



การศึกษาสมบัติของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

กรณีศึกษา : ขี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวา

The Study of the Thermal Insulation Properties of the Waste Materials of Agriculture:
Sawdust, Coconut Fiber, and Water Hyacinth Fiber

โรสลีนา อนันตกุลวงศ์* นูรีซัน มะรีเกะ อาแอสะ สะดียามู และนาเดียร์ ปี

Roseleena Anantanukulwong*, Nureesun Maruekeh, Araesoh Sadiyamu and Nadiar Pi

สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000
Program of Physics industrial, Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Muang, Yala 95000, Thailand

*Corresponding author, e-mail: roseleena.y@yru.ac.th

(Received: Sep 12, 2023; Revised: Mar 26, 2024; Accepted: Mar 29, 2024)

บทคัดย่อ

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถนำมาประยุกต์ใช้ด้านฉนวนกันความร้อน เนื่องจากมีเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวา โดยใช้ยางพาราเป็นตัวประสานในอัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราเท่ากับ 60:40 70:30 และ 80:20 และมีขนาดเท่ากับ 16 เซนติเมตร × 16 เซนติเมตร × 2 เซนติเมตร โดยทำการทดสอบความหนาแน่น การนำความร้อน สมบัติการต้านทานต่อแรงดึง การดูดซึมน้ำ และสมบัติการลามไฟ ผลการวิจัยพบว่า ความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 315 – 404 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยทุกชนิดและทุกอัตราส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำอยู่ในช่วง 0.0136 - 0.0315 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ค่าการทนต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 0.01 - 0.45 เมกะพาสคัล ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 16.49 – 67.64 เปอร์เซ็นต์ และค่าการลามไฟของเส้นใยทั้งสามชนิดเท่ากับ 0 มิลลิเมตรต่อนาที สำหรับฉนวนกันความร้อนที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้เป็นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยผักตบชวาที่อัตราส่วนเท่ากับ 60:40 เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและค่าการทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่นของเส้นใยชนิดเดียวกัน ดังนั้น วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในงานวิจัยนี้ นอกจากสามารถนำมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนแล้วยังสามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุและยังเป็นฉนวนกันความร้อนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เส้นใยธรรมชาติ ฉนวนกันความร้อน น้ำยางพารา

Abstract

Agricultural waste containing natural fibers is an alternate method of manufacturing thermal insulation. Because it contains natural fibers with a high concentration of cellulose. This research studied the properties of thermal insulation panels made from agricultural waste made from three types of materials: sawdust, coconut pulp fibers, and water hyacinth fiber. Using latex as a binder at a ratio of fibers to latex equal to 60:40, 70:30, and 80:20 and having a size of 16 cm × 16 cm × 2 cm by testing density, thermal conductivity, tensile strength, water absorption, and fire-retardant properties. The research results found that the density of the insulation was in the range of 315–404 kg/m³. Thermal insulation from all types and ratios of fibers had a low coefficient of thermal conductivity in the range of 0.0136–0.0315 W/m·K. The tensile strength of the insulation was in the range of 0.01–0.45 MPa. The water absorption value of the insulation panels was in the range of 16.49–67.64 percentage, and the fire spread value of the three types of fibers was 0 millimeters per minute. The optimum thermal insulation in this

investigation was water hyacinth fiber insulation with a fiber-to-latex ratio of 60:40 due to its low coefficient of thermal conductivity. Moreover, the water absorption value was within standard criteria, and the tensile strength value was higher than other ratios of the same type of fiber. As a result, the agricultural waste materials used in this study had the potential to increase the material's value while also serving as an environmentally friendly heat insulation.

Keywords: Waste materials of agriculture, Natural fiber, Thermal insulator, Latex

บทนำ

ปัจจุบันมนุษย์กำลังเผชิญกับสภาวะโลกร้อนอันเป็นผลมาจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Gases: GHG) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างมากมาย (Kamran *et al.*, 2023) หนึ่งในปัญหาดังกล่าวส่งผลให้มนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อลดความร้อนในตัวอาคาร (Gonzalez-Torres *et al.*, 2022) ฉนวนกันความร้อนเป็นวัสดุหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนจากภายนอกสู่ตัวอาคารได้เป็นอย่างดี (Wang *et al.*, 2022) โดยทั่วไปฉนวนกันความร้อนผลิตจากวัสดุอินทรีย์ อาทิ ฉนวนโฟเบอร์กลาสหรือฉนวนใยแก้ว (Sun *et al.*, 2021) ฉนวนโพลิสไตรีน (Polystyrene) (Bumanis *et al.*, 2023) ฉนวนใยแร่ (Jensen *et al.*, 2023) ฉนวนโพลียูรีเทนโฟม (Polyurethane foam) (Zemla *et al.*, 2022) เป็นต้น ฉนวนกันความร้อนเหล่านี้มีต้นทุนการผลิตสูงและเมื่อใช้งานในระยะยาวอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพเช่น โรคแอสเบสโตซิส (Asbestosis) หรือโรคปอดเรื้อรัง โรคเนื้องอกและโรคกระดูกพรุนอื่น ๆ ของร่างกาย (Tangjuank *et.al.*, 2023) จากการเสื่อมสภาพของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของฉนวนกันความร้อนได้

ฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเส้นใยธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อป้องกันความร้อนในตัวอาคารบ้านเรือนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติเหล่านั้นมีรูพรุนสูง มีส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี (Sen *et al.*, 2022) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติจะมีสมบัติการนำความร้อนต่ำ ซึ่งบ่งบอกการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี เช่น ฉนวนกันความร้อนจากใยไม้ (Zang *et al.*, 2023) ฉนวนกันความร้อนจากใบกล้วย (Mohamed *et al.*, 2021) หรือ ฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฉนวนกันความร้อนจากชานอ้อย (Mehrzaad *et al.*, 2022) เป็นต้น สืบเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประมาณ 38 ล้านตันต่อปี (Jarunjaruphat & Acharry, 2018) ที่สามารถแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งเหล่านั้นได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยต่อน้ำยางพาราในการผลิตฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวา โดยมีอัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพารา ได้แก่ 60:40 70:30 และ 80:20 และเพื่อศึกษาคุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าการทนต่อแรงดึง ค่าการดูดซึมน้ำ และค่าการลามไฟ

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการผลิตฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ชี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวา โดยผลิตแผ่นฉนวนกันความร้อนด้วยอัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพารา เท่ากับ 60:40 70:30 และ 80:20 และทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางความร้อน โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. วิธีการเตรียมเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

1.1 การเตรียมเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ชี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว เส้นใยผักตบชวา ดังภาพที่ 1a – 1c โดยนำไปผึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 1 เตรียมเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
(a) ชี้เลี้ยง (b) เส้นใยจากมะพร้าว และ (c) เส้นใยผักตบชวา

1.2 นำเส้นใยจากมะพร้าวและเส้นใยผักตบชวาที่ผ่านการผึ่งแดดแล้วมาตัดให้ได้ขนาด 2-5 เซนติเมตร และนำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเส้นใยที่ได้ไปต้มด้วยน้ำเปล่าเป็นเวลา 30 นาที

1.3 นำเส้นใยมาล้างน้ำให้สะอาดและผึ่งแดดให้แห้ง หลังจากนั้นนำเส้นใยมาแช่ในสารละลายบอแรกซ์ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ นาน 30 นาที แล้วนำไปผึ่งแดดให้แห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยสารบอแรกซ์เมื่อถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวของสารประกอบโบรอนเป็นผิวเคลือบ ซึ่งสามารถยับยั้งการถ่ายเทมวลสารหรืออากาศในการเผาไหม้ ทำให้สามารถลดการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ ซึ่งสามารถลดการลามไฟของฉนวนได้

1.4 นำเส้นใยไปอบความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

2. วิธีการขึ้นรูปฉนวนกันความร้อน

2.1 นำเส้นใยผสมน้ำยางพาราให้เข้ากันและเทลงบล็อกขนาด 16 เซนติเมตร × 16 เซนติเมตร × 2 เซนติเมตร ดังภาพที่ (2a)

2.2 ใช้ซีแคลมป์เป็นตัวกด ดังภาพที่ (2b) เพื่อทำให้แผ่นฉนวนแน่นขึ้นและเป็นการไล่อากาศออกจากฉนวน ซึ่งจะได้อุณหภูมิหลังกดอัดหนา 2 เซนติเมตร

2.3 นำเส้นใยไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้ยางคงรูปอย่างสมบูรณ์ ดังภาพที่ (2c)



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 2 วิธีการขึ้นรูปฉนวนกันความร้อน

(a) การนำเส้นใยลงบล็อก (b) การใช้ซีแคลมป์ขึ้นรูปฉนวน และ (c) เส้นใยที่คงรูปเป็นแผ่น

3. การทดสอบสมบัติของชิ้นงาน

3.1 ค่าความหนาแน่น หาคความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ โดยการนำชิ้นทดสอบมาตัดเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 3 เซนติเมตร × 3 เซนติเมตร × 2 เซนติเมตร แล้วหาคความหนาแน่นโดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น Electric densimeter รุ่น MD-300S และ Minimum density resolution: 0.001

3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การวัดค่าสภาพการนำความร้อน แบบ Heat flow meter ตามมาตรฐาน ASTM C518 ใช้เทคนิคการวัดแบบสภาวะคงที่ (Steady state method) หลักการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณค่าสภาพการนำความร้อน ดังสมการที่ (1)



$$k = -\frac{Q}{A} \frac{L}{\Delta T} \quad (1)$$

โดยที่ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส
 Q คือ ความร้อนที่ไหลผ่านต่อพื้นที่ผิวตัวอย่าง มีหน่วยเป็นวัตต์
 A คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน มีหน่วยเป็นตารางเมตร
 L คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นเมตร
 ΔT คือ อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างผิววัสดุด้านอุณหภูมิสูงและด้านอุณหภูมิต่ำ องศาเซลเซียส

3.3 ค่าการทนต่อแรงดึง นำแผ่นเส้นใยฉนวนกันความร้อนไปวัดค่าการทนต่อแรงดึง โดยใช้เครื่องมือ Force gauge ตัดแผ่นทดสอบขนาด 5 เซนติเมตร x 5 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร ผูกเชือกกับชิ้นทดสอบ โดยให้ด้านหนึ่งติดกับแท่นของเครื่องทดสอบและอีกด้านหนึ่งติดกับฐานของเครื่องทดสอบ (ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อแรงดันในขณะทดสอบชิ้นงาน) หมุนแท่นของเครื่องทดสอบจนกว่าแผ่นทดสอบจะฉีกขาด หลังจากนั้นนำคำนวณ หาค่าการทนต่อแรงดึงดังสมการที่ (2)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

เมื่อ σ คือ ค่าการทนต่อแรงดึง มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร
 F คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด มีหน่วยเป็นนิวตัน
 A คือ พื้นที่ของชิ้นทดสอบ มีหน่วยเป็นตารางเมตร

3.4 ค่าการดูดซึมน้ำ ตัดชิ้นงานให้ได้ขนาด 3 เซนติเมตร x 3 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร แล้วนำชิ้นทดสอบไปชั่งน้ำหนักก่อนการแช่น้ำจากนั้นวางชิ้นทดสอบในระนาบเดียวกันกับระดับน้ำโดยให้ขอบบนอยู่ใต้ผิวน้ำประมาณ 20 มิลลิเมตร ชิ้นทดสอบแต่ละชิ้นควรวางห่างกันและห่างผนังของภาชนะพอสมควรเมื่อแช่ชิ้นทดสอบครบ 2 ชั่วโมงแล้วจึงนำชิ้นทดสอบขึ้นจากน้ำและนำไปชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอนอีกครั้งจากสมการที่ (3)

$$W_A = \left[\frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \right] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_A คือ การดูดซึมน้ำ มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ (%)
 W_1 คือ น้ำหนักก่อนแช่น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม (g)
 W_2 คือ น้ำหนักหลังแช่น้ำ มีหน่วยเป็นกรัม (g)

3.5 ค่าการลามไฟ แผ่นเส้นใยฉนวนกันความร้อนที่ได้จากการขึ้นรูปชิ้นงานขนาด 16 เซนติเมตร x 16 เซนติเมตร x 2 เซนติเมตร ทำการขึ้นรูปชิ้นงานใหม่ขนาดเท่ากับ 125 มิลลิเมตร x 125 มิลลิเมตร x 13 มิลลิเมตร และทำการจุดไฟที่ปลายชิ้นงาน จับเวลาเมื่อไฟลามไปในตำแหน่ง 25 มิลลิเมตร จากปลายชิ้นงาน หยุดเวลาเมื่อไฟลามไปเป็นระยะ 75 มิลลิเมตร จากจุดที่จับเวลา คำนวณค่าการลามไฟ (ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D635-98) ดังสมการที่ (4)

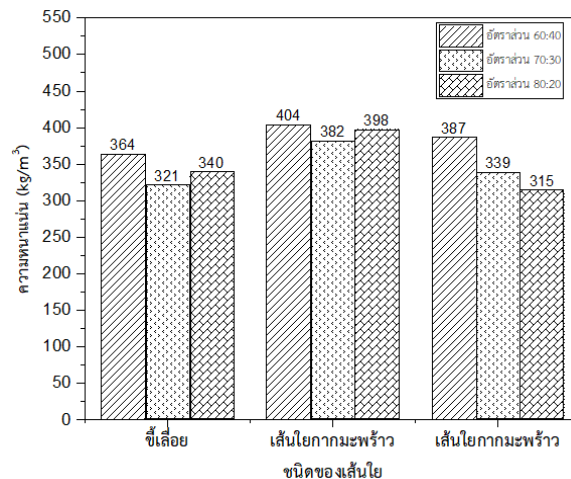
$$V = \frac{60L}{t} \quad (4)$$

เมื่อ V คือ อัตราการลามไฟ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อนาที
 L คือ ระยะของการลามไฟ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
 t คือ เวลาของการเผาไหม้ มีหน่วยเป็นวินาที

ผลการวิจัย

1. ค่าความหนาแน่น

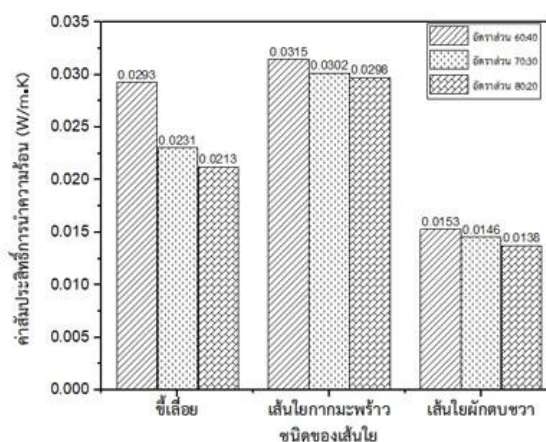
ความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสอเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผลิตจากขี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวาที่ปริมาณเส้นใยต่อน้ำยางพาราในอัตราส่วน 60:40, 70:30 และ 80:20 โดยน้ำหนักพบว่า ฉนวนกัน ความร้อนจากขี้เลื่อย มีค่าความหนาแน่น 364 ± 4.06 , 321 ± 3.5 และ 340 ± 4.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เส้นใยจากมะพร้าวมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 404 ± 5.5 , 382 ± 3.5 และ 398 ± 3.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับและเส้นใยผักตบชวา มีความหนาแน่นเท่ากับ 387 ± 4.12 , 339 ± 5.5 และ 315 ± 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนต่าง ๆ

2. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

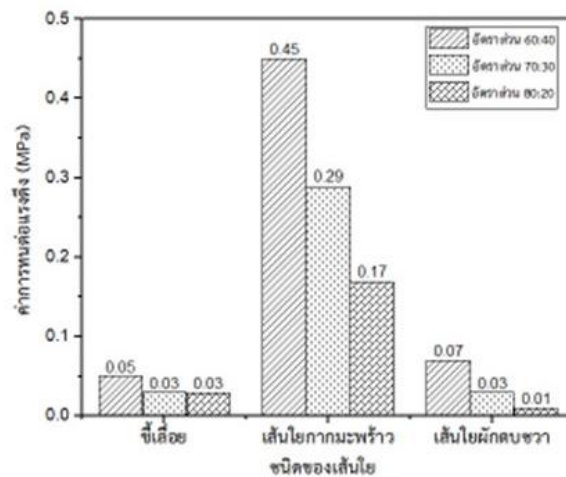
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนอยู่ในช่วง 0.0138 - 0.0315 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส โดยภาพที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 60:40 70:30 และ 80:20 เมื่อพิจารณาฉนวนกันความร้อนในแต่ละชนิดที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยผักตบชวามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าเส้นใยอื่น นอกจากนี้ ปริมาณของเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 80:20 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.0138 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยสอเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนต่าง ๆ

3. ค่าการทนต่อแรงดึง

ค่าการทนต่อแรงดึงของฉนวนกันความร้อนเป็นค่าที่แสดงถึงแรงที่ใช้ในการดึงต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยแต่ละชนิด โดยค่าการทนต่อแรงดึงของเส้นใยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่ในช่วง 0.01 – 0.45 เมกกะพาสคัล ดังภาพที่ 5 โดยฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยจากมะพร้าวมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดในทุกอัตราส่วนและปริมาณของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 60:40 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.45 เมกกะพาสคัล นอกจากนี้ เมื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพของเส้นใยจากมะพร้าว (ภาพที่ 6b) พบว่าเส้นใยมีความเหนียวและความแข็งแรงมากกว่าขี้เลื่อย (ภาพที่ 6a) และเส้นใยผักตบชวา (ภาพที่ 6c)



ภาพที่ 5 ค่าการทนต่อแรงดึงของฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนต่าง ๆ



(a)

(b)

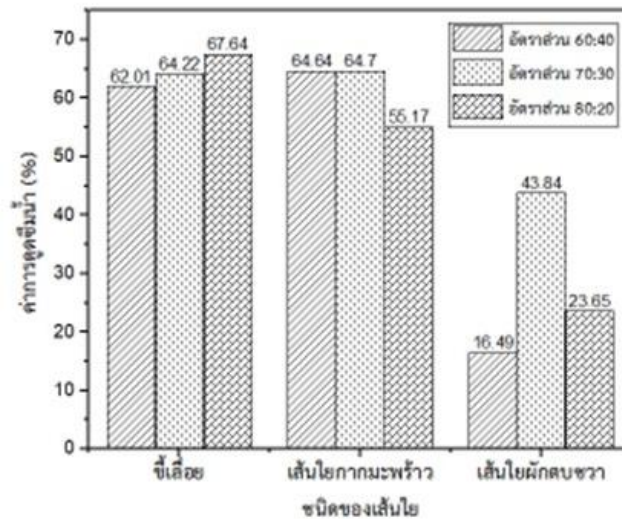
(c)

ภาพที่ 6 แผ่นฉนวนกันความร้อนที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่ 60:40

(a) ขี้เลื่อย (b) เส้นใยจากมะพร้าว และ (c) เส้นใยผักตบชวา

4. ค่าการดูดซึมน้ำและค่าการลามไฟ

ค่าการดูดซึมน้ำของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอยู่ในช่วง 16.40 – 67.64 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของเส้นใยแต่ละชนิดพบว่า เส้นใยจากผักตบชวามีค่าการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดในทุกอัตราส่วน โดยปริมาณเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 80:20 มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 16.49 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าร้อยละการลามไฟพบว่า ไม่เกิดการลามไฟ อาจจะเนื่องจากแผ่นฉนวนกันความร้อนที่ผลิตได้มีส่วนผสมของสารหน่วงไฟหรือบอแรกซ์



ภาพที่ 7 ค่าการดูดซึมน้ำของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผสมน้ำยางพาราในอัตราส่วนต่าง ๆ

อภิปรายผลการวิจัย

ฉนวนกันความร้อนในงานวิจัยนี้ผลิตขึ้นจากเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขี้เลื่อย เส้นใยจากมะพร้าว และเส้นใยผักตบชวา โดยนำเส้นใยดังกล่าวผ่านกระบวนการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เพื่อกัดพื้นผิวที่เป็นส่วนประกอบอื่นของพืชให้หลุดง่ายขึ้นและปรับโครงสร้างของเส้นใยให้จัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับตัวประสานน้ำยางพาราได้ดียิ่งขึ้น สำหรับอัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ อัตราส่วน 60:40 70:30 และ 80:20 โดยทุกอัตราส่วนสามารถขึ้นรูปเป็นฉนวนกันความร้อนได้ สำหรับค่าหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ว่าความหนาแน่นจะลดลงเมื่อปริมาณน้ำยางพาราลดลง ทั้งนี้ อาจจะเป็นเนื่องจากในช่วงที่ผสมเส้นใยกับน้ำยางพารานั้นเส้นใยมีการจัดเรียงตัวไม่ดี เส้นใยบางตำแหน่งอาจจะกระจุกตัวเป็นก้อน จึงทำให้น้ำยางพาราที่ใส่เข้าไปมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้จากผลการวิจัยในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยชนิดเดียวกันที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่แตกต่างกันจะมีความหนาแน่นที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลวิจัยดังกล่าวมีแตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่พบว่าเมื่ออัตราส่วนของน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ฉนวนกันความร้อนมีค่าหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย อันเนื่องมาจากน้ำยางพารามีความหนาแน่นสูงกว่าเส้นใยธรรมชาติ เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำยางพารา จึงส่งผลให้ความหนาแน่นสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน (Khamput, 2022)

สำหรับค่าการนำความร้อนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของพลังงานโดยการสั่นของโมเลกุล หากวัสดุชนิดใดยอมให้พลังงานความร้อนผ่านได้มาก วัสดุนั้นก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง ซึ่งหมายถึงวัสดุนั้นมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดีและถ้าวัสดุใดยอมให้พลังงานความร้อนผ่านได้น้อย นั่นหมายถึงวัสดุนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ สำหรับฉนวนกันความร้อนที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำนั้น จะยิ่งทำให้มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีมากยิ่งขึ้น (Anh & Pasztory, 2021) โดยค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจากงานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.0138-0.0315 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยธรรมชาติบางชนิด อาทิ ฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยแกนและข้อสับปะรด ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.0713 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (Sudprasert, 2018) ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยใบขิงมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.0737 - 0.0757 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (Tuntiwaranuruk & Lekjaisue, 2017) ฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยชั่งข้าวโพดมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.039 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (Monireh et al., 2023) และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าฉนวนใยแก้วซึ่งเป็นฉนวนกันความร้อนเชิงพาณิชย์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 0.032 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลเซียส (Sudprasert, 2018) โดยฉนวนกันความร้อนที่มีอัตราส่วนของเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางพาราเท่ากับ 80:20 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีความเหมาะสมในการผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนที่

ดีที่สุด เนื่องจากเส้นใยมีเนื้อวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีช่องว่างให้อากาศไหลผ่านได้ จึงสามารถเก็บรักษาพลังงานให้ถ่ายเทสู่อากาศภายนอกได้ (Maafa *et al.*, 2023) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่พบว่าฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ เนื่องจากมีเส้นใยเซลลูโลสและเป็นเส้นใยโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบหลักซึ่งไม่นำความร้อนและมีช่องว่างเล็ก ๆ ภายในเส้นใย โดยช่องว่างดังกล่าวทำหน้าที่เก็บอากาศไว้มีสภาพคล้ายเป็นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากความร้อนส่งผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศได้น้อย (Jiang *et al.*, 2020)

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับค่าความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่า ฉนวนกันความร้อนที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 60:40 และ 80:20 มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น (เปรียบเทียบความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเส้นใย 3 ชนิดที่อัตราส่วนเดียวกัน) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา เมื่อฉนวนมีความหนาแน่นมากจะทำให้พลังงานความร้อนสามารถผ่านฉนวนกันความร้อนได้มาก ซึ่งจะส่งผลให้ฉนวนกันความร้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงขึ้น (Saueprasearsit *et al.*, 2020) และเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับการทนต่อแรงดึง พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใยต่อน้ำยางพาราเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าลดลงและค่าการทนต่อแรงดึงก็มีค่าลดลงด้วยเช่นกัน อาจจะเนื่องจากเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้นทำให้ฉนวนดังกล่าวมีความพรุนมากขึ้นทำให้อากาศสามารถแทรกในภายในเส้นใยได้มากขึ้น ทำให้การไหลผ่านของอากาศดีขึ้นและเมื่อปริมาณของเส้นใยที่มากขึ้นทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยในการแทนที่ด้วยน้ำยางพาราลดลง ทำให้แรงต้านในการต้านแรงดึงตั้งฉากกับผิวหน้าวัสดุลดลงไปด้วย (Khamput, 2022) นอกจากนี้ ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยผักตบชวาที่อัตราส่วนเดียวกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำกว่าเส้นใยอื่น อาจเนื่องจากว่าเส้นใยผักตบชวามีรูพรุนที่กว้างจึงทำให้สามารถถ่ายเทอากาศได้ดี (He *et al.*, 2023)

สำหรับค่าการทนต่อแรงดึง เมื่อพิจารณาฉนวนกันความร้อนที่มีปริมาณน้ำยางพาราลดลง ทำให้ฉนวนกันความร้อนมีความแข็งแรงลดลงตามไปด้วย ส่งผลทำให้ค่าการทนต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าฉนวนกันความร้อนที่มีปริมาณน้ำยางพารามากกว่าซึ่งในงานวิจัยนี้ ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยกากมะพร้าวมีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดในทุกอัตราส่วน และปริมาณของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่อัตราส่วน 60:40 มีค่าการทนต่อแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.45 เมกกะพาสคัล ซึ่งมีค่าสูงกว่าฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยใบเตยปะหนัสนซึ่งมีค่าการทนต่อแรงดึงเท่ากับ 0.35 เมกกะพาสคัล (Tamhi & Tuntiwaranuruk, 2018) นอกจากนี้ เส้นใยกากมะพร้าวมีความเหนียวและความแข็งแรง จึงอาจเป็นสาเหตุที่ต้องใช้แรงในการดึงต่อพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยมากกว่าเส้นใยอื่น อีกทั้งเนื่องจากเส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นใยที่มีขนาดใหญ่และเป็นเส้นตรงไม่มีการหยิกงอ ทำให้เมื่อนำเส้นใยมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อนเส้นใยมีการเกาะกันได้น้อยทำให้มีความแข็งแรงลดลง

สำหรับค่าดูดซึมน้ำของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติ โดยทั่วไปนั้นจะมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูง (Thilagavathi *et al.*, 2019) ซึ่งจะทำให้ฉนวนกันความร้อนเกิดความชื้นได้ง่าย สำหรับฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยทุกอัตราส่วนมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในช่วง 16.40 – 67.64 เปอร์เซ็นต์ ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยซังข้าวโพดที่มีค่าเท่ากับ 92.51 เปอร์เซ็นต์ (Sakulpanich, 2016) สำหรับค่าการดูดซึมน้ำของฉนวนกันความร้อนตามมาตรฐาน มอก.867-2554 ที่ยอมรับได้ 2 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ (Jaktorn & Jiajitsawat, 2014) พบว่า มีเพียงฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยผักตบชวาที่มีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้ อาจจะเนื่องจากเส้นใยผักตบชวาเป็นเส้นใยที่มีรูพรุนมากเมื่อนำน้ำยางพาราที่ใช้เป็นตัวประสานในกระบวนการขึ้นแผ่นฉนวนกันความร้อนทำให้น้ำยางพาราสามารถแทรกและเข้าไปอุดช่องว่างที่เป็นเส้นใยได้เป็นอย่างดี ทำให้เมื่อนำแผ่นฉนวนกันความร้อนไปทดสอบการดูดซึมน้ำ ทำให้น้ำสามารถเข้าไปในช่องว่างเส้นใยได้น้อยกว่าฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยชนิดอื่น ๆ และสำหรับค่าการลามไฟของฉนวนกันความร้อนทุกอัตราส่วน พบว่า ไม่มีการลามไฟ เนื่องจากฉนวนกันความร้อนในงานวิจัยนี้ได้นำไปแช่ในสารละลายบอแรกซ์ ซึ่งบอแรกซ์เมื่อถูกเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาก่อตัวของสารประกอบโบรอนเป็นผิวเคลือบ (Glassy film) ซึ่งทำให้มีความสามารถในการยับยั้งการถ่ายเทมวลสาร (อากาศ) ในการเผาไหม้ ทำให้สามารถลดการแพร่กระจายของเปลวไฟได้ (Lojareonrat, 2006) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยธรรมชาติที่ไม่ก่อให้เกิดการติดไฟ ในขณะที่ฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยมะพร้าวมีอัตราการลามไฟเท่ากับ 20.49 มิลลิเมตรต่อนาที (Wansao *et al.*, 2021) และเมื่อเปรียบเทียบการลามไฟจากฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากโพลียูรีเทนโพนจะมีอัตราการลามไฟอยู่ระหว่าง 1-3 มิลลิเมตรต่อนาที (Ramphueiphad *et al.*, 2015)

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของฉนวนกันความร้อนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากผลการวิจัยพบว่า ฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากเส้นใยจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทุกชนิดและทุกอัตราส่วนมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ ฉนวนกันความร้อนจากเส้นใยผักตบชวาที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราที่ 60:40 เป็นเส้นใยที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่ำ มีค่าการดูดซึมน้ำที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่าการทนต่อแรงดึงที่สูงกว่าอัตราส่วนอื่นของเส้นใยผักตบชวาต่อน้ำยางพารา

สำหรับข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้ควรนำเส้นใยก่อนและหลังแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของเส้นใย ผู้วิจัยควรใช้เครื่องอัดไฮดรอลิคเพื่อให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันและควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของเส้นใยของแผ่นฉนวนกันความร้อนที่อัตราส่วนของเส้นใยต่อน้ำยางพาราในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบุคลากรของศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา สำหรับการอำนวยความสะดวกและสนับสนุน รวมถึงอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงเป็นไปได้อย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- Anh, L. & Pasztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44(102604), 1-16.
- Bumanis, G., Argalis, P., Sahmenko, G., Mironovs, D. Rucevskis, S. Korjamins, A. & Bajare, D. (2023). Thermal and sound insulation properties of recycled expanded polystyrene granule and gypsum composites. *Recycling*, 8, 1-12.
- Gonzalez-Torres, M., Perez-Lombard, L., Coronel, J., Maestre, I. & Yan, D. (2022). A review on building energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Report*, 8, 626-637.
- He, Q., Fei, H., Zhou, J., Liang, X. & Pan, Y. (2023). Utilization of carbonized water hyacinth for effective encapsulation and thermal conductivity enhancement of phase change energy storage materials. *Construction and Building Materials*, 372, 130841.
- Jensen, P., Belmonte, L., Solvang, M. & Yue, Y. (2023). Quantification of high temperature stability of mineral wool for fire-safe insulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 622, 122680.
- Jiang, D., Lv, S., Cui, S., Sun, S., Sonf, X., He, S., Zhang, J. & An, P. (2020). Effect of thermal insulation components on physical and mechanical properties of plant fibre composite thermal insulation mortar. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12996-13013.
- Jaktorn, C. & Jiajitsawat, S. (2014). Production of Thermal Insulator from Water Hyacinth Fiber and Natural Rubber Latex. *NU. International Journal of Science*, 11(2), 31-41.
- Jarunjaruphat, N. & Acharry, S. (2018). The particleboard manufacturing from agricultural waste. *The Journal of KMUTNB*, 28(2), 469-476. (in Thai)
- Kamran, M., Yan, Z., Ahmad, I., Jia, Q., Ghani, M., Chen, X., Chang, S., Li, T., Siddique, K., Fahad, S. & Hou, F. (2023). Assessment of greenhouse gases emission, global warming potential and net ecosystem economic benefits from wheat field with reduced irrigation and nitrogen management in an arid region of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 341, 108197.
- Khamput, P. (2022). Using rubber wood chips, rubber leaves and rubber latex as a heat insulating wall system. *Journal of Engineering, RMUTT*, 20(1), 13-24. (in Thai)
- Lojareonrat, W. (2006). The production of thermal insulation from rice straw fiber and natural rubber latex. *Kasetsart Engineering Journal*, 57(19), 32-45.



- Maafa, I., Abutaleb, A., Zouli, N., Zeyad, A., Yousef, A. & Ahmed, M. (2023). Effect of agricultural biomass wastes on thermal insulation and self-cleaning of fired bricks. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 4060-4073.
- Mehrzad, S., Taban, E., Soltani, P., Samaei, S. & Khavanin, A. (2022). Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings. *Building and Environment*, 108753.
- Mohamed, G., Mamoud, R., Fahim, S., Shaban, M., Abd El-Salam, H. & Mahmoud, M. (2021). Bio-composite thermal insulation materials based on banana leaves fibers and polystyrene: physical and thermal performance. *Journal of Natural Fibers*, 1-16.
- Monireh, F., Ebrahim, T., Parham, S., Umberto, B., Ali, K. & Vida, Z. (2023). Waste corn husk fibers for sounds absorption and thermal insulation applications: A step towards sustainable buildings. *Journals of Building Engineering*, 77(107468), 1-12.
- Ramphueiphad, S., Jaruwongwittaya, T., Toolthaisong, S., Amattirat, N. & Boonjue, A. (2015). Thermal insulator produced from polyurethane and hevea brasiliensis. *Farm Engineering and Automation Technology Journal*, 1(2), 75-81. (in Thai)
- Sakulpanich, A. (2016). The development of building thermal insulation from corncob and natural rubber latex. *Veridian E-Journal, Silpakorn University (Humanities, Social Sciences and Arts)*, 9(1), 1906-3431. (in Thai)
- Saueprasearsit, P., Boonchaleaw, C. & Junsiri, S. (2020). Technical feasibility for thermal insulation production from durian peel. *J Sci Technol MSU*, 39(6), 664-671. (in Thai)
- Sen, S., Singh, A., Bera, C., Roy, S. & Kailasam, K. (2022). Recent developments in biomass derived cellulose aerogel materials for thermal insulation application: a review. *Cellose*, 29, 4805-4833.
- Sudprasert, S. (2018). Simulation study of air-conditioning energy consumption and payback period of using thermal insulation in the detached houses. *Journal of The Faculty of Architecture King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*, 27(1), 193-204. (in Thai)
- Sun, J., Cai, F., Tao, D., Ni, Q. & Fu, Y. (2021). Enhanced thermal insulation of the hollow glass microsphere/glass fiber fabric textile composite material. *Polymers*, 13, 1-10.
- Tamhi, A. & Tuntiwaranuruk, U. (2018). Thermal conductivity of heat insulators produced from pandan fiber and water natural rubber. *King Mongkut's Agricultural Journal*, 36(3), 117-124. (in Thai)
- Thilagavathi, G., Muthukumar, N. & Neela Krishnanan, T. (2019). Development and characterization of pineapple fibre nonwovens for thermal and sound insulation applications. *Journal of Natural Fibers*, 17(10), 1-10.
- Tanguank, S., Wansao, C., Bunyarattaphan, N., Mahanil, W. & Marak, K. (2023). Thermal insulation board from rice husk and sawdust using natural rubber latex as binder. *Udon Thani Rajabhat University Journal of Sciences and Technology*, 11(2), 51-68. (in Thai)
- Tuntiwaranuruk, U. & Lekjaisue, C. (2017). Thermal properties for thermal insulation from earth ginger (*Etlingera littoralis* Gieseke). *King Mongkut's Agricultural Journal*, 35(1), 102-108. (in Thai)
- Wang, R., Lu, S., Zhai, X. & Feng, W. (2022). The energy performance and passive survivability of high thermal insulation buildings in future climate scenarios. *Build Simul*, 15, 1209-1225.
- Wansao, C., Bunyarattaphan, N. & Tanguank, S. (2021). Preparation of artificial wood from plastic and coir fiber. *Journal of Kanchanaburi Rajabhat University*, 10(2), 295-309. (in Thai)



- Zemla, M., Prociak, A., Michalowski, S., Cabulis, U., Kirpluks, M. & Simakovs, K. (2022). Thermal insulating rigid polyurethane foams with bio-polyol from rapeseed oil modified by phosphorus additive and reactive flame retardants. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*, 12386.
- Zhang, M., Wang, D., Li, T., Jiang, J., Bai, H., Wang, S., Wang, Y. & Dong, W. (2023). Multifunctional flame-retardant, thermal insulation, and antimicrobial wood-based composites. *Bio macromolecules*, *24*, 957-966.