

การพัฒนาวัสดุฉนวนคอมโพสิตจากฟางข้าวเหลือทิ้งโดยใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

เป็นสารเชื่อมประสานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Development of Composite Insulation Material from Rice Straw Waste Using

Environmentally Friendly Polyvinyl Alcohol (PVA) as a Binder

กรณิการ์ ปุดคัมมา^{1,*} อีวรา สุวรรณ² ดรชนิ พัทธวรกร³ และ ชวนะ เรือนมูล⁴

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

^{3,4} ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

*Corresponding author; E-mail address: kannika_pudkumma@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาวัสดุฉนวนคอมโพสิตทางเลือกที่ยั่งยืนโดยใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบหลักเพื่อลดการตัดไม้ ลดขยะชีวมวล และลดการเผาในที่โล่งซึ่งปล่อย CO₂ สู่บรรยากาศ และใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นวัสดุเชื่อมประสานแทนสารฟอร์มัลดีไฮด์ เพื่อช่วยลดการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds: VOCs) ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การศึกษาผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด (Particle board) จากฟางข้าว โดยใช้ PVA ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 โดยน้ำหนักมวลรวม มีการเติมกรดซิตริกและแคลเซียมคาร์บอเนต แล้วอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัดร้อนแรงดันสูง จากนั้นนำตัวอย่างไปทดสอบสมบัติทางกลทางกายภาพ และทางความร้อน ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มสัดส่วน PVA ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงทางกลดีขึ้น โดยเฉพาะความสามารถในการต้านทานแรงดัด วัสดุที่มี PVA ร้อยละ 35 ให้ความแข็งแรงสูงสุด ส่วนวัสดุที่มี PVA ร้อยละ 30 มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.069 W/m·K ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกั้นความร้อนได้ดี อีกทั้งยังดูความชื้นต่ำและมีความหนาแน่นน้อยกว่าวัสดุในท้องตลาด จึงเหมาะสำหรับการใช้งานในอาคารที่ต้องการวัสดุเบาและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ฉนวนคอมโพสิต, ฟางข้าว, โพลิไวนิลแอลกอฮอล์, สมบัติทางกล และทางความร้อน, ความยั่งยืน

Abstract

This research aims to develop a sustainable alternative composite insulation material using rice straw as the main raw material to reduce deforestation, biomass waste, and open burning by farmers, which releases CO₂ into the atmosphere. Polyvinyl Alcohol (PVA) was used as a binder instead of conventional adhesives containing formaldehyde, in order to reduce emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs) that are

harmful to human health and the environment. Particle boards were fabricated from rice straw with varying PVA contents of 25%, 30%, and 35% by total weight, incorporating Citric Acid and Calcium Carbonate as additives. The samples were high-pressure hot press and tested for mechanical, physical, and thermal properties. Results showed that increasing the PVA content improved mechanical strength, especially bending resistance. The sample with 35% PVA exhibited the highest mechanical strength, while the sample with 30% PVA achieved the lowest thermal conductivity at 0.069 W/m·K, indicating good thermal insulation performance. Additionally, the material exhibited low moisture absorption and lower density compared to commercial products, making it suitable for building applications that require lightweight and environmentally friendly materials.

Keywords: composite insulation, rice straw, Polyvinyl Alcohol, mechanical and thermal properties, sustainability.

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนับเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ และเป็นความท้าทายระดับโลก โดยการสะสมของก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมของมนุษย์ถูกระบุว่าเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศ พื้นน้ำ และผิวดินเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ข้อมูลจากรายงาน AR5 ของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC) ระบุว่าอุณหภูมิเฉลี่ยผิวโลกเพิ่มขึ้นประมาณ 0.85 องศาเซลเซียส ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา ซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อมในวงกว้าง เช่น การละลายของน้ำแข็งขั้วโลก การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล และความรุนแรงของภัยพิบัติที่หลากหลาย เช่น ภัยแล้ง น้ำท่วมฉับพลัน และการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝน [1]

ฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM_{2.5} ในประเทศไทยเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนมีนาคมของทุกปี โดยในปี 2567 พบว่าระดับฝุ่น PM_{2.5} ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพิ่มขึ้นสูงสุดในเดือนมกราคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ อยู่ในระดับที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพในเดือนกุมภาพันธ์ (35.5 ถึง 87.1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ส่วนในภาคเหนือระดับฝุ่น PM_{2.5} เพิ่มขึ้นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม โดยในเดือนมีนาคมระดับฝุ่นอยู่ในช่วงที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (47.4 ถึง 158.7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) สาเหตุหลักของฝุ่น PM_{2.5} ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมาจากการจราจร อุตสาหกรรม การเผาในที่โล่ง และกิจกรรมในครัวเรือน ขณะที่ในภาคเหนือมีสาเหตุมาจากการเผาไหม้ชีวมวลทางเกษตร ไฟป่า และหมอกควันข้ามพรมแดน ปัญหาฝุ่น PM_{2.5} นี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและคุณภาพอากาศในวงกว้าง จึงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน [2]

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากภาวะโลกร้อนและการสะสมของก๊าซเรือนกระจก ได้เพิ่มความสำคัญให้กับการพัฒนาเทคโนโลยีที่ช่วยลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความร้อนในอาคาร วัสดุฉนวนกันความร้อนถือเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นที่ภายในและภายนอกอาคาร โดยสามารถลดการพึ่งพาเครื่องปรับอากาศและช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงาน ในขณะที่เดียวกันปัญหาฝุ่น PM_{2.5} ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลและการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นปัจจัยสำคัญที่กระตุ้นความต้องการวัสดุฉนวนกันความร้อนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม วัสดุรีไซเคิล เช่น เซลลูโลสหรือวัสดุจากเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นทางเลือกที่ช่วยลดมลพิษทางอากาศ พร้อมทั้งสนับสนุนการลดของเสียจากกระบวนการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง โดยทั่วไปแล้วแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดผลิตมาจากไม้ที่มีขนาดเล็กซึ่งไม่สามารถใช้งานเป็นแผ่นได้ เช่น กิ่งก้านของต้นไม้ และเศษไม้ที่เหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมไม้ ได้แก่ เศษไม้จากโรงงานผลิตไม้อัด เศษไม้ที่ได้จากโรงเลื่อย และเศษไม้จากโรงงานเฟอร์นิเจอร์

ปัจจุบันการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดมักใช้เรซินฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์หรือยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมประสาน ซึ่งเรซินเหล่านี้เป็นแหล่งของสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) โดยเฉพาะฟอร์มัลดีไฮด์ที่เป็นสารก่อมะเร็งและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ใช้งานและผู้ผลิตในระยะยาว งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่ปล่อย VOCs ไม่เป็นพิษ และมีคุณสมบัติในการสร้างฟิล์มที่แข็งแรง ทำให้เหมาะสำหรับใช้เป็นสารเชื่อมประสานในผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้นเพื่อรองรับแนวทางการก่อสร้างที่ยั่งยืนผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือ เศษวัสดุชีวมวลจากฟางข้าว ซึ่งเป็นทรัพยากรหมุนเวียนที่ช่วยลดการใช้ไม้จากป่าและลดขยะชีวภาพ การนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาพัฒนาเป็นแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดสำหรับการใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อนไม่เพียงช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุที่ถูกมองว่าไม่มี

ประโยชน์ แต่ยังช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดขยะทางการเกษตรด้วยการเผาไหม้ที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาวัสดุใหม่ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนและความทนทานผ่านการใส่สารเติมแต่ง ได้แก่ สารหน่วงไฟร่วมกับวัสดุเมทริกซ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งช่วยเพิ่มความคงทนต่อการใช้งานและลดการปล่อยสารเคมีที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ผลิตและผู้ใช้งานในระยะยาว นอกจากนี้การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตและการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุทดสอบกับวัสดุอื่นที่มีในท้องตลาดยังช่วยให้สามารถประเมินความคุ้มค่าและศักยภาพในการผลิตเชิงพาณิชย์ได้ การศึกษานี้จึงมีความสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน โดยสนับสนุนการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสร้างโอกาสในการพัฒนานวัตกรรมวัสดุที่ตอบสนองต่อความต้องการด้านการอนุรักษ์พลังงานและการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการวิจัยจำนวนมากไม่น้อยที่ให้ความสนใจเกี่ยวกับการศึกษาวัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัสดุฉนวนรวม ดังแสดงตัวอย่างต่อไปนี้

การศึกษาสมบัติทนไฟของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดจากลำต้นปาล์มน้ำมัน-โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดซิตริกและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่ง แผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดถูกผลิตขึ้นผ่านกระบวนการผสมสารเคมีในสัดส่วนต่างๆ และผ่านการอัดร้อน มีการศึกษาการประเมินความคงทนต่อไฟ (LOI Test) การวิเคราะห์ความเสถียรเชิงความร้อน (TGA) และสมบัติของโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการเติมโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความทนต่อไฟและความเสถียรทางกล โดยตัวอย่างที่มีสัดส่วนของโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 20 และแคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละ 10 มีค่า LOI สูงสุดที่ร้อยละ 37.17 และมีสมบัติเชิงความร้อนและทางกายภาพที่เหมาะสม [3]

การพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ผลิตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เส้นใยจากต้นพลกษและเปลือกดอกทานตะวัน โดยใช้กาวชีวภาพที่พัฒนาจากเคซีน (โปรตีนจากนมวัว) เป็นตัวเชื่อมแทนกาวสังเคราะห์ โดยวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มีคุณสมบัติที่ดี เช่น ความพรุนที่เหมาะสมต่อการเป็นฉนวนกันความร้อนและน้ำหนักเบา งานวิจัยนี้ได้ผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดโดยการอัดร้อนวัสดุเหลือทิ้งร่วมกับกาวชีวภาพและไม่ใช้กาว เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกล ความทนทานต่อน้ำ ความเป็นฉนวน และความต้านทานไฟ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการใช้กาวชีวภาพช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและความทนทานต่อน้ำได้ดีกว่าแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ไม่ใช้กาว นอกจากนี้กาวชีวภาพยังช่วยลดการกระจายของเปลาไฟในกรณีเกิดเพลิงไหม้ [4]

การศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยจากเปลือกผลปาล์มน้ำมัน (Oil Palm Empty Fruit Bunch: OPEFB) และกากอ้อย (Sugarcane Bagasse: SCB) ต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพ และโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดที่เสริมแรงด้วยเรซินชีวภาพพอลิกลีสำหรับใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร โดยทำการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยด้วยสารซิลิโคนร้อยละ 2 โดยปริมาตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 4 โดยปริมาตร เพื่อลดความชื้นและเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์เรซิน การทดลองประกอบด้วยการผสมเส้นใย OPEFB และ SCB ในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ใช้เทคนิคการหล่อมือและการอัดร้อนเพื่อขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต จากนั้นทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง แรงดัด และแรงอัด รวมถึงการดูดซึมน้ำ การพองตัว และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลการทดสอบพบว่า การปรับสภาพด้วยซิลิโคนช่วยเพิ่มสมบัติทางกลได้ดีกว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยคอมโพสิตที่มีเส้นใยระหว่าง OPEFB และ SCB ในสัดส่วน 5:5 แสดงสมบัติทางกลและความเสถียรทางกายภาพที่ดีสุด นอกจากนี้วัสดุที่ปรับสภาพด้วยซิลิโคนยังมีอัตราการดูดซึมน้ำและการพองตัวต่ำที่สุด [5]

การพัฒนาวัสดุฉนวนกันความร้อนสำหรับอาคารที่ผลิตจากเส้นใยฟางข้าวและกากธรรมชาติ โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตและไคโตซานเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การศึกษานี้ได้ออกแบบกระบวนการเชื่อมโยงทางเคมีเพื่อแก้ปัญหาความสามารถในการละลายน้ำของวัสดุที่ใช้โซเดียมอัลจิเนต รวมถึงการศึกษาสมบัติทางความร้อน ความสามารถในการดูดซับความชื้น และความต้านทานต่อเชื้อรา โดยการทดสอบอิมพีลเม้นต์ของเส้นใย ชนิดของกากและอัตราส่วนของกากต่อคุณสมบัติของวัสดุ วัสดุฉนวนถูกผลิตขึ้นโดยการผสมเส้นใยฟางข้าวกับกากธรรมชาติในสัดส่วนต่างๆ และผ่านการอบแห้งซึ่งในงานวิจัยนี้มีการวัดค่าการนำความร้อน จากการทดสอบพบว่าวัสดุฉนวนทั้งหมดมีค่าการนำความร้อนต่ำอยู่ที่ 0.038 ถึง 0.047 W/m·K และวัสดุที่ใช้โซเดียมอัลจิเนตมีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงกว่าวัสดุที่ใช้ไคโตซาน แต่มีแนวโน้มเกิดเชื้อราได้ง่ายกว่า โดยเฉพาะเมื่อสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง [6]

การพัฒนาแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดน้ำหนักเบาจากเศษป่าน โดยใช้ตัวเชื่อมประสานสองชนิด ได้แก่ ลิกนินซัลโฟเนตซึ่งเป็นสารชีวภาพ และอีพ็อกซีเรซินที่มีโครงสร้างชีวภาพบางส่วน เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ตัวเชื่อมประสานทั้งสองชนิด การพัฒนานี้มุ่งเน้นการลดการปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์จากแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดเชิงพาณิชย์ รวมถึงส่งเสริมการใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดดำเนินการโดยใช้เศษป่านที่ไม่มีการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดร้อนที่อุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสม ตัวแปรในการศึกษารวมถึงสัดส่วนของตัวเชื่อมประสานที่ใช้ คือ ความหนาแน่นของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ 500 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแรงทางกล การนำความร้อน การดูดซึมน้ำ และการต้านทานไฟ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าแผ่นปาร์ติเกิล

บอร์ดที่ใช้ลิกนินซัลโฟเนตมีคุณสมบัติทางกล เช่น ค่าความต้านทานการดึง (MOR) และโมดูลัสยืดหยุ่น (MOE) สูงกว่าแผ่นที่ใช้อีพ็อกซีเรซิน อย่างไรก็ตามแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้อีพ็อกซีเรซินมีคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าและมีความเสถียรเมื่อสัมผัสกับน้ำ นอกจากนี้แผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ลิกนินซัลโฟเนตแสดงถึงความสามารถในการต้านทานไฟได้ดีกว่า [7]

การพัฒนาวัสดุฉนวนกันความร้อนและดูดซับเสียงสำหรับใช้งานในอาคาร โดยใช้ใบยูคาลิปตัสแห้ง (Eucalyptus Globulus) และเส้นใยฟางข้าวสาลี (Wheat Straw) ร่วมกับการจากแป้งข้าวโพดเป็นตัวเชื่อมประสาน ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และลดการพึ่งพาวัสดุสังเคราะห์ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การวิจัยนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างใบยูคาลิปตัสแห้งที่เหลือทิ้งและเส้นใยฟางข้าวสาลี จากนั้นผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาด อบแห้ง และผสมกับตัวเชื่อมประสานเพื่อขึ้นรูปตัวอย่างวัสดุทั้งแบบใบยูคาลิปตัสแห้งเพียงอย่างเดียว เส้นใยฟางข้าวสาลีเพียงอย่างเดียว และไฮบริดผสมทั้งสองชนิดในสัดส่วนที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ ประกอบด้วย การวัดค่าการนำความร้อน การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การดูดซับเสียง และการวิเคราะห์การย่อยสลายด้วยความร้อน (TGA) ผลการทดสอบพบว่า ใบยูคาลิปตัสแห้งมีการนำความร้อนเฉลี่ย 0.045 ถึง 0.055 W/m·K ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับวัสดุฉนวนกันความร้อน และตัวอย่างที่ผสมระหว่างใบยูคาลิปตัสแห้งกับเส้นใยฟางข้าวสาลีมีการนำความร้อนสูงขึ้นตามสัดส่วนของใบยูคาลิปตัสที่ลดลง โดยที่ใบยูคาลิปตัสแห้งเพียงอย่างเดียวสามารถดูดซับเสียงได้มากกว่าร้อยละ 60 ในช่วงความถี่ 500 ถึง 1,600 Hz งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าใบยูคาลิปตัสแห้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นฉนวนกันความร้อนและดูดซับเสียงในอาคาร [8]

2.2 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิต คือการผสมผสานระหว่างวัสดุสองชนิดขึ้นไปที่มีสมบัติทางเคมีหรือกายภาพที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อวัสดุเหล่านี้ทำงานร่วมกันจะก่อให้เกิดวัสดุใหม่ที่มีสมบัติและคุณลักษณะเฉพาะตัวที่เหนือกว่าวัสดุแต่ละชนิดเพียงลำพัง

2.2.1 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตเกิดจากการรวมกันของวัสดุสององค์ประกอบ เรียกว่า "องค์ประกอบของวัสดุ" ซึ่งประกอบด้วย วัสดุเสริมแรง (Reinforcement Material) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่รับแรง โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงสูง วัสดุเสริมแรงอาจมีรูปแบบตั้งแต่อนุภาคขนาดเล็กที่ไม่ต่อเนื่องไปจนถึงเส้นใยยาวที่ต่อเนื่องหรือเส้นใยที่ถักทอเป็นผืนผ้า และ วัสดุเมทริกซ์ (Matrix Material) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่ยึดจับหรือประสานส่วนต่างๆ ของวัสดุเข้าด้วยกัน โดยทั่วไปจะมีความแข็งแรงน้อยกว่าและความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุเสริมแรง วัสดุเมทริกซ์ช่วยถ่ายโอนแรงระหว่างวัสดุเสริมแรงและช่วยคงรูปร่างของวัสดุคอมโพสิตให้ได้ตามที่ต้องการ วัสดุทั้งสองชนิดนี้ถูกรวมเข้าด้วยกันในรูปแบบของวัสดุคอมโพสิต โดยที่วัสดุเมทริกซ์เป็นเฟสที่ต่อเนื่อง

(Continuous Phase) ในขณะที่วัสดุเสริมแรงเป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ (Dispersed Phase) [9]

นอกจากวัสดุคอมโพสิตประกอบด้วยวัสดุเสริมแรงและวัสดุเมทริกซ์ที่ทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสมบัติทางกลของวัสดุแล้วนั้น เพื่อให้วัสดุคอมโพสิตมีสมรรถนะที่ดีขึ้นจึงมีการใช้สารเติมแต่งร่วมด้วย แม้ว่าสารเติมแต่งจะถูกใช้ในปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับเรซิน วัสดุเสริมแรง หรือสารเติมแต่ง แต่สารเติมแต่งเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในระบบวัสดุ ถึงแม้จะเป็นการเพิ่มต้นทุนของระบบวัสดุพื้นฐาน อย่างไรก็ตามการเติมสารเติมแต่งเหล่านี้ก็ช่วยปรับปรุงความคุ้มค่าในเชิงต้นทุนต่อสมรรถนะของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.2 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุคอมโพสิต

ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตเพื่อเป็นสินค้า จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดอย่างละเอียดก่อนนำไปใช้งานเพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุนั้นเหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งการทดสอบมีหลายวิธีที่ช่วยตรวจสอบและวัดคุณสมบัติของวัสดุคอมโพสิต เช่น การทดสอบทางความร้อน ความแข็งแรง และสมบัติทางกายภาพ การทดสอบเหล่านี้สามารถช่วยคาดการณ์อายุการใช้งานของวัสดุภายใต้สภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้

การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพ เช่น การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงกระแทก การทดสอบแรงอัด การทดสอบแรงเฉือน การทดสอบการดูดซับน้ำ/ความชื้น และการวัดความหนาแน่น

การทดสอบสมบัติทางความร้อน เช่น การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความร้อนแบบสแกนเชิงความแตกต่าง การวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก การวิเคราะห์น้ำหนักเชิงความร้อน และการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดสอบความร้อนและเปลวไฟ เช่น การทดสอบการลามไฟ การหาค่าดัชนีออกซิเจนจำกัด การทดสอบความเป็นพิษ และการทดสอบความหนาแน่นของควัน [10]

2.3 ฉนวนกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation) เป็นวัสดุที่ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นที่ภายในและภายนอกอาคาร โดยมีคุณสมบัติพิเศษในการลดการนำพาความร้อนผ่านวัสดุ เช่น ฝ้า ผนัง และหลังคา

2.3.1 ประเภทของฉนวนกันความร้อน

ฉนวนใยแก้ว (Glass Wool) ผลิตจากแก้วที่ถูกหลอมและดึงเป็นเส้นใยบางๆ มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนและเสียงรบกวนได้ดี เหมาะสำหรับการติดตั้งในฝ้าเพดานและผนัง

ฉนวนโพลีเอสเตอร์ (Polyester Insulation) ผลิตจากเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่มีความยืดหยุ่นและทนทาน ปลอดภัยต่อสุขภาพ ไม่มีฝุ่นหรือสารพิษ เหมาะสำหรับผู้ที่มีปัญหาเรื่องภูมิแพ้และบ้านที่มีเด็กเล็ก

ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane Foam) เป็นฉนวนที่มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี ใช้สำหรับป้องกันความร้อนในหลังคาและ

ผนัง ติดตั้งง่ายและสามารถพ่นในจุดที่เข้าถึงยากได้

แผ่นกันความร้อนแบบสะท้อนแสง (Reflective Insulation) วัสดุประเภทแผ่นฟอยล์ที่เคลือบด้วยอลูมิเนียม ช่วยสะท้อนรังสีความร้อนจากแสงแดดออกไป ลดความร้อนสะสมในบ้าน นิยมติดตั้งในโครงสร้างหลังคา

ฉนวนเซลลูโลส (Cellulose Insulation) ผลิตจากวัสดุรีไซเคิล เช่น กระดาษหนังสือพิมพ์ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณสมบัติทนไฟ ใช้สำหรับป้องกันความร้อนในผนังและฝ้าเพดาน

2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) หรือที่เรียกสั้นๆ ว่า ค่า K คือ ค่าที่แสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน หรือค่าที่แสดงให้เห็นถึงค่าความร้อนที่ผ่านเข้าไปได้ในวัสดุนั้นๆ ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการทำฉนวนกันความร้อนจะมีค่า K ที่แตกต่างกัน ยิ่งมีค่า K ต่ำ แสดงว่าฉนวนกันความร้อนชนิดนั้นมีความสามารถในการต้านทานความร้อนได้ดี [11]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น เส้นใยจากต้นปาล์ม น้ำมัน ใบยูคาลิปตัส เปลือกถั่วลิสง ฝักข้าวโพด รวมถึงฟางข้าว มาพัฒนาเป็นวัสดุคอมโพสิตเพื่อใช้งานเป็นฉนวนกันความร้อน โดยเลือกใช้วัสดุเชื่อมประสานที่หลากหลาย เช่น PVA กาวชีวภาพ เคซีน โซเดียมอัลจิเนต หรือโคโคซาน เพื่อเพิ่มสมบัติทางกลและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุคอมโพสิตที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีในด้านการเป็นฉนวนความร้อน น้ำหนักเบา และย่อยสลายได้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่ยังไม่ได้นำเสนอการใช้ฟางข้าวร่วมกับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถหาได้ง่ายในพื้นที่การเกษตร โดยเฉพาะในภาคเหนือของประเทศไทยที่มีฟางข้าวเป็นจำนวนมาก การพัฒนาวัสดุคอมโพสิตจากฟางข้าวและ PVA จึงเป็นช่องว่างสำคัญที่ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะในบริบทของการนำมาใช้เป็นวัสดุฉนวนกันความร้อนที่ตอบโจทย์ด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

3. วัสดุและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ฟางข้าว

ฟางข้าว (Rice Straw) คือส่วนของลำต้นและใบข้าวที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว มักถูกมองว่าเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงหลักในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของเซลลูโลสที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

3.1.2 โพลีไวนิลแอลกอฮอล์

โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ละลายน้ำได้ มีลักษณะเป็นของแข็ง ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านการสร้างฟิล์มที่เหนียว แข็งแรง และยืดหยุ่นดี รวมถึงคุณสมบัติในการยึดเกาะสูง จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็น

สารเชื่อมประสาน (Binder) ในวัสดุคอมโพสิต นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

3.1.3 กรดซิตริก

กรดซิตริก (Citric Acid) เป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติในผลไม้รสเปรี้ยว เช่น ส้ม มะนาว และมะกรูด เป็นต้น เป็นสารยึดเกาะที่มีคุณภาพในการเชื่อมระหว่างวัสดุไม้และวัสดุที่มีลิกโนเซลลูโลส นอกจากนี้กรดซิตริกยังสามารถจับกลุ่มไฮดรอกซิลในไม้เพื่อสร้างพันธะเอสเทอร์ที่แข็งแรง

3.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ ได้แก่ เพิ่มความแข็งแรง ด้านทานแรงกระแทก และด้านการลามไฟ คุณสมบัติเด่นของแคลเซียมคาร์บอเนตคือ ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ และทนต่อความร้อนและสารเคมี

3.2 สัดส่วนผสมของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของปาร์ติเกิลบอร์ดที่มีส่วนผสมของฟางข้าวและโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นวัสดุผสมรวม โดยมีการเติมสารเติมแต่งด้วยกรดซิตริกและแคลเซียมคาร์บอเนต ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

ส่วนผสม	มวลรวม		สารผสมเพิ่ม	
	ฟางข้าว (%)	PVA (%)	กรดซิตริก (% ของมวลรวม)	แคลเซียมคาร์บอเนต (% ของมวลรวม)
PVA-25	75	25	10	10
PVA-30	70	30	10	10
PVA-35	65	35	10	10

3.3 การเตรียมแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

งานวิจัยนี้นำฟางข้าวมาผ่านกระบวนการบดละเอียดและคัดแยกขนาดผ่านตะแกรงขนาด 4 มิลลิเมตร เพื่อคัดแยกเศษฟางข้าวที่มีขนาดใหญ่ออกจากนั้นทำการเตรียมสารเชื่อมประสาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 โดยน้ำหนักของมวลรวม นำ PVA ไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เมื่อได้สารละลาย PVA แล้ว จึงเติมกรดซิตริกในสัดส่วนร้อยละ 10 ของมวลรวม โดยกรดซิตริกที่เติมนี้นำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง (Cross-Linking Agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของฟิล์ม PVA สามารถยึดเกาะเส้นใยให้แน่นยิ่งขึ้น จากนั้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในสัดส่วนร้อยละ 10 ของมวลรวม กับฟางข้าวที่ผ่านการบดและคัดขนาดแล้วให้เข้ากันเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางกลให้กับวัสดุ นำสารเชื่อมประสานผสมกับฟางข้าวที่เตรียมไว้ให้เข้ากันอย่างทั่วถึง จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในแม่พิมพ์ และขึ้นรูปด้วยการกดอัดร้อน โดยใช้เครื่องกดอัดร้อนแรงดันสูงสำหรับผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดขนาด 25 x 25 x 1.2 เซนติเมตร ทำการอัดร้อนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส แรงดัน 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

(psi) เป็นเวลา 50 นาที จากนั้นหล่อเย็นแผ่นอัดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที โดยการศึกษานี้ได้ทำการเตรียมแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดทั้งหมด 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องกดอัดร้อนแรงดันสูง

3.4 การทดสอบตัวอย่างแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

3.4.1 การทดสอบแรงดึง

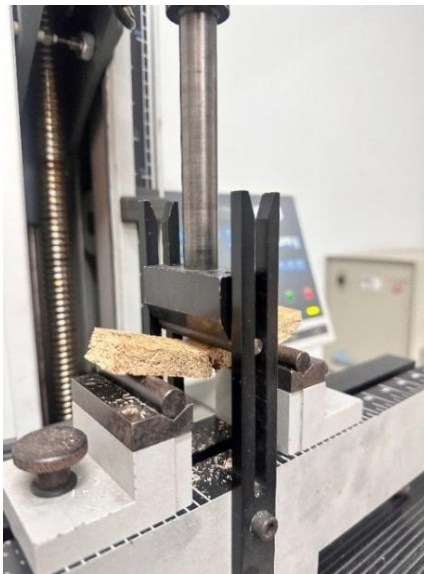
การทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM C209-20 โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing ขึ้นทดสอบขนาด 15 x 100 มิลลิเมตร วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปยึดติดกับหัวหนีบที่มีระยะห่าง 50 มิลลิเมตร อัตราการให้แรงดึง เท่ากับ 35 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 2 การทดสอบแรงดึง

3.4.2 การทดสอบแรงดัด

การทดสอบแรงดัด (Bending Test) แบบ 3 จุด หรือการต้านทานแรงดัดงอ ตามมาตรฐาน ASTM D1037 โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing ที่ติดตั้งหัวกดขนาด 2500 N ขึ้นทดสอบขนาด 20 x 100 มิลลิเมตร วัดความหนาและความกว้างของชิ้นทดสอบอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยนำชิ้นทดสอบวางบนแท่นรองรับที่มีระยะห่าง 60 มิลลิเมตร ให้แนวกึ่งกลางของชิ้นทดสอบอยู่ตรงกลางของแท่นรองรับ จากนั้นให้แรงกดที่จุดกึ่งกลางของชิ้นทดสอบ โดยมีอัตราการให้แรงกด เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3 การทดสอบแรงดัด

3.4.3 การทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมตัวตามความหนา

การทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมตัวตามความหนาเพื่อวัดปริมาณน้ำที่วัสดุสามารถดูดซับได้หลังจากแช่ในน้ำ ซึ่งจะช่วยประเมินความสามารถในการทนต่อความชื้นของวัสดุและการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุนั้นเมื่อสัมผัสกับน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความคงทนและการใช้งานของวัสดุในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูง

การทดสอบการดูดซับน้ำ (Water Absorption) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1037 ชิ้นทดสอบขนาด 20 x 30 มิลลิเมตร คำนวณร้อยละการดูดซับน้ำ จากสมการ 1

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ m_1 คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (กรัม)

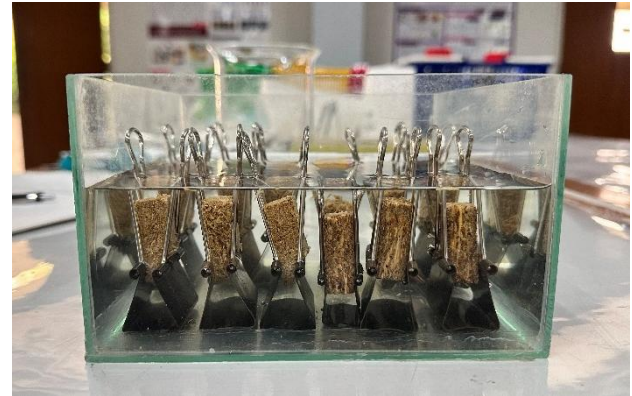
m_2 คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (กรัม)

การทดสอบการบวมตัวตามความหนา (Thickness Swelling) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1037 ชิ้นทดสอบขนาด 20 x 30 มิลลิเมตร คำนวณร้อยละการบวมตัวตามความหนา จากสมการ 2

$$\text{Thickness Swelling (\%)} = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ t_1 คือ ความหนาชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (มิลลิเมตร)

t_2 คือ ความหนาชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 4 การทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมตัวตามความหนา

3.4.4 การทดสอบการดูดความชื้น

การทดสอบการดูดความชื้นทำการทดสอบตามมาตรฐาน มทข.(ท 203-2545) โดยการเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 20 x 40 มิลลิเมตร นำชิ้นทดสอบวางไว้ในที่สภาวะห้องเป็นเวลา 7 วัน เพื่อให้วัสดุดูดซับความชื้นจากอากาศในระดับที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง ซึ่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ และบันทึกค่าเป็นน้ำหนักก่อนอบแห้ง จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกจากตู้อบทิ้งไว้ให้ชิ้นทดสอบเย็นลงที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ และบันทึกค่าหลังอบแห้ง แล้วคำนวณการดูดความชื้น จากสมการ 3

$$M = \frac{W - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ M คือ ร้อยละการดูดความชื้น

W คือ น้ำหนักก่อนอบแห้ง (กรัม)

W_d คือ น้ำหนักหลังอบแห้ง (กรัม)

3.4.5 การทดสอบความหนาแน่น

การทดสอบความหนาแน่น โดยการเตรียมชิ้นทดสอบขนาด 5 x 2 เซนติเมตร จากนั้นวัดความหนาของชิ้นทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนาแบบดิจิตอล วัดความกว้างและความยาวที่แน่นอนของชิ้นทดสอบด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณปริมาตรของแผ่นอัด จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบ คำนวณหาความหนาแน่น จากสมการ 4

$$d = \frac{m}{v} \times 10^3 \quad (4)$$

เมื่อ d คือ ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m คือ มวลของชิ้นทดสอบ (กรัม)

v คือ ปริมาตรของชิ้นทดสอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ 5 ชิ้นทดสอบหาค่าความหนาแน่น

3.4.6 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นการประเมินคุณสมบัติสำคัญของวัสดุฉนวนกันความร้อน เพื่อศึกษาว่าวัสดุนั้นสามารถต้านทานการถ่ายเทความร้อนผ่านตัววัสดุได้ดีเพียงใด โดยวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำจะมีความสามารถในการลดการสูญเสียพลังงานจากความร้อนภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในระบบผนัง ฝ้าเพดาน หรือหลังคา

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดเตรียมขึ้นทดสอบขนาด 25 x 25 x 1.2 เซนติเมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Heat Flow Meter (HFM) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยตั้งค่าอุณหภูมิช่วงการทดสอบให้ครอบคลุมตั้งแต่ 0 ถึง 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมของวัสดุภายใต้ช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในประเทศไทย การทดสอบวัสดุตัวอย่างแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 4-5 ชั่วโมง



รูปที่ 6 เครื่อง Heat Flow Meter (HFM)

3.4.7 การวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นกระบวนการที่สำคัญในการพิจารณาความคุ้มค่าและศักยภาพในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ในเชิงพาณิชย์ โดยครอบคลุมต้นทุนในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ตั้งแต่วัตถุดิบไปจนถึงการผลิตชิ้นงานพร้อมใช้งาน ซึ่งประกอบด้วย

ต้นทุนวัตถุดิบ (Material Cost) ได้แก่ ฟางข้าว โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ กรดซิทริกและแคลเซียมคาร์บอเนต

ต้นทุนแรงงาน (Labor Costs) ได้แก่ ค่าแรงในการเตรียมวัตถุดิบ การทอผสม การอัดขึ้นรูป โดยคิดเป็นจำนวนชั่วโมงแรงงานที่ใช้ในการผลิตต่อหน่วย และเปรียบเทียบกับอัตราค่าแรงต่อชั่วโมง

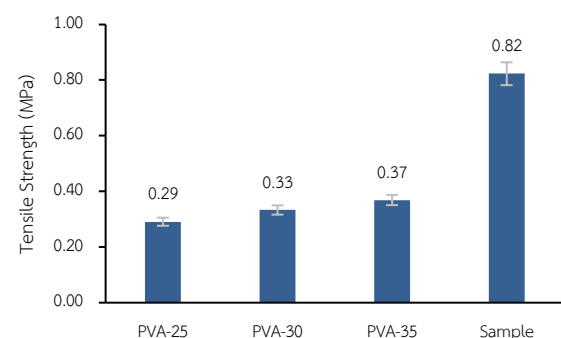
ต้นทุนค่าโสหุ้ย (Overhead Costs) ได้แก่ ค่าไฟฟ้า และค่าน้ำประปา

เมื่อได้ต้นทุนแต่ละขั้นตอนแล้วนำต้นทุนทั้งหมดมารวมกัน จากนั้นนำต้นทุนรวมที่ได้คิดเป็นต้นทุนต่อหน่วยของวัสดุแต่ละสัดส่วนในหน่วยบาทต่อตารางเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบกับวัสดุในท้องตลาด

4. ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบแรงดึง

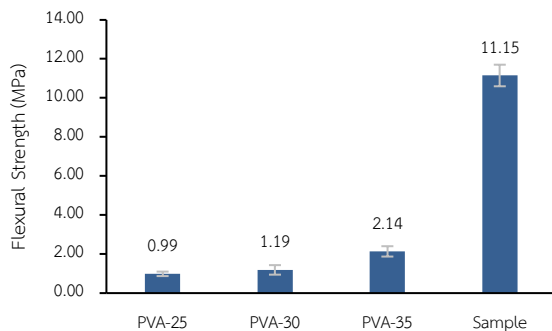
จากการทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ของวัสดุปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้โพลีไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวเชื่อมประสานในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 เปรียบเทียบกับปาร์ติเกิลบอร์ดในท้องตลาด (Sample) จะเห็นได้ว่า ค่า Tensile Strength ของ PVA-25, PVA-30 และ PVA-35 มีค่าน้อยและค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.29, 0.33 และ 0.37 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างในท้องตลาดมีค่า Tensile Strength สูงสุด เท่ากับ 0.82 MPa จากการทดสอบความต้านทานแรงดึงของวัสดุปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ฟางข้าวร่วมกับ PVA พบว่าแม้จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PVA แต่ยั้งถือว่ามีความต่ำกว่าวัสดุในท้องตลาดอย่างมาก สาเหตุที่วัสดุมีความต้านทานแรงดึงต่ำ เนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นใยสั้นและเปราะ ทำให้ถ่ายเทแรงได้น้อย ประกอบกับการยึดเกาะระหว่างฟางข้าวกับเมทริกซ์ PVA อาจไม่แข็งแรงเพียงพอ เนื่องจากไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยเพื่อเพิ่มการยึดเหนี่ยว อีกทั้งโครงสร้างภายในวัสดุอาจมีช่องว่างหรือไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ไม่สามารถรับแรงดึงได้ดี แม้ว่าการใช้ PVA เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มแรงดึงได้บ้าง แต่ยังคงต้องปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถใช้งานได้ในสภาวะที่ต้องรับแรงดึงมาก



รูปที่ 7 ค่า Tensile Strength ของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

4.2 ผลการทดสอบแรงดัด

จากการทดสอบความแข็งแรงต่อการดัดงอ (Flexural Strength) พบว่าวัสดุตัวอย่างที่มีโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 มีค่า Flexural Strength เท่ากับ 0.99, 1.19 และ 2.14 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุตัวอย่างในท้องตลาด โดยที่วัสดุตัวอย่างในท้องตลาดมีค่า Flexural Strength เท่ากับ 11.15 MPa จากผลการทดสอบวัสดุพาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ฟางข้าวร่วมกับ PVA แม้ว่าการเพิ่มปริมาณ PVA จะช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงตามสัดส่วนของ PVA ที่เพิ่มขึ้น แต่สมบัติทางกลโดยรวมยังคงต่ำกว่าวัสดุในท้องตลาดอย่างชัดเจน เนื่องจากลักษณะของฟางข้าวเป็นเส้นใยสั้นและเปราะ การกระจายตัวของ PVA ที่ไม่สม่ำเสมอภายในเนื้อวัสดุ และการยึดเกาะระหว่าง PVA กับเส้นใยที่ยังไม่แน่นพอ อีกทั้งการศึกษานี้ไม่มีการปรับสภาพพื้นผิวของเส้นใยฟางข้าวเพื่อเพิ่มการยึดเกาะ จึงอาจเป็นจุดอ่อนที่ส่งผลให้วัสดุไม่สามารถรับแรงได้ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 8 ค่า Flexural Strength ของแผ่นพาร์ติเกิลบอร์ด

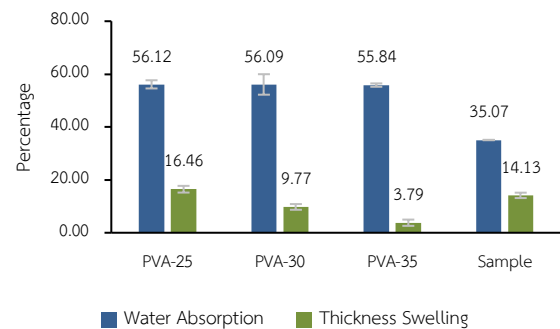
4.3 ผลการทดสอบการดูดซับน้ำและการบวมตัวตามความหนา

จากผลการทดสอบการดูดซับน้ำ (Water Absorption) และการบวมตัวตามความหนา (Thickness Swelling) ของแผ่นพาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ PVA ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 พบว่าสัดส่วนของ PVA ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อคุณสมบัติในการต้านทานความชื้นของวัสดุ โดยเฉพาะค่าการดูดซับน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่าลดลงตามปริมาณของ PVA ที่เพิ่มขึ้น

วัสดุตัวอย่าง PVA-25 มีค่าการดูดซับน้ำสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 56.12 ขณะที่ PVA-30 และ PVA-35 มีค่าลดลงเหลือร้อยละ 56.09 และ 55.84 ตามลำดับ แม้ค่าการดูดซับน้ำจะลดลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็สอดคล้องกับแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ PVA สามารถช่วยลดการดูดซับน้ำได้บางส่วน อย่างไรก็ตามค่าเหล่านี้ยังคงสูงกว่าวัสดุในท้องตลาดที่มีค่าการดูดซับน้ำเพียงร้อยละ 35.07 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุทดสอบยังมีข้อจำกัดในด้านการต้านทานการดูดซับน้ำ ส่วนการทดสอบการบวมตัวตามความหนา พบว่ามีแนวโน้มที่ชัดเจนมากขึ้น โดยวัสดุตัวอย่าง PVA-25 มีค่าการบวมตัวตามความหนาสูงสุดที่ร้อยละ 16.46 ขณะที่วัสดุตัวอย่าง PVA-30 และ PVA-35 มีค่าการบวมตัวตามความหนาลดลงเหลือเพียงร้อยละ 9.77 และ 3.79 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าดีกว่าวัสดุในท้องตลาดที่มีค่าการบวมตัวตามความหนาอยู่ที่ร้อยละ 14.13 โดยเฉพาะวัสดุตัวอย่าง PVA-35 มีค่าการบวมตัวตาม

ความหนาต่ำที่สุด ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการคงรูปและต้านทานการขยายตัวเมื่อดูดซับน้ำได้เป็นอย่างดี

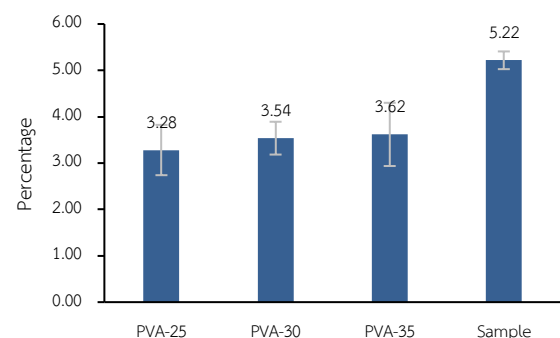
ผลการทดสอบเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่ม PVA ไม่เพียงช่วยลดการบวมตัวตามความหนาได้ แต่ยังช่วยให้วัสดุมีเสถียรภาพมากขึ้นเมื่อสัมผัสกับน้ำ แม้ยังไม่สามารถลดการดูดซับน้ำได้ดีเท่ากับวัสดุในท้องตลาด แต่ก็แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาในอนาคต โดยอาจมีการเพิ่มการเคลือบผิวหรือใช้สารเติมแต่งอื่นร่วมกับ PVA เพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการต้านทานน้ำให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 9 การดูดซับน้ำและการบวมตัวตามความหนาของแผ่นพาร์ติเกิลบอร์ด

4.4 ผลการทดสอบการดูดความชื้น

จากการทดสอบการดูดความชื้น (Moisture Absorption) ของแผ่นพาร์ติเกิลบอร์ด พบว่าวัสดุที่มี PVA ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 มีค่าการดูดความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 3.28 ถึง 3.62 ซึ่งต่ำกว่าวัสดุตัวอย่างในท้องตลาดที่มีค่าการดูดความชื้นสูงถึงร้อยละ 5.22 แสดงให้เห็นว่าการเติม PVA มีแนวโน้มช่วยลดการดูดความชื้นของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะวัสดุตัวอย่าง PVA-25 ที่ให้ค่าการดูดความชื้นต่ำที่สุด การลดลงของการดูดความชื้นอาจเกิดจากโครงสร้างของ PVA ที่ช่วยปิดช่องว่างภายในวัสดุ ทำให้ความชื้นซึมเข้าสู่วัสดุได้น้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณ PVA เป็นร้อยละ 30 และ 35 ค่าการดูดความชื้นกลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความอึดตัวของ PVA หรือการกระจายตัวที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดช่องว่างบางส่วนภายในวัสดุ



รูปที่ 10 การดูดความชื้นของแผ่นพาร์ติเกิลบอร์ด

4.5 ผลการทดสอบความหนาแน่น

จากการทดสอบความหนาแน่นของวัสดุ พบว่าวัสดุตัวอย่างที่มี PVA ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 334.22, 365.45 และ 380.76 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าวัสดุตัวอย่างในท้องตลาดที่มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 650.73 kg/m³ ผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุจากฟางข้าวที่พัฒนาขึ้นมีน้ำหนักเบากว่าวัสดุในท้องตลาด จึงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการน้ำหนักเบาและไม่จำเป็นต้องรับแรงมาก

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

ส่วนผสม	ความหนาแน่น (kg/m ³)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (kg/m ³)
PVA-25	334.22	17.28
PVA-30	365.45	11.07
PVA-35	380.76	2.10
Sample	650.73	8.73

4.6 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

จากการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน พบว่าวัสดุตัวอย่างที่มี PVA ในสัดส่วนร้อยละ 25, 30 และ 35 มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.069 ถึง 0.076 W/m-K ซึ่งต่ำกว่าวัสดุในท้องตลาดที่มีค่าการนำความร้อนสูงถึง 0.113 W/m-K แสดงให้เห็นว่าวัสดุพัฒนาจากฟางข้าวสามารถช่วยลดการนำความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะวัสดุตัวอย่าง PVA-30 ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุด เท่ากับ 0.069 W/m-K ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวัสดุส่วนผสมนี้สามารถต้านทานการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทดสอบทั้งหมด

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ด

ส่วนผสม	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m-K)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (W/m-K)
PVA-25	0.071	0.017
PVA-30	0.069	0.006
PVA-35	0.076	0.017
Sample	0.113	0.011

4.7 ผลการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดที่ใช้ฟางข้าวเป็นวัสดุหลักร่วมกับ PVA ในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ PVA-25, PVA-30 และ PVA-35 พบว่าตัวอย่างแต่ละสูตรมีต้นทุนรวมที่แตกต่างกันตามสัดส่วนของ PVA ที่ใช้ ซึ่งต้นทุนของ PVA มีผลต่อต้นทุนของวัตถุดิบโดยตรง วัสดุตัวอย่าง PVA-25 มีต้นทุนรวมต่ำที่สุดอยู่ที่ 89.19 บาท/แผ่น เนื่องจากมีต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุด เท่ากับ 13.21 บาท ขณะที่วัสดุตัวอย่าง PVA-35 มีต้นทุนรวมสูงที่สุดอยู่ที่ 94.17 บาท/แผ่น โดยสัดส่วนนี้มีต้นทุนวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเป็น 18.48 บาท ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PVA ซึ่งเป็นสารเชื่อมประสานที่มีราคาสูง จะส่งผลให้ต้นทุนวัตถุดิบเพิ่มขึ้น

ตามไปด้วย อย่างไรก็ตามในการทดสอบเป็นการวิเคราะห์ต้นทุนในระดับห้องปฏิบัติการ จึงพบว่าค่าแรงงานต่อหน่วยการผลิตสูงถึง 57.14 บาท/แผ่น คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 60 ถึง 70 ของต้นทุนรวมต่อแผ่น ในขณะที่ต้นทุนวัตถุดิบมีค่าระหว่าง 13.21 ถึง 18.48 บาท/แผ่น เท่านั้น ค่าแรงงานจึงถือว่าเป็นสัดส่วนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งค่าแรงที่สูงนี้มีสาเหตุมาจากลักษณะของการผลิตที่ยังอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการหรือ Lab Scale ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบกึ่งมือ กึ่งเครื่องจักร ทำให้ใช้เวลาในการผลิตต่อแผ่นนาน ไม่สามารถผลิตได้จำนวนมากในระยะเวลานั้น อีกทั้งยังไม่มีการจัดสายการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีต้นทุนวัตถุดิบที่มีราคาสูง เนื่องจากการจัดซื้อวัตถุดิบในปริมาณน้อยซึ่งมีราคาต่อหน่วยสูงกว่าการจัดซื้อวัตถุดิบในระดับอุตสาหกรรม เช่น การสั่งซื้อเป็นต้นหรือจำนวนมาก ทำให้สามารถซื้อได้ในราคาส่ง สามารถลดต้นทุนต่อหน่วยของวัตถุดิบได้ ส่งผลให้แนวโน้มของต้นทุนรวมในการผลิตวัสดุลดลงเป็นอย่างมาก หากขยายการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4 ต้นทุนแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดในแต่ละสัดส่วนผสม

ส่วนผสม	ต้นทุน (บาท/แผ่น)			ต้นทุนรวม (บาท/แผ่น)
	วัตถุดิบ	ค่าแรง	ค่าเสีย	
PVA-25	13.21	57.14	18.84	89.19
PVA-30	15.55	57.14	18.65	91.34
PVA-35	18.48	57.14	18.55	94.17

เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดในแต่ละสัดส่วนผสมเปรียบเทียบกับราคาวัสดุตัวอย่างในท้องตลาด พบว่าแผ่นที่ผลิตจากฟางข้าวและ PVA ในสัดส่วนต่างๆ ได้แก่ PVA-25, PVA-30 และ PVA-35 มีต้นทุนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1,427.15 ถึง 1,506.83 บาท/ตารางเมตร ซึ่งสูงกว่าราคาวัสดุตัวอย่างในท้องตลาด ที่มีราคาเพียง 93.40 บาท/ตารางเมตร ดังแสดงในตารางที่ 5 ความแตกต่างของต้นทุนนี้เกิดจากหลายปัจจัย เช่น การผลิตในระดับห้องปฏิบัติการ การจัดซื้อวัตถุดิบในปริมาณน้อย และค่าแรงต่อหน่วยที่สูง รวมถึงต้นทุนพลังงานที่ยังไม่ถูกเฉลี่ยตามสเกลการผลิตจริง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าต้นทุนของวัสดุทดสอบที่ผลิตขึ้นจะสูงกว่าวัสดุตัวอย่างในท้องตลาดกว่า 15 เท่า แต่ก็ยังสามารถพัฒนาเพื่อลดต้นทุนได้ หากนำเข้าสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม เช่น การสั่งซื้อวัตถุดิบในปริมาณมากเพื่อให้ได้ราคาส่ง การใช้เครื่องจักรอัตโนมัติ และการผลิตต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยลงได้เป็นอย่างมาก

ตารางที่ 5 ต้นทุนต่อหน่วยของแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดในแต่ละสัดส่วนผสมเปรียบเทียบกับราคาวัสดุตัวอย่างในท้องตลาด

ส่วนผสม	ต้นทุน (บาท/ตารางเมตร)
PVA-25	1,427.15
PVA-30	1,461.43
PVA-35	1,506.83
Sample	93.40

5. บทสรุป

จากการศึกษาการพัฒนาวัสดุฉนวนคอมโพสิตจากฟางข้าวโดยใช้โพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารเชื่อมประสานสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 วัสดุที่ได้มีสมบัติบางประการที่ยังด้อยกว่าวัสดุในท้องตลาด ได้แก่ ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดัด ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ สะท้อนให้เห็นถึงข้อจำกัดด้านสมบัติทางกลของวัสดุ

5.2 วัสดุที่พัฒนาขึ้นแสดงผลลัพธ์ที่ดีกว่าวัสดุในท้องตลาดหลายด้าน โดยเฉพาะในด้านการดูดความชื้น ซึ่งวัสดุทุกสัดส่วนผสมมีการดูดความชื้นต่ำกว่าวัสดุในท้องตลาด และในด้านการนำความร้อน พบว่าสัดส่วนผสมที่ใช้ PVA ร้อยละ 30 มีการนำความร้อนต่ำที่สุด เท่ากับ 0.069 W/m·K แสดงถึงสมรรถนะในการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี นอกจากนี้วัสดุยังมีความหนาแน่นต่ำ จึงเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการน้ำหนักเบาและไม่จำเป็นต้องรับแรงมาก

5.3 ด้านต้นทุน วัสดุเส้นใยหลักเป็นฟางข้าวมีราคาถูกและปริมาณมากในพื้นที่เกษตรกรรมของประเทศไทยโดยเฉพาะภาคเหนือ ขณะที่ PVA แม้จะมีต้นทุนสูงกว่าวัสดุเชื่อมประสานทั่วไป แต่ยังอยู่ในระดับที่สามารถแข่งขันได้ เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อได้เปรียบทางด้านสิ่งแวดล้อม

5.4 ความปลอดภัยและความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจาก PVA ไม่มีสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และไม่ปล่อยสารฟอร์มัลดีไฮด์ซึ่งเป็นสารอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ จึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานในพื้นที่ปิดหรืออาคารที่ปกอ้าย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และศูนย์บริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ศวท.-มช.) ที่สนับสนุนอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับใช้ในการทดสอบงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรณิกักร ธรรมพานิชวงศ์, กฤษณ์เลิศ สัมพันธ์รักษ์, และสวีส พงษ์เพ็ชร. (2567). การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ กับ เศรษฐกิจ: ตอนที่ 1 สถานการณ์และผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. <https://www.pier.or.th/perspectives/002/>
- [2] มธุรส รุจิวัฒน์. (2567). PM2.5: วิกฤตฝุ่นละอองในประเทศไทยที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ. <https://www.cri.or.th/th/articles-20240320/>
- [3] Yusof, M., Lamaming, J., Hashim, R., Yhaya, M. F., Sulaiman, O., & Selamat, M. E. (2020). Flame retardancy of particleboards made from oil palm trunk-poly(vinyl) alcohol with citric acid and calcium carbonate as additives.

- Construction and Building Materials*, 263, 120906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120906>
- [4] Mahieu, A., Vivet, A., Poilane, C., & Leblanc, N. (2021). Performance of particleboards based on annual plant byproducts bound with bio-adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107, 102847. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102847>
- [5] Azlina Ramlee, N., Jawaid, M., Abdul Karim Yamani, S., Syams Zainudin, E., & Alamery, S. (2021). Effect of surface treatment on mechanical, physical and morphological properties of oil palm/bagasse fiber reinforced phenolic hybrid composites for wall thermal insulation application. *Construction and Building Materials*, 276, 122239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122239>
- [6] Zhou, Y., Trabelsi, A., & El Mankibi, M. (2023). Hygrothermal properties of insulation materials from rice straw and natural binders for buildings. *Construction and Building Materials*, 372, 130770. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130770>
- [7] Essid, S., Hegde, V. J., Mahieu, A., Bizet, L., Leblanc, N., & Saouab, A. (2021). Comparison of the properties of flax shives based particleboards prepared using binders of bio-based lignin and partially bio-based epoxy resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 109, 102915. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102915>
- [8] Ali, M., Alabdulkarem, A., Nuhait, A., Al-Salem, K., Lannace, G., Almuzaiqer, R., Al-turki, A., Al-Ajlan, F., Al-Mosabi, Y., & Al-Sulaimi, A. (2020). Thermal and acoustic characteristics of novel thermal insulating materials made of Eucalyptus Globulus leaves and wheat straw fibers. *Journal of Building Engineering*, 32, 101452. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101452>
- [9] The Essential Chemical Industry. (2013). Composites. <https://www.essentialchemicalindustry.org/index.php/materials-and-applications/composites>
- [10] Ahmedabad Textile Industry's Research Association. (2022). Composite Materials Testing and Analysis. <https://atira.in/composite-materials-testing-and-analysis-detailed-guide/#>
- [11] Wall Technology. (n.d.). ฉนวนกันความร้อน คืออะไร <https://www.wtg.co.th/knowledge/146-how-is-the-insulation/>