การศึกษาประสิทธิภาพเชิงทดลองของแผ่นลดอุณหภูมิทางเลือกที่ผลิตจากถ่านชีวภาพสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย

Experimental Study of the Efficiency of Alternative Biochar-based Cooling Pads for Evaporative Cooling System

สมพร กงนะ[1] คมกฤษณ์ ชูเรือง[2] กัญลยา มิขะมา[3] และเสาวคนธ์ เหมวงษ์[3*]

Somporn Kongna[1] Komkrit Chooruang[2] Kanlaya Mikhama[3] and Saowakon Hemwong[3*]

[1] สาขาวิชานวัตกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

[1] Agricultural Innovation and Technology, Faculty of Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University, Mueang, Nakhon Phanom 48000

[2] สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

[2] Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Nakhon Phanom University, Mueang, Nakhon Phanom 48000

[3] สาขาวิชาพืชศาสตร์ คณะเกษตรและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยนครพนม อำเภอเมือง จังหวัดนครพนม 48000

[3] Plant Science, Faculty of Agriculture and Technology, Nakhon Phanom University, Mueang, Nakhon Phanom 48000

* Corresponding author: saowakon@hotmail.com

(Received: 22 December 2023; Revised: 29 March 2024; Accepted: 18 April 2024)

Abstract

Currently, the evaporative cooling pads are produced from kraft paper type with high cost and short lifetime. Using biochar, a material produced from local waste, is an alternative for agriculture. Therefore, this research aims to compare the efficiency of cooling pads produced from biochar for evaporative cooling systems. The study used two test boxes of different sizes with three types of biochar i.e., rice husk, eucalyptus wood, and bamboo wood biochar. These were compared with paper cooling pads, controlling wind speed and water flow rate. Temperature and relative humidity were measured before and after passing through the cooling pads. The study found that eucalyptus wood biochar could achieve the highest average temperature reduction of 7.06 degrees Celsius and maintain a constant relative humidity (74.27%), similar to paper (82.11%) by an appropriate value ranging from 40-90%. Analyzing the efficiency of evaporative cooling (Saturation efficiency), it was observed that eucalyptus wood and bamboo wood biochar had performance close to paper for size 1. (W 20 x L 20 cm). However, for size 2 (W 40 x L 40 cm), the efficiency of bamboo wood biochar decreased, while eucalyptus wood biochar remained constant, and increased for paper from the cooling pad. However, cost efficiency analysis with result that eucalyptus wood biochar had a lower cost efficiency compared to cooling pads made from paper. Therefore, this study suggests that eucalyptus wood biochar is suitable for producing cooling pads in evaporative cooling systems. It can absorb water, has good ventilation, a long lifetime, and fungal control agents, which affect plants, animals, and workers in a greenhouse. Therefore, biochar also contributes to long-term environmental problem-solving through biodegradability and soil preservation. Additionally, it helps reduce production costs by recycling materials within the community for new benefits.

Keywords: Agricultural waste, wood, rice husk, renewable resource

บทคัดย่อ

แผ่นลดอุณหภูมิที่ใช้ในโรงเรือนปัจจุบันผลิตมาจากกระดาษคราฟต์ ซึ่งมีต้นทุนสูง และอายุการใช้งานสั้น การใช้ถ่านชีวภาพซึ่งผลิตจากวัสดุเหลือใช้ในชุมชนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการทำการเกษตร ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นลดอุณหภูมิที่ผลิตจากถ่านชีวภาพสำหรับระบบทำความเย็นแบบระเหย โดยใช้กล่องทดสอบระบบทำความเย็นแบบระเหย จำนวน 2 ขนาด โดยใช้ถ่านชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านแกลบ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้ไผ่ เปรียบเทียบกับแผ่นลดอุณหภูมิจากกระดาษ โดยควบคุม ความเร็วลม และอัตราการไหลของน้ำให้มีค่าคงที่ ทำการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ก่อนและหลังผ่านแผ่นลดอุณหภูมิ ผลการศึกษา พบว่า ถ่านไม้ยูคาลิปตัส สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยได้สูงสุด 7.06 องศาเซลเซียส และสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ได้คงที่ (74.27%) เช่นเดียวกันกับกระดาษ (82.11%) โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 40 - 90% ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย พบว่า แผ่นลดอุณหภูมิจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ไผ่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผ่นลดอุณหภูมิจากกระดาษในขนาดที่ 1 (กว้าง 20 x ยาว 20 เซนติเมตร) แต่เมื่อเพิ่มขนาดเป็น 2 เท่า (ขนาดที่ 2) พบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของไม้ไผ่ลดลงแต่ถ่านไม้ยูคาลิปตัสคงที่ ในขณะที่กระดาษมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุน พบว่า ถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นลดอุณหภูมิที่ทำจากกระดาษ ดังนั้น จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นแผ่นลดอุณหภูมิในระบบทำความเย็นแบบระเหยซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำ มีรูพรุนระบายอากาศได้ดี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ป้องกันเชื้อราซึ่งมีผลต่อพืช สัตว์ และผู้ที่ปฏิบัติงานในโรงเรือน พร้อมกับแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมระยะยาวโดยอาศัยความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพได้และมีประสิทธิภาพในการบำรุงดิน นอกจากนี้ยังช่วยลดต้นทุนการผลิตจากการนำวัสดุในชุมชนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่

คำสำคัญ: วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ไม้ แกลบ ทรัพยากรที่นำกลับมาใช้ใหม่

คำนำ

การพัฒนาอุตสาหกรรมทั่วโลกทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่สูงขึ้น ในขณะที่ทรัพยากรธรรมชาติมีอยู่อย่างจำกัดส่งผลให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจำเป็นต้องลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการของเสียและใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่าด้วยการจัดการเชิงนโยบายเศรษฐกิจหมุนเวียน (Yang *et al*., 2023) โดยในประเทศไทยเองจะมีเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือที่เรียกว่า ชีวมวล (biomass) ประมาณปีละ 60 ล้านตัน (Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, 2021) การจัดการชีวมวลเหล่านี้ทางการเกษตรใช้วิธีการเผา การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล (Khidhathong *et al*., 2014) การผลิตถ่านอัดแท่ง (Visittiwong, 2021) รวมถึงการนำมาผลิตถ่านชีวภาพ (Hemwong, 2014)

ถ่านชีวภาพ เป็นแหล่งคาร์บอนสูง (Joseph *et al*., 2010) ผลิตด้วยกระบวนการไพโรไรซิส (Pyrolysis) ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนหรือปริมาณออกซิเจนที่จำกัด ที่อุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดถ่านชีวภาพที่มีความทนทานมากขึ้น (Haider, 2021; Armah, 2022) มีปริมาณพรุนสูงทั้งขนาดใหญ่ (macropore) ขนาดกลาง (mesopore) และขนาดเล็ก (micropore) ที่เป็นส่วนสำคัญในการกักเก็บน้ำ (Batista *et al*., 2018) รวมถึงความสามารถในการดูดซับมลพิษอนินทรีย์และอินทรีย์ปนเปื้อน นอกจากนี้ถ่านชีวภาพยังมีค่า pH สูง (ค่า pH อยู่ระหว่าง 4 - 12) (Hemwong, 2013; Tomczyk *et al*., 2020) ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราลดลง (Yamanaka, 2003) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้การนำถ่านชีวภาพมาผลิตแผ่นลดอุณหภูมิ (cooling pad) ทางเลือกสำหรับใช้กับระบบทำความเย็นแบบระเหย (evaporative cooling system; EVEP) ในโรงเรือนปลูกพืชและโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำ มีรูพรุนระบายอากาศได้ดี มีความสามารถในการต้านทานน้ำกร่อย ลดการเกาะของแร่ธาตุที่มาจากน้ำซึ่งก่อให้เกิดสาหร่าย ลดฝุ่นที่สะสม และมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน นำมาผลิตเป็นแผ่นลดอุณหภูมิทางเลือกซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญในการแก้ไขปัญหาแผ่นลดอุณหภูมิจากกระดาษที่ใช้กันในปัจจุบัน พบว่า หากมีการบำรุงรักษาที่ดีมีอายุการใช้งานอยู่ที่ 3 - 5 ปี ในขณะที่ระบบมีความดันและ

ประสิทธิภาพการอิ่มตัวลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของแผ่นใหม่ในรุ่นเดียวกัน (Franco-Salas *et al.*, 2019) นอกจากนี้ประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแผ่นลดอุณหภูมิกระดาษนี้จะเสื่อมลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการใช้น้ำกร่อย แร่ธาตุ สาหร่าย และฝุ่นที่สะสมอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการอุดตันของแผ่นลดอุณหภูมิทำให้อายุการใช้งานสั้นลง (Aziz *et al.*, 2018) ในขณะที่ถ่านชีวภาพมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงดินได้เนื่องจาก ถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพในการบำรุงดิน ช่วยเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืช รวมทั้งช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของดิน ลดความหนาแน่นรวม และเพิ่มความจุในการอุ้มน้ำให้ดินได้อีกด้วย (Hemwong, 2013) นอกจากนี้การใช้ถ่านชีวภาพเป็นอีกแนวทางในการทำการเกษตรแบบฟื้นฟู (regenerative agriculture; RA) ตามแนวทางในการทำเกษตรในอนาคตอีกด้วย (Schreefel *et al.*, 2020) ในขณะที่กระดาษเพียงย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเท่านั้น การนำวัสดุเหลือใช้ในชุมชนกลับมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงเป็นแนวทางสำคัญในการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน

ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพเชิงทดลองของแผ่นลดอุณหภูมิที่ผลิตจากถ่านชีวภาพเปรียบเทียบกับแผ่นลดอุณหภูมิที่ผลิตจากกระดาษสำหรับเป็นวัสดุทางเลือกให้กับเกษตรกรที่ใช้ระบบทำความเย็นแบบระเหยในโรงเรือนผลิตพืชและโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ต้นทุนต่ำ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาและบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดในปัจจุบันให้สามารถใช้งานได้อย่างยั่งยืนได้ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

การผลิตถ่านชีวภาพและออกแบบแผ่นลดอุณหภูมิ

การผลิตถ่านชีวภาพ

การทดลองใช้วัตถุดิบ 4 ประเภท ได้แก่ 1) กระดาษคราฟต์ (Kraft Paper; Type 7090) 2) ถ่านแกลบ (Rice husk biochar; RHC) 3) ถ่านไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus wood biochar; EC) และ 4) ถ่านไม้ไผ่ (Bamboo biochar; BC) โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่า Least Significant Difference (LSD) จากการทำ 3 ซ้ำ

การผลิตถ่านแกลบทำการเผาโดยใช้เตาเผาแบบดั้งเดิมโดยอ้างตามวิธีการของ Hemwong *et al.* (2021) ส่วนไม้ไผ่และไม้ยูคาลิปตัสนำมาตัดให้มีความยาวประมาณ 25 เซนติเมตร ตากแห้งแล้วนำไปเผาในเตาเผาถ่านชีวภาพที่ทำมาจากถังเหล็กขนาด 100 ลิตร ทำการจุดไฟและเผาโดยในกระบวนการเผาทำการวัดอุณหภูมิเป็นช่วง ๆ และอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้ในการเผาถ่านแกลบ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้ไผ่ เท่ากับ 189 440 และ 463 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เวลาในการเผาถ่านแกลบ ใช้เวลา 4 ชั่วโมง ส่วนถ่านไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้ไผ่ ใช้เวลาเผา 3 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาของการเผาเปลี่ยนไปตามชนิดและปริมาณของวัสดุที่ทำการเผา (Figure 1) โดยมีต้นทุนการผลิตของวัสดุเป็นดังแสดงใน Table 1



Figure 1 The materials studied are a) Kraft paper (Paper), b) Rice husk biochar (RHC), c) Eucalyptus biochar (EC) and d) Bamboo biochar (BC)

Table 1 Cost of production for each 20 x 20 cm^2 cooling pad material in this experiment

List	Material type			
	Paper	RHC	EC	BC
Raw material (Bath/m^2)	1,389	-	-	-
Biochar stoves (Bath)*	-	15	150	150
Plastic net (Bath/m^2)	-	43	43	43
Total	1,389	58	193	193

*fixed cost

นำวัสดุทั้ง 4 ชนิด วัดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ประกอบด้วย โครงสร้างของถ่านโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ค่าพื้นที่ผิว (surface area) (ตารางเมตร/กรัม) โดยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) ค่าปริมาตรของรูพรุน (pore volume) (ซีซีต่อกรัม) โดยวิธี total pore volume และค่าขนาดรูพรุน (pore size) โดยวิธี BJH method adsorption pore radius

การออกแบบแผ่นลดอุณหภูมิ

เมื่อทำการเผาเรียบร้อยแล้วนำถ่านที่ได้จากการเผามาบดให้มีขนาดเล็กและร่อนด้วยตะแกรงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยกเว้นถ่านแกลบเตรียมสำหรับทำแผ่นลดอุณหภูมิ แล้วนำถ่านที่เตรียมไว้บรรจุใส่ในแผ่นลดอุณหภูมิ 2 ขนาด คือ ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร x ยาว 20 เซนติเมตร x หนา 6 เซนติเมตร (ขนาดที่ 1) (Aziz *et al.*, 2018) และขนาดกว้าง 40 เซนติเมตร x ยาว 40 เซนติเมตร x หนา 6 เซนติเมตร (ขนาดที่ 2) เช่นเดียวกับแผ่นลดอุณหภูมิแบบกระดาษ (Figure 2) โดยแผ่นลดอุณหภูมิจากถ่านมีความหนาแน่น 400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Salins *et al.*, 2021) ใช้ตาข่ายพลาสติกหกเหลี่ยมด้านข้างที่มีขนาดช่องตาข่าย 0.2 มิลลิเมตร กั้นเป็นผนังของแผ่นลดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการหลุดของถ่านออกจากแผ่นลดอุณหภูมิ (Kouchakzadeh and Brati, 2013)

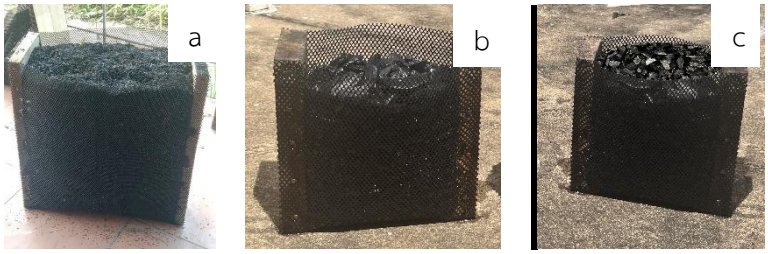


Figure 2 The cooling pads are made from a) Rice husk biochar (RHC) b) Eucalyptus biochar (EC) and c) Bamboo biochar (BC)

หลังจากเตรียมแผ่นลดอุณหภูมิแต่ละชนิดเรียบร้อยแล้วนำมาทดสอบการดูดซับน้ำก่อนและหลังการทำความเย็น โดยวิธีการชั่งน้ำหนักแผ่นลดอุณหภูมิขณะแห้งจากวัสดุชนิดต่าง ๆ นำวัสดุไปแช่ลงในน้ำเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำแผ่นลดอุณหภูมิที่ได้ไปแขวนตากลมจนน้ำไม่หยด ชั่งน้ำหนักสุดท้าย และเปรียบเทียบส่วนต่างของน้ำหนัก ทำ 3 ซ้ำต่อวัสดุ แล้วคำนวณหาการดูดซับน้ำของแผ่นลดอุณหภูมิแต่ละชนิด (water holding capacity) ดังนี้

$$water\ holding\ capacity\ (\%) = \frac{(W_2 - W_1)}{W_1} x100$$

โดย W_1 = น้ำหนักของวัสดุก่อนทำการทดสอบ (g)

W_2 = น้ำหนักของวัสดุหลังทำการทดสอบ (g)

การออกแบบและทดสอบแผ่นลดอุณหภูมิในกล่องทดสอบทำความเย็นแบบระเหย

การออกแบบ

ออกแบบกล่องทดสอบระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยใช้แผ่นอะคริลิคเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าในลักษณะส่วนที่ปิดและส่วนที่เปิดช่องสำหรับอากาศเข้าสู่ระบบ โดยเว้นช่องว่างสำหรับติดตั้งแผ่นลดอุณหภูมิ ท่อระบายอากาศเพื่อให้อากาศสัมผัสแผ่นลดอุณหภูมิสม่ำเสมอ และจุดให้ความร้อนแก่กล่องทดสอบรวมถึงรองรับการติดตั้งระบบตรวจวัดค่าต่าง ๆ (Figure 3) ซึ่งการจัดทำระบบจะต้องครอบคลุมถึงระบบรองรับน้ำของแผ่นลดอุณหภูมิ สำหรับการติดตั้งกล่องต้นแบบประกอบด้วย 2 ขนาด คือ 1) ขนาด กว้าง 20 เซนติเมตร x สูง 20 เซนติเมตร x ยาว 85 เซนติเมตร (ขนาดที่ 1) (Aziz *et al.*, 2018) และ 2) ขนาด กว้าง 40 เซนติเมตร x สูง 40 เซนติเมตร x ยาว 170 เซนติเมตร (ขนาดที่ 2)

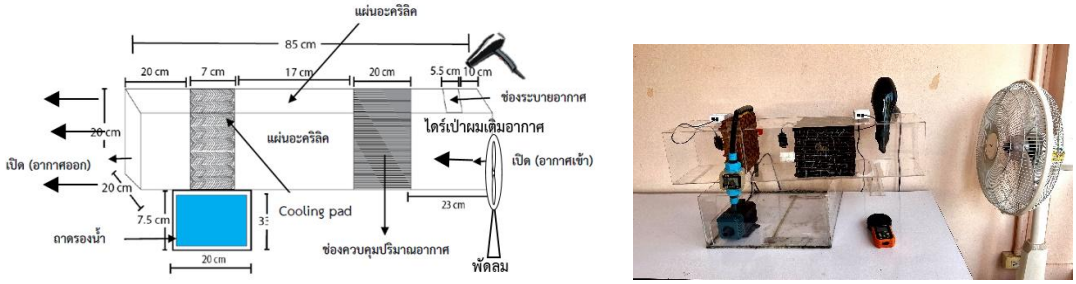


Figure 3 Evaporative cooling system prototype box.

การทดสอบแผ่นลดอุณหภูมิ

- ความเร็วลม: ใช้ความเร็วลมสูงสุดของพัดลมขนาด 16 นิ้ว แบบ 3 ใบพัด วัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ Peak meter รุ่น PM6252A ควบคุมความเร็วให้อยู่ระหว่าง 1.0 - 4.7 เมตรต่อวินาที Salins *et al.* (2021)

- อัตราการไหลของน้ำ: ควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยใช้วาล์วน้ำควบคุมความเร็วของน้ำ วัดอัตราการไหลของน้ำด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow meter) ยี่ห้อ G1 BSPP รุ่น K 24 ให้มีค่าเท่ากับ 1.6 - 1.7 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (Salins *et al.*, 2021; Tejero-González and Franco-Salas, 2021)

- การวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพันธ์ : ใช้อุปกรณ์ SONOFF รุ่น THR320D เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีหน้าสัมผัสแห้งแรงดันไฟฟ้า 5 - 30 โวลต์ โดยสามารถวัดอุณหภูมิได้ -10 ถึง 50 องศาเซลเซียส และความชื้นในการทำงาน 5 - 95 % สามารถเชื่อมต่อและรายงานผลผ่านคอมพิวเตอร์หรือมือถือได้ โดยติดตั้งอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกก่อนและหลังแผ่นลดอุณหภูมิในกล่องทดสอบทำความเย็นแบบระเหยเพื่อเปรียบเทียบความต่างของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 ชั่วโมง (10.00 - 17.00 น.) ทำ 3 ซ้ำ (Aziz, 2018; Vala *et al.*, 2016)

- ฮีตเตอร์ (heater): ขนาดกว้าง 24.5 เซนติเมตร x ยาว 28 เซนติเมตร x สูง 4.5 เซนติเมตร ใช้กำลังไฟสูงสุดที่ 2,200 วัตต์ เพื่อให้ความร้อน (Aziz, 2018) โดยทำการเปิดเพื่อให้ความร้อน 7 ชั่วโมงต่อวัน

- ระบบน้ำ ปั๊มน้ำและการจัดเรียงน้ำหยด : ใช้ปั๊มน้ำใช้อุปกรณ์ SOBO WP-4200 สามารถเปิดใช้งานได้ 24 ชั่วโมง ใช้กำลังไฟฟ้า 55 วัตต์ มีอัตราการไหลสูงสุด 3,000 ลิตรต่อชั่วโมง และใช้หัวน้ำหยดขนาด 4 ลิตรต่อชั่วโมง จำนวน 3 หัว (ขนาดที่ 1) และ 5 หัว (ขนาดที่ 2) (Aziz, 2018) โดยจัดทำวาล์วควบคุมการไหลของน้ำให้มีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 - 1.7 เมตรต่อวินาที (Salins *et al.*, 2021)

นำค่าที่วัดได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยของวัสดุโดยใช้ค่า saturation efficiency (η) อ้างจาก Franco-Salas *et al.* (2019) ความต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออก (difference

temperature, ΔT) (Franco-Salas *et al.*, 2019) และประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุนของวัสดุ (cost efficiency) (Muk-on, 2021) ดังนี้

$$\eta = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_{wb}')} x100 \quad (2)$$

โดย η = ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหย (Saturation efficiency, เปอร์เซ็นต์)

T_1 = อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนผ่านผิวเปียก (องศาเซลเซียส)

T_2 = อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านผิวเปียก (องศาเซลเซียส)

T_{wb}' = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศผ่านผิวเปียก (องศาเซลเซียส) โดยสามารถหาค่าได้จาก Psychometric charts ที่สภาวะอากาศของการทดลอง

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

โดย ΔT = ความต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออก (Difference temperature, องศาเซลเซียส) (3)

T_1 = อุณหภูมิกระเปาะแห้งขาเข้าอากาศผ่านผิวเปียก (องศาเซลเซียส)

T_2 = อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศหลังผ่านผิวเปียก (องศาเซลเซียส)

$$Cost\ efficiency(Bath/m\text{^}2) = \frac{Cost\ of\ material}{Saturation\ \ efficiency} \quad (4)$$

ผลการวิจัยและวิจารณ์

โครงสร้างทางกายภาพของถ่านชีวภาพแต่ละชนิด

จากการศึกษาภาพถ่ายโดย SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่าวัตถุดิบและอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่แตกต่างกันมีผลต่อโครงสร้างของถ่านชีวภาพ โดยเฉพาะถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ไผ่มีโครงสร้างคล้ายรังผึ้งซึ่งมีปริมาตรที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษ (Figure 4) อาจเนื่องจากการผลิตถ่านชีวภาพใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียน้ำ (dehydration) การย่อยสลาย (decomposition) และการระเหยของสารประกอบต่าง ๆ (volatilization) ในระหว่างกระบวนการเผาภายในเซลล์พืช (Liang *et al.*, 2016; Fawzy *et al.*, 2021) จากผลการศึกษาจะเห็นว่าถ่านแกลบ (เผาที่อุณหภูมิสูงสุด 189 องศาเซลเซียส) มีโครงสร้างของรูพรุนไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ยูคาลิปตัส (440 องศาเซลเซียส) และถ่านไม้ไผ่ (463 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเผาด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ดังนั้น อุณหภูมิการเผาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อโครงสร้าง ปริมาตร และปริมาณของรูพรุน เช่นเดียวกันกับชนิดของวัตถุดิบ ซึ่งวัตถุดิบที่มีปริมาณของลิกนิน (Lignin) ต่ำ และเซลลูโลส (Cellulose) สูงจะทำให้มีปริมาณรูพรุนของถ่านชีวภาพสูงกว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณลิกนินสูง (Tomczyk *et al.*, 2020) เนื่องจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเป็นองค์ประกอบของมวลชีวภาพซึ่งมีอิทธิพลต่อกระบวนการลดการทำลาย (Devolatilization) โครงสร้างของเซลล์พืช ปริมาณผลผลิตและสันฐานวิทยาของถ่านในระหว่างกระบวนการเผา (Sahoo *et al.*, 2021)

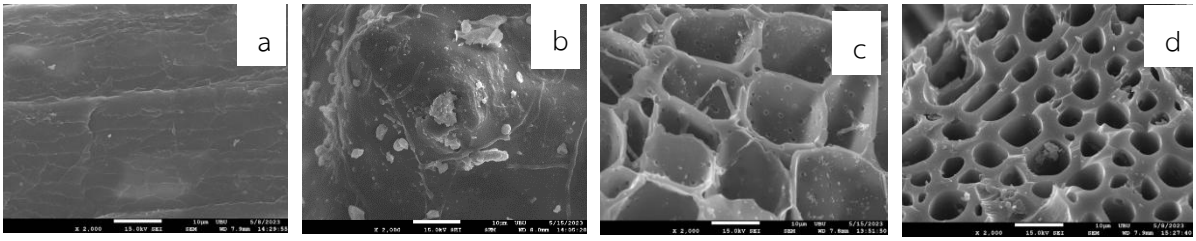


Figure 4 Scanning electron microscope of a) Kraft paper (paper) b) Rice hus k (RHC) (c) Eucalyptus (EC) and d) Bamboo biochar (BC)

ขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพที่ใช้ในการศึกษา พบว่า มี 2 ขนาด คือ ขนาด mesopore ซึ่งอยู่ระหว่าง 3 ถึง 7.49 nm ได้แก่ กระดาษ และถ่านแกลบ ตามลำดับ ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่และถ่านไม้ยูคาลิปตัส มีขนาด Micropore (อยู่ระหว่าง 1.40 ถึง 1.82 nm) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของการเผาส่งผลต่อขนาดของรูพรุนและมีผลต่อพื้นที่ผิว โดย Batista *et al.* (2018) พบว่า วัสดุที่เผาด้วยอุณหภูมิต่ำจะทำให้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งตรงกันข้ามกับผลการทดลอง พบว่า พื้นที่ผิวของถ่านแกลบ (22.53 ตารางเมตรต่อกรัม) สูงกว่าถ่านยูคาลิปตัส (6.39 ตารางเมตรต่อกรัม) ซึ่งเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า เช่นเดียวกันถ่านไม้ไผ่กับและถ่านยูคาลิปตัสเผาด้วยอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันแต่พบว่าถ่านไม้ไผ่มีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่ามาก 123.52 เท่า (Table 2) ชี้ให้เห็นว่า วัสดุประเภทเดียวกันแต่มีโครงสร้างและองค์ประกอบของวัสดุที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นไม้เนื้อแข็งมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินสูง เป็นส่วนประกอบที่ทนต่อการย่อยสลาย มีความชื้นต่ำทำให้ได้ปริมาณและความหนาแน่นของถ่านที่สูง เถ้าต่ำ รวมทั้งมีค่าความร้อนสูง (Tomczyk *et al.*, 2020) ในขณะที่ถ่านไม้ไผ่เป็นไม้เนื้ออ่อนมีความหนาแน่น และปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินต่ำกว่าไม้ยูคาลิปตัส ทำให้มี พื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนที่สูงกว่าถ่านชนิดอื่น (Chaturvedi *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการเผาสูงขึ้นจะเกิดการสะสมของเถ้าซึ่งสามารถอุดตันรูพรุนบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพได้ (Chaves Fernandes *et al.*, 2020) นอกจากนี้ขนาดรูพรุนยังมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับตะกอน การกรองน้ำ การดูดซับสารเคมีที่เกิดจากสารพิษปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่นำมาใช้ในโรงเรือนได้อีกด้วย (Hernandez-Mena *et al.*, 2014) ในทางกลับกันถ่านชีวภาพที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงจะทำให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำในวัสดุเพิ่มมากขึ้น (Batista *et al.*, 2018) ทำให้อากาศผ่านไหลผ่านได้ต่ำและมีความชื้นสูง มีน้ำหนักมาก หากมีประสิทธิภาพการดูดซับน้ำและความสามารถในการระบายน้ำที่ต่ำก็จะทำให้เกิดเชื้อราได้อีกด้วย

Table 2 Porosity characteristics of studied materials

Material	Surface area (m^2/g)	Pore volume (cc/g)	Pore size (nm)
Paper	40.62	0.002	3.00
RHC	22.53	0.012	7.49
EC	6.39	0.002	1.82
BC	789.3	0.312	1.40

ประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นลดอุณหภูมิ

จากการศึกษาค่าความอุ้มน้ำของแผ่นลดอุณหภูมิแต่ละชนิดทั้งขนาดที่ 1 และ 2 พบว่า ถ่านแกลบมีค่าสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาคือ ถ่านไม้ไผ่ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส และกระดาษ ตามลำดับ (Table 3) โดยค่าความอุ้มน้ำของวัสดุมีผลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของวัสดุ เนื่องจากวัสดุที่มีความสามารถอุ้มน้ำต่ำ (กระดาษ และถ่านไม้ยูคาลิปตัส) วัสดุจะมีช่องว่างให้อากาศไหลผ่านได้ง่าย และอากาศที่ไหลผ่านวัสดุจะสามารถสัมผัสกับน้ำเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าความอุ้มน้ำมาก (ถ่านแกลบ และถ่านไม้ไผ่) สอดคล้องกับ Ahmadu *et al.* (2022) ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยใช้แผ่นลดอุณหภูมิจากใยบวบ ถ่าน และแผ่นลดความชื้นคาร์บอน พบว่า ถ่านมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงกว่าแผ่นลดอุณหภูมิจากกระดาษ (แผ่นเซลลูโลส) และยังสอดคล้องกับ Salins *et al.* (2021) ได้ทำการศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการทำความเย็นด้วยการระเหย พบว่าถ่านเป็นชีวมวลธรรมชาติสามารถหมุนเวียนได้ ทนทาน มีราคาถูก หาเพิ่มเติมได้ง่าย และมีอายุการใช้งานยาวนานกว่าแผ่นลดอุณหภูมิที่ทำจากกระดาษ ซึ่งมีต้นทุนสูง และมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า ดังนั้นวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นแผ่นลดอุณหภูมิจึงควร

จะมีค่าความอุ้มน้ำที่ต่ำ เพื่อส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความเย็นมากขึ้นตามไปด้วย นั้นแสดงให้เห็นว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัสจากงานทดลองนี้น่าจะมีประสิทธิภาพในความเย็นที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ

Table 3 Water holding capacity of different cooling pad material in size 1 and size 2

Material	Water holding capacity (%)	
	Size 1 (W 20 cm x L 20 cm)	Size 2 (W 40 cm x H 40 cm)
Paper	34.33 b	8.73 b
RHC	77.92 a	21.50 a
EC	49.44 b	17.43 a
BC	34.88 b	9.42 b
$LSD_{.05}$	24.20*	7.29**

Remarks: Size W= Width and L=Long

*, ** significant differences $p \leq 0.05$ statistical and $p \leq 0.01$ respectively

Numbers, lowercase letters are directed differently in the same column. There are statistical differences at the 95% confidence level by means of LSD (Least Significant Difference Test)

ประสิทธิภาพการทำความเย็นของแผ่นลดอุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 2 ขนาด พบว่า แผ่นลดอุณหภูมิที่ทำจากถ่านไม้ยูคาลิปตัส สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยได้ 7.06 องศาเซลเซียส ซึ่งได้สูงกว่าแผ่นลดอุณหภูมิกระดาษที่ใช้กันโดยทั่วไป (4.86 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ถ่านแกลบ ลดอุณหภูมิเฉลี่ยได้เพียง 3.13 องศาเซลเซียส และถ่านไม้ไผ่ลดอุณหภูมิได้เฉลี่ย 4.59 องศาเซลเซียส (Table 4) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดของแผ่นลดอุณหภูมิขึ้น 2 เท่า (Size 2) ถ่านไม้ยูคาลิปตัสยังมีความสามารถลดอุณหภูมิได้สูงคงที่ใกล้เคียงกันกับขนาดเล็ก ในขณะที่วัสดุอื่น ๆ มีความสามารถในการลดอุณหภูมิลดลงโดยเฉพาะถ่านแกลบอุณหภูมิแตกต่างกันเพียง 1.66 องศาเซลเซียส

Table 4 The difference of temperature between the inlet and outlet of the cooling pads in size 1 and size 2

Time	Difference temperature (°C)							
	Size 1 (W 20 cm x L 20 cm)				Size 2 (W 40 cm x L 40 cm)			
	Paper	RHC	EC	BC	Paper	RHC	EC	BC
10:00	-1.43	-1.94	-0.77	0.30	-1.80	-2.93	-0.90	-2.27
11:00	5.23	3.17	5.77	5.35	2.87	1.43	6.67	2.57
12:00	6.73	3.77	7.67	4.90	4.47	1.43	7.70	2.77
13:00	6.80	6.40	7.33	5.33	5.70	2.87	8.20	3.37
14:00	6.43	6.67	7.97	6.63	5.07	3.17	8.20	4.13
15:00	6.33	6.67	8.80	6.40	5.17	2.60	8.30	5.00
16:00	6.70	6.57	9.07	7.53	5.83	2.07	9.67	6.43
17:00	6.93	5.53	10.30	7.73	6.73	2.60	8.90	7.27
Avg.	5.47 bc	4.60 c	7.02 a	5.52 b	4.25 b	1.66 c	7.09 a	3.66 b
$LSD_{.05}$	0.88**				0.73**			

Remarks: Size: W= Width and L=Long

The outside temperature throughout the experiment (24 days) averaged 28.9-36.0 °C.

*, ** significant differences $p \leq 0.05$ statistical and $p \leq 0.01$ respectively.

Numbers and lowercase letters are directed differently in the same column. There are statistical differences at the 95% confidence level using LSD (Least Significant Difference Test)

ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ซึ่งมีความแตกต่างกัน โดยความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของพืชอยู่ในช่วง 60 - 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งหากต่ำกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ อาจทำให้พืชเกิดความเครียดจากน้ำ และหากความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 95% เป็นเวลานานโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเวลากลางคืนส่งผลให้เชื้อราเกิดการพัฒนาอย่างรวดเร็ว (Ketsa, 2009) ในขณะที่โรงเรือนเลี้ยงสัตว์ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์มีความแตกต่างตามชนิดของสัตว์ที่เลี้ยง จากการศึกษาของ Dongsongkhram *et al.* (2022) กรณีศึกษา ลูกไก่ชนสายพันธุ์พม่า พบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40 - 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรม ระบบสรีรวิทยา พันธุกรรม รวมทั้งการเจริญเติบโตของสัตว์ด้วย จากการทดลองทำการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์หลังผ่านแผ่นลดอุณหภูมิ พบว่ากระดาษมีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ทั้ง 2 ขนาด สูงกว่าถ่านชีวภาพ (82.11 เปอร์เซ็นต์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยหากเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า (74.27 เปอร์เซ็นต์) ถ่านไม้ไผ่ (71.70 เปอร์เซ็นต์) และถ่านแกลบ (66.59 เปอร์เซ็นต์) (Table 5) สอดคล้องกับ Amer *et al.* (2015) ซึ่งพบว่า ไม้ให้ความชื้นสูงกว่าฟางข้าว มีส่วนสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาของพืชที่ต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา เคมี และชีวภาพขั้นต่ำโดยการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (Patel *et al.*, 2022) ชี้ให้เห็นว่าแผ่นลดอุณหภูมิจากถ่านแกลบไม่เหมาะกับการเลี้ยงสัตว์จำเป็นต้องมีการควบคุมการใช้งานให้อยู่ในระดับเหมาะสมกับสัตว์เลี้ยงนั้น ๆ ในขณะที่แผ่นลดอุณหภูมิที่ทำมาจากถ่านแกลบโดยเฉพาะขนาดที่ 2 มีความชื้นต่ำสุด (60.13 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งอยู่ในระดับที่เกือบถึงค่าวิกฤตในการเจริญเติบโตของพืช อย่างไรก็ตามโรงเรือนที่มีความชื้นสูงอาจส่งผลทำให้เกิดเชื้อราซึ่งก่อให้เกิดโรคพืช สัตว์ และผู้ปฏิบัติงาน เช่น *Penicillium sp.* และ *Aspergillus spp.* มีความสัมพันธ์กับโรคระบบทางเดินหายใจ โรคภูมิแพ้ โดยเฉพาะในคนที่ตอบสนองต่อเชื้อราได้ไว หรือในผู้ป่วย อาจทำให้หอบหืด ไอ และสมรรถภาพการทำงานของปอดลดลงส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ซึ่งถ่านนอกจากมีรูพรุนสูงยังมีค่า pH สูงด้วย ทำให้อาจมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ (Verma *et al.*, 2023)

Table 5 The relative humidity of the difference cooling pads materials in size 1 and size 2

Time	Relative humidity (%)							
	Size 1 (W 20 cm x L 20 cm)				Size 2 (W 40 cm x L 40 cm)			
	Paper	RHC	EC	BC	Paper	RHC	EC	BC
10:00	63.23	68.42	64.70	61.80	64.07	52.17	63.00	58.73
11:00	72.37	71.43	76.93	80.77	78.83	57.87	72.30	64.23
12:00	83.73	71.57	76.53	83.17	82.13	58.63	72.83	66.00
13:00	84.03	70.73	76.10	85.60	83.77	58.20	71.80	65.83
14:00	87.70	74.07	76.63	86.50	86.57	61.03	72.27	69.80
15:00	85.13	74.13	76.53	86.70	84.57	59.27	71.93	71.27
16:00	87.83	75.83	79.53	89.03	91.27	64.93	75.20	68.17
17:00	87.77	78.21	82.93	87.30	90.77	68.97	79.10	70.33
Avg.	81.48 a	73.05 b	76.24 ab	82.61 a	82.75 a	60.13 bc	72.30 b	66.80 c
$LSD_{.05}$	7.08*				6.48**			

Remarks: Size : W= Width and L=Long

The outside relative humidity throughout the experiment (24 days) was between 48.90-68.10 %.

*, ** significant differences $p \leq 0.05$ statistical and $p \leq 0.01$ respectively.

Numbers, lowercase letters are directed differently in the same column. There are statistical differences at the 95% confidence level by means of LSD (Least Significant Difference Test)

ประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยของแผ่นลดอุณหภูมิขนาดที่ 1 พบว่า มีค่าใกล้เคียงกันระหว่าง แบบกระดาษ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้ไผ่ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มขนาดแผ่นลดอุณหภูมิ ขนาดที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นลดลงโดยเฉพาะแผ่นลดอุณหภูมิที่ทำมาจากถ่านแกลบ และถ่านไม้ไผ่ ในขณะที่กระดาษมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีประสิทธิภาพคงที่ (Figure 5) ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระดาษมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดเฉลี่ยทั้ง 2 ขนาด คือ 76.25 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากกระดาษสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ได้สูงกว่า จึงทำให้สามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่าแผ่นลดอุณหภูมิที่ทำมากจากถ่านทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้ความสามารถในการกักเก็บน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นซึ่งจะเห็นได้จากถ่านแกลบมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้สูง สอดคล้องกับ Kapilan *et al.* (2023) ที่ศึกษาแผ่นลดอุณหภูมิถ่านแกลบมีประสิทธิภาพรักษาความเย็นสูงสุดที่ 56 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำที่สูงทำให้อากาศไหลผ่านได้ต่ำส่งผลต่อความสามารถในการระเหยของน้ำที่ไปใช้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่ำ และเมื่อเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นแบบระเหยของกระดาษกับถ่านทั้ง 3 ชนิด พบว่ามีประสิทธิภาพของถ่านทั้ง 3 ชนิด ต่ำกว่ากระดาษ โดยถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีประสิทธิภาพการทำความเย็นเฉลี่ยต่ำกว่ากระดาษน้อยที่สุด คือ 13.84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนถ่านแกลบและถ่านไม้ไผ่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นเฉลี่ยต่ำกว่ากระดาษ 48.61 และ 28.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Figure 6)

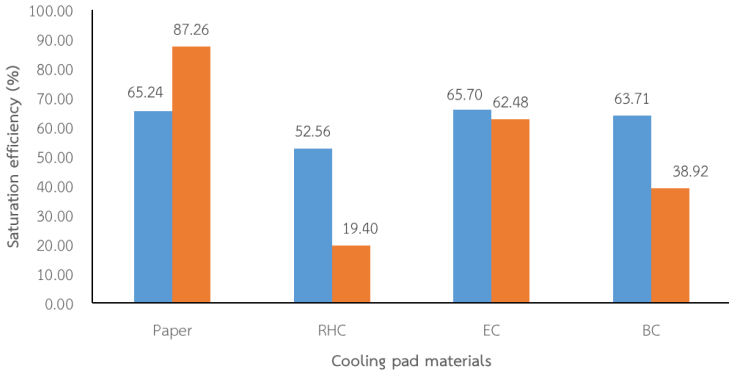


Figure 5 Saturation efficiency of cooling pads in size 1 and size 2

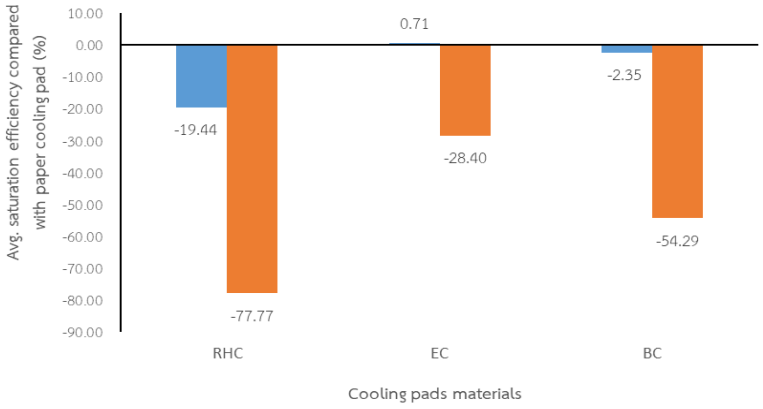


Figure 6 Evaporative cooling efficiency of biochars compared to paper cooling pads in Size 1 and Size 2

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุน

ต้นทุนต่อประสิทธิภาพเป็นตัวแปรที่แสดงถึงประสิทธิภาพต่อต้นทุนของระบบเพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการใช้งานของแผ่นลดอุณหภูมิ โดยค่าที่น้อยที่สุดจะแสดงถึงความคุ้มค่ามากที่สุด (Muk-on, 2021) ซึ่งส่วนใหญ่ต้นทุนที่เกิดขึ้นเป็นต้นทุนจากวัสดุที่นำมาผลิตเป็นแผ่นลดอุณหภูมิและกระบวนการผลิต จากการศึกษาผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุน พบว่า ถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด มีต้นทุนเฉลี่ยต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ต่ำกว่ากระดาษ (21.29 บาทต่อตารางเมตร) (Figure 7) จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุนของถ่านแกลบมีค่าต่ำสุด (1.10 บาทต่อตารางเมตร) อย่างไรก็ตาม แผ่นลดอุณหภูมิจากถ่านแกลบมีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านไม้ยูคาลิปตัส (2.94 บาทต่อตารางเมตร) และถ่านไม้ไผ่ (30.3 บาทต่อตารางเมตร) ซึ่งถ้าเปรียบเทียบระหว่างชนิดของถ่าน พบว่า ถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีความเหมาะสมทั้งด้านประสิทธิภาพการทำความเย็นที่สูงและต้นทุนที่ต่ำ นอกจากนี้ ถ่านแกลบเมื่อนำมาผลิตแผ่นลดอุณหภูมิต้องใช้ปริมาณสูงเนื่องจากมีน้ำหนักเบาจึงต้องทำการผลิตหลายครั้งเพื่อให้ได้ปริมาณเพียงพอต่อความต้องการใช้ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต (900 - 1,100 บาทต่อตัน) ในขณะที่ไม้ยูคาลิปตัสและไม้ไผ่ปริมาตรสูงกว่าใช้ปริมาณและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า (400 - 800 บาทต่อตัน) (Koson *et al.*, 2023) อย่างไรก็ตาม ถ่านชีวภาพที่นำมาผลิตเป็นแผ่นลดอุณหภูมิมีต้นทุนหลักคือเตาเผาถ่านและตาข่ายเท่านั้น เนื่องจากในการเผามุ่งเน้นการใช้เศษวัสดุใช้แทนการตัดต้นไม้ โดยเตาเผาถ่านสามารถใช้งานได้ยาวนานประมาณ 1 - 2 ปี หรือ ประมาณ 100 - 150 ครั้งของการเผา (Energy Research Center, Maejo University. 2014)

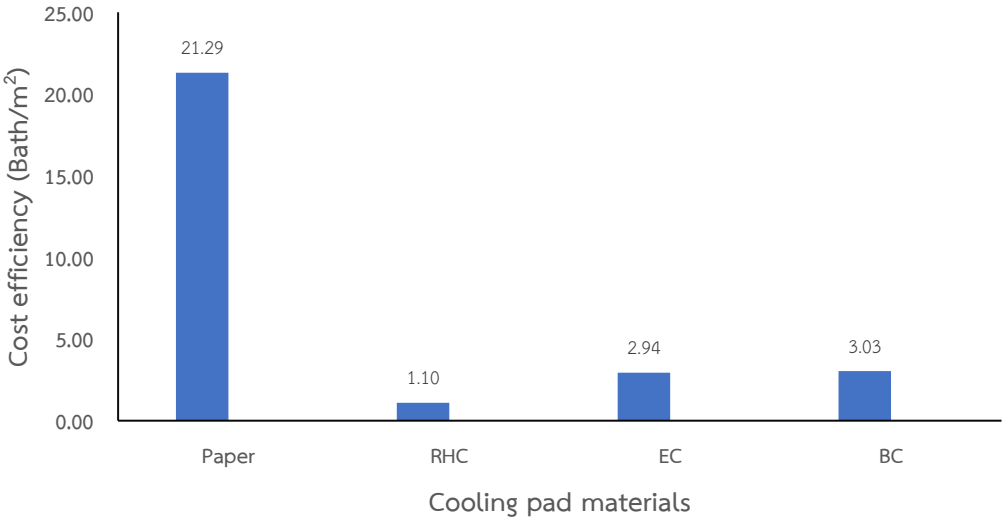


Figure 7 Cost-efficiency analysis of different cooling pads materials in size 20 x 20 cm

สรุปผลการวิจัย

ถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุทางเลือกที่เหมาะสมในการทำแผ่นลดอุณหภูมิที่ใช้ในระบบทำความเย็นแบบระเหย เนื่องจากมีประสิทธิภาพการทำความเย็นเฉลี่ยสูงกว่า (64.09 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพชนิดอื่นและมีความใกล้เคียงกับแผ่นลดอุณหภูมิที่ทำมาจากกระดาษ แต่มีประสิทธิภาพการทำความเย็นต่อต้นทุนต่ำกว่า (2.94 บาทต่อตารางเมตร) นอกจากนั้นการใช้ถ่านชีวภาพเป็นการนำวัสดุเหลือใช้ในชุมชนกลับมาใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และลดต้นทุนการผลิตทางด้านการเกษตร ซึ่งจะเป็นแนวการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมระยะยาวโดยอาศัยความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และช่วยลดปัญหาขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตามการใช้ถ่านชีวภาพเป็นแผ่นลดอุณหภูมิจำเป็นต้องมีการเพิ่มแรงลมที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระเหยของน้ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นลดอุณหภูมิที่ผลิตจากถ่านชีวภาพ เช่น อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของน้ำ รวมถึงการนำไปใช้ในสภาพโรงเรือนจริง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกลุ่มทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา กองทุนวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยนครพนมในการสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินการวิจัย รวมถึงคณะเกษตรและเทคโนโลยี และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยนครพนม ที่สนับสนุนอุปกรณ์และสถานที่ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

Ahmadu, T. O., Y. S. Sanusi and F. Usman. 2022. Experimental evaluation of a modified direct evaporative cooling system combining luffa fiber-charcoal cooling pad and activated carbon dehumidifying pad. Journal of Engineering and Applied Science 69(63): 1-8.

Amer, O., R. Boukhanouf and H. G. Ibrahim. 2015. A review of evaporative cooling technologies. International Journal of Environmental Science and Development 6(2): 111-117.

Armah, E. K., M. Chetty, J. A. Adedeji, D. E. Estrice, B. Mutsvene, N. Singh and Z. Tshemese. 2022. Biochar: Production, application and the future. Biochar: 1-26.

Aziz, A. R., N. F. Zamrud and N. Rosli. 2018. Comparison on cooling efficiency of cooling pad materials for evaporative cooling system. Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology 1: 61-68.

Batista, E. M. C. C., J. Shultz, T. T. S. Matos, M. R. Fornari, T. M. Ferreira, B. Szpoganicz, R. A. de Freitas and A. S. Mangrich. 2018. Effect of surface and porosity of biochar on water holding capacity aiming indirectly at preservation of the Amazon biome. Scientific Reports 8(1): 1-9.

Chaturvedi, K., A. Singhwane, M. Dhangar, M. Mili, N. Gorhae, A. Naik, N. Prashant, A. K. Srivastava and S. Verma. 2023. Bamboo for producing charcoal and biochar for versatile applications. Biomass Conversion and Biorefinery 2023: 1-27.

Chaves Fernandes, B. C., K. F. Mendes, A. F. Dias Júnior, V. P. S. Caldeira, T. M. S. Teófilo, T. Severo Silva, V. Mendonça, M. F. Souza and D. Valadão Silva. 2020. Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. Materials 13(24): 1-13.

Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. 2021. "Biomass": Green energy friendly to the planet. Available: https://www.thebangkokinsight.com/news/environmental-sustainability/558298 (October 18, 2023). [in Thai]

Dongsongkhram, K., S. Phanphithak, P. Premto and T. Trisakun. 2022. Development of environmental control system using Internet of Things technology in a simulated house: A case study of Burmese gamecock chicks. Journal of Applied Information Technology 8(1): 103-116. [in Thai]

Energy Research Center, Maejo University. 2014. User manual for 200-liter vertical charcoal kiln. Available: https://engineer.mju.ac.th/wtms_webpageDetail.aspx?wID=1260 (December 20, 2023). [in Thai]

Fawzy, S., A. I. Osman, H. Yang, J. Doran and D. W. Rooney. 2021. Industrial biochar systems for atmospheric carbon removal: A review. Environmental Chemistry Letters 19: 3023-3055.

Franco-Salas, A. , A. Peña-Fernández and D. L. Valera-Martínez. 2019. Refrigeration Capacity and Eect of Ageing on the Operation of Cellulose Evaporative Cooling Pads, by Wind Tunnel Analysis. 2019 (16): 1-11.

Haider, F. U., J. A. Coulter, C. Liqun, S. Hussain, S. A. Cheema, J. Wu and R. Zhang. 2021. An overview on biochar production, its implications, and mechanisms of biochar-induced amelioration of soil and plant characteristics. Pedosphere 32(1): 1-51.

Hemwong, S. 2013. Biochar: Carbon sequestration and soil fertility. Kasetsart Agricultural Journal 31(1): 104-113. [in Thai]

Hemwong, S. 2014. Effects of bamboo and rice husk biochars on yield and nitrogen use efficiency of Chainat 1 rice variety. Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University 16(1): 69-75. [in Thai]

Hemwong, S., C. Sangri, P. Phunthupan, S. Butnan and P. Vityakon. 2021. Rice-derived biochars enhance the yield of spring onion (Allium cepa L. var. Aggregatum), while reducing pesticide contamination in soil and plant. Applied Ecology and Environmental Research 19(1): 349-358.

Hernandez-Mena, L. E., A. A. B. Pécora and A. L. Beraldo. 2014. Slow pyrolysis of bamboo biomass: Analysis of biochar properties. Chemical Engineering Transactions 37: 115-120.

Joseph, S. D., M. Camps-Arbestain , Y. Lin, P. Munroe, C. H. Chia, J. Hook, L. van Zwieten, S. Kimber, A. Cowie, B. P. Singh, J. Lehmann, N. Foidl, R. J. Smernik and J. E. Amonette. 2010. An investigation into the reactions of biochar in soil. Australian Journal of Soil Research 48(7): 501-515

Kapilan, N., A. M. Isloor and S. Karinka. 2023. A comprehensive review on evaporative cooling systems. Results in Engineering 18: 1-14.

Ketsa, S. 2009. Global warming: Effect on plants. Journal of Health Systems Research 3(2): 203-211. [in Thai]

Khidhathong, P., W. Wangjiraniran and A. Suriyawong. 2014. A study on spatial potential of biomass for electricity generation in Thailand. Journal of Energy Research 11(1): 63–76. [in Thai]

Koson, K., S. Sriaon, P. Champaphang and S. Saengsuwan. 2023. Biochar (miracle material): Synthesis, characterization and potential applications. Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University 25(1): 89-104. [in Thai]

Kouchakzadeh, A. and A. Brati. 2013. The evaluation of bulk charcoal as greenhouse evaporative cooling pad. Agricultural Engineering International: CIGR Journal 15(2): 188-193.

Liang, H., L. Chen, G. Liu and H. Zheng. 2016. Surface morphology properties of biochars produced from different feedstocks. In: Proceedings of the International Conference on Civil, Transportation and Environment, China. pp. 1205–1208.

Muk-on, K. 2021. The study of substitute materials in evaporative cooling system. Master of Engineering Thesis in Energy Engineering, Department of Mechanical Engineering, Silpakorn University. [in Thai]

Patel, D. P., S. K. Jain, S. S. Lakhawat and N. Wadhawan. 2022. A low-cost storage for horticulture commodities for enhancing farmer's income: An overview on evaporative cooling. Journal of Food Process Engineering 45(10): 1-15.

Sahoo, S. S., V. K. Vijay, R. Chandra and H. Kumar. 2021. Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. Cleaner Engineering and Technology 3: 1-10.

Salins, S. S., S. Kota Reddy, S. V. Shiva Kumar and C. Stephen. 2021. Experimental investigation of humidification parameters using biomass-based charcoal as an alternative packing material. Journal of King Saud University - Engineering Sciences 35(7): 495–505.

Schreefel, L., R. P. O. Schulte, I. J. M. de Boer, A. Pas Schrijver and H. H. E. van Zanten. 2020. Regenerative agriculture - the soil is the base. Global Food Security 26: 1-8.

Tejero-González, A. and A. Franco-Salas. 2021. Optimal operation of evaporative cooling pads: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 151: 1-14.

Tomczyk, A., Z. Sokołowska and P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperatureand feedstock kind effects. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 19: 191-215.

Vala, K.V., M.T. Kumpavat and Dr. A. Nema. 2016. Comparative Performance Evaluation of Evaporative Cooling Local Pad materials with Commercial Pads. International Journal of Engineering Trends and Technology 39(4): 198-203.

Verma, S., M. K.Awasthi, Tao Liu, S. K.Awasthi, Asad Syed, A. Bahkali, M. Verma and Z. Zhang. 2023. Influence of biochar on succession of fungal communities during food waste composting 2023 (358): 129437

Visittiwong, A. 2021. Utilization of fruit orchard waste: Durian and mangosteen for charcoal briquette production. Research Journal of Rajamangala University of Technology Tawan-ok 14(2): 66-71. [in Thai]

Yamanaka, T. 2003. The effect of pH on the growth of saprotrophic and ectomycorrhizal ammonia fungi in vitro. Mycologia 95(4): 584-589.

Yang, Y., M Zhong, X. Bian, Y. You and F. Li. 2023. Preparation of carbon- based material with high water absorption capacity and its effect on the water retention characteristics of sandy soil. Biochar 5(61): 1-18.