



ระบบกักเก็บความเย็นในอาคารแบบคอนกรีตมวลเบา ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ

ศิริรัตน์ สุลา* สมชาย มณีวรรณ และ ฉันทนา พันธุ์เหล็ก

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

โยธิน อึ้งกุล

บริษัท อินทรี ซุปเปอร์บล็อก จำกัด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 0114 5654, 0 5596 3552 อีเมล: siri.ratsula@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.001

รับเมื่อ 26 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 10 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 6 ตุลาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 2 พฤศจิกายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาออกแบบระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (สำหรับปรับอากาศในบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน (อุณหภูมิหลอมละลาย 20 องศาเซลเซียส) ในช่วงการกักเก็บความเย็น 5 กรณี (ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 90, 70, 60, 50 และ 40 เฮิร์ตซ์) พบว่า ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีค่าสมรรถนะการทำความเย็น (COP) และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) อยู่ที่ 3.09 และ 10.53 (Btu/hr)/W คิดเป็นร้อยละประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบเท่ากับ 7.03 การใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง (สำหรับการทำความเย็น 8 ชั่วโมง) โดยในกรณีที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงอยู่ที่ประมาณ 1.13 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละการประหยัดเท่ากับ 81.57 ซึ่งส่วนประกอบของระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดได้แก่ ชุดคอยล์ร้อนภายนอกอาคาร คิดเป็นร้อยละ 55

คำสำคัญ: ระบบกักเก็บความเย็น สารเปลี่ยนสถานะ คอนกรีตมวลเบา



Cooling Storage System in Lightweight Concrete Building with Phase Change Material

Sirirat Sula * Somchai Maneewan and Chantana Punlek

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

Yothin Ungkoon

Affiliation Insee Superblock Company Limited, Sing Buri, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 0114 5654, 0 5596 3552, E-mail: siri.ratsula@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.001

Received 26 June 2020; Revised 10 August 2020; Accepted 6 October 2020; Published online: 2 November 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The aim of this research is to study and design the Phase Change Material Cooling Storage System (PCM-CSS) by using Photovoltaic (PV) cell for night air conditioning in lightweight concrete buildings. The PCM-CSS was applied to improve the efficiency of cooling storage system for buildings. The efficiency of PCM-CSS and the energy consumption between using electricity power from the Provincial Electricity Authority (PEA) and PEA with PV were studied in the experiment. The melting point of paraffin was selected at 22 °C to store the coldness from refrigerant (R410A). The PCM-CSS processes consist of the charging and discharging. The frequency of compressor was varied in five cases for charging process, namely 90, 70, 60, 50, and 40 Hz. The result indicates that the 50 Hz is an appropriate frequency for cooling charging to PCM with 3.09 of COP, 10.53 (Btu/hr)/W of EER and 7.03% of $\eta_{C,Charge}$. Eventually, the result of the comparison on energy consumption between using electricity power from PEA and PEA with PV reveals the PCM-CSS using electricity power from PEA without PV is approximately 6.11 kWh (charging process for 8 hours.). On the other hand, the electricity power usage from PEA with PV can decrease the energy consumption by approximately 1.13 kWh or can be saved around 81.57% as compared with the electricity power usage from PEA only. The condensing unit of the PCM-CSS, accounting for 55% of the total consumption, represents the greatest segment of power consumption.

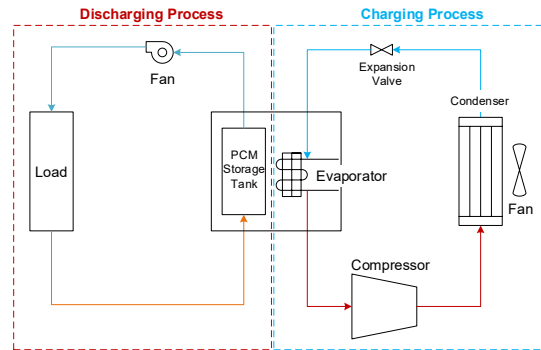
Keywords: Cooling Storage System, Phase Change Material, Lightweight Concrete

1. บทนำ

สถานการณ์การใช้ไฟฟ้าในช่วง 9 เดือนแรกของ พ.ศ. 2562 [1] พบว่า ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบ 3 การไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 32,273 เมกะวัตต์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.7 โดยภาคธุรกิจและครัวเรือนมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 และ 3.7 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าภาคครัวเรือนเป็นภาคที่มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่เปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อปรับสภาวะความสบายเชิงความร้อน ส่งผลให้ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น

ปัจจุบันระบบกักเก็บพลังงาน (Cooling Storage System) ถือว่าเป็นทางเลือกใหม่ที่ดีว่าเป็นตัวช่วยในการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด เพราะเป็นการนำพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าต่ำ มาผลิตพลังงานกักเก็บเอาไว้ในรูปแบบของพลังงานความเย็น แล้วนำพลังงานความเย็นนี้ออกมาใช้ในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่า โดยระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ประเภท [2] คือ เก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled Water Storage System) เก็บพลังงานด้วยน้ำแข็ง (Ice Thermal Storage) และเก็บพลังงานด้วยน้ำเกลือ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ (Salt Storage หรือ Phase Change Materials) โดย Vakilaltojjar [3] ได้ทำการวิจัยและพบว่า ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบปรับอากาศแบบเดิมกับระบบปรับอากาศที่ใช้ร่วมกับระบบกักเก็บความเย็น

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบระบบกักเก็บพลังงานด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials; PCM) โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาเพื่อการปรับอากาศในประเทศไทย ด้วยคุณสมบัติทางเคมีของ PCM ที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนในวัสดุโครงสร้าง ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่ระเบิด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเมื่อเปลี่ยนสถานะ [4] ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาในส่วนของสมบัติทางกายภาพของ PCM ร่วมกับระบบกักเก็บความเย็น โดยมีความคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปต่อยอด และพัฒนาประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นให้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบการใช้ และผลิตพลังงาน



รูปที่ 1 การทำงานของระบบกักเก็บความเย็น

ด้านอื่น ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนเทคโนโลยีที่ใช้อยู่ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material Cooling Storage System; PCM-CSS) แบ่งการทำงานออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ ช่วงการกักเก็บความเย็น (Charging Process) และช่วงการคายความเย็น (Discharging Process) ดังรูปที่ 1 ขั้นตอนในการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1) ออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของ PCM-CSS ที่ทำงานร่วมกับชุดทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic; PV) ได้โดยไม่ต้องมีแบตเตอรี่และอินเวอร์เตอร์และดำเนินการสร้าง PCM-CSS เครื่องต้นแบบ

2) ทดสอบประสิทธิภาพของ PCM-CSS ในช่วงกักเก็บความเย็น แบ่งออกเป็น 5 กรณี โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าความถี่ของคอมเพรสเซอร์ 90, 70, 60, 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการคัดเลือกออกมา 1 กรณี ที่มีค่าความถี่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บความเย็นที่สุด จากนั้นนำไปทดสอบในช่วงคายความเย็น

3) ทดสอบประสิทธิภาพในช่วงคายความเย็น แบ่งออกเป็น 2 กรณี โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิแวดล้อม 30 และ 35 องศาเซลเซียส

2.1 การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของ PCM-CSS

2.1.1 การคัดเลือก PCM

ประเภทของ PCM แบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และยูเทกติก (Eutectic) หรือสารหลายองค์ประกอบ ดังตารางที่ 1 จะพบว่ามีสารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ และยูเทกติก ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ใน PCM-CSS เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ไม่เหมาะสมในด้านกายภาพ และเคมี เพราะมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็ก มีการเกิด Supercooling และมีการแยกเฟส ส่วนสารเปลี่ยนสถานะประเภทยูเทกติกไม่เหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์เพราะมีราคาที่สูง

เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอต่อโหลดความร้อน อุณหภูมิหลอมละลายของ PCM ควรมีอุณหภูมิต่างจากอุณหภูมิอากาศประมาณ 3 ถึง 5 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุณหภูมิหลอมละลายของ PCM ควรอยู่ระหว่าง 19 ถึง 24 องศาเซลเซียส [5] ผู้วิจัยจึงเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทอินทรีย์ ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ระหว่าง 19 ถึง 24 องศาเซลเซียส โดยมีสมบัติเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ภาพรวมข้อดีและข้อเสียของ PCM แต่ละประเภท [6], [7]

| ประเภท | ข้อดี | ข้อเสีย |
|--------------|--|---|
| สารอินทรีย์ | ไม่เกิด Subcooling ไม่เกิดการแยกเฟส ความดันไอต่ำ ช่วงอุณหภูมิกว้าง ลักษณะทางเคมีคงที่ ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง และรีไซเคิลได้ | ค่าการนำความร้อนต่ำ ปริมาตรความจุความร้อนแฝงต่ำและไวไฟ |
| สารอนินทรีย์ | มีการเปลี่ยนเฟสชัดเจน ปริมาตรความจุความร้อนแฝงสูง ค่าการนำความร้อนมากกว่าสารอินทรีย์มีราคาสูง และไม่ไวไฟ | กัดกร่อนเหล็ก เกิด Supercooling มีการแยกเฟส และเกิดการเปลี่ยนปริมาตรสูง |
| ยูเทกติก | มีจุดหลอมเหลวชัดเจน คุณสมบัติขึ้นอยู่กับส่วนประกอบ | มีราคาสูง |

ตารางที่ 2 สมบัติเบื้องต้นของ PCM ที่นำมาใช้สำหรับ PCM-CSS

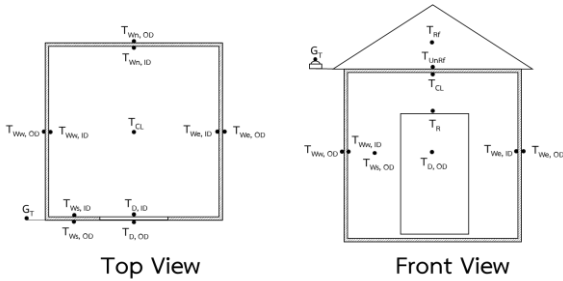
| คุณสมบัติ | รายละเอียด |
|-------------------------------------|------------|
| ประเภทของ PCM | paraffin |
| อุณหภูมิหลอมเหลว, ของเหลว (°C) | 22 |
| อุณหภูมิเยือกแข็ง, ของแข็ง (°C) | 18 |
| ค่าความหนาแน่น (kg/m ³) | 636 |
| ค่าความร้อนแฝง (kJ/kg) | 190-260 |
| ค่าการนำความร้อน, ของเหลว (W/mK) | 0.74 |
| ค่าการนำความร้อน, ของแข็ง (W/mK) | 0.93 |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg °C) | 3.22 |
| การดูดซับพลังงาน (ละลาย) (kJ/kg) | 492.80 |
| การคายพลังงาน (แข็งตัว) (kJ/kg) | 498.55 |

2.1.2 การเลือกใช้รูปแบบชุดกักเก็บความร้อน

การนำ PCM ไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการระบายอากาศหรือการปรับอากาศภายในอาคาร จำเป็นต้องมีการห่อหุ้มหรือบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในภาชนะ หรือวัสดุบรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารเปลี่ยนสถานะ และป้องกันการเปลี่ยนสถานะจากการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกโดยตรง อีกทั้งยังสามารถช่วยหลีกเลี่ยงการติดไฟ ในกรณีของการใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินได้ [8] โดยประสิทธิภาพของภาชนะที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะมีบทบาทสำคัญต่อการกักเก็บความร้อน และการนำความร้อน ส่งผลต่อระยะเวลาของการแข็งตัว และการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่งภาชนะบรรจุจะต้องแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนและความร้อน ง่ายต่อการใช้งานและมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอ [9] โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงรูปแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะพบว่า มีวิธีการและรูปแบบในการบรรจุที่หลากหลาย [10] ได้แก่ แบบแผงอะลูมิเนียม กระเปาะอะลูมิเนียม ลูกบอลโลหะ หรือพลาสติก แผ่น ผนังพลาสติก ท่อพลาสติกรูปแบบต่าง ๆ ท่อทรงกระบอก ฯลฯ

2.1.3 ปริมาณการใช้ PCM

ปริมาณการใช้ PCM จะขึ้นอยู่กับปริมาณภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ของอาคารบ้านทดสอบ คอนกรีตมวลเบา ณ บริษัท อินทรี ซุปเปอร์บล็อก จำกัด



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดค่าอุณหภูมิอาคารบ้านทดสอบ

จังหวัดสิงห์บุรี โดยบ้านทดสอบมีขนาด 2.40 (กว้าง) เมตร × 2.40 (ยาว) เมตร × 2.30 (สูง) เมตร ผนังทำจากคอนกรีตมวลเบาที่มีความหนา 0.10 เมตร โดยทำการวัดค่าอุณหภูมิอาคารทดสอบดังรูปที่ 2 เพื่อนำไปคำนวณหาภาระการทำความเย็น จากสมการที่ (1)–(3) [11] และปริมาณการใช้ PCM จากสมการที่ (4) [12]

$$Q_C = q_W + q_c \tag{1}$$

เมื่อ $q_W = A_B U_B \Delta T \tag{2}$

$$q_c = A_B U_B (CLTD) \tag{3}$$

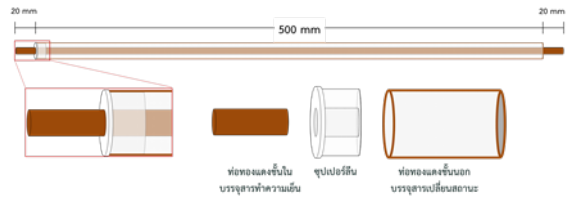
$$Q_{pcm} = mc_l \Delta T_l + mL + mc_s \Delta T_s \tag{4}$$

2.1.3 การออกแบบโครงสร้าง PCM-CSS

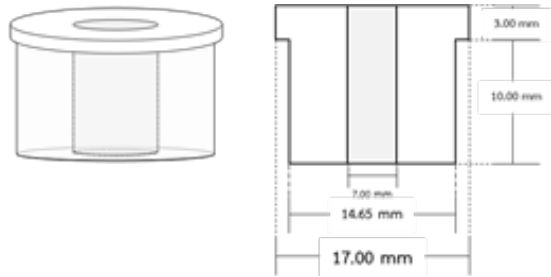
1) ชุดคอยล์เย็น (Indoor Unit)

ชุดแผงคอยล์เย็น (Evaporator) สำหรับ PCM-CSS จะมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น โดยท่อชั้นในเป็นท่อสารทำความเย็น (Refrigerant) ชนิด R410A และท่อชั้นนอกสำหรับบรรจุ PCM ชนิดพาราฟิน ที่มีความยาว 500 มิลลิเมตร ปิดด้วยซูเปอร์ลีน 1 ด้าน และอีกด้านเชื่อมปิดด้วยทองแดง ดังรูปที่ 3 และ 4

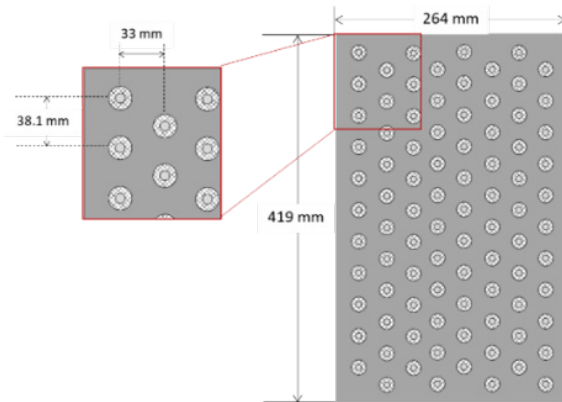
ชุดแผงคอยล์เย็นจะมีจำนวนท่อทั้งหมด 88 ท่อ เรียงเป็นแถวแนวตั้ง 8 แถว และแนวนอน 11 แถว วางเรียงกันตามขนาดและระยะห่างช่องใส่ท่อของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น (Aluminium Finned Sheet) โดยจะมีลักษณะผิวสัมผัสเรียบ ไม่ขรุขระ ขนาด 264 × 419 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5 โดยอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่นจะถูกวางเรียงกันที่ระยะห่าง



รูปที่ 3 ลักษณะของท่อ 2 ชั้น ในชุดแผงคอยล์เย็น



รูปที่ 4 ขนาดของซูเปอร์ลีน

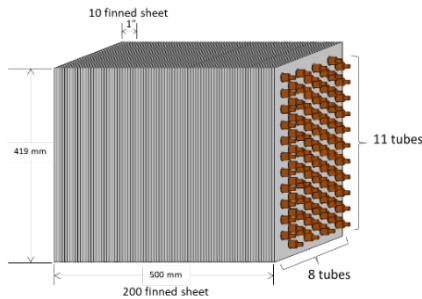


รูปที่ 5 ขนาดของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น

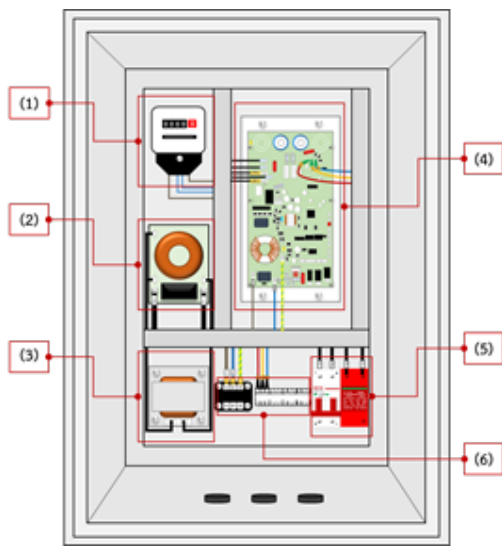
10 Finned Inch (ระยะห่าง 1 นิ้ว มีอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น 10 แผ่น) ดังรูปที่ 6

2) ชุดคอยล์ร้อน (Outdoor Unit)

จะมีลักษณะเหมือนกับชุดคอยล์ร้อนของระบบปรับอากาศทั่วไป แต่สำหรับ PCM-CSS จะมีการติดตั้งแอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) ระหว่างชุดแผงคอยล์เย็นกับคอมเพรสเซอร์ (Compressor) เพื่อดักจับสารทำความเย็นในสถานะของเหลว (Suction) ที่ออกจากชุดแผงคอยล์เย็น ไม่ให้ไหลเข้าสู่คอมเพรสเซอร์



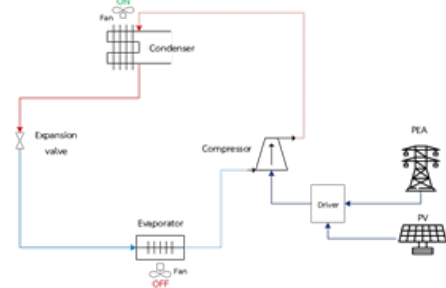
รูปที่ 6 การวางอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น



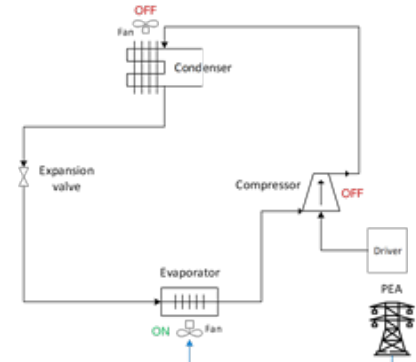
รูปที่ 7 ส่วนประกอบของชุดกล่องควบคุมสำหรับระบบกักเก็บความเย็น

3) ชุดกล่องควบคุม (Control Unit)

มีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 6 ส่วน ดังรูปที่ 7 ได้แก่ 1) มิเตอร์ไฟฟ้า มีหน้าที่บอกปริมาณพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current; AC) ที่เข้าสู่ PCM-CSS 2) ตัวกรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current; DC) 3) ตัวกรองสัญญาณ AC โดย 2) และ 3) จะทำการกรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ก่อนปล่อยเข้าสู่คอมเพรสเซอร์ 4) บอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ (BLDC Compressor Driver) เปรียบเสมือนเมนบอร์ด (Main Board) ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของคอมเพรสเซอร์ เป็นหลัก 5) เบรกเกอร์สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผง



รูปที่ 8 การทำงานช่วงกักเก็บความเย็น



รูปที่ 9 การทำงานช่วงการคายความเย็น

เซลล์แสงอาทิตย์ (PV Breaker) ประกอบไปด้วย เซอร์คิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) และเบรกเกอร์กันฟ้าผ่า (Surge Protection) 6) จุดเชื่อมต่อสายไฟ (Terminal)

2.1.4 รูปแบบการทำงานของ PCM-CSS

1) การกักเก็บความเย็น

PCM-CSS จะนำพลังงานไฟฟ้ามาผลิตเป็นพลังงานความเย็นสะสมไว้ใน PCM ส่วนประกอบต่างๆ ภายในระบบ จะทำงานเหมือนกับระบบปรับอากาศทั่วไป ยกเว้นมอเตอร์พัดลมของชุดแผงคอยล์เย็น เพื่อเก็บสะสมความเย็นเอาไว้ที่ PCM ดังรูปที่ 8

2) การคายความเย็น

เป็นการนำพลังงานความเย็นที่ถูกเก็บสะสมไว้ที่ PCM ออกมาใช้งาน โดยใช้พัดลมของชุดแผงคอยล์เย็นเพียงอย่างเดียว และเป็นช่วงที่คอมเพรสเซอร์หยุดการทำงาน ไม่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ยกเว้นจ่ายพลังงานไฟฟ้า AC ให้กับพัดลมของชุดแผงคอยล์เย็น ดังรูปที่ 9



รูปที่ 10 การทดสอบประสิทธิภาพกักเก็บความเย็น

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพของ PCM-CSS

ทำการทดสอบประสิทธิภาพในช่วงกักเก็บความเย็น โดยทำการติดตั้งชุดคอยล์ร้อนและชุดคอยล์เย็นของ PCM-CSS ดังรูปที่ 10 ในห้องปิดที่มีอุณหภูมิภายในห้องเฉลี่ยอยู่ที่ 27–28 องศาเซลเซียส ทำการปรับความถี่ (Frequency) ของคอมเพรสเซอร์ ในการชาร์จความเย็นให้กับ PCM ซึ่งจะทำทดสอบทั้งหมด 5 กรณี ที่ความถี่ 90, 70, 60, 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการเลือกความถี่ที่มีความเหมาะสมกับ PCM-CSS มากที่สุด

โดยได้ทำการบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบ ดังนี้

$T_{Ri, CM}$ = อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้าคอมเพรสเซอร์ ($^{\circ}C$)

$T_{Ro, CM}$ = อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออกคอมเพรสเซอร์ ($^{\circ}C$)

$T_{Ro, CN}$ = อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออกแผงคอยล์ร้อน ($^{\circ}C$)

$T_{Ri, EV}$ = อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้าแผงคอยล์เย็น ($^{\circ}C$)

$T_{Ro, EV}$ = อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออกแผงคอยล์เย็น ($^{\circ}C$)

T_{CM} = อุณหภูมิของคอมเพรสเซอร์ ($^{\circ}C$)

$T_{PCM, avg}$ = อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ($^{\circ}C$)

$T_{A, EV}$ = อุณหภูมิอากาศภายในแผงคอยล์เย็น ($^{\circ}C$)

T_R = อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ ($^{\circ}C$)

$T_{E, CN}$ = อุณหภูมิilmจากพัดลมของแผงคอยล์ร้อน ($^{\circ}C$)

2.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ PCM-CSS

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ PCM-CSS ด้วยการนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการบันทึกไว้มาคำนวณด้วยสมการปริมาณทางพลังงานที่ต้องการศึกษา ดังต่อไปนี้

2.3.1 ความสามารถในการทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์

$$\dot{Q}_{comp} = \dot{m}_a (h_{ao} - h_{ai}) \quad (5)$$

2.3.2 สมรรถนะการทำความเย็น

$$COP = \frac{\dot{m}_R (\Delta H_{Ro})}{\dot{m}_R (\Delta H_{Ri})} \quad (6)$$

2.3.3 อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงานประสิทธิภาพ

$$EER = \frac{Q}{W} \quad (7)$$

2.3.4 ประสิทธิภาพการกักเก็บความเย็น

$$\eta_{C,Charg} = \frac{\dot{Q}_{pcm}}{\dot{Q}_R} \times 100 \quad (8)$$

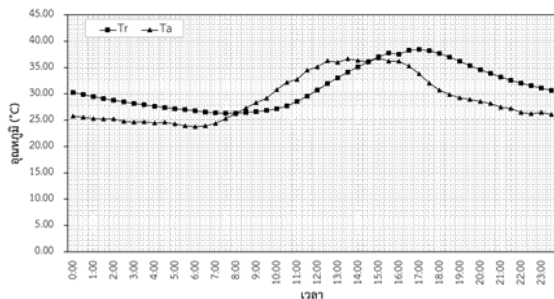
3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบประสิทธิภาพของ PCM-CSS และทำการบันทึกค่าตัวแปร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ PCM-CSS ด้วยสมการปริมาณทางพลังงาน สมการที่ (5)–(8) มีผลการทดลองดังนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณการใช้ PCM

จากการวัดค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ($T_{a,OD}$) – ภายใน ($T_{a,ID}$) อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาตลอด 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาดังตั้งตั้งแต่ 14.00–7.00 น. $T_{a,ID}$ สูงกว่า $T_{a,OD}$ เนื่องจากเกิดการสะสมความร้อนไว้ที่ใต้หลังคาและผนังอาคาร

โดยช่วงเวลาที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพการปรับอากาศของ PCM-CSS คือช่วงเวลา 20.00–6.00 น. เมื่อทำการวิเคราะห์ภาระความร้อนจากอาคาร (q_w) และภาระ



รูปที่ 11 อุณหภูมิอากาศภายใน-ภายนอกใน อาคารทดสอบ

การปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (q_c) ดังสมการที่ (1) พบว่า ภาระการทำความเย็นเฉลี่ยของอาคารทดสอบ (Q_c) ในช่วงเวลากลางคืนมีค่าเท่ากับ 2,368.67 กิโลจูล หรือคิดเป็น 2,245.06 (Btu/hr) ดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 2 PCM มีความสามารถในการดูดซับพลังงานอยู่ที่ 492.80 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ดังนั้นปริมาณ PCM สำหรับการสร้าง PCM-CSS เครื่องต้นแบบ ต้องใช้ปริมาณ PCM อย่างน้อย 4.81 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 7.56 ลิตร จึงจะสามารถรองรับภาระการทำความเย็นที่เกิดขึ้นในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาใน 1 ชั่วโมง ได้ ผู้วิจัยจึงทำการบรรจุ PCM ลงใน PCM-CSS ประมาณ 8.00 ลิตร

ตารางที่ 3 ภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา

| ช่วงเวลา | q_w (Btu/hr) | q_c (Btu/hr) | Q_c (Btu/hr) |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| กลางวัน | 682.25 | 2,415.66 | 3,097.90 |
| กลางคืน | 637.76 | 1,607.30 | 2,245.06 |

3.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพ PCM-CSS

จากการทดสอบประสิทธิภาพของ PCM-CSS ในช่วงกักเก็บความเย็น โดยให้คอมเพรสเซอร์ ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน 5 กรณี โดยจะแสดงผลการชาร์จความเย็นให้กับ PCM เปรียบเทียบกันเป็นระยะเวลา 16 นาที (ยึดตามระยะเวลาที่คอมเพรสเซอร์สามารถทำงานได้สั้นที่สุด) พบว่า ที่ความถี่ 90 เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้าสู่ชุดแผงคอยล์เย็น ($T_{ri,EV}$) มีค่าลดลงถึง 0 องศาเซลเซียส และเริ่มติดลบ

ในนาทีที่ 7 โดยมีค่าลดลงต่ำที่สุดเท่ากับ -8.67 องศาเซลเซียส สามารถถึงความร้อนออกจาก PCM ทำให้ $T_{pcm,avg}$ มีค่าลดลงต่ำสุดอยู่ที่ 9.03 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12 (ก.) และเมื่อทำการปรับความถี่ของคอมเพรสเซอร์ ให้ทำงานที่ 70 และ 60 เฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่า $T_{ri,EV}$ เริ่มติดลบช้ากว่าที่ความถี่ 90 เฮิร์ตซ์ ประมาณ 2 ถึง 3 นาที ดังรูป 12 (ข) และ (ค) และที่ความถี่ 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ ใช้เวลาทำให้ $T_{ri,EV}$ เริ่มติดลบมากกว่า 3 กรณีแรก โดยติดลบในนาทีที่ 15 ทั้ง 2 กรณี

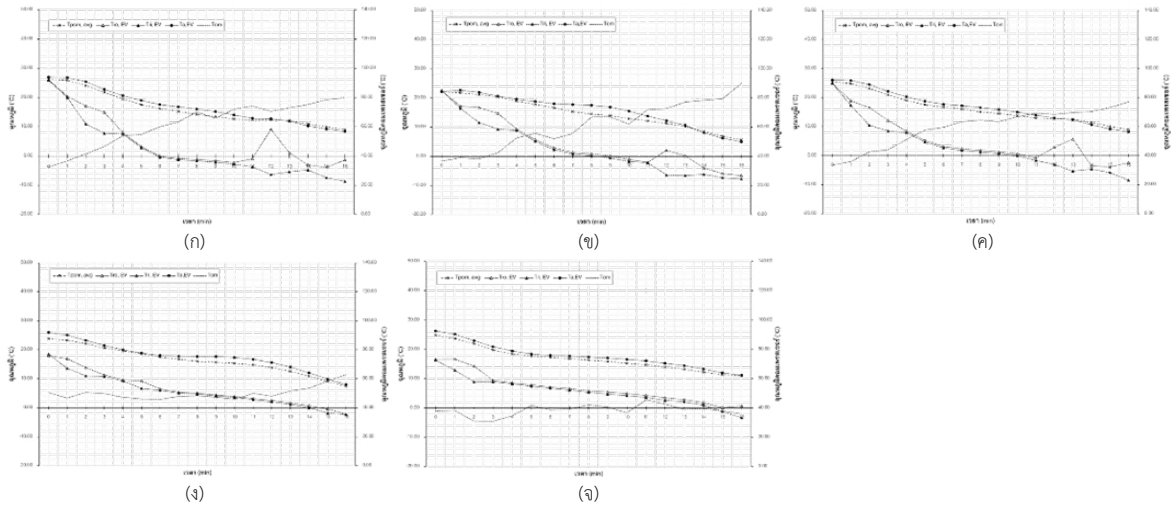
3.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ PCM-CSS

จากนั้นทำการนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำการบันทึกไว้มาวิเคราะห์ และคำนวณด้วยสมการของปริมาณทางด้านพลังงานที่ต้องการศึกษา ซึ่งได้ทำการพิจารณาปริมาณทางด้านพลังงาน ได้แก่ อัตราการทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์ (\dot{Q}_{comp}) สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance; COP) อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio; EER) ปริมาณการกักเก็บความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะ (Q_{pcm}) และประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ ($\eta_{C,Charg}$) โดยเป็นการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของระบบ จากการทดสอบประสิทธิภาพในการชาร์จความเย็นให้กับ PCM ในระยะเวลา 16 นาที แสดงดังตารางที่ 4 และ 5

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบ

| กรณีทดสอบ | \dot{Q}_{comp} | | COP (-) | EER (Btu/hr)/W |
|-----------|------------------|----------|---------|----------------|
| | W | Btu/hr | | |
| 90 Hz | 2.16 | 7,386.87 | 3.64 | 12.43 |
| 70 Hz | 1.90 | 6,486.17 | 2.53 | 8.63 |
| 60 Hz | 2.48 | 8,478.85 | 3.44 | 11.75 |
| 50 Hz | 2.56 | 8,749.07 | 3.09 | 10.53 |
| 40 Hz | 2.14 | 7,299.70 | 2.85 | 9.72 |
| เฉลี่ย | 2.25 | 7,680.13 | 3.11 | 10.61 |

จากตารางที่ 4 พบว่า \dot{Q}_{comp} คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7,680.13 Btu/hr โดยเป็นอัตราการทำความเย็นที่



รูปที่ 12 ผลการทดสอบประสิทธิภาพที่ความถี่ (ก) 90 Hz (ข) 70 Hz (ค) 60 Hz (ง) 50 Hz (จ) 40 Hz

คอมเพรสเซอร์สามารถทำได้ ขณะทำการชาร์จความเย็นให้กับ PCM ในระยะเวลา 16 นาที โดยมีค่า COP เฉลี่ยอยู่ที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าที่ 90 เฮิร์ตซ์ มีค่า COP สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 3.64 ส่งผลให้ค่า EER เท่ากับ 12.43 (Btu/hr)/W รองลงมา เป็นกรณีทดสอบที่ 60 และ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีค่า COP เท่ากับ 3.44 และ 3.09 ตามลำดับ และมีค่า EER อยู่ที่ 11.75 และ 10.53 (Btu/hr)/W ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของ PCM-CSS

| กรณีทดสอบ | Q_{pcm} | | \dot{Q}_{pcm} | | $\eta_{C,Charg}$ (%) |
|-----------|-----------|----------|-----------------|--------|----------------------|
| | kJ | Btu | W | Btu/hr | |
| 90 Hz | 1,089.72 | 1,032.86 | 1.14 | 3.88 | 6.20 |
| 70 Hz | 1,088.25 | 1,031.46 | 1.13 | 3.87 | 6.90 |
| 60 Hz | 1,088.25 | 1,031.46 | 1.13 | 3.87 | 5.77 |
| 50 Hz | 1,088.07 | 1,031.30 | 1.13 | 3.87 | 7.03 |
| 40 Hz | 1,083.40 | 1,026.87 | 1.13 | 3.85 | 5.33 |
| เฉลี่ย | 1,087.54 | 1,030.79 | 1.13 | 3.87 | 6.24 |

จากตารางที่ 5 พบว่า PCM-CSS มีค่า Q_{pcm} พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1,087.54 กิโลจูล ซึ่งเมื่อ

ทำการลดค่าความถี่ของคอมเพรสเซอร์ มีผลทำให้ Q_{pcm} มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน และ $\eta_{C,Charg}$ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 6.24 ซึ่งกรณีทดสอบที่ 50 เฮิร์ตซ์ เป็นกรณีที่มีค่า $\eta_{C,Charg}$ สูงที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 7.03

4. อภิปรายผลและสรุป

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ในช่วงกักเก็บความเย็นทั้งหมด 5 กรณี พบว่า ที่ความถี่น้อยกว่า ทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นลดลงช้ากว่า และสามารถดึงความร้อนออกจาก PCM ได้น้อยกว่าที่ความถี่สูง แต่ที่ความถี่น้อยกว่าจะทำให้คอมเพรสเซอร์ทำงานได้เสียดียรกว่า ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชาร์จความเย็นให้กับ PCM อยู่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีค่า \dot{Q}_{comp} COP, EER และ $\eta_{C,Charg}$ เท่ากับ 8,749.07 Btu/hr 3.09 10.53 (Btu/hr)/W และ 7.03% ตามลำดับ

การใช้พลังงานไฟฟ้าของ PCM-CSS พบว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับการทำความเย็น 8 ชั่วโมง โดยในกรณีที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง อยู่ที่ประมาณ 1.13

กิโลวัตต์ชั่วโมง ซึ่งส่วนประกอบของระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดได้แก่ ชุดคอยล์ร้อนภายนอกอาคาร คิดเป็นร้อยละ 55

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท และบริษัท อินทรี ซูเปอร์บล็อก จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เงินทุนสนับสนุนการวิจัย และเอื้อเพื่ออุปกรณ์ และสถานที่ ในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณบริษัท บีทีวี่ส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการวิจัย และเอื้อเพื่อสถานที่ เครื่องมือ และบุคลากร ในการสร้าง และทดสอบการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. สัญลักษณ์

$CLTD$ = ภาวะความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ที่อุณหภูมิปรับอากาศ 25 °C

COP = สมรรถนะการทำความเย็น (W/W)

H_{ai} = ค่าเอนทัลปีของอากาศก่อนผ่านเครื่อง CSS Unit (kJ/kg)

H_{ao} = ค่าเอนทัลปีของอากาศหลังผ่านเครื่อง CSS Unit (kJ/kg)

m = มวลของสาร PCM (kg)

Q_c = ภาระการทำความเย็นภายในอาคาร (W)

q_c = ภาระการทำความเย็นการปรับอากาศ (W)

Q_H = อัตราการการดูดซับพลังงาน (W)

Q_{pcm} = ปริมาณพลังงานสะสมของสาร PCM (kJ)

q_w = ภาระการทำความเย็นจากตัวอาคาร (W)

U_B = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอาคาร (W/m².K)

ΔH_{Ri} = ผลต่างค่าเอนทัลปีของด้านคอมเพรสเซอร์ (kJ/kg)

ΔH_{Ro} = ผลต่างค่าเอนทัลปีด้านทำความเย็น (kJ/kg)

ΔT = ผลต่างอุณหภูมิอากาศภายใน-ภายนอกอาคาร (K)

ΔT_i = ผลต่างของอุณหภูมิสาร PCM ขณะสถานะของเหลว (K)

ΔT_s = ผลต่างของอุณหภูมิสาร PCM ขณะสถานะของแข็ง (K)

\dot{m}_a = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

\dot{m}_R = อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)

\dot{Q}_a = ความสามารถในการทำความเย็นของระบบฯ (W)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Energy Policy and Planning office (EPPO). (2019, October). *Energy Situation of First Eight Month of 2018 Report*. [Online]. (in Thai). Available: <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-data/energysituation/monthly>
- [2] P. Surawattanawan and C. Suebsap, "Design and equipment selection for ice thermal storage application," *Academic Article of Air Conditioning Engineering Association of Thailand*, vol. 17, pp. 98–112, 2008 (in Thai).
- [3] S. M. Vakiltojar and W. Saman, "Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications," *Applied Thermal Engineering*, vol. 21, no. 3, pp. 249–263, 2001.
- [4] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierres, and L. Luo, "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 327–349, 2013.
- [5] N. Chaiyat, "Energy and economic analysis of a building air-conditioner with a phase change material (PCM)," *Energy Conversion and Management*, vol. 94, pp. 150–158, 2015.



- [6] S. E. Kalnæsa and B. P. Jelle, "Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities," *Energy and Buildings*, vol. 94, pp. 150–176, 2015.
- [7] R. Zeinelabdein, S. Omer, and G. Gan, "Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2843–2868, 2018.
- [8] U. Stritih and V. Butala, "Energy savings in building with a PCM free cooling system," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 2, pp. 125–134, 2011.
- [9] S. Riffat, B. Mempoou, and W. Fang, "Phase change material developments: A review," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 102–115, 2013.
- [10] L.F.Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011.
- [11] N. Ozisik, (2018, July). *Steady heat conduction* [Online]. Available: cecs.wright.edu/~stthomas/htchapter03.pdf
- [12] 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.