

การประเมินประสิทธิภาพของคานาไม้อย่างพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วย วัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้การดัด

Performance Evaluation of FRP Reinforced Para-Wood Glued Laminated (Glulam)

Beams under Flexure

¹วรพจน์ ประชาเสรี, ¹เอกรัฐ สมัครรัฐกิจ และ ²วิริยะ ทองเรือง

Woraphot Prachasaree, Agarat Samakrattakit and Wiriya Thongruang

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-287114 โทรสาร 074-459396

E-mail: pworaphot@eng.psu.ac.th

บทคัดย่อ

จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อทำการพัฒนาและประเมินค่าคุณสมบัติเชิงกลของคานาไม้อย่างพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วสำหรับก่อสร้างขนาดเล็กและที่พักอาศัย. ผลของรูปแบบรอยต่อและตำแหน่งของการเสริมวัสดุโพลิเมอร์ที่มีต่อ ค่าสติฟเนสของการดัดและการเหือน, กำลัง, ตัวประกอบลดกำลังเนื่องจาก การเปลี่ยนรูปเนื่องจากการเหือน และ รูปแบบการพิบัติถูก ศึกษาภายใต้การทดสอบการดัดของคานาแบบแรงกระทำ 3 และ 4 จุด สำหรับคานาประกอบที่ปราศจากการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์พบว่าคานาดังกล่าวเกิดการพิบัติใกล้แนว รอยต่อในด้านรับแรงดึง สำหรับในกรณีของคานาประกอบที่ มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์ พบการพิบัติของรอยต่อ ในคานาด้านรับแรงดึงและตามด้วยการแยกชั้นของวัสดุ โพลิเมอร์เสริมกำลัง นอกจากนี้รูปแบบรอยต่อแบบที่ 2 ของ คานาประกอบในงานวิจัยเป็นรูปแบบที่แนะนำให้ใช้ รวมทั้ง ประสิทธิภาพของรอยต่อสามารถทำการปรับปรุงได้โดยการ เพิ่มความยาวของรอยต่อ

Abstract

The main purpose of this research is to develop and evaluate mechanical properties of Para-wood glue laminated beam reinforced with GFRP (glass fiber reinforced polymer) for residential and light – construction. The effects of joint patterns and GFRP reinforcement positions on flexural and shear stiffness, strength, reduction factor due to shear deformation, and failure mode were studied under three and four point (ASTM D198-97) bending beam test. For Para-wood Glulam beam without GFRP reinforcement, test specimens were failed near finger joints on the beam tension side. In case of Para-wood Glulam beams with GFRP reinforcement, joint failure on the tension side following by delamination of GFRP reinforcement was found. In addition, Para-wood Glulam beams with the second joint pattern are recommended in this study. Joint efficiency can be improved by increasing the length of joints.

1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการบริโภคไม้สำหรับงานอุตสาหกรรมในด้านต่างๆของประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ในด้านอุตสาหกรรมการก่อสร้างพบว่าความต้องการที่จะนำไม้มาใช้งานมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภท ไม้ท่อน ไม้แปรรูปและไม้แผ่นบาง ซึ่งมีปริมาณการนำเข้ามากกว่าการส่งออก อย่างไรก็ตามในการนำไม้มาใช้สำหรับงานก่อสร้างจะพบปัญหาหรือสิ่งที่ต้องพิจารณาก่อนการใช้งานมากกว่าวัสดุประเภทอื่น เนื่องจากไม้เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างที่มีความเป็น เนื้อเดียวกันน้อยทำให้ประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของไม้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุวิศวกรรมอื่นๆ เช่น เหล็ก หรือ คอนกรีต ฯลฯ

อย่างไรก็ตามคุณสมบัติพื้นฐานของไม้ที่สำคัญบางประการ เช่น เป็นวัสดุที่หาไม่ยากนัก ใช้แล้วสามารถปลูกทดแทนได้ มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรงในระดับดี จึงยังคงมีความนิยมใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่ อุตสาหกรรมการก่อสร้างในต่างประเทศได้ประยุกต์ใช้งาน ไม้เนื้อแข็งในการผลิตไม้ประกอบลามิเนต (Glue Laminated Lumber or Glulam) เพื่อใช้เป็นองค์อาคารในการรับน้ำหนักของโครงสร้างต่างๆ เช่น นำไปใช้เป็นคานหลักและรองของโครงสร้าง รวมทั้งเสาของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้ในโครงสร้างพื้นฐานประเภทสะพานช่วงสั้นซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับองค์อาคารส่วนบน (Superstructure) เช่น พื้นสะพาน คานรอง และราวกันขอบ (Guardrail) เป็นต้น

การวิจัยศึกษาความเป็นไปได้เกี่ยวกับการใช้งานไม้กับวัสดุอื่นๆในลักษณะวัสดุประกอบได้ถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ราวปี ค.ศ.1960 อย่างไรก็ตามงานวิจัยในช่วงที่ผ่านมา จะเน้นอยู่ที่การนำโลหะเช่น เหล็กและอลูมิเนียม มาประกอบการใช้งาน รวมทั้งการศึกษาระบบการยึดต่อของแผ่นไม้กับโลหะ โดยวิธีทางกลและวิธีทางเคมี [1] ในปี ค.ศ. 1972 Curtis ได้ศึกษาการใช้แผ่นเหล็กเพื่อเสริมกำลังคานไม้ซึ่งพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่ก็ได้เป็นการเพิ่มกำลังของคาน [2] นอกจากนี้มีการทดสอบคานไม้ Southern Pine โดยมีการเสริมกำลังด้วยเส้นลวดเหล็กเคลือบด้วยทองเหลืองในด้านรับแรงดึงของคานไม้ซึ่งผลการทดสอบแสดงรูปแบบ

การบิดในด้านการอัด [3] ในปี ค.ศ. 1981 Spaum ทดลองใช้เส้นใยแก้วชนิดยาวเสริมกำลังคานไม้ซึ่งพบว่ากำลังดึงของคานจะเพิ่มขึ้นโดยตรงตามอัตราส่วนปริมาตรเส้นใย (Fiber Volume Fraction) [4] สำหรับงานในด้านโครงสร้างพื้นฐานพบว่าได้มีการติดตั้งสะพานคนเดินเท้าซึ่งสร้างขึ้นจากชิ้นส่วนของไม้ประกอบลามิเนตและมีการเสริมกำลังโดยใช้เส้นใยอามิก ในรัฐโอเรกอน สหรัฐอเมริกา [5] การศึกษาของ Zwerneman ในปี ค.ศ. 1995 แสดงถึงควมมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับการใช้แผ่นไม้ประกอบลามิเนตเพื่อแทนที่พื้นสะพานเดิมที่ชำรุดสึกหรอ ดังต่อไปนี้ คือ 1) ง่ายในการประกอบและติดตั้ง 2) ช่วยในการลดน้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead Load) ของแผ่นพื้นสะพาน 3) ช่วยลดเวลาในการทำงานและการปิดการจราจร และ 4) สามารถทำการติดตั้งภายใต้สภาวะอากาศใดๆได้อย่างดี [6] สำหรับงานทางด้านการขนส่งมีการประยุกต์ใช้คานไม้เสริมกำลังสำหรับไม้หมอนรถไฟ [7] ในปี ค.ศ. 1997 GangaRao ทำการศึกษาเกี่ยวกับคานไม้ในโครงสร้างสะพานซึ่งถูกเสริมกำลังแบบภายนอก (External Reinforcement) โดยการห่อคานไม้โดยใช้แผ่นเส้นใย [8] การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear Stochastic) สำหรับคานไม้ประกอบลามิเนตถูกเสนอขึ้นโดย Lindyberg [9] ในปี ค.ศ. 2000 พฤติกรรมทางโครงสร้างของแผ่นไม้ประกอบสำหรับพื้นสะพานถูกศึกษาภายใต้แรงกระทำสถิต [10]

สำหรับประเทศไทยพบว่าในการประยุกต์ใช้งานไม้ประกอบลามิเนตยังมีข้อจำกัดและอุปสรรคอย่างมาก ตั้งแต่การขาดแคลนไม้เนื้อแข็ง การขาดแคลนองค์ความรู้ ความเข้าใจในด้านพฤติกรรมทางด้านกำลังและคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งแนวคิดในการประยุกต์ใช้งานไม้ประกอบลามิเนตสำหรับประเทศไทยต้องวางอยู่บนพื้นฐานในการนำไม้ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศและมีปริมาณมากตลอดจนมีคุณสมบัติทางเชิงกลที่ดีพอให้นำมาทำการปรับปรุงและศึกษารูปแบบรวมทั้งพฤติกรรมสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง

สืบเนื่องมาจากไม้ยางพารามีคุณสมบัติเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง มีปริมาณมากในประเทศ เจริญเติบโตเร็วและเนื้อ

ไม่มีความสวยงาม ทำให้อุตสาหกรรมแปรรูปไม้จากไม้ยางพาราเป็นที่นิยมและมีการเติบโตสูงเป็นที่ต้องการของตลาด รวมไปถึงความต้องการในการพัฒนารูปแบบและผลิตภัณฑ์ใหม่จากไม้ยางพารา ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาเพื่อผลิตคานไม้ประกอบลามิเนตโดยเสริมกำลังของไม้ยางพาราด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer or FRP) ซึ่งการนำวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยมาใช้นี้จะเป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงของไม้ยางพารา ทำให้ไม้ประกอบลามิเนตจากไม้ยางพาราสามารถใช้แทนที่ไม้เนื้อแข็งและไม้ประกอบลามิเนตได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้รับความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงกลและรูปแบบการเสริมกำลังของคานไม้ รวมทั้งวิธีการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งจะถูกล่าไว้ในหัวข้ออื่นๆต่อไป

2. วัตถุประสงค์และขอบเขต

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มีรายละเอียดแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

1. เพื่อแสดงขั้นตอนและขบวนการผลิตซึ่งสามารถทำได้ในโรงงานผลิตเครื่องเรือนจากไม้ยางพาราโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มขบวนการใดที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน
2. เพื่อศึกษารูปแบบการประกอบชิ้นส่วนไม้และการเสริมกำลังของไม้ประกอบลามิเนต
3. เพื่อทำการประเมินความแข็งแรงและกำลังของคานไม้ประกอบลามิเนตเมื่อมีการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย
4. การศึกษาพฤติกรรมการใช้งานภายใต้สภาวะน้ำหนักบรรทุกใช้งานสถิต

เนื่องจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการประเมินประสิทธิภาพและพฤติกรรมเชิงกลของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย นอกจากปัจจัยและรูปแบบที่จะทำการศึกษาล่วงแล้ว เพื่อที่จะทำให้การประเมินประสิทธิภาพและพฤติกรรมของคานไม้ให้

ได้ผลละเอียดครบถ้วน จำเป็นต้องใช้รูปแบบคานตัวอย่างหลายรูปแบบซึ่งจะต้องสิ้นเปลืองเวลาและงบประมาณมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำกัดอยู่เฉพาะรูปแบบที่น่าเสนอ (แสดงอยู่ในหัวข้อถัดไป) และอยู่ภายใต้วิธีทดสอบคานไม้ประกอบตามมาตรฐาน ASTM D198 -97 เท่านั้น

3. คานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตและการผลิต

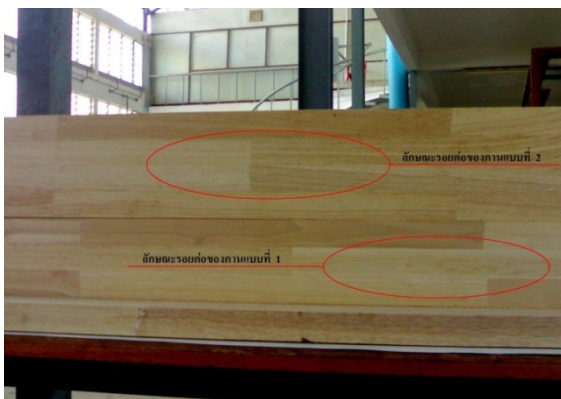
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองแบบสถิตย์ภายใต้การค้ำของคานไม้ยางพาราประกอบลามิเนตเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งขนาดของคานตัวอย่างจะมีหน้าตัด 7.5×16 เซนติเมตร และมีความยาวประมาณ 300 เซนติเมตร สำหรับวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วถักทอสองทิศทาง $[0^\circ/90^\circ]$ ร่วมกับโพลิเอสเตอร์เรซิน คานไม้ตัวอย่างประกอบกันขึ้นจากไม้ยางพาราซึ่งใช้ไม้ยางพาราแปรรูปหรือท่อนไม้ยางพาราแปรรูปที่เหลือจากการตัดท่อนไม้ในอุตสาหกรรมเครื่องเรือน ซึ่งไม้ยางพาราดังกล่าวผ่านกระบวนการอบแห้งและอบน้ำยาเพื่อป้องกันแมลงแล้ว ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อนไม้ยางพาราซึ่งมีความยาวประมาณ 50 เซนติเมตรเพื่อจำกัดจำนวนรอยต่อและให้คานไม้ตัวอย่างมีลักษณะรูปแบบที่สม่ำเสมอจากท่อนไม้ขนาดใกล้เคียงกันซึ่งท่อนไม้แต่ละท่อนจะประกอบเข้าด้วยกันในลักษณะต่อชนที่ปลายโดยมีลักษณะรอยต่อแบบฟัน (Finger Joint) เพื่อให้ได้ท่อนไม้มีความยาว 300 และ 350 เซนติเมตรโดยประมาณ

สำหรับท่อนไม้ที่ผ่านการประกอบโดยการต่อชนมาแล้ว จะถูกนำมาทำการประกอบขึ้นเป็นคาน โดยทำการวางท่อนไม้ซ้อนกันจนกระทั่งได้ขนาดความลึกของหน้าตัดตามต้องการ โดยที่ท่อนไม้แต่ละชั้นจะถูกเชื่อมต่อกันด้วยกาวชนิดฟีนอลฟอร์มาดีไฮด์ (กำลังรับแรงดึงประมาณ 35 ksc) และอยู่ภายใต้แรงอัดเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 1

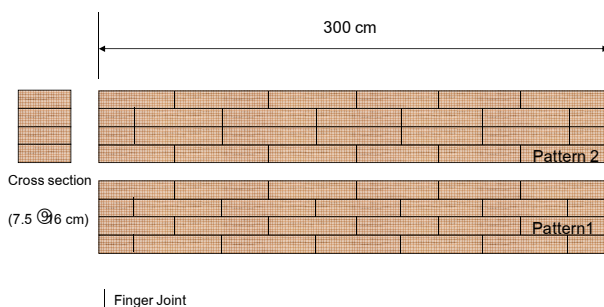


รูปที่ 1 การอัดประกอบคานไม้ตัวอย่าง (4 คานพร้อมกัน)

ในขั้นตอนนี้รูปแบบของตำแหน่งและแนวรอยต่อของคานประกอบไม้จำนวน 2 รูปแบบถูกนำเสนอ (แสดงอยู่ในรูปที่ 2 และ 3) เพื่อใช้ในการศึกษาอิทธิพลของรอยต่อที่มีผลต่อกำลังและรูปแบบการพืดที่เกิขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 2 คานไม้ประกอบต้นแบบ (แบบที่ 1 และ 2 วางซ้อนกันอยู่)



รูปที่ 3 แบบรอยต่อของคานไม้ประกอบ

คานไม้ยางพาราประกอบตัวอย่างจะถูกนำมาเสริมกำลังโดยวัสดุโพลีเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่ เส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยแก้วถักทอชนิดสองทิศทาง $[0^\circ/90^\circ]$ ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตรขณะที่โพลีเมอร์ที่ใช้คือโพลีเอสเตอร์ โดยทำการติดเส้นใยแก้วถักทอกับคานไม้ด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยมือ (hand lay-up) ซึ่งโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นชนิดที่เกิดการบ่มที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4 การเสริมกำลังคานไม้ประกอบ

คานไม้ยางพาราประกอบทั้งแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 จะถูกนำมาเสริมกำลังที่ 1) ผิวล่างเพียงอย่างเดียว (B) และ 2) ทั้งผิวบน (T) และล่าง (B) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 5 นอกจากนี้ลักษณะของคานไม้ประกอบตัวอย่างในโครงการวิจัยนี้แสดงสรุปไว้ในตารางที่ 1

4. การจัดเตรียมและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เพื่อศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกล คานไม้ยางพาราประกอบตัวอย่างจะถูกนำมาทดสอบภายใต้การดัดแบบแรงกระทำสามและสี่จุด (ASTM D198-97) (แสดงไว้ในรูปที่ 6) โดยใช้แรงกระทำสถิตในทิศทางตั้งฉากกับแกนตามแนวยาวของคานตัวอย่างจนกระทั่งคานเกิดการพืด ซึ่งคานไม้ตัวอย่างถูกวางบนที่รองรับอย่างง่ายทั้งสองด้านและคานเหล็กจะถูกนำมาวางเหนือคานไม้ตัวอย่างเพื่อใช้เป็นคานส่งถ่ายแรงในกรณีการทดสอบการดัดแบบแรงกระทำสี่จุด โดยระหว่างการทดสอบได้ทำการบันทึกข้อมูลต่างๆประกอบไป

ด้วย ขนาดแรงกระทำ, ค่าระยะการ โกงที่ตำแหน่งต่างๆ และ
ค่าความเครียดของตลอดหน้าตัด

ตารางที่ 1 สรุปลักษณะของคานไม้ประกอบตัวอย่าง

คาน	รอยต่อ	วัสดุ เสริม กำลัง	การเสริมกำลัง	
			ผิวล่าง (B)	ผิวน (T)
Pb1	1	-	-	-
Pb2	2	-	-	-
Pb1B	1	$G(0^\circ/90^\circ)$	B	-
Pb2B	2	$G(0^\circ/90^\circ)$	B	-
Pb1BT	1	$G(0^\circ/90^\circ)$	B	T
Pb2BT	2	$G(0^\circ/90^\circ)$	B	T



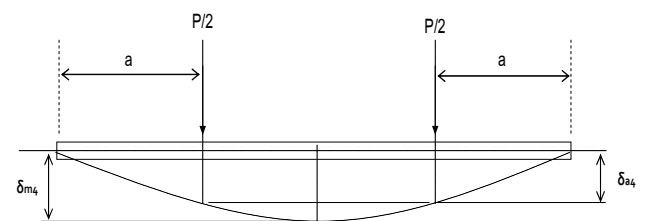
รูปที่ 5 รูปแบบการเสริมวัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย



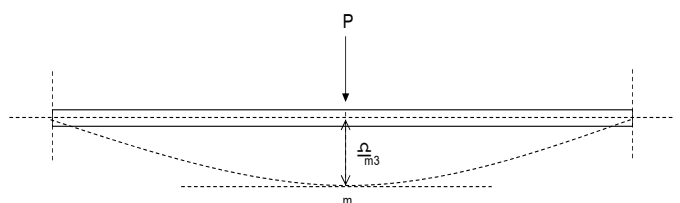
รูปที่ 6 การทดสอบคานภายใต้การดัดแบบแรงกระทำ 4 จุด

5. การประเมินค่าคุณสมบัติเชิงกลจากผลการทดสอบ

การประเมินค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดเทียบเท่า (equivalent bending rigidity: EI) และ ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการเฉือนเทียบเท่า (equivalent shear rigidity: KGA) ทำการคำนวณจากผลการทดสอบคานไม้ตัวอย่างโดยใช้ข้อมูลการโก่งตัวหรือค่าความเครียด อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้การประเมินค่าคุณสมบัติเชิงกลนี้จะใช้ผลของการโก่งตัวเป็นหลักซึ่งจะนำข้อมูลการโก่งตัวจากการทดสอบภายใต้การดัดแบบแรงกระทำสาม และสี่จุดมาทำการแยกผลการโก่งตัวเนื่องจากการดัดและการเฉือนออกจากกัน



รูปที่ 7 การโก่งตัวของคานภายใต้การดัดภายใต้แรงกระทำ 4 จุด



รูปที่ 8 การโก่งตัวของคานภายใต้การดัดภายใต้แรงกระทำ 3 จุด

จากรูปที่ 7 แสดงการโก่งตัวของคาน เนื่องจากระยะบนคานระหว่างตำแหน่งของแรงกระทำในแนวดิ่งอยู่ภายใต้ผลของการคัตเท่านั้น ดังนั้นค่าความแข็งแกร่งต่อการคัต (EI) และการเหิน (KGA) จึงสามารถถูกคำนวณแยกออกจากกันได้ โดยทำการกำจัดผลการโก่งเนื่องจากการเหินที่อยู่ภายนอกช่วงแรงกระทำ (จากปลายคานถึงตำแหน่ง a) โดยการใช้การโก่งตัวที่กึ่งกลางของคานภายใต้การทดสอบการคัตแบบแรงกระทำสี่จุด (δ_{m4}) ลบด้วยการโก่งตัวที่ตำแหน่งได้แรงกระทำของคานภายใต้การทดสอบการคัตแบบแรงกระทำสี่จุด (δ_{a4}) ทำการแก้สมการผลลัพธ์ของการโก่งตัวจะทำให้ได้ความแข็งแกร่งเทียบเท่าของการคัต (EI)

$$(EI) = \frac{Pa}{48(\delta_{m4} - \delta_{a4})}(3L^2 - 12La + 12a^2) \quad (1)$$

โดยที่ P คือแรงกระทำรวมในแนวดิ่ง L คือความยาวของคาน และ a คือระยะจากปลายคานถึงตำแหน่งแรงกระทำ

เพื่อคำนวณค่าความแข็งแกร่งต่อแรงเหินเทียบเท่า (KGA) ค่าความแข็งแกร่งเนื่องจากการคัตเทียบเท่า (EI) ในสมการ (1) จะถูกแทนค่าลงในสมการการโก่งตัวภายใต้การคัตแบบแรงกระทำ 3 จุด (รูปที่ 8) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความแข็งแกร่งต่อแรงเหินเทียบเท่า (KGA) ดังแสดงอยู่ในสมการ (2)

$$(\kappa GA) = \frac{PL}{\left(\delta_{m3} - \frac{PL^3}{(48 EI)} \right)} \quad (2)$$

โดยที่ P คือแรงกระทำรวมในแนวดิ่ง, δ_{m3} คือการโก่งตัวที่กึ่งกลางของคานภายใต้การทดสอบการคัตสามจุด, L คือความยาวของคาน

สำหรับการประเมินค่าตัวประกอบการลดกำลังของค่าความแข็งแกร่งต่อการคัตเนื่องจากการเปลี่ยนแปรรูปเนื่องมาจากการเหิน (R_{bs}) ในงานวิจัยนี้ตัวประกอบดังกล่าวทำการคำนวณหาจากข้อมูลของการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ โดยทำการพิจารณาสมการการโก่งตัวเนื่องจากผลการคัตและการเหิน (Timoshenko's beam theory) ซึ่งสมการการโก่งตัวดังกล่าวจะถูกเขียนอยู่ในรูปของ

การโก่งตัวเนื่องจากการคัตโดยใช้ตัวประกอบปรับแก้ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$\frac{(\delta_m)_b}{(\delta_m)_s} = f_{bs} \quad (3)$$

$$(\delta_m)_t = (\delta_m)_b \left(1 + \frac{1}{f_{bs}} \right) = \frac{(\delta_m)_b}{R_{bs}} \quad (4)$$

โดยที่ $(\delta_m)_t$ คือการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานเนื่องจากการคัต $(\delta_m)_b$ และการเหิน $(\delta_m)_s$ และ f_{bs} คืออัตราส่วนของการโก่งตัวเนื่องจากการคัตต่อการเหิน สำหรับกรณีคานภายใต้การคัตเนื่องจากแรงกระทำ 3 จุด

$$R_{bs} = \frac{1}{\left(1 + \frac{48(EI)_b}{\kappa(AG)_w L^2} \right)} \quad (5)$$

6. ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลจากการประเมินค่าความแข็งแกร่งต่อการคัต (EI), ค่าความแข็งแกร่งต่อการเหินคาน (KGA), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเทียบเท่า, ค่าโมดูลัสการเหินเทียบเท่า ทั้งหมดถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

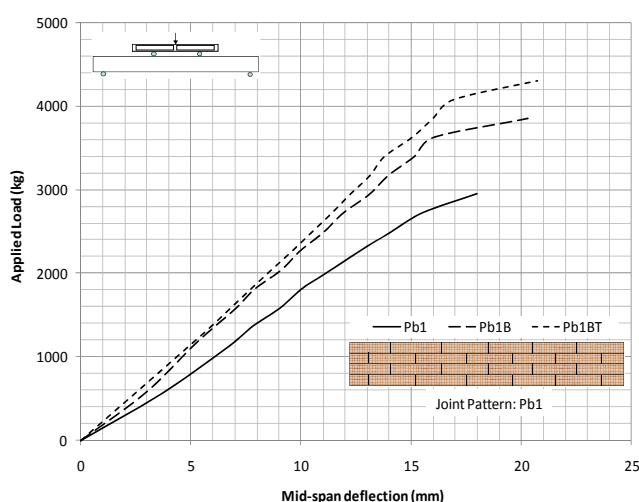
คาน	กำลังสูงสุด (kg)	(EI) 10^8 (kg.cm ²)	(KGA) 10^6 (kg)	E_{eq} 10^5 (ksc)	G_{eq} 10^4 (ksc)
Pb1	3402	6.40	-	2.50	-
Pb2	3175	5.91	-	2.31	-
Pb1B	5180	7.73	4.33	3.02	3.61
Pb2B	4990	7.28	7.21	2.84	6.01
Pb1BT	6124	8.67	10.17	3.39	8.48
Pb2BT	5670	8.39	13.35	3.28	11.13

7. การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

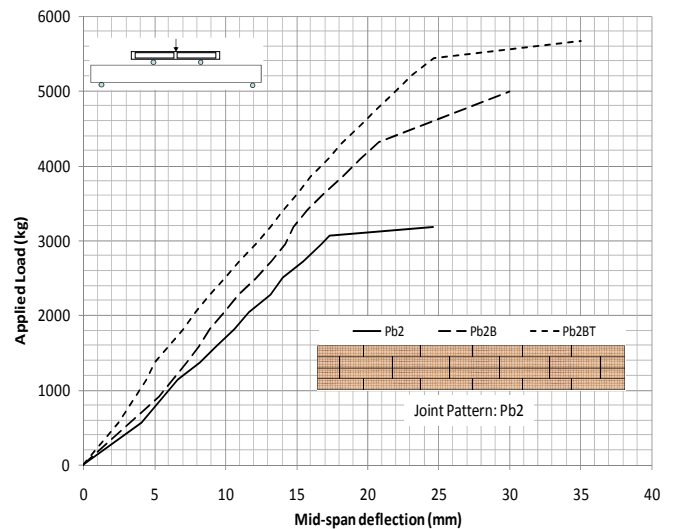
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานในแนวดิ่งพบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของคานที่ทำการ

ทดสอบเป็นแบบเชิงเส้น 2 ช่วง (Bilinear) ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10 ซึ่งพฤติกรรมของคานาไม้ยางพาราประกอบด้วยอย่างต่างๆ มีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยช่วงที่หนึ่งมีลักษณะรูปแบบเป็นเส้นตรงอีลาสติคจากจุดที่แรงกระทำเป็นศูนย์จนถึงตำแหน่งที่ค่าแรงกระทำมีผลให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณรอยต่อของคานา ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าความแข็งแรงของคานาภายหลังจุดดังกล่าว นี้ลดลงอย่างมากเนื่องจากการแตกร้าวที่รอยต่อที่จุดอื่นๆเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามคานายังสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มเติมอีกเล็กน้อยจนกระทั่งคานาถึงจุดพิบัติซึ่งพฤติกรรมลักษณะเชิงเส้นในช่วงหลังนี้มีการเพิ่มขึ้นของการโก่งของคานาอีกเล็กน้อยเช่นเดียวกันกับแรงกระทำ

นอกจากนี้ยังพบว่าคานาไม้ประกอบยางพาราเมื่อทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งเป็นการเพิ่มความแข็งแรงและค่าแรงกระทำที่ทำให้เกิดการแตกร้าวแล้ว ยังเป็นการเพิ่มของความสามารถในการเปลี่ยนแปรรูป (Deformation) ได้มากขึ้นกว่าเดิมประมาณ 5-15 % ซึ่งการคำนวณอยู่บนพื้นฐานของค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูป (Deformation Factor) โดยทำการคัดเปลี่ยนนิยามให้เหมาะสมกับคานาไม้ประกอบลามิเนตคืออัตราส่วนพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์แรงกระทำต่อการโก่งตัวที่กำลังประลัย (A_u) ต่อพื้นที่ใต้เส้นความสัมพันธ์แรงกระทำต่อการโก่งตัวที่เกิดรอยแตกร้าว (A_c)

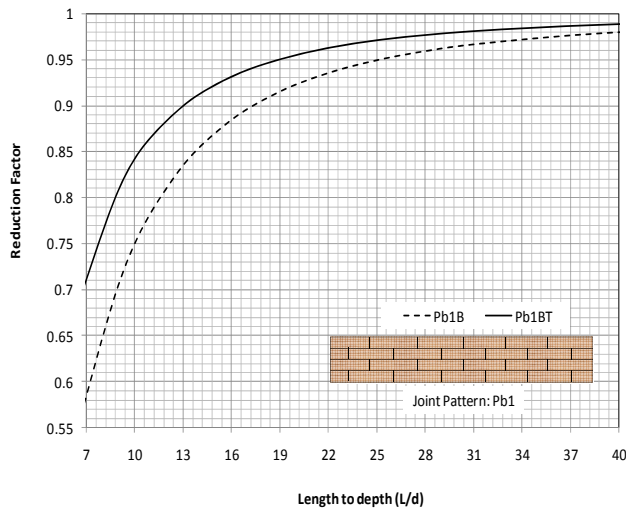


รูปที่ 9 แรงและการโก่งตัว (คานารอยต่อแบบที่ 1)

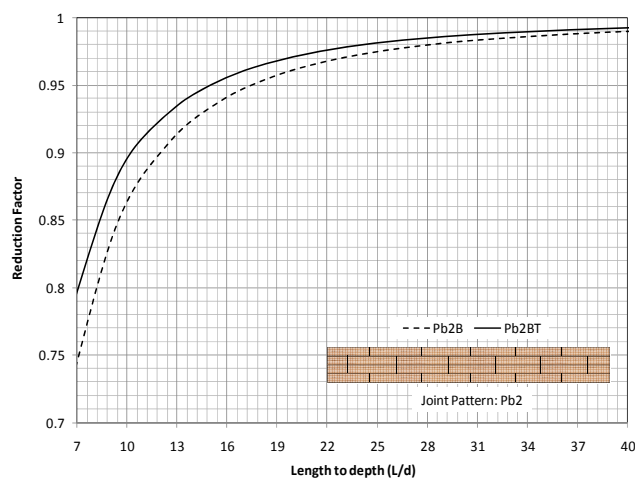


รูปที่ 10 แรงและการโก่งตัว (คานารอยต่อแบบที่ 2)

เมื่อนำค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูป (Deformation Factor) มาทำการเปรียบเทียบระหว่างคานาไม้ประกอบรูปแบบที่ 1 และ 2 พบว่าคานาไม้ประกอบรูปแบบที่ 2 มีค่าดังกล่าวสูงกว่าซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปได้และการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) ที่มากกว่าสำหรับตัวประกอบการลดกำลังของการตัดเนื่องจากอิทธิพลของแรงเฉือนของกรณีกานภายใต้การตัดถูกแสดงเป็นความสัมพันธ์กับอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของหน้าตัด (L/d) จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่ออัตราส่วนความยาวคานาต่อความลึกของหน้าตัดมีค่าน้อยกว่า 15 ซึ่งผลของแรงเฉือนที่มีต่อการโก่งของคานาประกอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากดังแสดงอยู่ในรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 ตัวประกอบการลดกำลังของค่าความแข็งแรงต่อการคด (คานรอยต่อแบบที่ 1)



รูปที่ 12 ตัวประกอบการลดกำลังของค่าความแข็งแรงต่อการคด (คานรอยต่อแบบที่ 2)

จากการทดสอบพบว่าลักษณะการพืดของคานส่วนใหญ่จะเกิดการแตกร้าวขึ้นที่บริเวณรอยต่อของคานในชั้นที่ 1 และ 2 ก่อน (นับจากด้านล่างสุด) และเมื่อเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกิดการพืดดังแสดงในรูปที่ 13 คานไม้ยางพาราประกอบทั้งหมดในการศึกษาจะเกิดการพืดขึ้นบริเวณรอยต่อของไม้ในชั้นล่างสุดก่อนเสมอเนื่องจากบริเวณรอยต่อ ไม้สามารถรับแรงในแนวตั้งฉากที่เพิ่มขึ้นได้ซึ่งเป็นผลของประสิทธิภาพในการส่งถ่ายแรงผ่านรอยต่อที่ไม่มีเพียงพอ

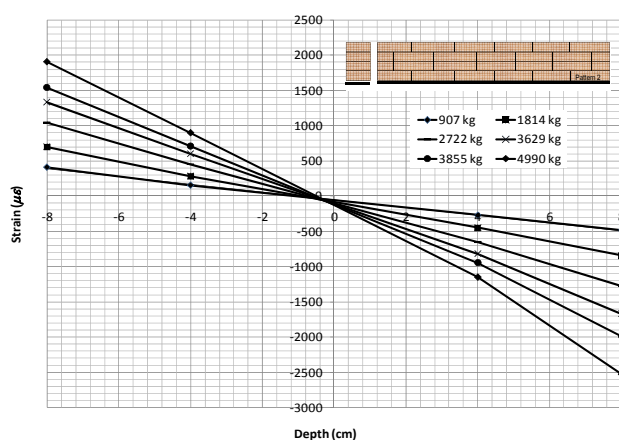
นอกจากนี้ผลการประเมินคุณสมบัติเชิงกลจากตารางที่ 2 พบว่าค่าความแข็งแรงเนื่องจากการคดเทียบเท่า (E_c) และค่าความแข็งแรงต่อแรงเฉือนเทียบเท่า (KGA) ของคานไม้ยางพาราประกอบชนิดรอยต่อแบบที่ 2 (รอยต่อในชั้นที่ 2 และ 3 ซ้อนทับในตำแหน่งเดียวกัน) มีค่าสูงกว่าคานไม้ที่ประกอบชนิดรอยต่อแบบที่ 1 (รอยต่อสลับกัน) เนื่องมาจากจำนวนของรอยต่อในคานแบบที่ 1 มีจำนวนมากกว่าในบริเวณระหว่างช่วงของแรงกระทำโดยเฉพาะที่ชั้นล่างสุดของคานไม้ประกอบ



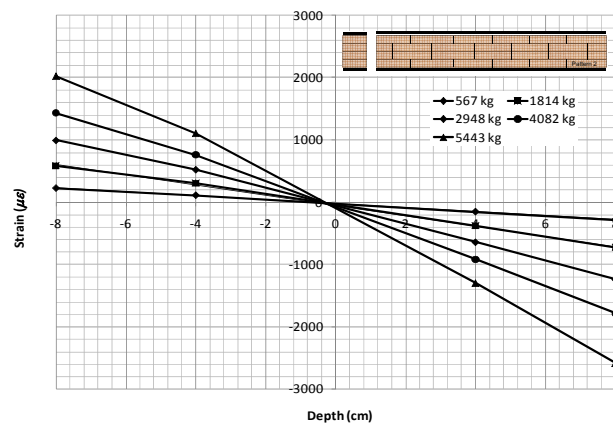
รูปที่ 13 รอยแตกร้าวและการพืดของคาน

ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการมีจำนวนรอยต่อในบริเวณดังกล่าวมากจะทำให้เกิดการร้าวไหลของการส่งถ่ายแรงที่ตำแหน่งของรอยต่อมากตามไปด้วยจึงมีเป็นสาเหตุให้คานไม้ประกอบชนิดรอยต่อแบบที่หนึ่ง มีกำลังต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับคานไม้ยางพาราประกอบซึ่งมีการเสริมเส้นใยในแบบต่างๆ จะเห็นได้ว่าถึงแม้กำลังของคานตัวอย่างที่แรงกระทำให้เกิดการรอยแตกร้าวและการพืดจะสูงขึ้น แต่ลักษณะการพืดยังคงเกิดขึ้นที่รอยต่อของคานเช่นเดิม ซึ่งเป็นการยืนยันว่าประสิทธิภาพของรอยต่อสำหรับคานไม้ประกอบคานแบบนี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการพืดในรูปแบบของการพืดเนื่องจากแรงดึงที่วัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลัง

จากผลของความเครียดตลอดหน้าตัดของคานไม้ยางพาราประกอบ (แสดงอยู่ในรูป 14) พบว่าค่าความเครียดที่ผิวนอกสุดของคานภายใต้แรงกำลังสูงสุดที่กึ่งกลางช่วงความยาวคาน มีค่าอยู่ระหว่าง 2000 ถึง 3000 $\mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดที่พิบัติของวัสดุ (โพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว และไม้ยางพารา) ซึ่งเป็นการใช้กำลังของวัสดุยังไม่เต็มประสิทธิภาพและเป็นการแสดงรูปแบบการพิบัติของคานไม้ประกอบยางพาราในการวิจัยนี้ว่ามีผลจากรอยต่อเชื่อมเป็นหลัก



ความเครียดตลอดหน้าตัด คาน Pb2B



ความเครียดตลอดหน้าตัด คาน Pb2BT

รูปที่ 14 ความเครียดของคานไม้ยางพาราประกอบ

ซึ่งในขณะนี้การวิจัยและทดสอบคานไม้ประกอบเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการพิบัติให้เป็นการพิบัติเนื่องจากแรงดึงและแรงอัด รวมทั้งพฤติกรรมของคานภายใต้แรงเฉือนกำลังอยู่

ในระหว่างดำเนินการซึ่งจะถูกนำเสนอเพื่อให้มีความสมบูรณ์ครบถ้วนสำหรับชุดการวิจัยนี้ต่อไป

8. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีของโครงการวิจัยนี้ นำไปสู่ข้อสรุปดังมีรายละเอียดต่อไปนี้ รูปแบบการประกอบคานไม้ยางพาราพบว่ารูปแบบที่สอง มีความเหมาะสมมากกว่าสืบเนื่องมาจากผลของการร้าวไหลของการส่งผ่านแรงเกิดขึ้นน้อยกว่า สำหรับการใช้วัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วทำให้คานไม้ยางพาราประกอบมีกำลังและคุณสมบัติเชิงกลเพิ่มสูงขึ้นอย่างไรก็ตามการใช้วัสดุโพลิเมอร์ดังกล่าวยังใช้ได้ไม่เต็มประสิทธิภาพมากเพียงพอ ซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงโดยเฉพาะที่ตำแหน่งของรอยต่อเพื่อทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบการพิบัติให้เป็นเกิดการพิบัติแบบการดึงที่วัสดุเสริมกำลังซึ่งจะเป็นการใช้งานวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ

9. บรรณานุกรม

ผลการทดสอบของคานไม้ยางพาราประกอบเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้การดัดแบบ 3 จุด แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบแบบดัด 3 จุด

คาน	δ_{m3} (mm)	Slope (kg/m) *
Pb1B	10.90	5.65
Pb2B	10.12	5.69
Pb1BT	9.06	4.72
Pb2BT	9.23	4.80

δ_{m3} คือการโก่งตัวที่กึ่งกลางของคานภายใต้การทดสอบการดัดสามจุด และ Slope (kg/mm) * พิจารณาในช่วงเส้นตรงจากแรงกระทำเริ่มต้นถึง 1800 kg

สำหรับตัวประกอบลดกำลังของค่าความแข็งแรงต่อการตัด จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 2 (ค่า EI และ (KGA) ของคานไม้แต่ละรูปแบบ โดยทำการแทนค่า EI และ (KGA) ลงในสมการตัวประกอบลดกำลังการตัดดังแสดงในสมการที่ (5) ซึ่งความลึกของคาน (d) ในการทดสอบคงที่ และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาว (L) ต่างๆ ในสมการที่ (5) จะทำให้ได้ค่าตัวประกอบลดกำลังของแต่ละอัตราส่วนของความยาวต่อความลึกดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12

10. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณกลุ่มวิจัย Structural Engineering and Mechanics และกลุ่มวิจัย Sustainable Waste Management ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สำหรับการให้การสนับสนุนในด้านเงินทุนและคำแนะนำโดยตลอด โครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lantos, G., "The Flexural Behavior of Steel Reinforced Laminated Timber Beams", Wood Science, Vol.2 No.3, 1970, pp. 136-143.
- [2] Curtis, J.O., "Steel Reinforced Wooden Beams", Transactions of the American Society of Agricultural Engineering, 1972, pp. 552-555.
- [3] Krueger, G.P., and Sandberg, L.B., "Ultimate Strength Design of Reinforced Timber", Wood Science, Vol.6, No.4, 1974, pp. 330-344.
- [4] Spaun, F.D., "Reinforcement of Wood with Fiberglass", Forest Products Journal, Vol.13, No.6, 1981, pp. 26-33.
- [5] Leichti, R.J., Gilham, P.C., and Tingley, D.A., "The Taylor Lake Bridge: A Reinforced-Glulam Structure", Wood Design Focus, Summer, 1993.
- [6] Sonti, S.S., and GangaRao, H.V.S., "Banding Timber Crossties Using Composite Fabrics for Improving Their

Performanc", Materials for the New Technology, Washington, D.C., 1995, pp. 1449-1457.

[7] Zwerneman, F.J., Anderson, S., and Huhnke, R.L., Performance of Glued Laminated Timber Panels for Bridge-Deck Replacement, Journal of Performance Construction Facilities, Vol.9, No.3, 1995, pp. 231-241.

[8] GangaRao, H.V.S., "Sawn and Laminated Wood Beams Wrapped with Fiber Reinforced Plastic Composites", Wood Des. Focus, 1997, pp. 13-18.

[9] Lindyberg, R., "A Nonlinear Stochastic Analysis of Reinforcement Glulam Beams in Bending", Doctoral Thesis, University of Maine, Orono, ME, 2000.

[10] Anido., R.L., and Xu, H., "Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer - Glulam Panels for Bridge Decks", Journal of Composites for Construction, Vol6, No.3, Aug. 2002, pp. 194-203.

[11] Gupta, R., and Siller, T.S., "Stress Distribution in Structural Composite Lumber under Torsion", Forest Products Journal, Vol.55, No.2, 2005, pp. 51-56.