhakar et al., "Improved flame-retardant and tensile properties of thermoplastic starch/flax fabric green composites," *Carbohydrate Polymers*, vol. 168, pp. 201-211, 2017.
- [21] S. Wang et al., "Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications," *Carbohydrate Polymers*, vol. 307, no. 120627, 2023.
- [22] X. Zhu et al., "A comparative study of structure, thermal degradation, and combustion behavior of starch from different plant sources," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 132, no.2, 2018.
- [23] A. Przysztas et al., "Some Key Factors Influencing the Flame Retardancy of EDA-DOPO Containing Flexible Polyurethane Foams," *Polymers*, vol. 10, no. 1115, 2018.
- [24] M. Phiriyawirut et al., "Pushing the Boundaries of Starch Foams: Novel Laminar Composites with Paper Reinforcement," *Journal of Renewable Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 101-114, 2025.