การทดสอบโมเมนต์ดัดเพื่อหาสมบัติทางกลของไม้อัดสำหรับโครงสร้างแซนด์วิชผสมระหว่างไม้อัดกับกระดาษรังผึ้ง

Bending Test for Mechanical Behavior Investigation of Plywood for Sandwich Structure Composed of Plywood and Honeycomb Core

ฉัตรินทร์ สุนสิน, ธรรมกร ศศะนาวิน และ พัชราภรณ์ บุณยวานิชกุล*

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
50 ถนนงามวงศ์วาน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
*phacharaporn.b@ku.ac.th, 027970999 ต่อ 1717, 025798570

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้การทดสอบโมเมนต์ดัดคำนวณหาสมบัติทางกลของไม้อัดทั้งประเภทที่แผ่นนอกเรียงตัวในแนวยาวและแนวขวางกับช่วงการรองรับ โดยใช้แผ่นไม้อัดตามท้องตลาดที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร มาสร้างชิ้นทดสอบที่มีขนาดตามมาตรฐานมาทดสอบโมเมนต์ดัดเพื่อคำนวณหามอดูลัสความยืดหยุ่น และมอดูลัสเฉือนตามทฤษฎี จากนั้นสร้างชิ้นทดสอบโครงสร้างแซนด์วิชที่ใช้ไม้อัดประเภทเดียวกันเป็นแผ่นประกบและแกนกลางใช้กระดาษรังผึ้งที่มีขนาดของเซลล์ในแต่ละช่องของรังผึ้งแตกต่างกัน ได้แก่ 8 และ 12 มิลลิเมตร มาทำการทดสอบโมเมนต์ดัดเพื่อเปรียบเทียบน้ำหนัก ความแข็งเกร็ง ความแข็งแรง และงานที่ใช้ในการกระทำให้โครงสร้างแซนด์วิชมีการเสียรูปถาวร ซึ่งผลดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในงานโครงสร้างต่างๆ ได้ต่อไป
คำหลัก: โครงสร้างแซนด์วิชแกนรังผึ้ง การทดสอบไม้อัด การทดสอบภาระกรรมดัด

Abstract

This research focuses on using of bending test to calculate mechanical behaviors of plywood. The plywood samples were fabricated both face grain parallel and perpendicular to span direction based on 3-mm thick of plywood panel. The specimens were tested under bending test to calculate Modulus of Elasticity and Shear Modulus from related theory. Sandwich structure samples were fabricated by the 3-mm plywood sheet as skin attached to honeycomb paper sheet as core. Two cell sizes of core were studied: 8 and 12 mm. The testing results, such as, weight, stiffness, strength, and work to proportional limit were investigated. These results can be use in structural application.
Keywords: Honeycomb sandwich structure, Plywood testing, Bending test.

1. บทนำ

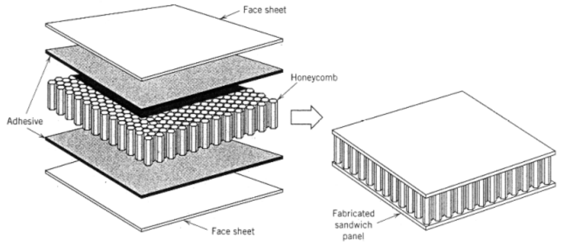
ไม้อัดเป็นทางเลือกที่น่าสนใจประเภทหนึ่งสำหรับใช้ในงานโครงสร้าง สามารถหาซื้อได้ง่าย และราคาไม่แพง ในประเทศไทยมีไม้อัดหลายชนิดให้เลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม เช่น ไม้อัดเคลือบฟิล์มดำ ไม้อัดยาง ไม้อัดเฟอร์นิเจอร์ ปาร์ติเคิลบอร์ด และไม้อัด OSB เป็นต้น ไม้อัดแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความทนทานและ

ส่วนประกอบที่ใช้สร้างไม้อัดประเภทนั้นๆ ยกตัวอย่าง เช่น ไม้อัดเคลือบฟิล์มดำ มีคุณสมบัติที่สามารถรับน้ำหนักได้ดี ทนแดดทนฝนกันน้ำได้เป็นอย่างดี น้ำหนักเบา สามารถเก็บได้ง่ายและนำมาใช้ซ้ำได้หลายครั้งทำให้มีราคาแพง แต่มีความเหมาะสมในงานก่อสร้างต่างๆ ตัวอย่างของไม้อัดอีกประเภทหนึ่งที่พบเห็นได้ทั่วๆ ไปที่ใช้สำหรับงานเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ คือ ปาร์ติเคิลบอร์ดที่สร้างขึ้นจากเศษชิ้นไม้หรือขี้เลื่อยมาอัดเป็นแผ่นโดยใช้ความร้อน ผิวหน้าสามารถใช้วีเนียร์มาติดเพื่อให้มีความสวยงามเหมาะสำหรับใช้ในอาคาร เพราะมีข้อเสียที่ไม่สามารถทนความชื้นได้

สำหรับไม้อัดที่งานวิจัยชิ้นนี้สนใจเป็นไม้อัดทั่วๆ ไปประเภทไม้อัดยางที่ขึ้นรูปด้วยการใช้ไม้แผ่นบางหลายแผ่นมาประกอบกันด้วยกาวโดยจัดให้มีแนวเสี้ยนขวางตั้งฉากกันสำหรับความแข็งแรง และลดการยืดหดตัวในระนาบที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานกับอากาศยานไร้คนของภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศในส่วนของการติดตั้งวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต้องการบรรทุกขึ้นไปกับเครื่องในภารกิจที่ใช้งานเพราะสามารถเจาะรูได้โดยไม่สร้างความเสียหายมากมายกับโครงสร้าง การใช้งานกับอากาศยานมีความต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาจึงได้เลือกไม้อัดที่มีความหนาน้อยที่สุด นั่นคือ 3 มิลลิเมตร เนื่องจากขนาดของไม้อัดที่มีตามท้องตลาดโดยทั่วไป คือ กว้าง 4 ฟุต ยาว 8 ฟุต ส่วนความหนามีแตกต่างกันไป ได้แก่ 3 4 6 10 15 และ 20 มิลลิเมตรและเพื่อให้มีความแข็งแรงโดยไม่เพิ่มน้ำหนักมากผู้วิจัยจึงนำไม้อัดที่ประกบกับโครงสร้างรังผึ้งที่ทำจากกระดาษเรียกว่า โครงสร้างแซนด์วิชเช่นเดียวกับคานพื้นของเครื่องบินโดยสารทั่วๆ ไป

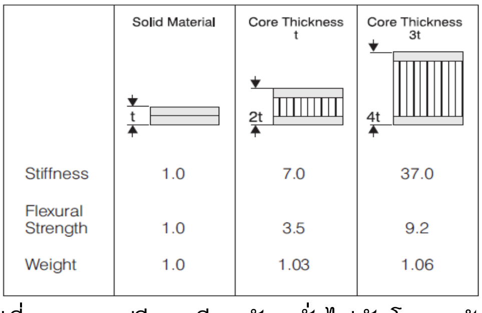
2. เอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

โครงสร้างแซนด์วิชเป็นโครงสร้างที่ประกอบขึ้นด้วยแผ่นบาง 2 แผ่นที่มีความแข็งแรงประกบบนล่างกับไส้ (core) ที่ทำจากวัสดุที่มีน้ำหนักเบาโดยเชื่อมต่อกันด้วยแผ่นกาว (adhesive) ที่สามารถเซตตัวได้เมื่อได้รับอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือใช้ตัวประสานก่อนเซตตัวในสภาพของเหลวที่ผสมพร้อมการขึ้นรูปสำหรับวัสดุคอมโพสิททาที่พื้นผิวด้านบนและล่างของไส้ทำให้สามารถติดกับแผ่นประกบ (face sheet) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างประเภทนี้เป็นการนำเอาข้อดีเช่นเดียวกับโครงสร้างคานรูปตัวไอมาใช้เนื่องจากแผ่นประกบทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงที่ตำแหน่งที่ห่างจากแกนกลางของโครงสร้างมากที่สุดโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อยและไม่ทำให้น้ำหนักเพิ่มมาก เนื่องจากไส้เป็นวัสดุที่ทำจากวัสดุน้ำหนักเบาทำหน้าที่สำหรับประคองให้แผ่นประกบถ่ายทอดแรงอย่างต่อเนื่องทั้งโครงสร้าง



รูปที่ 1 โครงสร้างแซนด์วิช [1]

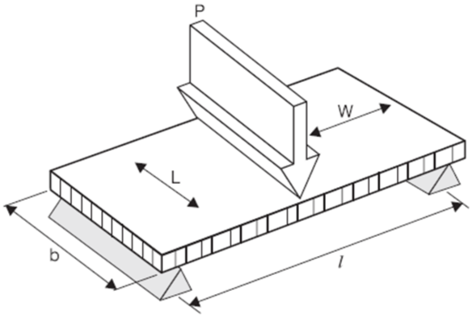
รูปที่ 2 แสดงวัสดุทั่วๆ ไปที่มีความหนา t เปรียบเทียบกับโครงสร้างแซนด์วิชที่มีความหนา 2t และ 3t ที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียง 3 และ 6 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความต้านทานโมเมนต์ดัด (stiffness) เพิ่มขึ้นถึง 7 และ 37 เท่า เมื่อพิจารณาความแข็งแรงสูงสุดต่อโมเมนต์ดัด (flexural strength) ของโครงสร้างที่มีความหนาของไส้ 3t พบว่าเพิ่มขึ้นจากวัสดุทั่วๆ ไปถึง 9.2 เท่า และในกรณีที่ความหนาของไส้เป็น 2 เท่ามีความแข็งแรงเป็น 3.5 ด้วยเหตุผลนี้งานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาเพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้งานสำหรับโครงสร้างที่มีความต้องการความแข็งแรงในขณะที่น้ำหนักเบา



รูปที่ 2 ภาพเปรียบเทียบวัสดุทั่วไปกับโครงสร้างแซนด์วิชที่ใช้ความหนาของไส้ 2 และ 3 เท่า [2]

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างแซนด์วิช [3]

การคำนวณหาความต้านทานโมเมนต์ดัดสำหรับโครงสร้างแซนด์วิชสามารถใช้การทดสอบโมเมนต์ดัด 3 จุดได้ดังรูปที่ 3 คานแซนด์วิชได้รับการวางบนระยะรองรับค่าหนึ่งและมีแรงกระทำที่กึ่งกลางคานสามารถคำนวณหาระยะเสียรูปในแนวดิ่ง (deflection) ได้จากสมการที่ (1)



รูปที่ 3 คานแซนด์วิชกับแรงที่กระทำที่กึ่งกลาง [2]

โดยสมการที่ (1) แสดงให้เห็นว่าการโก่งของคานมีผลจาก 2 เทอม ได้แก่ โมเมนต์และแรงเฉือนโดย

$$\delta = \frac{2Pl^3}{48E_s t_s h^2 b} + \frac{Pl}{4bhG_c} \qquad (1)$$

โดยที่ δ = การโก่งของกึ่งกลางคาน

E_s, t_s = มอดูลัสความยืดหยุ่นในระนาบและความหนาของแผ่นประกบ

h = ความหนาของคานแซนด์วิช

G_c = มอดูลัสเฉือนนอกระนาบของไส้

จะเห็นได้ว่าการคำนวณหาการโก่งของคานนั้นต้องการสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นประกบและไส้ ในทำนองเดียวกันหากทำการทดสอบโมเมนต์ดัดจะสามารถคำนวณหามอดูลัสเฉือนของไส้โครงสร้างแซนด์วิชได้ ทำให้การทดสอบโมเมนต์ดัดมีความจำเป็นในการดำเนินการเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

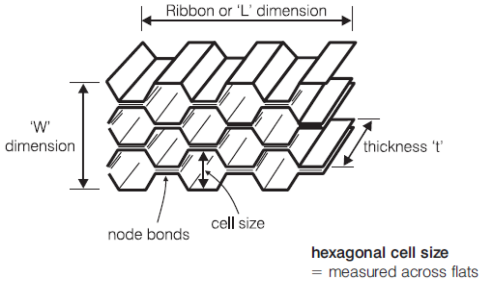
2.2 การทดสอบโมเมนต์ดัดของไม้อัด [4]

การเตรียมชิ้นงานไม้อัดยางที่ใช้ในการทดสอบได้รับการตัดเพื่อใช้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3043 – 00 โดยเลือกในบริเวณที่ห่างจากขอบเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของขอบด้วยขนาดที่มีความยาว 350 มิลลิเมตร และความกว้าง 25.4 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบได้รับการตัดให้มีแผ่นนอกเรียงตัวในแนวยาวและแนวขวางเพื่อเปรียบเทียบการโก่งของชิ้นทดสอบที่มีการเรียงตัวแตกต่างกันและศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้น ระยะรองรับที่ทำการทดสอบได้รับการกำหนดให้มากกว่า 48 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบสำหรับชิ้นทดสอบที่มีแผ่นนอกเรียงตัวในแนวยาว ในแนวขวางระยะรองรับได้รับการกำหนดให้ไม่น้อยกว่า 24 เท่าของความหนาของชิ้นทดสอบ การกำหนดชิ้นทดสอบที่มีแนวยาวเป็นแผ่นนอก เรียก L สำหรับชิ้นทดสอบที่มีแนวขวางเป็นแผ่นนอก เรียก T มีเลขที่เป็นระยะรองรับเป็น 300 มิลลิเมตรเป็นเลขที่ตามตัวอักษร ดังนั้น ชิ้นทดสอบมี 2 ประเภท คือ L300 และ T300 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบน้ำหนักได้กับโครงสร้างแซนด์วิชและความสะดวกในการขึ้นรูป ชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นได้ถูกสร้างขึ้นจากไม้อัดที่เรียงตัวในแนวเดียวกัน 2 ชั้น

มอดูลัสความยืดหยุ่นของไม้อัดได้รับการคำนวณจากผลการทดสอบที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งของแผ่นไม้อัดที่เป็นชิ้นทดสอบโดยทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ของ Testometric รุ่น MICRO 500 ที่สามารถใส่แรงสูงสุดได้ 50 กิโลนิวตัน และกำหนดให้หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตร/นาที

2.3 การทดสอบโมเมนต์ดัดของคานแซนด์วิช

คานแซนด์วิชได้รับการสร้างขึ้นจากแผ่นประกบที่มีความหนา 3 มิลลิเมตรกับไส้รังผึ้งหนา 10 มิลลิเมตร ที่มีขนาดของเซลล์ (cell size) แตกต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ 8 และ 12 มิลลิเมตร ขนาดของเซลล์วัดได้จากขอบของหกเหลี่ยมที่ขึ้นรูปเป็นแกนรังผึ้งของไส้ที่นำมาใช้สำหรับโครงสร้างแซนด์วิช



รูปที่ 4 ขนาดของเซลล์วัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ทับกับขนาดของหกเหลี่ยม [2]

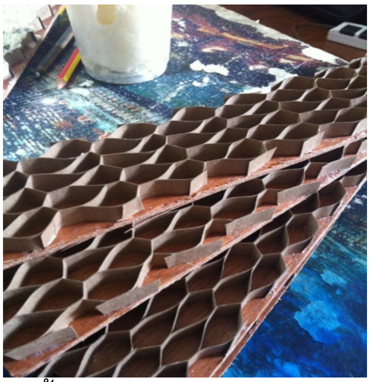
การเรียกชื่อของชิ้นทดสอบที่มีขนาดของเซลล์แตกต่างกันใช้ 4SLOT สำหรับ 8 มิลลิเมตรและ 3SLOT สำหรับ 12 มิลลิเมตรเนื่องจากการจัดรูปทรงของเซลล์ในด้านกว้างที่มีค่า 25.4 มิลลิเมตรสามารถทำได้จำนวนตามตัวเลขที่แสดงหน้าสัญลักษณ์ดังกล่าว

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานประกอบด้วยการเตรียมวัสดุพื้นฐานของคานแซนด์วิชที่ต้องการศึกษาทั้งสองชนิด ได้แก่

1) แผ่นประกบไม้อัดที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร ตัดตามขนาดที่ต้องการ คือ กว้าง 25.4 มิลลิเมตรและยาว 350 มิลลิเมตร โดยเลือกตัดในแนวที่แผ่นผิวด้านนอกของไม้อัดเรียงตัวในแนวยาวและเลือกตัดโดยห่างจากขอบของไม้อัดเพื่อลดปัญหาของการแยกชั้นริมแผ่นซึ่งเป็นสาเหตุของความเสียหายได้
2) ไส้กระดาษคราฟท์รูปแบบรังผึ้งที่มีขนาดของเซลล์ 2 ขนาด นั่นคือ 8 และ 12 มิลลิเมตร โดยตัดให้มีขนาดเท่ากับแผ่นประกบที่เตรียมไว้โดยเลือกตัวให้ด้านกว้างครอบคลุม 4 เซลล์สำหรับไส้ 8 มิลลิเมตร และ 3 เซลล์สำหรับไส้ 12 มิลลิเมตร

จากนั้นนำวัสดุพื้นฐานที่ประกอบกันเป็นคานแซนด์วิชโดยใช้แผ่นประกบ 2 แผ่น และไส้กระดาษคราฟท์ 1 ชิ้นติดกันโดยใช้กาวลาเท็กซ์ทาแผ่นประกบด้านที่ติดกับไส้ทีละแผ่นและใช้น้ำหนักกดทับเป็นเวลา 8 ชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้งสนิทและแผ่นประกบทั้งสองแนบไปกับไส้ตลอดทั้งชิ้น

รูปที่ 5 แสดงชิ้นทดสอบติดตั้งไส้รังผึ้งกับแผ่นประกบด้านล่างเรียบร้อยแล้วรอกาวแห้งเพื่อติดแผ่นประกบด้านบน เมื่อทำการปิดแผ่นประกบบนเรียบร้อยแล้วจึงทำการทดสอบโมเมนต์ดัดของโครงสร้างแซนด์วิช มอดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบโมเมนต์ดัดของไม้อัดได้ถูกนำมาคำนวณตามสมการที่ (1) ด้วยเครื่องทดสอบที่หัวกดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.5 มิลลิเมตร/นาที เพื่อบันทึกผลเป็นกราฟระหว่างแรงและการโก่งของคานแซนด์วิชที่สามารถนำมาคำนวณหามอดูลัสเฉือนของไส้จากสมการที่ (1) ความแข็งเกร็งโดยสังเกตจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่ง ความแข็งแรงแสดงโดยแรงสูงสุดที่คานแซนด์วิชสามารถรับได้ และงานที่ใช้ในการกระทำให้โครงสร้างแซนด์วิชมีการเสียรูปถาวรโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟในช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงและการโก่ง ดังที่จะแสดงในผลการวิจัยในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5 ไส้รังผึ้งก่อนติดแผ่นประกบบนของโครงสร้างแซนด์วิชที่มีขนาดเซลล์ 8 มิลลิเมตร (4SLOT)

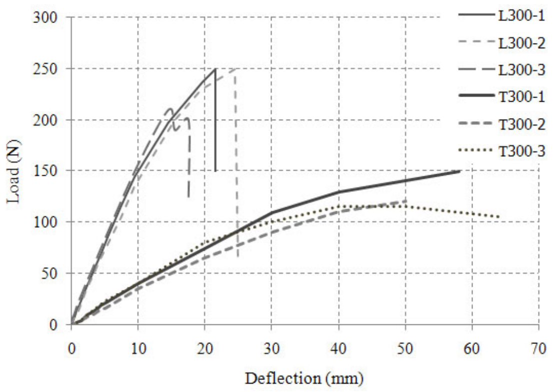
3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบโมเมนต์ดัดของไม้อัด

กราฟระหว่างแรงและการโก่งของชิ้นทดสอบที่เรียง 2 ชั้นแสดงในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าชิ้นทดสอบที่สร้างขึ้นโดยผิวนอกเรียงตัวในแนวขวางของระยะรองรับนั้นมีความยืดหยุ่นสูง ดังจะเห็นได้จากการโก่งที่สามารถแอ่นได้จนชิดกับฐานล่างของระยะรองรับดังแสดงในรูปที่ 6 ขวา โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโก่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกจนกระทั่งแรงกดประมาณ 100 นิวตัน จึงเริ่มสังเกตเห็นความโค้งของเส้นกราฟทั้ง 3 ชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบ L300 ที่ผิวนอกเรียงตัวในแนวเดียวกันกับระยะรองรับมีความแข็งเกร็งต่อต้านแรงดัดมากกว่าโดยวิเคราะห์จากความชันของกราฟเปรียบเทียบกันพบว่า ความชันของกราฟ L300 มีค่าประมาณ 3 เท่าของ T300 และลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งที่แปรผันตามกันจนกระทั่งผิวล่างที่โก่งประมาณ 15 – 25 มิลลิเมตรแอ่นจนกระทั่งเส้นใยของผิวล่าง

ของแผ่นประกบขาดแรงจึงตกอย่างฉับพลันโดยจะเห็นได้จากการลดลงของกราฟ และภาพความเสียหายที่แรงสูงสุดของชิ้นทดสอบ L300 ได้แสดงในรูปที่ 6 ซ้าย สำหรับชิ้นทดสอบ T300 สังเกตได้ว่าไม่มีการขาดของเส้นใยอย่างฉับพลัน มีเพียงแต่การแยกกันของเส้นใยแต่ละเส้นในผิวล่างเนื่องจากเรียงตัวในแนวขวางทำให้สามารถแอ่นได้โดยไม่มีที่สิ้นสุด แต่การทดสอบหยุดลงในขณะที่การโก่งเป็น 60 มิลลิเมตร เนื่องจากระยะในการโก่งไม่สามารถเพิ่มได้อีกต่อไป

รูปที่ 6 การโก่งของไม้อัด 2 ชั้น ของชิ้นทดสอบที่เรียงผิวนอกด้วย (ซ้าย) แนวยาว และ (ขวา) แนวขวาง

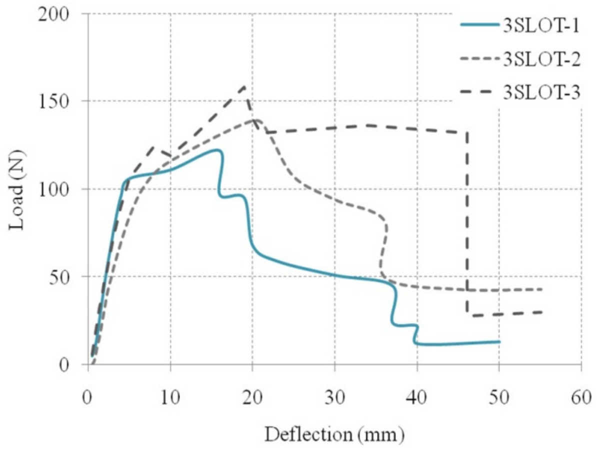


รูปที่ 7 กราฟแรงและการโก่งของการทดสอบโมเมนต์ดัดของชิ้นทดสอบ L300 และ T300

ค่ามอดูลัสความยืดหยุ่นที่ได้จากการทดสอบโมเมนต์ดัดของแผ่นไม้อัดที่ผิวนอกเรียงตามระยะรองรับมีค่าประมาณ 5.77 - 6.29 กิกะปาสคาล ส่วนชิ้นทดสอบแนวขวางได้ค่า 1.3 - 1.88 กิกะปาสคาล ซึ่งชิ้นทดสอบ L300 มีความแข็งเกร็งสูงกว่าประมาณ 5 เท่า และค่าที่ได้สามารถนำไปเปรียบเทียบกับ [5] ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าที่ไม่แน่นอนของมอดูลัสความยืดหยุ่นของไม้ประเภทที่ใช้ทำไม้อัดตามมาตรฐานในสหรัฐอเมริกาที่มีค่าประมาณ 6.96 - 8.55 กิกะปาสคาล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไม้อัดในประเทศไทยมีสมบัติทางกลที่ต่ำกว่าเล็กน้อย โดยเป็นไปได้ที่สาเหตุมาจากความร้อนชื้นในประเทศไทยทำให้คุณสมบัติของไม้ต่ำกว่าประเทศที่มีสภาพอากาศแห้ง อีกประการหนึ่งการแยกประเภทของไม้ตามที่แสดงใน [5] อาจจะมีความจำเป็นสำหรับประเภทต่างๆ ของไม้ที่สามารถหาได้ในประเทศไทยเพื่อให้มีมาตรฐานของการเก็บรักษา การทดสอบ การซ่อมแซมเพื่อใช้ในงานที่ต้องการการออกแบบต่อไป [6]

3.2 ผลการทดสอบโมเมนต์ดัดของคานแซนด์วิช

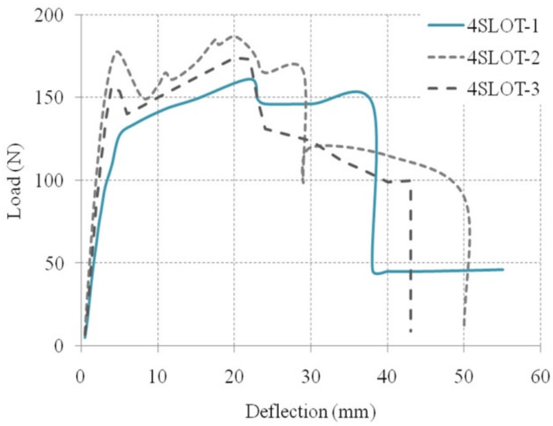
การทดสอบโมเมนต์ดัดของคานแซนด์วิชที่สร้างขึ้นด้วยไส้ที่มีขนาดของเซลล์แตกต่างกันให้ผลดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 จะเห็นได้ว่า มีลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างค่าทั้งสองคล้ายคลึงกันตั้งแต่ช่วงที่แปรผันตรงโดยที่คานแซนด์วิชประเภท 4SLOT มีค่าความชันสูงกว่าประมาณ 2 เท่า จากนั้นการโก่งเพิ่มขึ้นอย่างง่ายดายโดยที่ไม่ต้องออกแรงเพิ่มซึ่งเกิดความเสียหายเนื่องจากไส้และผิวประกบล่างเริ่มเกิดการแยกตัวเริ่มจากด้านปลายและการแยกตัวเริ่มเข้าสู่กลางคานจึงเกิดการลดลงของแรงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดความเสียหายอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 8 กราฟแรงและการโก่งของการทดสอบโมเมนต์ดัดของชิ้นทดสอบ 3SLOT

ช่วงที่เริ่มเกิดการสูญเสียความสัมพันธ์เส้นตรงระหว่างค่าทั้งสองของชิ้นทดสอบ 3SLOT พบที่ค่าแรง

ประมาณ 100 – 125 นิวตันในขณะที่ชิ้นทดสอบ 4SLOT มีค่าประมาณ 125 – 175 นิวตัน ในทำนองเดียวกันแรงสูงสุดที่สามารถรับได้ของ 4SLOT สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบแบบ 3SLOT โดยจะเห็นได้จากกราฟว่ามีค่าประมาณ 125 นิวตัน เปรียบเทียบกับ 150 นิวตัน นั่นแสดงให้เห็นว่า ขนาดของเซลล์ และจำนวนของเซลล์ที่มากกว่ามีผลให้มีความต้านทานแรงดัดและความแข็งแรงที่ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 9 กราฟแรงและการโก่งของการทดสอบโมเมนต์ดัดของชิ้นทดสอบ 4SLOT

4. สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิเคราะห์ที่ได้รับจากการทดสอบโมเมนต์ดัดของชิ้นทดสอบทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 1 พบว่าน้ำหนักของโครงสร้างแซนด์วิชเพิ่มขึ้นค่อนข้างสูงประมาณ 1 ใน 3 ของไม้อัด ค่าของมอดูลัสเฉือนสามารถคำนวณได้เป็น 3.7 เมกะปาสคาลสำหรับชิ้นทดสอบ 3SLOT และ 8.6 เมกะปาสคาลสำหรับชิ้นทดสอบ 4SLOT นั่นคือ ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของไส้แซนด์วิชรูปแบบรังผึ้งที่มีขนาดของเซลล์เล็กกว่าเป็น 2 ใน 3 เท่า (จาก 12 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับ 8 มิลลิเมตร) จะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ความแข็งเกร็งเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่าในกรณีที่ใช้ไส้ที่มีขนาดของเซลล์เล็กกว่า สำหรับค่าความแข็งแรงและงานที่ใช้ในการกระทำให้โครงสร้างแซนด์วิชมีการเสียรูปถาวรไม่ได้เปรียบสำหรับโครงสร้างแซนด์วิชซึ่งสาเหตุหลักมาจากการแยกชั้นระหว่างผิวประกบที่รอยแยกมีการพัฒนาไปสู่กึ่งกลางคานทำให้ชิ้นทดสอบสูญเสียความสามารถรับแรงต่อไป และเกิดการลดลงอย่างรวดเร็วของแรงที่มากระทำต่อคาน

ตารางที่ 1 สรุปเปรียบเทียบน้ำหนัก ความแข็งเกร็ง ความแข็งแรง และงานที่ใช้ภายใต้ช่วงยืดหยุ่นของชิ้นงานทั้ง 4 ประเภท

ชิ้นงาน	น้ำหนัก (กรัม)	ความแข็งเกร็ง	ความแข็งแรง (นิวตัน)	งาน (mJ)
L300	1	1	200-250	1,500
T300	1	-	105-150	1,250
3SLOT	1.37	1.77	122-158	210-265
4SLOT	1.37	3.17	161-187	155-314

5. ข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนของงานวิจัยนี้ คือกระบวนการผลิตที่ไม่สามารถทำให้ส่วนประกอบพื้นฐานของชิ้นทดสอบเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ซึ่งสังเกตพบในระหว่างการทดสอบโมเมนต์ดัดที่คานแซนด์วิชมีปัญหาการแยกชิ้นจากส่วนปลาย และพบได้จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นทดสอบคานแซนด์วิชที่ทำให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างแรงและการโก่งสิ้นสุดตั้งแต่แรงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไม้อัด ผู้วิจัยจึงมีข้อเสนอสำหรับงานที่ควรทำต่อไปสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อให้ผลการวิจัยสามารถนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นควรมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตในส่วนของการติดตั้งแผ่นประกบและไส้โดยเปลี่ยนชนิดของกาวที่มีคุณภาพในการยึดเกาะที่ดีขึ้น รวมถึงขั้นตอนในการติดตั้งที่ควรผลิตภายใต้ความดันที่สูงขึ้นเพื่อให้ชิ้นทดสอบมีคุณภาพและสอดคล้องกับการใช้งานของคานรูปตัวไอที่สามารถรับแรงดัดได้สูงเนื่องจากการเพิ่มค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากการแยกแผ่นประกบออกจากกัน นอกจากนั้นการสร้างชิ้นทดสอบที่มีประสิทธิภาพสามารถชะลอความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการแยกชั้นของแผ่นประกบและ

ไส้สามารถเพิ่มความแข็งแรงและค่างานที่ใช้ในการกระทำให้โครงสร้างแซนด์วิชมีการเสียรูปถาวรได้ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของคานแซนด์วิชที่สร้างขึ้นจากแผ่นไม้อัดและกระดาษคราฟท์รูปแบบรังผึ้งมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบาได้ โดยเฉพาะการใช้ไส้ที่มีขนาดของเซลล์เล็กลงจะช่วยสร้างสมดุลให้แผ่นประกบและสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้คานแซนด์วิชได้ดียิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Callister, W.D., Jr. (2003). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 6th Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.

[2] Hexcel composites (2007). Fibrelam®: Panels for aircraft flooring. Product Data

[3] Zenkert D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction.* EMAS/Engineering Materials Advisory Services Ltd.

[4] ASTM D 3043 -00 (2002). *Standard Test Methods for Structural Panel in Flexure*. PA 19428-2959, USA.

[5] Cai Z. and Ross R.J. (2010). *Wood Handbook, Chapter 12: Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials.* General Technical Report FPL-GTR-190, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

[6] APA The Engineered Wood Association (1997). *Plywood Design Specification*. Washington.