

การพัฒนาฉนวนความร้อนจากต้นกกช้างผสมเปลือกไข่ไก่ Development of Thermal Insulators Made from Elephant Grass and Eggshell

จิราภรณ์ แก้วพรม¹ และ จารุณี เข้มพิลลา^{2*}

¹โรงเรียนโคกเจริญวิทยา

^{2*}สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

*E-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมผงเปลือกไข่ไก่ต่อประสิทธิภาพของฉนวนความร้อนจากเส้นใยต้นกกช้าง โดยผสมผงเปลือกไข่ในปริมาณร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ใช้กาวยาสูบฉีดเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตเป็นตัวประสาน ในปริมาณคงที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลผลิตฉนวนแบบแผ่นราบชั้นเดียวที่มีความหนาแน่น 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยกระบวนการอัดร้อนในแม่พิมพ์ ขนาด 450×450 ตารางมิลลิเมตร หนา 10 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 147 บาร์ นาน 5 นาที วิเคราะห์ค่าความหนาแน่น ความชื้น การพองตัวตามความหนา การดูดซับน้ำ ความต้านแรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น อัตราการลามไฟ และค่าการนำความร้อน ของชิ้นงานตามมาตรฐาน มอก. 876-2547 มาตรฐาน JIS A 5905-2003 และ ASTM C208-12 ผลการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าเป็น 414.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความชื้นมีค่าระหว่างร้อยละ 2.86–3.54 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ค่าการพองตัวตามความหนา และการดูดซับน้ำมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมเปลือกไข่ การเติมผงเปลือกไข่ร้อยละ 20-30 ส่งผลทำให้การดูดซับน้ำลดลงร้อยละ 74–81 การพองตัวตามความหนาลดลงร้อยละ 23–58 อัตราการลามไฟลดลงร้อยละ 41–50 เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมผงเปลือกไข่ อย่างไรก็ตาม การเติมผงเปลือกไข่มากกว่าร้อยละ 20 ส่งผลให้ความต้านแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงร้อยละ 30 และ 24 ตามลำดับ แต่ยังผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C208-12 การนำความร้อนของอัตราส่วนผสมเปลือกไข่ร้อยละ 20 มีค่าเป็น 0.062 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน ซึ่งเทียบได้กับแผ่นใยแก้วประเภทที่ 1 (0.063 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน) ตามมาตรฐาน มอก. 487-2526

คำสำคัญ: ผงเปลือกไข่ การดูดซับน้ำ การพองตัวตามความหนา

* Corresponding author, e-mail: jarunee.kh@rmu.ac.th

Abstract

The aim of this research was to study the effects of eggshell powder (ESP) addition on the insulation board performance prepared from elephant grass fiber (EGF) with 0, 10, 20, and 30 wt.% of ESP. The polymeric Methylenediphenyl Diisocyanate (pMDI) contents were fixed at 10 wt.% as a binder. Hot pressing was employed to produce single-layered plain thermal insulation boards with a target density of 400 kg/m^3 . The sample panels were placed in a $450 \times 450 \text{ mm}^2$ mold with a thickness of 10 cm and pressed at temperatures of 120°C for 5 min at a specific pressure of 147 bar. Density, moisture content, thickness swelling, water absorption, modulus of rupture, modulus of elasticity, fire spread rate, and thermal conductivity were investigated according to the standards of TIS 876-2547, JIS A 5905-2003, and ASTM C208-12. The results showed that the average density of the board was 414.6 kg/m^3 . The moisture content was 2.86–3.54%, which satisfied the TIS 876–2547. The thickness swelling and water absorption rate decreased as the ratio of eggshells increased. The replacement of eggshell content from 20 to 30% decreased water absorption, thickness swelling, and fire spread rate by 74–81%, 23–58%, and 41–50%, respectively, in comparison with 0% eggshell. Adding more than 20% eggshell powder replacement to elephant grass fiber caused a decrease in the modulus of rupture and modulus of elasticity of 30% and 24%, respectively, but met the requirements of the ASTM C208-12 standard. The thermal conductivity value of the board with 20% eggshell replacement was $0.062 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, which was in accordance with that of the glass wool board type 1 ($0.063 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) according to the TIS 487-2526 standard.

Keywords: Eggshell powder, Water absorption, Thickness swelling

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการค้นคว้าวิจัยอย่างกว้างขวางเพื่อค้นหาวัสดุธรรมชาติที่สามารถใช้งานทดแทนฉนวนใยแก้วและโฟมได้ โดยต้องเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งหาได้ง่ายภายในประเทศ โดยเฉพาะวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรจำพวก ลำต้นและซังข้าวโพด แกลบ ฟางข้าว เป็นต้น วัสดุที่น่าสนใจอีกประเภทหนึ่งคือ วัชพืชในพื้นที่การเกษตร พื้นที่สาธารณประโยชน์หรือพื้นที่รกร้าง เช่น ต้นกกช้าง ผักตบชวา หลู้แฝก ซึ่งต้นกกช้างเป็นวัชพืชที่มีเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบอยู่มาก เจริญเติบโตได้ดีทั่วทุกภูมิภาคในประเทศไทย การกำจัดต้นกกชำนี้นิยมเผาทำลายทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ แต่ลำต้นของต้นกกช้ายังฝังตัวอยู่ใต้ดินและทนต่อความร้อนได้จึงสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ ดังนั้นการนำต้นกกช้างมาผลิตเป็นฉนวนกันความร้อน โดยอาศัยจุดเด่นของต้นกกช้างคือ มีโครงสร้างภายในเป็นโพรงอากาศปิดขนาดเล็ก (Air Gap) ซึ่งทำหน้าที่ต้านทานการถ่ายโอนความร้อน

ร้อนจากภายนอกเข้าสู่สิ่งปลูกสร้างได้ จึงเป็นการช่วยควบคุมการเจริญเติบโต ช่วยเพิ่มมูลค่าของวัชพืชจำพวกต้นกกช้าง

ปัญหาที่พบของการผลิตถนนวนความร้อน แผ่นขึ้นไม้อัด ผนัง และฝ้าเพดาน ที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ คือ มีค่าการพองตัวตามความหนาและค่าการดูดซับน้ำที่ไม่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน ดังเช่น ผลการศึกษาการผลิตปาร์ติเกิลบอร์ดจากกากกาแฟ ซึ่งภายหลังทดสอบการดูดซับน้ำ พบว่ามีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานยุโรป [1] และพบปัญหานี้ในการผลิตปาร์ติเกิลบอร์ดจากเปลือกผลฝิ่นที่มีค่าการพองตัวตามความหนาสูงถึงร้อยละ 23-28 [2] เช่นเดียวกับการผลิตถนนวนความร้อนจากแผ่นใยไม้อัดพบว่า มีการพองตัวสูงกว่ายิปซัมบอร์ด จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงหรือมีโอกาสเปียกน้ำได้ง่าย [3] ทั้งนี้ได้มีแนวทางการวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพดังกล่าว โดยการใช้ตัวประสานประเภทฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์หรือ เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์ [2] ซึ่งเป็นสารสังเคราะห์ หรือการผสมเปลือกถั่วลิสง/เปลือกอัลมอนต์ที่มีสมบัติดูดซับความชื้น พบว่าการพองตัวตามความหนาและการดูดซับน้ำมีค่าลดลง [4] สอดคล้องกับการผลิตแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดจากเปลือกถั่วแมคคาเดเมียที่ใช้เรซินจากน้ำมันละหุ่งเป็นตัวประสาน พบว่าสมบัติการดูดซับน้ำและการพองตัวมีค่าต่ำกว่าปาร์ติเกิลบอร์ดจากเส้นใยไม้ถึง 1/4 เท่า [5] ดังนั้นแนวทางที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อแก้ปัญหาการพองตัวและการดูดซับน้ำที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ การผสมวัสดุที่มีสมบัติดูดซับความชื้นโดยส่งผลด้านลบต่อสมบัติด้านอื่นๆ ของวัสดุนั้นน้อยที่สุด วัสดุธรรมชาติที่มีสมบัติในการดูดซับความชื้นและดูดซับน้ำมีหลายชนิด ได้แก่ แกลบ ถ่าน เปลือกไข่ไก่ เปลือกหอย ฯลฯ เนื่องจากเปลือกไข่ไก่นั้นมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ช่วยในเรื่องของการดูดซับกลิ่นและความชื้น อีกทั้งหาได้ง่ายและมีปริมาณมาก จึงมีความน่าสนใจในการนำมาเพิ่มมูลค่าให้เกิดประโยชน์และช่วยกำจัดขยะในทางอ้อมเนื่องจากเปลือกไข่ไก่กลายเป็นขยะทิ้งจากครัวเรือนและจากอุตสาหกรรมอาหาร การกำจัดเปลือกไข่เหลือใช้ของอุตสาหกรรมโรงฟักไข่คือ การฝังกลบทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายและยังคงสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น กลายเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรค การปล่อยก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อให้เกิดกลิ่น ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ฝังกลบเนื่องจากเกิดการย่อยสลายได้โดยธรรมชาติ

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะผลิตถนนวนกันความร้อนจากวัชพืชคือ ต้นกกช้าง โดยวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ทางกลและทางความร้อน พร้อมทั้งปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของสมบัติทางกายภาพในด้านการพองตัวทางความหนาและการดูดซับน้ำของถนนวนด้วยการใช้เปลือกไข่ไก่ซึ่งเป็นวัสดุดูดซับความชื้นจากธรรมชาติ และเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนกับถนนวนจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ และถนนวนที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุ

วัสดุธรรมชาติที่ใช้ผลิตถนนวนกันความร้อนในงานวิจัยนี้ คือ ต้นกกช้าง (Elephant grass) และเปลือกไข่ไก่ (Eggshell) โดยเลือกต้นกกช้างที่มีความสูงในช่วง 1.5 - 2 เมตร ซึ่งจะเป็นต้นที่มีอายุประมาณ 2 ปี หลังจากนั้นนำต้นกกช้างและเปลือกไข่ไก่มาลดความชื้นด้วยการตากแดดให้แห้งตามธรรมชาติ ลดขนาดต้นกกช้าง

ด้วยเครื่องสับย่อยวัตถุดิบ และบดเปลือกไข่ไก่ให้ละเอียดเป็นผงดังรูปที่ 1 แล้วร่อนผ่านตะแกรง 200 เมช (Mesh) ขนาด 0.076 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 ลำต้นกกข้างแห้ง เปลือกไข่และผงเปลือกไข่

2.2 การผลิตแผ่นฉนวนด้วยกระบวนการอัดร้อน

ชั่งน้ำหนักเส้นใยต้นกกข้างและผงเปลือกไข่ไก่ตามอัตราส่วนในตารางที่ 1 เพื่อควบคุมความหนาแน่นให้มีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน (400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) โดยทุกอัตราส่วนใช้กาว pMDI ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำเส้นใยต้นกกข้างและผงเปลือกไข่ไก่เข้าเครื่องผสม พ่นกาว pMDI ด้วยเครื่องพ่นละอองกาว แล้วนำส่วนผสมโรยในแม่พิมพ์ที่มีพื้นที่หน้าตัด 450×450 ตารางมิลลิเมตร กดอัดเย็นเพื่อไล่อากาศออกจากแผ่นแล้วนำเข้าสู่กระบวนการอัดร้อน กำหนดสภาวะในการอัดร้อนคือ อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แรงดันในการอัด 147 บาร์ เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำแผ่นออกจากเครื่องอัดร้อน ปรับสภาพโดยวางตั้งในตะแกรงระบายอากาศดังรูปที่ 2 ภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อมเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ



รูปที่ 2 กระบวนการอัดร้อนแผ่นฉนวน

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของวัสดุผสมระหว่างต้นกกข้างกับผงเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วนที่	องค์ประกอบของวัสดุผสม (%)	
	ต้นกกข้าง	ผงเปลือกไข่ไก่
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30

2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางกล

นำแผ่นฉนวนภายหลังการปรับสภาพมาตัดเป็นชิ้นทดสอบตามขนาดที่มาตรฐานกำหนด ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น (Density) ปริมาณความชื้น (Moisture content) การพองตัวตามความหนา (Thickness swelling) การดูดซับน้ำ (Water absorption) และทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านแรงดัด (Modulus of rupture) และโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นฉนวนตันกักข้างผสมผงเปลือกไข่ไก่กับมาตรฐานของแผ่นฉนวนใยไม้อัดชนิดอัดราบ (มอก. 876-2547) และมาตรฐาน JIS A 5905-2003 ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่นที่กำหนดสมบัติของแผ่นใยไม้อัด (Fiber boards) และมาตรฐาน ASTM C208-12 (Standard specification for cellulosic fiber insulating board, standard C208-12) ซึ่งเป็นมาตรฐานของแผ่นฉนวนจากเส้นใยวัสดุจำพวกเซลลูโลอีก

2.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

2.4.1 อัตราการลามไฟ (Burning rate)

วิเคราะห์อัตราการลามไฟอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 635 : 2003 (Standard Test Method for Rate of Burning and/or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position) การทดสอบใช้ชิ้นงานทั้งหมด 12 ชิ้น ขนาด 10x10x1.5 เซนติเมตร จ่อเปลวไฟที่ปลายชิ้นงานตัวอย่างเป็นเวลา 30 วินาที เริ่มจับเวลาและหยุดเมื่อเหลือความยาวของชิ้นงานตัวอย่าง 15 มิลลิเมตร ทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ชิ้นงาน

2.4.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity)

ภายหลังการวิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราส่วนที่เหมาะสมจากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพทางกล และอัตราการลามไฟ จึงเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเพียง 1 อัตราส่วนมาทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตามมาตรฐาน ASTM C 518-10 (Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of The Heat Flow Meter Apparatus) โดยใช้เครื่องวัดค่าการนำความร้อน (Heat Flow Meter, HFM) ที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรมกรมวิทยาศาสตร์บริการ ทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบไปใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

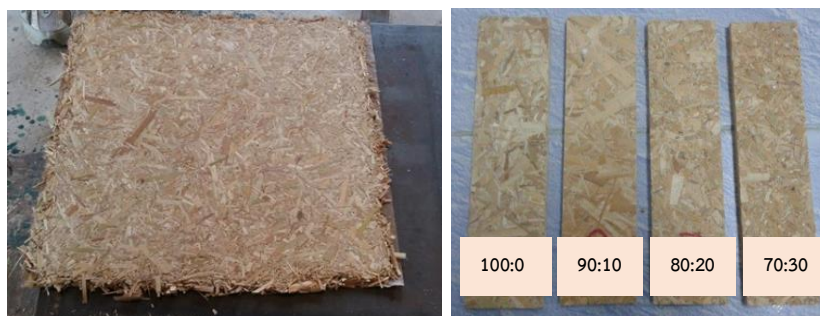
2.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ของสมบัติต่างๆ ของชิ้นทดสอบ ด้วยวิธี Duncan's multiple range test โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแต่ละอัตราส่วนจากข้อมูลการทดลอง 3 ซ้ำ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$)

3. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ผลการขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากตันกักข้างผสมเปลือกไข่ไก่

ผลการขึ้นรูปแผ่นฉนวนกันความร้อนจากต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่ทั้ง 4 อัตราส่วน พบว่าสามารถอัดขึ้นรูปได้ไม่มีกลิ่นหรือสีของการไหม้ แผ่นที่ได้มีลักษณะที่เรียบ ไม่มีกระจุกตัวของวัสดุอยู่บริเวณจุดใดจุดหนึ่งของแผ่นภายหลังการอัดร้อนและภายหลังปรับสภาพที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าแผ่นฉนวนไม่มีการโก่งตัวหรือบิดงอ แผ่นที่ผลิตได้มีขนาดประมาณ 400x400x10 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผ่นฉนวนกันความร้อนจากต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่

3.2 ผลการวิเคราะห์ ความหนาแน่น ความชื้น การดูดซับน้ำ และการพองตัวตามความหนา

ค่าความหนาแน่นนับเป็นข้อพิจารณาอันดับแรกก่อนทำการเปรียบเทียบสมบัติอื่นๆ เนื่องจากความหนาแน่นเป็นปัจจัยสำคัญต่อความเป็นฉนวน การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติการนำความร้อน และกระทบต่อสมบัติอื่นๆ ทั้งทางกายภาพและทางกล สำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องควบคุมกระบวนการขึ้นรูปแผ่นฉนวนให้มีความสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ซึ่งความหนาแน่นเฉลี่ยของแผ่นฉนวนกันความร้อนจากต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่ที่สัดส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 2 พบว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าเป็น 414.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และแต่ละอัตราส่วนมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากได้ควบคุมความหนาแน่นของแผ่นฉนวนด้วยการคำนวณสัดส่วนทั้งปริมาณของเส้นใยต้นกกข้างแห้งและตัวประสาน ทั้งก่อนและหลังการผสมกาวก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฉนวน

จากผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นเฉลี่ยในตารางที่ 2 พบว่า แผ่นฉนวนมีค่าความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 2.86-3.54 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน JIS A 5905-2003 และมาตรฐาน TIS 874-2547 การลดปริมาณเส้นใยหรืออีกนัยหนึ่งคือการเพิ่มปริมาณเปลือกไข่ไก่ พบว่าไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

การพองตัวตามความหนาของฉนวนกันความร้อนจากต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่ ทุกอัตราส่วนมีค่าผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยพบแนวโน้มการลดลงของค่าการพองตัวตามความหนาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของเปลือกไข่ไก่มากกว่าร้อยละ 20 เนื่องจากเปลือกไข่ไก่นั้นมีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ช่วยป้องกันการดูดซับความชื้นจึงดูดซับน้ำได้น้อย ค่าการพองตัวของแผ่นฉนวนจึงลดลง เมื่อพิจารณาถึงการลดลงของค่าการพองตัวตามความหนาที่อัตราส่วนการผสมผงเปลือกไข่ร้อยละ 20 และ 30 สอดคล้องกับการลดลงของการพองตัวสูงถึงร้อยละ 74.5 และ 81.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของฉนวนจากต้นกกข้างผสมผงเปลือกไข่ที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ต้นกกข้างต่อผงเปลือกไข่	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	ความชื้น (ร้อยละ)	การดูดซับน้ำ (ร้อยละ)	การพองตัว (ร้อยละ)
100: 0	416.14 ^a ± (8.50)	3.54 ^a ± (0.16)	24.78 ^a ± (1.67)	2.43 ^a ± (0.16)
90: 10	413.40 ^a ± (7.32)	3.49 ^a ± (0.60)	22.11 ^a ± (3.08)	2.33 ^{ab} ± (0.15)
80: 20	412.27 ^a ± (11.85)	3.12 ^a ± (0.04)	6.30 ^b ± (1.28)	1.86 ^b ± (0.29)
70: 30	414.66 ^a ± (10.77)	2.86 ^a ± (0.08)	4.51 ^b ± (0.09)	1.03 ^c ± (0.15)
มาตรฐาน TIS 874-2547	400 - 900	3-14	≤12	≤12
มาตรฐาน JIS A 5905-2003	400	5-13	-	≤10
ASTM C208-12	160-497	-	-	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวสทมภ์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P>0.05$)

จากผลวิเคราะห์ค่าการดูดซับน้ำของฉนวนกันความร้อนจากต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่ (ตารางที่ 2) พบว่าฉนวนกันความร้อนในอัตราส่วนเส้นใยต้นกกข้างต่อผงเปลือกไข่ไก่เป็น 100 : 0 และ 90 : 10 มีค่าการดูดซับน้ำไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ขณะที่อัตราส่วน 80 : 20 และ 70 : 30 มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สังเกตพบแนวโน้มการลดลงของค่าการดูดซับน้ำเมื่อลดปริมาณเส้นใยต้นกกข้าง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องด้วยองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยต้นกกข้าง [6] มีปริมาณ เซลลูโลสร้อยละ 63.0 ซึ่งเซลลูโลสธรรมชาติมีสมบัติดูดซับความชื้นได้ดีเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของเส้นใยมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงมีความสามารถในการดูดซับความชื้น ดังนั้น การลดปริมาณเส้นใยในอัตราส่วน 80 : 20 และ 70 : 30 จึงช่วยลดปริมาณดูดซับน้ำลงได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งการแทนที่เส้นใยด้วยการเพิ่มปริมาณผงเปลือกไข่ยังช่วยปิดความพรุนระหว่างเส้นใยทั้งบริเวณผิวภายนอกและภายในแผ่นฉนวนเนื่องจากเปลือกไข่เป็นผงละเอียด มีขนาดเล็กกว่าเส้นใยต้นกกข้าง ดังนั้นจึงแทรกตัวเข้าไปตามช่องว่างระหว่างเส้นใย ช่วยลดการแทรกซึมของน้ำเข้าไปในแผ่นฉนวนได้ และสำคัญอย่างยิ่งคือผงเปลือกไข่มีสมบัติดูดซับความชื้นได้น้อย [7]

3.3 ผลการวิเคราะห์ความต้านแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่น

จากผลการทดสอบความต้านแรงดัดของแผ่นฉนวนต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่อดังตารางที่ 3 พบว่าความต้านแรงดัดมีค่าระหว่าง 5.29-7.52 เมกกะปาสคาล ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C208-12 ทุกอัตราส่วน และพบว่าอัตราส่วนต้นกกข้างต่อเปลือกไข่ไก่อเป็น 100:0 และ 90:10 มีค่าความต้านแรงดัดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งพบแนวโน้มเช่นเดียวกันนี้กับอัตราส่วน 80:20 และ 70:30 อาจกล่าวได้ว่าการเติมผงเปลือกไข่จะส่งผลต่อการลดลงของความต้านแรงดัดของแผ่นฉนวนเมื่อผสมผงเปลือกไข่ในอัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 10 การลดลงของค่าความต้านแรงดัดแปรผันตามสัดส่วนการผสมเปลือกไข่ที่มากขึ้นเนื่องจากผงเปลือกไข่ไก่อสามารถเข้าไปแทรกตัวในเส้นใยต้นกกข้าง ทำให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยลดลงจึงส่งผลต่อการรับแรงที่ลดลง ความต้านแรงดัดจึงมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นฉนวนต้นกกข้างผสมเปลือกไข่ไก่อ (ตารางที่ 3) พบว่าอัตราส่วนต้นกกข้างต่อเปลือกไข่

เป็น 70:30 ส่งผลต่อการลดลงของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นคือการเติมผงเปลือกไข่มากกว่าร้อยละ 20 ส่งผลให้โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นฉนวนมีค่าลดลง

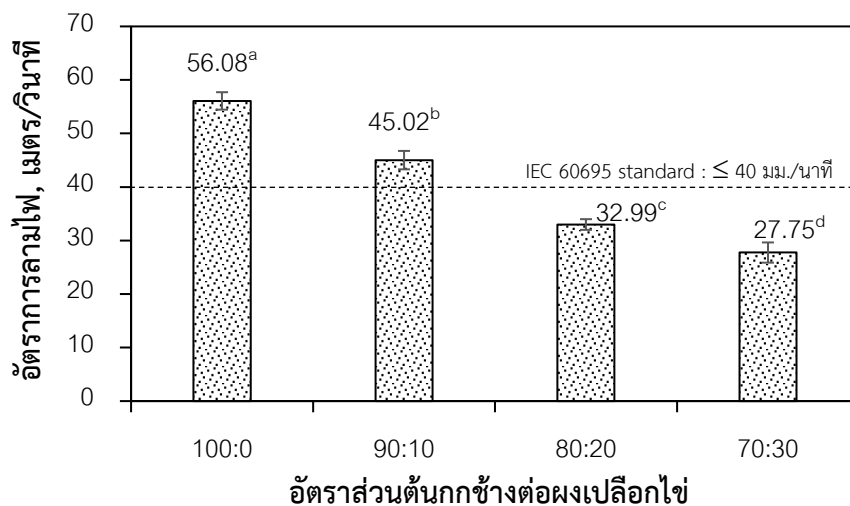
ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของฉนวนจากต้นกกข้างผสมผงเปลือกไข่ที่อัตราส่วนต่างๆ

อัตราส่วน ต้นกกข้างต่อผงเปลือกไข่	ความต้านแรงดัด (เมกะปาสคาล)	โมดูลัสยืดหยุ่น (เมกะปาสคาล)
100: 0	$7.52^a \pm (0.13)$	$302.54^a \pm (37.68)$
90: 10	$6.94^a \pm (0.43)$	$254.26^{ab} \pm (28.28)$
80: 20	$5.37^b \pm (0.21)$	$249.05^{ab} \pm (35.36)$
70: 30	$5.29^b \pm (0.75)$	$230.56^b \pm (29.83)$
ASTM C208-12	0.97-2.76	-

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในแนวนอน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P > 0.05$)

3.4 ผลการวิเคราะห์อัตราการลามไฟ

จากผลการทดสอบอัตราการลามไฟ (รูปที่ 4) พบว่า การเติมผงเปลือกไข่เป็นส่วนผสมในการผลิตฉนวนจากต้นกกข้างในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อการลดลงของค่าอัตราการลามไฟอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งส่งผลให้มีเพียง 2 อัตราส่วน คือ 80 : 20 (27.75 มิลลิเมตรต่อนาที) และ 70 : 30 (32.99 มิลลิเมตรต่อนาที) ที่มีค่าอัตราการลามไฟผ่านเกณฑ์มาตรฐาน IEC 60695 (1999) ซึ่งระบุให้ฉนวนที่มีความหนา 3-13 มิลลิเมตร ต้องมีค่าอัตราการลามไฟไม่เกิน 40 มิลลิเมตรต่อนาที ดังนั้นอัตราส่วนทั้งสองดังกล่าวจึงผ่านเกณฑ์มาตรฐาน การลดลงของอัตราการลามไฟสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณเส้นใยจากต้นกกข้างและการเพิ่มขึ้นของผงเปลือกไข่ การเพิ่มสัดส่วนของปริมาณผงเปลือกไข่ไปส่งผลต่อการลดลงของอัตราการลามไฟเนื่องด้วยสมบัติของเปลือกไข่ไก่ที่มีองค์ประกอบเคมีซึ่งประกอบด้วย แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ร้อยละ 95 คอลลาเจน โพลีแซคคาไรด์ซัลเฟต และอื่นๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , S, Cl, P, Cr_2O_3 , MnO อีกร้อยละ 5 เมื่อทดสอบการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดการก่อกวนของ CO_2 ในระหว่างการสลายตัวของ CaCO_3 [8] ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นฉนวนและช่วยลดพลักซ์การถ่ายโอนความร้อนและลดการแพร่กระจายของออกซิเจนเข้าสู่แผ่นฉนวนส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ลดลง



รูปที่ 4 อัตราการลามไฟของฉนวนจากต้นกกช้างผสมผงเปลือกไข่ที่อัตราส่วนต่างๆ

3.5 ผลการวิเคราะห์การนำความร้อน

แผ่นฉนวนจากต้นกกช้างผสมเปลือกไข่ไก่ที่อัตราส่วน 70 : 30 (ความหนาแน่น 414.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าความต้านทานความร้อนเป็น 0.062 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน และ 0.158 ตารางเมตร·เคลวินต่อวัตต์ ตามลำดับ ซึ่งปกติวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า 0.07 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน จะสามารถใช้เป็นฉนวนได้ [9] และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนกับมาตรฐาน ASTM C208-12 พบว่าสอดคล้องกับข้อกำหนดและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งระบุให้แผ่นฉนวนจากเส้นใยเซลลูโลสที่มีความหนาแน่นระหว่าง 160-497 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาของแผ่นฉนวนมีค่า 11-76 มิลลิเมตร ต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงสุดของฉนวนระหว่าง 0.055-0.072 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน โดยมีค่าแตกต่างกันไปตามวัสดุประสงค์ในการนำฉนวนไปใช้งาน เช่น ฉนวนใต้หลังคา ฉนวนเพดาน หรือฉนวนผนัง

ความหนาแน่นของฉนวนเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติความเป็นฉนวนและการลดความร้อนฉนวนที่มีความหนาแน่นน้อยจะมีสมบัติเป็นฉนวนที่ดีกว่าฉนวนที่มีความหนาแน่นมาก เนื่องจากความหนาแน่นที่มากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนมากขึ้น ดังนั้นการเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนกับฉนวนจากเส้นใยธรรมชาติชนิดอื่นๆ และฉนวนที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์จึงทำการเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ ที่มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 4) ซึ่งแผ่นฉนวนจากต้นกกช้างผสมเปลือกไข่ไก่มีค่าการนำความร้อนสอดคล้องกับฉนวนจากเส้นใยกกช้างซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 0.0606 วัตต์ต่อเมตร·เคลวิน ที่ความหนาแน่น 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [10] ขณะที่แผ่นฉนวนในงานวิจัยนี้มีค่าความหนาแน่นมากกว่าแผ่นปาร์ติเกิลบอร์ดจากขี้ข้าวโพด [11] และฉนวนจากเกล็ด [12] แต่พบว่ามีค่าการนำความร้อนต่ำกว่าฉนวนดังกล่าว และจากการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนจาก

ต้นกกช้างผสมผงเปลือกไข่ที่อัตราส่วน 70 : 30 กับมาตรฐานอุตสาหกรรมแผ่นใยแก้ว (มอก. 487-2526) พบว่ามีค่าเทียบเคียงได้กับแผ่นใยแก้วประเภทที่ 1

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่างๆ

ชนิดของวัสดุ	ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน วัสดุต่อ เมตร·เคลวิน	อ้างอิง
ต้นกกช้าง	200-400	0.0438-0.0606	[10]
ปาร์ติเกิลบอร์ดซังข้าวโพด	171-334	0.101	[11]
เกลบ	378±13	0.080	[12]
ก้านฝ้าย	400	0.078	[13]
กาบมะพร้าวสับและขานอ้อย	350	0.068	[14]
ต้นกกช้างและผงเปลือกไข่	414.6	0.062	ผลจากการศึกษา
แผ่นใยแก้วประเภทที่ 1	-	0.063	มอก. 487-2526
แผ่นใยแก้วประเภทที่ 2	-	0.042-0.066	มอก. 487-2526
แผ่นใยแก้วประเภทที่ 3	-	0.047	มอก. 487-2526

4. สรุปผลการศึกษา

การผสมผงเปลือกไข่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 10 ส่งผลต่อสมบัติของแผ่นฉนวนความร้อนจากเส้นใยต้นกกช้าง โดยพบการลดลงของค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 70-80 และค่าการพองตัวตามความหนามีค่าลดลงในช่วงร้อยละ 20-50 นอกจากนี้ยังช่วยเสริมให้มีค่าอัตราการลามไฟผ่านมาตรฐาน IEC 60695 (1999) และค่าการนำความร้อนสามารถเทียบเคียงได้กับแผ่นใยแก้วประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 487-2526 อีกด้วย และแม้จะส่งผลต่อการลดลงของสมบัติทางกลอยู่บ้างแต่ยังคงมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C208-12

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bekalo, S. A., & Reinhardt, H.-W. (2010). Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. *Materials and Structures*. 43(8): 1049–1060. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9565-0>
- [2] Keskin, H., Kucuktuevek, M., & Guru, M. (2015). The potential of poppy (*Papaver somniferum* Linnaeus) husk for manufacturing wood-based particleboards. *Construction and Building Materials*. 95: 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.160>

- [3] Triwong, P. (2012). Application of Thermal Insulation Ceiling by Fiberboard. *Journal of Industrial Technology*. 8(1) : 79–84.
- [4] Pirayesh, H., Khanjanzadeh, H., & Salari, A. (2013). Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard. *Composites Part B: Engineering*. 45: 858–863.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.008>
- [5] Wechsler, A., Zaharia, M., Crosky, A., Jones, H., Ramírez, M., Ballerini, A., Nuñez, M., & Sahajwalla, V. (2013). Macadamia (*Macadamia integrifolia*) shell and castor (*Ricinus communis*) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood-based particleboard. *Materials and Design*. 50: 117–123.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.008>
- [6] Suriyapunpong, D. (2014). Isolation and characterization of cellulose from water hyacinth, sugar cane bagasse, and narrow leaf cattail [Srinakharinwirot University]. <http://ir.swu.ac.th/jspui/handle/123456789/2631>
- [7] Tseghai, G. B., Berhe, B., & Wakjira, Y. (2019). Producing Fire Retardant Cotton Fabric Using Chicken Eggshell. *Journal of Textile Science & Engineering*. 9: 1000396.
- [8] Yew, M. C., Ramli Sulong, N. H., Yew, M. K., Amalina, M. A., & Johan, M. R. (2015). Eggshells: A novel bio-filler for intumescent flame-retardant coatings. *Progress in Organic Coatings*. 81: 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.01.003>
- [9] Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 4: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- [10] Luamkanchanaphan, T., Chotikaprakhan, S., & Jarusombuti, S. (2012). A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers. *APCBEE Procedia*. 1: 46–52.
<https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.009>
- [11] Paiva, A., Pereira, S., Sá, A., Cruz, D., Varum, H., & Pinto, J. (2012). A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards. *Energy and Buildings*. 45: 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>
- [12] Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., & Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*. 135: 238–245.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.053>
- [13] Zhou, X., Zheng, F., Li, H., & Lu, C. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*. 42(7): 1070–1074.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>
- [14] Vitrone, F., Ramos, D., Ferrando, F., and Salvadó, J. (2021). Binderless fiberboards for sustainable construction. Materials, production methods and applications. *Journal of Building Engineering*. 44: 102625. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102625>