



## บทความวิจัย

## การศึกษาเชิงเทคนิคระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการปรับอากาศภายในอาคาร

นันทพร วันเรียน\* ฉันทนา พันธุ์เหล็ก และ สมชาย มณีวรรณ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

โยธิน อึ้งกุล

บริษัท อินทรีย์ซูเปอร์บล็อก จำกัด

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 5596 3552, 09 2516 6986 อีเมล: nooyphy@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.033

รับเมื่อ 28 มีนาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 9 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 30 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานเบื้องต้นของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการปรับอากาศ โดยนำระบบกักเก็บความเย็นทำงานร่วมกับระบบทำความเย็นขนาด 11,601 บีทียูต่อชั่วโมง ที่ความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับมาตรฐาน ISO 17025 บริษัท บีทิวส์ (ประเทศไทย) จำกัด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ จากผลการทดสอบพบว่า ในกระบวนการประจุความเย็นของเครื่องกักเก็บความเย็นใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 45 นาที สามารถทำให้สารเปลี่ยนสถานะเย็นตัวลงได้อุณหภูมิ  $-3.42$  องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบกระบวนการคายความเย็นของเครื่องกักเก็บความเย็น โดยควบคุมอากาศที่ไหลผ่านให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 2.30 เมตรต่อวินาที พบว่า สามารถลดอุณหภูมิอากาศลงได้สูงสุด 10.37 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยผลต่างประมาณ 3.90 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบจะหยุดคายความเย็น เมื่ออุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที และมีประสิทธิภาพการกักเก็บความเย็นอยู่ที่ร้อยละ 67.91 คิดเป็นปริมาณพลังงานเฉลี่ย 2,910.12 บีทียูต่อชั่วโมง ดังนั้นระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสามารถนำมาใช้ในการปรับอากาศภายในกรอบอาคารคอนกรีตมวลเบาได้ และจะทำการศึกษาค้นคว้าต่อไปได้ของระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้แหล่งพลังงานการระบบเซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสานได้ในอนาคต

**คำสำคัญ:** ระบบกักเก็บความเย็น สารเปลี่ยนสถานะ การปรับอากาศ

การอ้างอิงบทความ: นันทพร วันเรียน, ฉันทนา พันธุ์เหล็ก, สมชาย มณีวรรณ และ โยธิน อึ้งกุล, “การศึกษาเชิงเทคนิคระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการปรับอากาศภายในอาคาร,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 31, ฉบับที่ 4, หน้า 759-769, ต.ค.-ธ.ค. 2564.



## Technical Analysis of Cold Storage System with Phase Change Material for Air Conditioning on Building

Nanthapton Wanriani\*, Chantana Punlek and Somchai Maneewan

Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

Yothin Ungkoon

Siam City Cement Public Co., Ltd., Sing Buri, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0 5596 3552, 09 2516 6986, E-mail nooypy@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.033

Received 28 March 2020; Revised 9 June 2020; Accepted 30 June 2020; Published online: 25 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The objective of this study was to investigate the efficiency of the basic performance of cold storage system using phase change material (PCM-CSS) for air conditioning. The cold storage system working with the refrigerator system of 11,601 Btu/hr. at an electrical frequency of 50 Hz was tested in a laboratory certified by ISO 17025, Bitwise (Thailand) Co., Ltd. The results showed that the cooling charging process of the cold storage unit at an average of 45 min for the phase change material (PCM) to cool down to the temperature of  $-3.42^{\circ}\text{C}$ . The cold discharging process of PCM-CSS was tested by controlling the airflow at the temperature of  $30^{\circ}\text{C}$  and at the average wind speed of 2.30 m/s. It was found that the reduction of the air temperature was at the maximum of  $10.37^{\circ}\text{C}$  with the average difference of  $3.90^{\circ}\text{C}$ . The discharging process would stop when the temperature of PCM was  $30^{\circ}\text{C}$  which took around 30 minutes. This revealed that the cold storage efficiency was 67.91% and the average energy of 2,910.12 Btu/hr. Therefore, the PCM-CSS can be used for air conditioning in building with lightweight concrete walls. There is a possibility to study the efficiency of cold storage system and phase change materials using the photovoltaic hybrid system in the future.

**Keywords:** Cold Storage System, Phase Change Material, Air Conditioning

Please cite this article as: N. Wanriani, C. Punlek, S. Maneewan, and Y. Ungkoon, "Technical analysis of cold storage system with phase change material for air conditioning on building," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 759–769, Oct.–Dec. 2021 (in Thai).

## 1. บทนำ

เทคโนโลยีระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System) ถือเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่อยู่ในกลุ่มของพลังงานหมุนเวียนเป็นการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ซึ่งในปัจจุบันการกักเก็บพลังงานในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าเป็นที่นิยมอย่างมากทั้งในภาคธุรกิจ และภาคที่อยู่อาศัย เป็นการใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ผลิตไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันแล้วกักเก็บไว้ในแบตเตอรี่แล้วนำมาใช้งานช่วงเวลากลางคืนหรือช่วงเวลาที่ต้องการ แต่แบตเตอรี่ดังกล่าวนี้มีราคาสูง ทำให้ระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้านี้มีต้นทุนสูง อีกทั้งยังมีอายุการใช้งานน้อย ประมาณ 3-4 ปี เท่านั้น [1] ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและหาแนวทางในการกักเก็บพลังงานในรูปแบบอื่นทดแทนการใช้แบตเตอรี่หรือการลดจำนวนของแบตเตอรี่ลง เพื่อลดต้นทุนของระบบกักเก็บพลังงาน

ระบบกักเก็บพลังงานในรูปแบบของความเย็น (Cold Storage System; CSS) เป็นระบบกักเก็บความเย็นโดยใช้น้ำซึ่งเป็นสารในกลุ่มสารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material; PCM) อีกชนิดหนึ่ง ที่มีค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) และค่าความร้อนแฝง (Latent Heat) สูงมาใช้สารทำงานของระบบ แบ่งตามลักษณะการกักเก็บความเย็นเป็น 2 รูปแบบ คือ แบบน้ำเย็น (Chilled Water) และแบบน้ำแข็ง (Ice Storage) สำหรับการจัดการพลังงานภายในอาคารของระบบปรับอากาศ นอกจากการลดภาระการทำความเย็นแล้ว การย้ายภาระการทำความเย็นในช่วงเวลาความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูง (On Peak) มาอยู่ในช่วงเวลาที่ไมคิดค่าความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า (Off Peak) จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 40-50 ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของระบบกักเก็บความเย็นโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะอื่น ในกลุ่มสารอินทรีย์ (Organic Phase Change Material) ที่มีความหนาแน่นต่ำ มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นใกล้เคียงกับน้ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [2] ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการเลือกสารทำงาน (Working Substance) ในการกักเก็บความเย็นของการปรับอากาศภายในอาคาร โดยสร้าง

เป็นระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ (PCM-Cold Storage System; PCM-CSS) เพื่อลดภาระการทำความเย็นและปรับอากาศภายในอาคารแทนการใช้ระบบปรับอากาศ [3]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพทางพลังงานเบื้องต้นของระบบ PCM-CSS สำหรับการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน โดยใช้แหล่งพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าส่วนภูมิภาค เป็นการประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบ PCM-CSS เบื้องต้น เพื่อเป็นแนวทางในการนำระบบไปปรับใช้กับระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของการลงทุนในอนาคตต่อไป

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การศึกษาสาร PCM สำหรับระบบกักเก็บความเย็น

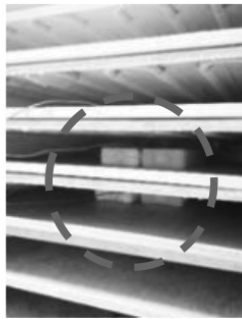
ชนิดของสาร PCM ที่เลือกใช้อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ (Organic Phase Change Material) คือ สารพาราฟินเหลว (Paraffin Oil) เป็นสารที่ไม่มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบท่อสารทำความเย็นที่ทำจากทองแดง เหล็ก หรืออะลูมิเนียมเป็นต้น และเป็นสารที่มีปริมาณความร้อนแฝงจำเพาะ (Latent Heat) สูงถึง 190-260 กิโลจูลต่อกิโลกรัม และมีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melting Point) ที่ชัดเจน ตามสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังตารางที่ 1 [4] เหมาะสำหรับการนำมาใช้งานกับระบบกักเก็บความเย็นสำหรับการปรับอากาศภายในอาคารที่ต้องการปรับอากาศที่ 22-27 องศาเซลเซียสตามสภาวะอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้คนรู้สึกสบาย [5]

### 2.2 การทดสอบ และวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บพลังงานของสาร PCMs เบื้องต้น

นำสาร PCM บรรจุในกล่องพลาสติก ชนิด HDPE (High Density Polyethylene) แข็งที่อุณหภูมิทำความเย็น -40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 1 เพื่อศึกษาปริมาณพลังงานสะสมในกระบวนการคายพลังงาน (การแช่แข็ง) จากค่าอุณหภูมิของสาร ( $T_{pcm}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถวิเคราะห์ปริมาณพลังงานในกระบวนการ ดังสมการที่ (1) [6]



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ตัวอย่างกล่องพลาสติกบรรจุ PCM (ข) การนำกล่องพลาสติกบรรจุสาร PCM แขนในตู้แช่แข็ง

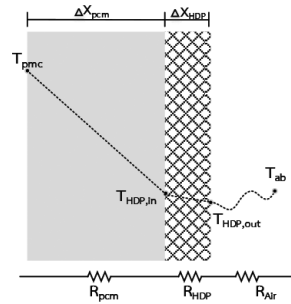
ตารางที่ 1 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสาร PCM

Parameter	Paraffin Wax
Density (kg/m <sup>3</sup> )	636
Freezing point: Solid (°C)	18
Melting point: Liquid (°C)	22
Max. Working temperature (°C)	45
Latent heat of fusion (Heating curve) (kJ/kg)	190–260
Specific gravity (kJ/kg °C)	3.22
Thermal conductivity: Solid (W/mK)	0.74
Thermal conductivity: Liquid (W/mK)	0.93

$$Q_{pcm} = mc_f \Delta T_f + mL + mc_s \Delta T_s \quad (1)$$

หลังจากนำกล่องบรรจุสาร PCM ผ่านกระบวนการคายพลังงานแล้ว จากนั้นนำมาวางไว้ในห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิห้องอยู่ที่ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2 เมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณพลังงานในกระบวนการดูดซับความร้อนของสาร PCM ผ่านพลาสติก HDPE ตามหลักการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 2 โดยคำนวณปริมาณพลังงานโดยใช้สมการที่ (2) [7]

$$Q_H = \frac{T_{pcm} - T_{ab}}{R_{pcm} + R_{HDP} + R_{ab}} \quad (2)$$



รูปที่ 2 การถ่ายเทความร้อนของบรรจุสารพาราฟินเหลวสู่ภายนอก



(ด้านหน้า)

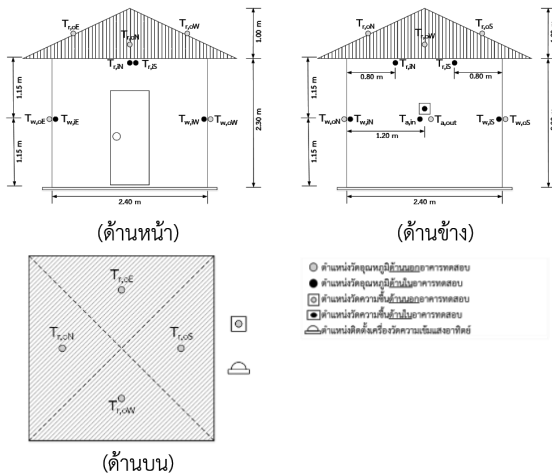


(ด้านข้าง)

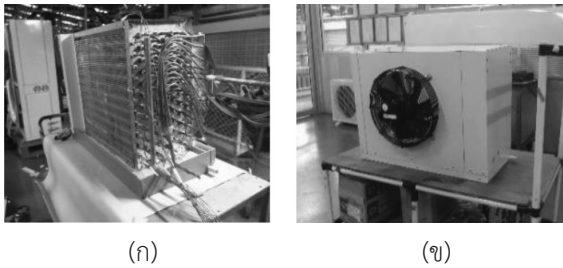
รูปที่ 3 ตัวอย่างบ้านทดสอบสร้างจากคอนกรีตมวลเบาสำหรับทดสอบภาระการทำความเย็น

### 2.3 การทดสอบภาระการทำความเย็นของบ้านทดสอบสำหรับระบบ PCM-CSS

บ้านทดลองที่ในสำหรับทดสอบระบบกักเก็บความร้อนร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ (PCM-CSS) ทำจากคอนกรีตมวลเบาหนา 10 เซนติเมตร และความหนาของปูนฉาบเท่ากับ 0.3 เซนติเมตร มีพื้นที่ภายใน 2.4 × 2.4 × 2.3 เมตร (กว้าง × ยาว × สูง) ลักษณะบ้านตัวอย่างดังรูปที่ 3 ทำการวัดค่าอุณหภูมิภายในและภายนอกบ้านทดสอบในช่วงเวลากลางคืน (20:00–06:00 น.) ในวันที่ 11–16 พฤศจิกายน 2563 ณ บริษัท อินทรี ซุปเปอร์บล็อก จำกัด ดังรูปที่ 4 เพื่อวิเคราะห์ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ที่เกิดจากความร้อนสะสมของตัวบ้านทดสอบได้รับในช่วงเวลากลางวัน ( $q_w$ ) [สมการที่ (4)] และภาระการทำความเย็นการปรับอากาศ ( $q_c$ ) [สมการที่ (5)] ในช่วงเวลากลางคืนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ (3) [7]



รูปที่ 4 ตำแหน่งการตรวจวัดอาคารทดสอบ



รูปที่ 5 (ก) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ที่บรรจุสาร PCM อยู่ภายในท่อทองแดง (ข) โครงตัวเครื่องและพัดลมดูดอากาศสำหรับ CSS Unit

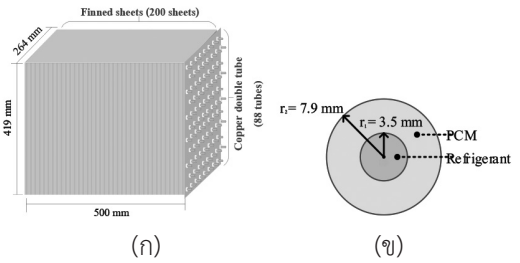
$$Q_c = q_w + q_c \quad (3)$$

โดยที่  $q_w = A_B U_B \Delta T \quad (4)$

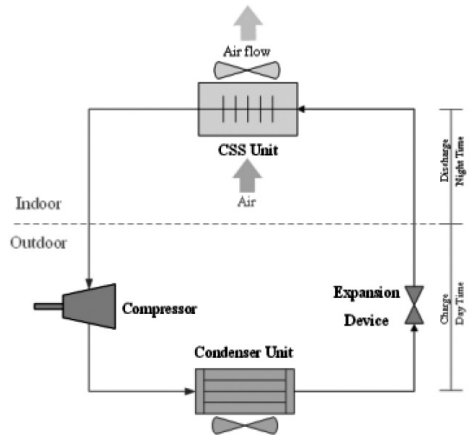
และ  $q_c = A_B U_B (CLTD) \quad (5)$

### 2.4 การสร้างเครื่องต้นแบบระบบ PCM-CSS

นำสาร PCM บรรจุในท่อชั้นนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบคอยล์ (Coil Loop Exchanger) หรือเครื่องกักเก็บความเย็น (Cold Storage System Unit; CSS Unit) ดังรูปที่ 5 โดยมีขนาดท่อบรรจุสารและชุดคอยล์ ดังรูปที่ 6 เป็นท่อทองแดงแบบสองชั้นโดยจำนวนท่อบรรจุสาร PCM จะ



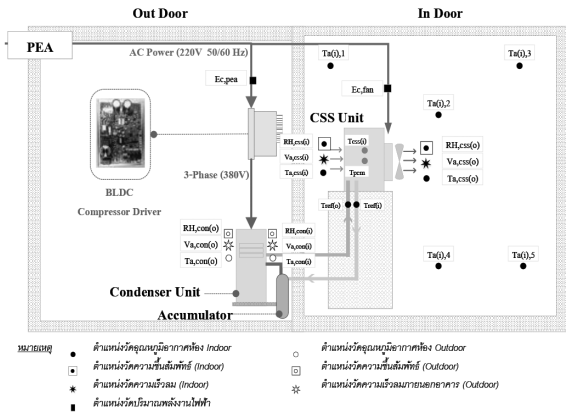
รูปที่ 6 (ก) ขนาดของคอล์ยและท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ขนาดของท่อบรรจุสาร PCM และท่อสารทำความเย็นแบบท่อสองชั้น (Double Tube)



รูปที่ 7 วัฏจักรการทำงานทำความเย็นของระบบ PCM-CSS

ขึ้นอยู่กับปริมาณของสาร PCMs ที่จะได้จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2.2 และ 2.3

การทำงานของระบบ PCM-CSS แบ่งออกเป็น 2 ช่วง ดังรูปที่ 7 คือ ช่วงที่ 1 กระบวนการประจุความเย็น (Charging Process) เป็นช่วงที่ระบบทำความเย็น (Refrigeration System) กระจายทำความเย็นให้เข้าไปในเครื่อง CSS Unit เพื่อดึงพลังงานความร้อนออกจากสาร PCM เมื่ออุณหภูมิสาร PCM ( $T_{PCM}$ ) คงที่ และสารทำความเย็นขาเข้า ( $T_{Ri}$ ) - ออก ( $T_{Ro}$ ) มีค่าอุณหภูมิเท่ากัน จึงเข้าสู่ช่วงที่ 2 กระบวนการคายความเย็น (Discharging Process) เป็นช่วงเวลาที่ระบบทำความเย็นหยุดทำงาน และสั่งการให้พัดลมดูดอากาศของเครื่อง CSS Unit ทำงาน โดยดึงอากาศภายในห้องผ่านชุดคอยล์ด้านใน เพื่อนำอากาศแลกเปลี่ยนกับสาร PCM ที่บรรจุอยู่ในท่อด้านใน



รูปที่ 8 การติดตั้งระบบ PCM-CSS Unit ร่วมกับระบบทำความเย็น ในห้องทดสอบผลิตภัณฑ์

เครื่อง CSS Unit จนอุณหภูมิอากาศขาเข้า ( $T_{a,css(i)}$ ) - ออก ( $T_{a,css(o)}$ ) มีค่าเท่ากัน จึงหยุดการทดสอบระบบ PCM-CSS

2.5 การทดสอบระบบ PCM-CSS

นำระบบ PCM-CSS ทดสอบในห้องทดสอบผลิตภัณฑ์ บริษัท บีทีวีส (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้รับการรับรองตามมาตรฐาน ISO 17025 ดังรูปที่ 8 โดยควบคุมอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ In Door ที่ 30 องศาเซลเซียส และห้องทดสอบ Out Door ที่ 35 องศาเซลเซียส และใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority; PEA) โดยระบบปฏิบัติการของห้องทดสอบจะทำการวิเคราะห์ความสามารถในการทำความเย็น ( $\dot{Q}_a$ ) และสมรรถนะการทำความเย็น (COP) ของระบบ PCM-CSS ตามทฤษฎีในสมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

ความสามารถในการทำความเย็น

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a (H_{ao} - H_{ai}) \tag{6}$$

สมรรถนะการทำความเย็น

$$COP = \frac{\dot{m}_R (\Delta H_{R_o})}{\dot{m}_R (\Delta H_{R_i})} \tag{7}$$



(Indoor) (Outdoor)

รูปที่ 9 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิอากาศของระบบ PCM-CSS



(Indoor) (Outdoor)

รูปที่ 10 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร็วลมและความชื้นของอากาศที่ไหลผ่านระบบ PCM-CSS

โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดค่าพลังงานต่างๆ ดังรูปที่ 9 และ 10 จากนั้นนำค่าทางพลังงานที่ได้ไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงการประจุ ความเย็น ( $\eta_{c,charge}$ ) และช่วงการคายความเย็น ( $\eta_{c,discharge}$ ) ของระบบ PCM-CSS และประสิทธิภาพพลังงานของระบบทำความเย็น โดยใช้สมการที่ (8), (9) และ (10) ตามลำดับ

ประสิทธิภาพระบบ PCM-CSS ช่วง Charging

$$\eta_{c,charge} = \frac{\dot{Q}_{pcm}}{\dot{Q}_R} \times 100 \tag{8}$$

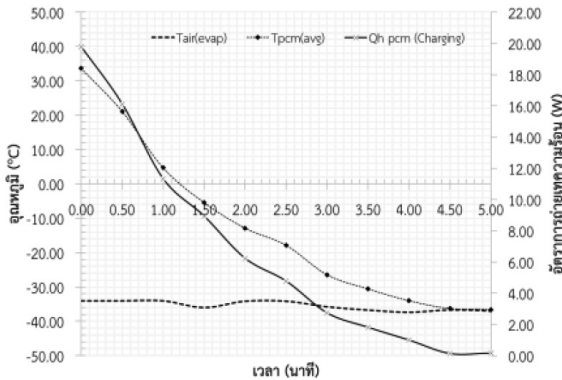
ประสิทธิภาพระบบ PCM-CSS ช่วง Discharging

$$\eta_{c,discharge} = \frac{\dot{Q}_{cs,discharge}}{\dot{Q}_{pcm}} \times 100 \tag{9}$$

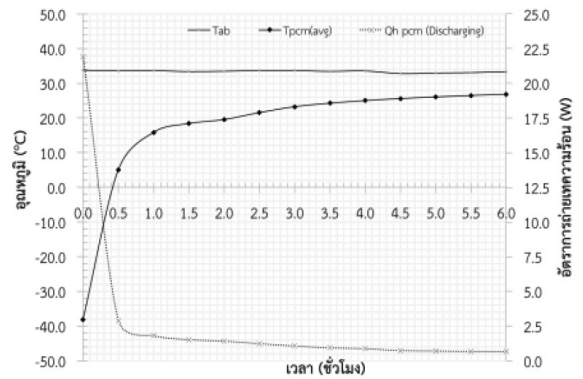
ประสิทธิภาพทางพลังงาน

$$\eta_e = \frac{Q_{pcm}}{E_{rx3,600}} \times 100 \tag{10}$$





รูปที่ 11 ผลการทดสอบอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{h, pcm(Charging)}$ ) และอุณหภูมิของสาร PCM ( $T_{pcm}$ ) ของกระบวนการคายพลังงาน



รูปที่ 12 ผลการทดสอบอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{h, pcm(Charging)}$ ) และอุณหภูมิของสาร PCM ( $T_{pcm}$ ) ของกระบวนการดูดซับพลังงาน

### 3. ผลการทดลอง

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ระบบ PCM-CSS สำหรับบ้านคอนกรีตมวลเบา โดยใช้แหล่งพลังงานไฟฟ้าจาก PEA มีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การวิเคราะห์ปริมาณการกักเก็บพลังงานของสาร PCM

ผลการทดสอบกระบวนการคายพลังงาน และดูดซับพลังงาน ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง ในหัวข้อที่ 2.2 พบว่า สาร PCM สามารถกักเก็บความเย็นเทียบเป็นปริมาณพลังงานเฉลี่ยอยู่ที่ 495.68 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยในกระบวนการคายพลังงานสาร PCM มีอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{h, (pcmcharging)}$ ) มีแนวโน้มลดต่ำลงตามอุณหภูมิของสาร PCM ลดลง และเริ่มคงที่เมื่อ  $T_{pcm}$  มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศภายในตู้แช่แข็ง ( $T_{airvap}$ ) ดังรูปที่ 11 โดยปริมาณพลังงานความร้อนที่สาร PCM ที่คายออกประมาณ 158.54 กิโลจูล

สำหรับผลการกระบวนการดูดซับพลังงานของสาร PCM ค่า ( $Q_{h, pcm(Discharging)}$ ) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20.66 วัตต์ ในช่วง 0.5 นาที สาร PCM มีอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็ว และเริ่มคงที่เมื่อ  $T_{pcm}$  มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 18–30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12 โดยคิดเป็นปริมาณพลังงานความร้อนที่สาร PCM ดูดซับได้ประมาณ 157.70 กิโลจูล

#### 3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสาร PCM สำหรับระบบ PCM-CSS

จากการวัดค่าอุณหภูมิอากาศด้านใน-นอกบ้านทดสอบ ในช่วงเวลากลางคืน (20:00–06:00 น.) พบว่า อุณหภูมิอากาศภายในบ้านสูงกว่าด้านนอก เนื่องจากหลังคาและผนังของตัวบ้านได้รับความร้อนสะสมในช่วงเวลากลางวัน และคายความร้อนออกมาในช่วงเวลากลางคืน สามารถวิเคราะห์ภาระความร้อนจากตัวอาคาร ( $q_w$ ) ร่วมกับภาระการปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ( $q_c$ ) มีภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบเฉลี่ย ( $Q_c$ ) เท่ากับ 705.32 วัตต์ หรือ 2,245.06 บีทียูต่อชั่วโมง ตามผลการวิเคราะห์ภาระการทำความเย็นในตารางที่ 2

การประเมินปริมาณสารพาราฟินเหลวที่ใช้สำหรับระบบ PCM-CSS ของการปรับอากาศในกรอบอาคารคอนกรีตมวลเบาสามารถวิเคราะห์ได้ว่าจะต้องใช้ปริมาณสารอย่างน้อย 4.81 กิโลกรัม จึงจะเพียงพอต่อภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นในการสร้างเครื่องต้นแบบระบบ PCM-CSS จึงบรรจุสารดังกล่าวในตัวเครื่อง CSS Unit เฉลี่ยอยู่ที่ 8.00 ลิตร

#### 3.3 ผลการทดสอบระบบ PCM-CSS เบื้องต้น

นำเครื่องต้นแบบระบบ PCM-CSS ต่อเข้ากับระบบ

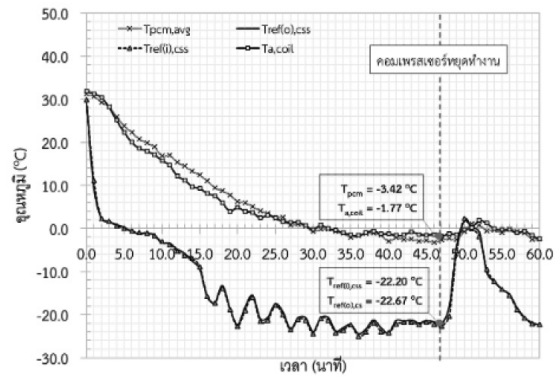
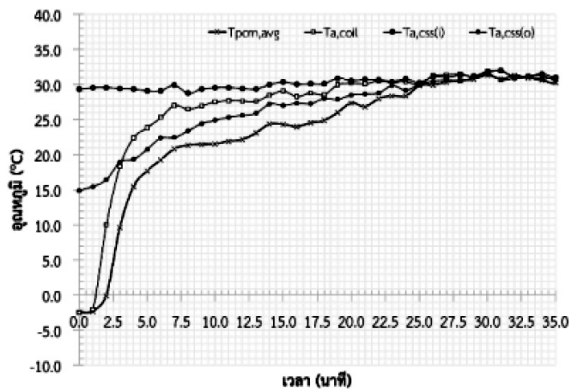
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารพาราฟินเหลวที่ใช้สำหรับระบบ CSS เทียบกับปริมาณความร้อนภายในอาคาร

ภาระความร้อน	ปริมาณความร้อนใน 1 ชั่วโมง				ปริมาณความร้อนใน 10 ชั่วโมง			
	ปริมาณพลังงาน		ปริมาณสาร PCM		ปริมาณพลังงาน		ปริมาณสาร PCM	
	KJ	BTU	kg	L	KJ	BTU	kg	L
$q_w$	672.88	637.76	1.37	2.15	6,728.77	6,377.65	13.65	21.47
$q_c$	1,695.79	1,607.30	3.44	5.41	16,957.88	16,072.97	34.41	54.11
$Q_c$	2,368.67	2,245.06	4.81	7.56	23,686.65	22,450.61	48.07	75.57

ทำความเย็นขนาด 11,601 บีทียูต่อชั่วโมง (380 โวลต์ ระบบไฟฟ้า 3 เฟส) ใช้สารทำความเย็น R410A โดยตั้งค่าให้คอมเพรสเซอร์ทำงานที่ความถี่ไฟฟ้าไม่เกิน 50 เฮิร์ตซ์

3.3.1 ผลการทดสอบกระบวนการประจุความเย็นจากการทดสอบจ่ายสารความเย็นให้กับเครื่อง CSS Unit ใช้ระยะเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิสารทำความเย็น ( $T_{ref}$ ) ต่ำสุด  $-22.20$  องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 13 พบว่า สามารถดึงความร้อนออกจากสาร PCM ได้อุณหภูมิ ( $T_{pcm,avg}$ ) ต่ำสุด  $-3.42$  องศาเซลเซียส และเห็นได้ว่าในนาที่ที่ 40-45  $T_{pcm,avg}$  เริ่มคงที่ ก่อนที่คอมเพรสเซอร์จะหยุดทำงาน เนื่องจากชุดควบคุมระบบทำความเย็น (Refrigeration Controllers) อาจตรวจพบว่า สารทำความเย็นก่อนไหลเข้าสู่คอมเพรสเซอร์มีสถานะเป็นของเหลว ระบบทำความเย็นจึงหยุดทำงาน สังเกตได้จากค่า  $T_{ref}$  ขาเข้า-ขาออก เครื่อง CSS Unit เริ่มมีค่าเท่ากัน แสดงว่าไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้น ระบบจึงหยุดทำงาน

3.3.2 ผลการทดสอบกระบวนการคายความเย็นทำการหยุดการทำงานระบบทำความเย็นและเปิดพัดลมดูดอากาศของเครื่อง CSS Unit ที่ความเร็วลมเฉลี่ย 2.3 เมตรต่อวินาที ใช้ระยะเวลาประมาณ 30-35 นาที จากผลการทดสอบ ในรูปที่ 14 พบว่า สามารถลดอุณหภูมิอากาศขาออก ( $T_{a,css(o)}$ ) ได้ต่ำสุด 10.37 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าเฉลี่ย ( $T_{a,css(i)}$ ) 30 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยผลต่างประมาณ 3.90 องศาเซลเซียส โดยสาร PCM ได้คายความเย็นและดูดซับพลังงานความร้อนจากอากาศที่ไหลผ่าน สังเกตได้จาก  $T_{pcm,avg}$  เพิ่มขึ้น และ  $T_{a,css}$  ที่ลดลง

รูปที่ 13 ผลการทดสอบอุณหภูมิเฉลี่ยของสาร PCM ( $T_{pcm,avg}$ ) และสารทำความเย็น ( $T_{ref}$ ) ในกระบวนการประจุความเย็นรูปที่ 14 ผลการทดสอบอุณหภูมิเฉลี่ยของสาร PCM ( $T_{pcm,avg}$ ) อุณหภูมิภายใน ( $T_{a,coil}$ ) และอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศไหลเข้า ( $T_{a,css(i)}$ ) - ออก ( $T_{a,css(o)}$ ) เครื่อง CSS Unit ในกระบวนการคายความเย็น



### 3.3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการกักเก็บความเย็นของระบบ PCM-CSS

ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของระบบ PCM-CSS พิจารณา 2 ส่วน คือ ระบบทำความเย็น (Out Door) และเครื่อง CSS Unit (In Door) รายละเอียดดังนี้

#### 1) ประสิทธิภาพระบบทำความเย็น

เนื่องจากระบบทำความเย็นที่นำมาใช้ในระบบ PCM-CSS ถูกปรับให้คอมเพรสเซอร์ทำงานในช่วงความถี่ไม่เกิน 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งต่ำกว่าปกติคือ 90 เฮิร์ตซ์ (ระบบไฟฟ้า 3 เฟส) เพื่อปรับอัตราการทำความเย็น ( $\dot{Q}_a$ ) ลง ให้เหมาะสมกับอัตราการกักเก็บความเย็นของเครื่อง CSS Unit ( $\dot{Q}_{pcm}$ ) ซึ่ง ( $\dot{Q}_a$ ) มีค่าเท่ากับ 4,285.41 บีทียูต่อชั่วโมง มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio; EER) ของระบบ PCM-CSS เฉลี่ยอยู่ที่ 5.79 บีทียูต่อชั่วโมงต่อวัตต์ โดยพิจารณาผลการทดสอบที่ 45 นาที สามารถประเมินปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สารทำความเย็นถ่ายเทให้กับสาร PCM ได้ประมาณ 3,214.06 บีทียู หรือ 3,391.01 กิโลจูล ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของระบบทำความเย็นสำหรับระบบ PCM-CSS

อัตราการทำความเย็น ( $\dot{Q}_a$ )	Btu/hr	4,285.41
	W	1,255.98
ปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $Q_a$ )	Btu	3,214.06
	kJ	3,391.01
ปริมาณพลังงานไฟฟ้า ( $E_c$ )	kWh/hr	0.20
	kJ	7,200.00
EER	Btu/hr/W	5.79
COP	-	1.70

#### 2) ประสิทธิภาพเครื่อง CSS Unit

ในช่วงของกระบวนการประจุความเย็น พิจารณาปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนจากสาร PCM ในเครื่อง CSS Unit ที่ถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็น โดย

พิจารณาเป็นอัตราการกักเก็บความเย็นของเครื่อง CSS Unit ( $\dot{Q}_{pcm}$ ) ส่วนในช่วงกระบวนการคายความเย็น พิจารณาปริมาณแลกเปลี่ยนความร้อนจากสาร PCM ในเครื่อง CSS Unit กับอากาศที่ไหลผ่านภายในชุดคอยล์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ของตัวเครื่อง ( $\dot{Q}_{css,discharge}$ ) ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นของเครื่อง CSS Unit

อัตราการกักเก็บความเย็น ( $\dot{Q}_{pcm}$ )	Btu/hr	2,910.12
	W	852.91
ปริมาณการกักเก็บความเย็น ( $Q_{pcm}$ )	Btu	2,174.81
	kJ	2,294.55
อัตราการคายความเย็น ( $\dot{Q}_{(cs,discharge)}$ )	Btu/hr	2,142.05
	W	627.80
ปริมาณการคายความเย็น ( $Q_{css,discharging}$ )	Btu	2,072.07
	kJ	2,186.15

#### 3) ประสิทธิภาพของระบบ PCM-CSS

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่า ( $\dot{Q}_a$ ) ของระบบทำความเย็น และค่า ( $\dot{Q}_{pcm}$ ) ในกระบวนการประจุความเย็นพบว่า มีค่าแตกต่างกันคิดเป็นร้อยละความแตกต่าง 38.23 เมื่อพิจารณาเป็นประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ PCM-CSS ( $\dot{Q}_{c,charge}$ ) เฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 67.91 ดังผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานในตารางที่ 5 เกิดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการในอุปกรณ์ เช่น ท่อสารทำความเย็น แอควิวเลเตอร์ (Accumulator) คิดเป็นร้อยละ 32.10

ในส่วนของกระบวนการคายความเย็น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบค่า ( $\dot{Q}_{(cs,discharge)}$ ) กับค่า ( $\dot{Q}_{pcm}$ ) ของเครื่อง CSS Unit พบว่า มีค่าแตกต่างกันคิดเป็นร้อยละความแตกต่าง 30.01 คิดเป็นประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\eta_{(c,discharge)}$ ) ร้อยละ 73.61 เกิดการสูญเสีย

พลังงานในกระบวนการผ่านผนังเครื่อง CSS Unit คิดเป็นร้อยละ 26.39

**ตารางที่ 5** ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางพลังงานของระบบ PCM-CSS

ประสิทธิภาพ PCM-CSS ช่วง Charging ( $\eta_{(C,charge)}$ )	67.91%
ประสิทธิภาพ PCM-CSS ช่วง Discharging ( $\eta_{(C,discharge)}$ )	73.61%
ประสิทธิภาพทางพลังงาน ( $\eta_e$ )	31.87%

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

สารเปลี่ยนสถานะที่นำมาใช้กับระบบกักเก็บความร้อนคือ พาราฟินเหลวสามารถกักเก็บความร้อนคิดเป็นปริมาณพลังงานต่อหน่วยมวลเฉลี่ยเท่ากับ 495.68 กิโลจูลต่อกิโลกรัม หรือ 469.81 บีทียูต่อกิโลกรัม เมื่อนำสาร PCM มาใช้ในการปรับอากาศภายในอาคารทดสอบอัฐมวลเบา มีภาระการทำ ความเย็นในช่วงเวลากลางคืนเฉลี่ยอยู่ที่ 2,245.06 บีทียูต่อ ชั่วโมง ในพื้นที่ใช้สอย 5.29 ตารางเมตร โดยต้องการสร้างระบบกักเก็บความร้อนร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ (PCM-CSS) จึงสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับการปรับอากาศในบ้านทดสอบดังกล่าวในระยะเวลา 1 ชั่วโมง ที่โหลดความร้อน 2,245.06 บีทียู หรือ 2,368.67 กิโลจูล โดยใช้สารพาราฟินเหลวบรรจุในเครื่องกักเก็บความร้อน (CSS Unit) และนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ระบบ PCM-CSS มีประสิทธิภาพในการกักเก็บความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 67.91 และมีประสิทธิภาพในการคายความร้อนสูงถึงร้อยละ 73.61 ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้เฉลี่ย 3.90 องศาเซลเซียส แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพพลังงานของระบบ PCM-CSS พบว่ามีค่าเฉลี่ย ร้อยละอยู่ที่ 31.87 เนื่องจากปริมาณโหลดความร้อนหรือ ปริมาณสาร PCM สำหรับกักเก็บพลังงานในเครื่อง CSS Unit มี ปริมาณน้อยกว่าความสามารถในการทำ ความเย็นของระบบ ทำความเย็น ดังนั้นหากมีการนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์เพิ่มเติม ในอนาคตอาจเพิ่มจำนวนเครื่อง CSS Unit ให้เหมาะสมกับ ระบบทำความเย็นที่นำมาใช้งานร่วมกัน และต้องปรับปริมาณ

สาร PCM ที่ใช้บรรจุในเครื่อง CSS Unit โดยการเพิ่มปริมาณ และจำนวนเครื่อง CSS Unit ให้เหมาะสมกับการนำมา ประยุกต์ใช้สำหรับบ้านพักอาศัยที่มีภาระการทำงานเย็น มากกว่าบ้านทดสอบ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด บริษัท เดอะคูล แมนูแฟคเจอร์ริง จำกัด และ บริษัท อินทรี ซุปเปอร์ บล็อก จำกัด ที่ในการสนับสนุนในเรื่องการให้คำปรึกษา อุปกรณ์ และเครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย รวมถึงสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ให้ทุน สนับสนุนในโครงการสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับ อดมศึกษาด้านอนุรักษ์พลังงาน ปีงบประมาณ 2562

#### 6. สัญลักษณ์

$A_B$	=	พื้นที่ผิวอาคารที่ถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
$c_i$	=	ค่าความจุความร้อนของสาร PCM ที่สถานะของเหลว ( $kJ/kg \cdot K$ )
CLTD	=	ภาระความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่าที่อุณหภูมิปรับอากาศ $25^\circ C$
COP	=	สมรรถนะการทำ ความเย็น (W/W)
$E_r$	=	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทำความเย็น (kWh)
$H_{ai}$	=	ค่าเอนทาลปีของอากาศก่อนผ่านเครื่อง CSS Unit (kJ/kg)
$H_{ao}$	=	ค่าเอนทาลปีของอากาศหลังผ่านเครื่อง CSS Unit (kJ/kg)
m	=	มวลของสาร PCM (kg)
$Q_c$	=	ภาระการทำ ความเย็นภายในอาคาร (W)
$q_c$	=	ภาระการทำ ความเย็นการปรับอากาศ (W)
$Q_H$	=	อัตราการการดูดซับพลังงาน (W)
$Q_{pcm}$	=	ปริมาณพลังงานสะสมของสาร PCM (kJ)
$q_w$	=	ภาระการทำ ความเย็นจากตัวอาคาร (W)
$R_{ab}$	=	สภาพต้านทานความร้อนของอากาศแวดล้อม (K/W)

$R_{HDP}$	= สภาพต้านทานความร้อนของกล่องบรรจุสาร PCM (K/W)
$R_{pcm}$	= สภาพต้านทานความร้อนของสาร PCM (K/W)
$T_{ab}$	= อุณหภูมิแวดล้อม (K)
$T_{pcm}$	= อุณหภูมิของสาร PCM (K)
UB	= สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอาคาร ( $W/m^2.K$ )
$\Delta H_{Ri}$	= ผลต่างค่าเอนทาลปีของด้านคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)
$\Delta H_{Ro}$	= ผลต่างค่าเอนทาลปีด้านทำความเย็น (kJ/kg)
$\Delta T$	= ผลต่างอุณหภูมิอากาศภายใน-ภายนอกอาคาร (K)
$\Delta T_l$	= ผลต่างของอุณหภูมิสาร PCM ขณะสถานะของเหลว (K)
$\Delta T_s$	= ผลต่างของอุณหภูมิสาร PCM ขณะสถานะของแข็ง (K)
$(\dot{m}_a)$	= อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
$(\dot{m}_r)$	= อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
$(\dot{Q}_a)$	= ความสามารถในการทำความเย็นของระบบฯ (W)
$\dot{Q}_{(cs,discharge)}$	= อัตราการคายความร้อนของเครื่อง CSS Unit (W)
$\dot{Q}_{pcm}$	= อัตราการกักเก็บความร้อนของ PCM (W)
$\eta_{(C,Charge)}$	= ประสิทธิภาพ PCM-CSS ช่วง Charging (%)
$\eta_{(C,discharge)}$	= ประสิทธิภาพ PCM-CSS ช่วง Discharging (%)
$\eta_e$	= ประสิทธิภาพทางพลังงาน (%)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Saez-de-Ibarra, A. Milo, H. Gaztañaga, I. Etxeberria-Otadui, P. Rodríguez, S. Bacha, and V. Debusschere, "Analysis and comparison of battery energy storage technologies for grid applications," presented at *2013 IEEE Grenoble Conference*, Grenoble, France, 2013.
- [2] F. Souayfane, F. Fardoun, and P.-H. Biwole, "Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review," *Energy and Buildings*, vol. 129, pp. 396–431, 2016.
- [3] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F.Cabeza, "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 4, pp. 534–540, 2010.
- [4] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 870–906, 2014.
- [5] P. Evans. (2017, December). *Cooling Load Calculation – Cold Room*. [Online]. Available: [theengineeringmindset.com/cooling-load-calculation-cold-room](http://theengineeringmindset.com/cooling-load-calculation-cold-room)
- [6] V. Palomba, V. Brancato, and A. Frazzica, "Experimental investigation of a latent heat storage for solar cooling applications," *Applied Energy*, vol. 199, pp. 347–358, 2017.
- [7] N. Ozisik. (2018, July). *Steady heat conduction*. [Online]. Available: [cecs.wright.edu/~stthomas/htchapter03.pdf](http://cecs.wright.edu/~stthomas/htchapter03.pdf)