บทความวิจัย

สมบัติของวัสดุแซนด์วิชจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพาราที่มีแกนกลางจากพลาสติกต่างชนิด

จันทโรทัย พรหมจันทร์ และ ธเนศ รัตนวิไล*
สาขาวิชาวิศกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา
ชาตรี หอมเขียว
สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7428 7151 อีเมล: thanate.r@psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.009
รับเมื่อ 16 กรกฎาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 10 กันยายน 2563 ตอบรับเมื่อ 30 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 15 พฤศจิกายน 2564
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกมาใช้งานอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ทำให้เกิดขยะในปริมาณมากและไม่สามารถย่อยสลายด้วยตัวเองได้ ก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตจากการกำจัดขยะพลาสติกที่ไม่ถูกวิธี ดังนั้นหากมีการนำพลาสติกชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้จะช่วยลดปัญหา และเพิ่มมูลค่าของพลาสติกใช้แล้วไม่ว่าจะเป็นพอลิเอทีลีนรีไซเคิล พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซึ่งเป็นชนิดของพลาสติกที่พบว่า เป็นขยะมูลฝอยที่มีปริมาณมาก เพื่อนำมาเป็นแกนกลางในการประกอบเป็นวัสดุแซนด์วิชจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ วัสดุแซนด์วิชประกอบด้วยแผ่นประกบ 2 ชั้น ทำมาจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพารา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกล และทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ได้แก่ สมบัติแรงดัด สมบัติการกระแทก ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวบริเวณผิว และขอบของชิ้นงานและสมบัติการดูดซับน้ำ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และผงไม้ยางพาราแบบชั้นเดียว โดยมีวิธีการศึกษา 3 ขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ 1) การผลิตแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ 2) การผลิตแผ่นแกนกลาง และ 3) การประกอบเป็นแผ่นวัสดุแซนด์วิช โดยการนำแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จำนวน 2 ชิ้น ประกบแผ่นแกนกลางแล้วอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 150–190 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบพบว่า แผ่นวัสดุแซนด์วิชมีความสามารถในการรับแรงดัด และแรงกระแทกได้ดีขึ้นถึง 63% และ 68% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว และให้ค่าดีที่สุดเมื่อแผ่นวัสดุแซนด์วิชมีแกนกลางทำมาจากพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลเมื่อเปรียบเทียบกับแกนกลางชนิดอื่นที่ใช้ในการศึกษา นอกจากนี้ยังพบว่า แผ่นวัสดุแซนด์วิชมีการดูดซับน้ำลดลงมากถึง 67% และให้ค่าความยึดเหนี่ยวตะปูเกลียวทั้งผิวหน้า และขอบชิ้นงานสอดคล้องตามมาตรฐานการทดสอบอีกด้วย

คำสำคัญ: วัสดุแซนด์วิช วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ สมบัติทางกล ผงไม้ยางพารา ความยึดเหนี่ยวตะปูเกลียว

การอ้างอิงบทความ: จันทโรทัย พรหมจันทร์, ธเนศ รัตนวิไล และ ชาตรี หอมเขียว, "สมบัติของวัสดุแซนด์วิชจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้ยางพาราที่มีแกนกลางจากพลาสติกต่างชนิด," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 700–711, ก.ค.–ก.ย. 2565.

Research Article

The Property of Sandwich-structure Rubberwood-plastic Composites with Different Plastic Core Layer

Jantarotai Promjan and Thanate Ratanawilai*
Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand
Chatree Homkhiew
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7428 7151, E–mail: thanate.r@psu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.009
Received 16 July 2020; Revised 10 September 2020; Accepted 30 September 2020; Published online: 15 November 2021
© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Nowadays, plastics are widely used in daily life, causing the large amounts of waste. This kind of waste emerges from non-biodegradable materials and thus can become hazardous to life in case of improper waste disposal. Recycling process is a solution to reduce waste problems while increasing its value. The most common plastic wastes including recycled polyethylene, recycled high-density polyethylene, and recycled polypropylene were selected to form a sandwich structure panel as a core layer, whereas the face-sheet layers were rubberwood flour/ polypropylene composites (WPCs). Therefore, the goal of this study is to improve the mechanical and physical properties of wood plastic composites, in particular flexural properties, impact properties, screw holding resistance, and water absorbing properties in comparison with the face-sheet layer of a sandwich structure panel alone. Three stages of the study were carried out: 1) making the face-sheet layer from rubberwood flour/ polypropylene composites 2) forming the core layer from different types of recycle plastics and 3) assembling the sandwich panels by using hot-press machine with the temperature ranging from 150 to 190 °C. The sandwich panels showed the improvement in both flexural and impact strength of up to 63% and 68%, respectively, as compared with the face-sheet layer of wood-plastic composites. The optimal property was found when the recycled polypropylene was used as a core layer in preference to the other materials used in this study. Moreover, water absorption of sandwich panels was considerably reduced by 67% whereas the screw holding resistance value on both surface and edge of the test sample was found to meet the criteria of the testing standards as well.

Keywords: Sandwich Structure, Wood Plastic Composites, Mechanical Properties, Rubberwood Flour, Screw Holding Resistance

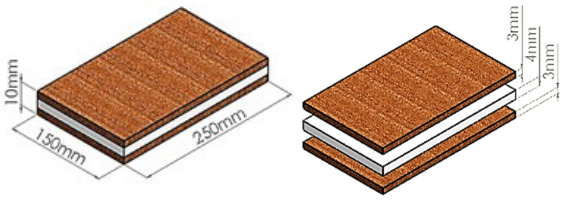
Please cite this article as: J. Promjan, T. Ratanawilai, and C. Homkhiew, "The property of sandwich-structure rubberwood-plastic composites with different plastic core layer ," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 700–711, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นวัสดุก่อสร้าง บรรจุภัณฑ์ การขนส่ง ตลอดไปจนถึงการทำเฟอร์นิเจอร์ [1] เนื่องจากสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีข้อได้เปรียบกว่าไม้จากธรรมชาติในหลายๆ ด้าน เช่น มีความแข็งแรงทนทานสูง มีความคงรูปสูง ดูดซับน้ำน้อย เกิดเชื้อราได้น้อย และต้นทุนในการบำรุงรักษาต่ำ อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ประกอบด้วยวัสดุสองชนิดที่มีสมบัติแตกต่างกัน ทำให้การยึดเกาะระหว่างกันในขณะขึ้นรูปทำได้ไม่ดีพอ ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีความสามารถในการรับแรงได้น้อย [2] จึงมีแนวทางในการแก้ปัญหาด้วยการนำเส้นใยสังเคราะห์ชนิดต่างๆ มาเป็นส่วนผสมเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว เช่น การเลือกใช้เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เส้นใยแอรามิด (Aramid Fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar Fiber) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) [3]–[5] มาเป็นส่วนผสม แต่เส้นใยสังเคราะห์เหล่านี้อาจส่งผลให้เกิดความระคายเคืองต่อผู้ใช้ อีกทั้งมีราคาสูง และอาจกัดกร่อนเครื่องจักรอันจะส่งผลให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอในระหว่างการใช้งานได้ อีกทั้งยังไม่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีกด้วย

นอกเหนือจากการปรับปรุงสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ด้วยการปรับเปลี่ยนวัสดุผสมแล้ว อีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ คือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของวัสดุจากวัสดุผสมแบบชั้นเดียวเป็นโครงสร้างแบบแซนด์วิช หรือวัสดุแซนด์วิช (Sandwich-structured) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นประกบ (Face-sheet) ด้านบนและด้านล่างมีความบางแต่แข็งแรงสูง และแกนกลาง (Core) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของวัสดุแซนด์วิช ทำมาจากวัสดุอ่อน มีจุดเด่นคือน้ำหนักน้อย มีความคงรูปและรับแรงได้ดีและสามารถเลือกใช้ตามความต้องการในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ [6], [7] ตัวอย่างเช่น วัสดุแซนด์วิชจากแผ่นประกบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเสริมแรงกับผงไม้ปาล์มแกนกลางทำจากพลาสติกพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทำให้มีความสามารถในการรับแรงดัดและแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 42% และ 77% ตามลำดับ การดูดซับน้ำลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเสริมแรงกับผงไม้ปาล์มชั้นเดียว [8] โครงสร้างแบบแซนด์วิชจากแผ่นประกบเส้นใยคาร์บอน เสริมแรงกับกาวอิพ็อกซีแกนกลางทำจากโฟมพอลิโพรพิลีนหรือแผ่นอะลูมิเนียมแบบรังผึ้ง ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้น 10% และ 20% ตามลำดับเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงประกอบเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงกับกาวอิพ็อกซีชั้นเดียว [9] อีกตัวอย่างที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายคือกระจกกันกระสุนที่เคลือบด้วยแก้วหรือวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยทั่วไปแล้วกระจกกันกระสุนจะประกอบด้วยชั้นกระจกลามิเนต เช่น โซดาไลม์ซิลิเกต บอโรซิลิเกต และกระจกแซฟไฟร์ ส่วนแกนกลางจะเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น พอลิไวนิล พอลิยูรีเทน พอลิคาร์บอเนตหรือพอลิเอสเตอร์ ซึ่งช่วยลดแรงกระแทกของกระสุนได้เป็นอย่างดี [10]–[12] ผลจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จะเห็นได้ว่าวัสดุแกนกลางจากพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสามารถประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติวัสดุแซนด์วิชได้ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้พลาสติกที่สามารถนำมาใช้ซ้ำมาประกอบเป็นวัสดุแซนด์วิชยังมีจำนวนจำกัด จึงถูกเลือกให้มาเป็นวัสดุแกนกลางในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบวัสดุแซนด์วิชในงานวิจัยนี้

ผลจากความนิยมในการใช้พลาสติกกันอย่างแพร่หลาย ทำให้เกิดขยะในปริมาณมาก และไม่สามารถย่อยสลายด้วยตัวเองได้เนื่องจากเป็นสารสังเคราะห์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อชีวิตจากการกำจัดขยะพลาสติกที่ไม่ถูกวิธี ดังนั้นหากมีการนำพลาสติกชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้ซ้ำได้ไม่ว่าจะเป็นพอลิเอทีลีนรีไซเคิล พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซึ่งเป็นชนิดของพลาสติกที่พบว่า เป็นขยะมูลฝอยที่มีปริมาณมาก [13] มาเป็นแกนกลางและจัดทำแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล และผงไม้ยางพาราเพื่อประกอบเป็นวัสดุแซนด์วิชจึงเป็นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ โดยมุ่งเน้นในการปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ได้แก่ สมบัติการต้านแรงดัด การต้านแรงกระแทก ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวบริเวณผิวและ



รูปที่ 1 วัสดุแซนด์วิช 3 ชั้น โดยมีแผ่นประกบด้านบนและล่างจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ แกนกลางจากพลาสติก

ขอบของชิ้นงาน และสมบัติการดูดซับน้ำ เพื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลและผงไม้ยางพาราแบบชั้นเดียว สำหรับช่วยในการตัดสินใจในการนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดการใช้ไม้จากธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการนำพลาสติกที่ใช้แล้วมาใช้ซ้ำเพื่อให้เกิดวัสดุทางเลือกในทางวิศวกรรมได้เพิ่มมากขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

ผงไม้ยางพาราที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เป็นวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการตัด และการเลื่อยไม้ของโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา และเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลสำหรับผสมเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ และใช้สารคู่ควบเพื่อช่วยในการยึดเกาะระหว่างผงไม้ยางพาราและพลาสติก คือ สารคู่ควบ สารเติมแต่ง คือ สารต้านทานรังสียูวี และสารหล่อลื่น เพื่อช่วยในกระบวนการขึ้นรูป ส่วนแกนกลางขึ้นรูปจากพอลิเอทีลีนรีไซเคิล (Recycled polyethylene; rPE) พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (Recycled high-density polyethylene; rHDPE) และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (Recycled polypropylene; rPP)

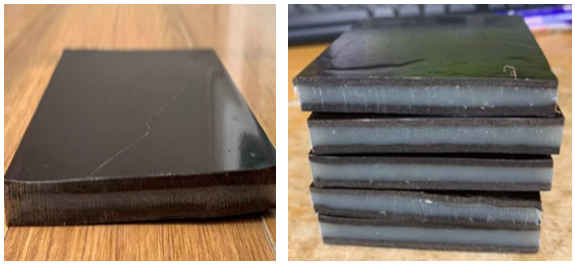
2.2 การผลิตชิ้นงานทดสอบของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (WPCs) และวัสดุแซนด์วิช

การผลิตชิ้นงานทดสอบประกอบด้วย 3 ขั้นตอนสำคัญ คือ 1) การผลิตแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ก่อนการนำผงไม้ยางพาราไปผสมกับเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ต้องนำผงไม้ยางพารามาร่อนให้ผ่านตะแกรงขนาด 80 เมช (<180 μm) เพื่อแยกขนาด จากนั้นนำผงไม้ยางพาราและเม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาอบเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำผงไม้ยางพารา (Rubberwood Flour; RWF) เม็ดพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) สารคู่ควบ (Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene; MAPP) สารต้านทานรังสียูวี (UV Stabilizer) และสารหล่อลื่น (Lubricant) ตามอัตราส่วน 44.5 : 50.3 : 3.9 : 0.2 : 1 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าสมบัติทางกลที่ดี [14] ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ รุ่น EMT-26 ที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 170–190 องศาเซลเซียส ความเร็วเกลียว 50 รอบต่อนาที นำวัสดุที่ได้หลังจากการผสมมาตัดเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบเพื่อให้ได้ขนาด 2–3 มิลลิเมตร แล้วทำการอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อน ที่ 190 องศาเซลเซียส ความดัน 5.17×10^4 มิลลิเมตรปรอท เป็นเวลา 10 นาที เพื่อผลิตแผ่นประกบหนา 3 มิลลิเมตร ให้แก่วัสดุแซนด์วิช 2) การผลิตแผ่นแกนกลางจากพลาสติก 3 ชนิด ของวัสดุแซนด์วิช ที่ทำมาจากเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล พอลิเอทีลีนรีไซเคิล และพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล โดยทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร 3) การประกอบเป็นแผ่นวัสดุแซนด์วิช โดยการนำแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จำนวน 2 ชิ้น ประกบแผ่นแกนกลางแล้วอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 150–190 องศาเซลเซียส ตามอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 250 มิลลิเมตร × 150 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร (ความกว้าง × ความยาว × ความหนา) ดังแสดงในรูปที่ 2

2.3 วิธีการทดสอบ

2.3.1 การทดสอบสมบัติการดัด

ก่อนการทดสอบสมบัติการดัด ต้องนำชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 2 วัสดุแซนด์วิชที่มีแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ และแกนกลางจากพลาสติก

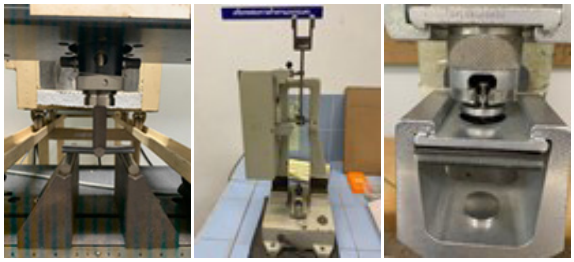
ตารางที่ 1 อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก [15]

Plastic Type	Melting Temperature (°C)
recycled polyethylene (rPE)	99–138
recycled high-density polyethylene (rHDPE)	108–134
recycled polypropylene (rPP)	160–165

ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยเป็นการทดสอบการดัดแบบ 3 จุด (Three-point Bending) ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก) ตามมาตรฐาน ASTM D790-92 ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 13 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา) โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ระยะห่างระหว่างบ่ารองรับชิ้นงาน (Span Distance) มีระยะ 80 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบการดัดคือ 2 มิลลิเมตรต่อนาที และทดสอบในอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส แต่ละสูตรการทดลองจะทำการทดลองซ้ำ 5 ตัวอย่าง เพื่อเพิ่มความแม่นยำให้แก่ผลการทดลอง [16]–[20] แล้วทำการหาค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดุลัสเฉลี่ยของแต่ละสูตรการทดลอง

2.3.2 การทดสอบการกระแทก

การทดสอบการกระแทก (Impact Strength) ตามมาตรฐาน ASTM D6110 ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 64 มิลลิเมตร × 13 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา) เป็นการทดสอบเพื่อหาความสามารถในการรับแรงที่มากระทำกับวัสดุด้วยความเร็ว (Dynamic Load) ดังแสดงในรูปที่ 3 (ข)



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 3 การทดสอบสมบัติ (ก) การดัด (ข) การกระแทก (ค) การทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวบริเวณผิวชิ้นงาน

โดยจะใช้ค้อนเหวี่ยง กระทบชิ้นงานด้วยแรงขนาด 2 จูล ซึ่งลักษณะการเหวี่ยงจะคล้ายลูกตุ้มนาฬิกา ใช้วิธีการจับยึดชิ้นงานแบบไอซอด (Izod Test) คือชิ้นงานทดสอบจะถูกจับยึดเพียงด้านเดียว และปลายอีกด้านจะตั้งขึ้นและหันหน้ารอยบากรูปตัววี มีความลึกที่ 2.45–2.50 มิลลิเมตร เข้าสู่จุดกระทบของค้อน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนการทดสอบที่ 0.004 จูล และในแต่ละสูตรมีการทดลองทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง [16]–[20]

2.3.3 การทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว

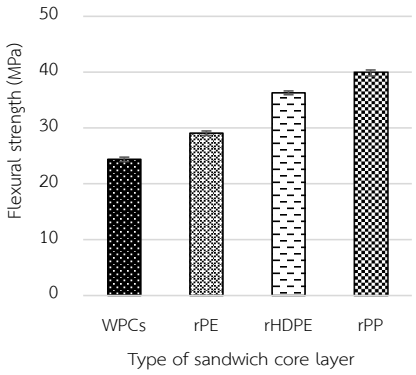
การทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียว (Screw Holding Resistance) ตามมาตรฐาน EN 312: 2010 ที่ความหนา > 6.0–13.0 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 50 มิลลิเมตร × 50 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว) เจาะรูนำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ลึก 6 มิลลิเมตร แล้วขันตะปูเกลียวขนาด 4 มิลลิเมตร × 40 มิลลิเมตร (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง × ยาว) ให้มีความลึกสมบูรณ์จมลงไป 15 มิลลิเมตร ไม่นับส่วนปลายเรียวของตะปูเกลียว ลงไปในชิ้นงานทั้งบนผิวและขอบของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4 จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบอเนกประสงค์โดยใช้หัวจับแบบดึง ดึงให้ตะปูเกลียวถอนออกจากชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3 (ค) แรงที่ใช้ในการดึงจะต้องอยู่ในแนวเดียวกับตะปูเกลียวและตั้งฉากกับผิวหน้า หรือผิวขอบของชิ้นงานทดสอบ มีอัตราการเพิ่มแรงดึงที่สม่ำเสมอ และใช้ความเร็วในการดึง 2 มิลลิเมตรต่อนาที ในแต่ละสูตรทำการทดลองทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง [16]–[20]

(ก) (ข)

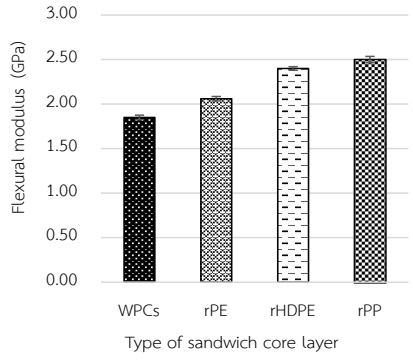
รูปที่ 4 การขัดตะปูเกลียวบริเวณ (ก) ผิวชิ้นงาน (ข) ขอบชิ้นงาน

2.3.4 การทดสอบการดูดซับน้ำ

การทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำ (Water Absorption) ตามมาตรฐาน ASTM D570-98 ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีขนาด 6 มิลลิเมตร × 13 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา) โดยก่อนการทดสอบต้องนำชิ้นงานทดสอบ ไปลดความชื้นด้วยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักของชิ้นงานทันที ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลที่ความละเอียด 0.001 กรัม แล้วนำชิ้นงานทดสอบแต่ละสูตรไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด จึงนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก โดยในแต่ละสูตรทำการทดลองทำซ้ำ 5 ตัวอย่าง [16]–[20]



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 สมบัติแรงดัดของชิ้นทดสอบวัสดุแซนด์วิช (ก) ค่าความแข็งแรงดัดและ (ข) มอดุลัสการดัด

3. ผลการทดลอง

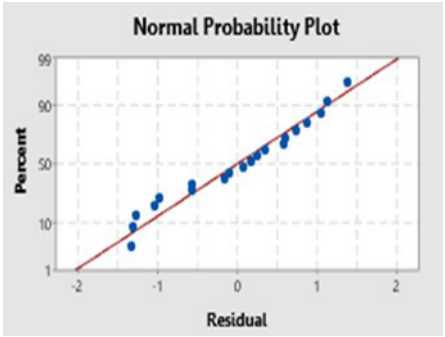
3.1 ผลการทดสอบสมบัติแรงดัด

ผลกระทบของชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชต่อค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดุลัสการดัด ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดุลัสการดัดมีพฤติกรรมที่คล้ายกันคือ เมื่อนำพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาเป็นแกนกลางของวัสดุแซนด์วิช ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัด และค่ามอดุลัสการดัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล พอลิเอทีลีนรีไซเคิล ตามลำดับ เนื่องจากการใช้วัสดุแกนกลางจากพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นสูงจะเป็นตัวช่วยในการรับ และกระจายแรงจากการกดอัดให้กับวัสดุแซนด์วิชได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว ทำให้การรวมจุดความเค้นที่อาจทำความเสียหายให้ชิ้นงานลดน้อยลง [7], [8] และจากการนำวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างไม้ยางพาราและพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาเป็นแผ่นประกบแก่วัสดุแซนด์วิช โดยมีแกนกลางที่ทำมาจากพลาสติกชนิดเดียวกันด้วยแล้ว จึงทำให้เกิดการยึดติดระหว่างเมทริกซ์ได้ดีกว่าแกนกลางจากพลาสติกต่างชนิดกับแผ่นประกบอีกด้วย

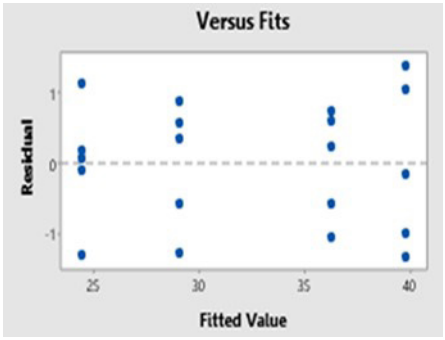
เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวกับวัสดุแซนด์วิชที่มีพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาเป็นแกนกลางพบว่า ให้ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 24.38 เมกะปาสคาล เป็น 39.86 เมกะปาสคาล และค่ามอดุลัสการดัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 1.85 กิกะปาสคาล เป็น 2.50 กิกะปาสคาล คิดเป็น 63% และ 35% ตามลำดับ

เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากชิ้นงานทดสอบมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อทดสอบว่าชนิดของแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชส่งผลต่อค่าสมบัติทางกลหรือไม่ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) โดยมีปัจจัยในการทดสอบ คือ ชนิดของแกนกลางของวัสดุแซนด์วิช 4 ระดับ คือ WPCs, rPE, rHDPE และ rPP แล้วทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละปัจจัยด้วยวิธี Tukey's Comparison Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยเบื้องต้นได้ทำการวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) กราฟ Normal Probability ของสมบัติแรงดัด ไม่มีค่าผิดปกติเกิดขึ้นในกราฟและข้อมูลมีความแนบชิดกับเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ รูปที่ 6 (ข) แสดงกราฟความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาดพบว่า ข้อมูลมีความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดที่สม่ำเสมอกัน รูปที่ 6 (ค) แสดงกราฟที่มีความเป็นอิสระต่อกันพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบ และกระจายตัวอยู่รอบค่าศูนย์ที่เท่าๆ กัน จึงเป็นข้อมูลที่มีความเสถียรภาพของความแปรปรวน และมีสมบัติด้านความเป็นอิสระต่อกัน ทั้งนี้การวิเคราะห์ความพอเพียงของรูปแบบจำลองในสมบัติมอดุลัสการดัด การกระแทก การยึดเหนี่ยวตะปูเกลียวบริเวณผิวหน้าและขอบชิ้นงาน และการดูดซับน้ำ มีการวิเคราะห์ในรูปแบบเดียวกันและพบว่า ทุกชุดข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ข้อมูลมีความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดแบบคงที่ และข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน เหมือนเช่นความแข็งแรงดัด

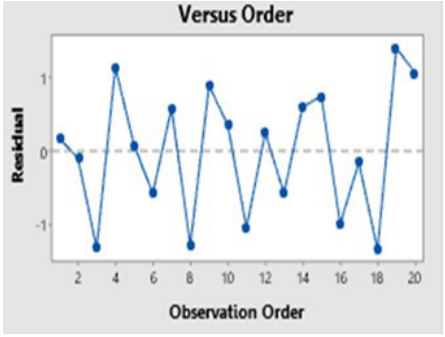
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิช ส่งผลต่อค่าสมบัติทางกลทั้งในส่วนของสมบัติแรงดัด และสมบัติการกระแทก อย่างมีนัยสำคัญ ที่ $\alpha = 0.05$ (p-value < 0.05) เช่นเดียวกันเมื่อวิเคราะห์โดยใช้ Tukey's Test พบว่า ชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชทำให้ค่าทุกการทดสอบสมบัติทางกลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ผลกระทบของชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชต่อค่าความแข็งแรงดัดของวัสดุแซนด์วิชที่มีชั้นแกนกลางจาก rPE (C) แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (WPCs) แบบชั้นเดียว (D) ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับวัสดุแซนด์วิชที่มีชั้นแกนกลางจาก rHDPE (B) และ rPP (A) เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแซนด์วิชที่มีชนิดแกนกลางต่างกัน rPP (A) rHDPE (B) และ rPE (C) พบว่า ให้ค่าความแข็งแรงดัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



(ข)

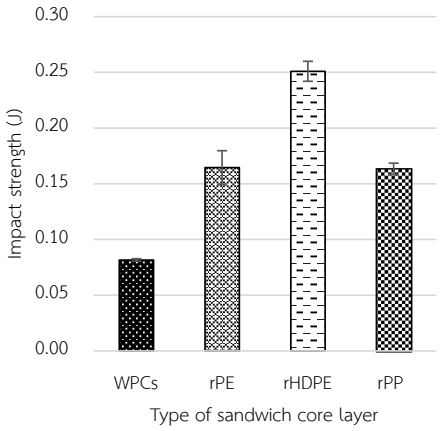


(ค)

รูปที่ 6 การตรวจสอบความเพียงพอของรูปแบบจำลองของสมบัติความแข็งแรงดัด (ก) กราฟ Normal Probability (ข) กราฟความแปรปรวนคงที่ของค่าความผิดพลาด (ค) กราฟที่มีความเป็นอิสระต่อกัน

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของวัสดุแซนด์วิชจากแกนกลางพลาสติกต่างชนิดที่มีผลต่อสมบัติทางกล

Properties	Core layer			Control (WPCs)
	rPE	rHDPE	rPP	
Flexural strength (MPa)	29.07^{C}	36.29^{B}	39.86^{A}	24.38^{D}
Flexural modulus (GPa)	2.06^{B}	2.40^{A}	2.50^{A}	1.85^{C}
Impact strength (J)	0.16^{B}	0.25^{A}	0.16^{B}	0.08^{C}
Screw holding resistance of face (N)	1494^{C}	1582^{C}	2363^{A}	2166^{B}
Screw holding resistance of edge (N)	1394^{B}	1981^{A}	2443^{A}	1280^{B}
Water absorption (%)	0.33^{B}	0.24^{B}	0.18^{B}	0.54^{A}



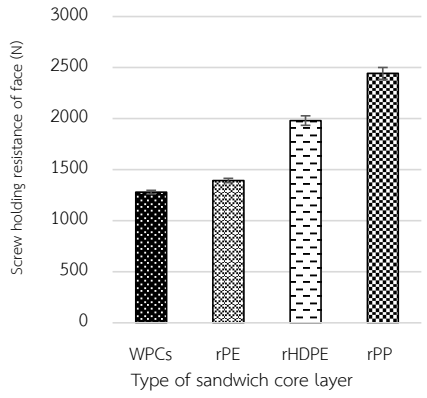
รูปที่ 7 สมบัติการกระแทกของชิ้นทดสอบวัสดุแซนด์วิช

3.2 ผลการทดสอบสมบัติการกระแทก

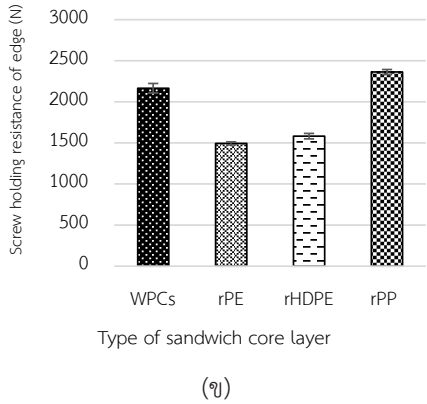
จากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ผลความแปรปรวนทางเดียวของชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชพบว่า ส่งผลต่อค่าสมบัติการกระแทก (Impact Property) อย่างมีนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.05$ นอกจากนี้รูปที่ 7 ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำพลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมาใช้เป็นวัสดุแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชจะทำให้มีค่าแรงกระแทกสูงที่สุด รองลงมาคือ แกนกลางจากพอลิเอทีลีนรีไซเคิล และพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวกับวัสดุแซนด์วิชที่มีพลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิลมาเป็นแกนกลาง พบว่า มีค่าแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 68% (จาก 0.08 จูล เป็น 0.25 จูล) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hao และคณะ [8] ที่พบว่า เมื่อนำพลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาเป็นแกนกลางให้กับวัสดุแซนด์วิช และนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง และไม้ปาล์มเพียงชั้นเดียว ทำให้ค่าแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 77% ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าชั้นแกนกลางของพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นสามารถช่วยดูดซับ และกระจายแรงที่มากระแทกบนชิ้นงานได้ดีกว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวที่มีผงไม้ผสมอยู่ในปริมาณมาก [21], [22] อีกทั้งผงไม้เป็นวัสดุที่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถดูดซับน้ำจากความชื้นโดยรอบได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป และการทดสอบชิ้นงาน ความชื้นเหล่านี้สามารถเข้าไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮโดรดรอกซิลในผงไม้แทนที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลสด้วยกันเอง [16] จึงทำให้ค่าแรงกระแทกของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้มีค่าลดลง

3.3 ผลการทดสอบความยึดเหนี่ยวของตะปู

ผลกระทบของชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชต่อค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูบริเวณผิวหน้า และขอบของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ทุกสูตรการทดสอบมีค่าเฉลี่ยความยึดเหนี่ยวสอดคล้องตามมาตรฐานการทดสอบ EN 320 และยังพบว่า ชนิดแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชส่งผลต่อค่าสมบัติความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวบริเวณผิวชิ้นงานและความยึดเหนี่ยวของตะปูเกลียวบริเวณขอบชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ที่ $\alpha = 0.05$ ดังแสดงในตารางที่ 2 ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) แสดงให้เห็นค่าความยึดเหนี่ยวตะปูเกลียวบริเวณผิวหน้าชิ้นงาน ซึ่งจะพบว่า พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุแกนกลางแก่วัสดุแซนด์วิชจะทำให้มีค่าความยึดเหนี่ยวของตะปูบริเวณผิวหน้าของชิ้นงานสูงที่สุด รองลงมาคือ แกนกลางจากพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิเอทีลีนรีไซเคิล ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการยึดติดกัน 3 ชั้น ระหว่างแกนกลาง และ



(ก)



(ข)

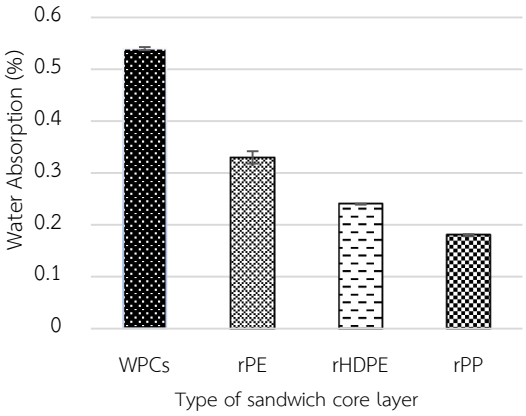
รูปที่ 8 ความยืดเหนี่ยวของตะปูของชิ้นทดสอบวัสดุแซนด์วิช (ก) บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานและ (ข) บริเวณขอบของชิ้นงาน

แผ่นประกบที่เป็นพลาสติกชนิดเดียวกันมีความเข้ากันได้ดีกว่าแกนกลางที่ทำจากพลาสติกต่างชนิดกับแผ่นประกบ และเมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวกับวัสดุแซนด์วิชที่มีพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาเป็นแกนกลางพบว่า ค่าความยืดเหนี่ยวของตะปูบริเวณผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น 9% (จาก 2,166 N เป็น 2,363 N) แต่เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวเป็นการผสมระหว่างพลาสติกและผงไม้จึงทำให้เกิดการยึดติดกันได้ดีระหว่างเมทริกซ์ [21], [22] จึงทำให้มีค่าความยืดเหนี่ยวตะปูได้ดีกว่าวัสดุแซนด์วิช 3 ชั้น จากแกนกลางพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิเอทีลีนรีไซเคิล

แต่จากรูปที่ 8 (ข) ซึ่งแสดงค่าความยืดเหนี่ยวของตะปูบริเวณขอบของชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าวัสดุแซนด์วิชที่มีแกนกลางจากพลาสติกรีไซเคิลทั้ง 3 ชนิด ให้ค่าความยืดเหนี่ยวของตะปูเกลียวสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว โดยมีค่าสูงสุดที่แกนกลางจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล รองลงมาคือ แกนกลางจากพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิเอทีลีนรีไซเคิล ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวกับวัสดุแซนด์วิชที่มีพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิลมาเป็นแกนกลางพบว่าค่าความยืดเหนี่ยวของตะปูบริเวณขอบของชิ้นงานเพิ่มขึ้น 91% (จาก 1,280 N เป็น 2,443 N) ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุแซนด์วิชมีแกนกลางที่เป็นพลาสติกที่จะช่วยทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความเหนียว และยืดหยุ่นมากกว่าการเจาะตะปูเกลียวลงไปในวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียว

3.4 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำ

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ชนิดของแกนกลางของวัสดุแซนด์วิชส่งผลต่อค่าสมบัติการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ที่ $\alpha = 0.05$ ดังแสดงในรูป 9 พบว่า หลังจากการทดสอบการแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวมีการดูดซับน้ำมากกว่าวัสดุแซนด์วิชในทุกชนิดแกนกลางพลาสติก สามารถอธิบายได้จากการที่วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวอาจมีรูพรุนมากเนื่องจากเป็นการผสมกันระหว่างพลาสติก และผงไม้ ซึ่งผงไม้ไม่ได้รับการห่อหุ้มด้วยปริมาณพลาสติกที่เพียงพอส่งผลให้เกิดช่องว่าง [23], [24] ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปได้ง่ายกว่าวัสดุแซนด์วิชที่มีชั้นแผ่นประกบที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ที่มีความบางกว่า และแกนกลางที่ทำมาจากพลาสติกก็ทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปบริเวณชิ้นงานได้น้อยมาก [8] ชนิดแกนกลางที่ทำให้ค่าการดูดซับน้ำลดลงได้ดีที่สุดคือ แกนกลางจากพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล รองลงมาคือ แกนกลางจากพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล และพอลิเอทีลีนรีไซเคิล ตามลำดับ เนื่องจากเป็นแกนกลางที่มีพลาสติกชนิดเดียวกันกับแผ่นประกบจึงทำให้เกิดการหลอม



รูปที่ 9 การดูดซับน้ำของชิ้นทดสอบวัสดุแซนด์วิช

และยึดติดกันได้ดี และมีช่องว่างให้น้ำแทรกซึมได้น้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวแล้วทำให้ค่าการดูดซับน้ำลดลงถึง 67% (จาก 0.54% เป็น 0.18%)

4. สรุป

การนำพลาสติกรีไซเคิล 3 ชนิด ได้แก่ พลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) พอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงรีไซเคิล (rHDPE) และพอลิเอทีลีนรีไซเคิล (rPE) มาเป็นแกนกลางให้แก่วัสดุแซนด์วิชที่มีแผ่นประกบเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล (rPP) และผงไม้ยางพารา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้แบบชั้นเดียวแล้วพบว่า ส่งผลทำให้ชิ้นงานทดสอบมีสมบัติทางกลดีขึ้น โดยเฉพาะสมบัติแรงดัด และการกระแทกซึ่งเป็นผลมาจากการที่มีพลาสติกแกนกลางคอยช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่วัสดุแซนด์วิช และยังช่วยเพิ่มความยืดเหนี่ยวให้แก่ตะปูเกลียวอีกด้วย เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องจับยึดด้วยตะปูเกลียวเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังส่งผลให้เกิดการดูดซับน้ำลดลง จึงช่วยให้วัสดุแซนด์วิชสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายยิ่งขึ้นในหลากหลายสภาพแวดล้อม ซึ่งในภาพรวมแล้วชนิดของพลาสติกที่นำมาเป็นแกนกลางให้แก่วัสดุแซนด์วิชและให้ค่าสมบัติทางกลที่ดี คือพลาสติกชนิดพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล เมื่อพิจารณาต้นทุนในระดับห้องปฏิบัติการของวัสดุแซนด์วิช ได้แก่ ต้นทุนของวัสดุและต้นทุนด้านพลังงาน มีต้นทุนรวมประมาณ 175 บาทต่อการผลิต 1 แผ่น (260 มิลลิเมตร × 150 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร) โดยเลือกคำนวณแผ่นวัสดุแซนด์วิชที่มีแผ่นประกบจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและผงไม้โดยมีแกนกลางจากพลาสติก rPP ซึ่งเป็นสูตรที่ให้สมบัติทางกลที่ดีที่สุดในการทดลอง ผลจากงานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มแนวทางในการนำพลาสติกใช้แล้วกลับมารีไซเคิลและผลิตเป็นวัสดุใหม่ทางวิศวกรรมที่เพิ่มคุณค่าโดยสามารถเปลี่ยนความหนาของชั้นแผ่นประกบหรือแกนกลางให้เหมาะกับการใช้งาน อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาที่ดีจากกลุ่มวิจัยเทคโนโลยีไม้ยางพาราและการจัดการ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เอกสารอ้างอิง

[1] H. Fu, M. Dun, H. Wang, W. Wang, R. Ou, Y. Wang, T. Liu, and Q. Wang, “Creep response of wood flour-high-density polyethylene/ laminated veneer lumber coextruded composites,” *Construction and Building Materials*, vol. 237, 2020.

[2] S. M. Mirmehdi, F. Zeinaly, and F. Dabbagh, “Date palm wood flour as filler of linear low-density polyethylene,” *Composites: Part B*, vol. 56, pp. 137–141, 2014.

[3] J. Zhang, Y. Li, D. Xing, Q. Wang, H. Wang, and A. Koubaa, “Reinforcement of continuous fibers for extruded wood-flour/HDPE composites: Effects of fiber type and amount,” *Construction and Building Materials*, vol. 228, 2019.

[4] A. Zolfaghari and A. H. Behravesh, "Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Mechanical properties," *Materials & Design*, vol. 51, pp. 701–708, 2013.

[5] R. Ou, H. Zhao, S. Sui, Y. Song, and Q. Wang, "Reinforcing effects of Kevlar fiber on the mechanical properties of wood-flour/high-density-polyethylene composites,"*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 9, pp. 1272–1278, 2010.

[6] R. Nasirzadeh and A. R. Sabet, "Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 63, pp. 129–139, 2014.

[7] J. P. Vitale, G. Francucci, J. Xiong, and A. Stocchi, "Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 94, pp. 217–225, 2017.

[8] X. Hao, H. Zhou, Y. Xie, H. Mu, and Q. Wang, "Sandwich-structured wood flour/HDPE composite panels: Reinforcement using a linear low-density polyethylene core layer," *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 489–496, 2018.

[9] Y. Zhang, Z. Zong, Q. Liu, J. Ma, Y. Wu, and Qing Li, "Static and dynamic crushing responses of CFRP sandwich panels filled with different reinforced materials," *Materials & Design*, vol. 117, pp. 396–408, 2017.

[10] G. -I. Shim, H. -W. Eom, S. -H. Kim, J. -K. Park, and S. -Y. Choi, "Fabrication of lightweight and thin bulletproof windows using borosilicate glass strengthened by ion exchange," *Composites Part B: Engineering*, vol. 69, pp. 44–49, 2015.

[11] G. -I. Shim, S. -H. Kim, D. -L. Ahn, J. -K. Park, D. -H. Jin, D. -T. Chung, and S. -Y. Choi, "Experimental and numerical evaluation of transparent bulletproof material for enhanced impact-energy absorption using strengthened-glass/polymer composite," *Composites Part B: Engineering*, vol. 97, pp. 150–161, 2016.

[12] G. -I. Shim, S. -H. Kim, H. -W. Eom, D. -L. Ahn, J. -K. Park, and S. -Y. Choi, "Improvement in ballistic impact resistance of a transparent bulletproof material laminated with strengthened soda-lime silicate glass," *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, pp. 169–178, 2015.

[13] Pollution Control Department. (2020, August 9). *Plastic Waste Management 2018* [Online] (in Thai). Available: http://www.pcd.go.th/info_serv/waste.html

[14] C. Homkhiew, T. Ratanawilai, and W. Thongruang, "The optimal formulation of recycled polypropylene/rubberwood flour composites from experiments with mixture design," *Composites: Part B*, vol. 56, pp. 350–357, 2014.

[15] Department of Primary Industries and Mines. (2020, August 10). *Waste account database* [Online] (in Thai). Available: http://recycle.dpim.go.th

[16] M. A. M. Elamin, S. X. Li, Z. A. Osman, and T. A. Otitoju, "Preparation and characterization of wood-plastic composite by utilizing a hybrid compatibilizer system," *Industrial Crops & Products*, vol. 154, 2020.

[17] L. Jiang, J. Fu, and C. He, "Reliability analysis of wood-plastic composites in simulated seawater conditions: Effect of iron oxide pigments," *Journal of Building Engineering*, vol. 31, 2020.

[18] X. Gao, L. Lin, J. Pang, F. Chen, and Q. Li, "Effects of impulse-cyclone drying and silane modification on the properties of wood fiber/HDPE composite material," *Carbohydrate Polymers*, vol. 207, pp. 343–351, 2019.

[19] X. Hao, X. Yi, L. Sun, D. Tu, Q. Wang, and R. Ou, "Mechanical properties, creep resistance, and dimensional stability of core/shell structured wood flour/polyethylene composites with highly filled core layer," *Construction and Building Materials*, vol. 226, pp. 879–887, 2019.

[20] S. Y. Shen, F. J. Masters, H. L. Upjohn II, and C. C. Ferraro, "Mechanical resistance properties of FRP/polyol-isocyanate foam sandwich panels," *Composites Structures*, vol. 99, pp. 419–432, 2013.

[21] D. G-. García, A. Carbonell, M. D. Samper, D. G.-Sanoguera, and R. Balart, "Green composites based on polypropylene matrix and hydrophobized spend coffee ground (SCG) powder," *Composites Part B: Engineering*, vol. 78, pp. 256–265, 2015.

[22] Y. Zhua and Y. Sun, "Dynamic response of foam core sandwich panel with composite facesheets during low-velocity impact and penetration," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 139, 2020.

[23] K. B. Adhikary, S. Pang, and M. P. Staige, "Long-term moisture absorption and thickness swelling behaviour of recycled thermoplastics reinforced with *Pinus radiata* sawdust," *Chemical Engineering Journal*, vol. 142, no. 2, pp. 190–198, 2008.

[24] R. Ou, Y. Xie, M. P. Wolcott, S. Sui, and Q. Wang, "Morphology, mechanical properties, and dimensional stability of wood particle/high density polyethylene composites: Effect of removal of wood cell wall composition," *Materials & Design*, vol. 58, pp. 339–345, 2014.