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 จันทร์โต[2] และ ทวิช พูลเงิน[3]

[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 องศากับแนวแรงร้อยละ 17.92 และ 12.81 ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางกลของ PLA สามประเภท ได้แก่ PLA-CF (Carbon fiber) PLA-GF (Glass fiber) และ PLA+ (Plus) พบว่า PLA+ มีค่ากำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดต่อราคาวัสดุสูงกว่า 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 สามารถใช้วัสดุได้หลากหลาย โดยใช้เลเซอร์หลอมผงวัสดุให้แข็งตัว จนกระทั่งปี ค.ศ. 1989 Steven Scott Crump ได้คิดค้นและจดสิทธิบัตรเทคโนโลยีการพิมพ์แบบอัดฉีดขึ้น

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

ต้านทานแรงดึงและแรงอัด 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 ในขณะเดียวกันแต่ละชั้นที่ขึ้นรูปจะหลอมรวมเป็นชิ้นเดียวกัน กระทั่งกระบวนการพิมพ์สิ้นสุดลงวัตถุสามมิติจะแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิห้อง [14] การพิมพ์สามมิติแบบอัดฉีดขึ้นรูป อาจมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีพารามิเตอร์การพิมพ์ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของเส้นพลาสติก โดยขึ้นอยู่กับประเภทและขนาดของเส้นพลาสติกที่ใช้ จากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [15] แสดงถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นคือ ทิศทางของแรงต่อองศาการจัดเรียงเส้นใยพลาสติก ซึ่งส่งผลทั้งในด้านกำลังต้านทานแรงดึง ความเครียด ความเหนียว มอดูลัสยืดหยุ่น 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) เริ่มจากการจัดเรียงท่อนไม้ไผ่ตามทิศทางของเสี้ยนไม้ไผ่จากนั้นรีดให้แบนด้วยลูกกลิ้งฟันเฟืองเกิดเป็นไม้ไผ่ในรูปแบบแผ่นหรือเป็นท่อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามต้องการ จากนั้นใช้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้น กระบวนการถัดไปคือ การจุ่ม (Dipping) ทำการจุ่มในกาวเรซินฟีนอลิก (Phenolic resin) เพื่อประสานท่อนไม้ไผ่ให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้จนแห้งที่อุณหภูมิ 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 ขั้นตอนสุดท้าย คือ ตัดแต่งไม้เพื่อให้วัสดุมีขนาดและผิวตามต้องการ [16-17]

2.4 วัสดุเชื่อมประสาน

วัสดุเชื่อมประสาน (Adhesive) มีการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเชื่อมประสานหลากหลายชนิดที่เหมาะสมต่อการใช้งานภายใต้วัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า กาวร้อน (Cyanoacrylate) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีความเข้ากันได้กับวัสดุชนิดพลาสติก [18] รวมถึงการประยุกต์ใช้อีพ็อกซี่เรซิ่น (Epoxy resin) ในการเชื่อมประสานคานไม้ตัวอย่างทดสอบระหว่างไม้และเส้นใยแก้วเสริมกำลัง สามารถต้านทานกำลังดัดได้โดยไม่เกิดการหลุดร่อนของกาว [19] งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กาวร้อนสำหรับเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนพลาสติกชีวภาพ และใช้อีพ็อกซี่เรซิ่น สำหรับเชื่อมประสานระหว่างแกนกลางพลาสติกชีวภาพและแผ่นไม้ไผ่ประสานจากตัวแทนจำหน่ายของบริษัท Fosroc [20]

3. วิธีการทดสอบ

3.1 สมบัติทางกลของพลาสติกชีวภาพ

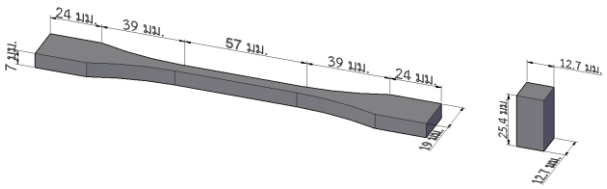
พลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติวิธีอัดฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ Bambu Lab X1e โดยใช้พารามิเตอร์พื้นฐานดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์พื้นฐานที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ

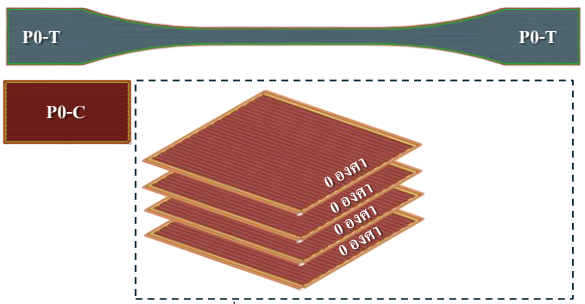
อุณหภูมิที่หัวฉีด (องศาเซลเซียส)	215
อุณหภูมิที่แผ่นรองพิมพ์ (องศาเซลเซียส)	55
ความเร็วในการพิมพ์ในชั้นแรก (มิลลิเมตรต่อวินาที)	50-105
ความเร็วในการพิมพ์ในชั้นอื่น (มิลลิเมตรต่อวินาที)	200-300
ความหนาของเส้นใยต่อหนึ่งชั้น (มิลลิเมตร)	0.2
ความหนาแน่นของการเติมเส้นใย (%)	100
รูปแบบการเติมเส้นใย	จัดเรียงเป็นเส้นตรง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

3.1.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใย

เนื่องจาก PLA+ เป็นวัสดุที่มีต้นทุนที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ชนิดอื่น จึงเลือกใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการศึกษาอิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใย ทำการขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงที่มีองศาการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียว 0 องศาขนานกับทิศทางการให้แรง (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

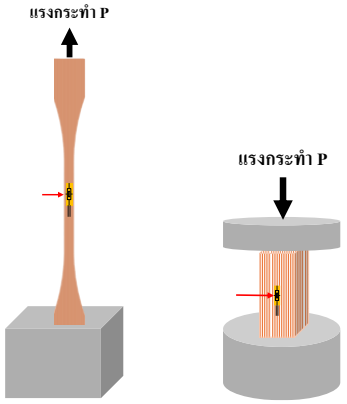
เมื่อการทดสอบแล้วเสร็จ จะพิจารณาคัดเลือกองศาการจัดเรียงเส้นใยที่มีกำลังต้านทานแรงดึงและกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด ขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่ม

3.1.2 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพ

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



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



รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

3.2 ไม้ไผ่ประสานด้วยกาว

3.2.1 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

การศึกษานี้ใช้ไม้ไผ่ประสานด้วยกาวที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ทิมเบอร์ เทคโนโลยี ดีเวล็อปเม้นต์ จำกัด จุดเด่นของไม้ไผ่อัดประสานนี้มีการเลือกใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีการระเหยต่ำ (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) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนของไม้ มยผ. 1222-51 [25] ซึ่งตัวอย่างทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 5



(ก) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง (ข) ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด

รูปที่ 5 ตัวอย่างทดสอบไม้ไผ่ประสานด้วยกาว

3.3 กำลังต้านทานแรงดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบที่ขึ้นรูปแกนกลางด้วยเส้นพลาสติกชีวภาพ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

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



รูปที่ 6 แกนกลางรูปทรงรังผึ้ง และรังผึ้งโครงข่าย

จากนั้นทำการเชื่อมประสานพลาสติกชีวภาพที่ขึ้นรูปเป็นรูปทรงรังผึ้ง (Honeycomb, HC) และรังผึ้งโครงข่าย (Honeycomb lattice, HCLT) ทั้ง 3 ชิ้นส่วนด้วยกาวร้อน ทิ้งไว้ให้แห้งด้วยระยะเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการเชื่อมประสานระหว่างพลาสติกชีวภาพที่เป็นแกนกลางและแผ่นไม้ไผ่ด้วยอีพ็อกซี่เรซิ่น จากนั้นบีบอัดชิ้นงานเพื่อไม่ให้เกิดการแยกตัวด้วยระยะเวลา 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 พฤติกรรมของคานภายใต้โมเมนต์ดัดล้วนขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ขนาดหน้าตัด และจุดรองรับของคาน ซึ่งส่งผลให้เกิดหน่วยแรงดัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียว สำหรับคานที่ต้านทานแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนจะส่งผลให้เกิดหน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงดัดในคาน ซึ่งการพิจารณาคานตัวอย่างที่ถูกกระทำภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด เมื่อสร้างแผนภาพแรงเฉือน และแผนภาพโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นภายในคาน แสดงให้เห็นถึงบริเวณช่วงกึ่งกลางคานเกิดแรงกระทำแบบแรงดัดล้วน ซึ่งจะเกิดแรงเฉือนในคานเพียงช่วงริมของคานเท่านั้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์พฤติกรรมดัดล้วนของคาน ต้องอยู่ภายใต้สมมติฐานการดัดล้วน จึงพิจารณาใช้สมการหน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นในแนวแกนของคานเนื่องจากโมเมนต์ M บนหน้าตัดที่ห่างจากแกนสะเทินเป็นระยะ y และ I คือโมเมนต์ของความเฉื่อย และเนื่องจากแรงกระทำแบบ 4 จุดบนคาน สามารถจัดให้อยู่ในรูปของแรงกระทำ P และระยะห่างระหว่างจุดรองรับ L ที่ขึ้นกับโมเมนต์ของความเฉื่อยได้ ดังสมการที่ (1) [26]

$$\sigma_x = \frac{My}{I} = \frac{PLy}{6I} \tag{1}$$

ทั้งนี้สตีฟเนสต่อการต้านทานแรงดัด EI สามารถคำนวนได้จากส่วนยืดหยุ่นเชิงเส้นเริ่มต้นของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ P ต่อระยะการโก่งตัว δ ดังสมการที่ (2) [27]

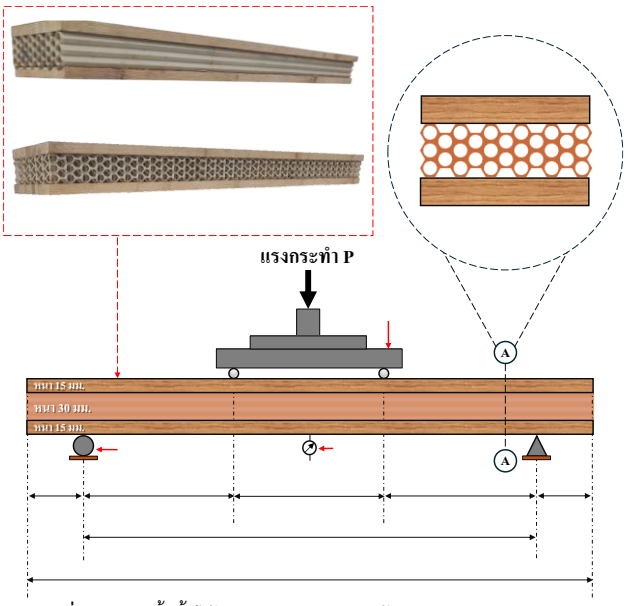
$$EI = \frac{23PL^3}{1296\delta} \tag{2}$$

คานเชิงประกอบ (Composite beams) คือ คานที่ประกอบด้วยวัสดุสองชนิดขึ้นไป ยึดติดกันแน่นเสมือนเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน อย่างไรก็ตามการ

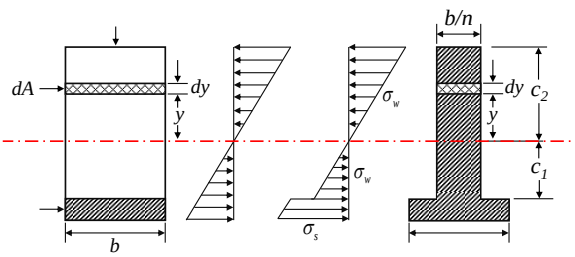
วิเคราะห์คานที่ประกอบด้วยวัสดุแตกต่างกันอาจไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการหน่วยแรงดัดในคานได้โดยตรงเนื่องจากคานเชิงประกอบนี้ยังไม่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน หากพิจารณาการเปลี่ยนรูปของคานเชิงประกอบจะพบว่าความเครียดตามแนวแกนยังคงแปรผันตามระยะ y จากแกนสะเทินแสดงดังรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าแกนสะเทินของหน้าตัดคานเชิงประกอบไม่ผ่านจุดศูนย์กลางเรขาคณิตของหน้าตัด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

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

ดังนั้น หน้าตัดส่วนที่เป็นไม้อยู่เดิมอาจแปลงเป็นหน้าตัดของเหล็กได้ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความกว้างของไม้ที่เปลี่ยนเป็นเหล็กเท่านั้นซึ่งมีค่าเท่ากับ $b_s' = b/n$ เมื่อกระบวนการแปลงหน้าตัดเสร็จสิ้น จึงสามารถคำนวนหาตำแหน่งของแกนสะเทินใหม่และสามารถใช้สมการหาหน่วยแรงได้จากสมการที่ (1) และต้องแปลงค่าหน่วยแรงที่ได้นี้กลับไปเป็นหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในเนื้อไม้เดิม โดยการหารด้วยค่า n



รูปที่ 7 การติดตั้งพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด



รูปที่ 8 หน่วยแรงและความเครียดในคานเชิงประกอบ

4. ผลการศึกษา

4.1 อิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใยต่อกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

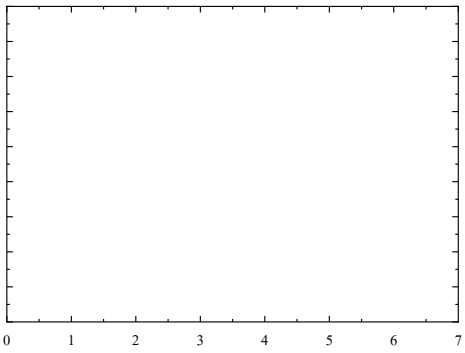
การจัดเรียงเส้นใยพลาสติกชีวภาพแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) มีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดมากกว่าการจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง ทำมุมกับทิศทางของแนวแรง (45/135 องศา) ร้อยละ 17.92 และ 12.81 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (Coefficient of variation, CV) เกิดจากอัตราส่วนระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน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

การวิเคราะห์ผลเริ่มจากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง โดยพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึง ดังรูปที่ 9 (ก) แสดงถึงช่วงเริ่มต้นของการให้แรงกระทำมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่คล้ายกัน ทั้งการจัดเรียงแบบทิศทางเดียวและแบบสองทิศทาง เมื่อเวลาผ่านไปแรงดึงในตัวอย่างทดสอบ P0-T ลดลงอย่างรวดเร็วกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ ในขณะเดียวกันแรงดึงในตัวอย่างทดสอบ P45-T จะเป็นการเปลี่ยนตำแหน่งโดยมีแรงดึงคงที่กระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติ โดยลักษณะการวิบัติภายใต้แรงดึงเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางไปจนถึงคอคอดของตัวอย่างทดสอบ ในการวิเคราะห์กำลังต้านทานแรงอัดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำสูงสุดกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงอัดดังรูปที่ 9 (ข) พบว่ามีพฤติกรรมการต้านทานกำลังอัดคล้ายกับแรงดึง โดยมีลักษณะการวิบัติเป็นลักษณะการหดตัวในแนวดิ่งอย่างช้า ๆ แสดงดังรูปที่ 10

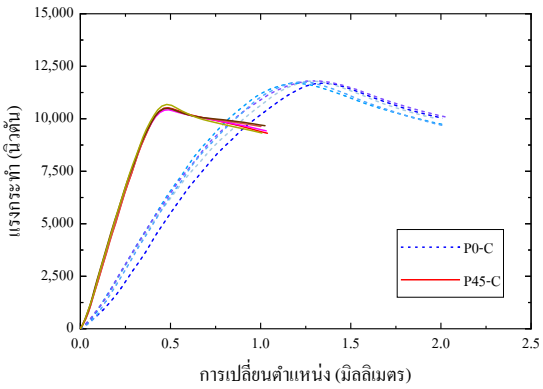
จากพฤติกรรมต้านทานแรงดึงและแรงอัด ภายใต้อิทธิพลของการจัดเรียงเส้นใยพลาสติกจึงนำไปสู่การศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมที่แตกต่างกันในพลาสติกชีวภาพได้แก่ PLA+ PLA-CF และ PLA-GF โดยขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง 0 องศา เนื่องจากมีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดสูงกว่าการจัดเรียงเส้นใยพลาสติกแบบสองทิศทาง

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 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของพลาสติกชีวภาพที่มีองศาการจัดเรียงเส้นใยต่างกัน



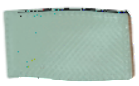
(ก) P0-T



(ข) P0-C



(ค) P45-T



(ง) P45-C

รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีองศาการจัดเรียงเส้นใยต่างกัน

4.2 อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพต่อกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

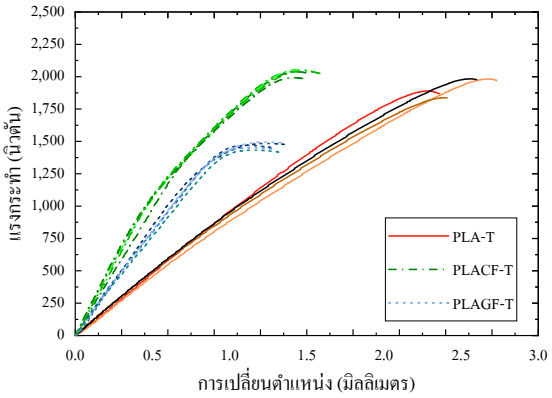
ตารางที่ 4 แสดงกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ประเภท ได้แก่ PLA+ PLA-CF และ PLA-GF พบว่า PLA+ มีค่ากำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 44.22 เมกะปาสกาล และ PLA-CF มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุด 86.35 เมกะปาสกาล โดยมีพฤติกรรมช่วงต้นเป็นเส้นตรงทั้งภายใต้แรงกระทำแบบดึงและอัด เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่าทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่เกินร้อยละ 6

สำหรับการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึง ดังรูปที่ 11 (ก) แสดงถึงการให้แรงกระทำถึงจุดที่มีหน่วยแรงสูงสุด แรงดึงจะมีการตกลงอย่างรวดเร็วกระทั่งเกิดการวิบัติบริเวณกึ่งกลางถึงคอคอดของตัวอย่างทดสอบพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด กำลังต้านทานแรงดึงของ PLA-GF มีค่าต่ำกว่า PLA+ และ PLA-CF ร้อยละ 24.36 และ 23.63 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาในอดีต [4]

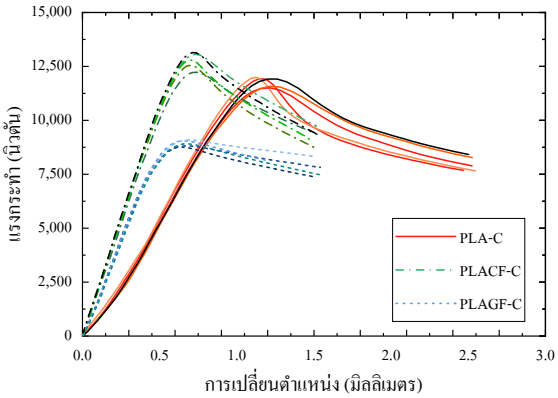
การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวภายใต้แรงอัด ดังรูปที่ 11 (ข) พบว่า PLA+ และ PLA-CF มีการยืดตัวได้น้อยในช่วงต้น และมีจุดเปลี่ยนโครงสร้างสัณฐานที่เห็นได้ชัด เมื่อเพิ่มแรงกระทำจนถึงขณะหนึ่ง แรงกระทำจะลดลงอย่างรวดเร็ว และการยืดตัวจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในเวลาต่อมา กระทั่งวัสดุไม่สามารถต้านทานแรงอัดได้และเกิดการวิบัติในที่สุด 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 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของพลาสติกชีวภาพที่มีส่วนผสมเพิ่มแตกต่างกัน

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] รวมถึงความสามารถในด้านการต้านทานแรงกระทำที่มากเพียงพอต่อการประเมิน

การประกอบชิ้นส่วนหน้าตัดประกบในขั้นตอนถัดไปจึงเลือกใช้ PLA+ ขึ้นรูปโดยใช้องศาการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) เป็นแกนกลางรูปทรงรังผึ้ง และรังผึ้งโครงข่าย

4.3 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดของไม้ไผ่ประสาน

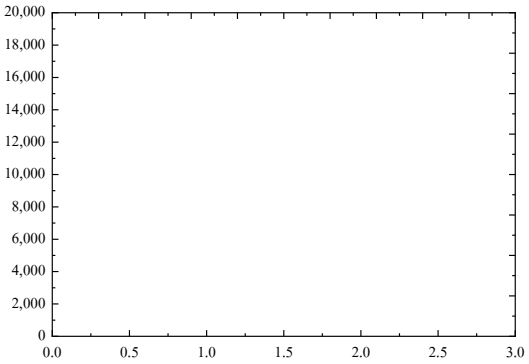
จากการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนไม้ พบว่าไม้ไผ่ประสานด้วยกาว มีกำลังต้านทานแรงดึงมากกว่าแรงอัด 2.78 เท่า ซึ่งผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและอัดเป็นไปดังตารางที่ 6

พฤติกรรมต้านทานแรงดึงของไม้ไผ่ประสานด้วยกาวในแนวขนานเสี้ยนมีความเป็นเส้นตรงตลอดการให้แรงกระทำ และเมื่อการให้แรงเป็นไปอย่างต่อเนื่องถึงจุดหนึ่งวัสดุเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเปลี่ยนตำแหน่งภายใต้แรงดึงในรูปที่ 12 โดยลักษณะการวิบัติเป็นการแตกหักตามแนวเสี้ยนไม้บริเวณกึ่งกลางไปจนถึงคอคอดของตัวอย่างทดสอบ

พฤติกรรมต้านทานแรงอัดของไม้ไผ่ประสานด้วยกาวในแนวขนานเสี้ยนมีความเป็นเส้นตรงในช่วงต้น เมื่อให้แรงกระทำถึงจุดหนึ่ง แรงกระทำที่เกิดขึ้นเริ่มคงที่ และลดลงอย่างช้าๆ โดยที่การเคลื่อนตัวยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องกระทั่งวัสดุเกิดการวิบัติแบบเฉือนตามแนวเสี้ยนไม้

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



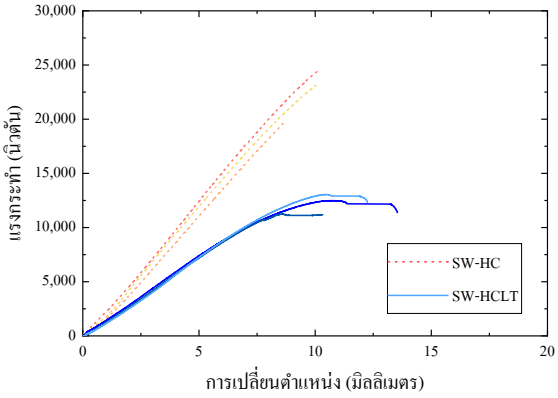
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของไม้ไผ่ประสานด้วยกาวภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัด

4.4 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของ SW-HC และ SW-HCLT ดังรูปที่ 13 ภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด ดังรูปที่ 14 พบว่า SW-HC มีพฤติกรรมใกล้เคียงเชิงเส้นกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด สำหรับตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT มีพฤติกรรมช่วงต้นคล้ายเชิงเส้นกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างช้า ๆ โดยลักษณะการวิบัติของหน้าตัดทั้งสองรูปทรงเป็นการวิบัติแบบเฉือนแนวราบบริเวณแกนกลางพลาสติกชีวภาพของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 15

จากการคำนวนภายใต้สมการ (1) และ (2) ที่ผ่านการแปลงหน้าตัดแล้วได้ผลดังตารางที่ 7 ซึ่งพบว่า SW-HC มีกำลังต้านทานแรงดัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมากกว่า SW-HCLT เท่ากับ 2.18 และ 2.03 เท่า ตามลำดับ เป็นผลเนื่องจากความหนาแน่นของรูปทรงแกนกลาง HC ที่มากกว่าแกนกลางแบบ HCLT และเมื่อพิจารณากำลังต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนัก พบว่า SW-HC มีค่ามากกว่า SW-HCLT ถึง 1.80 เท่า เป็นผลมาจากส่วนต่างของน้ำหนักของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบ แม้ว่า HCLT จะมีน้ำหนักที่เบากว่า HC ถึง

2.00 เท่า แต่การพิจารณาร่วมกับไม้ไผ่ที่ปิดผิวด้านบนและด้านล่าง ส่งผลให้น้ำหนักรวมของหน้าตัด SW-HC และ SW-HCLT ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน พบว่าทุกตัวอย่างทดสอบมีค่าไม่เกินร้อยละ 10



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนตำแหน่งของพื้นไม้หน้าตัดประกบภายใต้การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัด



(ก) ตัวอย่างทดสอบ SW-HC



(ข) ตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT

รูปที่ 14 การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดแบบ 4 จุด



(ก) ตัวอย่างทดสอบ SW-HC



(ข) ตัวอย่างทดสอบ SW-HCLT

รูปที่ 15 ลักษณะการวิบัติของพื้นไม้ตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของพื้นไม้หน้าตัดประกบ

ตัวอย่างทดสอบ	กำลังต้านทานแรงดัด (เมกะปาสกาล)		มอดูลัสยืดหยุ่น (เมกะปาสกาล)		กำลังต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนัก (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 โดยใช้แกนกลางที่ผ่านกระบวนการคัดเลือกด้านกำลัง และด้านมูลค่าวัสดุ ขึ้นรูปเป็นรูปทรงรังผึ้งและรังผึ้งโครงข่าย มีผลลัพธ์การศึกษาดังต่อไปนี้

1. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดภายใต้อิทธิพลขององศาการจัดเรียงเส้นใยพบว่า องศาการจัดเรียงเส้นใยแบบทิศทางเดียวขนานกับแนวแรง (0 องศา) มีกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดสูงกว่าองศาการจัดเรียงเส้นใยแบบสองทิศทาง (45/135 องศา)
2. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดึงและแรงอัดต่อราคาของวัสดุภายใต้อิทธิพลของส่วนผสมเพิ่มในพลาสติกชีวภาพพบว่า PLA+ มีความคุ้มค่าด้านมูลค่าวัสดุมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA-CF และ PLC-GF
3. การทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของ SW-HC และ SW-HCLT พบว่าหน้าตัดประกบ SW-HC มีกำลังต้านทานแรงดัดและกำลังต้านทานแรงดัดต่อน้ำหนักสูงกว่า SW-HCLT 2.18 และ 1.80 เท่า ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรมจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สัญญาเลขที่ N42A650314 ขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัยภายใต้โครงการทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund 2567: โครงการเทคโนโลยีการก่อสร้างขั้นสูงสำหรับ Thailand 4.0) ขอขอบคุณบริษัท ทิมเบอร์ เทคโนโลยี ดีเวล็อปเม้นต์ จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนไม้ไผ่ตัวอย่าง

ทดสอบทั้งหมด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการทดสอบ

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-$CaCO_3$ 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] Cojocaru, 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.