

การทดสอบการถ่ายเทความร้อนของแผ่นวัสดุที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ ทางการเกษตรโดยมีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน

The Experiment of Heat Transfer in Material Block Made from Agricultural Waste Integrated by Cement

พันธ์ศักดิ์ ภัคดี¹ และ จิตินันท์ รัตนพรหม²

Punsak Pakdee¹ and Tithinun Rattanaplome²

¹คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยแม่โจ้

¹Faculty of Architecture and Environmental Design, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

²Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

E-mail: punsak.pakdee@gmail.com¹, tithinun@mju.ac.th²

Received 15/1/2018

Accepted 13/8/2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุทดสอบแต่ละชนิด ที่ทำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยมีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน ในอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ 1:0.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สามารถสร้างแผ่นทดสอบได้สมบูรณ์ที่สุดใน ขนาด 60 ซม. X 60 ซม.หนา 2 ซม. ทดสอบในเงื่อนไขของการใช้งานที่ไม่ปรับอากาศ แล้วประเมินค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิภายในคงที่ ผลการทดสอบพบว่า แผ่นวัสดุทดสอบมีลักษณะเป็นวัสดุเก็บสะสมความร้อน แต่เนื่องจากมีความหนาที่ไม่มากนักจึงหน่วงเหนี่ยวความร้อนเอาไว้เพียงเวลาสั้นๆ โดยวัสดุที่หน่วงความร้อนเอาไว้ได้นานจะมีความเป็นฉนวนสูงกว่า แผ่นวัสดุทดสอบที่เหมาะสมมากที่สุดถึงน้อยที่สุดในการนำไปใช้เพื่อลดความร้อนในเงื่อนไขระบบปิดที่ไม่ปรับอากาศคือ 1) คอนกรีตผสมเยื่อหญ้าแฝก 2) คอนกรีตผสมเศษไผ่ 3) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ 4) คอนกรีตผสมถั่วแกลบ 5) คอนกรีตผสมแกลบ 6) คอนกรีตผสมกะลาเผา จากผลการทดลองดังกล่าวยังต้องได้รับการทดสอบและพัฒนาประสิทธิภาพ เพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุก่อสร้างทั้งในกรณีที่ไม่ปรับอากาศและไม่ปรับอากาศสำหรับบ้านพักอาศัยหรืออาคารขนาดเล็ก

คำสำคัญ

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

การถ่ายเทความร้อน

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

Abstract

The objective of this research is to observe the quality of heat transfer from various agricultural waste integrated with cement as bonding material. The weight ratio of the mixture between cement and agricultural waste used is 1:0.15. This weight ratio can create the best quality of examined block in the dimension of 60 cm. x 60 cm. with the thickness of 2 cm. This experiment is tested under non-air conditioned condition. Then the thermal conductivity (K-Value) under the controlled indoor-temperature is investigated. The results show that all examined materials have heat-capacity quality with short time lag, because of the thinness of the examined blocks. Also materials that have longer periods of time lag are considered a good thermal insulator. The results of this study show the best to worst examined materials ranking in quality of reducing heat in the non-air conditioner condition as 1) integration of concrete and pulp from vetiver grass 2) integration of concrete and bamboo waste 3) integration of concrete and paper pulp 4) integration of concrete and rice husk ash 5) integration of concrete and rice husk 6) integration of concrete and coffee endocarp. The results of this research should be tested and developed in order to further apply to create building materials that are used with and without air-conditioner condition.

Keywords

Waste Agriculture Material

Heat Transfer

Thermal Conductivity

1. ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตทางด้านเกษตรกรรมหลายด้าน ในแต่ละปีจะมีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมากและหลากหลายชนิด บางส่วนถูกนำไปใช้หรือนำไปแปรรูปให้เกิดประโยชน์ แต่ยังมีวัสดุเหลือใช้อีกส่วนหนึ่งที่ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์เกิดเป็นปัญหาขยะภายในชุมชน การเผาทำลายสร้างมลภาวะทางอากาศ ประชากรส่วนใหญ่ในประเทศประกอบอาชีพเกษตรกรรม ส่วนหนึ่งสร้างที่อยู่อาศัยสร้างจากวัสดุในพื้นที่ เป็นวัสดุที่หาง่ายและไม่คงทนถาวร อีกส่วนหนึ่งสร้างจากวัสดุที่ถาวรขึ้นซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป เช่น อิฐมวลเบา คอนกรีตบล็อก สังกะสีหรือกระเบื้องไยหิน เป็นต้น การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติมาเป็นส่วนหนึ่งของการผลิตเป็นวัสดุก่อสร้างจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์ ช่วยลดต้นทุนในการผลิต มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน สร้างเป็นวัสดุทางเลือกและนำมาทดแทนวัสดุเดิม

งานวิจัยชิ้นนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ (กปร.) โครงการขยายผลการใช้ประโยชน์หญ้าแฝกสู่ชุมชน แผนงานชีวมวลหญ้าแฝก โดยการนำเยื่อหญ้าแฝกมาประเมินพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นวัสดุทดสอบเปรียบเทียบกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรแต่ละชนิดโดยมีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน

ปัจจุบันเทคโนโลยีและระบบการก่อสร้างได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง วัสดุก่อสร้างที่ประหยัด สะดวก รวดเร็วและวัสดุทดแทนเป็นทางเลือกที่สำคัญในการพิจารณาเพื่อเลือกใช้ วัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ทางด้านงานคอนกรีตได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ มีรูปแบบที่หลากหลายให้เลือกใช้ งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาวัสดุทดแทนทางสถาปัตยกรรมจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ แ้วกลบ (rice husk ash) แ้วกลบ (rice husk) กะลากาแฟ (coffee endocarp) เยื่อกระดาษ (paper pulp) เศษไผ่ (bamboo waste) และ เยื่อหญ้าแฝก (vetiver grass) พัฒนาเป็นผนังอาคารชนิดไม่รับน้ำหนักหรือเป็นส่วนตกแต่งผนัง โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสม นำมาทดสอบด้านการรับแรงอัดเพื่อให้ได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดและทดสอบด้านการถ่ายเทความร้อน แล้วนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพ เปรียบเทียบ

คุณสมบัติของวัสดุทดแทนที่เกิดขึ้นจากวัสดุเหลือใช้แต่ละชนิดเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ต่อไป

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและเลือกใช้วัสดุอาคารมีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อให้ผู้อยู่อาศัยในอาคารได้รับประโยชน์จากตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อสภาวะสบายของมนุษย์ (comfort zone) สภาวะน่าสบายจึงเป็นมาตรฐานหนึ่งที่นักออกแบบต้องคำนึงถึง (Boonyathikarn, 1999) ตัวอย่างจากการศึกษาสภาพภูมิอากาศเมืองเชียงใหม่ทั้งสิ้น 8 เขต พบว่าความเข้มข้นของปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองสูงขึ้น 4.35 องศาเซลเซียสในฤดูร้อน พื้นที่ที่ประกอบด้วยสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นมากจะมีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่ที่มีความหนาแน่นน้อย เป็นพื้นที่จำเป็นเร่งด่วนในการดำเนินการเพื่อหามาตรการแก้ไขและบรรเทาผลกระทบ (Srivanit & Attarat, 2016) การออกแบบอาคารใช้พลังงานเป็นศูนย์ (Zero Energy Building: ZEB) คือ การออกแบบให้ใช้ประโยชน์จากธรรมชาติเพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร มีการประหยัดพลังงานในระบบต่าง ๆ การลดการใช้พลังงานในอาคารต้องการการทำงานประสานกันแบบบูรณาการของผู้ที่เกี่ยวข้องรวมทั้งออกแบบบูรณาการแนวทางการประหยัดพลังงานด้วย (Yimprayoon, 2016) การศึกษาและแก้ปัญหาทางด้านวัสดุพื้นผิว และพลังงานด้วยการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดความร้อนและการใช้พลังงานภายในอาคารลงได้

มีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อความรู้สึกของคนเราในสภาวะที่ร่างกายเรปกดิหลายตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยงานวิจัยนี้ศึกษาทางด้านวัสดุเพื่อประยุกต์เป็นวัสดุผนังไม่รับน้ำหนักหรือเป็นส่วนตกแต่งผนัง จึงจะพิจารณาเฉพาะตัวแปรของอุณหภูมิอากาศ (air temperature) เท่านั้น

2.1 คุณสมบัติของวัสดุก่อสร้างอาคารเชิงความร้อน (Thermal Properties of Building Materials)

กระบวนการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากอาคาร สามารถเกิดขึ้นได้ 4 วิธี คือ การนำความร้อน (conduction) การพาความร้อน (convection) การแผ่รังสี (radiation) และการระเหยกลายเป็นไอ หรือ การควบแน่น (evaporation of condensation) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์

ที่มุ่งเน้นการออกแบบวัสดุเพื่อสภาวะน่าสบาย ซึ่งให้ความสำคัญกับการจัดการความร้อนในแนวทางการออกแบบด้วยวิธีธรรมชาติ ดังนั้น องค์ประกอบของผนังที่จะทำการศึกษาจึงประกอบด้วยคุณสมบัติของวัสดุทึบตัน (opaque materials) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเข้า หรือออกจากอาคาร อุณหภูมิภายใน และสภาวะน่าสบายในอาคาร (Kreider, Curtiss & Rabl, 2002)

2.2 บทบาทของมวลสารกับการถ่ายเทความร้อน (The Role of Thermal Mass)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิอากาศภายในอาคารภายใต้สภาวะที่ไม่มีการปรับอากาศ นอกเหนือจากปัจจัยภายนอก (ความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศภายนอก) และปัจจัยภายใน (ผู้ใช้อาคาร ไฟฟ้าจากแสงสว่าง และอุปกรณ์) ยังมีปัจจัยที่เกิดจากโครงสร้างของเปลือกอาคาร และคุณสมบัติของวัสดุเหล่านั้น ที่จะมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากอาคารจนทำให้เกิดดุลยภาพทางความร้อน (thermal balance) ที่จะเป็นตัวบ่งชี้สภาพอากาศภายในอาคาร (Stein & Reynolds, 1992)

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนประกอบของผนังอาคาร โดยในชั้นต้น ผนังอาคารจะมีอุณหภูมิภายนอกและภายในเท่านั้น เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิผิวภายนอกของอาคารจะเพิ่มสูงขึ้นจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในองค์ประกอบของผนังอาคาร ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร เมื่ออุณหภูมิอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในตอนเที่ยง – บ่าย อุณหภูมิของผนังอาคารก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเกือบเท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวผนังภายนอก และเมื่ออากาศภายนอกค่อยๆ มีอุณหภูมิลดลงในเวลาเย็น ความร้อนก็จะค่อยๆ ถ่ายเทผ่านผนังไปสู่ด้านที่เย็นกว่าทั้งภายในและภายนอกอาคาร (Santamouris & Asimakopoulous, 1996)

ดังนั้น เพื่อทำการประเมินคุณสมบัติของแผ่นวัสดุสำหรับการทดสอบนี้จึงพิจารณาประเมินตัวแปร ดังนี้

1. อุณหภูมิภายในที่เพิ่มขึ้นเพื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อน และระยะเวลาของการถ่ายเทตามคุณสมบัติการต้านทานและหน่วงความร้อน

2. อุณหภูมิผิวภายในที่เพิ่มขึ้นเพื่อพิจารณาถึงการแผ่รังสีความร้อนจากผิววัสดุต่อผู้ใช้งาน หากอุณหภูมิ

ผิววัสดุเพิ่มจะมีผลต่อความรู้สึกร้อนมากขึ้น ซึ่งเพิ่มจากอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศ

3. สภาวะน่าสบายเฉพาะด้านความร้อนหรืออุณหภูมิเปรียบเทียบกับอากาศภายนอกและอุณหภูมินอกขอบเขตสภาวะน่าสบายหรือสูงกว่า 28 °C

2.3 วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากแต่การนำกลับมาใช้ยังมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเศษวัสดุที่มีทั้งหมด บางส่วนถูกเผาทำลายทำให้เกิดมลพิษ ถูกทิ้งเป็นขยะชุมชน จากข้อมูลปริมาณผลผลิตพืชเศรษฐกิจสำคัญของกลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด ปี พ.ศ. 2560 (Chiang Mai Government Center, 2017) พบว่า ปริมาณพืชเศรษฐกิจสำคัญอันดับ 1 ได้แก่ ข้าว มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปี 431,910 ไร่ และผลผลิตเฉลี่ย 624 (กิโลกรัม/ไร่) มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปี 78,830 ไร่ และผลผลิตเฉลี่ย 650 (กิโลกรัม/ไร่) ดังนั้น วัสดุเหลือใช้จากการปลูกข้าวจึงเป็นตัวเลือกแรกในการนำมาทดลองใช้ ได้แก่ แกลบ และเถ้าแกลบ ในปัจจุบันการตีมูลค่าเป็นที่ยอมรับอย่างสูงและมีปริมาณการบริโภคที่มากขึ้น ในการผลิตกาแฟจะสร้างเศษวัสดุเหลือทิ้งที่เป็นกากกาแฟและกะลากาแฟประมาณร้อยละ 25-30 ซึ่งมีจำนวนหลายล้านตันในแต่ละปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ กะลากาแฟจึงเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่น่าสนใจในการประยุกต์ใช้ และยังมีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรด้านอื่นที่เลือกนำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ เศษไม้ที่เหลือจากการจักสาน การทำตะเกียบหรือมู่ลี่ ซึ่งเป็นการผลิตภายในชุมชน หรือผลผลิตทางอ้อมจากการเกษตร เช่น เยื่อหุ้มกาแฟที่ผลิตจากใบกาแฟที่ปลูกคลุมดินและต้องตัดใบทิ้งตลอดเวลา และเยื่อกระดาษที่นำกระดาษเหลือทิ้งจากการใช้งานมาใช้ให้เกิดประโยชน์ซึ่งเป็นผลผลิตจากต้นไม้

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบเป็นวัสดุทดแทนรูปแบบต่างๆ มากมายส่วนใหญ่จะใช้เป็นส่วนผสม โดยจะมีตัวประสาน เช่น ดินปูนซีเมนต์ ยางพารา กาวเรซิน และสารเคมีอื่นๆ เป็นต้น เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้กับวัสดุทดแทนที่ได้

วรรณวิทย์ แท้มทอง (Taemthong, 2013, pp. 380-390) ได้พัฒนาฉนวนกันความร้อนที่ผลิตจากฟางข้าวและกาวยูเรียฟอร์มาดีไฮต์ นำมาผสมกันและอัดให้ได้ความ

หนาแน่น 275 kg/m³ โดยประมาณ ฉนวนดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ผลิตเป็นฉนวนเพื่อนำมาติดตั้งที่กรอบอาคาร โดยฉนวนฟางข้าวมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน 0.153 W/m²•K สามารถกันความร้อนได้ 2.7°C ในเวลากลางวัน

ภูษิต เลิศวัฒนาภิรักษ์ และ จตุพร ตั้งศิริสกุล (Lertwattananuruk & Tungsirisakul, 2007, pp. 187-199) พัฒนาก่อนอิฐดินดิบด้วยการผสมแกลบและขุยมะพร้าว เข้าไปไม่เกินกว่าร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มความ สามารถในด้านคุณสมบัติเชิงกล และการเป็นฉนวน กันความร้อนของก้อนอิฐดินดิบ

พิทยา สุขจินดา กฤตธี น้ำกลั่น และณัทพงษ์ ชัย วิชิต (Sukjinda, Numkrun & Chaivichit, 2016, p. 1) ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมแกลบดำสำหรับงาน โครงสร้าง พบว่า แกลบดำแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม คือไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งให้ค่า ใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน

วิชาญ ยอดนาค (Yodnumkhum, 2005) พัฒนา แผ่นซีเมนต์ผสมเยื่อกระดาษเหลือใช้ เสริมด้วยปอแก้ว และไม้ไผ่ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 1 : 1.5 (ซีเมนต์ ต่อ เยื่อกระดาษ) โดยเยื่อกระดาษควรผ่านการแช่น้ำ 14 - 30 วันแล้วนำมาอัดขึ้นรูป จากผลการทดลองพบว่า การใส่ เส้นใยธรรมชาติทำให้กำลังอัดและความเหนียวของแผ่น ซีเมนต์ผสมเยื่อกระดาษเพิ่มขึ้น

Okino, Santana & de Souza (2000) พัฒนาแผ่น อัดเสริมเส้นใยน้ำหนักเบา จากกระดาษเหลือใช้จาก สำนักงาน โดยใช้การเรซินเป็นตัวประสาน ในอัตราส่วนที่ เหมาะสมจะสามารถขึ้นรูปและรับแรงทางกลได้ดีขึ้น

วชิระ แสงรัตมี (Sangrutsamee, 2012) พัฒนา บล็อกประสานน้ำหนักเบาจากเยื่อกระดาษเหลือทิ้ง พบว่า การเพิ่มส่วนผสมของเยื่อ กระดาษเหลือทิ้งช่วยลดน้ำหนัก และลดความหนาแน่นของวัสดุได้ดี อัตราส่วนที่เหมาะสม ในการผลิตบล็อกใหม่ คือ 1:5:0.02:0.3 (ปูนซีเมนต์:ทราย: ผงสี:เยื่อกระดาษ) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกัน ความร้อน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับบล็อกประสานดินลูกรังผสม ซีเมนต์ในท้องตลาด

Ricciardi, Torchia, Belloni, Lascaro & Buratti (2017) ได้พัฒนาฉนวนความร้อนและวัสดุดูดซับเสียงจาก กะลากาแฟ พบว่า ความหนาและความพรุนของวัสดุ ดันแบบมีผลต่อการป้องกันความร้อนและการดูดซับเสียง

3. การออกแบบวิธีวิจัย

เพื่อประเมินพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของ วัสดุทดสอบที่ทำมาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 6 ชนิด ได้แก่ 1. แกลบ (Rice Husk Ash, RHA) 2. แกลบ (Rice Husk, RH) 3. กะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CE) 4. เยื่อกระดาษ (Paper Pulp, PP) 5. เศษไม้ (Bamboo Waste, BW) และ 6. เยื่อหญ้าแฝก (Vetiver Grass, VG) โดยมีปูนซีเมนต์เป็นตัวประสาน มาทดสอบในเงื่อนไขของ การใช้งานที่ไม่ปรับอากาศ โดยจำลองการให้ความร้อน ด้วยวิธี Heat-flow แล้วประเมินค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายใต้สภาวะอุณหภูมิภายในคงที่ (steady-state)

รูปแบบของแผ่นวัสดุทดสอบ ขนาดกว้าง 60 ซม. ยาว 60 ซม. หนา 2 ซม. โดยมีอัตราส่วนระหว่าง ปูนซีเมนต์:ทราย:น้ำ:วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 1:3:0.5:0.15 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ขึ้นรูปได้ดี สามารถคงสภาพเป็นแผ่นมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ อัตราส่วนอื่นๆ และรับแรงอัดได้ดีที่สุดจากการทดสอบ กำลังอัด เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับผนังไม่รับน้ำหนักหรือเป็น วัสดุกรุผนัง ไม่ได้นำไปใช้ในส่วนโครงสร้าง และมี คุณสมบัติในการลดการถ่ายเทความร้อน

การทดสอบการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุแผ่นโดย ประเมินในเงื่อนไขไม่ปรับอากาศ ดังรูปที่ 1 มีวิธีการและ ขั้นตอน ดังนี้

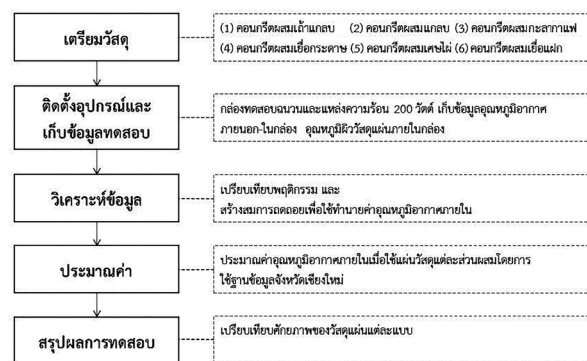
1) เตรียมวัสดุทดสอบ โดยมีอัตราส่วนระหว่าง ปูนซีเมนต์:ทราย:น้ำ:วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร 1:3:0.5:0.15 ขนาด 60 ซม. X 60 ซม. จำนวน 6 รูปแบบ คือ 1. คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA) 2. คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH) 3. คอนกรีต ผสมกะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CCE) 4. คอนกรีต ผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP) 5. คอนกรีตผสม เศษไม้ (Bamboo Waste, CBW) และ 6. คอนกรีตผสม เยื่อหญ้าแฝก (Vetiver Grass, CVG)

2) ติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูลทดสอบ ติดตั้งแผ่น วัสดุกับกล่องทดสอบเพื่อรับการถ่ายเทความร้อนจาก แหล่งกำเนิดความร้อน 200 วัตต์ คงที่เป็นเวลา 8 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิลงอีกเป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง แหล่ง กำเนิดความร้อนของการทดลองนี้เป็นหลอดไส้ชนิดหลอด ความร้อน Incandescent ติดอุปกรณ์ปรับกระแสไฟฟ้า (dimming) ได้

3) วิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลที่เก็บด้วยอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติทุกๆ 1 นาที นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างและสร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายในด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นตรง (linear regression analysis)

4) ประเมินค่านำข้อมูลอุณหภูมิอากาศจากฐานข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา (Thai meteorological department, 2017) โดยการใช้ฐานข้อมูลจังหวัดเชียงใหม่ ทำนายค่าอุณหภูมิอากาศภายในเมื่อใช้วัสดุแผ่นดังกล่าว ด้วยสมการถดถอยที่สร้างขึ้นในข้อ 3

5) สรุปผลการทดสอบทำการสรุปพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและข้อแตกต่างของอุณหภูมิภายในเนื่องจากการใช้วัสดุดังกล่าว



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการทดสอบ (Testing procedures)

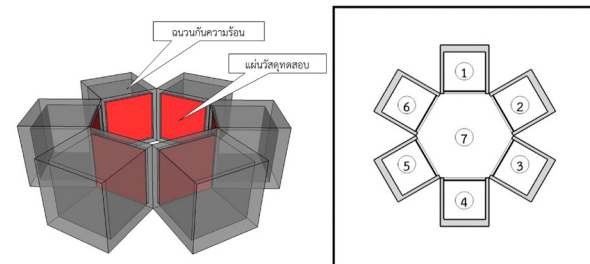
4. การดำเนินการวิจัย

4.1 การติดตั้งแผ่นทดสอบ

1) การติดตั้งส่วนประกอบของวัสดุแผ่นทดสอบกับกล่องทดสอบ ทำการติดตั้งกล่องทดลองจำนวน 6 กล่อง สำหรับวัสดุทดสอบ 6 รูปแบบ ในลักษณะปิดมิดชิดกันเพื่อหั่นด้านที่เป็นแผ่นวัสดุทดสอบเข้าหากันที่ศูนย์กลางที่เป็นแหล่งความร้อนหรือหลอดไฟฟ้า 200 วัตต์ ดังรูปที่ 2 และแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แหล่งกำเนิดความร้อนของการทดลองนี้เป็นหลอดไส้ขดลวดความร้อน Incandescent ติดอุปกรณ์ปรับกระแสไฟฟ้า (dimming) ได้

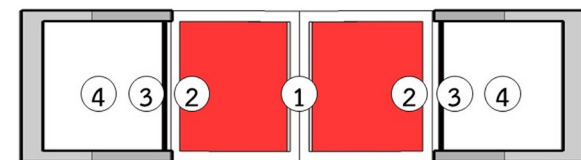
2) วัสดุทดสอบเป็นแผ่นขนาด กว้าง 60 ซม. ยาว 60 ซม.หนา 2 ซม. ทั้งหมด 6 รูปแบบ ได้แก่ 1. เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) 2. แกลบ (Rice Husk, RH) 3. กะลากาแฟ (Coffee endocarp, CE) 4. เยื่อกระดาษ (Paper Pulp, PP) 5. เศษไม้ (Bamboo Waste, BW) และ 6. เยื่อหญ้าแฝก (Vetiver Grass, VG) ดังรูปที่ 5

3) วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ วัสดุแผ่นตัวอย่างถูกทดสอบในระบบปิดเป็นกล่องฉนวนโฟมหนา 2 นิ้ว 5 ด้าน ดังรูปที่ 6 เพื่อให้ได้รับความร้อนถ่ายเทผ่านเข้าทางด้านแผ่นทดสอบเพียงด้านเดียว



- 1) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA)
- 2) คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH)
- 3) คอนกรีตผสมกะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CCE)
- 4) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP)
- 5) คอนกรีตผสมเศษไม้ (Bamboo Waste, CBW)
- 6) คอนกรีตผสมเยื่อหญ้า (Vetiver Grass, CVG)

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งแผ่นทดสอบ (Installation of testing plate)

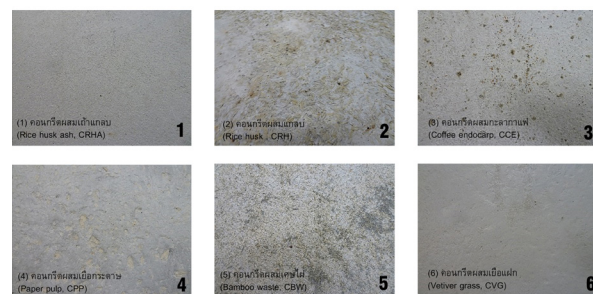


- 1) แหล่งความร้อน 200 วัตต์
- 2) ตำแหน่งหัววัดอุณหภูมิอากาศภายนอกกล่อง
- 3) ตำแหน่งหัววัดอุณหภูมิอากาศภายในกล่อง
- 4) ตำแหน่งหัววัดอุณหภูมิอากาศภายในกล่อง

รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Installation of thermometers)



รูปที่ 4 แสดงส่วนประกอบของกล่องทดสอบและการติดตั้งแผ่นวัสดุที่หันด้านเข้าสู่แหล่งความร้อน (The components of the testing box and the installation of the material facing the heat source)

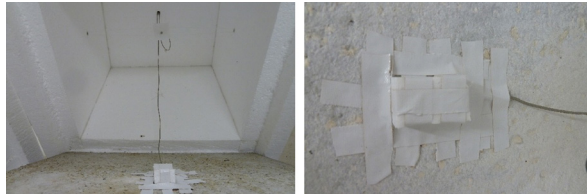


- 1) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA)
- 2) คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH)
- 3) คอนกรีตผสมกะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CCE)
- 4) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP)
- 5) คอนกรีตผสมเศษไม้ (Bamboo Waste, CBW)
- 6) คอนกรีตผสมเยื่อหญ้า (Vetiver Grass, CVG)

รูปที่ 5 วัสดุทดสอบทั้ง 6 แบบ (6 types of testing materials)



รูปที่ 6 แสดงอุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger) และกล่องทดสอบ (The data logger and testing box)



ติดตั้งภายในกล่องทดสอบและที่ผิวแผ่นวัสดุ ใช้ฉนวนปิดหัววัดให้เก็บข้อมูลเฉพาะที่ผิววัสดุ

รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งสาย Thermocouple type J (Wiring of thermocouple type J)

4) วิธีการทดสอบ ทำการวัดข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายนอก (ด้านแหล่งความร้อน) อากาศภายใน (หลังผนัง) อุณหภูมิผิวผนังด้านใน โดยกำหนดให้ความร้อนถ่ายเทด้านเดียว ด้านที่เหลือใช้วัสดุฉนวนโฟมเพื่อให้ความร้อนถ่ายเททางด้านผนังทดสอบเป็นหลักเท่านั้น ใช้หัววัดอุณหภูมิ Thermocouple type J ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ และใช้ฉนวนโฟมปิดผิวกรณีวัดค่าอุณหภูมิผิวผนัง เชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) ดังรูปที่ 7 ทั้งนี้ ทำการสอบเทียบค่าการวัดของหัววัดแต่ละอันก่อนทำการทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถเปรียบเทียบกันได้ได้อย่างถูกต้อง ทำการให้ความร้อนผ่านสู่ภายในกล่องและคายความร้อนออกเมื่ออุณหภูมิภายในกล่องลดลง

ทำการสอบเทียบเครื่องมือโดยการนำหัววัดสัญญาณต่อกับเครื่องบันทึกอัตโนมัติ (data logger) เก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศในช่วงอุณหภูมิต่ำจนถึงสูงในช่วงที่มีผลต่อการทดสอบ แล้วนำมาเปรียบเทียบโดยการสร้างเป็นสมการถดถอยของแต่ละหัววัดเพื่อสอบเทียบข้อมูลกลับหลังจากที่มีการเก็บข้อมูลจริงแล้ว โดยใช้ค่าที่ได้จากหัววัดมาตรฐานเป็นตัวแปรตาม

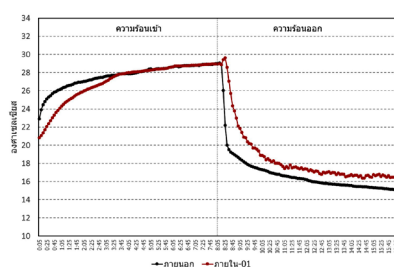
5. ผลการทดลอง

5.1 ผลการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกผ่านแผ่นทดสอบ

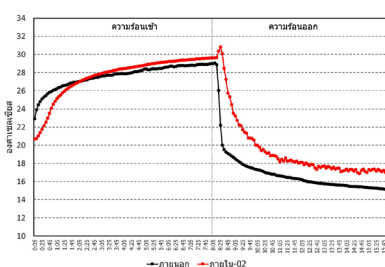
จากการทดสอบวัสดุแผ่นทดสอบทั้ง 6 ดังรูปที่ 8 รูปแบบหลังทำการให้ความร้อนเข้า 8 ชั่วโมง และคายความร้อน 8 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า

1) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA) หน่วงเหนี่ยวความร้อนไว้ได้ประมาณ 3.5 ชั่วโมงก่อนที่จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก สูงกว่าภายนอกเฉลี่ย 0.04°C และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่ก็จะไม่ลดต่ำจนเท่ากับอากาศภายนอก

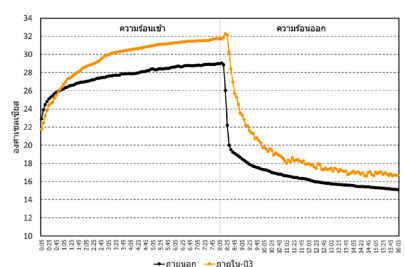
2) คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH) หน่วงเหนี่ยวความร้อนไว้ได้ประมาณ 2 ชั่วโมงก่อนที่จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก สูงกว่าภายนอกเฉลี่ย 0.51°C และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่ก็จะไม่ลดต่ำจนเท่ากับอากาศภายนอก



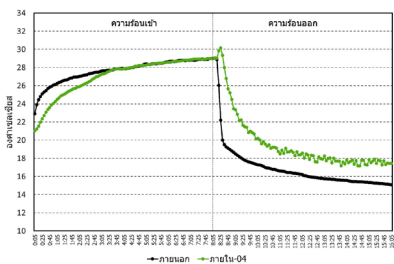
(1) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA)



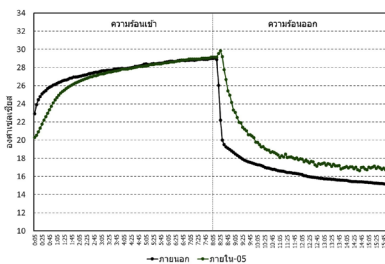
(2) คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH)



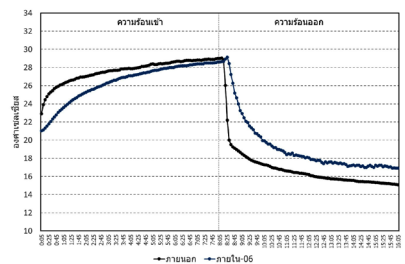
(3) คอนกรีตผสมกะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CCE)



(4) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP)



(5) คอนกรีตผสมเศษไม้ (Bamboo Waste, CBW)



(6) คอนกรีตผสมหญ้าแฝก (Vetiver Grass, CVG)

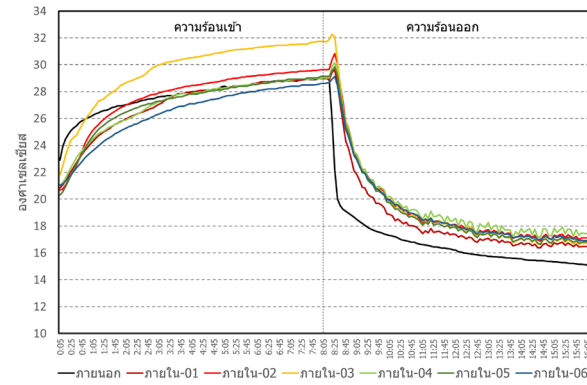
รูปที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในกล่องทดสอบของวัสดุทดสอบทั้ง 6 รูปแบบ (The air temperature outside and inside testing box from 6 testing materials)

3) คอนกรีตผสมกะลาแฟ (Coffee Endocarp, CCE) ผนังหนึ่ยวความร้อนไ้ได้ประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนที่้จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก สูงกว่าภายนอกเฉลี่ย 2.28 °C และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่กั้จะไม่ลดต่ำจนเท่ากั้กับอากาศภายนอก

4) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP) ผนังหนึ่ยวความร้อนไ้ได้ประมาณ 3.5 ชั่วโมงก่อนที่้จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก สูงกว่าภายนอกเฉลี่ย 0.04 °C และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่กั้จะไม่ลดต่ำจนเท่ากั้กับอากาศภายนอก

5) คอนกรีตผสมเศษไ้ (Bamboo Waste, CBW) ผนังหนึ่ยวความร้อนไ้ได้ประมาณ 4.5 ชั่วโมง ก่อนที่้จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก สูงกว่าภายนอกเฉลี่ย 0.10 °C และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่กั้จะไม่ลดต่ำจนเท่ากั้กับอากาศภายนอก

6) คอนกรีตผสมเยื่อหญ้าแฟก (Vetiver Grass, CVG) ผนังหนึ่ยวความร้อนไ้ได้ประมาณ 8 ชั่วโมงก่อนที่้จะทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับอากาศภายนอก และคายความร้อนออกอย่างรวดเร็วในช่วง 1 ชั่วโมงแรก แต่กั้จะไม่ลดต่ำจนเท่ากั้กับอากาศภายนอก ดังรูปที่ 9

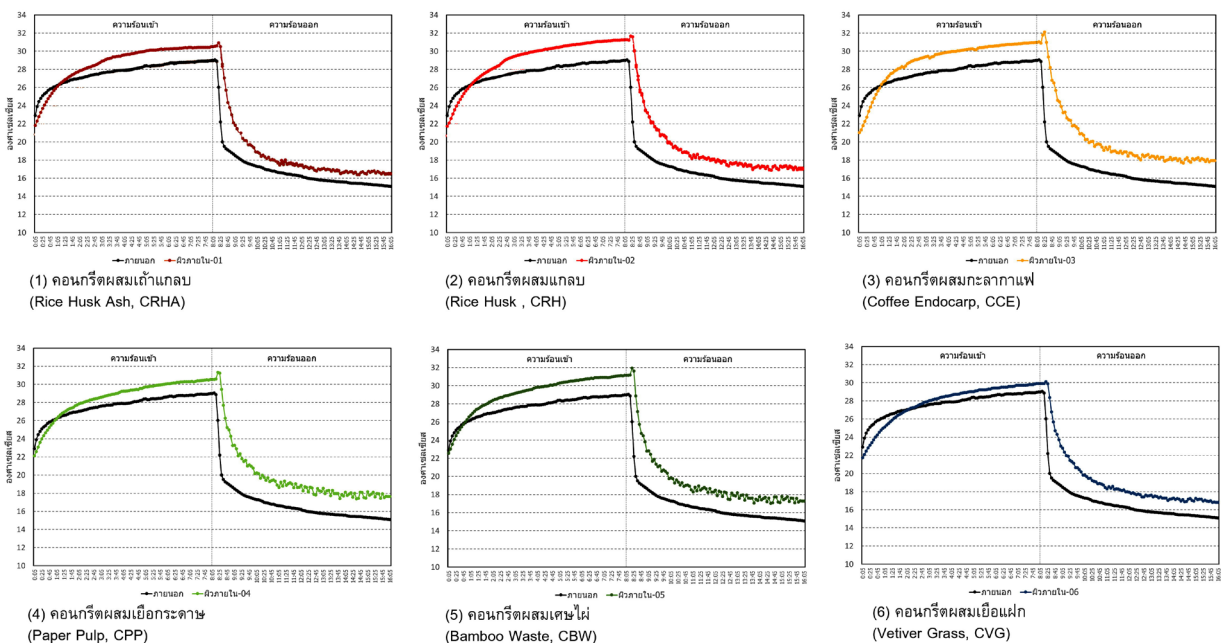


รูปที่ 9 แสดงค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในกล่องทดสอบวัสดุทดสอบแบบต่างๆ (The air temperature outside and inside testing box in different types)

จากข้อมูลพบว่า แผ่นทดสอบที่มีส่วนผสมของกะลาแฟมีความแตกต่างอย่างชัดเจนถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในห้องและมีความเป็นตัวนำสูงตามด้วยแคลบ เยื่อกระดาษ เศษไ้ และเยื่อแฟกตามลำดับ

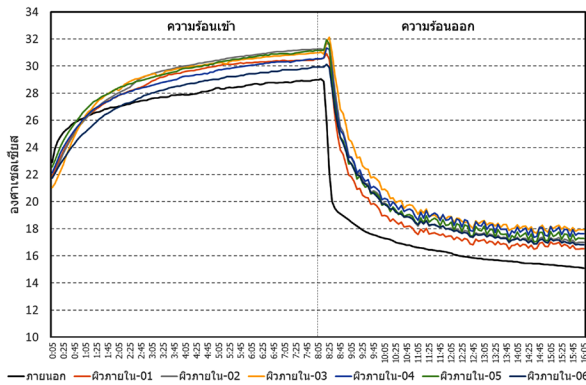
5.2 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิววัสดุภายใน

ด้วยอุณหภูมิผิวของวัสดุมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีสู่ผู้ไ้ นอกเหนือจากอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศ วัสดุใดมีอุณหภูมิผิวสูงจึงมีโอกาสทำให้ผู้ใช้งานภายในห้องรู้สึกร้อนขึ้น โดยมีผลการทดสอบ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงค่าอุณหภูมิผิววัสดุภายในกล่องทดสอบของวัสดุทดสอบทั้ง 6 รูปแบบ (Show the inside surface temperature of 6 types of testing box)

จากผลการทดลอง อุณหภูมิผิวภายในสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ย ดังรูปที่ 11 สรุปได้ดังนี้



รูปที่ 11 แสดงค่าอุณหภูมิผิววัสดุภายในกล่องทดสอบของวัสดุทดสอบแบบต่างๆ (Show the inside surface temperature of different types of testing box)

- (1) คอนกรีตผสมเถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, CRHA) 1.39 °C
- (2) คอนกรีตผสมแกลบ (Rice Husk, CRH) 1.87 °C
- (3) คอนกรีตผสมกะลากาแฟ (Coffee Endocarp, CCE) 1.74 °C
- (4) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (Paper Pulp, CPP) 1.19 °C
- (5) คอนกรีตผสมเศษไม้ (Bamboo Waste, CBW) 1.74 °C
- (6) คอนกรีตผสมเยื่อแฝก (Vetiver Grass, CVG) 0.69 °C

จากข้อมูลพบว่า วัสดุทดสอบจะให้ค่าอุณหภูมิผิวสูงโดยเรียงลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้ คอนกรีตผสมแกลบ กะลากาแฟ เศษไม้ เถ้าแกลบ เยื่อกระดาษ และเยื่อแฝก ตามลำดับ

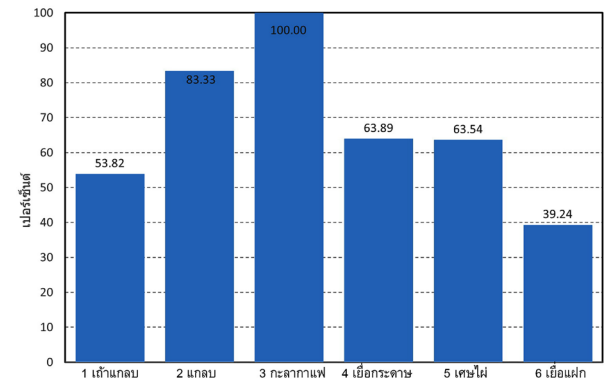
5.3 อุณหภูมิภายในห้องเนื่องจากการใช้งานภายใต้ระบบปิดที่ไม่ปรับอากาศ

1) โอกาสการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายใน เมื่อไม่เปิดช่องเปิด ดังรูปที่ 12

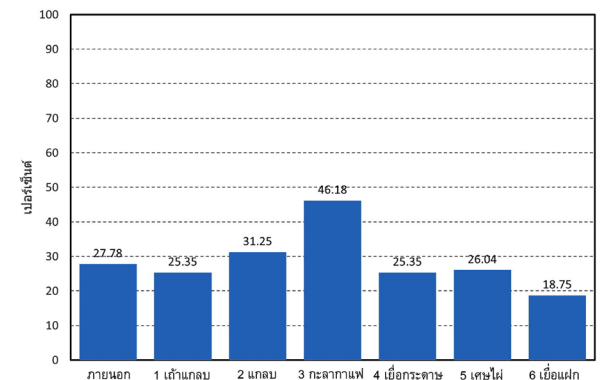
2) โอกาสการลดลงของสภาวะน่าสบายภายใต้ตัวแปรของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 13

จากข้อมูลพบว่า วัสดุคอนกรีตผสมกะลากาแฟ แกลบ เศษไม้ เถ้าแกลบ เยื่อกระดาษ และเยื่อแฝก มีคุณสมบัติที่มีผลทำให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก มีผลให้มีโอกาสเกิดสภาวะน่าสบายลดลงเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า เมื่อไม่เปิดช่องเปิด อุณหภูมิสามารถเพิ่มขึ้นได้

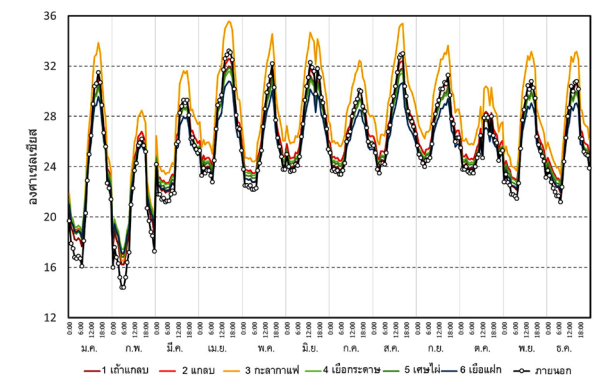
เนื่องจากการสะสมความร้อนของวัสดุในช่วงที่ได้รับความร้อน และการไม่มีการถ่ายเทความร้อน การทำนายค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ใช้การสร้างสมการถดถอยเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรต้นคืออุณหภูมิอากาศภายนอกกล่องทดลองและรูปแบบวัสดุตัวแปรตามคืออุณหภูมิอากาศภายใน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 แสดงค่าโอกาสของชั่วโมงที่จะมีอุณหภูมิอากาศภายในห้องสูงกว่าภายนอกห้อง (The possibility of time (hour unit) that have higher air temperature inside the room than outside the room)



รูปที่ 13 แสดงค่าโอกาสของชั่วโมงที่จะมีอุณหภูมิอากาศภายในห้องสูงกว่า 28 องศาเซลเซียส (The possibility of time (hour unit) that have air temperature inside the room higher than 28 °C)



รูปที่ 14 แสดงการทำนายค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องเทียบกับอุณหภูมิอากาศภายนอก (The prediction of air temperature inside the room comparing with the outside one)

6. บทสรุปและข้อแนะนำ

จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ ตามตารางที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) วัสดุแผ่นทดสอบมีลักษณะเป็นวัสดุเก็บสะสมความร้อน แต่เนื่องจากมีความหนาที่ไม่มากนักจึงหวั่นเหี่ยวความร้อนเอาไว้เพียงเวลาสั้นๆ ได้แก่ คอนกรีตผสมกะลาปากาแฟ ส่วนวัสดุที่หวั่นความร้อนเอาไว้ได้นานจะมีความเป็นฉนวนสูงกว่า แผ่นวัสดุทดสอบที่เหมาะสมมากที่สุดถึงน้อยที่สุดในการนำไปใช้เพื่อลดความร้อนในเงื่อนไขระบบปิดที่ไม่ปรับอากาศ คือ (1) คอนกรีตผสมเยื่อแฟก (2) คอนกรีตผสมเศษไม้ (3) คอนกรีตผสมเยื่อกระดาษ (4) คอนกรีตผสมถั่วแกลบ (5) คอนกรีตผสมแกลบ และ (6) คอนกรีตผสมกะลาปากาแฟ ตามลำดับ

2) วัสดุแผ่นมีลักษณะผิวหน้าคล้ายกัน (ด้านเรียบ) มีความสามารถเก็บความร้อนต่างกันตามส่วนผสมมีผลต่อการทำให้อุณหภูมิผิววัสดุภายในต่างกัน แผ่นที่มีความเป็นคอนกรีตสูงจะมีอุณหภูมิผิวสูงกว่า ได้แก่ คอนกรีตผสม

กะลาปากาแฟ ส่วนแผ่นที่มีความเป็นคอนกรีตน้อยจะมีอุณหภูมิผิวต่ำกว่า ได้แก่ คอนกรีตผสมเยื่อหญ้าแฟก

3) เมื่อทำการทำนายค่าการนำไปใช้งานกับอาคารไม่ปรับอากาศ พบว่า วัสดุแผ่นทดสอบแต่ละส่วนผสมมีโอกาสให้ค่าอุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกทั้งวันตลอดปีตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ คอนกรีตผสมกะลาปากาแฟ แกลบ กระดาษ เยื่อไม้ ถั่วแกลบ และเยื่อแฟก

4) เมื่อทำการทำนายค่าโอกาสที่อุณหภูมิภายในห้องสูงกว่าสภาวะนำสบาย (28 องศาเซลเซียส) ทั้งวันตลอดปีตามลำดับจากมากไปน้อยดังนี้ คอนกรีตผสมกะลาปากาแฟ แกลบ เยื่อไม้ กระดาษ ถั่วแกลบ และเยื่อหญ้าแฟก

5) แผ่นวัสดุคอนกรีตผสมกะลาปากาแฟมีความเหมาะสมน้อยที่สุด ส่วนคอนกรีตผสมเยื่อหญ้าแฟกเหมาะสมมากที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดความร้อนในเงื่อนไขระบบปิดที่ไม่ปรับอากาศ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการทดสอบวัสดุ (Comparison of result of the testing material)

หัวข้อทดสอบ	ถั่วแกลบ	แกลบ	กะลาปากาแฟ	เยื่อกระดาษ	เศษไม้	เยื่อหญ้าแฟก
ช่วงเวลาที่ความร้อนภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ภายใน (ชั่วโมง)	3.5	2.0	1.0	3.5	4.5	8.0
อันดับ (แย่งดี)	3	2	1	3	5	6
ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิภายในที่สูงกว่าภายนอก (เซลเซียส)	0.04	0.51	2.28	0.04	0.10	-
อันดับ (แย่งดี)	4	2	1	4	3	6
อุณหภูมิผิวภายในที่สูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ย (เซลเซียส)	1.39	1.87	1.74	1.19	1.74	0.69
อันดับ (แย่งดี)	4	1	2	5	2	6
ชั่วโมงที่อุณหภูมิภายในสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก (เปอร์เซ็นต์)	53.82	83.33	100.00	63.89	63.54	39.24
อันดับ (แย่งดี)	5	2	1	3	4	6
ชั่วโมงที่อุณหภูมิภายในสูงกว่า 28 องศาเซลเซียส (เปอร์เซ็นต์)	25.35	31.25	46.18	25.35	26.04	18.75
อันดับ (แย่งดี)	4	2	1	4	3	6

References

- Boonyathikarn, S. (1999). *Techniques of energy saving house design for better quality of life*. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University.
- Chiang Mai Government Center. (2017). *General information of Chiang Mai*. Retrieved January, 2017, from <http://www.chiangmai.go.th/managing/public/D8/8D01Feb2017150134.pdf>.
- Kreider, J. F., Curtiss, P. S., & Rabl, A. (2002). *Heating and cooling of building design for efficiency*. USA: Traylor & Frank Group.
- Lertwattanakul, P., & Tungsirirakul, J. (2007). Effect of natural materials on properties of adobe brick for earth construction. *Journal of architectural/planning research and studies (JARS)*, 5(1), 187-199.
- Okino, E. Y. A., Santana, M. A. E., & de Souza, M. R. (2000). Utilization of wastepaper to manufacture low density boards. *Bioresource Technology*, 73, 77-79.
- Ricciardi, P., Torchia, F., Belloni, E., Lascaro, E., & Buratti, C. (2017). Environmental characterisation of coffee chaff, a new recycled material for building applications. *Construction and Building Materials*, 147, 185-193.
- Sangrutsamee, V. (2012). Development of lightweight interlocking blocks from paper pulp waste. *Built environment research associates conference*, 3, 12-20.
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996). *Passive cooling of building*. London: James & James.
- Srivanit, M., & Auttarat, J. (2016). Classifying spatial homogeneity of thermally-stabilized surface to define differentiation local atmospheric zones in Chiang Mai city. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, 13(1), 1-22.
- Stein, B., & Reynolds, J. S. (1992). *Mechanical and electrical equipment for buildings*. New York: John Wiley & Sons.
- Sukjinda, P., Numkrun, K., & Chaivichit, N. (2016). Suitable amount of black rice husk ash for structural concrete work. *Building innovation*, 1, 8.
- Taemthong, W. (2013). Rice straw insulation sheet. *KKU research journal*, 18(3), 380-390.
- Thai meteorological department. (2017). *Chiang Mai weather information*. Retrieved January, 2017, from <https://www.tmd.go.th/index.php>.
- Yimprayoon, C. (2016). Zero energy building. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies (JARS)*, 13(2), 1-30.
- Yodnumkhum, W. (2005). *Production development of cement composite plates reinforced with wastepaper fibers*. Master of science thesis (Civil Engineering), Faculty of industrial education and technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

