

พฤติกรรมของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่ขึ้นรูปแกนกลางด้วยเส้นใยพลาสติกชีวภาพ โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

Behavior of Sandwich Timber Slabs with a Core Formed by Bio-Plastic Fiber Using 3D Printing Technology

ณัฐวัฒน์ มหาสุวรรณชัย^{1*}, กสาน จันทรโต² และ ทวีช พูลเงิน³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: nattawat.mahas@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่ขึ้นรูปแกนกลางด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติจากเส้นใยพลาสติกชีวภาพ (Polylactic acid, PLA) โดยการศึกษาผลขององศาการพิมพ์เส้นใยแสดงถึง PLA+ ที่ขึ้นรูปในทิศทางขนานกับแนวแรง 0 องศา มีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด สูงกว่า PLA+ ที่ขึ้นรูปในทิศทางทำมุม 45 องศา กับแนวแรง ร้อยละ 17.92 และ 12.81 ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกลของ PLA สามประเภท ได้แก่ PLA-CF (Carbon fiber) PLA-GF (Glass fiber) และ PLA+ (Plus) พบว่า PLA+ มีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดต่อราคาวัสดุสูงกว่า PLA-CF ร้อยละ 35.62 และ 22.83 ตามลำดับ และสูงกว่า PLA-GF ร้อยละ 43.11 และ 43.87 ตามลำดับ พลาสติกชีวภาพชนิด PLA+ ที่มีการขึ้นรูปในทิศทางขนานกับแนวแรง 0 องศา จึงถูกเลือกเป็นแกนกลางของโครงสร้างหน้าตัดประกบ ซึ่งมีสองรูปแบบ คือ แบบรังผึ้ง (Honeycomb) และแบบรังผึ้งโครงข่าย (Honeycomb lattice) ประกบด้วยไม้ไผ่ที่ผิวบนและล่าง ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดชี้ให้เห็นว่า โครงสร้างที่มีแกนกลางเป็นรูปแบบรังผึ้งมีกำลังต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนักสูงกว่าโครงสร้างที่มีแกนกลางเป็นรูปแบบรังผึ้งโครงข่าย 1.8 เท่า โดยการวิบัติเกิดขึ้นในลักษณะเฉือนแนวราบบริเวณแกนกลาง

คำสำคัญ: เทคนิคการพิมพ์ 3 มิติ, พลาสติกชีวภาพ, พื้นไม้หน้าตัดประกบ, รูปทรงรังผึ้ง

Abstract

This research investigates the behavior of laminated wood panels with a core structure fabricated using 3D printing technology from bio-based plastic filament (Polylactic acid, PLA). The study of the effects of fiber printing angles and found that PLA+ printed in the direction parallel to the load (0 degrees) exhibits higher tensile and compressive strength than PLA+ printed at a 45-degree angle to the load by 17.92% and

12.81%, respectively. The study examines the mechanical properties of three types of PLA, including PLA-CF (Carbon fiber), PLA-GF (Glass fiber), and PLA+ (Plus). It was found that PLA+ has a tensile and compressive strength per unit material cost higher than PLA-CF by 35.62% and 22.83%, respectively, and higher than PLA-GF by 43.11% and 43.87%, respectively. PLA+ printed in the 0-degree direction (parallel to the load) was selected as the core material for the sandwich structure, which was fabricated with two core configurations: honeycomb and honeycomb lattice and sandwiched between bamboo layers on the top and bottom. The bending strength test results indicated that the structure with a honeycomb core had a bending strength-to-weight ratio 1.8 times higher than the structure with a honeycomb lattice core. The failure occurred in the form of horizontal shear failure at the core area.

Keywords: 3D printing technology, Bioplastic, Sandwich timber slab, Honeycomb

1. บทนำ

เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) เกิดขึ้นในช่วงคริสต์ทศวรรษ 1980 [1] โดยในปี ค.ศ. 1984 Charles Hull ได้ออกแบบเครื่องพิมพ์สามมิติเครื่องแรกและคิดค้นกระบวนการ (Stereolithography, SLA) ซึ่งเป็นการใช้รังสีอัลตราไวโอเลตทำให้พอลิเมอร์แข็งตัวซ้อนทับกันทีละชั้น การพิมพ์ด้วยระบบนี้มีจุดเด่นที่ความเรียบของพื้นผิว แต่มีข้อจำกัดด้านความเร็วในการพิมพ์และวัสดุราคาสูง ต่อมามีการพัฒนาเทคโนโลยีการพิมพ์อื่น ๆ ได้แก่ (Laminated object manufacturing, LOM) โดย Michael Feygin และ (Selective laser sintering, SLS) โดย Carl Robert Deckard ในปี ค.ศ. 1988 [2] SLS สามารถใช้วัสดุได้หลากหลายโดยใช้เลเซอร์หลอมผงวัสดุให้แข็งตัว จนกระทั่งปี ค.ศ. 1989 Steven Scott Crump ได้คิดค้นและจดสิทธิบัตรเทคโนโลยีการพิมพ์แบบอัดฉีดขึ้น

รูป (Fused deposition modeling, FDM) [3] ซึ่งเป็นการหลอมละลายเส้นใยพลาสติกเพื่อฉีดขึ้นรูปทีละชั้นและแข็งตัวเป็นวัตถุสามมิติด้วยการใช้งานที่ง่าย ต้นทุนการพิมพ์ต่ำ ใช้เวลาพิมพ์น้อย สามารถขึ้นรูปวัตถุที่มีความซับซ้อนได้อย่างแม่นยำ รวมถึงตัวเลือกด้านวัสดุที่หลากหลาย ทำให้การพิมพ์แบบ FDM ได้รับการยอมรับในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นและเป็นที่นิยมใช้งานถึงปัจจุบัน

โดยทั่วไปพลาสติกที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ต้องผ่านการอัดรีดเป็นเส้นพลาสติก (Filament) เสียก่อน ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นพลาสติกขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ทั้งนี้เส้นพลาสติกที่เข้าร่วมกับเครื่องพิมพ์สามมิติ สามารถจำแนกได้หลายประเภทได้แก่ อะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีนสไตรีน (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) ไนลอน (Nylon) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly vinyl alcohol, PVA) และพอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) หรือเส้นพลาสติกชีวภาพ รวมถึงการเพิ่มส่วนผสมบางชนิด เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลและความสมบูรณ์ของชิ้นงาน จากการศึกษาในอดีต [4] แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเส้นใยแก้ว (Glass fibers, GF) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber, CF) สามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงดึงของเส้นพลาสติกชีวภาพ อีกทั้งการใส่แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO₃) ในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงดึงอย่างมีนัยสำคัญ [5] รวมถึงการต้านทานความร้อนที่เพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนพฤติกรรมการเสียรูปจากแข็งเปราะเป็นเหนียว [6] จากงานวิจัยในอดีต [7] พบว่ามีการใช้ PLA ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ราคาไม่แพง การซื้อเข้าถึงได้ง่าย และมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปเป็นโครงสร้างคานที่มีรูปทรงแกนกลางเป็นแบบรังผึ้ง (Honeycomb) ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ทำให้การขึ้นรูปโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากนี้ [8] มีการศึกษารวบรวมพารามิเตอร์ ที่อาจส่งผลต่อสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปด้วยวิธีฉีดขึ้นรูปซึ่งพบว่าความหนาของแต่ละชั้นที่ขึ้นรูป ความเร็วในการพิมพ์ ความร้อนที่หัวพิมพ์ รูปแบบการเรียงตัวของเส้นใย และองศาการเรียงตัวของเส้นใย ล้วนเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพ ในช่วงต้นของการศึกษาจึงมุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพภายใต้พารามิเตอร์การพิมพ์ที่แตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติในการออกแบบและขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนโครงสร้าง

ปัจจุบันมีการศึกษาชิ้นส่วนโครงสร้างที่ช่วยลดขนาดและน้ำหนักของหน้าตัดโครงสร้าง [9] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านกำลังต้านทานน้ำหนักบรรทุกต่อน้ำหนัก นั่นคือ หน้าตัดประกบ (Sandwich panel) ซึ่งเกิดจากการประกบกันระหว่าง ชิ้นส่วนแกนกลาง (Core) กับชิ้นส่วนปิดผิว (Face) ด้านบนและด้านล่าง ในเวลาต่อมา การใช้หน้าตัดประกบ มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง ซึ่งแกนกลางรูปทรงรังผึ้ง เริ่มเป็นที่นิยมในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น ด้วยความสมมาตรของรูปทรง ทำให้

อัตราส่วนกำลังต้านทานแรงกระทำต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง ในส่วนของกระบวนการผลิตโครงสร้างหน้าตัดประกบ การเชื่อมต่อระหว่างแกนกลางกับวัสดุปิดผิวต้องเป็นไปอย่างสมบูรณ์ เพื่อลดปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมด้านทานแรงกระทำ ในส่วนของการประยุกต์ใช้พลาสติกชีวภาพที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ เป็นแกนกลางของโครงสร้างหน้าตัดประกบ [10] มีการศึกษาอิทธิพลของรูปทรงแกนกลางที่แตกต่างกันภายในหน้าตัดประกบ ทั้งรูปทรงแกนเสริมแบบโครงข่าย (Auxetic core) รูปทรงสี่เหลี่ยม (Rectangular) และรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal) รวมถึงการจัดเรียงรูปทรงในทิศทางต่างกันภายใต้การทดสอบแรงกระทำ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า รูปทรงแบบแกนเสริมโครงข่ายสามารถดูดซับพลังงานได้ดี ในขณะที่ตัวแกนรูปทรงหกเหลี่ยมในทิศทาง ตั้งฉากกับระนาบของหน้าตัด ด้านทานแรงกระทำได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับทั้ง 3 รูปทรง [11] การศึกษาต่อมาเป็นการตรวจสอบกำลังต้านทานแรงดัดที่มีรูปแบบแกนกลางแตกต่างกันโดยใช้พลาสติกชีวภาพผสมกับเส้นใยไม้ ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่ารูปทรงแกนกลางแบบ รูกหลวงวงกลมภายในเนื้อวัสดุรูปทรงหกเหลี่ยมมีกำลังต้านทานแรงดัดสูงกว่ารูปทรงอื่น การศึกษาแนวโน้มการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแกนกลางของโครงสร้าง [12] โดยจำแนกโครงสร้างแกนกลางออกเป็นสามประเภท ได้แก่ แกนกลางแบบโฟม แกนกลางแบบ 2 มิติ และแกนกลางแบบโครงข่าย จากการพิจารณาในด้านขีดจำกัดการรับน้ำหนักบรรทุกพบว่า โครงสร้างหน้าตัดประกบที่มีแกนกลางแบบ 2 มิติ และแกนกลางแบบโครงข่ายให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแกนกลางแบบโฟม

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นได้ถึงความหลากหลายของวัสดุที่ใช้ผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างหน้าตัดประกบ ซึ่งวัสดุอีกหนึ่งชนิดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีการใช้งานในโครงสร้างมาอย่างยาวนานคือ ไม้ ด้วยข้อเด่นด้านการก่อสร้างที่รวดเร็ว การดูดซับและสะท้อนเสียงสูง มีอายุการใช้งานที่ยาวนานภายใต้สภาพแวดล้อมที่แห้ง เกิดการลามไฟน้อย รวมถึงกำลังต้านทานแรงต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง [13] จึงทำให้ ไม้ เป็นอีกหนึ่งวัสดุที่ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่สอดคล้องกับการพัฒนาที่ยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม การศึกษาในอดีตยังขาดการเชื่อมโยงระหว่างการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ร่วมกับการประเมินความคุ้มค่าในด้านมูลค่าวัสดุ การศึกษานี้จึงเป็นการนำข้อดีของเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ พลาสติกชีวภาพ และไม้ประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อก่อให้เกิดความสะดวก รวดเร็ว และแม่นยำในด้านการขึ้นรูปชิ้นส่วนโครงสร้าง ตลอดจนการนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมก่อสร้างที่สอดคล้องกับการพัฒนาที่ยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่มีแกนกลางแตกต่างกัน สองรูปทรงคือ รูปทรงรังผึ้ง และรูปทรงรังผึ้งโครงข่าย โดยใช้พลาสติกชีวภาพ ประกบด้วยไม้ไผ่อัดประสานด้วยกาว ในแนวนอนเลียนที่ผ่านการเคลือบสารอินทรีย์ระเหยต่ำเป็นวัสดุปิดผิวด้านบนและด้านล่าง ซึ่งพลาสติกชีวภาพที่ใช้เกิดจากการคัดเลือกผ่านการคัดเลือกอิทธิพลขององศาการพิมพ์เส้นพลาสติกชีวภาพที่ส่งผลต่อกำลัง

ด้านทานแรงดึงและแรงอัด ร่วมกับการศึกษาส่วนผสมเพิ่มของพลาสติกชีวภาพที่มีความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุ

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

2.1 เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ

เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D-Printing) เป็นกระบวนการสร้างวัตถุสามมิติจากไฟล์ดิจิทัล โดยการขึ้นรูปวัสดุซ้อนกันเป็นชั้นต่อชั้นกระทั่งได้วัตถุที่สมบูรณ์ งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องพิมพ์แบบหลอมละลายวัสดุและฉีดขึ้นรูปเป็นเส้นพลาสติกเพื่อสร้างวัตถุสามมิติ หรือ FDM เป็นการหลอมรวมเส้นใยพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติก โดยหัวพิมพ์หรือตัวดันเส้นพลาสติก (Extruder) จะทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิพลาสติกให้อยู่ในสถานะกึ่งของเหลว จากนั้นหัวฉีด (Nozzle) จะทำการฉีดพลาสติกเป็นเส้นบนแผ่นรองพิมพ์ (Bed plate) ในชั้นแรก และจะพิมพ์ซ้อนทับไปเรื่อย ๆ ในขณะเดียวกันแต่ละชั้นที่ขึ้นรูปจะหลอมรวมเป็นชั้นเดียวกัน กระทั่งกระบวนการพิมพ์สิ้นสุดลงวัตถุสามมิติจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง [14] การพิมพ์สามมิติแบบอัดฉีดขึ้นรูป อาจมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีพารามิเตอร์การพิมพ์ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของเส้นพลาสติก โดยขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของเส้นพลาสติกที่ใช้ จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [15] แสดงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นคือ ทิศทางของแรงตึงการอัดเรียงเส้นใยพลาสติก ซึ่งส่งผลทั้งในด้านกำลังต้านทานแรงดึง ความเครียด ความเหนียว โมดูลัสยืดหยุ่น กำลังคราก และความยืดหยุ่น รวมถึงความหนาแน่นของการพิมพ์เส้นใยพลาสติกที่แปรผันตรงกับสมบัติทางกล

2.2 เส้นพลาสติกสำหรับเครื่องพิมพ์สามมิติ

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พลาสติกที่เป็นวัสดุตั้งต้นทั้งหมด 3 ประเภท คือ พลาสติกชีวภาพผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (PLA+) พลาสติกชีวภาพผสมเส้นใยคาร์บอน (PLA-CF) และ พลาสติกชีวภาพผสมเส้นใยแก้ว (PLA-GF) เนื่องจากมีวัสดุที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้

2.3 ไม้ประสานด้วยกาว

ไม้ประสานด้วยกาว (Glued laminate timber, Glulam) คือ เทคนิคการแปรรูปไม้เชื่อมประสานด้วยกาว มีสมบัติเด่นด้านความแข็งแรง ความทนทานต่อการลามไฟ และความสวยงาม ปัจจุบันเทคนิคการประสานไม้ด้วยกาว ยังคงเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยม โดยมีการนำมาใช้ในโครงสร้างร่วมสมัยมากขึ้น ซึ่งหนึ่งในไม้ที่นิยมใช้สำหรับการประสานด้วยกาว คือ ไม้ไผ่ โดยกระบวนการผลิตไม้ไผ่ประสานด้วยกาว เริ่มจากการเลือกไม้ไผ่ ทั้งนี้บริเวณผิวของไม้ไผ่มีปริมาณน้ำมันสูง ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างมัดไม้ไผ่ค่อนข้างต่ำจึงจำเป็นต้องตัดส่วนดังกล่าวออกเป็นชิ้นยาว (Bamboo strip) แล้วจึงเป็นกระบวนการแยกเส้นใย (Defibering) เริ่มจากการจัดเรียงท่อนไม้ไผ่ตามทิศทางของเส้นใยไผ่จากนั้นรีดให้แบนด้วยลูกกลิ้งพื้นเพื่อให้เกิดเป็นไม้ไผ่ในรูปแบบแผ่นหรือเป็นท่อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามต้องการ

จากนั้นใช้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้น กระบวนการถัดไปคือ การจุ่ม (Dipping) ทำการจุ่มในกาวเรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) เพื่อประสานท่อนไม้ไผ่ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส ร่วมกับการใช้สารประกอบอินทรีย์ (Volatile organic compounds, VOCs) เพื่อเพิ่มความคงทนต่อสภาพอากาศ ป้องกันสัตว์ประเภทกัดกินเนื้อไม้ และลดการหด-ขยายตัวของเนื้อไม้ จากนั้นทำการบีบอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) ด้วยความดัน 4-8 เมกะปาสกาล ที่อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการกดที่ 1.0-2.0 มิลลิเมตรต่อนาที ขึ้นตอนสุดท้าย คือ ตัดแต่งไม้เพื่อให้วัสดุมีขนาดและผิวตามต้องการ [16-17]

2.4 วัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive) มีการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชื่อมประสานหลากหลายชนิดที่เหมาะสมต่อการใช้งานภายใต้วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาของงานวิจัยในอดีตพบว่า กาวร้อน (Cyanoacrylate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีความเข้ากันได้กับวัสดุชนิดพลาสติก [18] รวมถึงการประยุกต์ใช้อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin) ในการเชื่อมประสานคานไม้ตัวอย่างทดสอบระหว่างไม้และเส้นใยแก้วเสริมกำลัง สามารถต้านทานกำลังตัดได้โดยไม่เกิดการหลุดร่อนของกาว [19] งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กาวร้อนสำหรับเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนพลาสติกชีวภาพ และใช้อีพ็อกซีเรซิน สำหรับเชื่อมประสานระหว่างแกนกลางพลาสติกชีวภาพและแผ่นไม้ไผ่ประสานจากตัวแทนจำหน่ายของบริษัท Fosroc [20]

3. วิธีการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพ

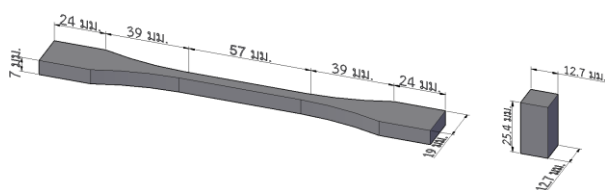
พลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวิธีอัดฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ Bambu Lab X1e โดยใช้พารามิเตอร์พื้นฐานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ

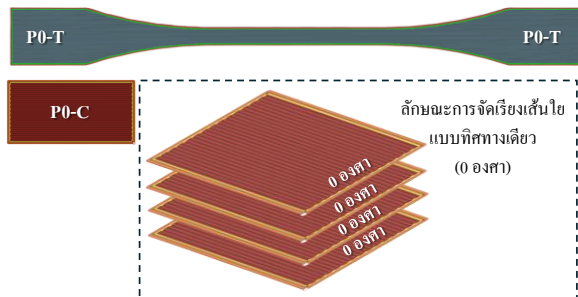
อุณหภูมิที่หัวฉีด (องศาเซลเซียส)	215
อุณหภูมิที่แผ่นรองพิมพ์ (องศาเซลเซียส)	55
ความเร็วในการพิมพ์ในชั้นแรก (มิลลิเมตรต่อวินาที)	50-105
ความเร็วในการพิมพ์ในชั้นอื่น (มิลลิเมตรต่อวินาที)	200-300
ความหนาของเส้นใยต่อหนึ่งชั้น (มิลลิเมตร)	0.2
ความหนาแน่นของการเติมเส้นใย (%)	100
รูปแบบการเติมเส้นใย	จัดเรียงเป็นเส้นตรง
การเติม/การทับซ้อนของผนัง (%)	15
การเติมพื้นผิวด้านบน	ไม่มี
การเติมพื้นผิวด้านล่าง	ไม่มี
จำนวนชั้นผนังโดยรอบของวัตถุ (ชั้น)	2
พื้นที่การพิมพ์ (ลูกบาศก์มิลลิเมตร) (กว้าง × ยาว × สูง)	256 × 256 × 256

3.1.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของ องศาการจัดเรียงเส้นใย

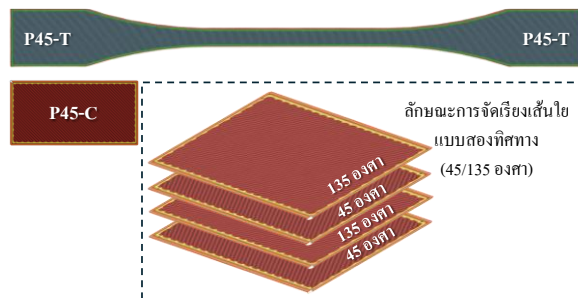
เนื่องจาก PLA+ เป็นวัสดุที่มีต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ชนิดอื่น จึงเลือกใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษาอิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใย ทำการขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงที่มีองศาการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียว 0 องศา ทิศทางการให้แรง (P0-T) และตัวอย่างทดสอบแรงอัด (P0-C) ในส่วนของตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงที่มีองศาการจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง 45/135 องศา และทำมุมกับทิศทางการให้แรง 45 องศา (P45-T) และตัวอย่างทดสอบแรงอัด (P45-C) โดยขนาดมิติและวิธีการทดสอบสอดคล้องกับมาตรฐานของแต่ละการทดสอบ ซึ่งการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงจะมีเงื่อนไขการทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM D638-22 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics [21] และ การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดภายใต้มาตรฐาน ASTM D695-15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics [22] ตัวอย่างทดสอบมีขนาดมิติดังรูปที่ 1 และลักษณะการจัดเรียงเส้นใยดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 ขนาดมิติของตัวอย่างทดสอบ



(ก) ตัวอย่างทดสอบที่มีการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียว



(ข) ตัวอย่างทดสอบที่มีการจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง

รูปที่ 2 ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของพลาสติกชีวภาพ

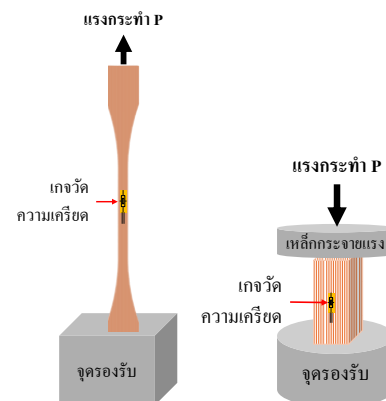
เมื่อการทดสอบแล้วเสร็จ จะพิจารณาคัดเลือกองศาการจัดเรียงเส้นใยที่มีกำลังต้านทานแรงดึงและกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด ขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่ม

3.1.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของ ส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพ

ทำการศึกษาพลาสติกชีวภาพที่ผ่านการเพิ่มส่วนผสมที่แตกต่างกันสามประเภท ได้แก่ PLA+, PLA-CF และ PLA-GF ทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดตามมาตรฐานการทดสอบ เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.1 โดยในส่วนนี้จะมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์วัดความเครียดเพิ่มเติม เพื่อศึกษาพฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบแต่ละประเภท โดยมีลักษณะตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 3 และการติดตั้งตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 เมื่อการทดสอบแล้วเสร็จ จะทำการคัดเลือกวัสดุที่มีความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุ จากการพิจารณาวัสดุที่มีความกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดต่อราคาวัสดุสูงสุด เพื่อนำวัสดุที่มีความคุ้มค่านี้ขึ้นรูปเป็นแกนกลางสองรูปทรงคือ รูปทรงรังผึ้ง และรูปทรงรังผึ้งโครงข่าย



รูปที่ 3 ตัวอย่างทดสอบ PLA+ PLA-CF และ PLA-GF



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

3.2 ไม่ไผ่ประสานด้วยกาว

3.2.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

การศึกษานี้ใช้ไม้ไผ่ประสานด้วยกาวที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ทิมเบอร์ เทคโนโลยี ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด จุดเด่นของไม้ไผ่อัดประสานนี้ มีการเลือกใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีการระเหยต่ำ (Low-VOCs) แต่ยังคงไว้ซึ่งความทนทานที่เพียงพอต่อการใช้งาน [23] โดยมีขนาด มิติ และวิธีการทดสอบสอดคล้องกับมาตรฐานของแต่ละการทดสอบ ซึ่งการทดสอบ

กำลังต้านทานแรงดึง (GB-T) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D198-22 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes [24] และการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด (GB-C) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดในแนวขนานเส้นของไม้ มยผ. 1222-51 [25] ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 5



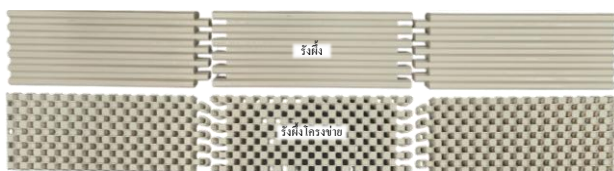
(ก) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง (ข) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

รูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบไม้ไม่ประสานด้วยกาว

3.3 กำลังต้านทานแรงดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่ขึ้นรูปแกนกลางด้วยเส้นพลาสติกชีวภาพ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

เครื่องพิมพ์สามมิติที่ใช้ในการศึกษานี้ มีข้อจำกัดในการพิมพ์ขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพได้ไม่เกิน 256 มิลลิเมตร ซึ่งไม่สามารถขึ้นรูปแกนกลางที่มีความยาวต่อเนื่องได้ตามขอบเขตการศึกษา (720 มิลลิเมตร) ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการต่อเชื่อมด้วยกาว 2 จุดโดยทำการพิมพ์ขึ้นรูปแกนกลางรูปทรงรังผึ้งและรังผึ้งโครงข่าย ที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง และทำการออกแบบให้แต่ละส่วนมีการบาร่อง เพื่อต่อเชื่อมกันในลักษณะที่คล้ายกับนิ้วประสานดังรูปที่ 6 โดยการเชื่อมประสานวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ด้วยวัสดุประสาน 2 ชนิด คือ กาวร้อนเชื่อมประสานระหว่างพลาสติกชีวภาพและพลาสติกชีวภาพ และ อีพ็อกซีเรซินเชื่อมประสานระหว่างพลาสติกชีวภาพและไม้



รูปที่ 6 แกนกลางรูปทรงรังผึ้ง และรังผึ้งโครงข่าย

จากนั้นทำการเชื่อมประสานพลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปเป็นรูปทรงรังผึ้ง (Honeycomb, HC) และรังผึ้งโครงข่าย (Honeycomb lattice, HCLT) ทั้ง 3 ชิ้นส่วนด้วยกาวร้อน ทั้งไว้ให้แห้งด้วยระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการเชื่อมประสานระหว่างพลาสติกชีวภาพที่เป็นแกนกลางและแผ่นไม้ไผ่ด้วยอีพ็อกซีเรซิน จากนั้นบิอัดขึ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดการแยกตัวด้วยระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้มาซึ่งพื้นไม้หน้าตัดประกบที่มีแกนกลางรูปทรงรังผึ้ง (Sandwich honeycomb, SW-HC) และพื้นไม้หน้าตัดประกบที่มีแกนกลางรูปทรงรังผึ้งโครงข่าย (Sandwich honeycomb lattice, SW-HCLT) และทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 น้ำหนักของชิ้นส่วนพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบ	น้ำหนักของแผ่นไม้เฉลี่ย (กรัม)	น้ำหนักของแกนกลางเฉลี่ย (กรัม)
SW-HC	825.88	738.46
SW-HCLT	801.15	356.28

3.3.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด

การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด เพื่อศึกษาพฤติกรรมดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่ขึ้นรูปแกนกลางด้วยเส้นพลาสติกชีวภาพรูปทรงรังผึ้ง และรังผึ้งโครงข่าย โดยกำหนดให้พื้นไม้ตัวอย่างทดสอบมีการเชื่อมประสานระหว่างแกนกลางและแผ่นปิดผิวอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด เป็นการควบคุมให้การวิบัติของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดเท่านั้น โดยอ้างอิงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D198-22 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes ดังรูปที่ 7

เมื่อคานถูกแรงภายนอกกระทำจะส่งผลให้เกิดแรงภายในเพื่อต้านทานแรงกระทำ คานจะเกิดการโก่งตัวและเกิดหน่วยแรงภายในซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้หลักการสมดุลของแรงและโมเมนต์ พฤติกรรมของคานภายใต้โมเมนต์ดัดดัดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ขนาดหน้าตัด และจอร์จรับของคาน ซึ่งส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียว สำหรับคานที่ต้านทานแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนจะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงดัดในคาน ซึ่งการพิจารณาตัวอย่างที่ถูกกระทำภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด เมื่อสร้างแผนภาพแรงเฉือน และแผนภาพโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในคาน แสดงให้เห็นถึงบริเวณช่วงกึ่งกลางคานเกิดแรงกระทำแบบแรงดัดล้วน ซึ่งจะเกิดแรงเฉือนในคานเพียงช่วงริมของคานเท่านั้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์พฤติกรรมดัดล้วนของคาน ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานการดัดล้วน จึงพิจารณาใช้สมการหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในแนวแกนของคานเนื่องจากโมเมนต์ M บนหน้าตัดที่ห่างจากแกนสะเทินเป็นระยะ y และ I คือโมเมนต์ของความเฉื่อย และเนื่องจากแรงกระทำแบบ 4 จุดบนคาน สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแรงกระทำ P และระยะห่างระหว่างจอร์จรับ L ที่ขึ้นกับโมเมนต์ของความเฉื่อยได้ ดังสมการที่ (1) [26]

$$\sigma_x = \frac{My}{I} = \frac{PLy}{6I} \quad (1)$$

ทั้งนี้สตีเฟนสต่อการต้านทานแรงดัด EI สามารถคำนวณได้จากส่วนยืดหยุ่นเชิงเส้นเริ่มต้นของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ P ต่อระยะการโก่งตัว δ ดังสมการที่ (2) [27]

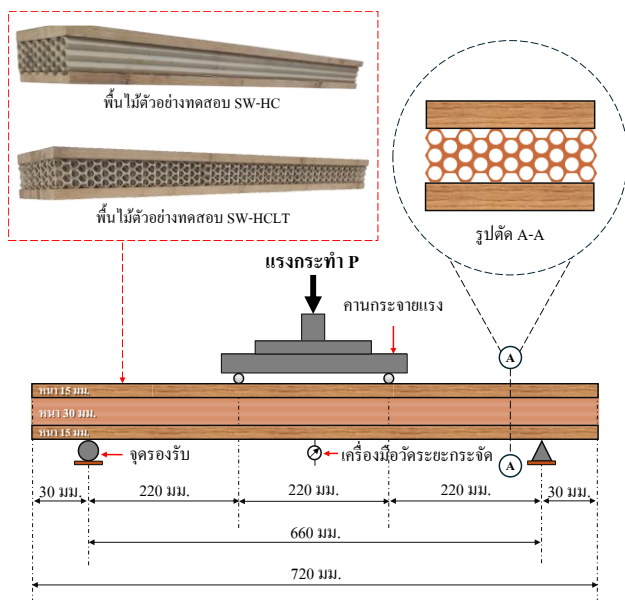
$$EI = \frac{23PL^3}{1296\delta} \quad (2)$$

คานเชิงประกอบ (Composite beams) คือ คานที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิดขึ้นไป ยึดติดกันแน่นเสมือนเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน อย่างไรก็ตามการ

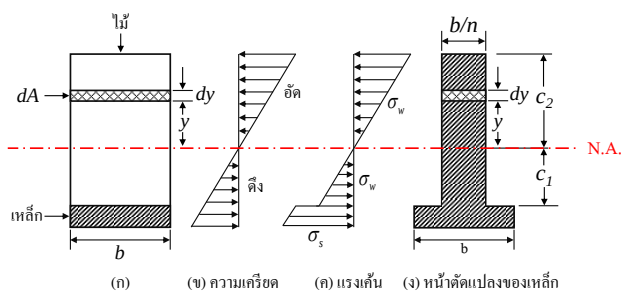
วิเคราะห์คานที่ประกอบด้วยวัสดุแตกต่างกันอาจไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการหน่วยแรงดัดในคานได้โดยตรงเนื่องจากคานเชิงประกอบนี้ยังไม่มีวัสดุชนิดเดียวกัน หากพิจารณาการเปลี่ยนรูปของคานเชิงประกอบจะพบว่าความเครียดตามแนวก้นยังคงแปรผันตามระยะ y จากแกนสะเทินแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าแกนสะเทินของหน้าตัดคานเชิงประกอบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางเรขาคณิตของหน้าตัด ดังนั้นในทางทฤษฎีเชิงเส้นจึงต้องแปลงหน้าตัดให้เป็นวัสดุชนิดเดียวกันก่อน ร่วมกับการหาจุดศูนย์กลางเรขาคณิตใหม่ของหน้าตัดแปลง กำหนดให้ อัตราส่วนระหว่างค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก E_s ต่อมอดูลัสยืดหยุ่นของไม้ E_w เท่ากับ n โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$n = \left(\frac{E_s}{E_w} \right) \quad (3)$$

ดังนั้น หน้าตัดส่วนที่เป็นไม้ย่อมเดิมอาจแปลงเป็นหน้าตัดของเหล็กได้ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความกว้างของไม้ที่เปลี่ยนเป็นเหล็กเท่านั้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $b'_s = b/n$ เมื่อกระบวนการแปลงหน้าตัดเสร็จสิ้น จึงสามารถคำนวณหาตำแหน่งของแกนสะเทินใหม่และสามารถใช้สมการหาหน่วยแรงได้จากสมการที่ (1) และต้องแปลงค่าหน่วยแรงที่ได้นี้กลับไปเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในเนื้อไม้เดิม โดยการหารด้วยค่า n



รูปที่ 7 การติดตั้งพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด



(ก) (ข) ความเครียด (ค) แรงเค้น (ง) หน้าตัดแปลงของเหล็ก

รูปที่ 8 หน่วยแรงและความเครียดในคานเชิงประกอบ

4. ผลการศึกษา

4.1 อิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

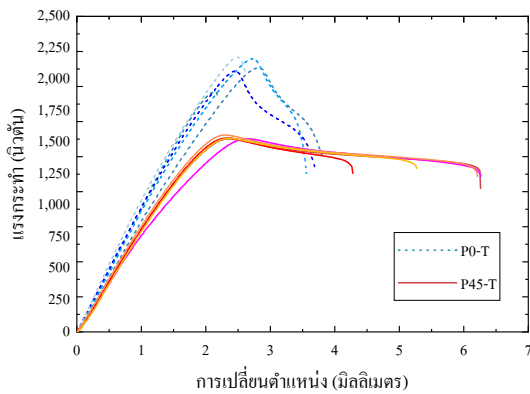
การจัดเรียงเส้นใยพลาสติกชีวภาพแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) มีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดมากกว่าการจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง ทำมุมกับทิศทางของแนวแรง (45/135 องศา) ร้อยละ 17.92 และ 12.81 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV) เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D.) ต่ค่าเฉลี่ย (Mean) ของตัวอย่างทดสอบ แสดงถึงการกระจายตัวของตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่เกินร้อยละ 6 ดังตารางที่ 3

การวิเคราะห์ผลเริ่มจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึง ดังรูปที่ 9 (ก) แสดงถึงช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกระทำ มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่คล้ายกัน ทั้งการจัดเรียงแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง เมื่อเวลาผ่านไปแรงดึงในตัวอย่างทดสอบ P0-T ลดลงอย่างรวดเร็วกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ ในขณะที่ตัวอย่างแรงดึงในตัวอย่างทดสอบ P45-T จะเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งโดยมีแรงดึงคงที่กระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ โดยลักษณะการวิบัติภายใต้แรงดึงเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางไปจนถึงคอคอดของตัวอย่างทดสอบ ในการวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงอัดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงอัดดังรูปที่ 9 (ข) พบว่ามีพฤติกรรมการต้านทานกำลังอัดคล้ายกับแรงดึง โดยมีลักษณะการวิบัติเป็นลักษณะการหลุดในแนวตั้งอย่างช้า ๆ แสดงดังรูปที่ 10

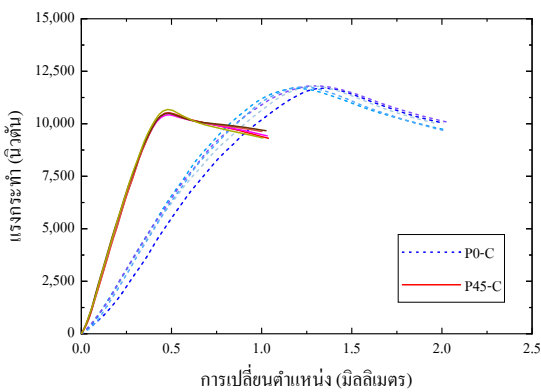
จากพฤติกรรมต้านทานแรงดึงและแรงอัด ภายใต้อิทธิพลของการจัดเรียงเส้นใยพลาสติกจึงนำไปสู่การศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมที่แตกต่างกันในพลาสติกชีวภาพได้แก่ PLA+ PLA-CF และ PLA-GF โดยขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง 0 องศา เนื่องจากมีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดสูงกว่าการจัดเรียงเส้นใยพลาสติกแบบสองทิศทาง

ตารางที่ 3 ผลทดสอบอิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

ตัวอย่างทดสอบ	แรงกระทำสูงสุด (นิวตัน)		กำลังต้านทานแรงสูงสุด (เมกะปาสกาล)	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
P0-T	1,871.95	88.71	46.11	1.18
P45-T	1,537.73	11.05	37.85	2.20
P0-C	11,749.72	46.05	69.47	0.52
P45-C	10,528.29	83.22	60.57	0.45



(ก) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง



(ข) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดแบบทิศทางเดียวและสองทิศทาง

รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ
พลาสติกชีวภาพที่มีองค์การจัดเรียงเส้นใยต่างกัน



(ก) P0-T



(ข) P0-C



(ค) P45-T



(ง) P45-C

รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีองค์การจัดเรียงเส้นใยต่างกัน

4.2 อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพต่อกำลังต้านทานแรงดึง และแรงอัด

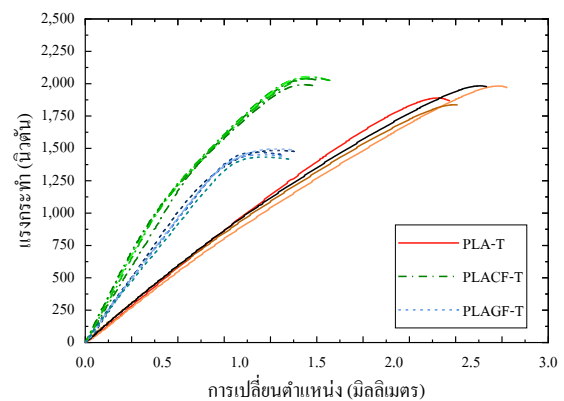
ตารางที่ 4 แสดงกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของพลาสติกชีวภาพ
ทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ PLA+ PLA-CF และ PLA-GF พบว่า PLA+ มีกำลัง
ต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 44.22 เมกะปาสกาล และ PLA-CF มีกำลัง
ต้านทานแรงอัดสูงสุด 86.35 เมกะปาสกาล โดยมีพฤติกรรมช่วงต้นเป็น
เส้นตรงทั้งภายใต้แรงกระทำแบบดึงและอัด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของ
ความแปรปรวน พบว่าทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่เกินร้อยละ 6

สำหรับการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง จากกราฟความสัมพันธ์
ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึง ดังรูปที่ 11 (ก)
แสดงถึงการให้แรงกระทำถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด แรงดึงจะมีการตกลง
อย่างรวดเร็วกระทั่งเกิดการวิบัติบริเวณกึ่งกลางถึงคอคอดของตัวอย่าง
ทดสอบพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด กำลังต้านทานแรงดึงของ PLA-GF มีค่า
ต่ำกว่า PLA+ และ PLA-CF ร้อยละ 24.36 และ 23.63 ตามลำดับ ซึ่งมี
แนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาในอดีต [4]

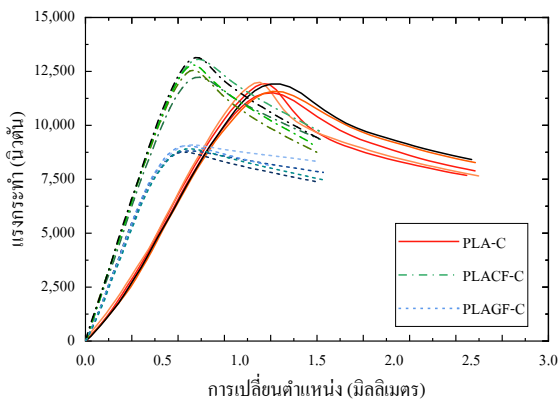
การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
แรงกระทำและการเคลื่อนตัวภายใต้แรงอัด ดังรูปที่ 11 (ข) พบว่า PLA+ และ
PLA-CF มีการยืดตัวได้น้อยในช่วงต้น และมีจุดเปลี่ยนโครงสร้างฐาน
ที่เห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มแรงกระทำจนถึงขณะหนึ่ง แรงกระทำจะลดลงอย่าง
รวดเร็ว และการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในเวลาต่อมา กระทั่งวัสดุไม่
สามารถต้านทานแรงอัดได้และเกิดการวิบัติในที่สุด ซึ่งต่างจาก PLA-GF
ที่เกิดการวิบัติภายใต้แรงกระทำที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมชนิดอื่น
โดยมีลักษณะวิบัติเช่นเดียวกับส่วนผสมชนิดอื่น

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของพลาสติกชีวภาพ

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังต้านทานแรงดึง (เมกะปาสกาล)		กำลังต้านทานแรงอัด (เมกะปาสกาล)	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
PLA+	44.22	2.37	75.22	1.17
PLA-GF	35.56	0.34	57.29	0.37
PLA-CF	43.96	0.91	86.35	1.40



(ก) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงที่มีส่วนผสมเพิ่มแตกต่างกัน



(ข) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดที่มีส่วนผสมเพิ่มแตกต่างกัน

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ
พลาสติกชีวภาพที่มีส่วนผสมเพิ่มแตกต่างกัน

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความคุ้มค่าด้านมูลค่า PLA ที่มีส่วนผสมต่างกัน

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังต้านทานแรงดึง ต่อราคาวัสดุ (เมกะปาสกาลต่อบาท)	กำลังต้านทานแรงอัด ต่อราคาวัสดุ (เมกะปาสกาลต่อบาท)
PLA+	5.16	29.49
PLA-GF	2.94	16.55
PLA-CF	3.32	22.76

ในส่วนของการประเมินความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุด้วยอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำต่อมูลค่าของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จากตารางที่ 5 พบว่า PLA+ มีความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุมากที่สุดเมื่อเทียบกับ PLA-CF และ PLA-GF ทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมของ PLA+ ที่มีการใส่แคลเซียมคาร์บอเนตราคา 469 บาทต่อกิโลกรัม เพิ่มเติมในองค์ประกอบของพลาสติกชีวภาพ ซึ่งมีราคาถูกกว่าเส้นใยคาร์บอนที่มีราคาเท่ากับ 659 บาทต่อกิโลกรัม และเส้นใยแก้วในราคา 690 บาทต่อกิโลกรัม [28] รวมถึงความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่มากเพียงพอต่อการประเมิน

การประกอบชิ้นส่วนหน้าตัดประกบในขั้นตอนถัดไปจึงเลือกใช้ PLA+ ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องจักรจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) เป็นแกนกลางรูปทรงรังผึ้ง และรังผึ้งโครงข่าย

4.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของไม้ไผ่ประสาน

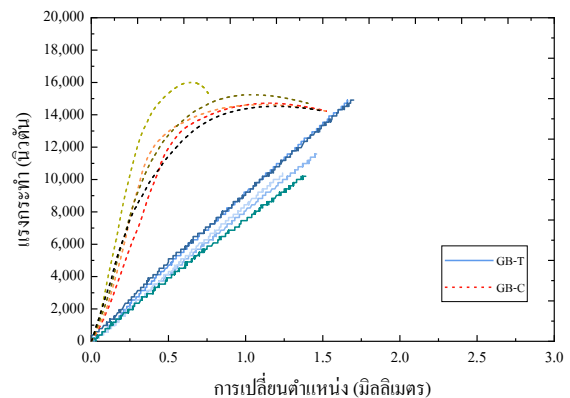
จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดในแนวนอนเส้นใยไม้พบว่าไม้ไผ่ประสานด้วยกาว มีกำลังต้านทานแรงดึงมากกว่าแรงอัด 2.78 เท่า ซึ่งผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและอัดเป็นไปดังตารางที่ 6 พฤติกรรมต้านทานแรงดึงของไม้ไผ่ประสานด้วยกาวในแนวนอนเส้นใยมีความเป็นเส้นตรงตลอดการให้แรงกระทำ และเมื่อการให้แรงเป็นไปอย่างต่อเนื่องถึงจุดหนึ่งวัสดุเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึงในรูปที่ 12

โดยลักษณะการวิบัติเป็นการแตกหักตามแนวเส้นใยบริเวณกึ่งกลางไปจนถึงคอคอดของตัวอย่างทดสอบ

พฤติกรรมต้านทานแรงอัดของไม้ไผ่ประสานด้วยกาวในแนวนอนเส้นใยมีความเป็นเส้นตรงในช่วงต้น เมื่อให้แรงกระทำถึงจุดหนึ่ง แรงกระทำที่เกิดขึ้นเริ่มคงที่ และลดลงอย่างช้าๆ โดยการเคลื่อนตัวยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวเส้นใย

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและอัดของไม้ไผ่ประสาน

ตัวอย่างทดสอบ	หน่วยแรง (เมกะปาสกาล)		มอดูลัสยืดหยุ่น (เมกะปาสกาล)	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.
GB-T	108.48	12.05	8,949.60	540.44
GB-C	39.03	1.46	6,621.55	1,213.49



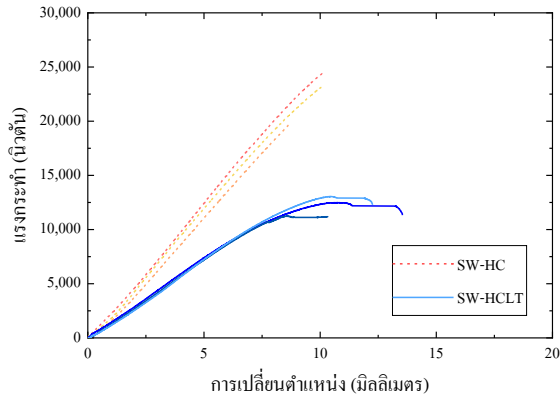
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ
ไม้ไผ่ประสานด้วยกาวภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

4.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ SW-HC และ SW-HCLT ดังรูปที่ 13 ภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด ดังรูปที่ 14 พบว่า SW-HC มีพฤติกรรมใกล้เคียงเชิงเส้น กระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด สำหรับตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT มีพฤติกรรมช่วงต้นคล้ายเชิงเส้น กระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างช้าๆ โดยลักษณะการวิบัติของหน้าตัดทั้งสองรูปทรงเป็นการวิบัติแบบเฉือนแนวราบบริเวณแกนกลางพลาสติกชีวภาพของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 15

จากการคำนวณภายใต้สมการ (1) และ (2) ที่ผ่านการแปลงหน้าตัดแล้ว ได้ผลดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่า SW-HC มีกำลังต้านทานแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า SW-HCLT เท่ากับ 2.18 และ 2.03 เท่า ตามลำดับ เป็นผลเนื่องจากความหนาแน่นของรูปทรงแกนกลาง HC ที่มากกว่าแกนกลางแบบ HCLT และเมื่อพิจารณาการกำลังต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนัก พบว่า SW-HC มีค่ามากกว่า SW-HCLT ถึง 1.80 เท่า เป็นผลมาจากส่วนต่างของน้ำหนักของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบ แม้ว่า HCLT จะมีน้ำหนักที่เบากว่า HC ถึง

2.00 เท่า แต่การพิจารณาร่วมกับไม้ที่ปิดผิวด้านบนและด้านล่าง ส่งผลให้น้ำหนักรวมของหน้าตัด SW-HC และ SW-HCLT ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่าทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่เกิน ร้อยละ 10



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ ไม้หน้าตัดประกบภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด



(ก) ตัวอย่างทดสอบ SW-HC



(ข) ตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT

รูปที่ 14 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด



(ก) ตัวอย่างทดสอบ SW-HC



(ข) ตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT

รูปที่ 15 ลักษณะการวัดของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบ

ตัวอย่าง ทดสอบ	กำลังต้านทาน แรงดัด (เมกะปาสกาล)		มอดูลัสยืดหยุ่น (เมกะปาสกาล)		กำลังต้านทานแรงดัด ต่อน้ำหนัก (เมกะปาสกาล/กรัม)	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
SW-HC	46.52	4.23	7,976.47	176.02	0.01945	0.00169
SW-HCLT	21.33	1.30	3,925.26	21.68	0.01089	0.00055

5. บทสรุป

การศึกษาพฤติกรรมดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบ โดยใช้แกนกลางที่ ผ่านกระบวนการคัดเลือกด้านกำลัง และด้านมูลค่าวัสดุ ขึ้นรูปเป็นรูปทรง รังผึ้งและรังผึ้งโครงข่าย มีผลลัพธ์การศึกษาต่อไปนี้

1. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของ องค์การจัดเรียงเส้นใยพบว่า องค์การจัดเรียงเส้นใยแบบ ทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) มีกำลังต้านทานแรงดัด และแรงอัดสูงกว่าองค์การจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง (45/135 องศา)
2. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดและแรงอัดต่อราคาของวัสดุ ภายใต้อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพพบว่า PLA+ มีความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA-CF และ PLC-GF
3. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของ SW-HC และ SW-HCLT พบว่าหน้าตัดประกบ SW-HC มีกำลังต้านทานแรงดัดและกำลัง ต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนักสูงกว่า SW-HCLT 2.18 และ 1.80 เท่า ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการ วิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สัญญาเลขที่ N42A650314 ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริม วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สทว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้ โครงการทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund 2567: โครงการ เทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0) ขอขอบคุณบริษัท ทิมเบอร์ เทคโนโลยี ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนไม้ตัวอย่าง

ทดสอบทั้งหมด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความ
อนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Maliki, J.Q. (2015). The processes and technologies of 3D Printing. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*, 4(10), pp. 161-165.
- [2] Savini, A. and Savini, G.G. (2015). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. *IEEE History of Telecommunications Conference (HISTELCON)*, Madrid, Spain, 18-19 September 2015, pp. 1-8.
- [3] Gokhare, V., Raut, D. and Shinde, D. (2017). A Review paper on 3D-printing aspects and various processes used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 6, pp. 953-958.
- [4] Vălean, C., Stoia, D.I., Opris, C. and Linul, E. (2024). Effect of fillers on mechanical properties of FDM printed PLA components. *Procedia Structural Integrity*, 56, pp. 97-104.
- [5] Kasuga, T., Maeda, H., Kato, K., Nogami, M., Hata, K.-i. and Ueda, M. (2003). Preparation of poly(lactic acid) composites containing calcium carbonate (vaterite). *Biomaterials*, 24, pp. 3247-3253.
- [6] Nekhamanurak, B., Patanathabutr, P. and Hongsriphan, N. (2012). Thermal-mechanical property and fracture behaviour of plasticised PLA-CaCO₃ nanocomposite. *Plastics Rubber and Composites*, 41, pp. 175-179.
- [7] Ghazijahani, T.G., Kasebahadi, M., Hassanli, R. and Classen, M. (2022). 3D printed honeycomb cellular beams made of composite materials (plastic and timber). *Construction and Building Materials*, 315, 125541.
- [8] Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C.-O. and Marginean, G. (2022). The Influence of the Process Parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication-A review. *Polymers*, 14(5), 886.
- [9] Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Engineering Materials Advisory Services, pp.1-10.
- [10] Sarvestani, H.Y., Akbarzadeh, A.H., Niknam, H. and Hermenean, K. (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: energy absorption and structural performance. *Composite Structures*, 200.
- [11] Zarna, C., Carrasco, G.C. and Echtermeyer, A.T. (2023). Bending properties and numerical modelling of cellular panels manufactured from wood fibre/PLA biocomposite by 3D printing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 165, 107368.
- [12] Ma, Q., Rejab, M.R.M., Siregar, J.P. and Guan, Z. (2021). A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels. *Journal of Composite Materials*, 55(18), pp. 2513-2555.
- [13] Tazmeen, T. and Mir, F.Q. (2024). Sustainability through materials: A review of green options in construction. *Results in Surfaces and Interfaces*, 14, 100206.
- [14] Kristiawan, R.B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, and Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11, pp. 639-649.
- [15] El Essawi, B., Abdallah, S., Ali, S., Mohammed, A.N.A., Susantyoko, R.A. and Pervaiz, S. (2024). Optimization of infill density, fiber angle, carbon fiber layer position in 3D printed continuous carbon-fiber reinforced nylon composite. *Results in Engineering*, 21, 101926.
- [16] Chen, M., Semple, K., Hu, Y., Zhang, J., Zhou, C., Pineda, H., Xia, Y., Zhu, W. and Dai, C. (2024). Fundamentals of bamboo scrimber hot pressing: mat compaction and heat transfer process. *Construction and Building Materials*, 412, 134843.
- [17] Chen, J., Guagliano, M., Shi, M., Jiang, X. and Zhou, H. (2020). A comprehensive overview of bamboo scrimber and its new development in China. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(2), pp. 363-379.
- [18] Eakintumas, W., Pulngern, T., Rosarpitak, V. and Sombatsompop, N. (2022). Load-bearing capacity of wood polyvinyl chloride composite log-walls with openings strengthened with steel flat bars via experimental and numerical studies. *Structures*, 39, pp. 242-254.
- [19] Udtaranakron, T., Pulngern, T., Mahasuwanchai, N., Sombatkaew, C., Chinnarat, T. and Sombatsompop, N. (2024). Flexural strengthening of thermally modified rubberwood glulam beams with FRP under static and cyclic loads. *Wood Research*, 69(3), pp. 469-484.
- [20] Fosroc International, Fosroc [Online], Available: <http://www.fosroc.com> [2025 Apr 9].
- [21] ASTM International (2022). Standard D638-22, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

-
- [22] ASTM International (2015). Standard D695-15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.
- [23] Steel and glulam hybrid space truss. *Engineering Structures*, 171, pp. 140-153.
- [24] ASTM International (2022). Standard D198-22, Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.
- [25] กรมโยธาธิการและผังเมือง (2551). มาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดในแนวนอนสั้นของไม้. มยพ. 1222-51.
- [26] สิริศักดิ์ ปโยธรศิริ (2549). *กลศาสตร์วัสดุ*. ว. เพ็ชรสกุล, กรุงเทพฯ. หน้า 203-256.
- [27] Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M. and Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, pp. 547-555.
- [28] Molastic Thailand, Molastic [Online], Available: <https://molastic.com> [2025 Apr 24].