พฤติกรรมการต้านทานของคานไม้ยางพาราประกอบภายใต้แรงกระแทก

Resistant Behavior of Composite Rubber Wood Beams under Impact Loads

พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี[1,*] นันทชัย ชูศิลป์[2] นภดล คงเพชร[3] อาศิส อัยรักษ์[4] และ สมมาตร์ สวัสดิ์[5]

[1,2,3,4,5] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

**Corresponding author; E-mail address: pongsak.s@rmutsv.ac.th*

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานและการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบและคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้แรงกระแทก โดยทำการทดสอบแบบคานช่วงเดียวที่มีความยาวคาน 1.00 m, 1.50 m และ 2.00 m โดยปล่อยน้ำหนัก 15 kg ที่ความสูงคือระยะ 0.60 m, 0.80 m และ 1.00 m เพื่อนำมาศึกษาพฤติกรรมการต้านทานแรงกระแทกของคานไม้ยางพาราประกอบก่อนใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาเสริมกำลัง และหลังใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มาเสริมกำลัง ผลการทดสอบพบว่าไม้ยางพาราจัดอยู่ในประเภทไม้เนื้ออ่อนตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) เมื่อนำข้อมูลการทดสอบแรงกระแทกแบบการปล่อยน้ำหนักลงเพียงหนึ่งครั้งมาเปรียบเทียบโดยคิดค่าความแตกต่างของการแอ่นตัวระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบที่เสริมและไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ตามความสูงของการปล่อยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ในกลุ่มของความยาวคานที่ 1.00, 1.50 และ 2.00 m พบว่าคานไม้ยางพาราประกอบที่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ค่าการแอ่นตัวน้อยกว่าคานที่ไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 30.43 ถึง 33.33, 30.23 ถึง 35.29 และ 33.17 ถึง 35.38 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบคานจนกระทั่งให้การวิบัติ พบว่าลักษณะการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่า คานไม้ยางพาราประกอบที่ไม่ได้เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

คำสำคัญ: คานไม้ประกอบ, ไม้ยางพารา, แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, แรงกระแทก

Abstract

The research is aimed to study about the resistant action of assembled rubber wooden beams under their impact and another one of rubber wooden beams supplemented by carbon fiber sheet, by for testing the beam which has the length of 1.00 m, 1.50 m and 2.00 m by free fall drop the weight of 15 kg at 0.60 m, 0.80 m and 1.00 m height. The study of the resistant action of assembled rubber wooden beams under their impact is investigated between before and after they are supplemented by carbon fiber sheet. The result demonstrated that the rubber woods are considered as softwood following Thailand Engineering Standard (EIT). The information of impact testing when free fall drop the weight of beam just once showed the differences of deflection of assembled rubber wooden beams with carbon fiber and the ones with no carbon fiber. The deflection increasingly happened following to the height of the weight left. In the group of the length beams at 1.00 m, 1.50 m and 2.00 m found that rubber wooden beams with carbon fiber deflected less that found that rubber wooden beams with no carbon fiber at the percent of 30.43 to 33.33, 30.23 to 35.29 and 33.17 to 35.38 respectively. For testing the beams until blooming, it would find the aspect of the blooming of assembled rubber wooden beams with carbon fiber way tougher than the ones with no carbon fiber.

Keywords: Assembled Wooden Beams, Rubber Wood, Carbon fiber Sheet, Impact Load

1. คำนำ

ปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้ไม้ยางพาราในงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมด้านการก่อสร้างที่มีความต้องการปริมาณมากขึ้นโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทไม้แปรรูป ไม้ท่อนและไม้แผ่นบาง เนื่องจากว่าไม้ยางพาราเป็นไม้ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพหลายประการใกล้เคียงกับไม้สัก มีลวดลายที่สวยงาม ย้อมสีได้ ตกแต่งง่าย น้ำหนักเบา และมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับไม้ชนิดอื่น ตลอดจนเป็นวัสดุที่หาได้ไม่ยากนักโดยเฉพาะทางภาคใต้ ใช้แล้วสามารถปลูกทดแทนได้ รวมถึงไม้ชนิดสำคัญและมีขนาดใหญ่ในป่าธรรมชาติที่มีคุณภาพนั้นหาได้ยากขึ้น อย่างไรก็ตามการนำไม้ยางพารามาใช้ในงานก่อสร้างจะต้องพิจารณาเรื่องคุณสมบัติวัสดุก่อนการใช้งานมากกว่าวัสดุประเภทอื่น เนื่องจากไม้ยางพาราเป็นไม้ประเภทเนื้ออ่อน และเป็นวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันน้อย ทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของไม้ยางพารามีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ เช่น เหล็ก หรือคอนกรีต เป็นต้น

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าไม้ยางพาราเป็นประเภทเนื้ออ่อน แต่เมื่อผ่านกระบวนการอาบน้ำยาและอบแห้งแล้วจะจัดได้ว่าไม้ที่ได้เป็นไม้เนื้อปานกลางมีความคงทนและมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น รวมถึงการประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตไม้ประกอบลามิเนต (Glue Laminate Lumber or Glulam) ซึ่งเป็นโครงสร้างไม้ประกอบที่ผ่านขบวนการ แปรรูป ปรับขนาดประกอบ และบีบอัดกาว และมีขั้นตอนในการติดตั้งที่ไม่ยุ่งยาก เพื่อใช้เป็นองค์อาคารในการรับน้ำหนักของโครงสร้างต่างๆ เช่น เสาของโครงสร้าง คานหลักและคานรองของโครงสร้าง ซึ่งอาจมีการประยุกต์ใช้วัสดุเสริมกำลังให้กับโครงสร้างด้วยเช่น โลหะ แผ่นเหล็ก เส้นใยคาร์บอน เส้นใยพอลิเมอร์ เป็นต้น ทั้งนี้การวิจัยและศึกษาเกี่ยวกับงานไม้ประกอบกับวัสดุอื่นๆ ถูกพัฒนาขึ้นราวปี ค.ศ.1960 [1] ซึ่งจะเน้นเกี่ยวกับการนำโลหะมาประกอบการใช้งาน รวมทั้งการยึดต่อโลหะกับแผ่นไม้ ต่อมาในปี ค.ศ.1995 Zwernemam [2] ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการใช้แผ่นไม้ประกอบลามิเนตเพื่อแทนที่พื้นสะพานเดิมที่ชำรุดเสียหาย ในปี ค.ศ.1997 GangaRao [3] ทำการศึกษาเกี่ยวกับคานไม้ในโครงสร้างสะพานที่ถูกเสริมกำลังแบบภายนอก โดยการห่อคานไม้ด้วยแผ่นเส้นใย และในปี ค.ศ.2004 Camille A. Issa. [4] ศึกษากำลังรับแรงดัดของคานไม้ประกอบเสริมแรงด้วย CFRP พบว่าการเสริมแรงในคานช่วยให้รูปแบบการพิบัติของคานจากแบบเปราะกลายเป็นพิบัติแบบเหนียวและมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้มากขึ้น และในปี ค.ศ.2014-2016 Nadir, Y. et al., [5,6] ศึกษาพฤติกรรมของคานไม้ลามิเนตที่ติดกาวตามแนวขนานโดยใช้ไม้ยางพารา โดยมีการเสริมแผ่น GFRP และ CFRP พบว่าการเสริมแผ่น GFRP และ CFRP ทำให้คานมีความสามารถต้านทานการดัดมากขึ้น ทั้งนี้การศึกษาในประเทศไทยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพของไม้ยางพาราประกอบ ได้แก่ ปี พ.ศ.2553 วรพจน์ ประชาเสรี และคณะ [7] ได้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้การดัด และ พ.ศ.2563 อาดิล นิยมเดชา และคณะ [8] พบว่าคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นเส้นใยโพลิเมอร์ที่ชั้น L1 และ L2 มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ปีเดียวกัน อิมรอน หะยียูโซะ และคณะ [9] พบว่ารูปแบบการเสริมแผ่นโพลิเมอร์กับคานไม้ประกอบ มีผลต่อความสามารถในการรับกำลังที่แตกต่างกัน ปี พ.ศ.2565 พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี และคณะ [10] ได้ศึกษาในเรื่องเสาประกอบไม้ยางพารา เป็นต้น

ด้วยข้อดีของไม้ยางพารา และการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของไม้ยางพาราในรูปแบบต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นที่เป็นไปในแนวทางที่ทำให้ความสามารถในการใช้ไม้ยางพาราเพื่อเป็นไม้ในอุตสาหกรรมการก่อสร้างมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ทางคณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำไม้ยางพารามาใช้ในงานโครงสร้างโดยเฉพาะโครงสร้างคานประกอบไม้ยางพาราที่รับแรงกระทำแบบต่างๆ (ได้แก่ แรงอัด แรงดัด แรงกระแทก เป็นต้น) ซึ่งการนำเสนอการศึกษาในครั้งนี้มุ่งเน้นเสนอผลของคานประกอบไม้ยางพาราภายใต้แรงกระแทก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการต้านทานและการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบและคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้แรงกระแทก และเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรับแรงกระแทกของคานประกอบไม้ยางพารา

2. การดำเนินการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุหลักในการศึกษามีสามอย่างด้วยกัน ได้แก่ 1) ไม้ยางพารา เป็นไม้ยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูปมาแล้วจากโรงงานในพื้นที่จังหวัดสงขลา โดยมีขนาดหน้าตัดที่นำมาใช้งานหลังจากผ่านกระบวนการอบและไสเรียบร้อยแล้ว กว้าง 5 เซนติเมตร ลึก 2 เซนติเมตร ความยาวจากโรงงาน 120 เซนติเมตร (นำมาตัดตามขนาดที่จะใช้ทำการทดสอบอีกครั้ง) 2) กาวผงร็อควู้ด ใช้ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 2:1 สำหรับทาบนผิวไม้ยางพาราที่จำนำมาประกอบเป็นคานที่ใช้ทดสอบ และ 3) แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดผ้า สำหรับเสริมคานประกอบโดยตัดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์กว้าง 5 เซนติเมตร และยาวตามขนาดของคานตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ โดยตัวอย่างคานประกอบไม้ยางพาราทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาจะถูกจัดเตรียมและทำการทดสอบภายในห้องปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ทั้งนี้รูปที่ 1 คือรูปตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้

รูปที่ 1 วัสดุหลักที่ใช้ในการศึกษา 1) ไม้ยางพารา 2) กาวผง และ 3) แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

2.2 ตัวอย่างในการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีการแบ่งกลุ่มตัวอย่างในการทดสอบเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ ส่วนแรก ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา (ดังแสดงในรูปที่ 1) และส่วนที่สอง ทำการทดสอบคานประกอบไม้ยางพารารับแรงกระแทก โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ตัวอย่างในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

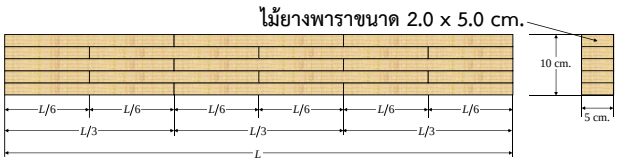
วัสดุหลักในการศึกษานี้มี 3 ส่วนด้วยกันดังกล่าวข้างต้น ต้องมีการทดสอบค่าพื้นฐานทางกายภาพและคุณสมบัติเบื้องต้นดังนี้ 1) ไม้ยางพาราต้องตรวจสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของไม้ยางตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) โดยทำการทดสอบคุณสมบัติตามมาตรฐานการทดสอบไม้ กรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1221-51 ถึง มยผ. 1227-51 [10,11] โดยทำการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบหาค่าความชื้นของไม้, การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของไม้, การทดสอบการต้านทานแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนของไม้,การทดสอบความต้านทานแรงเฉือนในแนวขนานเสี้ยนไม้ และการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของไม้ 2) การทดสอบการ

ต้านทานแรงดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 3) การทดสอบการต้านทานแรงเฉือนของกาวที่ใช้ในการประกอบคานในการศึกษา โดยประยุกต์รูปแบบการทดสอบมาจาก มยผ.1221-51 [10] รูปในการทดสอบ ดังรูปที่ 2

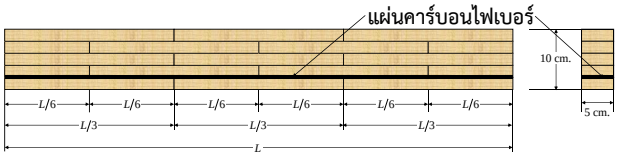
รูปที่ 2 การทดสอบ 1) สมบัติพื้นฐานของไม้ยางพารา 2) ความต้านทานแรงดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และ 3) ความต้านทานแรงเฉือนของกาวยึดไม้

2.2.2 ตัวอย่างคานประกอบรับแรงกระแทก

คานไม้ยางพาราประกอบมีขนาดหน้าตัดกว้าง 5.0 เซนติเมตร ลึก 10.0 เซนติเมตร ได้มาจากการประกอบไม้ยางพาราสำเร็จรูปที่ผ่านกระบวนการไสและอบแล้วขนาดกว้าง 5.0 เซนติเมตร ลึก 2.0 เซนติเมตร ประกอบกันด้วยกาวและการบีบอัดจำนวน 5 ชั้นด้วยกัน โดยชั้นที่ 1 (ชั้นล่างสุด) ชั้นที่ 3 และชั้นที่ 5 (ชั้นบนสุด) ไม้ยางพารามีจำนวน 3 ท่อน ยาวเท่ากันหมด (ยาว L/3 เมื่อ L คือความยาวของคานที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งมีความยาว 3 ระยะด้วยกัน คือ 1.0 เมตร 1.5 เมตร และ 2.0 เมตร) ชั้นที่ 2 กับ ชั้นที่ 4 ใช้ไม้ยางพาราจำนวน 4 ท่อน (ยาว L/3 จำนวน 2 ท่อน และยาว L/6 จำนวน 2 ท่อน) ซึ่งคานไม้ยางพาราประกอบที่ใช้สำหรับการศึกษามี 2 กลุ่มด้วยกันคือ กลุ่มที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ และกลุ่มที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ถูกเสริมอยู่ระหว่างไม้ชั้นที่ 1 กับชั้นที่ 2) ดังแสดงรายละเอียดของตัวอย่างคานไม้ยางพาราประกอบ ในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 คานไม้ยางพาราประกอบที่ใช้สำหรับการศึกษากลุ่มที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



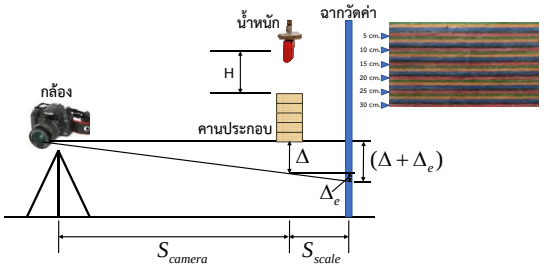
รูปที่ 4 คานไม้ยางพาราประกอบที่ใช้สำหรับการศึกษากลุ่มที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

2.3 วิธีการและขั้นตอนในการทดสอบ

การทดสอบดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ซึ่งการทดสอบจะแบ่งเป็นสองส่วนดังนี้ ส่วนแรกจะดำเนินการทดสอบไม้ยางพาราตามมาตรฐานการทดสอบไม้ กรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1221-51 ถึง มยผ.1227-51 [10] เพื่อทดสอบหากลสมบัติต่างๆของไม้ยางพารา ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อ 2.2.1 และรูปที่ 2 ซึ่งผลทดสอบที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อจำแนกประเภทของไม้ยางพาราที่ใช้ในการศึกษาตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.)

รูปที่ 5 การติดตั้งคานไม้ยางพาราประกอบที่ใช้สำหรับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ

ในส่วนที่สอง จะทำการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบรับแรงกระแทก (ดังรายละเอียดในข้อ 2.2.2) เพื่อต้องการหาค่าระยะการแอ่นตัว (Deflection) ของคานไม้ยางพาราประกอบจากปล่อยน้ำหนักลงมาให้กระแทกกับคานเพียงครั้งเดียว โดยทำการจัดวางคานไม้ยางพาราประกอบบนที่รองรับ แบบที่รองรับอย่างง่าย (Simply Supported Beam) และจัดแท่งน้ำหนัก 15 กิโลกรัม แขวนตรงตำแหน่งเหนือขึ้นไปด้านบนของกึ่งกลางคาน ทำการปล่อยน้ำหนักดังกล่าวให้ตกลงมาแบบอิสระที่ระยะความสูงที่ได้กำหนดไว้ (H หรือความสูงในการปล่อยก้อนน้ำหนัก 15 กิโลกรัม มี 3 ระยะความสูง ได้แก่ 0.6 เมตร 0.8 เมตร และ 1.0 เมตร) ให้กระแทกกับคานไม้ยางพาราประกอบ ดังรูปที่ 5 และทำการจดบันทึกค่าของการแอ่นตัวของคานเนื่องจากแรงกระแทก (โดยทำการติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าการแอ่นตัวดังรูปที่ 6) ตลอดจนถึงลักษณะของความเสียหายของคานไม้ยางพาราประกอบที่โดนกระแทก และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ต่อไป



รูปที่ 6 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบ

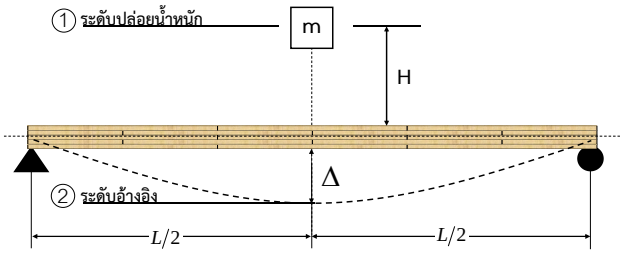
รูปที่ 6 แสดงการจัดเครื่องมือในการอ่านค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบในขณะที่น้ำหนักกระแทกกับคานและมีการแอ่นตัวสูงสุด ในขณะนั้น โดยอ่านค่าการแอ่นตัวจากล้องที่บันทึกภาพของฉากวัดค่าที่อยู่ด้านหลังคานประกอบ และใช้หลักการของสามเหลี่ยมคล้ายในการวิเคราะห์ผลดังสมการที่ (1) เพื่อหาค่าการแอ่นตัว

$$\frac{S_{camera}+S_{scale}}{\Delta+\Delta_e}=\frac{S_{camera}}{\Delta} \quad (1)$$

โดย S_{camera} คือระยะห่างระหว่างกล้องกับคานไม้ยางพาราประกอบ, S_{scale} คือระยะห่างระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบกับฉากวัดค่า, Δ คือการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบ และ Δ_e คือระยะแอ่นตัวที่เพิ่มขึ้นจากระยะห่างระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบกับฉากวัดค่า โดย $\Delta+\Delta_e$ จะเป็นค่าที่อ่านจากกล้อง ซึ่งจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (1) ทำให้เราสามารถวิเคราะห์หาค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบจากการทดสอบได้

2.4 การประเมินค่าจากการทดสอบ

การประเมินค่าการแอ่นตัว (Deflection) หรือค่าแรงกระทำสูงสุด (Maximum Load) หรือความแข็งเกร็งการดัดเทียบเท่า (Equivalent Bending Rigidity: EI) ได้จากค่าการแอ่นตัวที่อ่านค่าได้ โดยอาศัยหลักการของงานและพลังงาน ในเรื่องของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) จากการปล่อยน้ำหนักให้ตกอิสระลงบนคานไม้ยางพาราประกอบ ในรูปที่ 7 (m คือมวล H คือความสูงในการปล่อย L คือความยาวคานประกอบ และ Δ คือการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบ ดังสรุปในตารางที่ 1) โดยพลังงานรวมที่ตำแหน่งเริ่มต้นการปล่อยจะต้องเท่ากับพลังงานรวมที่ตำแหน่งสุดท้าย



รูปที่ 7 การแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบจากแรงกระแทก

ตารางที่ 1 รายละเอียดของความยาวคานไม้ยางพาราประกอบและระยะความสูงของการปล่อยน้ำหนักกระแทก

ประเภทคานไม้ยางพาราประกอบ	ความยาวช่วงคานทดสอบ (L) (เมตร)	ความสูงปล่อยน้ำหนัก (H) (เมตร)	มวล (m) (กิโลกรัม)
คานประกอบ (ไม่มีแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์)	1.0, 1.5 และ 2.0	0.6, 0.8 และ 1.0	15.0
คานประกอบ (เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์)	1.0, 1.5 และ 2.0	0.6, 0.8 และ 1.0	15.0

จากความสัมพันธ์ของการอนุรักษ์พลังงาน จะได้ว่าพลังงานรวมที่ตำแหน่งที่ 1 หรือที่ระดับปล่อยน้ำหนัก จะมีค่าเท่ากับพลังงานรวมที่ตำแหน่งที่ 2 หรือที่ระดับอ้างอิง ดังนี้

$$U_1 = U_2 \quad (2)$$

$$w(H+\Delta) = \frac{1}{2}k\Delta^2 \quad (3)$$

$$\Delta^2-\frac{2w}{k}\Delta-2\left(\frac{w}{k}\right)H = 0 \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{w}{k}+\sqrt{\left(\frac{w}{k}\right)^2+2\left(\frac{w}{k}\right)H} \quad (5)$$

โดยที่ w คือน้ำหนัก Δ คือการแอ่นตัว k คือค่าความแข็งแรง (Stiffness) ของคานประกอบ (ในกรณีคานอย่างง่ายรับแรงกระทำเป็นจุดตรงตำแหน่งกึ่งกลางคานแบบสถิตจะได้สมการการแอ่นตัวคือ $\Delta=PL^3/48EI$ หรือ $k=P/\Delta=48EI/L^3$ และในกรณีที่วางน้ำหนักที่เท่ากับที่รับแรงกระแทกไว้บนคานแล้ววัดการแอ่นตัว จะได้ความสัมพันธ์ $w=k\Delta_{static}$ เมื่อ Δ_{static} คือการแอ่นตัวของคานในกรณีที่มีน้ำหนักกระทำแบบสถิต) และจัดสมการที่ (5) ใหม่จะได้

$$\Delta=\Delta_{static}+\sqrt{(\Delta_{static})^2+2(\Delta_{static})H} \quad (6)$$

$$\Delta=\Delta_{static}\left[1+\sqrt{1+2\left(\frac{H}{\Delta_{static}}\right)}\right] \quad (7)$$

$$\frac{\Delta}{\Delta_{static}}=1+\sqrt{1+2\left(\frac{H}{\Delta_{static}}\right)} \quad (8)$$

และจาก $P_{\max}=k\Delta_{\max}$ และ $P_{static}=k\Delta_{static}$ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าแรงกระทำสูงสุดที่เกิดจากการปล่อยน้ำหนักลงมากระแทกคานประกอบไม้ยางพาราเพียงครั้งเดียวโดยอาศัยค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จากการทดสอบและความสัมพันธ์ข้างต้นตามลำดับ จะได้

$$\frac{P_{\max}}{P_{static}}=\frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{static}}=1+\sqrt{1+2\left(\frac{H}{\Delta_{static}}\right)} \quad (9)$$

โดยเมื่อ $P_{\max}$ และ $\Delta_{\max}$ คือแรงกระทำสูงสุดและการแอ่นตัวสูงสุดตามลำดับ

3. ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและอภิปราย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

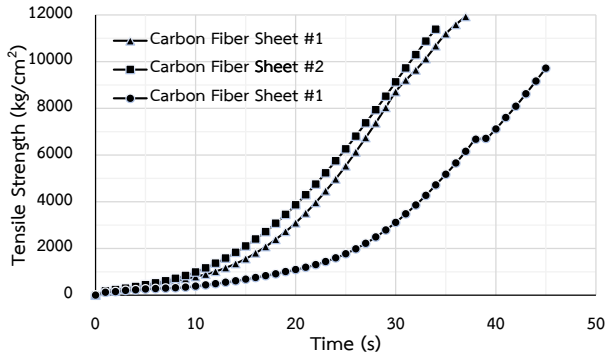
3.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของไม้ยางพารา

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและความชื้นของไม้ยางพารา พบว่า ไม้ยางพารามีค่าความถ่วงจำเพาะธรรมชาติเฉลี่ยที่ 0.65 และค่าความถ่วงจำเพาะแห้งเฉลี่ยอยู่ที่ 0.54 มีค่าหน่วยน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 562.21 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าปริมาณความชื้นเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 7.25 โดยการจำแนกไม้เบื้องต้นค่าความถ่วงจำเพาะ (Gravity Specific: G.S.) ของไม้เนื้ออ่อนมาก และไม้เนื้ออ่อน อยู่ระหว่าง 0.44 – 0.70 และ 0.56 – 0.87 ตามลำดับ และไม้แห้งมีความชื้นเฉลี่ย 12 เปอร์เซ็นต์หรือน้อยกว่า 16 เปอร์เซ็นต์ [12,13] ซึ่งจากค่าที่ทดสอบได้ทำให้ไม้ยางพาราจัดอยู่ในประเภทไม้เนื้ออ่อนค่อนข้างไปทางไม้เนื้ออ่อนมาก

การทดสอบความต้านทานแรงอัดในแนวขนานเสี้ยนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 42.53 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ย 83,248.39 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าหน่วยแรงดัดของคานไม้ยางพาราที่วิเคราะห์ได้มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 31.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ย 54,932.34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะเห็นว่าค่าโมดูลัสมีความแตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม้มีคุณสมบัติของความเป็นเนื้อเดียวกันน้อย [7] ส่งผลให้กำลังต้านทานแรงในแต่ละมิติมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเนื้อไม้และการเรียงตัวของเสี้ยนไม้ และจากค่าที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของไม้ยางพาราเบื้องต้น เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าตามมาตรฐานการจำแนกประเภทของไม้ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) พบว่าไม้ยางพาราที่นำมาศึกษาจัดอยู่ในประเภทไม้เนื้ออ่อนถึงไม้เนื้ออ่อนมาก

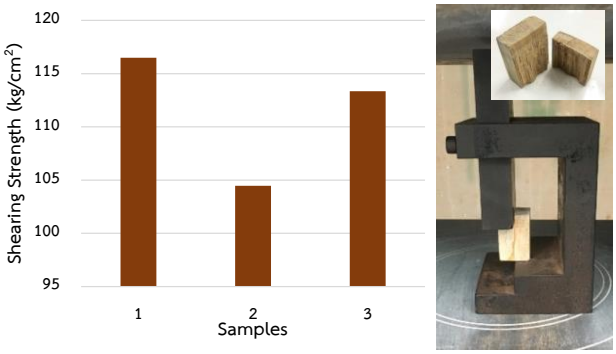
3.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

จากการทดสอบกำลังต้านทานการรับแรงดึงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดผ้า โดยทดสอบดังรูปที่ 2 โดยตัวอย่างในการทดสอบขนาดความหนา 0.2 มิลลิเมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที) ดังรูปที่ 8 และวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ทดสอบได้ค่า 11,014.61 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (10,190 – 22,927 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)



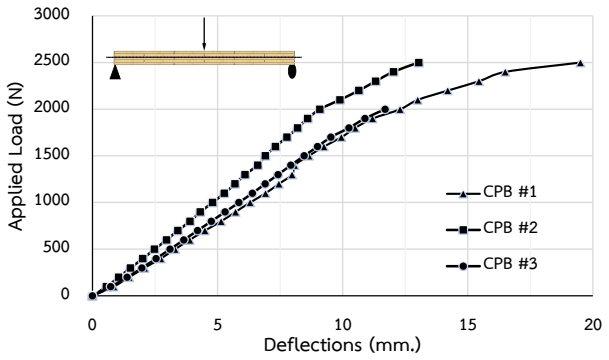
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลาในการทดสอบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

3.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเชื่อมประสาน (กาว)



รูปที่ 9 แรงกระทำสูงสุดในการทดสอบวัสดุเชื่อมประสาน

การทดสอบโดยการยึดไม้ยางพาราสองท่อนเข้าด้วยกันแล้วทำการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนโดยใช้ขนาดตามมาตรฐานในการทดสอบของกรมโยธาธิการและผังเมือง [11] ได้ผลการทดสอบเป็นค่าแรงกระทำสูงสุดจนชิ้นงานเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 9 และวิเคราะห์ค่าหน่วยแรงต้านทานแรงเฉือนเฉลี่ยได้เท่ากับ 111.14 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังต้านทานแรงเฉือนในแนวขนานเสี้ยนของไม้ยางพาราที่ทดสอบซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 107.34 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่ามีค่าที่แตกต่างกันประมาณ 3.54 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่ากาวที่ใช้ในการยึดประสานไม้ยางพาราสามารถยึดประสานได้ดี และการทดสอบยังพบอีกว่าการวิบัติของชิ้นตัวอย่างเกิดคนละแนวกับบริเวณที่ทากาวประสาน แสดงว่าชิ้นส่วนที่ใช้กาวมีความแข็งแรงในระดับที่ดี



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการแอ่นตัวในการทดสอบการต้านทานการดัดของคานไม้ยางพาราประกอบ

3.1.4 ผลการทดสอบการรับแรงดัดของคานประกอบไม้ยางพารา

พบว่าค่าหน่วยแรงดัดที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 32.07 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 58,429.37 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้การการทดสอบความต้านทานแรงดัดของคานไม้ยางพารา (ข้อ 3.1.1) จะพบว่าค่าจากการทดสอบคานประกอบมีค่าที่มากกว่า 3.02 เปอร์เซ็นต์ และ 6.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคานที่ประกอบขึ้นมีประสิทธิภาพในการรับแรงดัดที่ดีขึ้น โดยผลการทดสอบดังรูปที่ 10

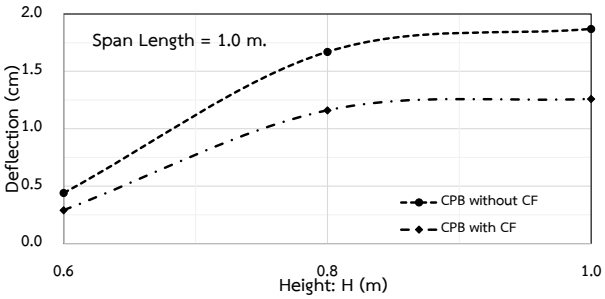
3.2 ผลการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบรับแรงกระแทกเพียงครั้งเดียว

3.2.1 ค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบ

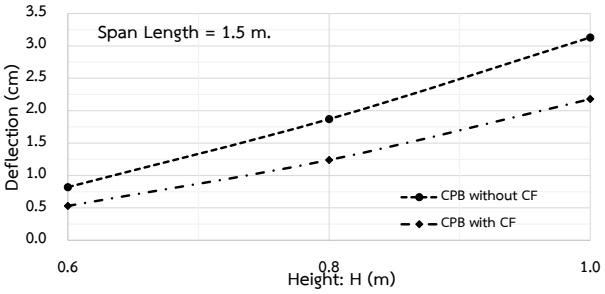
จากตารางที่ 1 การทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบรับแรงกระแทกทั้งที่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จำนวนทั้งหมด 54 ตัวอย่าง โดยน้ำหนัก (Weight: W) ที่ปล่อยอิสระหนักมีมวล (Mass: M) เท่ากับ 15 กิโลกรัม และมีตัวแปรที่แตกต่างกันคือ ความยาวของคาน (Length: L) และระยะความสูง (Height: H) ในการปล่อย เพื่อวัดค่าการแอ่นตัว (Deflection: Δ) ที่เกิดขึ้น โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 16

ตารางที่ 2 ค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบรับแรงกระแทกเพียงครั้งเดียวจากผลการทดสอบ

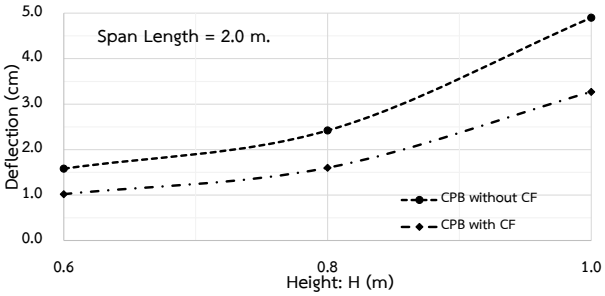
ความยาว (Length: L) (เมตร)	ความสูง (Height: H) (เมตร)	การแอ่นตัวของคาน (Deflection: Δ) (เซนติเมตร)		
		ไม่เสริมคาร์บอนไฟเบอร์	เสริมคาร์บอนไฟเบอร์	ค่าจากทฤษฎี
1.00	0.60	0.44	0.29	1.27
	0.80	1.67	1.16	1.46
	1.00	1.87	1.26	1.63
1.50	0.60	0.82	0.53	2.35
	0.80	1.87	1.24	2.71
	1.00	3.13	2.18	3.02
2.00	0.60	1.58	1.02	3.66
	0.80	2.42	1.60	4.21
	1.00	4.90	3.27	4.69



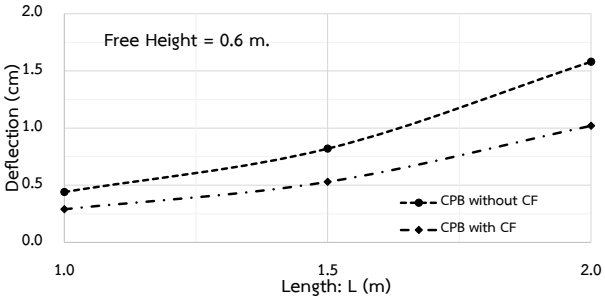
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและระยะปล่อยน้ำหนัก (L=1.0 m)



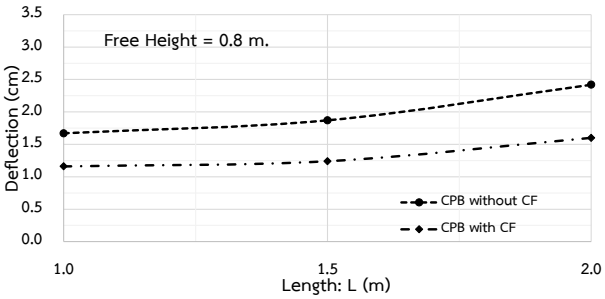
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและระยะปล่อยน้ำหนัก (L=1.5 m)



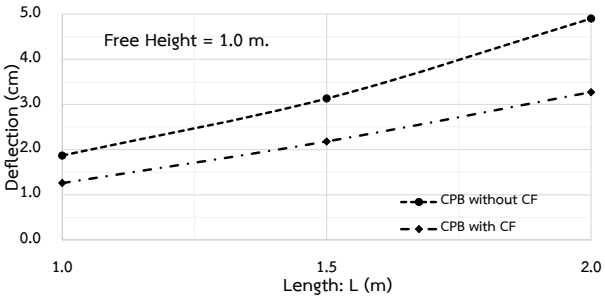
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและระยะปล่อยน้ำหนัก (L=2.0 m)



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและความยาวคาน (H=0.6 m)



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและความยาวคาน (H=0.8 m)



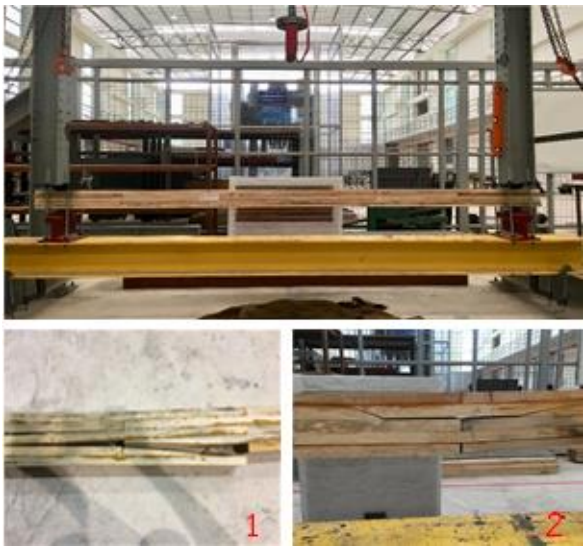
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการแอ่นตัวและความยาวคาน (H=1.0 m)

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 16 ผลการทดสอบแรงกระแทกแบบปล่อยน้ำหนักลงเพียงครั้งเดียวของคานไม้ยางพาราประกอบ และคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ความยาวคาน 1.0 เมตร, 1.5 เมตร และ 2.0 เมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ พบว่าในทุก ๆ การทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบเสริมคาร์บอนไฟเบอร์ให้ค่าการแอ่นตัวต่ำกว่าคานไม้ยางพาราประกอบทุก ๆ การทดสอบอันเนื่องมาจากคานไม้ยาพารางประกอบเสริมคาร์บอนไฟเบอร์มีคาร์บอนไฟ

เบอร์เป็นตัวช่วยยึดรั้งหรือรับแรงดึงภายในที่เกิดขึ้นจากแรงกระแทกของมวลน้ำหนักที่กระแทกลงคาน ดั้งนั้นคานไม้ยางพาราประกอบเสริมคาร์บอนไฟเบอร์จึงให้ค่าการแอ่นตัวที่ต่ำกว่าหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ คานไม้ยางพาราประกอบเสริมคาร์บอนไฟเบอร์แข็งแรงกว่าคานไม้ยางพาราประกอบ และพบว่าค่าความแตกต่างของการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบกับคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อคิดเป็นร้อยละแบ่งตามความยาวของคาน 1.0 เมตร, 1.5 เมตร และ 2.0 เมตร ตามลำดับ จะได้ค่าร้อยละของความแตกต่างระหว่างการโก่งตัวของคานไม้ยางพาราประกอบกับคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เทียบกับคานไม้ยางพาราประกอบอยู่ในช่วง 30.43 ถึง 33.33, 30.23 ถึง 35.29, และ 33.17 ถึง 35.38 ตามลำดับ นั่นก็คือ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์สามารถช่วยลดค่าการโก่งตัวได้ประมาณร้อยละ 30.23 ถึง 35.38 นั่นเอง

3.2.2 การวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบ

ลักษณะความแตกต่างของการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบและคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จากการปล่อยน้ำหนักที่ระยะความสูง 1.2 เมตร ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบ
1) คานไม้ยางพาราประกอบ 2) คานไม้ยางพาราประกอบเสริมคาร์บอนไฟเบอร์

จากรูปที่ 17 การวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเมื่อเทียบกับการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จะเห็นได้ว่าคานที่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ แม้คานไม้จะวิบัติแต่ชิ้นส่วนของคานยังไม่หลุดออกจากกัน เนื่องจากแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ช่วยยึดเหนี่ยวตัวคานไว้ทำให้คานไม้ยางพาราประกอบที่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะการวิบัติที่เหนียว ชิ้นส่วนไม่หลุดออกจากกันแตกต่างจากคานไม้ยางพาราที่ไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ไปอย่างสิ้นเชิง โดยที่คานไม้ยางพาราประกอบที่ไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อวิบัติแล้วจะวิบัติแบบเปราะและมีความยืดหยุ่นน้อยและแตกออกจากกันอย่างทันที

4. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการต้านทานของคานไม้ยางพาราประกอบภายใต้แรงกระแทก โดยคานไม้ยางพาราประกอบมีความยาวช่วงคานที่แตกต่างกันและรับแรงกระแทกจากน้ำหนัก 15 กิโลกรัม ที่ระยะความสูงที่แตกต่างกัน และนำค่าการแอ่นตัวของคานไปวิเคราะห์ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1) เมื่อทำการประกอบคานไม้ยางพาราและคานไม้ยางพาราเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ให้มีขนาดหน้าตัดเดียวกันตามขนาดความยาวต่าง ๆ ที่กำหนดจนแล้วเสร็จ เมื่อนำข้อมูลการทดสอบมาวิเคราะห์ผลพบว่าความยาวของคานที่เพิ่มขึ้นจาก 1.0 เมตร, 1.5 เมตร และ 2.0 เมตร จะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของการโก่งตัวอย่างชัดเจนที่ความสูงการปล่อยน้ำหนักลงกระแทกที่ 1.00 เมตร โดยได้ค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 1.87 เซนติเมตร, 3.13 เซนติเมตร และ 4.90 เซนติเมตร สำหรับคานไม้ยางพาราประกอบและค่าการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เท่ากับ 1.26 เซนติเมตร, 2.18 เซนติเมตร และ 3.27 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อคิดค่าความแตกต่างระหว่างการแอ่นตัวของคานทั้งสองเป็นร้อยละจะได้เท่ากับร้อยละ 32.47, 30.23 และ 33.17 ตามลำดับ

4.2) เมื่อนำข้อมูลการทดสอบแรงกระแทกแบบการปล่อยน้ำหนักลงเพียงหนึ่งครั้งมาเปรียบเทียบโดยคิดค่าความแตกต่างของการแอ่นตัวระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบที่เสริมและไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามความสูงของการปล่อยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจาก 0.60 เมตร, 0.80 เมตร, และ1.00 เมตร ในกลุ่มของความยาวคานที่ 1.00 เมตร, 1.50 เมตร และ 2.00 เมตร พบว่าคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ให้ค่าการแอ่นตัวที่น้อยกว่าคานไม้ยางพาราประกอบที่ไม่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยอยู่ในช่วงร้อยละ 30.43 ถึง 33.33, 30.23 ถึง 35.29 และ 33.17 ถึง 35.38 ตามลำดับ

4.3) จากการสังเกตลักษณะการวิบัติและการแอ่นตัวของคานไม้ยางพาราประกอบที่เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และไม่ได้เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ พบว่าลักษณะการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีลักษณะการวิบัติที่เหนียวกว่า อีกทั้งยังสามารถรับแรงกระแทกได้มากกว่าคานไม้ยางพาราประกอบที่ไม่ได้เสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ อีกด้วย

5. ข้อเสนอแนะ

5.1) การประกอบคานไม้ยางพารา ควรเพิ่มการบากรอยต่อ เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการยึดจับของกาวกับคานไม้ยางพาราประกอบ เนื่องจากกาวที่ใช้ในการประกอบคานไม้ มีส่วนสำคัญที่ช่วยในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทก ดังผลการทดสอบการรับแรงเฉือนของกาวจะเกิดการวิบัติตรงตำแหน่งของเนื้อไม้ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่ได้ใช้กาว

5.2) การวัดค่าการแอ่นตัวในการทดสอบแรงกระแทก ซึ่งเป็นการแอ่นตัวในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นจึงควรมีเครื่องมือในการวัดค่าการแอ่นตัวที่เหมาะสมกับการทดสอบโดยตรง ซึ่งในการศึกษานี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น ผู้วิจัยจึงประยุกต์วิธีการศึกษาและการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ที่มีเป็นฐาน

5.3) ปัจจุบันใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพียงหนึ่งแผ่น เพื่อหาความแตกต่างระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบกับคานไม้ยางพาราประกอบเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพียงเท่านั้น ดังนั้นหากต้องการพัฒนากำลังรับแรงดัดหรือกำลังรับแรงกระแทก ควรจะมีการเพิ่มปริมาณของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการเสริมคานไม้ยางพาราประกอบ ตลอดจนหาปริมาณการเสริมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เหมาะสมที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา ในการสนับสนุนห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทดสอบ และขอบคุณนักศึกษาช่วยการวิจัย ได้แก่ นายพรภิญโญ แสงชัยศรี และ นายสิขเรศ สุขวัฒนโชติ

เอกสารอ้างอิง

Lantos, G. (1970). The Flexural Behaviour of Steel Reinforced Laminated Timber Beams. *Wood Science*, Vol.2, No.3, pp. 136-143.

Sonti, S.S., and GangaRao, H.V.S. (1995). Banding Timber Crossties Using Composite Fabrics for Improving Their Performance. *Materials for the New Technology*, Washington, D.C., pp.1449-1457.

GangaRao, H.V.S. (1997). Sawn and Laminated Wood Beams Wrapped with Fiber Reinforced Plastic Composites. *Wood Des. Focus*, pp.13-18

Camille, A. Issa. And Ziad, Kmeid. (2004). Advanced Wood Engineering: Glulam Beams. *Journal of Construction and Building Materials*, pp. 99-106.

Nadir, Y. and Nagarajan, P. (2014). The Behaviour of Horizontally Glued Laminate Beams using Rubber Wood. *Construction and Building Materials*, 55, pp. 398-405.

Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M. and Arif, M. M. (2016). Flexural Stiffness and Strength Enchancement of Horizontally Glued Laminated Wood Beam with GFRP and CFRP Composite Sheets. *Construction and Building Materials*, 112, pp. 547-555.

วรพจน์ ประชาเสรี, เอกรัฐ สมัครรัฐกิจ และ วิริยะ ทองเรือง (2553). การประเมินประสิทธิภาพของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้การดัด. *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 21, ฉบับที่ 1, หน้า 7-16.

อาดิ้ล นิยมเดชา, นันทชัย ชูศิลป์ และ จรูญ เจริญเนตรกุล (2563). พฤติกรรมการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบติดกาวเสริมกำลังด้วยเส้นใยพอลิเมอร์. *การประชุมวิชาการระดับชาติสหวิทยาการเอเชียอาคเนย์ ครั้งที่ 7*, นนทบุรี, 29-30 พฤษภาคม 2563, หน้า 60-69.

อิมรอน หะยียูโซะ, วนัชพร แมงสาโมง และ ฮาซัน คอแด๊ะ (2563). คานไม้ยางพาราลามิเนตเสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมใยแก้ว. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาชราชนครินทร์*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม , หน้า 67-81.

พงศ์ศักดิ์ ศุขมณี, ถาวร เกื้อสกูล และ อรุณ ลูกจันทร์ (2565). พฤติกรรมการรับแรงอัดของเสาสั้นประกอบไม้ยางพาราที่ถูกยึดด้วยตะปู. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27*, เชียงราย, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า MAT01-1 – MAT01-7.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). มยผ.1221-51 ถึง มยผ. 1227-51 มาตรฐานการทดสอบไม้. สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง ถนนพระราม 6 แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400.

มนัส อนุสิริ. (2554). *ทฤษฎีและการปฏิบัติการทดสอบวัสดุในงานวิศวกรรมโยธา*. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) อาคารเนชั่นทาวเวอร์ ชั้นที่ 19 เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนาตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260.

มนัส อนุสิริ. (2556). การออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก. ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน) อาคารเนชั่นทาวเวอร์ ชั้นที่ 19 เลขที่ 1858/87-90 ถนนบางนาตราด แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260.