ประสิทธิภาพทางด้านอุณหภาพของหลังคาที่บรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะ กรณีศึกษา : อาคารในเขตร้อนชื้น

Thermal Performance of Pcm Capsules Integrated Roof. A Case Study: Hot Humid Climates Buildings

เปรมวิภา สิริปัญญานนท์[1] และ อรรจน์ เศรษฐบุตร[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCM) เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคาสำหรับอาคาร ทำการทดลองเดือน มค.-พค. ในภูมิอากาศจริงของกรุงเทพฯ ประเทศไทย โดยติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะด้านบนกล่องทดสอบขนาด 60x60x60 ซม. ทำจากโฟมโพลียูรีเทน หนา 1 นิ้ว ปิดทับด้วยแผ่นเหล็กสีขาวทั้งกล่องทดสอบ ซึ่งวัดอุณหภูมิพื้นผิวภายนอก-ภายใน, อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบและอุณหภูมิอากาศภายนอก การศึกษาขั้นที่ 1 ทดลองเพิ่มประสิทธิภาพโดยการผสม $CaCl_2$ Na_2CO_3 และกลีเซอรีน ในอัตราส่วน 1:1 และเปรียบเทียบกับน้ำ พบว่า $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 ทำให้ประสิทธิภาพพาราฟินลดลง และกลีเซอรีนแทบไม่มีผล แต่ความสามารถในการหน่วงความร้อนของพาราฟินยังน้อยกว่าน้ำเล็กน้อย การศึกษาขั้นที่ 2 บรรจุพาราฟินด้วยบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิด คือ: กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน; กล่องสเตนเลส และกล่องเมทัลชีท เปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ เมทัลชีทกรุฟอยล์ด้านล่างและแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม. ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดภายในกล่องทดสอบของกล่องเมทัลชีทมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งต่ำกว่ากล่องสเตนเลสและเมทัลชีทกรุฟอยล์ด้านล่าง 3.8 ºC และ 1.3 ºC ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยภายในช่วงกลางคืนของกล่องเมทัลชีทต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต 1.3 ºC จึงสรุปได้ว่ากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟิน สามารถเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอาคารช่วงเวลากลางวันได้ และเนื่องจากเมทัลชีทมีค่าการนำความร้อนสูง ทำให้ในเวลากลางคืน พาราฟินสามารถคายความร้อนและถ่ายเทออกสู่ภายนอกอาคารผ่านทางเมทัลชีทได้ ไม่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนออกเหมือนมวลอุณหภาพ เช่น คอนกรีต

ABSTRACT

This research aims to study the heat prevention performance of phase change materials when acting as roof insulation in buildings. This experiment is performed under real climate conditions in Jan-May of Bangkok, Thailand with 60x60x60 cm test boxes that made by 2-inch Polyurethane foam with white metal plate finishing. The tested PCMs are located on the top of test boxes and data loggers at surface in- out temperatures and indoor-outdoor temperatures. The first testing, to

[1] นิสิตระดับบัณฑิตศึกษา คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Email: premwipanya@gmail.com

[2] รองศาสตราจารย์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Email: atch.s@chula.ac.th

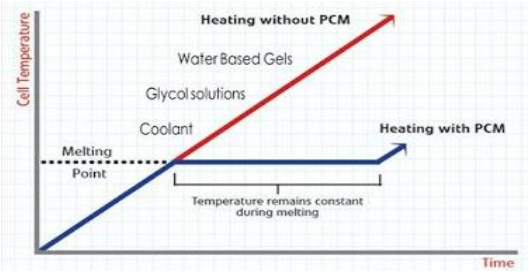
enhance paraffin's thermal performance by mixing $CaCl_2$ and Na_2CO_3 and Glycerin in 1:1 ratio against with water. Results indicate, $CaCl_2$ and Na_2CO_3 reduced Paraffin's performance and Glycerin was almost ineffective but Paraffin heat prevention performance still slightly lower than water. The second testing 3 containers capsuled paraffin; Polystyrene box, Stainless steel box and Metal sheet box compared with metal sheet roof with foil and concrete slab. The outcomes show, the highest temperature inside the test box of Metal sheet box is lowest which lower than Stainless box and metal sheet roof with foil, 3.8 ºC and 1.3 ºC in consequence. At night, the average indoor temperature of Metal sheet box is lower than concrete slab 1.3ºC. In conclusion, it appears that Paraffin capsulated in Metal sheet box can be a thermal insulation and has capability to reduce the daytime indoor temperature fluctuation. Due to the high thermal conductivity of the metal sheet, at night paraffin can release heat to the outside of the building via metal sheet easily which doesn't block the heat like like thermal mass such as concrete.

คำสำคัญ: วัสดุเปลี่ยนสถานะ ฉนวนหลังคา การป้องกันความร้อนเข้าสู่เปลือกอาคารด้านบน
Keywords: Phase Change Materials, Roof insulation, Heat prevention performance

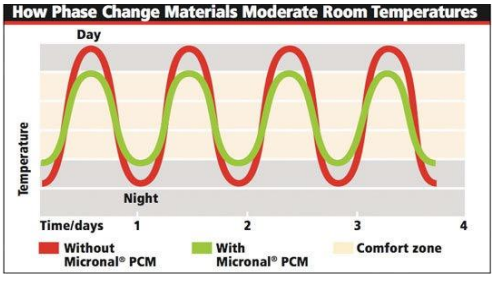
บทนำ

แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทุกๆปี โดยเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2 ใน พ.ศ. 2558 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.5 ในปี พ.ศ. 2559 ซึ่งพลังงานสูญเสียไปกับระบบปรับอากาศมากเป็นอันดับหนึ่ง (กระทรวงพลังงาน, 2558) การลดภาระการทำความเย็นจึงจะต้องลดความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในอาคารโดยเฉพาะที่เปลือกอาคาร เช่น หลังคา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของอาคารในเขตร้อน เพราะได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ได้รับโดยตรง ทำให้เกิดการสะสมและถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารเข้ามาภายในอาคารมาก วิธีการการแก้ปัญหา คือ การออกแบบที่เหมาะสมต่อสภาพอากาศหรือเลือกใช้วัสดุมวลอุณหภาพ (Thermal mass) ที่มีความสามารถในการหน่วงความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับมวลวัสดุ ทำให้ต้องใช้วัสดุที่มีมวลมากซึ่งมีน้ำหนักและความหนามาก จึงเกิดวัสดุสมัยใหม่ที่มีความสามารถเช่นเดียวกันแต่มีน้ำหนักหรือความหนาน้อยกว่า

วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials, PCM) คือ "สารหนึ่งสารใดที่มีความสามารถในการกักเก็บสะสมและปล่อยพลังงานออกมาจำนวนหนึ่งจำนวนใด โดยที่อุณหภูมิของสารหนึ่งสารใดนั้นยังมีอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งค่าใด" โดยอาศัยหลักการของความร้อนแฝง (Latent Heat) ในเวลากลางวันจะสะสมพลังงานความร้อนและเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และในเวลากลางคืนที่อุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุเปลี่ยนสถานะจะคายความร้อนเพื่อคืนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งใหม่ กระบวนการนี้ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเปลี่ยนแปลงต่ำทำให้คงอยู่ในภาวะน่าสบายได้ ตลอดจนสามารถลดภาระการทำความเย็นที่ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าลดลง วัสดุเปลี่ยนสถานะจึงเป็นหนึ่งในวัสดุสมัยใหม่ที่มีความสามารถในการหน่วงความร้อน แต่ไม่สะสมความร้อนไว้ตลอดวันซึ่งแตกต่างจากฉนวนความร้อนทั่วไป



ภาพที่ 1 แสดงหลักการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (ซ้าย)
ที่มา: http://pcmfeijie.en.makepolo.com, 28 ต.ค. 2559



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะกับภาวะน่าสบายในอาคาร (ขวา)
ที่มา: http://www.apartmenttherapy.com/on-the-horizon-building-with-p-124682

ตัวอย่างการใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประกอบอาคาร เช่น งานวิจัยของ X. Xu et al, 2015 ทดสอบแบบ Passive system ด้วยพื้นที่ผสมวัสดุเปลี่ยนสถานะ พบว่าควรใช้กับบริเวณที่ได้รับรังสีความร้อนโดยตรง ประสิทธิภาพอยู่กับ ลักษณะวัสดุปิดผิว ระยะห่างของช่องว่างอากาศด้านในกับวัสดุปิดผิว อุณหภูมิจุดหลอมเหลว และสิ่งสำคัญคือประสิทธิภาพจะไม่เพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นวัสดุเปลี่ยนสถานะ มากกว่า 20-25 มม.และค่าความจุความร้อน (Heat of fusion) ต่ำกว่า 120 kJ/ kg โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ คือ อัตราการไหลเวียนของลม อุณหภูมิของอากาศ และความหนาของบรรจุภัณฑ์ (V.Butala et al, 2009) งานวิจัยของ A.Pasupathy and Velraj, 2008 ทดลองใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ 2 ชั้น ที่ทำงานร่วมกับแผ่นมุงหลังคา ในเมืองเชนนัย ประเทศอินเดีย ใช้สารผสมยูเทติกของ salts hydrated พบว่าเมื่อเทียบกับห้องปกติ อุณหภูมิภายในห้องเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าและเหมาะสมกับการใช้ทุกฤดู โดยวัสดุเปลี่ยนสถานะชิ้นใกล้ภายนอก ควรมีจุดหลอดเหลวสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 6-7 °C ในช่วงฤดูร้อน และ ชิ้นในห้องมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในห้อง

คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ คือ ค่าความร้อนจำเพาะสูง (Specific Heat) มีความสามารถในการเก็บสะสมและปล่อยความร้อนสูง (Heat of fusion) ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting Point) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิภายในห้องและภาวะน่าสบาย 22-27 °c (ติดตั้งภายในห้อง) หรือสอดคล้องกับภูมิอากาศ (ภายนอกห้อง) โดยตลอด 30 ปีที่ผ่านมา พาราฟิน (อินทรีย์) เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะที่นิยมใช้กับวัสดุอาคารทั่วไปมากที่สุดและ Salt Hydrate (อนินทรีย์) และสารยูเทติกตามลำดับ (F. Souayfane et al., 2016) ถึงแม้สารอินทรีย์จะมี Heat of fusion ต่ำกว่าสารอนินทรีย์แต่มีความเสถียรและปลอดภัยมากกว่า ทำให้เกิดการนำมาผสมกันเป็นสารยูเทติกเพื่อเพิ่ม Heat of fusion ให้กับสารอินทรีย์

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษา “พาราฟิน” เนื่องจากมีความเสถียรในการเปลี่ยนแปลงสถานะ มีความปลอดภัยในการใช้งานและได้ง่ายในท้องถิ่น และสร้างแนวทางแก้ไขจุดบกพร่องช่วงการคายความร้อนสู่บรรยากาศได้ต่ำและใช้เวลานาน เนื่องจากอากาศของประเทศไทยในตอนกลางคืนมีความชื้นสูง ส่งผลให้อุณหภูมิในอาคารไม่ลดต่ำลงไม่มากเวลากลางคืน

วัตถุประสงค์ของบทความ

1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันและหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อเป็นฉนวนหลังคา

2. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่พบโดยทั่วไป เพื่อคำนวณหาค่าต้านทานความร้อนของพาราฟินที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ (R-Value)

3. สร้างแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุมวลสารหลังคา ที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร

วิธีการวิจัย

ศึกษาขั้นที่ 1

ตัวแปรต้น จากทบทวนวรรณกรรมคัดเลือกตัวแปรที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอุณหภูมิอากาศของประเทศไทย (ตารางที่ 1) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพาราฟินจึงทดลองผสมกับวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดอื่นที่มีจุดหลอมเหลวที่ใกล้เคียง โดยใช้อัตราผสมเบื้องต้นที่ 1: 1 (B. Zalba et al, 2003)

การทดลองเปรียบเทียบครั้งละ 2 ตัวแปร; (a) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมแคลเซียมคลอไรด์ (PF + $CaCl_2$); (b) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมโซเดียมคาร์บอนเนต (PF + Na_2CO_3); (c) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมกลีเซอรีน (PF + Glycerin); (d) พาราฟิน (PF) กับ น้ำ (Water)

ตัวควบคุม บรรจุขวดโพลิโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ทั่วไปของสารทำความเย็นขนาด 14x22x2 ซม.น้ำหนัก 200 กรัม

ตารางที่ 1 วัสดุเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิภาวะน่าสบายและภูมิอากาศจาก D.SHARMA et al, 2004

Materials	Organic	Melting point (°C)	Latent Heat (J/kg)	Materials	Organic	Melting point (°C)	Latent Heat (J/kg)
1. Paraffin	Y	38-42	222	4. Calcium Chloride ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$)	N	29	190.8
2. Water	Y	0-100	334	5. Sodium Carbonate ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$)	N	32-36	246.5
3. Glycerin	Y	18.9	198.7				

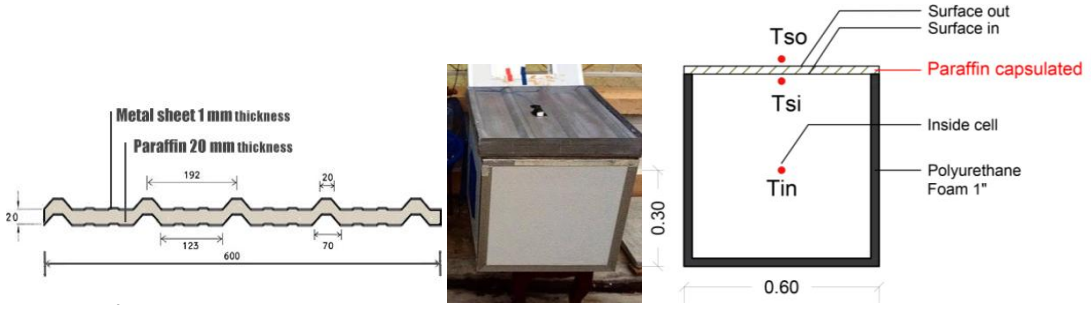
ภาพที่ 3 แสดงภาพกล่องทดลอง (ซ้าย) และรูปตัดกล่องทดลอง (ขวา)

ศึกษาขั้นที่ 2

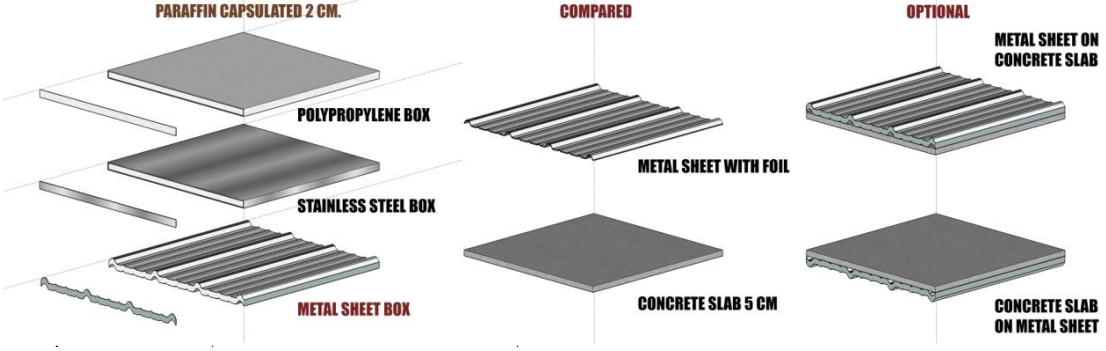
ตัวแปรต้น คัดเลือกบรรจุภัณฑ์ที่คุณสมบัติต่างกัน ได้แก่ 1.กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS); 2.กล่องสเตนเลส (SL); 3.กล่องเมทัลชีท (MS); เพื่อเปรียบเทียบกับ 4.เมทัลชีทกรุฟอยด้านล่าง (MF); และ 5.แผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม (CC)

การทดลองเปรียบเทียบครั้งละ 2 ตัวแปร; (e) กล่องสเตนเลสกับกล่องพลาสติกโพลีสไตรีน; (f) กล่องสเตนเลส กับกล่องเมทัลชีท; (g) กล่องเมทัลชีทกับเมทัลชีทกรุฟอยล์; (h) เมทัลชีทกรุฟอยล์กับแผ่นคอนกรีต; (i) กล่องเมทัลชีทวางบนแผ่นคอนกรีตกับแผ่นคอนกรีต (MS on CC); และ (j) กล่องเมทัลชีทวางใต้แผ่นคอนกรีตกับแผ่นคอนกรีต (CC on MS)

ตัวควบคุม บรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดขนาด 60x60x2 ซม. ผิวบรรจุภัณฑ์หนารวม 0.2 ซม. พาราฟินหนัก 2,200 กรัม



ภาพที่ 4 แสดงรูปตัดกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน (ซ้าย) ภาพกล่องทดลอง (กลาง) และรูปตัดกล่องทดลอง (ขวา)



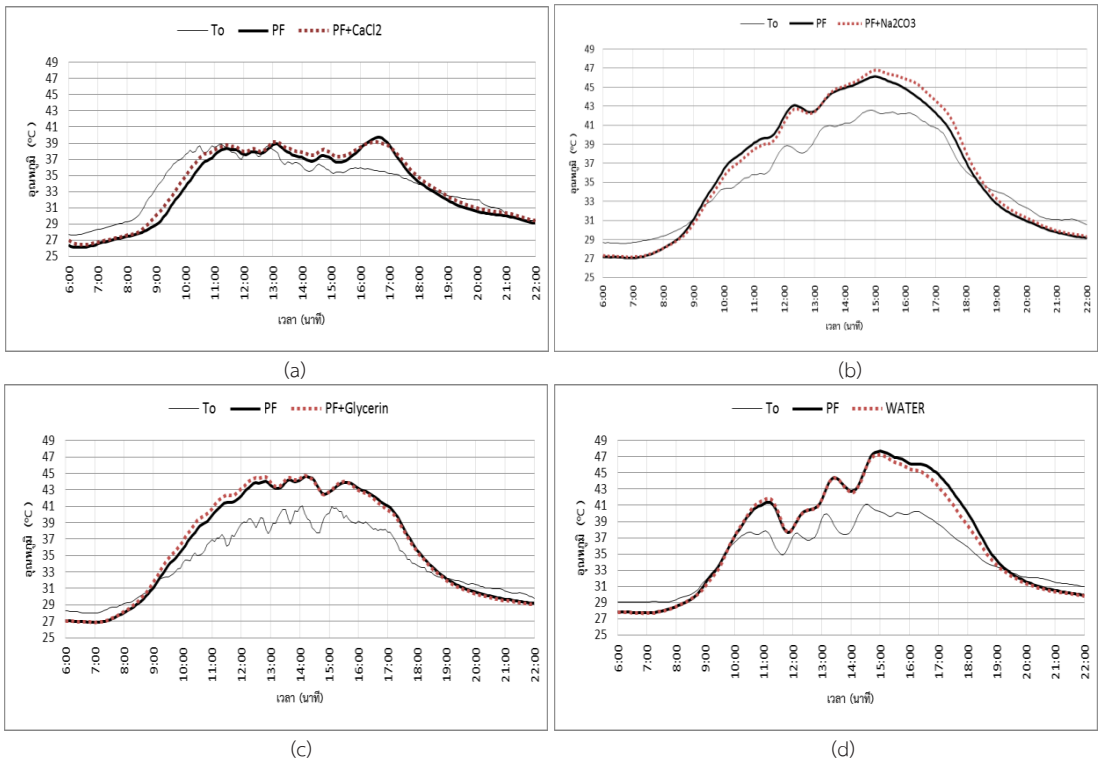
ภาพที่ 5 แสดงตัวแปรที่บรรจุพาราฟิน (ซ้าย) วัสดุหลังคาที่เปรียบเทียบ (กลาง)
กล่องเมทัลชีทร่วมกับแผ่นคอนกรีต (ขวา)

การเก็บข้อมูลและสถานที่ทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

ติดตั้งตัวแปรบนกล่องทดลอง ตั้งอยู่ที่กรุงเทพมหานครในบริเวณที่โล่งได้รับแดดทั้งวัน ทดลองเดือน ม.ค.-พ.ค. เก็บบันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาทีตั้งแต่ 6.00 น.- 22.00 น. จาก 4 จุดของแต่ละกล่องทดลองได้แก่ อุณหภูมิผิวภายนอก (T_{so}) และใน (T_{si}) อุณหภูมิในกล่องทดสอบ (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_{o}) ด้วยเครื่อง 12 Channels Temperature Recorder

ผลการวิจัย

ศึกษาขั้นที่ 1: ทดสอบประสิทธิภาพของพาราฟิน



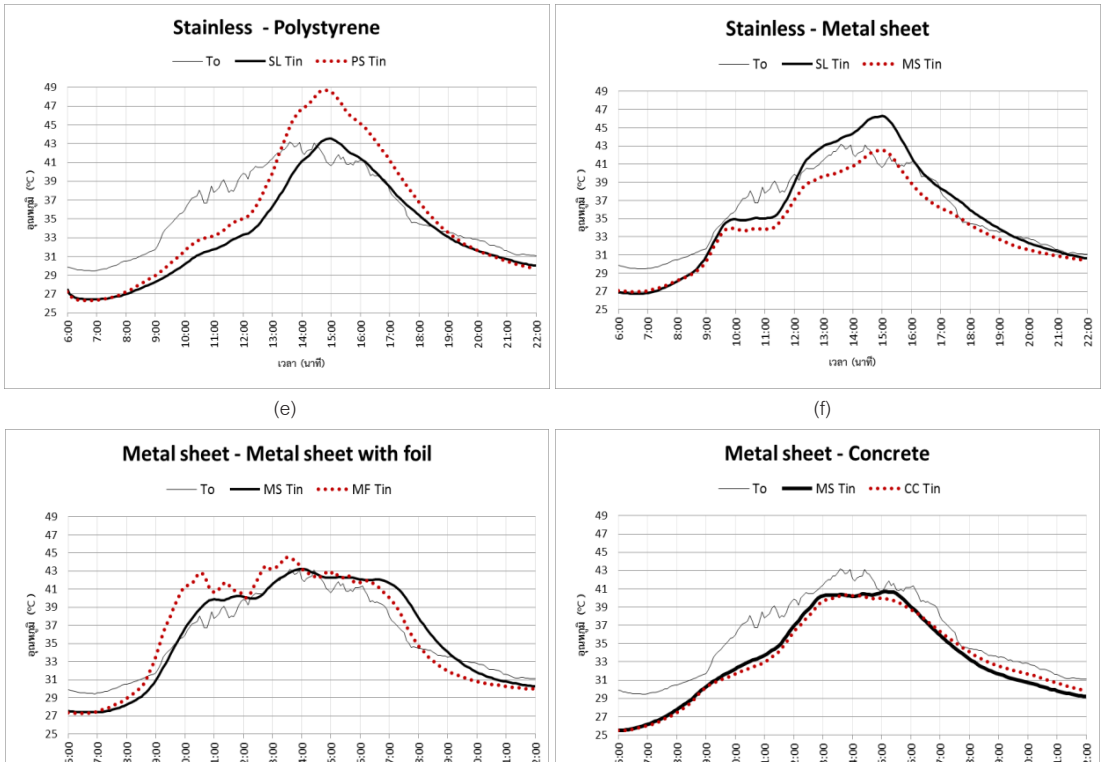
ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (T_{in}) ของตัวแปรและอุณหภูมิอากาศ (T_o)

ตารางที่ 2 แสดงผลต่างอุณหภูมิในกล่อง (T_{in}) ในแต่ละช่วงเวลาของพาราฟินกับแต่ละตัวแปร ที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 1

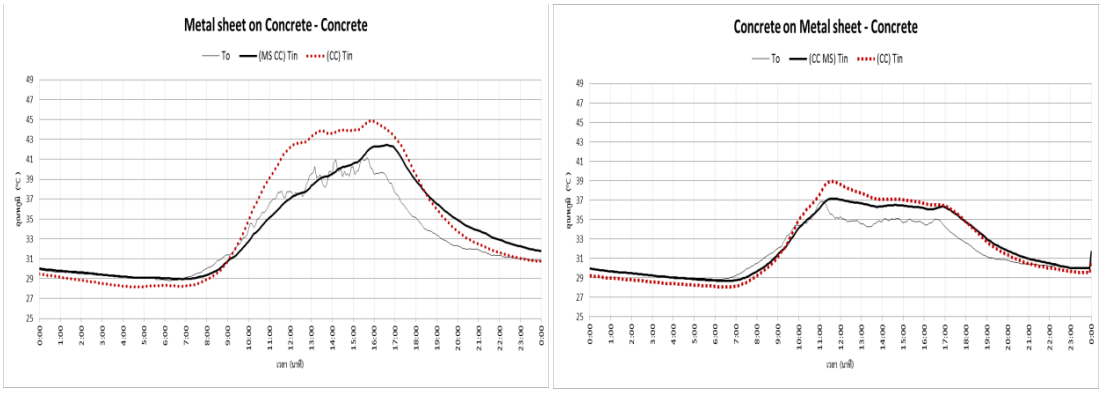
ช่วงเวลาของอุณหภูมิต่ำสุด/ผลต่างของตัวแปรเปรียบเทียบ	PF - (PF+$CaCl_2$)	PF - (PF+Na_2CO_3)	PF - (PF+Glycerin)	PF - Water
	(a)	(b)	(c)	(d)
1. Tin Max (°C)				
เช้า	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง	ใกล้เคียง
สาย (8.00-12.50 AM)	น้อยกว่า 1.20 °C	มากกว่า 0.5 °C	น้อยกว่า 1 °C	ใกล้เคียง 0.05 °C
บ่าย (12.05-5.00 PM)	มากกว่า 0.40 °C	น้อยกว่า 1.20 °C	น้อยกว่า 0.21 °C	มากกว่า 0.40 °C
เย็น (5.05-7.00 PM)	น้อยกว่า 0.30-0.70 °C	น้อยกว่า 0.58 °C	มากกว่า 0.20 °C	มากกว่า 1.30 °C
กลางคืน (7.05-10.00 PM)	น้อยกว่า 0.38 °C	น้อยกว่า 0.24 °C	มากกว่า 0.17 °C	มากกว่า 0.20 °C
2. ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน	ดีกว่าเล็กน้อย	ดีกว่าเล็กน้อย	ใกล้เคียง	น้อยกว่าเล็กน้อย

การทดลอง (a) และ (b) พบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟิน (PF) มีอุณหภูมิต่ำกว่า PF+$CaCl_2$ และ Na_2CO_3 เกือบตลอดวัน โดยอุณหภูมิต่ำมากกว่าที่สุดถึง 1.20 ºC หมายความว่า พาราฟินมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้ดีกว่าการผสม $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 เพียงเล็กน้อย จากการทดลอง (c) อุณหภูมิในกล่องมีความแตกต่างกันน้อยมาก และจากการทดลอง (d) อุณหภูมิในกล่องของพาราฟินสูงกว่าน้ำตลอดช่วงบ่ายและเย็น เนื่องจากน้ำมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) มีค่า 4184 J/kg ºC ซึ่งสูงกว่าวัสดุทั่วไป ทำให้มีความสามารถในการหน่วงความร้อนได้มากกว่าพาราฟิน จึงสรุปว่าการใช้พาราฟินไม่ผสมมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้มากกว่าการผสมเข้ากับ $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่าน้ำมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนดีกว่าพาราฟิน เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ศึกษาขั้นที่ 2: ทดสอบประสิทธิภาพของพาราฟินเมื่ออยู่ในบรรจุภัณฑ์ต่างๆและเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาทั่วไป



ภาพที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (T_{in}) ของตัวแปรและอุณหภูมิอากาศ (T_o)



(j) (j)

ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบ T_{in} และ T_{o} ระหว่าง MS ที่วางบนคอนกรีต (i), วางใต้คอนกรีต (j) กับแผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม.

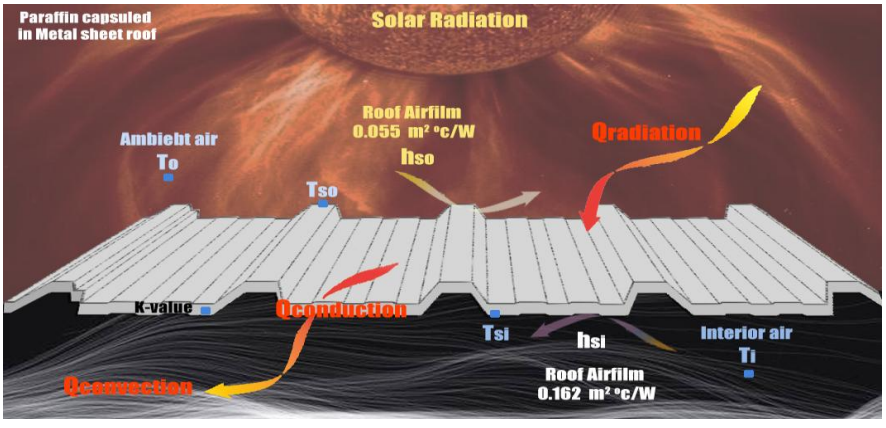
ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของวันของตัวแปร ที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 2

จุดวัดอุณหภูมิ/ตัวแปรเปรียบเทียบ	SL : PS		SL : MS		MS : MF		MS : CC	
	(e)		(f)		(g)		(h)	
1.Tin MAX (°C)	43.53	48.70	46.29	42.535	43.25	44.53	40.69	40.34
	น้อยกว่า 5.18 °C		**มากกว่า 3.76 °C**		**น้อยกว่า 1.28 °C**		**มากกว่า 0.34 °C**	
Tin MIN (°C)	26.43	26.33	26.72	26.94	26.00	27.26	25.50	25.50
	ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		น้อยกว่า 1.26 °C		เท่ากัน	
Tin เฉลี่ย (°C)	35.52	38.23	38.55	36.45	39.12	40.04	35.96	35.64
(เวลา 8.00-18.00)	**น้อยกว่า 2.71 °C**		**มากกว่า 2.1 °C**		**มากกว่า 2.1 °C**		**มากกว่า 0.32 °C**	
Tin เฉลี่ย (°C)	31.92	32.07	32.62	31.81	32.50	31.21	30.79	31.64
(เวลา 18.05-22.00)	**น้อยกว่า 0.15 °C**		**มากกว่า 0.81 °C**		**มากกว่า 1.29 °C**		**น้อยกว่า 0.85 °C**	
2. ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน	ดีกว่า		แย่กว่า		ดีกว่าเวลากลางวัน ร้อนกว่าเวลากลางคืน		ใกล้เคียงเวลากลางวัน เย็นกว่าเวลากลางคืน	

ผลจากการทดลองขั้นที่ 2 จึงสรุปได้ว่า ในช่วงกลางวันกล่องเมทัลชีทมีประสิทธิภาพการต้านทานความร้อนดีกว่ากล่องสเตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนตามลำดับ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม ส่วนในเวลากลางคืนเมทัลชีทกรุฟอยด้านล่างมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งดีกว่ากล่องเมทัลชีท 1.29 °C แต่กล่องเมทัลชีทมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกล่องโดยเฉลี่ยต่ำกว่าและมีอัตราอุณหภูมิลดลงเร็วกว่าแผ่นคอนกรีต และจากภาพที่ 8 พบว่าเมื่อกล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินวางบนคอนกรีต มีความสามารถในการป้องกันความร้อนได้มากกว่าวางด้านใต้ คือ มีอุณหภูมิภายในต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตมากที่สุดถึง 5° C ในช่วงเวลา 11.45-12.55 น. และต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 3° C ในเวลา 9.00-18.00 จึงหมายความว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะ ควรติดตั้งใกล้ภายนอกในบริเวณที่ได้รับรังสีความร้อนโดยตรง เพื่อคายออกสู่ภายนอกได้ในเวลากลางคืน

ตัวอย่างการคำนวณและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการหน่วงความร้อน

จากกฎของเทอร์โมไดนามิก ในภาวะคงที่ของพลังงานความร้อน การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ผ่านผิวนอกหลังคา (Q_{rad}) จะมีความสมดุลกับการนำความร้อน (Conduction) ผ่านชิ้นวัสดุ (Q_{cond}) และการพาความร้อน (Convection) ในอาคาร (Q_{conv}) ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมถึงการวัดค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นสมการในการคำนวณจากการทดลองนี้ใช้ค่าความสมดุลจากการนำความร้อนผ่านหลังคา (Q_{cond}) และการพาความร้อนเข้ามาในอาคาร (Q_{conv}) ทำให้ผลจากการวัดอุณหภูมิทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity, K) และค่าต้านทานความร้อน (R Value, R) ได้ดังนี้



ภาพที่ 9 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะที่บรรจุในกล่องหลังคาเมทัลชีท (ซ้าย)

$$(Q_{cond}) = (Q_{conv})$$

$$(k / \Delta x) \bullet A \bullet (T_{so} - T_{si}) = h_{in} \bullet A \bullet (T_{si} - T_{in}) \quad \text{.....(1)}$$

และเนื่องจากสูตร $R = \Delta x / k$ $(m^2.{}^oK/w)$ .....(2)

$$(1 / R) \bullet (T_{so} - T_{si}) = 0.95 \bullet (T_{si} - T_{in})$$

$$R = (T_{so} - T_{si}) / 0.95 \bullet (T_{si} - T_{in})$$

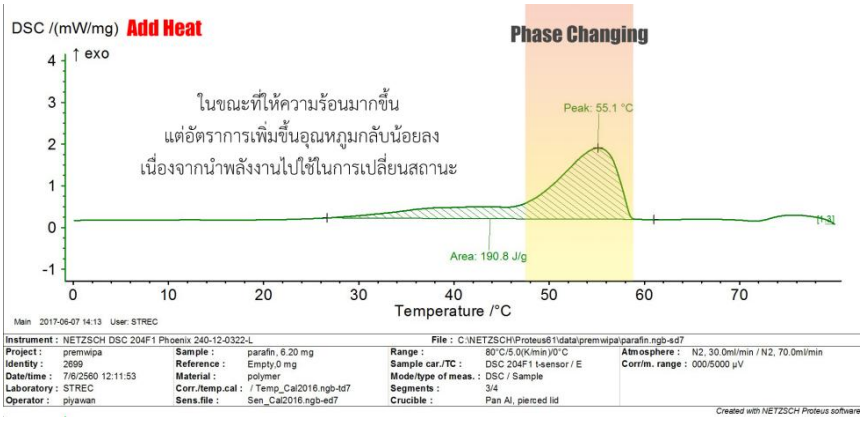
โดยค่า R ได้จากการเฉลี่ยจากช่วงที่คงที่ 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนสถานะ (R_{Day}) และช่วงหลังเปลี่ยนสถานะ (R_{Night})

$R_{Day} = 3.60\ m^2.{}^oK/w$ และ $R_{Night} = 3.11\ m^2.{}^oK/w$

$R_{(paraffin\ capsuled\ Metal\ sheet)} = 3.02\ m^2.{}^oK/w$ (โดยเฉลี่ย 2 ช่วงเวลา)

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะไม่สามารถคำนวณช่วงเปลี่ยนสถานะได้ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะความร้อนจะอยู่ในรูปของความร้อนแฝง (Q_{latent}) และอุณหภูมิคงที่ ไม่ได้แปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิเหมือนวัสดุทั่วไป (ภาพที่ 10) แต่ความสามารถในการหน่วงความร้อนจะแปรผันตามมวลของวัสดุ ดั่งสมการที่ (3)

$$Q_{latent} = mL \quad \text{.....(3)}$$



ภาพที่ 10 แสดงการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินที่ใช้ทดลองในงานวิจัยจากเครื่อง DSC

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใน (heat transfer coefficient), $W/m^{2.o}C$ (ASHRAE, 1981)

A = พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน, m^2

Δx = ความหนาวัสดุ, m

T_o = อุณหภูมิอากาศ, °C

T_{so} = อุณหภูมิผิววัสดุทดสอบภายนอก, °C

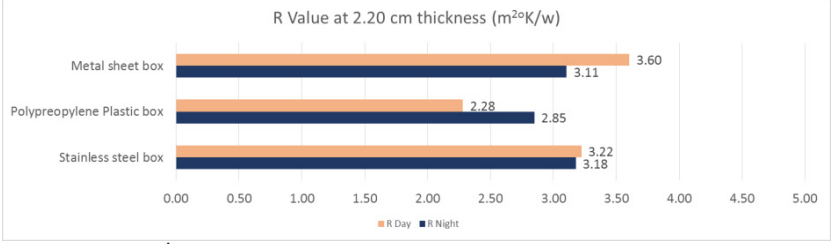
T_{in} = อุณหภูมิในกล่องทดลอง, °C

T_{si} = อุณหภูมิผิววัสดุทดสอบภายใน, °C

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (K Value), W/m^oK

R = ค่าต้านทานความร้อน (R Value), $m^{2o}K/w$

L = ความร้อนของการหลอมเหลว (Latent Heat of fusion), kJ/kg



ภาพที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าต้านทานความร้อน (R Value, R)

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบค่าทางความร้อนของหลังคาที่ได้จากการทดลอง

	บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม			เมทัลชีท กรุฟอยล์ด้านล่าง	แผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม.
	กล่องพลาสติกโพลีโพรพิลีน	กล่องสเตนเลส	กล่องเมทัลชีท		
ความหนารวม (m)	0.022	0.022	0.022	0.006	0.05
K Value (W/m^oK)	0.009	0.007	0.0067	0.25	0.026
R Value ($m^{2o}K/W$)	2.57	3.20	3.36	1.57	1.90

จากภาพที่ 11 เมื่อพิจารณาช่วงกลางวัน กล่องเมทัลชีทมีค่า R มากที่สุด รองลงมาคือกล่องสเตนเลสและกล่องพลาสติก ตามลำดับ แต่สำหรับช่วงกลางคืนกล่องสเตนเลสมีค่ามากที่สุดและกล่องเมทัลชีท กล่องพลาสติกตาม

ลำดับ ทั้งนี้กล่องสเตนเลสมีค่ามากกว่ากล่องเมทัลชีทเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงสรุปได้ว่าค่าต้านทานความร้อนระหว่างกล่องสเตนเลสและ กล่องเมทัลชีท มีค่าใกล้เคียงและเทียบเท่ากันได้ในตอนกลางคืน และเวลากลางวันกล่องเมทัลชีทต้านทานได้มากที่สุด

จากตารางที่ 4 พบว่ากล่องเมทัลชีทมีค่า R เฉลี่ยทั้งวันสูงที่สุดในกลุ่มที่บรรจุพาราฟิน คือมีค่า 3.36 $m^{2o}K/W$ ซึ่งมีค่ามากกว่าหลังคาเมทัลชีทกรุฟอยล์ หมายความว่ากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินมีความสามารถในการต้านความร้อนสูงที่สุด

การอภิปรายผล

ผลจากการการทดลองขั้นที่ 1 พบว่า อุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟินมีอุณหภูมิต่ำกว่าพาราฟินที่ผสม $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 เกือบตลอดวัน หมายความว่า พาราฟิน 100 % มีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้ดีกว่าการผสม $CaCl_2$ และ Na_2CO_3 เพียงเล็กน้อย และไม่มีความแตกต่างระหว่างพาราฟินและการผสมกลีเซอรีน แต่อุณหภูมิในกล่องของพาราฟินสูงกว่าน้ำตลอดช่วงบ่ายและเย็น เนื่องจากน้ำมีค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงกว่าวัสดุทั่วไปทำให้หน่วงความร้อนได้มากกว่าพาราฟิน อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าน้ำมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนดีกว่าพาราฟินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ผลจากการทดลองขั้นที่ 2 พบว่าในช่วงกลางวันกล่องเมทัลชีท มีอุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่ากล่องสเตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนตามลำดับ และมีอุณหภูมิภายในกล่องใกล้เคียงกับแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม ส่วนในเวลากลางคืนกล่องเมทัลชีทมีอุณหภูมิภายในสูงกว่าเมทัลชีทกรุฟอยล์ด้านล่าง 1.29 °C และมีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกล่องต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต จากการคำนวณพบว่ากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินมีค่าการต้านความร้อนดีที่สุด คือ 3.36 $m^{2o}K/W$ (ตารางที่ 4) และเมื่อทดลองกล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินวางบนคอนกรีต พบว่ามีอุณหภูมิภายในต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตธรรมดามากที่สุดถึง 5° C ในช่วงเวลา 11.45-12.55 น. และต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 3° C ในเวลากลางวัน

จึงสรุปว่าการใช้พาราฟิน 100 % มีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้มากกว่าการผสมเข้ากับสาร $CaCl_2$ Na_2CO_3 และ Glycerin ในอัตราส่วน 1:1 และชนิดของบรรจุภัณฑ์มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ กล่าวคือในเวลากลางวัน บรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟินที่มีความสามารถในการต้านความร้อนดีที่สุดคือกล่องเมทัลชีท และควรติดตั้งภายนอกในบริเวณที่ได้รับรังสีความร้อนโดยตรง เพื่อคายความร้อนออกสู่ภายนอกได้ดีในเวลากลางคืน จะยิ่งส่งผลให้มีความสามารถในการลดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาคารได้ยาวนานขึ้น

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ ใช้เพื่อเป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเปรียบเทียบการเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ ตำแหน่งการติดตั้งและชนิดของบรรจุภัณฑ์ โดยเปรียบเทียบจากประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร ซึ่งยังไม่ได้คำนวณเรื่องค่าใช้จ่ายและความคุ้มค่าในการลงทุน รวมถึงการประหยัดพลังงานสำหรับอาคารที่มีการปรับอากาศ หากผู้ที่สนใจจะศึกษาเพิ่มเติมสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์หรือเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์เพื่อออกแบบต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท แอฟริคัส จำกัด และ ดนู กตัญญุตานันท์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการวัด

ประวัติผู้เขียนบทความ

นางสาวเปรมวิภา สิริปัญญานนท์, จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, Email: premwipanya@gmail.com

เอกสารอ้างอิง

กระทรวงพลังงาน. (2558) สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พ.ย. 2559, จาก www.chanthaburi.buu.ac.th/~office_building/power/documents/energy2015-forecast2016.pdf

A. Pasupathy, R. Velraj. (2008). “Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management”. **Energy Build.** 2008(40): 193-203.

D. Sharma et al. (2004). “Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications”. **Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.** 2004(29): 31-64.

ENTROPY SOLUTIONS. (2016) Retrieved Oct. 20, 2016, from http://www.puretemp.com/stories/understanding-pcms

F. Souayfane et al. (2016). “Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review”. **Energy Build.** 2016(129): 396-431.

GREEN ARCHITECT. (2016) Retrieved Oct. 20, 2016, from http://www.apartmenttherapy.com/on-the-horizon-building-with-p-124682

P. Brosseau, M. Lacroix. (1994). “Study of the thermal performance of a multi-layer PCM storage unit”. **Energy Convers Mgrnt.** 1996(37): 599-609.

V. Butala, U. Stritih. (2009). “Experimental investigation of PCM cold storage”. **Energy Build.** 2009(41): 354-359.

X. Xu et al. (2005). “Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings”. **Energy Build.** 2005(37): 1084-1091.