

Thermal Behavior of Lightweight Metal-Sheet Building-Envelope Incorporated with Phase Change Material (PCM)

Chonlathis Eiamworawutthikul^{1,*}, Chawalit Manisri², Nuttawat Chutarat³

^{1,2,3} School of Engineering, Sripatum University

Received: 15 October 2018

Revised: 6 November 2018

Accepted: 7 November 2018

ABSTRACT

Heat Transfer behaviour through light building envelope wall can be managed using Phase Change Material (PCM) to enhance latent thermal mass with minimal burden on wall structure. By absorbing heat during the day and releasing it at night, PCM incorporated wall can reduce diurnal maximum inner wall surface temperature and decrease cooling load for air conditioning system. The research numerically investigated thermal behaviour daily cycle of a lightweight metal-sheet building envelope with fiberglass insulator incorporated with varied amount of PCM layer under Bangkok weather condition. Implicit Finite Difference Method using Crank-Nicolson scheme was applied for numerical calculation. The result indicates that the amount of PCM used influences the effectiveness of wall temperature reduction and how latent heat storage is activated per weight of implemented PCM.

KEYWORDS : PCM Building-Envelope Energy Conservation Cooling

* Corresponding Author; Email: chonlathis.ei@spu.ac.th

พฤติกรรมทางความร้อนของผนังเบาเปลือกอาคาร แบบโลหะแผ่นร่วมกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ชลธิศ เอี่ยมวรฤทธิกุล^{1,*}, ขวลิต มณีศรี², ณัฐวัฒน์ จุฑารัตน์³

^{1,2,3} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

บทคัดย่อ

การจัดการการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบาเปลือกอาคารแบบโครงสร้างแผ่นโลหะ สามารถทำได้โดยการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (PCM) เพื่อเพิ่มมวลความร้อนแฝงโดยไม่มีผลกระทบต่อมวลของโครงสร้างผนัง ในการดูดซับความร้อนจากภายนอกอาคารในช่วงเวลากลางวัน และปลดปล่อยออกในช่วงเวลากลางคืน ทำให้ช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวผนังและลดภาระการทำความเย็นสูงสุดของการปรับอากาศภายในอาคาร การศึกษาได้ดำเนินการโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ Crank-Nicolson Finite Difference implicit Method เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างของผนังเบาแบบแผ่นโลหะ ที่มีฉนวนใยแก้วและชั้นของสารเปลี่ยนสถานะที่ปริมาณต่างๆ ภายในใต้การเปลี่ยนแปลงรายวันของสภาวะภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่แสดงให้เห็นถึงปัจจัยของปริมาณการใช้ PCM ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิผิวผนังเปลือกอาคาร และมีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงานของปริมาณความร้อนแฝงต่อน้ำหนัก PCM ที่ใช้

คำสำคัญ: สารเปลี่ยนสถานะ ผนังเปลือกอาคาร การอนุรักษ์พลังงาน ภาระการทำความเย็น

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: chonlathis.ei@spu.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิและแสงอาทิตย์ของสภาพภูมิอากาศท้องถิ่น ผ่านผนังเปลือกอาคารเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคาร เป็นส่วนสำคัญของภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานของอาคารเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีการใช้งานอาคารอย่างเต็มที่ ในขณะที่มีการระบายความร้อนจากความชื้นแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศมีค่าสูง วิธีหนึ่งในการบริหารจัดการการถ่ายเทความร้อนจากเปลือกอาคาร สามารถทำได้โดยการใช้ผนังโครงสร้างที่มีมวลความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลในการลดการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ใช้งานและบรรเทาภาระความต้องการในการทำความเย็นสูงสุด (Peak Demand) ลงได้

การใช้สารเปลี่ยนสถานะ หรือ Phase Change Material (PCM) เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างผนังเปลือกอาคาร สามารถช่วยเพิ่มมวลความร้อนของผนัง โดยไม่มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่จะเป็นภาระต่อโครงสร้างอาคาร การเลือกใช้ PCM ที่เหมาะสมจะสามารถดูดซับความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผนังในรูปแบบความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวในช่วงเวลากลางวัน และคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมในช่วงกลางคืนเมื่อเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของแข็งอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นการนำ PCM มาใช้ในโครงสร้างผนังเบา จะช่วยลดการแปรผันของอุณหภูมิผิวอันเนื่องมาจากมวลความร้อนที่สูงขึ้น และลดการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ใช้งานภายในอาคาร

เปลือกโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะเป็นผนังเบา ประกอบด้วยแผ่นเหล็ก (ชุบเคลือบด้วยสังกะสี หรือ ทาสี) และ มีฉนวนกันความร้อนด้านภายใน เป็นที่นิยมสำหรับผนังโรงงานอุตสาหกรรม หลังคาอาคารห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่ และยังรวมถึงโครงสร้างเปลือกสำหรับการใช้งานอื่นๆ เช่น ตู้รถบรรทุก container ห้องติดตั้งชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กลางแจ้ง ฯลฯ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถก่อสร้างได้เร็ว ดังนั้นโครงสร้างปกติของผนังเบา ที่มีมวลความร้อนน้อยมากเทียบกับผนังอิฐที่ใช้ในอาคารทั่วไป ทำให้อุณหภูมิของผิวภายในผนังมีค่าสูงสุดในช่วงประมาณเที่ยงวันและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากในแต่ละวัน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงศักยภาพในการใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างผนังเพื่อเพิ่มมวลความร้อนแฝง ที่จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ใช้งานในช่วงเวลากลางวัน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของการใช้สารเปลี่ยนสถานะในปริมาณต่างๆ ต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบาเปลือกอาคาร แบบโครงสร้าง Metal-Sheet ภายใต้การเปลี่ยนแปลงรายวันของสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับออกแบบการใช้ PCM ในโครงสร้างผนังเบาในอาคารประเภทต่างๆ ได้ต่อไป

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำสารเปลี่ยนสถานะ หรือ phase change material (PCM) ทั้งประเภท inorganic materials (เช่น salt-hydrate) หรือ ประเภท organic materials (เช่น paraffin waxes หรือ fatty acid) มาใช้ในโครงสร้างของวัสดุเพื่อการควบคุมพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคาร ได้มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลามากกว่า 20 ปี ตามที่รายงานโดย Athienitis et al. (1997) Hawes et al. (1993) และ Rudd (1993)

รายงานสืบเนื่องจากการวิจัยก่อนหน้านี้โดย Eiamwongwutthikul & Yongchareon (2007, 2010) ได้วิเคราะห์เชิงตัวเลขถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผนังคอนกรีต ที่มี PCM ประเภทพาราฟิน ผสมอยู่ภายใต้

สภาพภูมิอากาศรายชั่วโมงของกรุงเทพมหานคร ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความร้อนแฝงจากการเปลี่ยนสถานะของ PCM ในการลดอุณหภูมิสูงสุดของผนังและการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคาร อีกทั้งได้ระบุถึงแนวทางการเลือกอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เหมาะสม ที่ควรมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้ง PCM ในโครงสร้างของผนัง เพื่อให้เกิดการใช้ความร้อนแฝงของ PCM (% Active PCM) ได้มากที่สุด Eiamworawutthukul (2008) ผลการทดลองโดย Wattanavichien & Sudprasert (2016) ยืนยันถึงอิทธิพลของการใช้ PCM ในโครงสร้างผนังเบา ภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังภายในและลดเวลาในการเกิดขึ้นได้ รวมถึงได้ระบุถึงปัจจัยของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ต่อพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของผนังที่ต้องสอดคล้องกับค่าเฉลี่ยการแปรผันของอุณหภูมิของผนังในรอบวัน

Gracia & Cabeza (2015) ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวข้องกับการใช้ PCM ในการเพิ่มมวลความร้อนให้แก่ผนังเปลือกอาคาร ที่ส่งผลถึงการควบคุมภาระการทำความร้อนและความเย็นภายในพื้นที่ใช้งาน ที่สามารถช่วยลดการใช้พลังงานจากอุปกรณ์ปรับอากาศได้ รวมถึงแนวทางการผนวก PCM เข้าไว้ในโครงสร้างอาคารในรูปแบบต่างๆ เช่น การใช้ Nano-PCM ในส่วนประกอบของผนังเบาที่มี Graphite Nano-Sheet เพื่อช่วยในการกระจายความร้อนสู่ PCM อย่างทั่วถึง (Biswas et al., 2014) หรือ การบรรจุ PCM ในช่องของแผงรังผึ้งอลูมิเนียมที่สามารถส่งถ่ายความร้อนจากผนังไปยัง PCM ได้อย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความจุความร้อนแฝงถูกใช้งานได้เต็มศักยภาพยิ่งขึ้น (Lai & Hokoi, 2014) ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึง ปัจจัยของตำแหน่งการติดตั้ง PCM ภายในผนังเปลือกอาคาร ต่อพฤติกรรมในการเพิ่มมวลความร้อนจากความร้อนแฝงของ PCM ในผนังเบา ได้อธิบายโดย Jin et al. (2014) และสำหรับผนังก่ออิฐฉาบโดย Silva et al. (2012)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้พบว่ามีผลการรายงานผลอย่างกว้างขวางถึงพฤติกรรมทางความร้อนของผนังที่เปลี่ยนไปจากการใช้สารเปลี่ยนสถานะภายในโครงสร้างผนังอาคาร โดยมุ่งเน้นปัจจัยของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่ใช้ ตลอดจนตำแหน่งและลักษณะการติดตั้งภายในโครงสร้างผนัง อย่างไรก็ตามการอธิบายถึงอิทธิพลจากปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบอย่างมีประสิทธิภาพยังไม่ได้มีการรายงานไว้อย่างชัดเจน

สมมติฐานการวิจัย

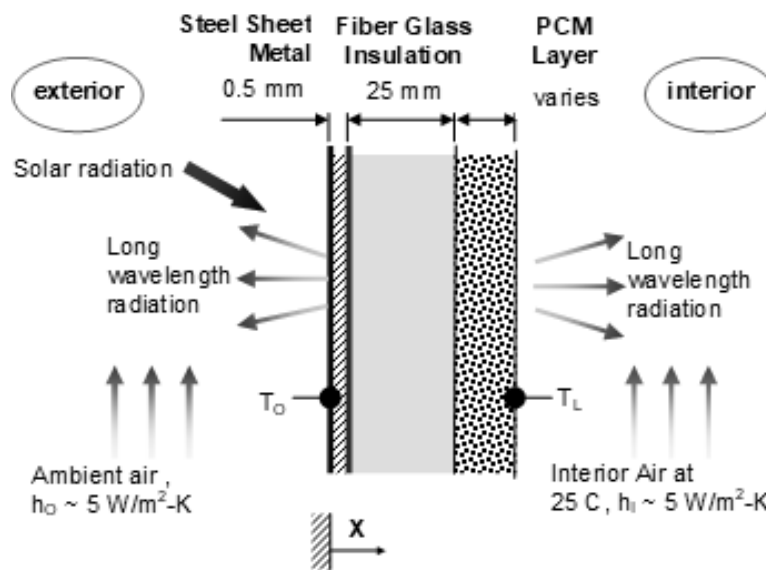
การใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างผนังเบาแบบแผ่นโลหะ สามารถช่วยเพิ่มมวลความร้อนที่ส่งผลในการลดอุณหภูมิผนังสูงสุด และการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ใช้งานภายในอาคารในช่วงเวลากลางวัน โดยประสิทธิภาพในการทำงานของระบบขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยพฤติกรรมทางความร้อนของผนังเปลือกอาคาร ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมตอบสนองของ PCM ที่ถูกผนวกเข้าเป็นส่วนประกอบของผนังภายนอกของอาคาร ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่เป็นค่าเฉลี่ย รายชั่วโมงในรอบวันของเดือนเมษายน โดยใช้ข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา (2547) ในการคำนวณแบบ quasi-steady รอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศและแสงอาทิตย์เป็นไปในแบบเดียวกันในแต่ละรอบวัน

รูปแบบผนังที่พิจารณาถูกจำลองเป็นลักษณะผนังหลายชั้น (composite wall) ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ ดังแสดงใน ภาพที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย แผ่นโลหะ หนา 0.5 mm และ ฉนวนใยแก้วหนา 25 mm โดยมีชั้น

ของสารเปลี่ยนสถานะถูกผนวกเข้าไปในโครงสร้าง มีความหนาเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 0 mm (ไม่มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะ) ถึงความหนา 25 mm



ภาพที่ 1 รูปส่วนประกอบผนังเบาและสภาพแวดล้อม

โดยการวิเคราะห์การนำความร้อนแบบไม่คงตัวภายในวัสดุแต่ละชั้นผนัง เป็นไปตามสมการ

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T}{\partial t}$$

โดยที่

$T(x, t)$ คือ อุณหภูมิของผนังที่ตำแหน่ง x และเวลา t ใดๆ

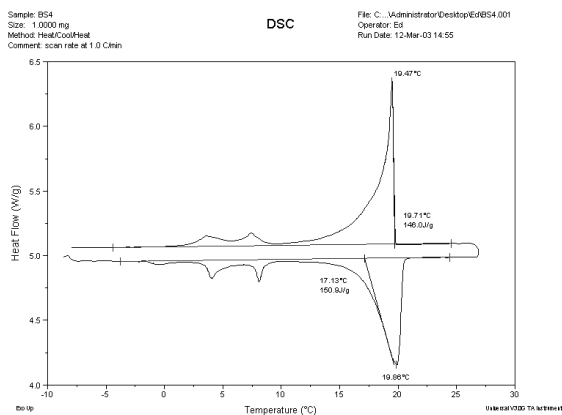
α_j คือ thermal diffusivity ของวัสดุในชั้นที่ $j = (1), (2), \text{ หรือ } (3)$

การรวบรวมข้อมูลใช้ผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขแบบ finite-difference ที่มีลักษณะของ Crank-Nicolson implicit method โดยมีขอบเขต (Boundary Condition) ที่ผิวผนังภายนอก โดยการนำความร้อนเท่ากับผลรวมของการถ่ายเทความร้อนจาก แสงอาทิตย์ตกกระทบ การแผ่รังสีจากสภาพแวดล้อม และการพาความร้อนจากข้อมูลสภาพภูมิอากาศภายนอก ในขณะที่ขอบเขตที่ผิวผนังภายใน โดยการนำความร้อนเท่ากับผลรวมของการถ่ายเทความร้อน จากการแผ่รังสีและการพาความร้อนระหว่างผิวผนังและอากาศภายในอาคารที่กำหนดให้มีค่าอุณหภูมิคงที่ที่ 25°C

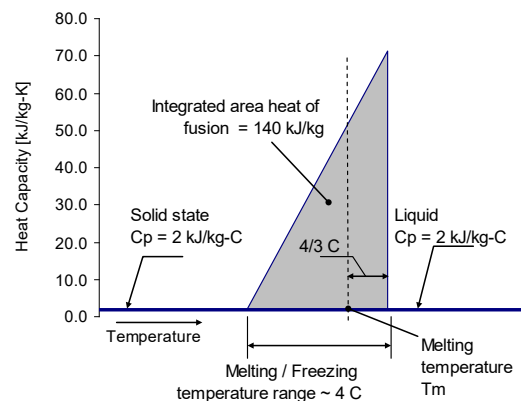
ในการคำนวณ ผนังได้ถูกกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น (Initial Condition) มีค่าสม่ำเสมอที่ 25°C โดยให้โปรแกรมดำเนินการคำนวณการถ่ายเทความร้อนตามชั้นเวลา ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงรายชั่วโมง จำลองหลายรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง จนกระทั่งให้ผลอุณหภูมิของผนังที่เป็น quasi-steady คือ สถานะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายชั่วโมงของผนังที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าคงตัวในแต่ละรอบวัน

สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้พิจารณาเป็นแบบพาราฟิน โดยจำลองพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะผ่านค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วงของอุณหภูมิ ดังแสดงจากข้อมูลตัวอย่างจากการวัดโดยเครื่อง differential scan calorimeter (DSC) ใน ภาพที่ 2a และแบบจำลองสำหรับการคำนวณใน ภาพที่ 2b ซึ่งกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของโครงสร้างผนังและสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการคำนวณได้ถูกกำหนดดังแสดงใน ตารางที่ 1 (Incropera & DeWitt, 2002)

การคำนวณกำหนดให้ผนังถูกจัดวางในแนวนอน เสมือนเป็นการใช้งานสำหรับหลังคาอาคาร โดยเริ่มจากการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีเพียง metal sheet และ ฉนวน เป็นข้อมูลอ้างอิงฐาน สำหรับเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่เปลี่ยนไป เมื่อมีชั้นของสารเปลี่ยนสถานะติดตั้งเพิ่มเข้าไปที่ระดับชั้นความหนาชั้นละ 2.5 mm จนกระทั่งความหนาของชั้น PCM สูงสุดที่ 25 mm ซึ่งในแต่ละชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้น PCM นั้นๆ เพื่อให้เกิดการใช้ความจุความร้อนแฝงของ PCM สูงที่สุด อีกทั้งได้คำนวณเงื่อนไขที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วขนาดความหนา 25 mm อีกชั้นหนึ่ง (ความหนารวมเป็น 50 mm) แทนการใช้ชั้นสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น



(a)



(b)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างลักษณะค่าความจุความร้อนจาก DSC และ แบบจำลองค่าความจุความร้อน แปรผันตามอุณหภูมิของ PCM

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุผนังและสารเปลี่ยนสถานะ

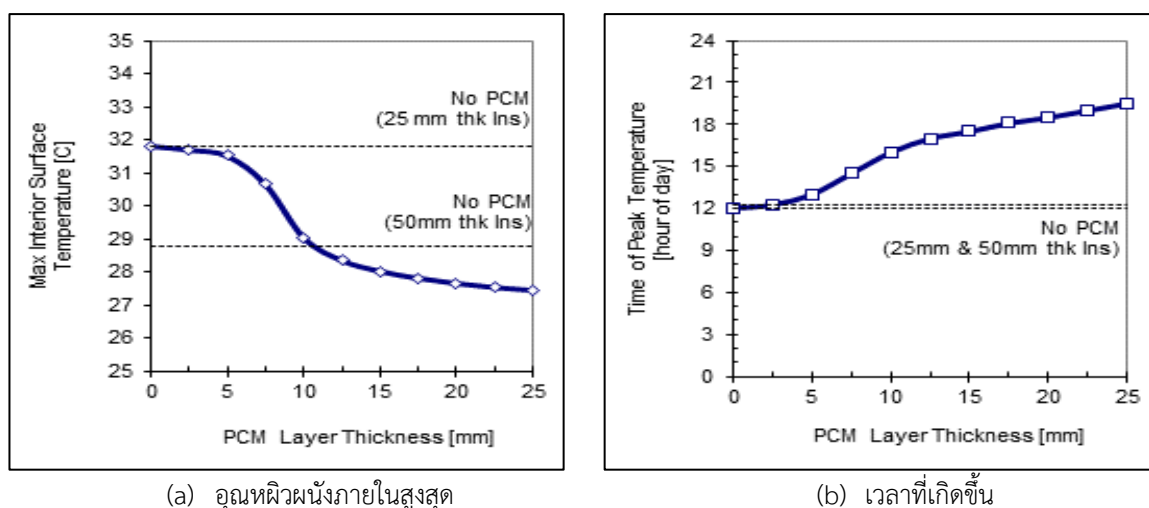
คุณสมบัติ	Metal Sheet	ฉนวนใยแก้ว	PCM
Density [kg/m ³]	7,830	24	800
Heat Capacity [kJ/kg-K]	0.450	0.835	0.2
Thermal Conductivity [W/m-K]	60	0.035	0.2
Heat of Fusion [kJ/kg]	-	-	140
ความหนา [mm]	0.5	25	0-25

Incropera & DeWitt (2002)

ผลการวิจัย

ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบวัน ของผิวผนังด้านในอาคารและเวลาที่เกิดขึ้น ดังแสดงไว้ใน ภาพที่ 3a และ 3b ระบุได้ว่า อุณหภูมิผิวผนังด้านภายในเมื่อไม่มีชั้น PCM มีอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันที่ 32°C เกิดขึ้นในเวลาประมาณเที่ยงวัน อันเนื่องมาจากที่มวลความร้อนของผนังเบา มีค่าน้อย ทำให้ ผิวผนังภายในมีอุณหภูมิตอบสนองต่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวผนังภายนอกได้อย่างรวดเร็ว

เมื่อเพิ่มชั้น PCM เข้าไปบนผนังด้านฉนวนใยแก้ว อุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังด้านในมีค่าลดลงเล็กน้อยจนเมื่อความหนาของ PCM เท่ากับ 5 mm อุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังลดลงอย่างรวดเร็วตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของอุณหภูมิผิว ตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น ชลottedลงเมื่อชั้น PCM มีความหนาที่ประมาณมากกว่า 10 mm โดยการเพิ่มความหนา PCM มากขึ้นกว่านี้ แทบไม่ได้ช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของผนังลง



(a) อุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุด

(b) เวลาที่เกิดขึ้น

ภาพที่ 3 พฤติกรรมทางความร้อนของผนังตามปริมาณความหนาของ PCM ที่ใช้

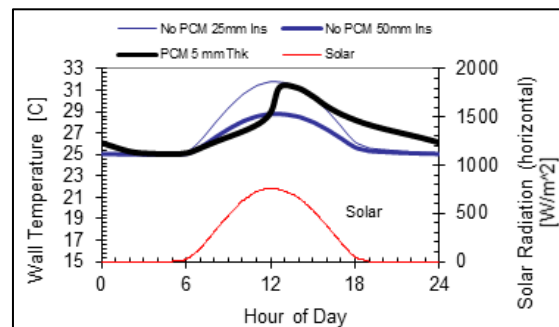
การเพิ่มความหนาของชั้น PCM ทำให้มวลความร้อนรวมของผนังสูงขึ้น ส่งผลให้การเกิดขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันช้าลง จากประมาณเวลา 12:00 น. สำหรับผนังที่ไม่มี PCM เป็น ประมาณ 19:30 น. เมื่อใช้ชั้น PCM มีความหนา 25 mm ดังแสดงใน ภาพที่ 3b

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฉนวนใยแก้วที่มีความหนา 25 mm เพิ่มเข้าไปแทนการใช้ชั้น PCM พบว่าฉนวนที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุดลงประมาณ 3 °C (จาก 32 °C เป็น 29 °C) ดังที่แสดงเป็นเส้นประในภาพที่ 3a ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ชั้น PCM ที่ความหนาประมาณ 10 mm อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาฉนวนแบบไม่ได้เพิ่มมวลความร้อนให้แก่ผนัง และอุณหภูมิผิวผนังสูงสุดยังคงเกิดขึ้นที่ประมาณเวลา 12:00 น.

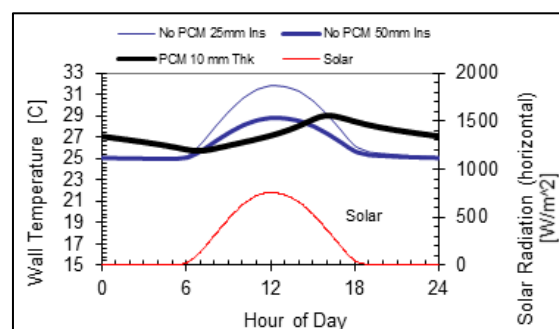
ภาพที่ 4a, b, และ c แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวผนังภายในเมื่อมีชั้น PCM หนา 5 mm, 10 mm, และ 25 mm เปรียบเทียบกับ อุณหภูมิผิวผนังที่ไม่มี PCM แต่มีฉนวนหนา 25 mm และ 50 mm โดยได้แสดงเปรียบเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยในรอบวัน

ผลการคำนวณในภาพที่ 4 ชี้ให้เห็นว่า PCM สามารถเปลี่ยนการตอบสนองของอุณหภูมิผิวผนังต่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดในเวลาเที่ยงวันได้ หาก PCM ที่ใช้มีปริมาณเพียงพอ (ที่ชั้นความหนา 10 mm และ 25 mm)

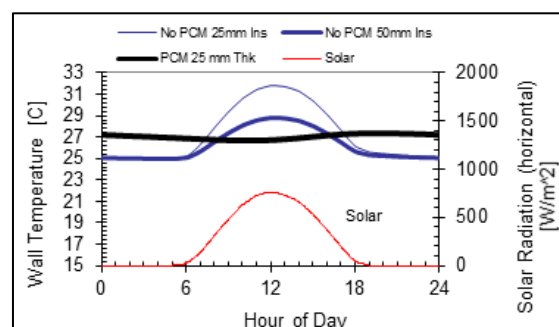
โดยให้อุณหภูมิผิวผนังมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลง รวมถึงลดการเกิดอุณหภูมิสูงสุด ไปสู่ช่วงบ่ายของวัน



(a) ชั้น PCM หนา 5 mm



(b) ชั้น PCM หนา 10 mm



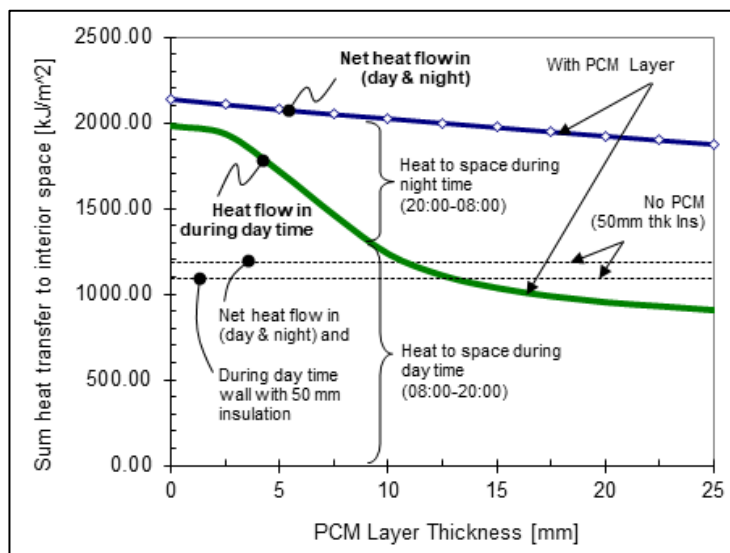
(c) ชั้น PCM หนา 25 mm

ภาพที่ 4 อุณหภูมิผิวผนังภายในของผนังเบารายชั่วโมง ที่ความหนาของชั้น PCM ต่างๆ เปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มี PCM

แต่สำหรับที่ชั้นความหนา PCM 5 mm ซึ่งมีปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะที่น้อยเกินไป และมีปริมาณความจุความร้อนแฝงไม่เพียงพอต่อการดูดซับพลังงานความร้อน ที่ถ่ายเทสู่ผนังได้ตลอดช่วงเวลากลางวัน ส่งผลให้อุณหภูมิของชั้น PCM และผิวผนังด้านในมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อการดูดซับความร้อนแฝงหมดไป ทำให้อุณหภูมิผิวผนังเพิ่มขึ้นกลับเข้าหาลักษณะเหมือนกับผนังเมื่อไม่มีชั้น PCM อย่างรวดเร็ว จากแรงขับของความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างเปลี่ยนสถานะของชั้น PCM และอุณหภูมิภายนอก

ข้อมูลการถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่พื้นที่ภายในได้ถูกวิเคราะห์เพิ่มเติม ดังแสดงผลคำนวณไว้ใน ภาพที่ 5 จากสภาพโครงสร้างผนังเบาเดิมเมื่อไม่มี PCM (ความหนาชั้น PCM = 0 mm) ปริมาณพลังงาน ความร้อน ถ่ายเทเข้า

สู่พื้นที่ภายในทั้งวัน (net heat flow in) มีค่าสุทธิประมาณ $2,138 \text{ kJ/m}^2$ ดังแสดงในกราฟเส้นบนสุด ซึ่งในปริมาณนี้ แบ่งเป็นส่วนที่เกิดขึ้นในช่วงกลางวันระหว่างเวลา 08:00 – 20:00 น. (day time heat flow) เท่ากับ $1,977 \text{ kJ/m}^2$ หรือ 92.5% ของปริมาณความร้อนถ่ายเททั้งหมด



ภาพที่ 5 ปริมาณพลังงานความร้อนถ่ายเทจากผนังเบาสู่พื้นที่ภายใน ที่ความหนาของ PCM ต่างๆ

ข้อมูลปริมาณความร้อนสุทธิผ่านผิวผนังที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในอาคาร ตามเส้นทึบบนสุดของ ภาพที่ 5 มีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรงตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น ในอัตราการลดลงที่ไม่มากนัก ซึ่งมาจากค่าความเป็นฉนวนของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้นตามความหนา ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความร้อนแฝงของ PCM เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะแต่ประการใด

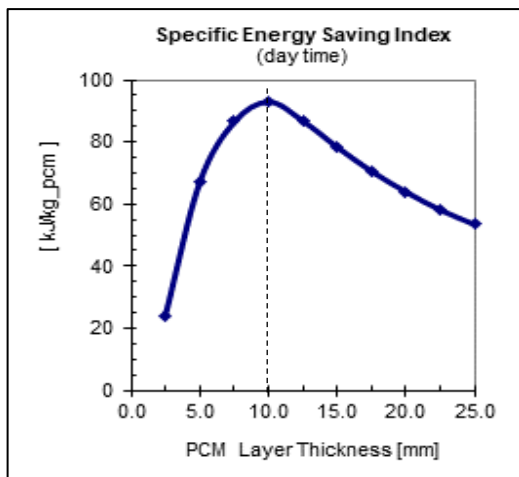
หากพิจารณา แยกการถ่ายเทความร้อนระหว่าง ช่วงกลางวัน (8:00-20:00 น.) และ กลางคืน (20:00-08:00 น.) โดยที่ผลรวมปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างทั้งสองช่วงเวลา (day time heat flow และ night time heat flow) รวมกัน มีค่าเท่ากับความร้อนถ่ายเทสุทธิสู่พื้นที่ภายใน (net heat flow) พบว่าปริมาณความร้อนรวมที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายใน ในช่วงเวลากลางวันมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความหนาอยู่ระหว่าง 2.5-10 mm ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในระหว่างช่วงกลางวันที่มีความหนาของชั้น PCM เท่ากับ 10 mm คิดเป็น 60.9% ของการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งวัน ลดลงจาก 92.5% เมื่อไม่มีชั้น PCM อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของชั้น PCM มากกว่า 10 mm ไม่ได้ช่วยลดสัดส่วนของการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีชั้น PCM แต่เพิ่มความหนาของชั้นฉนวนให้หนาขึ้นเป็นความหนารวมที่ 50 mm ดังแสดงเป็นเส้นประใน 4kr ที่ 5 พบว่า ถึงแม้การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงเป็นอย่างมาก แต่ปริมาณความร้อนถ่ายเทเกือบทั้งหมดยังคงเกิดขึ้นในช่วงเที่ยงวัน

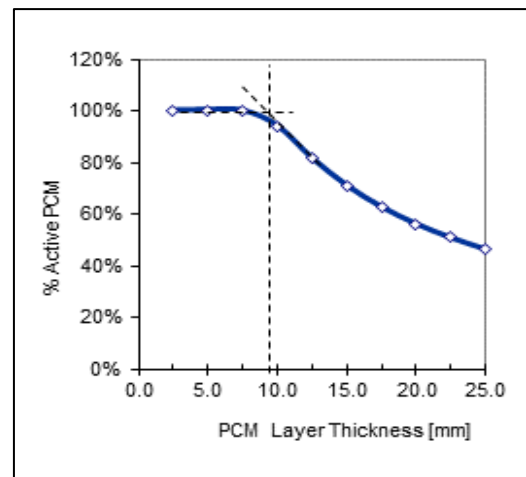
จากผลการคำนวณข้างต้นเป็นที่สังเกตได้ว่า ผนังที่มีชั้น PCM มีการอัตราการลดลงของอุณหภูมิผิวสูงสุดและการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในที่ไม่เหมือนกัน ตลอดช่วงความหนาของชั้น PCM ที่พิจารณา ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะคำนวณหาความหนาของชั้น PCM ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองในนี้

หากกำหนดให้ค่า Specific Energy Saving Index (SESI) คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในในช่วงกลางวันที่ลดลงเป็น [kJ] ต่อ ปริมาณน้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะเป็น [kg] ที่ใช้ในชั้น PCM ที่ความหนาที่กำหนด เพื่อเป็นดัชนีชี้วัดความคุ้มค่าในการใช้ PCM ในการลดการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในอาคาร โดยค่า SESI ที่ความหนาของชั้น PCM ตลอดช่วงที่พิจารณาได้แสดงไว้ใน ภาพที่ 6a มีค่าสูงที่สุด (หรือสารเปลี่ยนสถานะถูกใช้อย่างคุ้มค่าที่สุด) เมื่อความหนาของชั้น PCM ประมาณเท่ากับ 10 mm

ที่ความหนา PCM ประมาณ 10 mm มีปริมาณความร้อนแฝงที่พอเหมาะต่อการใช้งานของผนังเบาบน พื้นฐานของสภาพแวดล้อมที่กำหนด นั่นคือปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะมีไม่มากเกินไปจนทำให้ความจุความร้อนแฝงไม่ถูกใช้อย่างเต็มที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าค่าประสิทธิภาพการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (% Active PCM) หรือ สัดส่วนของ PCM ที่ทำงานจากการเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง-ของเหลว มีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้น PCM มากกว่า 10 mm ดังแสดงในภาพที่ 6b



(a)



(b)

ภาพที่ 6 ปริมาณความร้อนถ่ายเทสู่พื้นที่ผิวภายในที่ลดลงในช่วงกลางวัน และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะในชั้น PCM

ในทางตรงข้าม หากปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะน้อยเกินไป (ในที่นี้คือที่ความหนาชั้น PCM น้อยกว่า 7.5 mm) ทำให้ความจุความร้อนแฝง มีค่าไม่มากพอที่จะดูดซับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่ชั้น PCM ได้ทั้งหมดระหว่างช่วงกลางวันและสารเปลี่ยนสถานะมีสภาพเป็นของเหลวทั้งหมดก่อนที่พลังงานจากแสงอาทิตย์จะหมดไป ทำให้เร่งขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากความเข้มแสงอาทิตย์ และจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่ยังคงมีค่าสูง ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนในปริมาณที่มากสู่ PCM ในรูปของความร้อนสัมผัส เป็นผลให้อุณหภูมิผิวผนังภายในมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าอุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังมีค่าแทบไม่แตกต่างมากนักจากผิวผนังพื้นฐานที่ไม่มีชั้น PCM ดังที่แสดงในภาพประกอบ 4a (เมื่อชั้น PCM หนา 5 mm) ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของ PCM จะมีค่า 100% ดังภาพประกอบ 6b ก็ตาม

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดในโครงสร้างผนังอาคาร นอกเหนือที่จะต้องเลือกใช้ PCM ที่มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม เท่ากับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ

อุณหภูมิผนัง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะแล้ว (Eiamworawutthikul, 2008) สารเปลี่ยนสถานะควรมีปริมาณที่พอเหมาะที่สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดและการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้ศึกษา พฤติกรรมทางความร้อนของเปลือกผนังอาคาร แบบโครงสร้างผนังเบาที่ประกอบด้วย Metal Sheet หนา 0.5 mm ฉนวนใยแก้ว หนา 25 mm และ ชั้นสารเปลี่ยนสถานะที่มีความหนาตั้งแต่ 0 ถึง 25 mm พบว่าปัจจัยในการออกแบบต้องคำนึงถึงปริมาณ PCM ที่ใช้ ควบคู่ไปกับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะและตำแหน่งการติดตั้งในโครงสร้างผนังอาคาร โดยปริมาณการใช้ PCM ในชั้นโครงสร้างผนังควรมีปริมาณที่พอเหมาะแก่การใช้งาน ซึ่งหากปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะของชั้น PCM มีปริมาณที่น้อยเกินไป ทำให้ความจุความร้อนแฝงมีค่าไม่เพียงพอสำหรับปริมาณความร้อนที่ผนังได้รับในแต่ละรอบวัน จนกระทั่งไม่สามารถลดค่าอุณหภูมิผนังสูงสุดแตกต่างไปจากผนังที่ไม่มี PCM ผสมอยู่ในโครงสร้าง ในทางตรงข้ามหากปริมาณ PCM มีมากเกินไปจนทำให้ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะไม่ได้ถูกใช้ทั้งหมด และสัดส่วนการทำงานของ PCM มีค่าน้อยกว่า 100% ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์ โดยสำหรับโครงสร้างผนังเบาในงานวิจัยนี้พบว่า ความหนาของชั้น PCM ที่ 10 mm จะให้ปริมาณความจุความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม ซึ่งสามารถลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในอาคารต่อหน่วยน้ำหนัก PCM ได้สูงที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

การนำสารเปลี่ยนสถานะไปใช้เป็นองค์ประกอบในผนังเปลือกอาคาร เพื่อเพิ่มมวลความร้อนแฝงในการดูดซับความร้อน ที่จะสามารถลดอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวผนังและภาระความร้อนสูงสุดแก่พื้นที่ใช้งานภายในอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ต้องคำนึงถึง องค์ประกอบ 2 ส่วน คือ อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะที่สอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะ ตามคำแนะนำในรายงานวิจัย โดย Eiamworawutthikul (2008) และ รวมถึงปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะที่เพียงพอที่จะสามารถดูดซับความร้อนจากภายนอกได้ทั้งหมดในระหว่างช่วงเวลากลางวันก่อนการถ่ายเทเข้าสู่พื้นที่ภายในอาคาร อีกทั้งมีปริมาณสารเปลี่ยนสถานะไม่มากเกินไปที่เกิดความสิ้นเปลือง ตามที่รายงานจากผลการวิจัยนี้

2. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

(1) ศึกษาถึงปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม ต่อการใช้งานสำหรับลักษณะผนังเปลือกอาคารประเภทต่างๆ ในภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร และท้องถิ่นอื่นๆ ในประเทศไทย

(2) ศึกษาเพื่อกำหนดวิธีการประเมินปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม สำหรับลักษณะผนังอาคารชนิดต่างๆ ที่สอดคล้องกับเครื่องมือในการคำนวณภาระการทำความเย็นของอาคาร สำหรับผู้ออกแบบระบบปรับอากาศสามารถนำไปใช้ได้โดยสะดวก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณสำหรับบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุม

เอกสารอ้างอิง

- Athienitis, A.K., et al. 1997. Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage. *Building and Environment*, 32(5), 405-410.
- Biswas K., et.al. 2014. Combined Experimental and Numerical Evaluation of a Prototype Nano-PCM Enhanced Wallboard. *Applied Energy (Vol. 131)*, 15 October 2014, 517-529.
- Eiamworawutthikul, C. and Yongchareon, W. (2007). The Influence of Phase Change Material in Heat Transfer Behavior of Building Envelope Structure. *The Proceeding of The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-Nett2007)*, 17-19 October 2007 at Chonburi (in Thai)
- Eiamworawutthikul, C. (2008). Utilization of Phase Change Materials in Building Envelope Structure for Thermal Energy Management. *The Proceedings of the 12th National and International Sripatum University Conference (SPUCON2008)*, 31 August 2008 at Sripatum University (Bangkhen Campus), 10-17. (in Thai)
- Eiamworawutthikul, C. (2010). Thermal Mass Enhancement of Wall Structure Using Phase Change Material. *The Proceedings of the 6th Conference on Energy Network of Thailand*, 5-7 May 2010 at Srinakharinwirot University, ENETT6-1006. (in Thai)
- Gracia, D.A. and Cabeza, L.F. 2015. Phase Change Material and Thermal Energy Storage for Building. *Energy and Buildings (Vol. 103)*, 15 September 2015, 414-419
- Jin, X., Medina, M.A., and Zhang, X. 2014. On the Placement of a Phase Change Material Thermal Shield within the Cavity of Buildings Walls for Heat Transfer Rate Reduction, *Energy (Vol.73)*, 14 August 2014, 780-786
- Hawes, D.W., et al. 1993. Latent Heat Storage in Building Materials. *Energy and Building (Vol. 20)*, 77-86.
- Incropera, F.P., and DeWitt, D.P. 2002. *Fundamental of Heat and Mass Transfer (5th Edition)*. John Wiley & Sons, Inc. , USA.
- Lai, C.-M. and Hokoi, S. 2014. Thermal Performance of an Aluminum Honeycomb Wallboard Incorporating Microencapsulated PCM, *Energy and Building (Vol. 73)*, April 2014, 37-47
- Rudd, A. 1993. Phase-Change Material Wallboard for Distributed Thermal Storage in Buildings. *ASHRAE Transactions: Research*, 99(2), paper # 3724.
- Silva, T., et.al. 2012. Experimental Testing and Numerical Modelling of Masonry Wall Solution with PCM Incorporation: Passive Construction Solution, *Energy and Buildings (Vol. 49)*, June 2012, 235-245
- Thai Meteorological Department. (2004). *Bangkok Weather Statistical Data 2001-2003*. (in Thai)
- Wattanavichien, P. and Sudprasert, S. (2016). The Experimental Study of Thermal Behavior with the Placement of Phase Change Material (PCM) Thermal Shield inside Lightweight Wall in Air-Conditioned Building. *The Proceedings of the 12th Conference on Energy Network of Thailand*, 8-10 June 2016 at Pitsanulok, ENETT12-EB-83 (in Thai)