


ระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบา  
ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ




วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
กรกฎาคม 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร


วิทยานิพนธ์ เรื่อง “ระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบา  
ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ”  
ของ นางสาวศิริรัตน์ สุลา  
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ของมหาวิทยาลัยนเรศวร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัตมณะ รักความสุข)


  
.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ)

  
.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
(ดร.โยธิน อึ้งกุล)

  
.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทนา พันธุ์เหล็ก)

  
.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร.สุภชัย สำเนา)

อนุมัติ

  
.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร

24 กค 2563

## ประกาศคุณูปการ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สำเร็จไปด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย มณีวรรณ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้อุดหนุนให้ค่าตอบแทนตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒนา รักความสุข ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.โยธิน อึ้งกุล กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน และ ดร.ศุภชัย สัมภา กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ระดับปริญญาโท และบริษัท อินทรี ชูปเปอร์บล็อก จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เงินทุนสนับสนุนการวิจัย และเชื้อเพื่ออุปกรณ์ และสถานที่ ในการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณบริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ในการวิจัย และเชื้อเพื่อสถานที่ เครื่องมือ และบุคลากร ในการสร้างและทดสอบการวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบกักเก็บความเย็นสำหรับการปรับอากาศในประเทศและผู้ที่มีสนใจบ้างไม่มากก็น้อย

ศิริรัตน์ สุลา

ชื่อเรื่อง	ระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบา ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ
ผู้วิจัย	ศิริรัตน์ สุลา
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย มณีวรรณ
กรรมการที่ปรึกษา	ดร. โยธิน อึ้งกุล
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2562
คำสำคัญ	ระบบกักเก็บความเย็น สารเปลี่ยนสถานะ คอนกรีตมวลเบา

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาออกแบบระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (สำหรับปรับอากาศในบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร โดยได้ทำการศึกษา 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ด้านการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ด้านประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และด้านการใช้พลังงานไฟฟ้า ระหว่างการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ผู้วิจัยเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภท Organics ชนิดพาราฟิน ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 22 องศาเซลเซียส ใช้รูปแบบชุดคอยล์เย็นแบบท่อทองแดงกลม 2 ชั้น ร่วมกับครีบบระบายความร้อนแบบแผ่น โดยใช้ท่อชั้นนอกบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ และท่อชั้นในเป็นท่อสารทำความเย็น ร่วมกับครีบบระบายความร้อนแบบแผ่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและสารเปลี่ยนสถานะได้อย่างสม่ำเสมอ ปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่บรรจุไว้ในชุดกักเก็บความเย็นอยู่ที่ 7.56 ลิตร ระบบมีรูปแบบการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงการกักเก็บความเย็น และช่วงการคายความเย็น

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะเบื้องต้นทั้งหมด 9 กรณี แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบช่วงการกักเก็บความเย็นแบ่งออกเป็น 5 กรณี (ที่ความถี่

คอมเพรสเซอร์ 90 70 60 50 และ 40 เฮิร์ตซ์) พบว่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยมีค่าสมรรถนะการทำความเย็น (COP) และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) อยู่ที่ 3.09 และ 10.53 (Btu/hr.)/W คิดเป็นร้อยละประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบเท่ากับ 7.03 การทดสอบช่วงการคายความเย็นแบ่งออกเป็น 4 กรณี (ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 และ 35 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วลม 1.56 และ 1.90 เมตรต่อวินาที) พบว่าที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบที่สูงกว่า ทำให้สารเปลี่ยนสถานะเกิดการคายความเย็นได้ไวกว่าประมาณ 5 ถึง 6 นาที โดยความเร็วลมในการคายความเย็นทั้ง 2 กรณีมีผลต่อการคายความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะเพียงเล็กน้อย โดยมีอัตราการคายความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยเท่ากับ 1,201.13 Btu/hr. และมีประสิทธิภาพในการคายความเย็นเฉลี่ยของระบบร้อยละ 71.58

การใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างการให้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง (สำหรับการทำความเย็น 8 ชั่วโมง) โดยในกรณีที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง อยู่ที่ประมาณ 1.13 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละการประหยัดเท่ากับ 81.57 ซึ่งส่วนประกอบของระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดได้แก่ ชุดคอยล์ร้อนภายนอกอาคาร คิดเป็นร้อยละ 55

Title COOLING STORAGE SYSTEM IN LIGHTWEIGHT CONCRETE BUILDING STRUCTURE WITH PHASE CHANGE MATERIAL

Author Sirirat Sula

Advisor Professor Somchai Maneewan, Ph.D.

Co - Advisor Yothin Ungkoon, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.S. in Applied Physics,  
Naresuan University, 2020

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

#### ABSTRACT

The aim of this current study is to model the Phase Change Material Cooling Storage System (PCM-CSS) by using Photovoltaic (PV) electricity power for night air conditioning in Lightweight Concrete Building. The study on PCM-CSS efficiency, three main parts were studied: the design system structure and process, the efficiency of PCM-CSS and the energy consumption between using electricity power from the Provincial Electricity Authority (PEA) and PEA with PV. First, the researcher selected paraffin (melting point 22 °C) to store the coldness from refrigerant (R410A). To increase the heat exchanger area, we use cylindrical double tube, to contain 7.56-litre of PCM, with aluminium fin sheet. The PCM-CSS process has two parts consist in charging and discharging process.

Then, experiment the PCM-CSS on charging process with five cases testing, compressor frequency on 90 70 60 50 and 40 Hz. Result showed that the 50 Hz is appropriate frequency for cool charging to PCM, with 3.09 of COP, 10.53 (Btu/hr.)/W of EER and 7.03% of  $\eta_{C,Charg}$ . The discharging process experimental with four cases testing, room temperature 30 and 35 °C and evaporator fan velocity 1.56 and 1.90 m/s. We founded that PCM discharging on the higher room temperature faster than the low room temperature approximately 5 to 6 minutes and the PCM discharging rate is 1,201.13 Btu/hr. with 71.58%  $\eta_{C,Discharg}$ .

Finally, comparison on energy consumption between using electricity power from PEA and PEA with PV, results showed PCM-CSS using electricity power from PEA without PV has energy consumption is 6.11 kWh (charging process on 8 hrs.). On the other hand, the use electricity power from PEA with PV reduced energy consumption for electricity decreased compared to the use electricity power from PEA only. This will save 81.57% of energy consumption for PCM-CSS charging and outdoor unit is the most energy consumption user approximately 55%.



## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา.....	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
สารเปลี่ยนสถานะ.....	7
การกักเก็บความร้อนแฝง.....	12
การถ่ายเทความร้อน.....	14
ระบบกักเก็บความเย็น.....	26
ภาระการทำความเย็น.....	35
แผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	48
แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บ ความเย็น.....	50
การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็น....	59
การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น.....	61
การบันทึกผลการวิจัย.....	66
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น.....	71
อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย.....	73



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	78
ผลการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็น ด้วยสารเปลี่ยนสถานะ.....	78
ผลการดำเนินการสร้างระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ.....	83
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยน สถานะโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.....	95
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยน สถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	110
5 บทสรุป.....	121
สรุปผลการวิจัย.....	121
ข้อเสนอแนะ.....	122
บรรณานุกรม.....	123
ภาคผนวก.....	131
ประวัติผู้วิจัย.....	168

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงคุณสมบัติสำคัญของสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการออกแบบระบบกักเก็บ ....	11
2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างสารกักเก็บความร้อนในรูปแบบความร้อน สัมผัสและความร้อนแฝง.....	13
3 แสดงช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	25
4 แสดงภาพรวมข้อดีและข้อเสียของสารเปลี่ยนสถานะ .....	50
5 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของสารเปลี่ยนสถานะ .....	51
6 แสดงลักษณะความแตกต่างของครีบบรรบายความร้อนที่ใช้ในสารเปลี่ยนสถานะ สำหรับกักเก็บความเย็น.....	53
7 แสดงสมบัติเบื้องต้นของสารเปลี่ยนสถานะที่นำมาใช้ในระบบกักเก็บความเย็น.....	79
8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุทั้ง 5 ชนิด.....	82
9 แสดงการเปรียบเทียบการเลือกใช้ความยาวและจำนวนท่อของชุดกักเก็บความเย็น	84
10 แสดงรายละเอียดของ Compressor ที่ใช้ในระบบกักเก็บความเย็น.....	89
11 แสดงอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะในช่วงการกักเก็บความเย็นในแต่ละกรณีทดสอบ	99
12 แสดงอุณหภูมิ Compressor ในช่วงการกักเก็บความเย็นในแต่ละกรณีทดสอบ.....	100
13 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบ.....	101
14 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ.....	102
15 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้า และออกจาก Evaporator....	107
16 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคายความเย็นของระบบ.....	109
17 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาวะ การทำความเย็นของอาคาร.....	111
18 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบคอนกรีต มวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคาร ในช่วงเวลากลางวัน....	112
19 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบคอนกรีต มวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคาร ในช่วงเวลากลางคืน...	113
20 แสดงภาวะการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	114

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

- 21 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... 116



## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 แสดงแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (ซ้าย) ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด(ขวา) ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี.....	1
2 แสดงลักษณะการวางชุด Evaporator แบบ 2 ชั้น.....	4
3 แสดงลักษณะการวางอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น.....	4
4 แสดงอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	5
5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะวัสดุ.....	9
6 แสดงประเภทของสารเปลี่ยนสถานะ.....	10
7 แสดงการนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น.....	17
8 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอก.....	19
9 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอกหลายชั้น.....	20
10 แสดงการนำความร้อนของเปลือกทรงกลม.....	21
11 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน.....	22
12 แสดงประมาณค่าการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	23
13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของสารชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ.....	23
14 แสดงกลยุทธ์การทำงานของระบบกักเก็บความเย็น.....	27
15 แสดงระบบกักเก็บน้ำเย็น.....	29
16 แสดง Typical Stratification Temperature Profile.....	30
17 แสดงถังเก็บน้ำแข็งระบบน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก.....	31
18 แสดงระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก.....	31
19 แสดงถังเก็บน้ำแข็งของระบบน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน.....	32
20 แสดงระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน.....	33
21 แสดง Stacked Eutectic Salt Storage Containers.....	34
22 แสดงระบบ Eutectic salt แบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อนและหลัง.....	34
23 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว.....	37
24 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	37
25 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ.....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
26 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	49
27 แสดงรูปแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะที่วางขายตามท้องตลาด.....	52
28 แสดงลักษณะการเดินท่อสารทำความเย็นของชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง.....	54
29 แสดงลักษณะโครงสร้างชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง.....	55
30 แสดงระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดย Ansuini et al.....	55
31 แสดงระบบกักเก็บความเย็นในท่อสี่เหลี่ยมที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะ โดย Rouault et al.....	56
32 แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบนแผ่นตามยาวภายในท่อ.....	57
33 แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบนวงแหวนภายในท่อ.....	57
34 แสดงระบบระบายอากาศแบบอิสระ โดย Stritih และ Butala (ซ้าย) การติดตั้งการทดลอง (ขวา) ชุดกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะแบบมี fin.....	58
35 แสดงรูปแบบและผลการทดสอบการไหลของระบบ โดย Osterman et al.....	59
36 แสดงขนาดของชุดคอยล์เย็นสำหรับระบบกักเก็บความเย็น.....	60
37 แสดงการทำงานของระบบในช่วง Charging process.....	61
38 แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process .....	62
39 แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process .....	62
40 แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process.....	63

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
41	แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ในช่วง Discharging Process .....	64
42	แสดงก่อนและหลังการปรับปรุงอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	64
43	แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	65
44	แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	65
45	แสดงขนาดและการวางแท่นคอนกรีตมวลเบาสำหรับวางชุด Indoor Unit ใน อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านหน้าและด้านข้าง.....	66
46	แสดงการวางชุด Indoor Unit บนแท่นคอนกรีตมวลเบาในอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านหน้าและด้านข้าง.....	66
47	แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บ ความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Charging Process .....	67
48	แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บ ความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Discharging Process .....	68
49	แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบภาระการทำความเย็นของ อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านบนและด้านหน้า ตามลำดับ....	70
50	แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บ ความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา.....	71
51	แสดงสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดเค.....	74
52	แสดงเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger).....	74
53	แสดงไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer).....	75
54	แสดงหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer).....	75
55	แสดงเครื่องวัดค่าความเร็วลมแบบใบพัด (Windmill Anemometer).....	76
56	แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม (Humidity Logger).....	76
57	แสดงดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter).....	77

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
58	แสดงชุด Evaporator แบบท่อ 2 ชั้น.....	80
59	แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการกักความร้อนระหว่างสารเปลี่ยนสถานะกับวัสดุ ทั้ง 6 ประเภท.....	80
60	แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเปลี่ยนสถานะและสารเคลือบผิวทองแดง.....	81
61	แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเปลี่ยนสถานะและสารเคลือบผิวเหล็ก.....	81
62	แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบแบบแผ่น.....	82
63	แสดงลักษณะจริงของซูเปอร์ไลน์สำหรับปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะ.....	83
64	แสดงขนาดของซูเปอร์ไลน์สำหรับปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะ.....	84
65	แสดงลักษณะของท่อ 2 ชั้น ในชุด Evaporator .....	84
66	แสดงการปิดท่อทองแดงแบบ 2 ชั้น โดยการให้ซูเปอร์ไลน์และเชื่อมปิดด้วย ทองแดง.....	85
67	แสดงลักษณะของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น.....	86
68	แสดงขนาดและระยะห่างช่องใส่ท่อของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น.....	86
69	แสดงลักษณะการวางอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น สำหรับชุดคอยล์เย็น ที่ระยะห่าง 10 finned inch.....	87
70	แสดงลักษณะการใส่ท่อ 2 ชั้นกับอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น.....	87
71	แสดงชุดมอเตอร์พัดลมแบบ AC230V ขนาด 0.10 กิโลวัตต์ ที่ใช้สำหรับ Indoor Unit.....	87
72	แสดงการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมไว้ด้านหน้า Indoor Unit .....	88
73	แสดงการติดตั้งฟิลเตอร์กรองอากาศสำหรับ Indoor Unit .....	88
74	แสดงลักษณะของ Accumulator ที่ใช้ในระบบกักเก็บความเย็น.....	89
75	แสดง Compressor แบบ twin rotary ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สารทำความเย็น R410A.....	89
76	แสดง Condenser และ Compressor.....	90
77	แสดงชุดมอเตอร์พัดลมแบบ DC310V ขนาด 30 วัตต์ ที่ใช้สำหรับชุดคอยล์ร้อน..	90
78	แสดง Outdoor Unit สำหรับระบบกักเก็บความเย็น.....	90

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
79 แสดงส่วนประกอบของชุดกล่องควบคุมสำหรับระบบกักเก็บความเย็น.....	92
80 แสดงการทำงานของชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บความเย็น.....	92
81 แสดงการทำงานของระบบในช่วง Charging Process.....	94
82 แสดงการทำงานของระบบในช่วง Discharging Process.....	94
83 แสดงการไหลเวียนของอากาศเมื่อทำการเปิดมอเตอร์พัดลม.....	95
84 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 90 เฮิรตซ์.....	96
85 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 80 เฮิรตซ์.....	96
86 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 60 เฮิรตซ์.....	97
87 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 50 เฮิรตซ์.....	97
88 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 40 เฮิรตซ์.....	98
89 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที.....	103
90 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที.....	104
91 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที.....	104



## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
92 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที.....	105
93 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะจากการทดสอบประสิทธิภาพของ ระบบในช่วง Discharging Process.....	106
94 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาวะ การทำความเย็นของอาคาร (7 พ.ย. 2562, 12 พ.ย. 2562 และ 16 พ.ย. 2562).....	110
95 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมันนิ่ง ประตู่ ภายนอก - ภายใน และหลังคา อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ในช่วงเวลากลางวัน.....	112
96 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิมันนิ่ง ประตู่ ภายนอก - ภายใน และหลังคา อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ในช่วงเวลากลางคืน.....	113
97 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา.....	114
98 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคาร ทดสอบ ของการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งในอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ช่วง 9.00 – 17.00 น. (18 ธ.ค. 2562, 19 ธ.ค. 2562 และ 20 ธ.ค. 2562).....	116
99 แสดงลักษณะกักเก็บความร้อนของระบบในช่วง Charging Process ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ตั้งแต่ 9.00 – 17.00 น.....	117
100 แสดงลักษณะการคายความร้อน ของระบบในช่วง Discharging Process ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ตั้งแต่ 17.00 – 00.00 น.....	118
101 แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บความร้อนระหว่าง การใช้และไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	119

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ

หน้า

102	แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของส่วนประกอบในระบบกักเก็บ ความเย็น.....	119
-----	--	-----



## อักษรย่อ

$T_{Ri, CM}$	=	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, CM}$	=	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ri, EV}$	=	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, EV}$	=	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM, avg}$	=	อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะเฉลี่ย ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	=	อุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_A$	=	อุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, EV}$	=	อุณหภูมิอากาศภายใน Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, In, EV}$	=	อุณหภูมิอากาศขาเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, Out, EV}$	=	อุณหภูมิอากาศขาออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{F, CN}$	=	อุณหภูมิมิถมาจากพัดลม Condenser ( $^{\circ}C$ )
$T_{CM}$	=	อุณหภูมิของ Compressor ( $^{\circ}C$ )
$G_T$	=	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$V_{A, EV}$	=	ค่าความเร็วลมของอากาศขาออก Evaporator (m/s)
$\dot{Q}_{comp}$	=	อัตราการทำความเย็นของ Compressor (W)
$\dot{Q}_{pcm}$	=	อัตราการกักเก็บความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ (W)
$\dot{Q}_R$	=	อัตราการถ่ายเทพลังงานของสารทำความเย็น (W)
$\dot{Q}_{cs, discharg}$	=	อัตราการคายความร้อนของ PCM-CSS (W)
$Q$	=	ขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิ (Btu/hr.)
$W$	=	กำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็น (W)
$\dot{m}_a$	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
$h_{ao}$	=	ค่าเอนทาลปีของอากาศขาออกจาก condenser (kJ/kg)
$h_{ai}$	=	ค่าเอนทาลปีของอากาศขาเข้า condenser (kJ/kg)
$h_{Ro}$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็นขาออกจากชุด evaporator (kJ/kg)
$h_{Ri}$	=	ค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็นขาเข้าสู่ชุด evaporator (kJ/kg)
$\Delta h_{Ro}$	=	ผลต่างค่าเอนทาลปีด้านทำความเย็น (kJ/kg)
$\Delta h_{Ri}$	=	ผลต่างค่าเอนทาลปีด้าน Compressor (kJ/kg)

### อักษรย่อ (ต่อ)

$\eta_{C,Charg}$  = ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงการกักเก็บความเย็นของระบบ (%)

$\eta_{C,Discharg}$  = ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงการคายความเย็นของระบบ (%)

COP = สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (W/W)

EER = อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Btu/hr.)/W

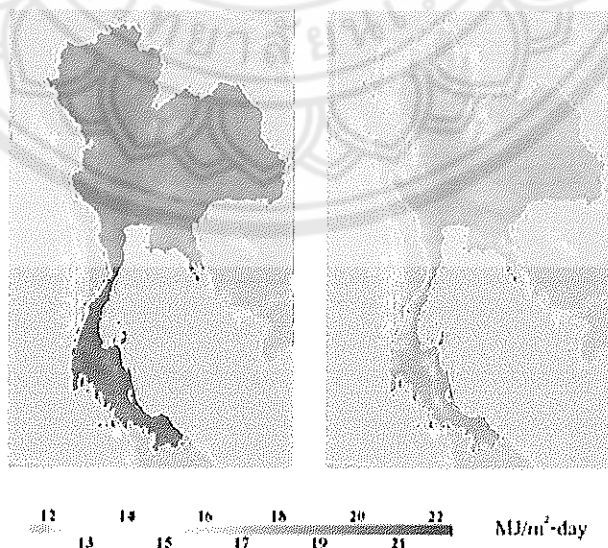


# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้มีสภาพภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น สภาพอากาศโดยทั่วไปจึงร้อนอบอ้าวเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งจะร้อนที่สุดในช่วงกลางเดือนเมษายน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2560) ดังภาพ 1 และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นตลอดช่วงหลายปีที่ผ่านมา จากสถานการณ์การใช้ไฟฟ้า ในช่วง 9 เดือนแรกของปี 2562 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562) พบว่าค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดในระบบ 3 การไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 32,273 เมกะวัตต์ เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.7 และการใช้ไฟฟ้าของประเทศอยู่ที่ 15,648 จิกะวัตต์ ชั่วโมง ลดลงร้อยละ 0.9 เนื่องจากการใช้ไฟฟ้าที่ลดลงของภาคอุตสาหกรรม ในขณะที่ภาคธุรกิจ และครัวเรือนมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.7 และ 3.7 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าภาคครัวเรือนเป็นภาคที่มีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากที่สุด เนื่องจากประชาชนส่วนใหญ่เปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อปรับสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Khedari, J., 2000, pp. 245-249) ส่งผลให้ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น



ภาพ 1 แสดงแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (ซ้าย) ความเข้มรังสีอาทิตย์สูงสุด (ขวา) ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดปี

ตามกรอบการกำหนดสัดส่วนเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP2018) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) ที่ระบุว่าให้มีสัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทนอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 20 ภายในปี 2580 สำนักคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (กกพ.) จึงได้มีประกาศจัดหาไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ (PV Solar Rooftop) สำหรับภาคประชาชน พ.ศ.2562 (สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน, 2562) ตามมติคณะกรรมการบริหารนโยบายพลังงาน (กพข.) โดยในปี 2562 มีเป้าหมายในการจัดหาไฟฟ้าจากผู้ผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา สำหรับภาคประชาชนประเภทบ้านอยู่อาศัย จำนวน 100 เมกะวัตต์สูงสุด (MWp) โดยเน้นให้ผลิตไฟฟ้าใช้เอง (Self-Consumption) เพื่อลดค่ากระแสไฟฟ้า และส่วนที่เหลือสามารถขายคืนให้กับ การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (Provincial Electricity Authority: PEA) ได้ ในอัตราซื้อไฟฟ้า 1.68 บาท/หน่วย เป็นระยะเวลา 10 ปี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) ซึ่งในช่วงระยะเวลากลางคืน ผู้ใช้งานยังต้องมีการซื้อพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในอัตราซื้อไฟฟ้าประมาณ 4 บาท/หน่วย (การไฟฟ้านครหลวง, 2561)

ปัจจุบันระบบกักเก็บพลังงาน ถือว่าเป็นทางเลือกใหม่ที่ถือว่าเป็นตัวช่วยในการลดค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด เพราะเป็นการนำพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าต่ำ มาผลิตพลังงานกักเก็บเอาไว้ในรูปแบบของพลังงานความเย็น แล้วนำพลังงานความเย็นนี้ออกมาใช้ในช่วงเวลาที่มีอัตราค่าไฟฟ้าสูงกว่า (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) โดยระบบกักเก็บพลังงานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ประเภท (จักรพันธ์ ภวังคะรัตน์, 2551) คือ เก็บพลังงานด้วยน้ำเย็น (Chilled water storage system) เก็บพลังงานด้วยน้ำแข็ง (Ice thermal storage) และเก็บพลังงานด้วยน้ำเกลือ หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวได้ (Salt storage หรือ Phase Change Materials: PCM)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบ ระบบกักเก็บพลังงานด้วยวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM) โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาเพื่อการปรับอากาศในประเทศไทย ด้วยคุณสมบัติทางเคมีของสารเปลี่ยนสถานะ ที่ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนในวัสดุโครงสร้างไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษ ไม่ระเบิด และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมากเมื่อเปลี่ยนสถานะ (Simen Edsjø Kalnæsa, 2015, pp. 150 - 176) ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาในส่วนของสมบัติทางกายภาพของสารเปลี่ยนสถานะ ร่วมกับระบบกักเก็บความเย็น โดยมีความคาดหวังว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปต่อยอด และพัฒนาประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น ให้สามารถนำไป

ใช้งานร่วมกับระบบการใช้และผลิตพลังงานด้านอื่น ซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนเทคโนโลยีที่ใช้อยู่ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

#### จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เคมี และหลักการการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับระบบกักเก็บความเย็น
2. เพื่อออกแบบระบบกักเก็บความเย็นที่ทำงานร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาเพื่อการปรับอากาศ
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการนำพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทำความเย็นเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บพลังงานกับการนำไปเก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ แล้วนำพลังงานไปใช้สำหรับการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน

#### ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร โดยมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ ให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปปฏิบัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขอบเขตการดำเนินงานดังนี้

##### 1. สารเปลี่ยนสถานะ

1.1 สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นประเภทพาราฟิน

1.2 การใช้สารเปลี่ยนสถานะในการดูดซับความร้อนและกักเก็บความเย็นใน

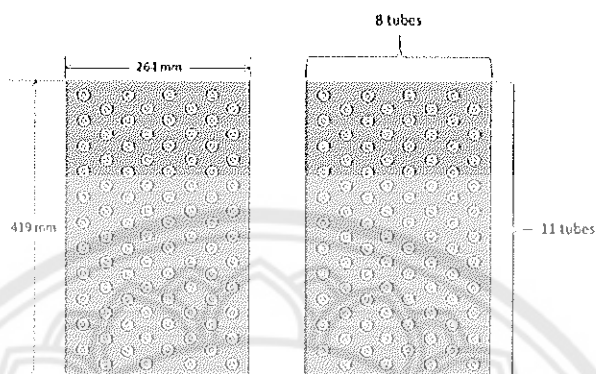
โครงสร้างอาคาร บรรจุในวัสดุที่ไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร

##### 2. โครงสร้างระบบ

ระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ มีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Indoor Unit, Outdoor Unit และ ชุดกล่องควบคุม โดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.1 Indoor unit หรือ ชุดคอยล์เย็น ซึ่งในระบบปรับอากาศทั่วไปจะทำหน้าที่ดูดซับความร้อนภายในห้อง และประกอบไปด้วย แผงคอยล์เย็น (Evaporator) และชุดมอเตอร์พัดลม แต่สำหรับระบบกักเก็บความเย็น ชุด Evaporator จะมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น โดยท่อชั้นใน เป็นท่อสารทำความเย็น (R410A) ยาวต่อเชื่อมกันทุกท่อ และท่อชั้นนอก เป็นท่อเดี่ยวไม่ได้เชื่อมต่อกันสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ (Paraffin) ที่มีความยาว 550 มิลลิเมตร ซึ่งชุด Evaporator แบบท่อ 2 ชั้น จะมีทั้งหมด 88 ท่อ เรียงเป็น 8 คอลัมน์ และ 11 แถว โดยระยะห่างของท่อจะขึ้นอยู่กับระยะห่าง

ของช่องใส่ท่อของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น ที่มีขนาดความหนา 0.15 มิลลิเมตร กว้าง 264 มิลลิเมตร และสูง 419 มิลลิเมตร ดังภาพ 2 และ 3



ภาพ 2 แสดงลักษณะการวางชุด Evaporator แบบ 2 ชั้น



ภาพ 3 แสดงลักษณะการวางอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น

2.2 Outdoor Unit หรือ ชุดคอยล์ร้อน เหมือนกับระบบปรับอากาศทั่วไปที่ทำหน้าที่ระบายความร้อน ซึ่งภายในเครื่องประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ (Compressor) แผงคอยล์ร้อน (Condenser) และชุดมอเตอร์พัดลม โดย Compressor ที่ใช้เป็นแบบ twin rotary ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สารทำความเย็น R410A

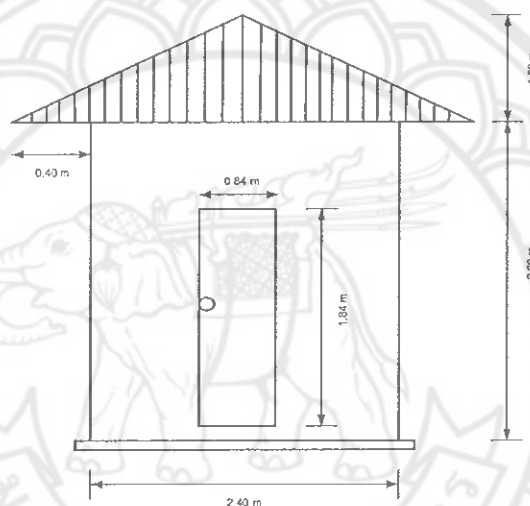
2.3 ชุดกล่องควบคุม จะทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานไฟฟ้าทั้งจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) และจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) โดยภายในกล่องควบคุมจะประกอบไปด้วย ชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ (Driver Inverter) มิเตอร์วัดไฟ และเบรกเกอร์ ซึ่งตัวชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ จะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือ



ไฟฟ้าทั่วไป และพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส

### 3. โครงสร้างอาคารทดสอบ

อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาขนาด 2.4 เมตร x 2.4 เมตร x 2.3 เมตร หลังคาปูกระเบื้องซีแพ็คสีเทา ทำมุมเอียง 30 องศา บุด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยด์สะท้อนความร้อนฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดมีความหนา 1 เซนติเมตร หลังคาบ้านสูง 1.0 เมตร ชายคาบ้าน 0.4 เมตร และมีประตูบานขนาด 1.84 เมตร x 0.84 เมตร ดังภาพ 4



ภาพ 4 แสดงอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

4. การทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้แก่

4.1 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Charging Process แบ่งออกเป็น 5 กรณี ได้แก่

กรณีที่ 1 ความถี่ของ Compressor 90 เฮิรตซ์

กรณีที่ 2 ความถี่ของ Compressor 70 เฮิรตซ์

กรณีที่ 3 ความถี่ของ Compressor 60 เฮิรตซ์

กรณีที่ 4 ความถี่ของ Compressor 50 เฮิรตซ์

กรณีที่ 5 ความถี่ของ Compressor 40 เฮิรตซ์

4.2 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Discharging Process เพื่อดูความเร็วลมที่เหมาะสมสำหรับการดึงความเย็นที่สะสมไว้มาใช้งาน โดยจะเลือกกรณีที่เหมาะสมที่สุด 1 กรณี จาก 5 กรณีในข้อที่ 4.1 นำมาทดสอบเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของพัดลม 1.90 และ 1.56 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 และ 35 องศาเซลเซียส ทั้งหมด 4 กรณี

5. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา โดยเปรียบเทียบระหว่างการให้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว (non-PV) กับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (with PV)

#### นิยามศัพท์เฉพาะ

- |                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. Phase Change Materials (PCM) | คือ สารเปลี่ยนสถานะ          |
| 2. Cooling Storage System (CSS) | คือ ระบบกักเก็บความเย็น      |
| 3. Lightweight Concrete         | คือ คอนกรีตมวลเบา            |
| 4. Photovoltaic (PV)            | คือ แผงเซลล์แสงอาทิตย์       |
| 5. Peak                         | คือ ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด   |
| 6. Charging Process             | คือ กระบวนการกักเก็บความเย็น |
| 7. Discharging Process          | คือ กระบวนการคายความเย็น     |

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาพร้อมกับสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร โดยมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ ให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ที่จะสร้างระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะจึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ดังนี้

#### สารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials : PCM) คือ สารประกอบทางเคมีหรือวัสดุที่มีการนำพลังงานมาใช้ในการเปลี่ยนสถานะ โดยพลังงานที่กล่าวถึงก็คือพลังงานความร้อน ซึ่งสารเปลี่ยนสถานะสามารถดูดสะสมพลังงานความร้อนได้ในปริมาณมาก ปริมาณความร้อนที่มีการดูดสะสมเข้ามาเรียกว่า "ค่าความร้อนแฝง" คือ ปริมาณความร้อนที่ดูดสะสมเข้ามาจนถึงจุดที่สามารถเปลี่ยนสถานะได้โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและค่าความร้อนแฝงของแต่ละชนิด ในการเปลี่ยนสถานะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของแต่ละชนิด มักจะมีการนำไปใช้งานอุตสาหกรรม โดยรายละเอียดอื่น ๆ จะถูกอธิบายในหัวข้อต่อไป (Simen Edsjø Kalnæsa, 2015, pp. 150 - 176)

#### 1. ทฤษฎีและกลไกการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ

การเปลี่ยนสถานะของสารได้มีการแบ่งเป็น ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งเป็นการแบ่งตามลักษณะทางกายภาพ โดยในสารเปลี่ยนสถานะ จะมีการเปลี่ยนสถานะใน 2 ประเภทคือ การเปลี่ยนสถานะในรูปของของแข็ง และการเปลี่ยนสถานะในรูปของของเหลว ซึ่งเป็นความแตกต่างกับสารชนิดอื่น ๆ โดยการเปลี่ยนสถานะนั้น ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนทั้งภายในและภายนอก โดยแบ่งระบบเป็น 2 รูปแบบดังนี้ (จิโรจ ไซยสาร, 2556)

1.1 การเปลี่ยนแปลงประเภทคายความร้อน คือ การเปลี่ยนแปลงที่ระบบคายพลังงานให้แก่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม จึงถ่ายเทพลังงานจากระบบไปสู่สิ่งแวดล้อม เช่น การละลายของโซดาไฟในน้ำ อุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น จึงถ่ายเท

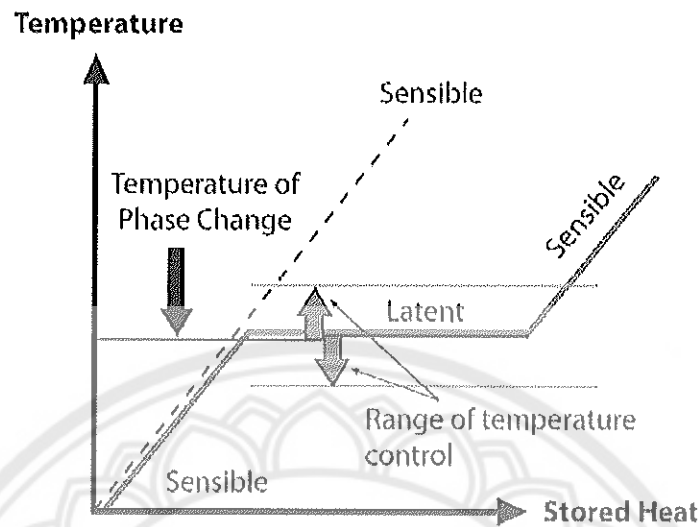
พลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม เพื่อให้อุณหภูมิของระบบลดลงจนอุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

1.2 การเปลี่ยนแปลงประเภทอุณหภูมิ คือ การเปลี่ยนแปลงที่ระบบดูดพลังงานจากสิ่งแวดล้อม เนื่องจากระบบมีอุณหภูมิต่ำกว่าสิ่งแวดล้อม ระบบจะปรับตัวโดยดูดพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่ระบบ เพื่อให้อุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เช่น การละลายของเกลือแกงในน้ำ อุณหภูมิของสารละลายต่ำลง จึงดูดพลังงานเข้าสู่ระบบ เพื่อให้อุณหภูมิของระบบสูงขึ้นจนอุณหภูมิของระบบเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

## 2. การเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะต่าง ๆ มักจะอยู่ในสถานะของแข็ง เป็นส่วนมาก และการเปลี่ยนสถานะจะขึ้นอยู่กับการเลือกของสาร สารแต่ละชนิดจะมีจุดหลอมเหลวต่างกัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสาร การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารเปลี่ยนสถานะนั้นจะมีความแตกต่างจากสารอื่น ๆ เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนสถานะในช่วงของอุณหภูมิเฉพาะของแต่ละชนิดเรียกว่า "อุณหภูมิของการหลอมเหลวหรืออุณหภูมิของการเริ่มเปลี่ยนสถานะของสาร" โดยการเปลี่ยนสถานะของแต่ละชนิดก็จะมีค่าไม่เท่ากัน การดูดสะสมปริมาณความร้อนเพื่อที่จะเปลี่ยนสถานะก็ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับการเลือกไปใช้ในความต้องการแตกต่างกัน แต่กระบวนการของการเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะ นั้นก็เหมือนกับการเปลี่ยนสถานะของสารอื่น ๆ (M.M. Farid, 2004, pp. 1597 - 1615)

ช่วงการแข็งตัวของวัสดุ จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 การเย็นตัวลงจากของเหลวจะค่อย ๆ คายความร้อนจากอุณหภูมิสูงสุด ลดลงไปถึงอุณหภูมิหลอมเหลว ส่วนช่วงที่ 2 การเปลี่ยนสถานะของวัสดุจากของเหลวไปเป็นของแข็งซึ่งอุณหภูมิจะคงที่ตลอดช่วง และช่วงที่ 3 การเย็นตัวลงจากของแข็งจะค่อย ๆ คายความร้อน จนกว่าอุณหภูมิของวัสดุจะเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ดังภาพ 5



ภาพ 5 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะของวัสดุ

### 3. ทฤษฎีการกักเก็บความร้อน

เมื่อวัสดุได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Energy) แล้วกักเก็บพลังงานความร้อนไว้ในรูปของความร้อนแฝง (Latent Heat) แต่เมื่ออุณหภูมิภายนอกวัสดุหรืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป วัสดุจะค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางความร้อน เมื่อวัสดุได้รับความร้อน วัสดุนั้นจะค่อย ๆ ดูดหรือกักเก็บพลังงานความร้อนนั้นไว้โดยสารเปลี่ยนสถานะ จากนั้นเมื่ออุณหภูมิภายนอกลดลง วัสดุจะค่อย ๆ คายความร้อนหรือพลังงานออกมาจนกระทั่งเข้าสู่สมดุลกับสภาพแวดล้อม (อุณหภูมิของวัสดุเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม) และมีการเปลี่ยนแปลงตามสมการดังต่อไปนี้

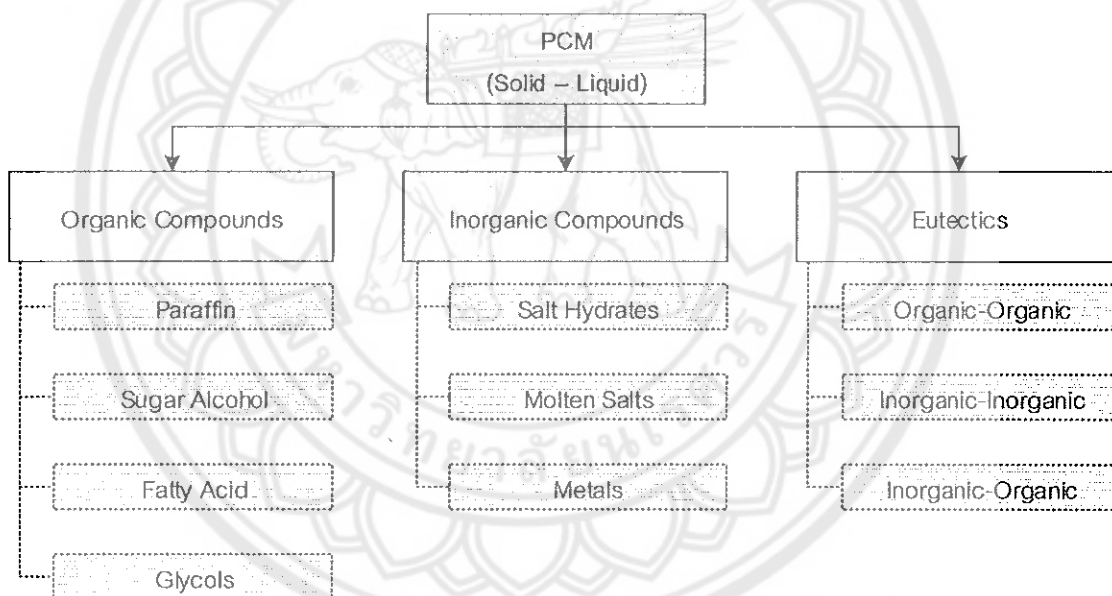
$$Q_{LHS} = \int_{T_i}^{T_m} m C_{pi} dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_{ps} dT \quad (1)$$

เมื่อ	$Q_{LHS}$	คือ	ปริมาณความร้อนแฝงที่วัสดุถ่ายเท (J)
	$\Delta h_m$	คือ	ความร้อนหลอมเหลว (kJ/kg)
	$m$	คือ	มวลของวัสดุ (kg)
	$a_m$	คือ	สัดส่วนของสารเปลี่ยนสถานะที่หลอมเหลว (-)
	$C_{pi}$	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยระหว่าง $T_m$ และ $T_i$ (kJ/kg °C)

$C_{ps}$	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ยระหว่าง $T_i$ และ $T_m$ (kJ/kg °C)
$T_m$	คือ	อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะขณะหลอมเหลว (°C)
$T_i$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)
$T_f$	คือ	อุณหภูมิสุดท้าย (°C)

#### 4. ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic) สารอนินทรีย์ (Inorganic) และสารยูเทกติก (Eutectics) หรือสารหลายองค์ประกอบ (H. Mehlhng, 2004) ดังภาพ 6



ภาพ 6 แสดงประเภทของสารเปลี่ยนสถานะ

ปัจจัยหลักที่ควรศึกษาสำหรับการนำไปใช้งาน (Parfait Tatsidjoudoung, 2013, pp. 327 - 349) คือช่วงอุณหภูมิการหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะเพื่อความเหมาะสมและใช้งานได้ถูกต้องกับลักษณะของงานที่ต้องการใช้ ชนิดที่มีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่

4.1 พาราฟิน (Paraffin) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตรโมเลกุล  $C_nH_{2n+2}$  เช่น n - Triacontane n - Octadecane และ Paraffin wax เป็นต้น โดยพาราฟินที่มี  $C_5 - C_{15}$  จะมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิต่ำ หากจำนวนโมเลกุลคาร์บอนมากกว่า 15 จะมีเฟสเป็นของแข็ง

(Wax) ซึ่งพาราฟินมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม

4.2 เกลือไฮเดรต (Salt Hydrate) เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่ได้นำมาศึกษาทดลองเพื่อใช้ในงานด้านการกักเก็บความร้อน จะประกอบไปด้วยโมเลกุลของเกลือกับน้ำในโครงสร้างผลึก เช่น  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$   $\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  และ  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เป็นต้น มีช่องของจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน และมีค่าการนำความร้อนสูงเมื่อเทียบกับสารเปลี่ยนสถานะชนิดอื่น ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยให้การกระจายตัวหรือการถ่ายเทความร้อนในระบบให้ดีขึ้น มีค่าความร้อนของการหลอมเหลวสูงซึ่งทำให้มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะในปริมาณที่น้อยลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งทำให้ง่ายต่อการออกแบบวัสดุจัดเก็บในระบบ แต่ในขณะเดียวกันโครงสร้างผลึกที่ประกอบไปด้วยเกลือและน้ำในโมเลกุล ทำให้เกิดความไม่เสถียรทางเคมี จะทำให้สมรรถนะลดลงเมื่อได้รับความร้อน เนื่องจากการสูญเสียน้ำออกจากโมเลกุล

4.3 ยูเทกติก (Eutectics) เป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ ๆ ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น  $\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$   $\text{NH}_4\text{Cl}$   $\text{Na}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{NaCl} \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  เป็นต้น โดยกระบวนการสังเคราะห์วัสดุชนิดนี้ทำได้โดยการนำเอาสารหลายองค์ประกอบมาผสมกันแล้วทำการตกผลึกร่วมกัน สารประกอบยูเทกติกเมื่อมีการนำมาใช้งานโดยการหลอมเหลวแล้วทำให้แข็งตัววัสดุองค์ประกอบก็ไม่แยกจากกัน เนื่องจากผลึกนั้นมีการเกาะกันอย่างเหนียวแน่นซึ่งยากที่จะแยกออกจากกันได้ นอกจากการประยุกต์ใช้สารประกอบยูเทกติกในเรื่องการกักเก็บความร้อนแล้ว เราก็สามารถอาศัยคุณสมบัติเดียวกันนี้ในการกักเก็บความเย็นด้วย เช่น ใช้ในรถยนต์อาหารสด ไอศกรีม หรือวัคซีน เป็นต้น

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติสำคัญของสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการออกแบบระบบกักเก็บ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ทางความร้อน	อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่เหมาะสม ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง ค่าความร้อนจำเพาะสูง ค่าการนำความร้อนสูง
ทางกายภาพ	ค่าความดันไอต่ำ (น้อยกว่า 1 bar) ความหนาแน่นสูง เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อย

## ตาราง 1 (ต่อ)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ทางเคมี	เข้ากันได้กับภาชนะบรรจุ มีความเสถียรภาพทางเคมีสูง มีความไวไฟต่ำ ไม่เป็นพิษ และไม่ระเบิด
ทางพลังงาน	อัตราการตกผลึกสูง อัตราการเกิดนิวเคลียสสูงเพื่อหลีกเลี่ยงการเย็นเกิน
ทางเศรษฐศาสตร์	มีความคุ้มค่า มีปริมาณเพียงพอต่อการใช้งาน หาง่าย

ที่มา: Rami Zeinelabdein, 2018

### การกักเก็บความร้อนแฝง

การกักเก็บความร้อนแฝงขึ้นอยู่กับความร้อนที่ถูกดูดซับหรือปล่อยออกมา ขณะที่วัสดุมีการเปลี่ยนสถานะจากสถานะทางกายภาพหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งการเปลี่ยนสถานะสามารถเกิดขึ้นได้ในรูปแบบ ของแข็ง - ของแข็ง, ของแข็ง - ของเหลว, ของแข็ง - ก๊าซ, ของเหลว - ก๊าซ (Zakir Khan, 2016, pp. 132 - 158) การเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของแข็ง ความร้อนที่ถูกกักเก็บไว้ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนรูปแบบผลึกจากแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง จากการศึกษางานวิจัยของ Parfait Tatsidjodoung (2013, pp. 327 - 349) เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างผลึกเท่านั้น จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของเหลว โดยการเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของแข็ง มีข้อจำกัดในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ที่น้อยกว่าและมีความยืดหยุ่นในการออกแบบมากกว่า (Sharma A, 2009, pp. 18 - 45) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาพบว่ามีสารเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของแข็ง ค่อนข้างน้อยที่มีคุณสมบัติการหลอมเหลวและคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะเหมาะสมสำหรับการใช้งานในอาคาร โดยสารเปลี่ยนสถานะที่มีแนวโน้มเหมาะสมที่สุดในขณะนั้นคือ สารเปลี่ยนสถานะประเภท Penta-glycerine ที่มีคุณสมบัติหลอมละลาย 81 องศาเซลเซียส และความร้อนแฝง 263 MJ / m<sup>3</sup> (Pillai KK, 1976, pp. 205 - 216)



การเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ก๊าซ และ ของเหลว - ก๊าซ เป็นรูปแบบที่มีค่าความร้อนแฝงสูงแต่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรสูงเช่นเดียวกัน ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของบรรจุภัณฑ์หรือภาชนะสำหรับสร้างเป็นระบบกักเก็บความร้อน สารเปลี่ยนสถานะแบบ ของแข็ง - ก๊าซ และ ของเหลว - ก๊าซ จึงไม่มีความเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานสำหรับระบบกักเก็บ สารเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของเหลว เป็นผลกำไรที่ได้จากการพัฒนาหลายอย่างในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา แม้ว่าปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะจะน้อยกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่เป็น ของแข็ง - ก๊าซ และ ของเหลว - ก๊าซ ซึ่งสารเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง - ของเหลว สามารถกักเก็บและปล่อยปริมาณความร้อนที่ค่อนข้างสูง ในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างแคบ โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรที่สูงมาก การเปลี่ยนสถานะในรูปแบบ ของแข็ง - ของเหลว จึงเป็นที่นิยม และมีความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ (Garg HP, 1985)

การใช้งานระบบกักเก็บความร้อนแฝงสำหรับที่อยู่อาศัยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผันผวนของอุณหภูมิโดยเฉพาะความผันผวนเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้น ระบบกักเก็บความร้อนแฝงมีข้อดีมากกว่าระบบกักเก็บความร้อนสัมผัส เนื่องจากมีปริมาตรความหนาแน่นของความร้อนสูงและอุณหภูมิในการทำงานค่อนข้างคงที่สำหรับระบบกักเก็บด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และสามารถปรับเปลี่ยนขนาดหรือภาชนะบรรจุให้เหมาะสมกับโหลดความร้อนในการใช้งาน โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่สามารถกักเก็บไว้ในระบบระหว่างระบบกักเก็บความร้อนสัมผัสและระบบกักเก็บความร้อนแฝง ดังตารางที่ 2 พบว่าระบบกักเก็บความร้อนแฝงที่ใช้พาราฟิน จะใช้ปริมาตรน้อยกว่า 1.5 เท่า เมื่อเทียบกับระบบกักเก็บความร้อนสัมผัสที่ใช้น้ำเป็นตัวกักเก็บความร้อน

ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างการกักเก็บความร้อนในรูปแบบความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง

คุณสมบัติ	วัสดุที่กักเก็บความร้อน			
	การกักเก็บความร้อนสัมผัส		การกักเก็บความร้อนแฝง	
	หิน	น้ำ	พาราฟิน	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (kJ/kg)	-	-	174.4	266
ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)	0.9	4.18	-	-

ตาราง 2 (ต่อ)

คุณสมบัติ	วัสดุักเก็บความร้อน			
	การักเก็บความร้อนสัมผัส		การักเก็บความร้อนแฝง	
	หิน	น้ำ	พาราฟิน	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )				
ที่อุณหภูมิ 24 °C	2,240	1,000	1,802	795
ปริมาตรสำหรับักเก็บ				
ความร้อนที่ 1 GJ (m <sup>3</sup> )	9.9	4.8	3.2	4.7
ปริมาตรสัมพัทธ์	3.1	1.5	1.0	1.5

ที่มา: Hasnain SM, 1998

#### การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) เป็นปัจจัยสำคัญต่อขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ไม่ว่าเป็นการปรับอากาศ การเพิ่มหรือการลดอุณหภูมิในขบวนการผลิต ต่างจำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น ซึ่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้จะมาจากการใช้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นทุกวัน นอกจากนั้นยังมีมลพิษที่ปล่อยออกมาจากการใช้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ในการให้พลังงานอีกด้วย ดังนั้นถ้าสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงลงได้นอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังจะเป็นการลดมลพิษอีกด้วย จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาถึงเทคโนโลยีการถ่ายเทความร้อน เพื่อไปใช้ในการปรับปรุงอุปกรณ์ หรือขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน

ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการคงที่ และกระบวนการไม่คงที่ กระบวนการคงที่หมายถึง ในการถ่ายเทความร้อน การกระจายอุณหภูมิภายในตัววัตถุและปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ส่วนในกระบวนการไม่คงที่ ปริมาณเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามเวลา

#### 1. การนำความร้อน

การนำความร้อน หมายถึง กระบวนการที่ความร้อนถ่ายเทโดยอาศัยการเคลื่อนไหวของอะตอมหรือโมเลกุลในของแข็งไปตามลำดับ

##### 1.1 สมการพื้นฐานของการนำความร้อน

สมมติว่ามีพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งภายในตัววัตถุและให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หนึ่งหน่วยเวลา (ปริมาณนี้เรียกว่า ฟลักซ์ความร้อน มีหน่วยพื้นฐานเท่ากับ  $W/m^2$ ) เท่ากับ  $q$  โดย  $q$  จะแปรผันตามความชันของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้น กล่าวคือ ถ้าให้อุณหภูมิเท่ากับ  $T$  (K) ให้ระยะทางตามทิศทางการไหลของความร้อนเท่ากับ  $x$  (m) และให้ค่าคงที่ของการแปรผันเท่ากับ  $\lambda$  ( $W/m \cdot K$ ) แล้ว

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการความสัมพันธ์พื้นฐานของการนำความร้อน หรือ สมการของ Fourier โดยค่าคงที่ของการแปรผัน  $\lambda$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัว (สมบัติทางกายภาพ) ของวัตถุนิดหนึ่งๆ ค่า  $q$  เป็นฟลักซ์ความร้อนที่ชี้ไปตามทิศทางบวกของ  $x$  และเครื่องหมายลบทางด้านขวาของสมการ 1 แสดงว่า ความร้อนจะไหลไปในทิศทางที่มีอุณหภูมิต่ำลง ( $dT/dx < 0$ )

### 1.2 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่น

สมมติว่ามีวัสดุรูปแผ่นมีความหนาสม่ำเสมอ  $l$  ซึ่งมีอุณหภูมิผิวหน้าทั้งสองด้านเท่ากับ  $T_1$  และ  $T_2$  ในกรณีนี้เราจะสนใจเฉพาะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามทิศทางความหนาเท่านั้น หากภายในแผ่นวัสดุไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ฟลักซ์ความร้อน  $q$  จะมีคงที่ ณ ตำแหน่ง  $x$  ใด ๆ ภายในแผ่นวัสดุ ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ  $\lambda$  แล้ว จะสามารถอินทิเกรตสมการของ Fourier ได้อย่างง่ายดาย

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad dT = -\frac{q}{\lambda} dx, \quad T = -\frac{q}{\lambda} x + C$$

ในที่นี้ เมื่อ  $x = 0$  แล้ว  $T = T_1$  และเมื่อ  $x = l$  แล้ว  $T = T_2$  ดังนั้น เมื่อนำเงื่อนไขตั้งต้นไปแทนค่าเพื่อกำจัดค่าคงที่  $C$  แล้วจะได้

$$q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{l} \quad (2)$$

และปริมาณความร้อน  $Q$  (W) ที่ถ่ายเทผ่านพื้นที่หน้าตัด  $A$  จะเท่ากับ

$$Q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{l} A = \frac{(T_1 - T_2)}{\left(\frac{l}{\lambda A}\right)} \quad (3)$$

ถ้าเราคิดว่าในการนำความร้อนนั้น การที่ความร้อนถ่ายเทจะต้องมีแรงผลักดัน ซึ่งได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิแล้ว ด้านล่างของพจนานุกรมในสมการ 3 จะมีความหมาย คล้ายกับ "ความต้านทาน" ต่อการถ่ายเทความร้อน บางครั้งจึงเรียกว่า ความต้านทานการนำความร้อน

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการนำความร้อน} = \frac{\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ}}{\text{ความต้านทานการนำความร้อน}}$$

ดังนั้น หากให้ความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ  $R_c$  แล้ว

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_c}, \quad R_c = \frac{l}{\lambda A} \quad (4)$$

เมื่อพิจารณาการกระจายอุณหภูมิตามทิศทางความหนาของแผ่นวัสดุแล้ว อุณหภูมิ  $T$  ที่ระยะทาง  $x$  จะเท่ากับ

$$T(x) = -\frac{q}{\lambda}x + C$$

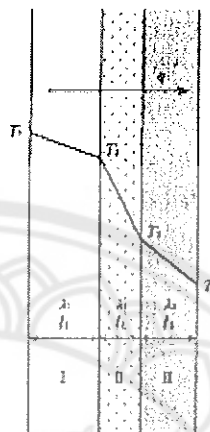
เมื่อแทนค่า  $q$  ด้วยสมการ 2 และแทนค่า  $C$  ด้วยค่าที่หาได้จากเงื่อนไขตั้งต้น แล้วจะได้

$$T(x) = T_1 - (T_1 - T_2) \frac{x}{l} \quad (5)$$

แสดงว่า อุณหภูมิภายในแผ่นวัสดุจะมีการกระจายเป็นเส้นตรงตามทิศทาง  $x$  จาก  $T_1$  ถึง  $T_2$

### 1.3 การนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น

จะพิจารณาการนำความร้อนของแผ่นวัสดุหลายชั้นซึ่งประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่างกันมาประกบกันแน่น ดังภาพ



ภาพ 7 แสดงการนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น

ในที่นี้จะถือว่าอุณหภูมิที่พื้นผิวของแต่ละชั้นมีการกระจายสม่ำเสมอ ไม่มีความร้อนไหลออกไปในทิศทางอื่นนอกเหนือจากตามความหนาของแผ่นวัสดุ และอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสของแผ่นวัสดุแต่ละชั้นเท่ากัน (ไม่มีความต้านทานการนำความร้อนที่ผิวสัมผัส) ดังนั้นฟลักซ์ความร้อน  $q$  ที่วิ่งผ่านแผ่นวัสดุ I, II และ III จึงมีค่าเท่ากัน จากสมการ 2

$$q = \lambda_1 \frac{(T_1 - T_2)}{l_1}, \quad q = \lambda_2 \frac{(T_2 - T_3)}{l_2}, \quad q = \lambda_3 \frac{(T_3 - T_4)}{l_3}$$

แปลงรูปความสัมพันธ์เหล่านี้ได้เป็น

$$(T_1 - T_2) = \frac{l_1}{\lambda_1} q, \quad (T_2 - T_3) = \frac{l_2}{\lambda_2} q, \quad (T_3 - T_4) = \frac{l_3}{\lambda_3} q$$

เมื่อบวกทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของสมการเหล่านี้เหล่าด้วยกัน

$$(T_1 - T_4) = \left( \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3} \right) q$$

ดังนั้น

$$q = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}\right)}, Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \frac{l_3}{\lambda_3}\right)}, A = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{l_1}{\lambda_{1A}} + \frac{l_2}{\lambda_{2A}} + \frac{l_3}{\lambda_{3A}}\right)} \quad (6)$$

โดยทั่วไป ถ้าจำนวนชั้นของแผ่นวัสดุเท่ากับ  $n$  ก็สามารถคำนวณได้จากสมการ  $n$  สมการเช่นเดียวกับข้างต้นและผลลัพธ์จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_i}\right)}, Q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_i}\right)}, A = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_{iA}}\right)} \quad (7)$$

ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท ( $Q$ ) และความต้านทานการนำความร้อน ( $R_C$ ) ในกรณีนี้จะเท่ากับ

$$Q = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{R_C}, R_C = \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_{iA}}\right) \quad (8)$$

กล่าวคือ ความต้านทานการนำความร้อนของวัสดุรูปแผ่นหลายชั้นจะเท่ากับผลบวกของความต้านทานการนำความร้อนของแผ่นวัสดุแต่ละชั้นนั่นเอง ดังนั้น เราจึงสามารถพิจารณาได้ว่าวัสดุนี้เป็นแผ่นวัสดุ 1 แผ่น ที่มีอุณหภูมิที่ผิวหน้าทั้งสองด้านเท่ากับ  $T_1$  และ  $T_{n+1}$  และมีความต้านทานการนำความร้อนเท่ากับ  $\sum_{i=1}^n \left(\frac{l_i}{\lambda_{iA}}\right)$  ได้

#### 1.4 การนำความร้อนของกระบอก

ในทรงกระบอกดังภาพ 8 การกระจายของอุณหภูมิตามแนวแกนกลางจะสม่ำเสมอ มีแต่การกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมีเท่านั้น ในกรณีนี้ ความร้อนจะไหลจากผิวด้านในออกมาด้านนอก (หรือในทิศทางตรงข้าม) ตามแนวรัศมี

ถ้าให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $\lambda$  มีค่าคงที่ และภายในทรงกระบอกไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อนแล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวทรงกระบอกที่มีรัศมี  $r$  และมีความยาวหนึ่งหน่วยตลอดทั่วทั้งพื้นผิว  $Q'$  (W/m) จะมีค่าคงที่ตลอด ณ รัศมี  $r$  ใด ๆ

$$q = \frac{Q'}{2\pi r}$$

เมื่อนำความสัมพันธ์นี้ไปแทนค่าในสมการของ Fourier และอินทิเกรตแล้ว  
จะได้ว่า

$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (9)$$

$$dT = \left(\frac{Q'}{2\pi r}\right)\left(\frac{1}{r}\right)dr, T = \frac{Q'}{2\pi r} \ln r + C$$



ภาพ 8 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอก

ในที่นี้ เมื่อแทนค่าเงื่อนไขตั้งต้นว่าเมื่อ  $r = r_1$  แล้ว  $T = T_1$  และเมื่อ  $r = r_2$  แล้ว  $T = T_2$  จะได้ว่า

$$T_1 - T_2 = \frac{Q'}{2\pi r} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q'}{2\pi r} \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

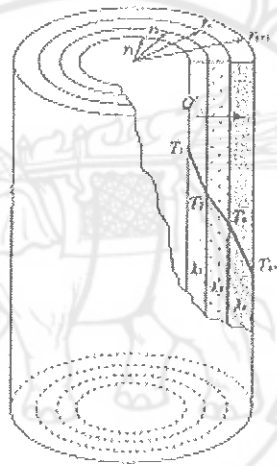
ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมด  $Q$  (W) ที่ถ่ายเทจากผิวด้านในสู่ผิวด้านนอก  
จะเท่ากับ

$$Q = Q'L = \frac{(T_1 - T_2)}{R_C}, R_C = \frac{1}{2\pi\lambda L} \ln \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (10)$$

อุณหภูมิภายในทรงกระบอกสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ ซึ่งมีการกระจายแบบล็อกการิทึม

$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right), \quad T(r) = T_2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right) \quad (11)$$

เมื่อพิจารณาการนำความร้อนของทรงกระบอกหลายชั้นดังรูปที่ 4.3 ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านจะคำนวณได้ในทำนองเดียวกับวัสดุรูปแผ่นหลายชั้น กล่าวคือ



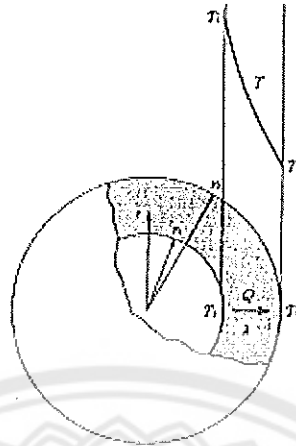
ภาพ 9 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอกหลายชั้น

$$Q = Q'L = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{R_C}, \quad R_C = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{2\pi\lambda_i L} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \right\} \quad (12)$$

### 1.5 การนำความร้อนของเปลือกทรงกลม

ต่อไปนี้จะพิจารณาการนำความร้อนของเปลือกทรงกลมรัศมีภายใน  $r_1$  รัศมีภายนอก  $r_2$  ดังภาพ 10 ให้อุณหภูมิที่ผิวภายในเท่ากับ  $T_1$  อุณหภูมิที่พื้นผิวภายนอกเท่ากับ  $T_2$  โดยมีการกระจายสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว ให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อน  $\lambda$  ของเปลือกทรงกลมมีค่าคงที่ทุกจุด และภายในตัวเปลือกทรงกลมไม่มีการกำเนิดหรือดูดกลืนความร้อน ถ้าให้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผิวทรงกลมรัศมี  $r$  เท่ากับ  $Q$  (W) แล้ว ค่า  $Q$  จะคงที่ไม่ขึ้นกับ  $r$  ดังนั้น สมการของ Fourier ในกรณีนี้จึงเท่ากับ





ภาพ 10 แสดงการนำความร้อนของเปลือกทรงกลม

$$q = \frac{Q'}{4\pi r^2} = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (13)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการนี้ จะได้ว่า

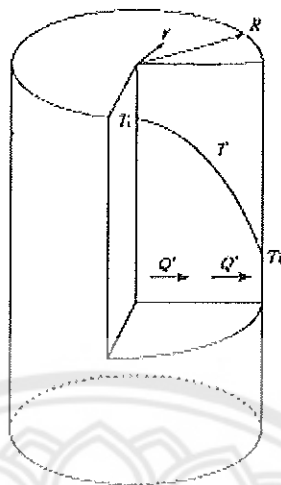
$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_C}, R_C = \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (14)$$

$$T(r) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right), T(r) = T_2 - \frac{(T_1 - T_2)}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (15)$$

#### 1.6 การนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน

กรณีนี้จะแตกต่างจากการนำความร้อนของทรงกระบอกข้างต้น เนื่องจากภายในทรงกระบอกมีการกำเนิดความร้อน ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านพื้นผิวทรงกระบอกสมมติภายในตัวทรงกระบอก จึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวทรงกระบอกนั้น ถ้าให้ปริมาณความร้อนที่กำเนิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของทรงกระบอกนี้เท่ากับ  $w$  ( $W/m^3$ ) แล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านพื้นผิวทรงกระบอกรัศมี  $r$  ต่อความยาวหนึ่งหน่วยของทรงกระบอก  $Q'$  ( $W/m$ ) จะเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่จากด้านในพื้นผิวทรงกระบอกนั้น

$$Q' = \pi r^2 w$$



ภาพ 11 แสดงการนำความร้อนของทรงกระบอกที่กำเนิดความร้อนจากภายใน

ดังนั้น สมการของ Fourier ในกรณีนี้จะเท่ากับ

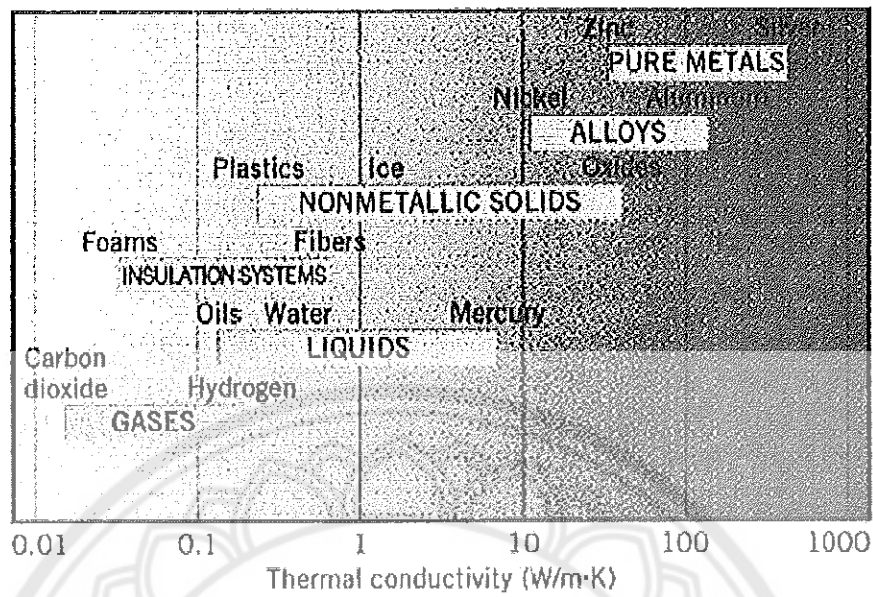
$$q = \frac{Q'}{2\pi r} = \frac{r}{2} w = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (16)$$

เมื่ออินทิเกรตแล้วจะได้

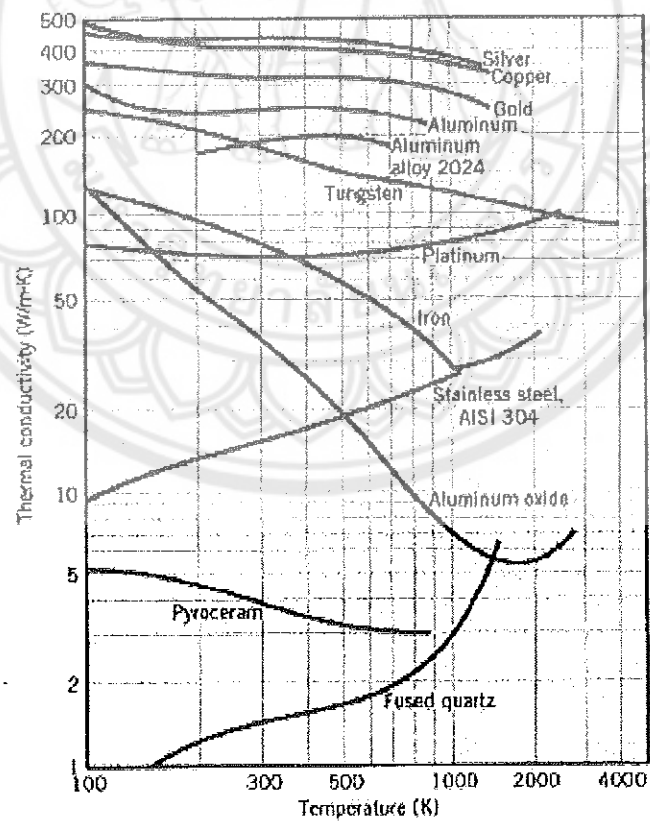
$$dT = \frac{w}{2\lambda} r dr, \quad T(r) = \frac{w}{2\lambda} \left( \frac{1}{2} r^2 \right) + C$$

ถ้าให้อุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของทรงกระบอก ( $r = R$ ) เท่ากับ  $T_2$  แล้ว การแจกแจงอุณหภูมิภายในทรงกระบอกจะเป็น

$$T(r) = T_2 + \frac{w}{4\lambda} (R^2 - r^2) \quad (17)$$



ภาพ 12 แสดงประมาณค่าการนำความร้อนสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ



ภาพ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำความร้อนของสารชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ

## 2. การพาความร้อน

การพาความร้อน หมายถึง กระบวนการถ่ายเทความร้อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าของวัตถุกับของไหล ก็เรียกว่า การพาความร้อน ในอุปกรณ์ความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมากการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ มักจะสำคัญกว่าการถ่ายเทความร้อนภายในตัวของไหลเอง ในที่นี้ จึงจะกล่าวถึงการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าว การพาความร้อนเกิดขึ้นได้ทั้งจากการไหลที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (หรือความหนาแน่น) และการไหลที่เกิดขึ้นจากปั๊มหรือพัดลม เป็นต้น ซึ่งแบบแรกจะเรียกว่า การพาความร้อนตามธรรมชาติ แบบหลังจะเรียกว่า การพาความร้อนด้วยการบังคับ

ชั้นผิวสัมผัสกับการพาความร้อน เมื่อพิจารณาในเชิงจุลภาคเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลกับผิวหน้าของวัตถุ จะพบว่าที่จริงแล้วการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการนำความร้อนระหว่างวัตถุกับของไหลที่ผิวสัมผัสนั่นเอง โดยปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับการกระจายของอุณหภูมิของชั้นผิวสัมผัส (กล่าวคือ ขึ้นอยู่กับความชันของเส้นการแผ่กระจายของอุณหภูมิในตัวของไหลที่อยู่ใกล้ๆ กับผิวหน้าของวัตถุ) ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจึงไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของของไหลและรูปร่างของวัตถุเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นราบเรียบหรือปั่นป่วน และขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นอยู่ในช่วงเร่งความเร็วหรือมีความเร็วคงที่แล้ว ฯลฯ อีกด้วย ในที่นี้ เราจะรวมเอาปัจจัยที่ซับซ้อนเหล่านี้ไว้ในค่าที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]) โดยพลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$q = h(T_{\infty} - T_w) \quad (18)$$

$T_w$  เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าวัตถุ  $T_{\infty}$  เป็นอุณหภูมิของกระแสหลัก ณ จุดที่ห่างเพียงพอจากผิวหน้า มีสมการต่าง ๆ มากมายที่ใช้ในการคำนวณอัตราการพาความร้อน ( $h$ ) ของวัตถุรูปร่างต่าง ๆ ที่อยู่ในการไหลแบบต่าง ๆ ซึ่งจะได้กล่าวในภายหลัง ตัวอย่างช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสำหรับการไหลและการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ แสดงไว้ในตาราง 3

เนื่องจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไม่ได้เป็นสมบัติทางกายภาพของสสารเหมือนกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ดังนั้น ค่าของมันบางครั้งจึงขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนผิวหน้าของวัตถุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนผิวหน้า เรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะที่ ( $h_x$ ) และค่าเฉลี่ยทั่วผิวหน้าเรียกว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

( $h_m$ ) หากให้พื้นที่ที่มีความร้อนถ่ายเทเท่ากับ A แล้ว ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านในหนึ่งหน่วยเวลา Q จะเท่ากับ

$$Q = h_m (T_\infty - T_w) A \quad (19)$$

### ตาราง 3 แสดงช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

รูปแบบการถ่ายเทความร้อน	ช่วงของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และเงื่อนไข
การพาความร้อนตามธรรมชาติ	5 - 10      แผ่นตะกั่วเรียบ 500 °C ในบรรยากาศ 0.1 MPa, 20 °C
การพาความร้อนด้วยการบังคับ	500 - 550      แผ่นตะกั่วเรียบ 50 °C ในน้ำ 20 °C
	40      ท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 m อุณหภูมิผิวด้านใน 130 °C มีอากาศ 40 °C ไหลผ่านด้วยความเร็ว 10 m/s
การเดือด	5000      ท่อกลมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 m อุณหภูมิผิวด้านใน 130 °C มีน้ำ 40 °C ไหลผ่านด้วยความเร็ว 1 m/s
	ประมาณ 1500 - 60000      film boiling < nucleate boiling, ที่ใกล้กับ burnout point จะมีค่าประมาณ 60000
การควบแน่น	ประมาณ 10000 - 230000      film-wise condensation << drop-wise condensation

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการพาความร้อน} = \frac{\text{ความแตกต่างของอุณหภูมิ}}{\text{ความต้านทานการพาความร้อน}}$$

ถ้าให้ความต้านทานการพาความร้อนเท่ากับ  $R_t$  แล้ว จะได้สมการดังต่อไปนี้

$$Q = \frac{(T_\infty - T_w)}{R_t}, \quad R_t = \frac{1}{h_m A} \quad (20)$$

### 3. การแผ่รังสี

การแผ่รังสี วัตถุทุกชนิดจะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาว และความเข้มค่าหนึ่ง จากพื้นผิวอยู่ตลอดเวลา โดยความยาวและความเข้มจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน หากวัตถุนั้นดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ ก็จะได้รับพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของวัตถุสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้เรียกว่า การแผ่รังสี

การแผ่รังสีความร้อน การแผ่รังสีจากวัตถุดำ การแผ่รังสีหมายถึงปรากฏการณ์ที่วัตถุปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่และดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัตถุ จะทำให้เกิดการสั่นเนื่องจากความร้อนของอะตอมหรือโมเลกุลภายในตัววัตถุ ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญในการแผ่รังสีความร้อน มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง  $0.3 - 10 \mu\text{m}$  กล่าวคืออยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ถึงช่วงรังสีอินฟราเรด โดยทั่วไปเมื่อรังสีความร้อนกระทบกับวัตถุ ส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลืน ส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านไป โดยสัดส่วนของแต่ละส่วนเรียกว่า ค่าการดูดกลืน (Absorptivity)  $\alpha$  ค่าการสะท้อน (Reflectivity)  $\rho$  และค่าการทะลุผ่าน (Transmissivity)  $\tau$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (21)$$

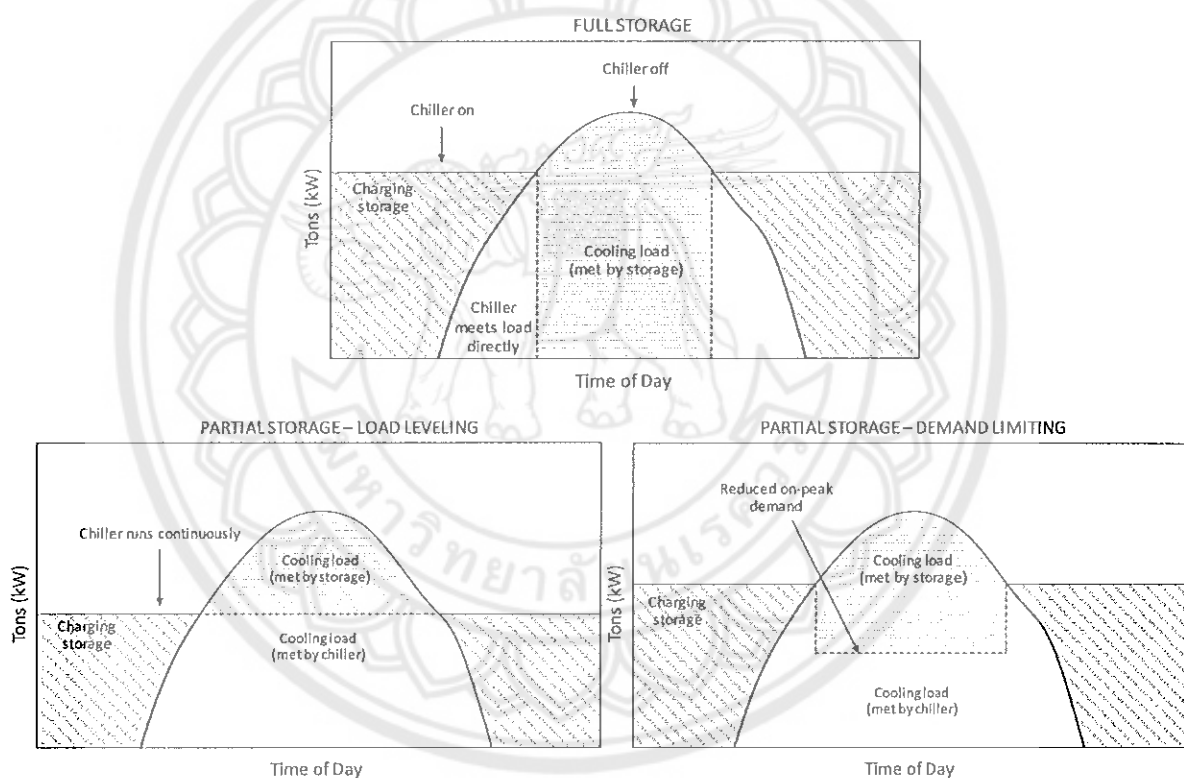
วัสดุที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยมากมักจะมี  $\tau$  เท่ากับศูนย์ ส่วนก๊าซจะมี  $\alpha$  และ  $\rho$  ต่ำมาก แต่มี  $\tau$  เกือบเท่ากับ 1 ในการพิจารณาการแผ่รังสี ถ้าเราสมมติว่ามีวัตถุในอุดมคติที่มี  $\rho = \tau = 0$ ,  $\alpha = 1$  กล่าวคือวัตถุนี้ จะดูดกลืนรังสีความร้อนที่เข้ามากระทบทุกความยาวคลื่นอย่างสมบูรณ์ ไม่สะท้อนหรือปล่อยให้ทะลุผ่านไปวัตถุนี้เรียกว่า วัตถุดำ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำ เรียกว่า การแผ่รังสีจากวัตถุดำ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการพิจารณาการแผ่รังสีจากวัตถุต่าง ๆ โดยในจำนวนการแผ่รังสีจากวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิหนึ่ง ๆ การแผ่รังสีจากวัตถุดำจะมีพลังงานสูงที่สุด

#### ระบบกักเก็บความเย็น

จักรพันธ์ ภวังคะรัตน์ (2551) ได้กล่าวไว้ว่า ระบบกักเก็บความเย็น (Cooling Storage System) เป็นการทำความเย็นสะสมไว้ในตอนกลางคืน แล้วนำมาใช้ในตอนกลางวัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าไฟฟ้า โดยย้ายการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงที่มีราคาแพงไปยังช่วงที่มีราคาถูก ซึ่งในการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ กักเก็บเต็มที่ (Full

Storage) และกักเก็บบางส่วน (Partial Storage) ระบบแบบกักเก็บบางส่วนสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ แบบปรับระดับภาระ (Load-Leveling) และแบบจำกัดค่าความต้องการ (Demand-Limiting) ดังภาพ 14 แสดงกลยุทธ์การทำงานของระบบกักเก็บความเย็นทั้ง 3 แบบ

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีของพลังงานทดแทน คือ เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell หรือ Photovoltaic: PV) มาใช้การผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมไว้ในแบตเตอรี่ และนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาใช้งานในเวลาจำเป็น โดยในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณา ดังนี้



ภาพ 14 แสดงกลยุทธ์การทำงานของระบบกักเก็บความเย็น

กลยุทธ์แบบกักเก็บเต็มที่จะถ่ายเทภาระการทำความเย็นทั้งหมดของช่วง On-Peak ไปอยู่ในช่วง Off-Peak ระบบซึ่งออกแบบสำหรับการกักเก็บเต็มๆ โดยทั่วไปจะทำงานที่ความสามารถสูงสุด (Full Capacity) ตลอดช่วง Non-Peak อุปกรณ์ทำความเย็นจะไม่ทำงานในช่วง On-Peak และภาระการทำความเย็นทั้งหมดจะได้รับการจ่ายความเย็นจากระบบกักเก็บ การทำงานแบบ

กักเก็บเต็มที่จะเหมาะสำหรับที่ซึ่งมีอัตราค่าความต้องการไฟฟ้าแพง และที่ซึ่งมีช่วง On-Peak ค่อนข้างสั้น การควบคุมของระบบนี้ค่อนข้างง่าย

กลยุทธ์แบบกักเก็บบางส่วน จะจ่ายความเย็นให้กับเพียงบางส่วนของภาระการทำความเย็น ซึ่งภาระการทำความเย็นที่คงเหลืออยู่จะได้รับการจ่ายความเย็นจากเครื่องทำความเย็น กลยุทธ์การทำงานแบบกักเก็บบางส่วนแบบย่อได้ 2 แบบ คือ

1. แบบปรับระดับภาระ จะทำงานโดยที่เครื่องทำความเย็นทำงานเต็มความสามารถ (Full Capacity) ตลอด 24 ชั่วโมงในวันออกแบบ เมื่อภาระน้อยกว่าความสามารถของเครื่องทำความเย็น ความเย็นที่เหลือจากเครื่องทำความเย็นจะถูกนำไปเก็บ เมื่อภาระมากกว่าเครื่องทำความเย็นภาระที่เกิดขึ้นจะได้รับ ความเย็นจากระบบกักเก็บ การกำหนดขนาดสำหรับกลยุทธ์การทำงานแบบนี้จะทำให้ได้ขนาดเครื่องทำความเย็นและขนาดของระบบกักเก็บเล็กที่สุด การทำงานแบบปรับระดับภาระจะเหมาะสำหรับที่ซึ่งภาระการทำความเย็นสูงสุดมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยมาก ๆ

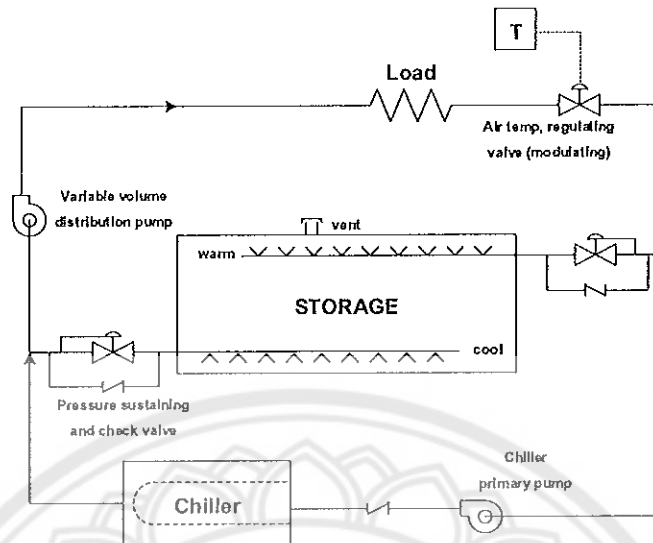
2. แบบจำกัดค่าความต้องการ อุปกรณ์ทำความเย็นจะทำงานที่ค่าจำกัดหนึ่งในช่วง On-Peak ในบางกรณี อุปกรณ์ทำความเย็นอาจถูกควบคุมเพื่อรักษาระดับค่าความต้องการไฟฟ้า (Demand) ให้อยู่ในระดับที่กำหนดไว้ ระบบดังกล่าวนี้จึงต้องการอุปกรณ์สำหรับ Monitoring ด้วย โดยทั่วไปมิเตอร์วัดค่าความต้องการไฟฟ้าจะถูกใช้ในวัตถุประสงค์นี้ มิเตอร์วัดค่าความต้องการไฟฟ้าบางรุ่นจะมีสัญญาณ Pulse ซึ่งสามารถนำไปใช้ในระบบควบคุมอาคารได้

### 1. ชนิดของระบบกักเก็บความเย็น

#### 1.1 ระบบกักเก็บน้ำเย็น

ระบบกักเก็บน้ำเย็น (Chilled Water Storage System) ใช้ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ของน้ำในการเก็บความเย็น น้ำจะถูกทำให้เย็นโดยเครื่องทำน้ำเย็นแล้วนำไปเก็บไว้ในถังเพื่อนำออกมาใช้ในภายหลัง ปริมาณของความเย็นที่จะเก็บขึ้นอยู่กับอุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำเย็นที่เก็บไว้ในถังและน้ำที่กลับมาจากระบบ ระบบกักเก็บน้ำเย็นสามารถเพิ่มความจุในการเก็บความเย็นได้โดยการรักษาอุณหภูมิแตกต่างให้สูงที่สุด อุณหภูมิแตกต่างทำให้สูงขึ้นได้โดยทำให้อุณหภูมิน้ำกลับสูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิน้ำที่เก็บในถังต่ำลง และป้องกันไม่ให้น้ำที่กลับมามีอุณหภูมิเย็นที่เก็บอยู่ในถัง ดังภาพ 15



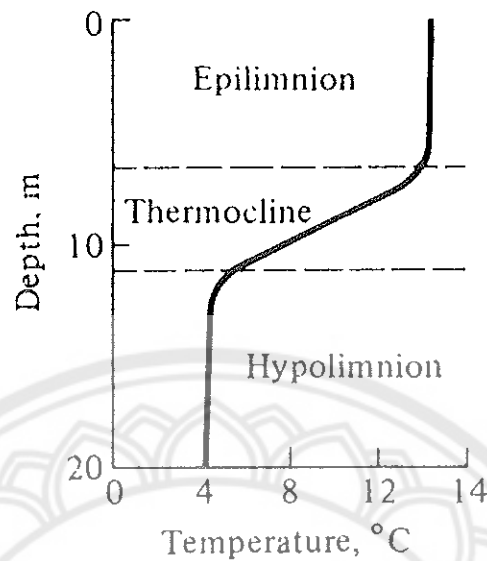


ภาพ 15 แสดงระบบกักเก็บน้ำเย็น

ที่มา: Charles E, Design Guid for Cool Thermal storage, ASHRAE Atlanta

ระบบกักเก็บน้ำเย็นโดยทั่วไปจะบรรจุกวามเย็นด้วยน้ำ อุณหภูมิประมาณ 4 ถึง 7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในช่วงนี้ใกล้เคียงกับระบบทำความเย็นปกติทั่วไป จึงทำให้สามารถใช้เครื่องทำน้ำเย็นทั่ว ๆ ไปได้ รวมทั้ง Absorption Chiller ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิปกติ ปริมาณในการกักเก็บสำหรับระบบกักเก็บน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิแตกต่าง 6 ถึง 11 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะประมาณ 5.9 ถึง 11.3 kWh/m<sup>3</sup> (11 ถึง 21 ft<sup>3</sup>/Ton-h) ถ้าหากรักษาอุณหภูมิแตกต่างได้ 17 องศาเซลเซียส ปริมาณที่ใช้คือ 17.7 kWh/m<sup>3</sup> (7 ft<sup>3</sup>/Ton-h) พื้นที่ที่ต้องการสำหรับระบบนี้จะประมาณ 3 - 7 เท่าของระบบกักเก็บน้ำแข็ง และ 2 - 3 เท่าของระบบกักเก็บ Eutectic Salt ระบบกักเก็บน้ำเย็นจะคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เมื่อใช้กับระบบขนาดใหญ่กว่า 7,000 kWh (2,000 Ton-h) หรือประมาณ 760 m<sup>3</sup> (200,000 Gal) ถึงยังขนาดใหญ่ ก็ยังมีอัตราส่วนพื้นที่ต่อผิวปริมาตรน้อย และยังมีราคาต่อ kWh (Ton-h) น้อยลง

การทำงานของระบบกักเก็บความเย็นชนิดนี้ขึ้นอยู่กับการรักษาภาวะการแบ่งในเชิงความร้อนระหว่างน้ำเย็นที่เก็บเข้าไปและน้ำกลับซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า การแบ่งมีหลายวิธี คือ Stratification, Multiple Tank, Membrane or Diaphragm และ Labyrinth and Baffle แต่วิธี Stratification เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด มีประสิทธิภาพที่สุด และ Cost Effective ที่สุด แสดงดังภาพ 16



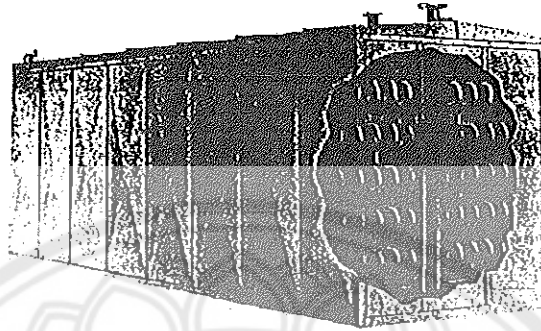
ภาพ 16 แสดง Typical Stratification Temperature Profile

ถังเก็บน้ำเย็นที่ใช้วิธี Stratification ทำงานโดยอาศัยหลักการที่ว่าน้ำจะฟอร์มตัวเป็นชั้น ๆ ตามอุณหภูมิ โดยชั้นอยู่กับความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมินั้น ๆ ความหนาแน่นของน้ำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ เมื่อน้ำเย็นลงจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึง 4 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดนี้จนถึงจุดเยือกแข็งความหนาแน่นจะลดลง น้ำที่อุณหภูมิ 4 - 6 องศาเซลเซียส จะอยู่ในส่วนล่างสุดของถังขณะที่น้ำกลับซึ่งมีอุณหภูมิโดยประมาณ 10 - 18 องศาเซลเซียส จะอยู่ในส่วนบนของถัง ถังเก็บน้ำเย็นที่ใช้วิธี Stratification ซึ่งได้รับการออกแบบมาอย่างดี จะสามารถจ่ายพลังงานความเย็นได้ถึง 85 - 95% ของพลังงานทั้งหมดที่เก็บไว้

### 1.2 ระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก

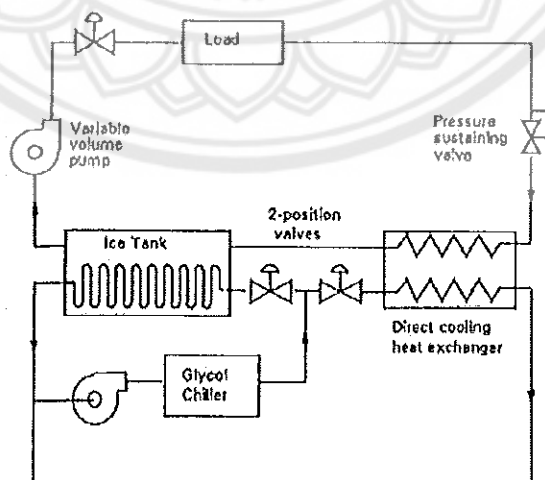
ระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก (External Melt Ice-On-Coil Storage System) บางครั้งหมายถึงเครื่องสร้างน้ำแข็ง โดยสร้างและเก็บน้ำแข็งบนผิวนอกขดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งวางจมอยู่ในถังที่มีน้ำบรรจุอยู่ ในการบรรจุความเย็น สารทำความเย็นซึ่งอาจเป็น Refrigerant หรือ Secondary Coolant จะถูกส่งผ่านเข้าไปในขดท่อทำให้มีน้ำแข็งเกิดขึ้นบนท่อจะถูกทำให้มีน้ำแข็งเกิดขึ้นบนผิวด้านนอกของท่อ ในการจ่ายความเย็นน้ำแข็งบนท่อจะถูกทำให้ละลายโดยน้ำกลับซึ่งหมุนเวียนผ่านภายในถัง (นอกท่อ) ผลก็คือจะทำให้ได้น้ำเย็นเพื่อไปใช้ทำความเย็นให้กับอาคาร นอกจากนี้จะมีการทำให้เกิดฟองอากาศผุดอยู่ทั่วถังในช่วงเริ่มต้น

ของการบรรจุกวามเย็นและตลอดช่วงจ่ายความเย็นเพื่อให้อุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งถัง และยังทำให้ การสร้างและสลายน้ำแข็งดียิ่งขึ้น ดังภาพ 17



ภาพ 17 แสดงถึงเก็บน้ำแข็งระบบน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก

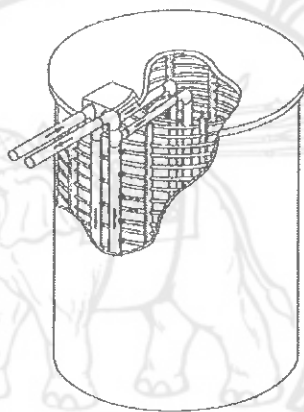
โดยทั่วไปจะสร้างน้ำแข็งหนาประมาณ 40 - 65 มิลลิเมตร บนท่อซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานแบบต่าง ๆ น้ำแข็งยิ่งหนาก็ยิ่งต้องการอุณหภูมิบรรจุกว่า ๆ และโดยทั่วไปจะใช้เมื่อมีระบบทำความเย็น ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิ -12 ถึง -9 องศาเซลเซียส น้ำแข็งบาง ๆ ใช้กับที่ซึ่งมีอุณหภูมิในการบรรจุกสูงกว่าและต้องการประสิทธิภาพที่ดีกว่า หากถึงเก็บความเย็นแบบละลายภายนอกบรรจุกวามเย็นมากเกินไป น้ำแข็งจะจับตัวเป็นผืนระหว่างท่อบางครั้งอาจไม่ใช่ปัญหาสำคัญ แต่บางกรณีที่ผืนน้ำแข็งไปกีดขวางทางน้ำก็อาจทำให้อุณหภูมิน้ำจ่ายสูงขึ้นได้ ดังภาพ 18



ภาพ 18 แสดงระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายนอก

### 1.3 ระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน

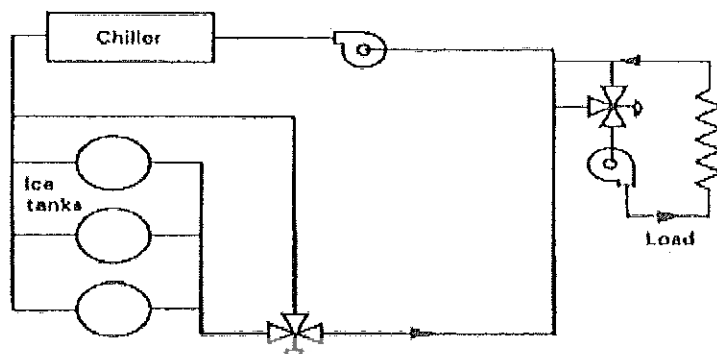
ระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน (Internal Melt Ice-On-Coil Storage System) จะใช้ Secondary Coolant เป็นการไหลของการทำงาน ในการบรรจุและจ่าย ความเย็นโดยการผ่านสารทำความเย็นเข้าไปขุดต่อหรือคอยล์ซึ่งวางจมอยู่ ถังที่มีน้ำบรรจุอยู่ ในการสร้างน้ำแข็ง เครื่องทำความเย็นจะทำให้ สารทำความเย็นมีอุณหภูมิประมาณ -6 ถึง -3 องศาเซลเซียส และน้ำแข็งก็จะเกิดขึ้นภายนอกขุดต่อ ในการจ่ายความเย็นสารทำความเย็นไหลผ่าน ภายในท่อทำการละลายน้ำแข็งจากทางด้านในออกไปสู่ด้านนอก สารทำความเย็นก็จะมีอุณหภูมิ ลดลง แล้วจึงนำไปใช้ในการทำความเย็นต่อไป ดังภาพ 19



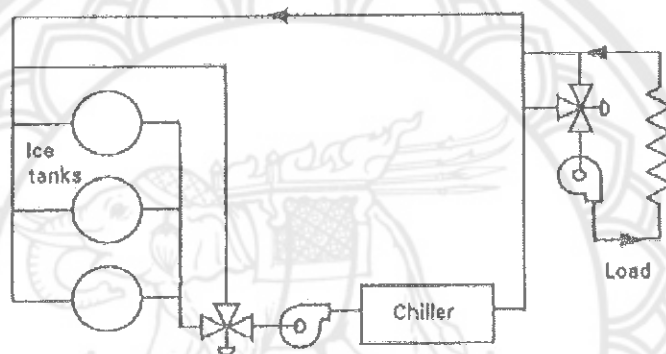
ภาพ 19 แสดงถึงเก็บน้ำแข็งของระบบน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน

ในการจัดเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อน (Chiller Up-stream) ซึ่งใช้กลยุทธ์ในการทำงานแบบกักเก็บบางส่วน สารทำความเย็นที่กลับมาจากอาคารจะถูกทำให้เย็นโดยเครื่องทำความเย็นก่อนที่จะผ่านไปยังถังเก็บน้ำแข็งการจัดในรูปแบบนี้จะทำให้การทำงานของเครื่องทำความเย็นมีประสิทธิภาพมากกว่าเพราะทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่าอย่างไรก็ตามส่วนที่นำมาใช้งาน ได้ของระบบกักเก็บจะลดลงเพราะอุณหภูมิด้านจ่ายออกจากถังต่ำลง

ในการจัดเครื่องทำความเย็นอยู่หลัง (Chiller Down-stream) น้ำที่กลับมาจากอาคารจะผ่านถังก่อนที่จะผ่านไปยังเครื่องทำความเย็นการจัดแบบนี้จะทำได้ความสามารถของถังเก็บได้อย่างเต็มที่ รวมทั้งจะมีอุณหภูมิด้านจ่ายคงที่แน่นอนด้วย เครื่องทำความเย็นจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า จึงทำให้ประสิทธิภาพน้อยกว่า แบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อน ภาพ 20 แสดงการจัดระบบทั้งแบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อนและอยู่หลัง



A CHILLER UPSTREAM



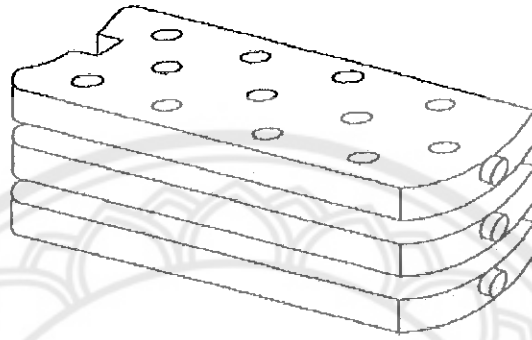
B. CHILLER DOWNSTREAM

ภาพ 20 แสดงระบบกักเก็บน้ำแข็งบนคอยล์แบบละลายภายใน

## 1.4 ระบบกักเก็บความเย็นน้ำเกลือหรือสารเปลี่ยนสถานะ

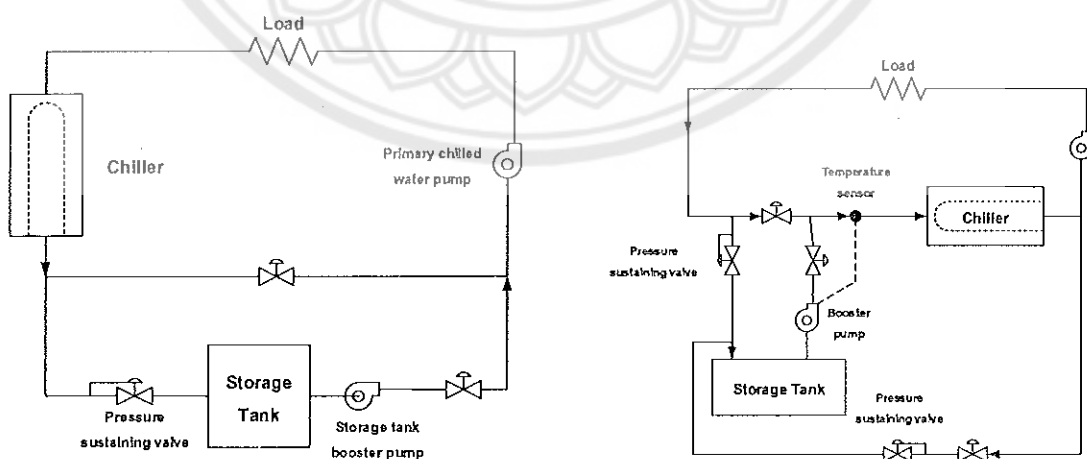
ระบบกักเก็บความเย็นน้ำเกลือหรือสารเปลี่ยนสถานะ (Eutectic Salt Storage or Phase Change Materials) เป็นส่วนผสมทางเคมีที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งที่อุณหภูมิที่กำหนดเหมือนกับน้ำที่เก็บความเย็นเป็นจำนวนมากที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ขณะเปลี่ยนจากสถานะของเหลวเป็นของแข็ง Eutectic Salt ก็เก็บความเย็นที่อุณหภูมิที่จุดเปลี่ยนสถานะเช่นกัน ซึ่งจะเปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิ 8.3 องศาเซลเซียส สารนี้จะบรรจุในคอนเทนเนอร์พลาสติกรูปสี่เหลี่ยมซึ่งวางเรียงเป็นตั้งอยู่ภายในถัง น้ำทำหน้าที่เป็นสารถ่ายเทความร้อนโดยจะถูกหมุนเวียนผ่านถังซึ่งมีคอนเทนเนอร์อยู่ภายในน้ำความร้อนเข้าและออกจาก Eutectic Salt ที่เปลี่ยนสถานะที่อุณหภูมิ 8.3 องศาเซลเซียส สามารถบรรจุความเย็นได้ด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิกปกติ คือ 4 - 6 องศาเซลเซียส ด้วยคุณสมบัตินี้จึงสามารถเพิ่มระบบกักเก็บความเย็นแบบนี้เข้าไปในระบบน้ำเย็นที่มีอยู่แล้ว โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องทำความเย็นและระบบส่งจ่ายน้ำเย็น อุณหภูมิขณะจ่าย

ความเย็นโดยทั่วไปประมาณ 9 - 10 องศาเซลเซียส ซึ่งค่อนข้างสูงสำหรับระบบปรับอากาศ โดยทั่วไป ลักษณะดังกล่าวนี้จึงเป็นข้อจำกัดในการนำระบบนี้ไปใช้แบบกักเก็บเต็มที ซึ่งมีความต้องการควบคุมความชื้นดังภาพ 21



ภาพ 21 แสดง Stacked Eutectic Salt Storage Containers

ระบบ Eutectic salt สามารถจัดได้ทั้งแบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อนและหลัง การจัดแบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อน สามารถใช้ได้กับระบบซึ่งทำงานแบบกักเก็บเต็มที หรือที่ซึ่งไม่ต้องการความเย็นจากระบบกักเก็บขณะเครื่องทำความเย็นทำงาน การจัดแบบเครื่องทำความเย็นอยู่หลังจะทำให้น้ำที่ผ่านถังมาแล้วผ่านเครื่องทำความเย็นเพื่อทำความเย็นให้ได้ตามอุณหภูมิที่กำหนด ดังภาพ 22



ภาพ 22 แสดงระบบ Eutectic salt แบบเครื่องทำความเย็นอยู่ก่อนและหลัง

### ภาระการทำความเย็น

ภาระการทำความเย็น คือ จำนวนความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นทั้งจากภายในห้องทำความเย็นและความร้อนจากภายนอกห้องที่ผ่านเข้ามาในห้องทำความเย็น ซึ่งเป็นภาระที่เครื่องทำความเย็นจะต้องนำออกไปเพื่อลดและรักษาอุณหภูมิในห้องให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ความร้อนสัมผัสที่เกิดจากการนำและการพา มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศภายในห้องทันทีและความร้อนแฝงที่เกิดจากการแผ่รังสี มีผลต่ออุณหภูมิของพื้น ผนัง และเพดาน จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นการพาความร้อนเข้าสู่อากาศภายในห้องภายหลัง โดยเวลาในการแผ่รังสีเข้าสู่อากาศในห้องจะช้าลงหรือเร็วขึ้นขึ้นอยู่กับความจุความร้อนของวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง สามารถคำนวณภาระการทำความเย็นได้ในสมการต่อไปนี้ (Paul Evans, Cooling Load Calculation)

$$Q = \frac{24\text{hr} \cdot q_t}{RT} \quad (22)$$

เมื่อ  $Q$  คือ ความต้องการความสามารถของการทำความเย็น (kW)

$RT$  คือ เวลาที่เครื่องทำความเย็นทั้งหมด (hr.)

$q_t$  คือ ภาระการทำความเย็นทั้งหมด (kW)

โดยที่ 
$$q_t = q_w + q_{ac} + q_{\text{product}} + q_h \quad (23)$$

1. ภาระการทำความเย็นจากความร้อนผ่านผนัง (The Wall Heat Gain Load)

$$q_w = AU\Delta T \quad (24)$$

2. ภาระการทำความเย็นจากอากาศภายนอก (Calculating the Air Change Load)

$$q_{ac} = \dot{m} (h_0 - h_i) \quad (25)$$

3. ภาระการทำความเย็นจากอุปกรณ์ที่สามารถเกิดความร้อนได้ (Powers Load)

$$q_{\text{light}} = \frac{(\text{Watts}) \times (\text{hours in use})}{(24 \text{ hours})} \quad (26)$$

$$Q_{\text{Motor}} = \frac{(\text{Motor Output in kW}) \times (\text{Factor}) \times (\text{Hours in use})}{(24 \text{ Hours})} \quad (27)$$

#### 4. ภาระการทำความเย็นจากผู้อาศัย (Humans Load)

$$Q_h = \frac{(\text{No. of People}) \times (\text{Heat Equivalent kW/People}) \times (\text{Hours Occupied})}{(24 \text{ Hours})} \quad (28)$$

เมื่อ $q_w$	คือ	ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าไปผ่านผนัง (W)
$q_{ac}$	คือ	ปริมาณความร้อนจากอากาศภายนอกสู่ตัวอาคาร (W)
$q_{\text{light}}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่เกิดจากหลอดไฟ (W)
$q_{\text{Motor}}$	คือ	ปริมาณความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้มอเตอร์ (W)
$q_h$	คือ	ปริมาณความร้อนที่เกิดจากผู้อาศัย (W)
A	คือ	พื้นที่ของผนังที่มีกรถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนัง ( $W/m^2 \cdot K$ )
$\Delta T$	คือ	ผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านของผนัง (K)
$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
$h_o$	คือ	เอนทาลปีของอากาศที่ไหลออก (kJ/kg)
$h_i$	คือ	เอนทาลปีของอากาศที่ไหลเข้า (kJ/kg)

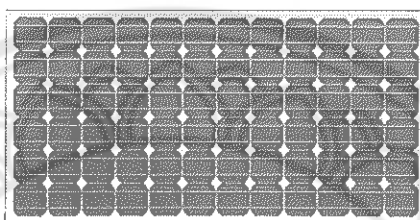
#### แผงเซลล์แสงอาทิตย์

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิคอน (Silicon) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide) อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide) เป็นต้น ซึ่งเมื่อได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงก็จะเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและจะถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์เหล่านั้นทำให้สามารถทำงานได้ (รพีพรรณ คุ้มปรานค์, 2559)



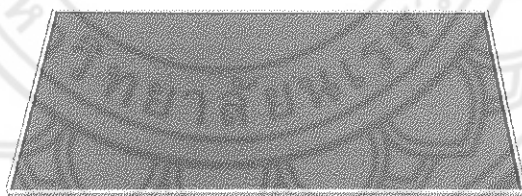
## 1. ชนิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งตามวัสดุที่ใช้

1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline Silicon Photovoltaics) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Monocrystalline Silicon Photovoltaics และชนิดผลึกรวม (Polycrystalline Silicon Photovoltaics) ลักษณะเป็นแผ่นซิลิคอนแข็งและบางมีประสิทธิภาพ 15 - 20% ดังภาพ 23



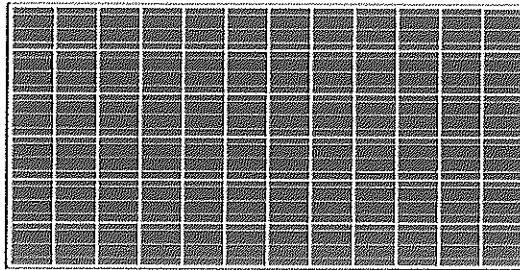
ภาพ 23 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว

1.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous Silicon Photovoltaics) ลักษณะเป็นฟิล์มบางเพียง 0.5 ไมครอน (0.0005 มม.) น้่านักเบาและมีประสิทธิภาพ 7 - 13% ดังภาพ 24



ภาพ 24 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากอะมอร์ฟัสซิลิคอน

1.3 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์แคดเมียม เทลลูไรด์และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์เป็นต้นมีทั้งชนิดผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) และผลึกรวม (Polycrystalline) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาร์เซไนด์จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 13 - 16% ดังภาพ 25



ภาพ 25 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอื่น ๆ

## 2. อุปกรณ์ที่สำคัญในระบบเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 เครื่องควบคุมการประจุ (Charge Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ประจุไฟฟ้าที่ได้รับจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาประจุให้กับแบตเตอรี่ซึ่งการประจุนี้จะต้องไม่ให้มีการประจุมากเกินไป (Over Charge) เพราะจะมีผลทำให้แบตเตอรี่ร้อนจัดทำให้เสื่อมสภาพเร็วและเมื่อมีประจุเต็มแล้วก็ต้องตัดการชาร์จทันทีที่กระแสไฟฟ้าที่ชาร์จแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่มีรูปสัญญาณเป็นพัลส์ (Pulse) และมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่าแบตเตอรี่ประมาณร้อยละ 15 ถึง 20 เนื่องจากมีค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการชาร์จได้แก่ อุณหภูมิของแบตเตอรี่ ความไม่คงที่ของกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายที่ป้อนให้โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานทดแทนอื่น ๆ เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์จากกังหันลมหรืออื่น ๆ จึงต้องใช้อุปกรณ์ประมวลผล (Microcontroller) มาทำการประมวลผลและควบคุมการทำงานวงจรชาร์จประจุและใช้วงจร PWM (Pulse Width Modulation) มาสร้างรูปสัญญาณไฟฟ้าเพื่อให้การประจุแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2 แบตเตอรี่ (Battery) แบตเตอรี่ที่ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้จัดเก็บพลังงานไฟฟ้ามีการพัฒนาให้มีความเหมาะสมในการใช้งานโดยจะออกแบบให้สามารถจัดเก็บประจุได้มาก ๆ และจ่ายกระแสไฟฟ้าได้นาน ๆ ยิ่งขึ้นที่เรียกว่าเป็นแบบ Deep cycle โดยการออกแบบให้แผ่นธาตุตะกั่วมีความหนาเป็นพิเศษเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานภายในสูงสามารถจัดเก็บประจุไฟฟ้าได้สูง แต่จะจ่ายกระแสออกมาได้ไม่สูงมากนักซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการกระแสไฟฟ้าสูง ๆ ในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น การใช้กับรถยนต์แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle จะเหมาะสำหรับรถไฟฟาร์ถยกของ (Flock Lift) เครื่องสำรองไฟ (Uninterruptible Power Supply: UPS) หรือการเก็บพลังงานสำรองจากแหล่งพลังงานทดแทนต่าง ๆ รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ด้วย

แบตเตอรี่แบบ Deep Cycle นี้จะมีราคาขนาดและน้ำหนักที่ต่างกับแบตเตอรี่รถยนต์ (Vehicle Battery) มากถึงแม้ว่ากำลังวัตต์ต่อชั่วโมง (Watt Hour. : Wh) หรือความจุของกระแสไฟฟ้าจะเท่ากันก็ตามในการใช้งานแบตเตอรี่ต่าง ๆ ให้ท่านจะต้องทราบข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิและระดับความลึกในการคายประจุ (Depth of Discharge: DOD) ในระหว่างการทำงานด้วยซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่การใช้งานจนพลังงานไฟฟ้าหมดจะเป็นผลทำให้อายุการใช้งานของแบตเตอรี่สั้นลงอย่างมาก ๆ ดังนั้นการใช้งานจึงไม่ควรใช้ประจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่าร้อยละ 60 และแบตเตอรี่ควรเก็บไว้ในที่อากาศเย็นปกติอุณหภูมิไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส ในส่วนการประจุไฟฟ้าจะต้องไม่ประจุกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปจะทำให้แบตเตอรี่ร้อนจัดทำให้เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น

2.3 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้า (Inverter) ใช้ปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ สำหรับใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบ้านโดยทั่วไปจะออกแบบวงจรภายในโดยใช้วงจร Switching แปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับโดยมีสัญญาณความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิร์ตซ์ ในระบบที่มีขนาดเล็กผู้ผลิตอาจจะรวมวงจรอินเวอร์เตอร์เข้าเป็นชุดเดียวกับวงจรควบคุมการประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ (Charger and Inverter) สำหรับการนำระบบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานต้องคำนึงถึงโหลดไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ขนาดของแผง (W)} = \frac{\text{ค่าการใช้พลังงานทั้งหมด (Wh)}}{5 \text{ hrs.}} \quad (29)$$

$$\text{ขนาดของแบตเตอรี่ (Ah)} = \frac{\text{ค่าการใช้พลังงานทั้งหมด (Wh)}}{(\text{แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V)} \times \text{เปอร์เซ็นต์การใช้งานกระแสไฟฟ้าในแบตเตอรี่} \times \text{ประสิทธิภาพของ Inverter})} \quad (30)$$

โดยขนาดของเครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้าควรมีขนาดเกินกระแสไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าควรมีขนาดสูงกว่ากำลังวัตต์ที่ใช้งานร้อยละ 15 ถึง 20 ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพประมาณร้อยละ 80 ถึง 85 เช่นกำลังวัตต์ที่ต้องการใช้งาน 800 วัตต์ ต้องใช้เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าขนาด 1 kW เป็นต้น

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีของพลังงานทดแทน คือเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell หรือ Photovoltaic: PV) มาใช้การผลิตพลังงานไฟฟ้าสะสมไว้ในแบตเตอรี่ และนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้มาใช้งานในเวลาจำเป็น โดยในการใช้งานระบบกักเก็บพลังงานโดยใช้แบตเตอรี่สำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาดังนี้

#### 1. ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์อาจเรียกว่าประสิทธิภาพของเซลล์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 31

$$\eta_M = \frac{V \times I}{G \times A} \times 100 \quad (31)$$

#### 2. ประสิทธิภาพของการอัดประจุและการแปลงกระแสไฟฟ้า

เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณไฟฟ้าที่ออกจากกระบวนการอัดและชาร์จประจุต่อปริมาณไฟฟ้าที่เข้าสู่กระบวนการอัดและชาร์จประจุโดย สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 32

$$\eta_C = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (32)$$

#### 3. ประสิทธิภาพแบตเตอรี่

เป็นการหาประสิทธิภาพของการบรรจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่สำหรับการทำงานในการเก็บประจุไฟฟ้า สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 33

$$\eta_B = 1 + f_n (\eta_{rt} - 1) \times 100 \quad (33)$$

#### 4. ประสิทธิภาพรวมของระบบ

เป็นการหาค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากผลการคูณของประสิทธิภาพของอุปกรณ์ภายในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของระบบ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 34

$$\eta_{sys} = \eta_M \times \eta_C \times \eta_B \quad (34)$$

เมื่อ	$\eta_{\text{sys}}$	คือ	ประสิทธิภาพรวมของระบบ (%)
	$\eta_M$	คือ	ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
	$\eta_C$	คือ	ประสิทธิภาพของเครื่องอัดและชาร์จประจุ (%)
	$\eta_B$	คือ	ประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ (%)
	A	คือ	พื้นที่แผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ ( $\text{m}^2$ )
	G	คือ	ความเข้มแสงอาทิตย์ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
	I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (A)
	V	คือ	แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ (V)
	$P_{\text{in}}$	คือ	ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เข้าสู่กระบวนการอัดและชาร์จประจุ (W)
	$P_{\text{out}}$	คือ	ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากกระบวนการอัดและชาร์จประจุ (W)
	$f_n$	คือ	สัดส่วนของภาระไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายไฟฟ้าทั้งวันต่อไฟฟ้ารวมทั้งวัน (%)
	$\eta_{\text{rt}}$	คือ	ประสิทธิภาพในหนึ่งรอบการทำงานของแบตเตอรี่ สำหรับแบตเตอรี่แบบใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{\text{rt}}$ ) มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 75 - 80

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. การออกแบบโครงสร้างและการทำงานของระบบ

Jessica Giro-Paloma et al. (2016, pp. 1059 - 1075) ทำการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาและงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสารเปลี่ยนสถานะขนาดเล็ก (MPC) ที่ใช้ในระบบการจัดเก็บพลังงานความร้อน (TES) โดยมุ่งเน้นไปที่วิธีการที่แตกต่างกันของการห่อหุ้มและการใช้งานที่แตกต่างกันของวัสดุเหล่านี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแนวทางสำหรับนักวิจัย เพราะได้อธิบายถึงความแตกต่างของสารเปลี่ยนสถานะแต่ละชนิด ประเภทของวัสดุภายในสารเปลี่ยนสถานะและวัสดุห่อหุ้ม จะเป็นตัวจำแนกประเภทสารเปลี่ยนสถานะ และการนำไปใช้งาน

Yaxue Lin et al. (2018, pp. 2730 - 2742) ทำการทบทวนวิธีการเพิ่มการนำความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่งรวมถึงการเพิ่มสารเติมแต่งที่มีการนำความร้อนสูงและวัสดุเปลี่ยนระยะห่อหุ้ม พบว่าการเติมสารเพิ่มการนำความร้อนถือเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการนำความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ โดยสารเติมแต่งที่เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอน มีแนวโน้มในการนำมาใช้สำหรับการเพิ่มการนำความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะเพิ่มมากขึ้น และทำการวิเคราะห์ถึงการนำสารเปลี่ยนสถานะไปใช้งานในระบบพลังงานแสงอาทิตย์, อาคาร, ระบบทำความเย็น และสิ่งทอ อีกด้วย

Muriel Iten et al. (2016, pp. 175 - 186) ทำการทบทวนผลงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการใช้งานและเทคโนโลยีของ Air-PCM-TES สำหรับการทำความเย็นและความร้อนแบบอิสระของอาคาร โดยการศึกษา สืบค้นและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับ Air-PCM-TES ทั้งวิธีการ passive และ active ข้อดีและข้อเสีย ของ Air-PCM-TES ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบด้วยวิธีการทดลองและการจำลอง การใช้สารเปลี่ยนสถานะสำหรับถ่ายเทและดูดซับความร้อนในกรอบอาคารมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้น้อยและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสถานที่ที่มีสภาพอากาศที่รุนแรง โดยรวมเมื่อใช้วิธีการที่ถูกต้องระบบ air-PCM-TES ได้แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการทำความเย็นและความร้อนของอาคาร

Muthuvelan Thambidurai et al. (2015, pp. 74 - 88) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงและรวบรวมงานวิจัยที่สำคัญที่ได้ดำเนินการในปีที่ผ่านมาโดยนักวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคโนโลยีการระบายความร้อนแบบอิสระ (Free Cooling) โดยใช้ PCMs ในระบบกักเก็บความร้อนแฝง (LHTES) ซึ่งได้นำเสนอในส่วนของทางเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะสำหรับระบบการระบายความร้อนแบบอิสระ เทคโนโลยีของการระบายความร้อนแบบอิสระ การนำไปใช้งานและแนวโน้มของการนำสารเปลี่ยนสถานะไปใช้งานสำหรับการระบายความร้อนแบบอิสระภายในอาคาร

Laura Colla et al. (2017, pp. 584-589) ได้ทำงานวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบถึงความเป็นไปได้ของการใช้อลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และคาร์บอนแบล็ค (CB) เพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อน การนำความร้อน ความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงของพาราฟินบริสุทธิ์เพื่อที่จะทำเป็นประเภทใหม่ของ PCMs เรียกว่า Nano-PCMs นาโน PCMs ที่ได้ 1% โดยน้ำหนักของอนุภาคนาโนในพาราฟินที่การหลอมละลาย อุณหภูมิ 20 - 25 องศาเซลเซียส คุณสมบัติทาง Thermophysical ที่ทำการทดสอบ แสดงให้เห็นว่า ผลกระทบของอนุภาคนาโนที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของทั้ง PCM ของแข็งและของเหลว Nano-PCMs สามารถเป็นตัวแทนของวิธีที่เป็นไปได้และน่าสนใจที่จะลดหรือขจัดข้อจำกัด ที่แท้จริง ในการใช้พาราฟินเป็น PCMs สำหรับการจัดเก็บพลังงานและการใช้เพื่อการระบายความร้อน

Li Dong et al. (2015, pp. 147-156) นำสารเปลี่ยนสถานะ (PCM) มาประยุกต์ใช้ในหลังคาสามารถลดปริมาณความต้องการพลังงานในที่อยู่อาศัยและปรับปรุงภาวะความสบายตัวได้โดยพัฒนาความสามารถในการจัดเก็บพลังงานความร้อนที่ตัวอาคาร ในงานนี้ทำการตรวจสอบรูปแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในส่วนของประสิทธิภาพการควบคุมความร้อนในหลังคาที่แตกต่างกันไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและพื้นที่หนาวเย็นของประเทศจีน นอกจากนี้งานนี้ยังสำรวจปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางด้านความร้อนของหลังคา เช่น ความ

เข้มของรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ ความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะ ความลาดชันของหลังคาความหนาของชั้นเปลี่ยนสถานะ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อนของผิวหลังคาด้านนอก ผลการศึกษาพบว่าหลังคาที่มีสารเปลี่ยนสถานะจะช่วยลดอุณหภูมิในห้องและช่วยให้เวลาที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดของชั้นหลังคาที่มีสารเปลี่ยนสถานะช้าออกไปมากกว่า 3 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับหลังคาทั่วไป ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะกับประสิทธิภาพการระบายความร้อนของหลังคามีสัมพันธ์ที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความลาดชันของหลังคา ความหนาของสารเปลี่ยนสถานะ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อนของผิวหลังคาด้านนอก

Paula Marin et al. (2016, pp. 274-283) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอาคารมวลเบาที่ใช้ยิปซัมบอร์ดที่มีและไม่มีส่วนประกอบของสารเปลี่ยนสถานะ โดยจะคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริงในแต่ละสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจะทำการออกแบบแบบจำลองของอาคารรวมถึงวิเคราะห์ผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อสารเปลี่ยนสถานะด้วยโปรแกรม EnergyPlus และการลดการใช้พลังงานของอาคาร ซึ่งผลที่ได้พบว่าปริมาณการใช้พลังงานมีค่าลดลงเมื่อใช้ยิปซัมบอร์ดที่มีส่วนประกอบของสารเปลี่ยนสถานะในพื้นที่ที่อากาศแห้งแล้งและอบอุ่น แต่ในทางกลับกันในพื้นที่เขตร้อนและมีหิมะทำให้มีขีดจำกัดของศักยภาพการลดการใช้พลังงานของอาคาร โดยสารเปลี่ยนสถานะที่เป็นส่วนประกอบของยิปซัมบอร์ดมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในเขตพื้นที่ที่มีอากาศร้อนสูงเกินไปและต่ำเกินไป โดยผลกระทบจากการใช้สารเปลี่ยนสถานะในกรอบอาคารจะมีผลมากที่สุดเมื่อมีการนำไปใช้กับอาคารที่มีมวลเบา

Octavian G. Pop et al. (2018, pp. 976 - 996) ทำการศึกษาและหาเหตุผลของสมการการเปลี่ยนแปลงความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ 3 ชนิด ได้แก่ RT20, RT25 และ RT27 เพื่อเป็นโมเดลสำหรับการพัฒนาพฤติกรรมทางด้านความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะที่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนด้วยอากาศบริสุทธิ์ในอาคารสำนักงานที่มีสภาพภูมิอากาศต่างกัน

U. Stritih & V. Butala (2010, pp. 1676 - 1683) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารเปลี่ยนสถานะสำหรับการระบายความร้อนแบบอิสระและการกักเก็บความเย็น ซึ่งได้ให้ข้อเสนอแนะว่าสารเปลี่ยนสถานะชนิด E19, ClimSel C21, E21, RT 20, E23 และ ClimSel C24 มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้สำหรับการระบายความร้อนแบบอิสระได้ จากผลการทดลองของพวกเขา รายงานว่า PCM (Rubitherm RT20) สามารถทำให้อุณหภูมิอากาศลดลงต่ำกว่า 24

องศาเซลเซียสเป็นเวลามากกว่า 2.5 ชั่วโมง เมื่อให้ความเร็วลมที่ 1 m / s อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าอยู่ที่ 26 องศาเซลเซียส

Zalba et al. (2004, pp. 839 - 49) ทำการทดลองโดยสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับระบบการระบายความร้อนแบบอิสระ โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะแบบสำเร็จรูปแบบแผ่น ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด มีช่วงอุณหภูมิหลอมละลายเป็น 20 - 25 °C บรรจุอยู่ในกรอบวัสดุที่ทำจากโพลิสไตรีนและมีช่องอากาศระหว่างกรอบเพื่อให้แน่ใจว่าการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด โดยศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองเชิงประจักษ์ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน แล้วใช้ตัวแปรและผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเพื่อออกแบบระบบทำความเย็นแบบอิสระ ทำการวิเคราะห์ทางสถิติ เห็นว่า ความหนาของบรรจุภัณฑ์ อัตราการไหลที่สูงกว่า และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการแข็งตัวของสารเปลี่ยนสถานะ แต่การควบคุมอุณหภูมิเข้าเป็นสิ่งสำคัญมากกว่าการควบคุมความหนาของบรรจุภัณฑ์ ในการทดลองได้ทำการออกแบบระบบทำความเย็น ที่มีความจุไหลเฉลี่ย 3,000 วัตต์ ใช้สารเปลี่ยนสถานะ RT25 และ C22 ทั้งหมด 8 โมดูลทดสอบ สำหรับทำความเย็นในห้องอุตสาหกรรม

ประกอบ สุรวัฒนารวรรณ และ เจิดศักดิ์ สืบทรัพย์ (2554) ทำการศึกษาระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อออกแบบ Ice Thermal Storage และแนวทางการออกแบบเพื่อลดผลกระทบของ Ethylene Glycol ต่อประสิทธิภาพของ Cooling Coil โดยทำการศึกษาดัชนีแปรต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ Ethylene Glycol ที่ป้อนเข้าระบบ จำนวนขดของท่อ อัตราการไหล pressure drop ของอากาศและ Ethylene Glycol และปริมาตรรวมของ storage พบว่ามี 4 แนวทาง

## 2. การนำระบบกักเก็บไปใช้งาน

Mohammad Hoseini Rahdar et al. (2016, pp. 391 - 399) ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบกักเก็บความเย็นแบบใช้น้ำแข็งและสารเปลี่ยนสถานะสำหรับระบบปรับอากาศในอาคารสำนักงานได้ทำการศึกษาด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อม โดยจะทำการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี และการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายวัตถุประสงค์ โดยพิจารณาในส่วนของระยะเวลาคืนทุน ปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณการใช้พลังงาน ซึ่งจะเปรียบเทียบระหว่างระบบปรับอากาศแบบเดิมกับระบบกักเก็บความเย็นทั้ง 2 ระบบ พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีและต้นทุนรวมที่เหมาะสมที่สุดของระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งและระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะมีค่าเท่ากับ 46.93% 0.482823 MUS\$ และ 53.44% 0.806591 MUS\$ ตามลำดับ และการใช้พลังงานรายปีของระบบกักเก็บความเย็นทั้ง 2 ระบบลดลงประมาณร้อยละ 4.59 และ 7.58 ตามลำดับ และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของ



ระบบกักเก็บความเย็นทั้ง 2 ระบบ มีค่าเท่ากับร้อยละ 17.8 และ 27.2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่า เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับระบบปรับอากาศแบบเดิม

B., A., Habeebullah (2007, pp. 355 - 363) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้เชิง เศรษฐศาสตร์ของการเพิ่มระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งเพื่อกักเก็บภาระทำความเย็นสำหรับ สุเหร่า Grand Holly ในเมืองเมกกะ ประเทศซาอุดีอาระเบีย โดยทำการสร้างสมการเป้าหมาย สำหรับค่าใช้จ่ายที่ใช้ระหว่างการดำเนินงานและการบำรุงรักษา และทำการประเมินระบบทั้งใน กรณีกักเก็บบางส่วนและกักเก็บเต็มที่ จากผลการทดลองได้เลือกให้ระบบกักเก็บความเย็นด้วย น้ำแข็งแบบกักเก็บเต็มที่ โดยได้มีการใช้เทคโนโลยีสำหรับการเก็บข้อมูลและแบบจำลองอัตราค่า ไฟฟ้าตามสิ่งเร้าเพื่อให้ระบบมีกักเก็บรายวันอย่างเหมาะสม ซึ่งในขณะที่ระบบกำลังทำงานสาร เปลี่ยนสถานะจะถูกใช้เพื่อกักเก็บพลังงานในระบบ

I., Dincer (2002, pp. 377 - 388) ได้นำเสนอข้อมูลและตัวอย่างการใช้งานระบบ กักเก็บความเย็นที่หลากหลาย และทำการวิเคราะห์ในด้านของพลังงาน และ Exergy และยัง กล่าวถึงประโยชน์ที่ได้รับในด้านของสิ่งแวดล้อมและเศรษฐศาสตร์

D., MacPhee, & I., Dincer (2009, pp. 2288 - 2299) ได้ทำการทบทวนงานวิจัย เกี่ยวกับระบบกักเก็บความเย็นด้วยน้ำแข็งสำหรับระบบปรับอากาศในอาคารเชิงพาณิชย์ 4 ประเภท พวกเขาได้ทำการพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์พลังงานและ Exergy ใน กระบวนการชาร์จและการคายประจุ และทำการพิสูจน์ว่าการวิเคราะห์ด้านพลังงานเพียงอย่าง เดียวไม่สามารถหาสมรรถนะที่เหมาะสมของระบบได้ จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ Exergy ประกอบด้วย

S., M., Vakialtojar, & W., Saman (2001, pp. 249 - 263) ได้ใช้ระบบกักเก็บความ เย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะสำหรับประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศ และพบว่าปริมาณการใช้ พลังงานไฟฟ้าลดลงเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบปรับอากาศแบบเดิมกับระบบปรับอากาศที่ใช้ ร่วมกับระบบกักเก็บความเย็น

Nattaporn Chaiyat (2015, pp. 150 - 158) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ ในการระบายความร้อนของเครื่องปรับอากาศด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ชนิด Rubitherm20 ใน รูปแบบของลูกบอลบรรจุในภาชนะที่มีความหนา 40 เซนติเมตร โดยนำไปลดอุณหภูมิของอากาศที่ ไหลเข้าคอยล์เย็นของระบบปรับอากาศ

N., Stathopoulos et al. (2017, pp. 1064 - 1072) ใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภท พาราฟินที่มีอุณหภูมิหลอมละลาย 37.0 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยมีอุณหภูมิ อากาศขาเข้าในช่วงการหลอมละลายอยู่ที่ 44 องศาเซลเซียส และในช่วงการแข็งตัวอยู่ที่ 26.0

องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศสูงรอบการหลอมละลายและการแข็งตัวต้องใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง แต่สามารถถึง 22 ชั่วโมงได้หากใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ นี่เป็นข้อบ่งชี้ที่ดีสำหรับการชาร์จและคายประจุตลอดทั้งวันอย่างสมบูรณ์โดยมีระยะเวลาการถ่ายเทความร้อนที่จำกัด

A., A., R., Darzi et al. (2013, pp. 155 - 163) ได้ทำการศึกษาสารเปลี่ยนสถานะชนิดเกลืออนินทรีย์ (SP22A17) แบบแผ่นสำเร็จรูปหนา 1.0 และ 2.0 มิลลิเมตร (มีช่วงอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 22.0 - 24.0 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝง 150.0 กิโลจูล/กิโลกรัม) ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบโดยการกำหนดอุณหภูมิอากาศขาเข้า อยู่ที่ 29.0, 33.0 และ 39.0 องศาเซลเซียส พบว่าด้วยอัตราการไหลของอากาศที่ต่ำลงจะทำให้อุณหภูมิอากาศขาออกมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน

T., Muthuvelan et al. (2018, pp. 139 - 149) ทำการศึกษาและทดลองโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ มีช่วงอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 27.0 - 29.0 องศาเซลเซียส สำหรับทดสอบศักยภาพการประหยัดพลังงานในอาคาร ภายใต้สภาพภูมิอากาศเขตร้อนที่อุณหภูมิกลางวัน 35.0 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิกกลางคืน 22.0 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถลดอุณหภูมิห้องได้ประมาณ 2.5 องศาเซลเซียส

S., Medved, & C., Arkar (2008, pp. 429 - 437) ได้ทดสอบสมรรถนะของชุดบรรจุสารเปลี่ยนสถานะชนิดพาราฟิน (RT20) ที่มีช่วงอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 20.0 - 22.0 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาพอากาศที่ค่อนข้างเย็น จากผลการศึกษาพบว่า 95% ของความต้องการการทำความเย็นที่ตรงกันนั้นเป็นที่น่าพอใจ โดยได้พิจารณาช่วงอุณหภูมิหลอมละลาย ที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในแต่ละสถานที่ จะต้องมียุณหภูมิหลอมละลายเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของเดือนที่ร้อนที่สุด ดังนั้นจึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าเลือกใช้ช่วงอุณหภูมิหลอมละลาย (เพิ่มความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะ) ทำให้สามารถผลิตพลังงานความเย็นได้มากขึ้น

B., Zalba et al. (2004, pp. 839 - 849) ได้ใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน RT25 (ช่วงอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ที่ 18.8 - 24.1 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อนแฝงเท่ากับ 164.0 kJ / kg) ภายใต้อัตราการไหลของอากาศที่แตกต่างกันอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะแปรผันระหว่าง 28.0 - 30.0 องศาเซลเซียส ในช่วงการหลอมละลายและ 16.0 - 18.0 องศาเซลเซียส ในช่วงการแข็งตัว พบว่าการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นช้ากว่าด้วยแผ่นหุ้มที่หนากว่าโดยใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำ เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานด้านการระบายความเย็นแบบอิสระ

Yanbing et al. (2003, pp. 417 - 25) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองระบบระบายอากาศกลางคืน (Night Ventilation System: NVP) โดยให้ระบายความร้อนแบบอิสระโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะ สำหรับกักเก็บความเย็นในตอนกลางคืนและปล่อยความเย็นที่เก็บไว้ออกมาใช้งานในเวลากลางวัน ในการทดลองได้ทำการสร้างชั้น 20 ชั้น ในเพดาน โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะประมาณ 2,000 แคปซูล (ประมาณ 150 กิโลกรัม)

Hed G., & Bellander R. (2006, pp. 82 - 9) กล่าวถึงระบบระบายอากาศแบบอิสระ (Free Cooling) ภายในอาคารด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยทำการกักเก็บความเย็นจากอากาศในช่วงเวลากลางคืน และนำออกมาใช้ภายหลังในช่วงเวลากลางวัน กระบวนการชาร์จความเย็นจะเกิดขึ้นโดยการไหลเวียนของอากาศเย็นแล้วเข้าไปกักเก็บในสารเปลี่ยนสถานะ จนสามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะได้ทั้งหมด จนกว่าสารเปลี่ยนสถานะจะแข็งตัว และเมื่ออุณหภูมิภายในอาคารเริ่มสูงขึ้น จะเกิดการดึงความเย็นที่สะสมไว้ในสารเปลี่ยนสถานะทำให้สารเปลี่ยนสถานะเริ่มหลอมละลาย และกักเก็บความร้อนไว้แทน



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

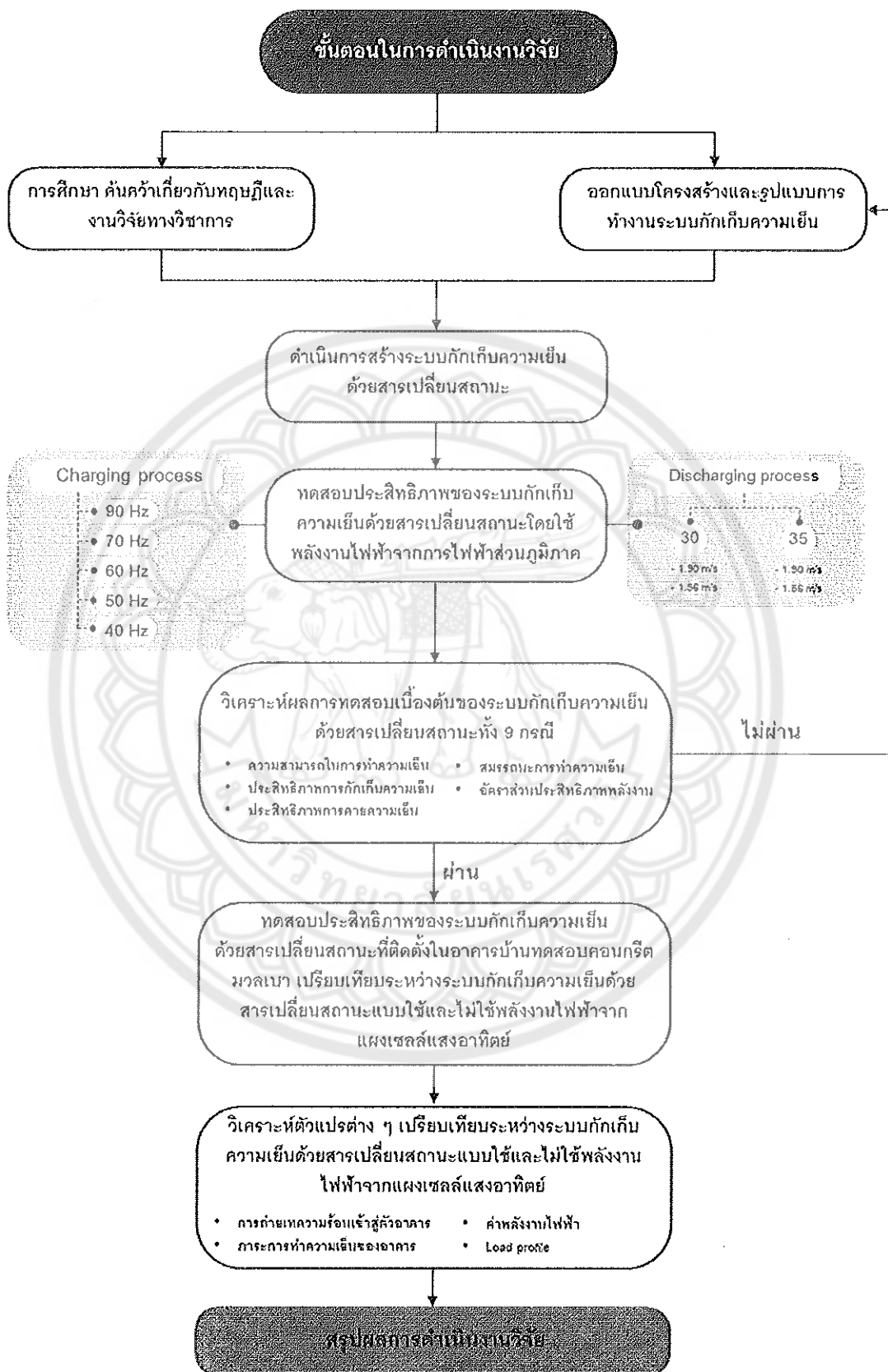
งานวิจัยนี้ทำการศึกษารูปแบบระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาพร้อมกับสารเปลี่ยนสถานะ (สำหรับปรับอากาศในบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน) เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร ซึ่งระบบกักเก็บความเย็นแบ่งการทำงานออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ Charging Process หรือช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ทำหน้าที่สร้างไหลลดความเย็นเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และ Discharging Process หรือช่วงการคายความเย็น ที่ทำหน้าที่ดึงไหลลดความเย็นที่เก็บสะสมไว้มาใช้ในช่วงเวลากลางคืน โดยไม่จำเป็นต้องเปิดชุดเครื่องอัดสารทำความเย็น (Compressor Unit)

ขั้นตอนในการศึกษาระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาพร้อมกับสารเปลี่ยนสถานะ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

1. ออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ที่ทำงานร่วมกับชุดทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศแบบอินเวอร์เตอร์โดยสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยไม่ต้องมีเบตเตอร์และอินเวอร์เตอร์ และดำเนินการสร้างระบบ

2. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในช่วง Charging Process แบ่งออกเป็น 5 กรณี โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าความถี่ของ Compressor 90, 70, 60, 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการคัดเลือกออกมา 1 กรณี ที่มีค่าความถี่เหมาะสมสำหรับระบบกักเก็บความเย็นที่สุด จากนั้นนำไปทดสอบในช่วง Discharging Process โดยจะทำการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วของพัดลม 1.90 และ 1.56 เมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 30 และ 35 องศาเซลเซียส ทั้งหมด 4 กรณี

3. ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา โดยเปรียบเทียบระหว่างการให้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพ 26 แสดงแผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

แนวคิดในการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบก็เก็บความเย็น

จากการศึกษาและสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบก็เก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการออกแบบระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

### 1. การคัดเลือกสารเปลี่ยนสถานะ

ในงานวิจัยนี้จะทำการคัดเลือกประเภทของสารเปลี่ยนสถานะโดยทำการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยและการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะ พบว่าสารเปลี่ยนสถานะทั้ง 3 ประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน แสดงดังตาราง 4 โดยหลักเกณฑ์ที่สำคัญที่สุดสำหรับการเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะนั้นก็คือ มีอุณหภูมิหลอมละลายอยู่ในช่วงที่ต้องการใช้งาน และมีค่าความร้อนแฝงและการนำความร้อนสูงสำหรับการกักเก็บหรือปลดปล่อยความร้อนออกไป แสดงดังตาราง 5

ตาราง 4 แสดงภาพรวมข้อดีและข้อเสียของสารเปลี่ยนสถานะ

ประเภท	ข้อดี	ข้อเสีย
Organic	ไม่เกิด Subcooling ไม่เกิดการแยกเฟส ความดันไอต่ำ ช่วงอุณหภูมิกว้าง รีไซเคิลได้ ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง	ค่าการนำความร้อนต่ำ ปริมาตรความจุความร้อนแฝงต่ำ ไวไฟ
Inorganic	ปริมาตรความจุความร้อนแฝงสูง ค่าการนำความร้อนมากกว่า organic ราคาถูก ไม่ไวไฟ มีการเปลี่ยนเฟสชัดเจน	กักร้อนหนัก เกิด Supercooling มีการแยกเฟส เกิดการเปลี่ยนปริมาตรสูง
Eutectics	จุดหลอมเหลวชัดเจน คุณสมบัติขึ้นอยู่กับส่วนผสม	ราคาสูง

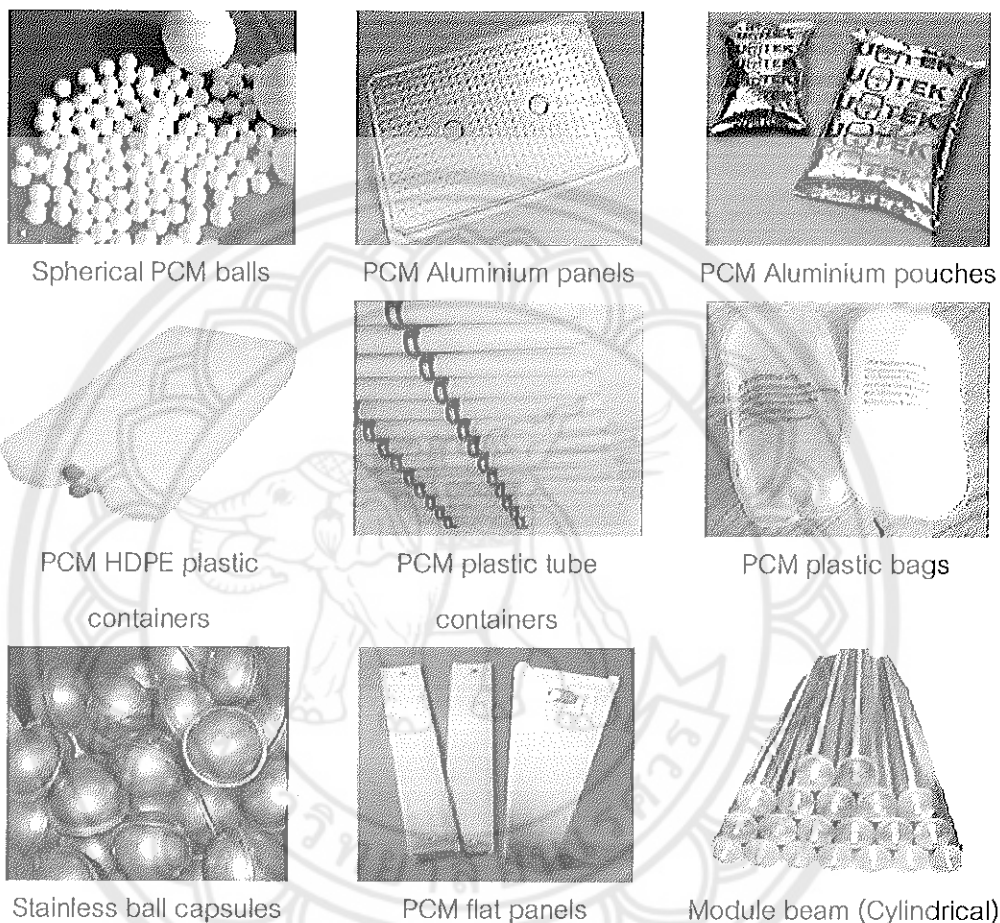
ตาราง 5 แสดงคุณสมบัติที่สำคัญของสารเปลี่ยนสถานะ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ทางความร้อน	อุณหภูมิหลอมเหลวเหมาะสำหรับการใช้งาน เอนทัลปีในการเปลี่ยนเฟสสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้งาน ค่าการนำความร้อนสูงทั้งในสถานะของเหลวและของแข็ง
ทางกายภาพ	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่ำ ความหนาแน่นสูง ไม่เกิดสภาวะเย็นยิ่งยวด (Subcooling) หรือเกิดได้น้อย
ทางเคมี	มีความเสถียร ไม่มีการแยกเฟส เข้ากันได้กับภาชนะบรรจุ ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ไม่ปลดปล่อยมลภาวะ
ทางเศรษฐศาสตร์	ราคาถูก หาได้ง่าย

## 2. การเลือกให้รูปแบบชุดกักเก็บความเย็น

การนำสารเปลี่ยนสถานะไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการระบายอากาศหรือการปรับอากาศภายในอาคาร จำเป็นต้องมีการห่อหุ้มหรือบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในภาชนะหรือวัสดุบรรจุภัณฑ์ เพื่อช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารเปลี่ยนสถานะและป้องกันการเปลี่ยนสถานะจากการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกโดยตรง อีกทั้งยังสามารถช่วยหลีกเลี่ยงการติดไฟ ในกรณีของการใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินได้ (Rodriguez-Ubinas E, 2012, pp. 49 - 62) โดยประสิทธิภาพของภาชนะที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะมีบทบาทสำคัญต่อการกักเก็บความเย็นและการนำความร้อน ส่งผลต่อระยะเวลาของการแข็งตัวและการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่งภาชนะบรรจุจะต้องแข็งแรงทนต่อการกัดกร่อนและความร้อน ง่ายต่อการใช้งานและมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอ (Riffat S, 2013, pp. 1 - 14) โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงรูปแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ พบว่ามีวิธีการและรูปแบบในการบรรจุที่หลากหลาย (Cabeza L, 2011, pp. 1675 - 95) ได้แก่ แบบแผงอะลูมิเนียม, กระป๋องอะลูมิเนียม,

ลูกบอลโลหะหรือพลาสติก, แผ่น, ถุงพลาสติก, ท่อพลาสติกรูปแบบต่าง ๆ, ท่อทรงกระบอก ฯลฯ  
 ดังภาพ 27



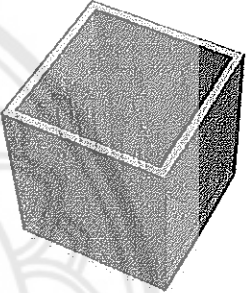
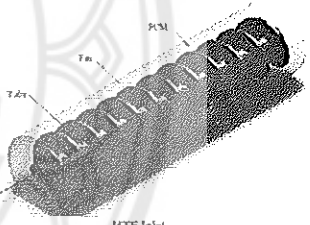
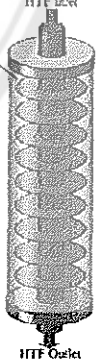
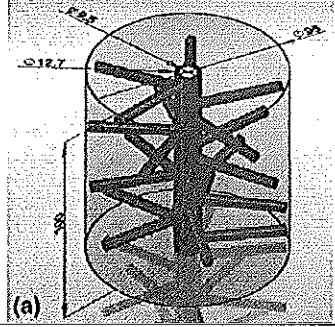
ภาพ 27 แสดงรูปแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะที่วางขายตามท้องตลาด

เพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง Jasim M. Mahdi et al. (2019, pp. 630 - 649) กล่าวว่าต้องมีการปรับปรุงการตอบสนองทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนในระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ มี 2 วิธีหลัก ๆ ได้แก่ การเพิ่มส่วนประกอบที่ช่วยใหเกิดการนำความร้อนได้ดีขึ้น เช่น ครัวโลหะ โฟมโลหะและท่อความร้อน และการปรับปรุงคุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์ เช่น การนำความร้อนจำเพาะและความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้สารเติมแต่งชนิดไมโครและนาโน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะด้วยการใช้ครัวระบาย

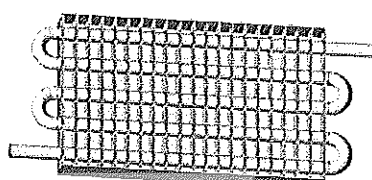


ความร้อน (Fin) เพิ่มเข้าไปในโครงสร้างของระบบ จะต้องคำนึงถึง รูปปร่าง ขนาด จำนวน และ ประเภทวัสดุของครีบบระบายความร้อน ซึ่งลักษณะของครีบบระบายความร้อนที่พบในงานวิจัยที่ได้ ทำการศึกษา มีอยู่ 5 รูปแบบ แสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 แสดงลักษณะความแตกต่างของครีบบระบายความร้อนที่ใช้ในสารเปลี่ยนสถานะ สำหรับกักเก็บความเย็น

ลักษณะ	กระบวนการ	การใช้งาน	แผนผัง
แบบกึ่งตามยาว (M. Sheikholeslami, 2016, pp. 154–166)	การแข็งตัว	แบบจำลอง	
แบบเกลียว (S.M. Borhani, 2019, pp. 297–314)	การหลอมละลาย	แบบจำลอง	
แบบวงแหวน (X. Yang, 2017, pp. 558–570)	การหลอมละลาย	แบบจำลอง	
แบบหมุด (N.H.S. Tay, 2013, pp. 79–86)	การหลอมละลาย	แบบจำลอง	

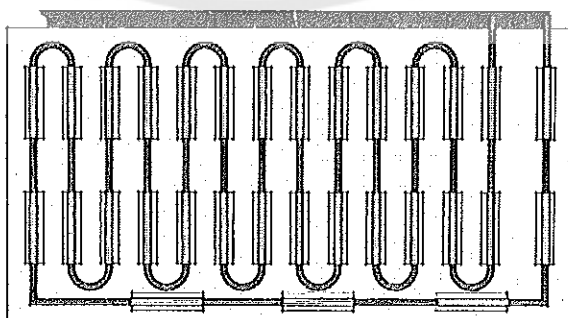
ตาราง 6 (ต่อ)

ลักษณะ	กระบวนการ	การใช้งาน	แผนผัง
แบบแผ่น (D. Li, 2019, pp. 712-722)	การหลอมละลาย และการแข็งตัว	แบบจำลอง และการทดลอง	

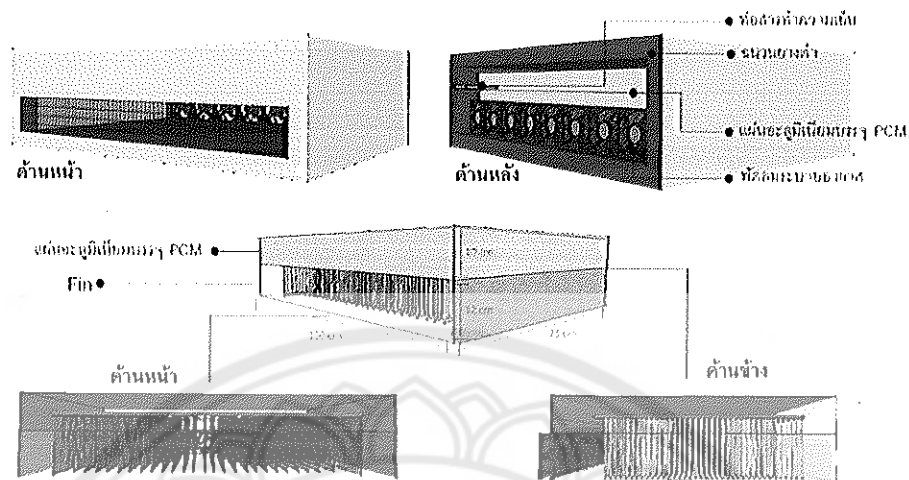
จากการทบทวนผลงานวิจัยเกี่ยวกับการนำสารเปลี่ยนสถานะไปประยุกต์ใช้งานสำหรับระบบระบายอากาศและปรับอากาศภายในอาคารที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการออกแบบชุดกักเก็บความเย็นของระบบกักเก็บความเย็นเบื้องต้นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่

#### 2.1 แนวคิดที่ 1: ชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง

สำหรับแนวคิดที่ 1 ในการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง เลือกใช้อะลูมิเนียมแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร ภายในกล่องใส่สารเปลี่ยนสถานะ ทำการเดินท่อสารทำความเย็นและยึดไว้ให้แนบสนิทกับผิวกล่องบรรจุ ด้านล่างกล่องบรรจุสารเปลี่ยนสถานะมีการติดครีบบระบายความร้อนแบบหมุน ด้านหลังทำการติดพัดลมเพื่อดึงความเย็นจากสารเปลี่ยนสถานะผ่านครีบบ วัสดุส่วนประกอบทั้งหมดไว้ด้วยกล่องอะลูมิเนียมที่มีการติดฉนวนกันความร้อน และด้านหน้ามีช่องสำหรับลมเย็นที่ได้จากสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพ 28 และ 29

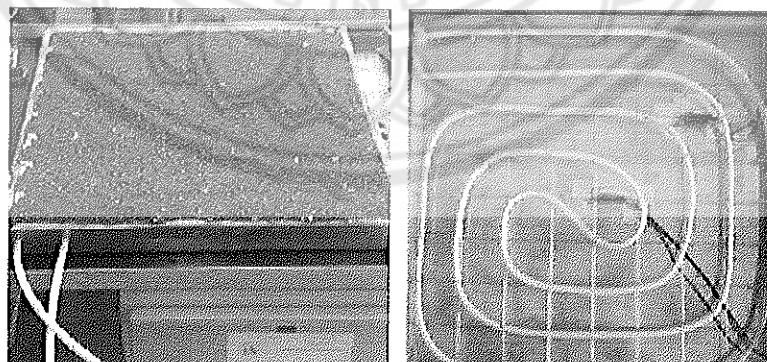


ภาพ 28 แสดงลักษณะการเดินท่อสารทำความเย็นของชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง



ภาพ 29 แสดงลักษณะโครงสร้างชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในกล่อง

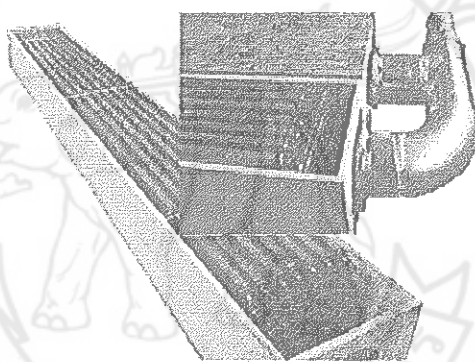
จากงานวิจัยของ R. Ansuini et al. (2011, pp. 3019 - 3026) ที่ได้ทำการทดลองสร้างพื้นที่ที่มีการใส่ท่อระบายความร้อนและบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในกล่องโลหะ ดังภาพ 30 เพื่อให้เกิดภาวะความสบายทางความร้อนในช่วงฤดูร้อนสำหรับห้องขนาด 16 ตารางเมตร ผลการวิจัยพบว่าสามารถรักษาอุณหภูมิห้องและช่วยประหยัดน้ำที่ใช้ในการระบายความร้อนได้ประมาณ 25%



ภาพ 30 แสดงระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดย Ansuini et al.  
 (ซ้าย) ภาพขณะโลหะที่มีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบเม็ด  
 (ขวา) ภายในภาชนะโลหะที่มีการใส่ท่อและตาข่ายโลหะรับน้ำหนัก

## 2.2 แนวคิดที่ 2: ชุดกักเก็บความเย็นแบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในท่อ

สำหรับแนวคิดในการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ในท่อ เลือกใช้วิธีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบท่อ 2 ชั้น (Double Tube) โดยท่อชั้นในจะเป็นท่อสารทำความเย็น และท่อชั้นนอกสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ F. Rouault et al. (2014, pp. 96 - 107) ได้ทำการศึกษาชุดกักเก็บพลังงานความร้อนแฝงที่มีลักษณะเป็นท่ออะลูมิเนียมบรรจุสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน (RT28 HC และ RT21) สำหรับระบายความร้อนในบ้านสองหลังและทำการวิเคราะห์ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการละลายของสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพ 31 โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น ท่อกลมชั้นในสำหรับสารทำความเย็น และท่อสี่เหลี่ยมชั้นนอกสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ

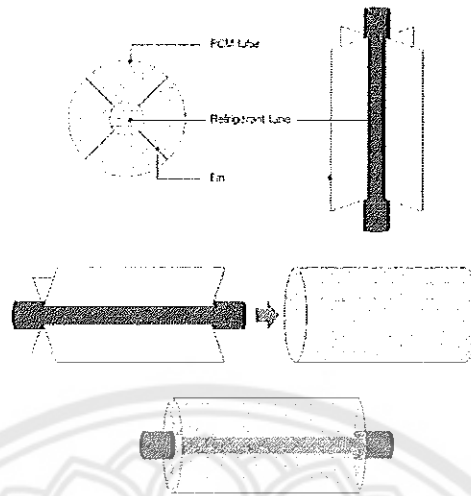


ภาพ 31 แสดงระบบกักเก็บความเย็นในท่อสี่เหลี่ยมที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะ โดย Rouault et al.

แนวคิดที่ 2 ชุดกักเก็บความเย็นแบบท่อกลม 2 ชั้น ท่อชั้นในมีขนาด 7 มิลลิเมตร สำหรับใส่สารทำความเย็น และท่อชั้นนอกสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะขนาด 14.65 มิลลิเมตร โดยมีแนวคิดในการใช้ครีบบะลูมิเนียมระบายความร้อน เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะที่บรรจุไว้ที่ท่อชั้นนอก แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

### 2.2.1 แบบติดครีบบนแผ่นตามยาวภายในท่อ

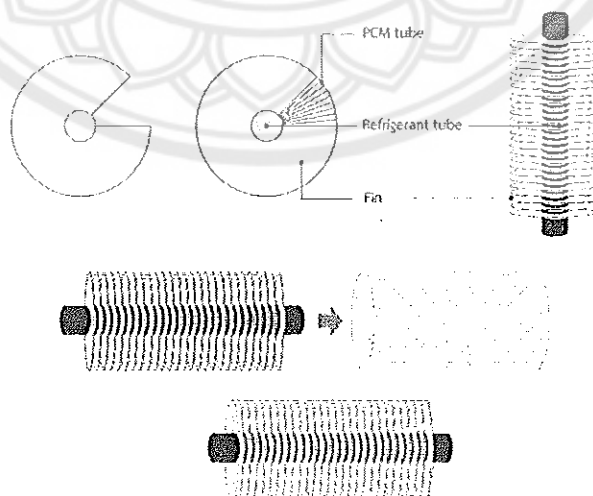
การติดครีบบนแผ่นตามยาวระหว่างผิวท่อชั้นในและท่อชั้นนอก โดยครีบบระบายความร้อนจะมีความยาวเท่ากับความยาวของท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ทำการติดครีบบนที่ผิวด้านนอกของท่อสารทำความเย็นจำนวนท่อละ 4 แผ่น แบ่งเป็น 4 มุมเท่า ๆ กัน ดังภาพ 32



ภาพ 32 แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบางแผ่นตามยาวภายในท่อ

### 2.2.2 แบบติดครีบบางวงแหวนภายในท่อ

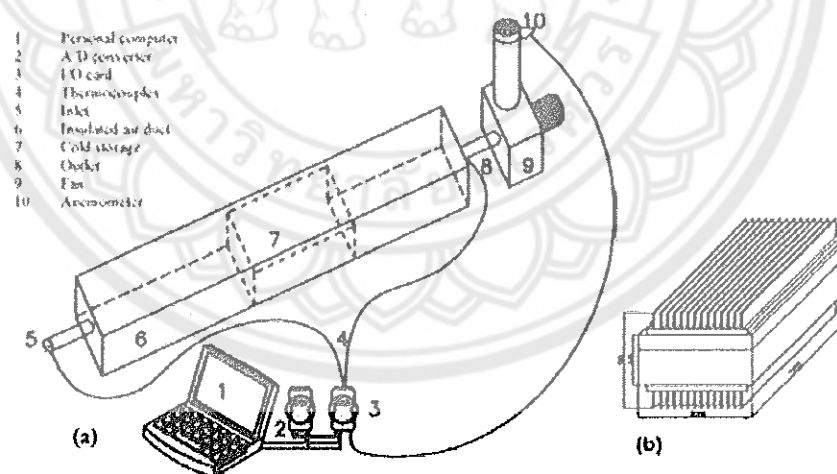
การติดครีบบางวงแหวนรอบผิวนอกของท่อสารทำความเย็น โดยครีบบางวงแหวนจะมีความร้อนแบบวงแหวนจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่งครีบบางวงแหวน 1 แผ่น จะถูกตัดออก 1 ใน 8 ส่วน เพื่อให้สามารถบรรจุสารเปลี่ยนสถานะลงไปให้เต็มท่อได้ ดังภาพ 33



ภาพ 33 แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบางวงแหวนภายในท่อ

### 2.2.3 แบบติดครีบบแบบแผ่น

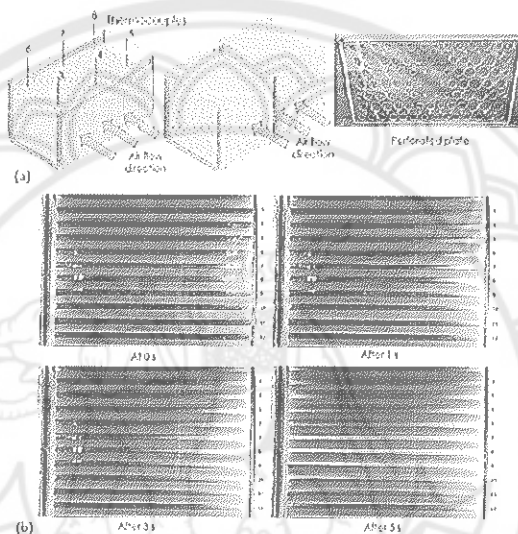
การติดครีบบระบายความร้อนแบบแผ่นโดยให้ท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น สอดผ่านครีบบแต่ละแผ่น จะไม่มีการติดครีบบภายในระหว่างท่อ 2 ชั้น และใช้พัดลมเป่าผ่านตามแนวยาวของครีบบเพื่อดึงความเย็นออกจากท่อสารเปลี่ยนสถานะ Stritih U., & Butala V. (2011, pp. 125–34) ได้ทำการทดลองเพื่อประเมินการถ่ายเทความร้อนภายในระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยมีลักษณะเป็นการระบายความร้อนแบบอิสระ ดังภาพ 34 โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ประมาณ 3.6 กิโลกรัม (RT20) ที่มีอุณหภูมิหลอมละลาย 22 องศาเซลเซียส ถูกวางไว้ในกล่องโลหะที่ออกแบบให้สะดวกสำหรับการนำเข้าไปในเพดานอาคาร ท่อโลหะถูกหุ้มฉนวนภายนอกเพื่อป้องกันการสูญเสียความเย็นโดยรอบ ซึ่งมีการใช้ครีบบอะลูมิเนียมทั้งภายในและภายนอก ทั้งด้านบนและด้านล่างของกล่องโลหะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อน ผลการทดลองและผลการสร้างแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศภายในอาคารลดลงจาก 27 องศาเซลเซียส เป็น 24 องศาเซลเซียส เป็นเวลา มากกว่า 2.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลอยู่ที่ 7.8 ลิตรต่ออนาที สามารถประหยัดพลังงานได้ประมาณ 14% ถึง 87%



ภาพ 34 แสดงระบบระบายอากาศแบบอิสระ โดย Stritih และ Butala (ซ้าย) การติดตั้ง การทดลอง (ขวา) ชุดกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะแบบมี fin

Osterman et al. (2015, pp. 138 - 49) ได้ทำการศึกษาเพื่อประเมินลักษณะการถ่ายเทความร้อนของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพ 35 สำหรับการทำ

ความเย็นในช่วงฤดูร้อนภายในอาคารแบบอิสระ โดยมีการใช้ solar collector สำหรับทำความร้อน ในช่วงฤดูหนาว โมดูลบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแผ่น (Compact Storage Modules: CSM) ถูกบรรจุด้วยสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน (RT 22HC) โดยทำการทดสอบลักษณะการไหลของอากาศทั้งในแนวตั้งและแนวนอน พบว่าช่วยลดความหนาของโมดูลเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเปลี่ยนสถานะ



ภาพ 35 แสดงรูปแบบและผลการทดสอบการไหลของระบบ โดย Osterman et al.

การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็น

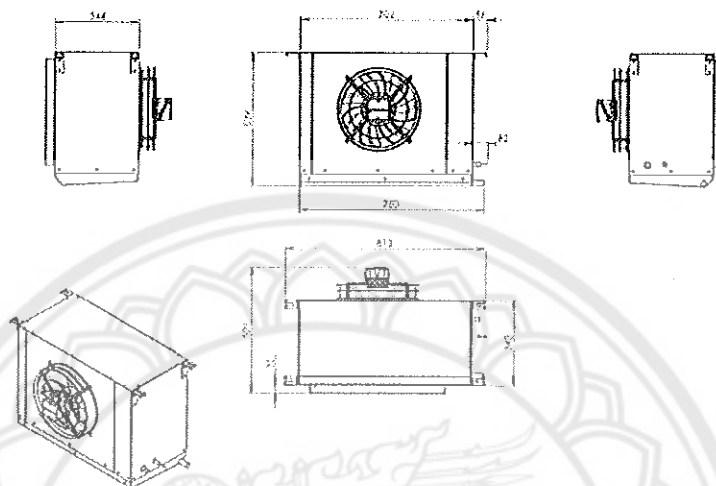
การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาพร้อมกับสารเปลี่ยนสถานะ จะพิจารณาถึงความสามารถในการกักเก็บและคายความเย็นของระบบ รวมถึงผลกระทบของระบบที่มีต่อโครงสร้างอาคารคอนกรีตมวลเบา โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

### 1. การออกแบบโครงสร้างระบบกักเก็บความเย็น

ระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ มีส่วนประกอบทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ Indoor Unit , Outdoor Unit และ ชุดกล่องควบคุม โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1.1 Indoor Unit หรือ ชุดคอยล์เย็น ซึ่งในระบบปรับอากาศทั่วไปจะทำหน้าที่ดูดซับความร้อนภายในห้อง และประกอบไปด้วย แผงคอยล์เย็น (Evaporator) และชุดมอเตอร์พัดลม แต่สำหรับระบบกักเก็บความเย็น ชุด Evaporator จะมีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น โดยท่อชั้นใน เป็นท่อสาร

ทำความเย็น (R410A) ยาวต่อเชื่อมกันทุกท่อ และท่อชั้นนอก เป็นท่อเดี่ยวสำหรับบรรจุน้ำมันเปลี่ยนสถานะ (PCM) ชุดคอยล์เย็นสำหรับระบบกักเก็บความเย็นจะมีลักษณะดังภาพ 36



ภาพ 36 แสดงขนาดของชุดคอยล์เย็นสำหรับระบบกักเก็บความเย็น

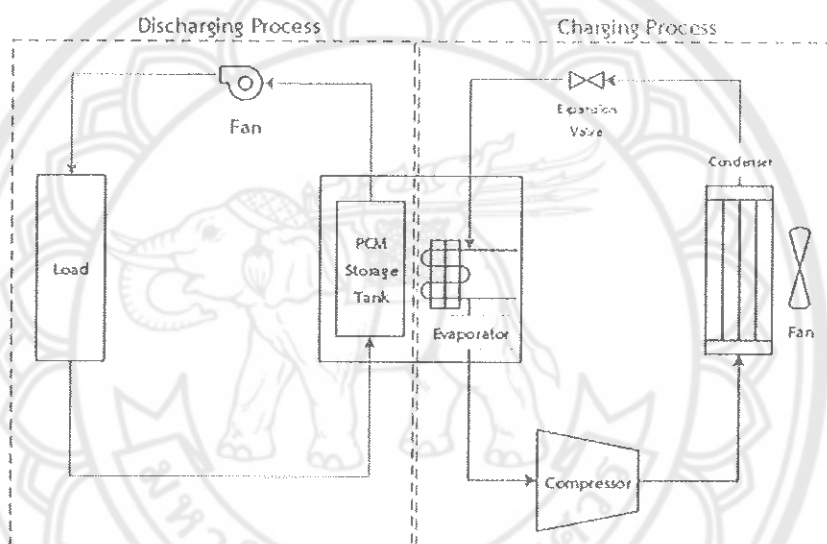
1.2 Outdoor Unit หรือ ชุดคอยล์ร้อน จะมีลักษณะเหมือนกับ Outdoor Unit ของระบบปรับอากาศทั่วไปที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนและระบายความร้อนให้กับชุดคอยล์เย็น ซึ่งภายใน Outdoor Unit จะประกอบด้วย แผงคอยล์ร้อน (Condenser) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) และชุดมอเตอร์พัดลม แต่สำหรับระบบกักเก็บความเย็นจะมี แอ็กคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) เพิ่มเข้ามา เนื่องจากการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นไม่เหมือนกับระบบปรับอากาศ จึงอาจทำให้มีสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลวไหลกลับเข้า Compressor ตัว Accumulator จึงมีหน้าที่ดักจับของเหลวที่ออกจาก Evaporator ดังนั้น Accumulator จะถูกติดตั้งไว้ระหว่าง Evaporator กับ Compressor

1.3 ชุดกล่องควบคุม จะทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานไฟฟ้าทั้งจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยภายในกล่องควบคุมจะประกอบไปด้วย ชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ (BLDC Compressor Driver) มิเตอร์ไฟฟ้า และเบรกเกอร์ ซึ่งชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ จะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current: AC) ที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค หรือไฟฟ้าบ้านทั่วไป และพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current: DC) ที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส จากนั้นจะทำการจ่ายไฟให้กับ Compressor



## 2. รูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็น

ระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญเหมือนกับระบบปรับอากาศทั่วไป แต่จะมีการทำงานที่แตกต่างกันเนื่องจากระบบกักเก็บความเย็นมีวัตถุประสงค์เพื่อทำความเย็นสะสมไว้ แล้วดึงความเย็นที่สะสมไว้มาใช้ในภายหลัง โดยระบบกักเก็บความเย็นจะมีการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง (Osterman E, 2015, pp. 125 - 33) ได้แก่ ช่วงการกักเก็บความเย็น (Charging Process) และ ช่วงการคายความเย็น (Discharging Process) ดังภาพ 37



ภาพ 37 แสดงการทำงานของระบบใน ช่วงการกักเก็บความเย็น

### การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร ซึ่งจะทำให้การทดสอบประสิทธิภาพของระบบออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

#### 1. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น

การทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วงการกักเก็บความเย็น หรือช่วง Charging Process จะเป็นช่วงที่ Compressor ทำงานเต็มประสิทธิภาพเพื่อทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นต่ำลงแล้วไปแลกเปลี่ยนความเย็นสะสมไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะ โดยในการทดสอบจะทำการปรับความถี่ของ Compressor ที่ทำการชาร์จความเย็นให้สารเปลี่ยนสถานะจนกว่าสารเปลี่ยนสถานะจะมีอุณหภูมิติดลบคงที่ ซึ่งจะทำให้การทดสอบทั้งหมด 5 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ความถี่ของ Compressor 90 เฮิรตซ์

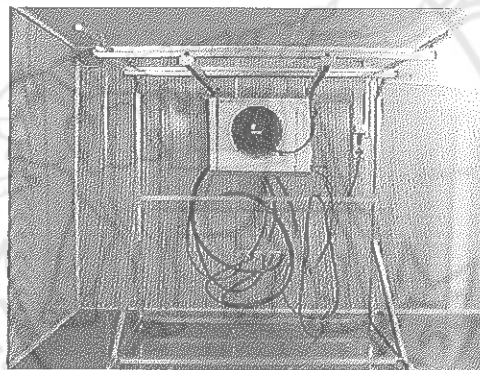
กรณีที่ 2 ความถี่ของ Compressor 70 เฮิรตซ์

กรณีที่ 3 ความถี่ของ Compressor 60 เฮิรตซ์

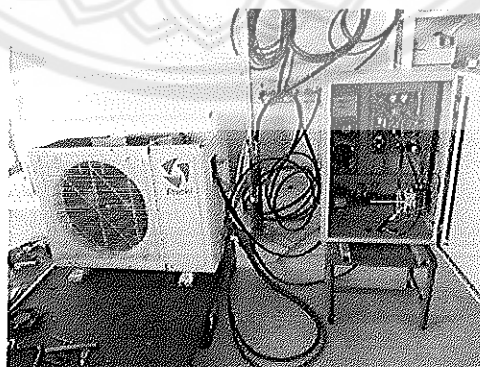
กรณีที่ 4 ความถี่ของ Compressor 50 เฮิรตซ์

กรณีที่ 5 ความถี่ของ Compressor 40 เฮิรตซ์

เมื่อทำการทดสอบครบทั้ง 5 กรณี จะทำการเลือกความถี่ของ Compressor ที่มีความเหมาะสมกับระบบกักเก็บความเย็นมากที่สุดมา 1 กรณี โดยจะพิจารณาจากความเสถียรในการทำงานของ Compressor ขณะทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อนำไปทดสอบในช่วง Discharging Process ต่อไป



ภาพ 38 แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process



ภาพ 39 แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process

## 2. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process

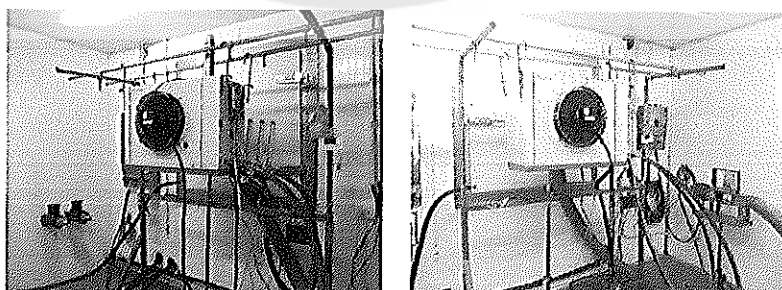
การทำงานของระบบก็เก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Discharging Process หรือช่วงการคายความเย็น จะเป็นช่วงที่ไม่มีการทำงานของ Compressor แต่จะเป็นการทำงานของพัดลมในชุด Indoor Unit แทน ซึ่งพัดลมจะทำหน้าที่ดึงความเย็นที่สะสมไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะออกมาใช้สำหรับการปรับอากาศภายในห้อง โดยทำการทดสอบในห้องปิดที่มีการควบคุมอุณหภูมิห้องและค่าความชื้น ในการทดสอบจะทำการปรับค่าความเร็วของพัดลมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดึงความเย็นจากสารเปลี่ยนสถานะ โดยจะดึงความเย็นจนกว่าสารเปลี่ยนสถานะ และลมเข้า - ลมออกระบบก็เก็บความเย็น มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิห้อง ในการปรับความเร็วของพัดลมสำหรับ Evaporator จะเป็นการปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) ของมอเตอร์พัดลม โดยใช้หม้อแปลงปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer) หรือ วาริแอกซ์ (Variac) จากเดิม 230 โวลต์ ความเร็วของพัดลม 1.90 เมตรต่อวินาที ผู้วิจัยได้ทำการปรับลง 1 ระดับ ที่ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า 196 โวลต์ มีความเร็วของพัดลมอยู่ที่ 1.56 เมตรต่อวินาที จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process ทั้งหมด 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วของพัดลม 1.90 เมตรต่อวินาที

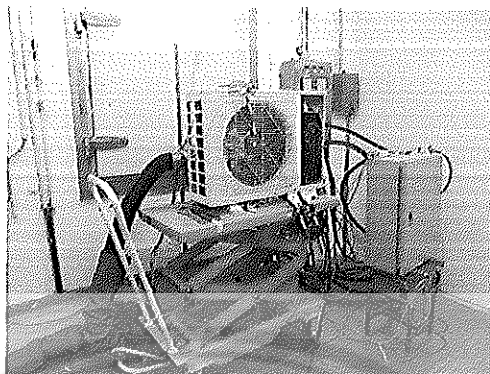
กรณีที่ 2 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วของพัดลม 1.56 เมตรต่อวินาที

กรณีที่ 3 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วของพัดลม 1.90 เมตรต่อวินาที

กรณีที่ 4 ที่อุณหภูมิแวดล้อม 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วของพัดลม 1.56 เมตรต่อวินาที



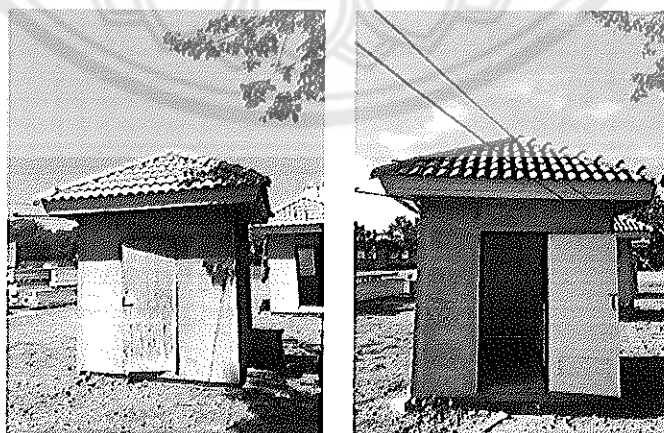
ภาพ 40 แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process



ภาพ 41 แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ในช่วง Discharging Process

### 3. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา

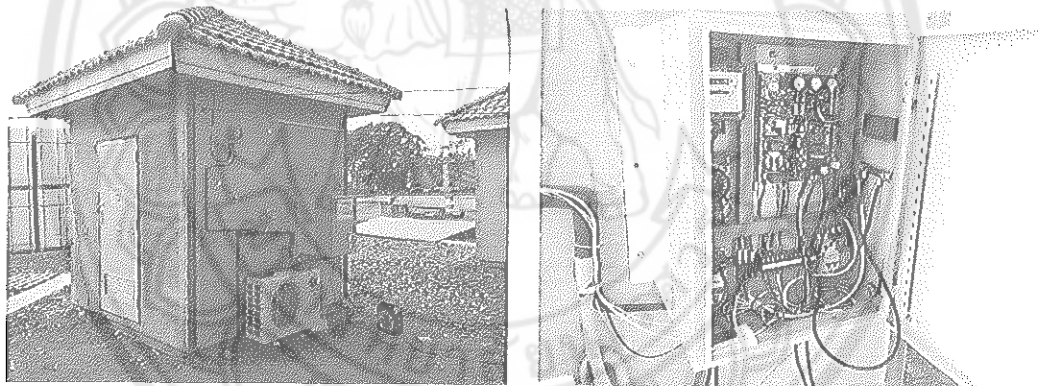
การนำระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะไปติดตั้งร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างแบบมีและไม่มีพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาที่มีอยู่แล้ว ณ บริษัท อินทรี ซูเปอร์บัส จำกัด จังหวัดสิงห์บุรี ก่อนทำการทดสอบได้ทำการปรับปรุงและซ่อมแซมอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ให้เหมาะสมสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพระบบกักเก็บความเย็น ดังภาพ 42 - 44



ภาพ 42 แสดงก่อนและหลังการปรับปรุงอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

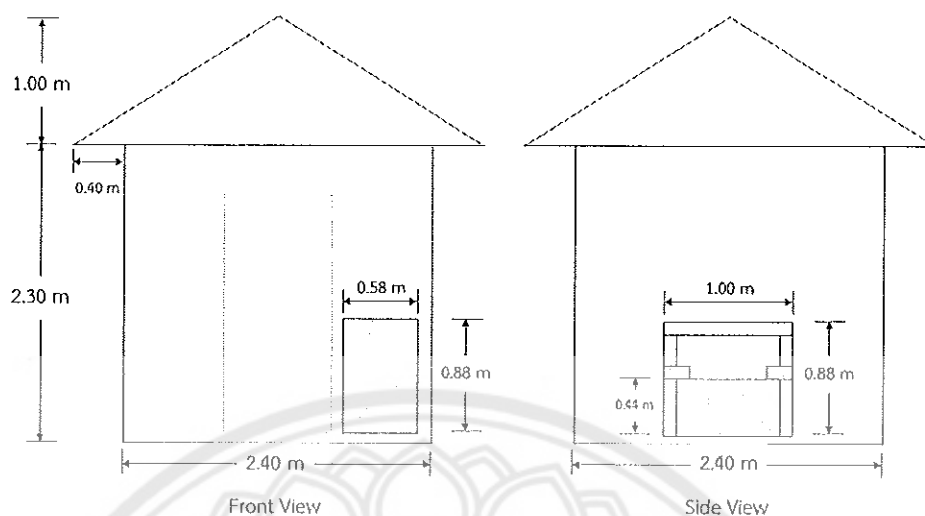


ภาพ 43 แสดงการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

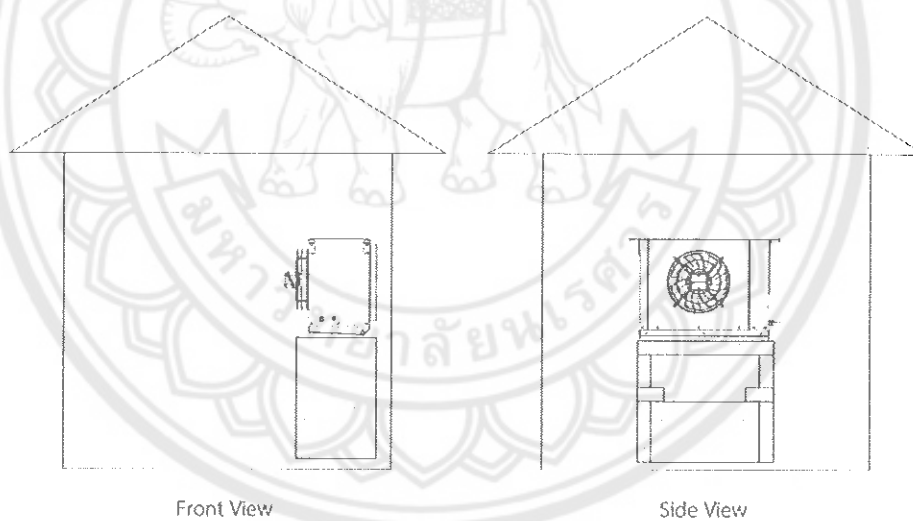


ภาพ 44 แสดงการติดตั้งชุด Outdoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

ในการติดตั้งชุด Indoor Unit สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบร่วมกับอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging - Discharging Process ทำการทดสอบด้วยการแขวน แต่โครงสร้างและพื้นที่ภายในของอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบาค่อนข้างจำกัดและไม่สามารถรับน้ำหนักของชุด Indoor Unit ได้ เนื่องจากชุด Indoor Unit มีน้ำหนักค่อนข้างมาก ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนจากการแขวนเป็นแบบตั้งไว้บนแท่นคอนกรีตมวลเบา โดยให้มีระยะกึ่งกลางห้องวัดจากพื้นและเพดานพอดี ดังภาพ 45 และ 46



ภาพ 45 แสดงขนาดและการวางตำแหน่งคอนกรีตมวลเบาสำหรับวางชุด Indoor Unit ในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านหน้าและด้านข้าง



ภาพ 46 แสดงการวางชุด Indoor Unit บนแท่นคอนกรีตมวลเบาในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านหน้าและด้านข้าง

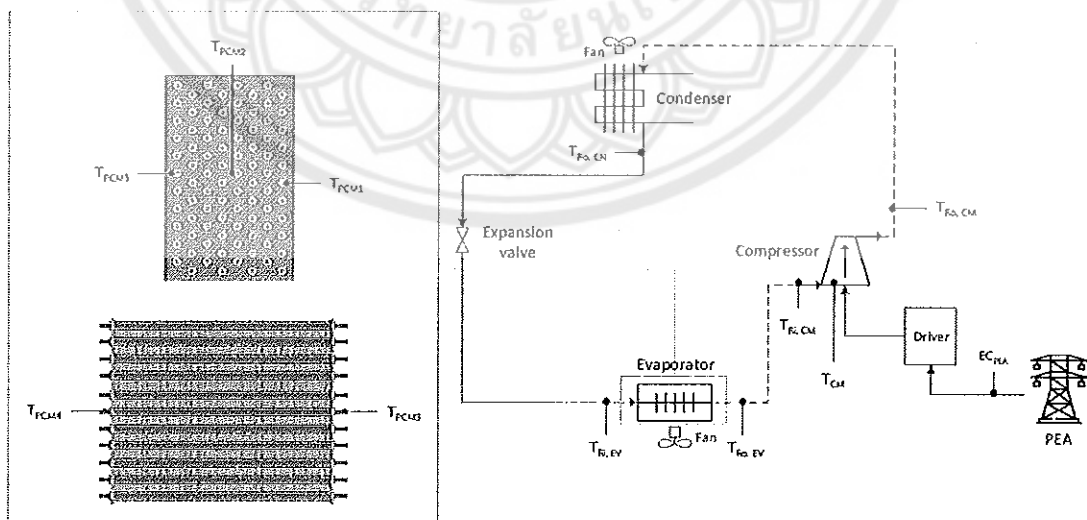
#### การบันทึกผลการวิจัย

การบันทึกผลการวิจัยเป็นการบันทึกค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคารแบบคอนกรีตมวลเบาพร้อมกับสารเปลี่ยนสถานะ ซึ่ง

ประกอบไปด้วย อุณหภูมิ แรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า ความเร็วลม และปริมาณการใช้ไฟฟ้าของระบบ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกค่าตัวแปรต่าง ๆ ในการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

### 1. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วงการกักเก็บความเย็น

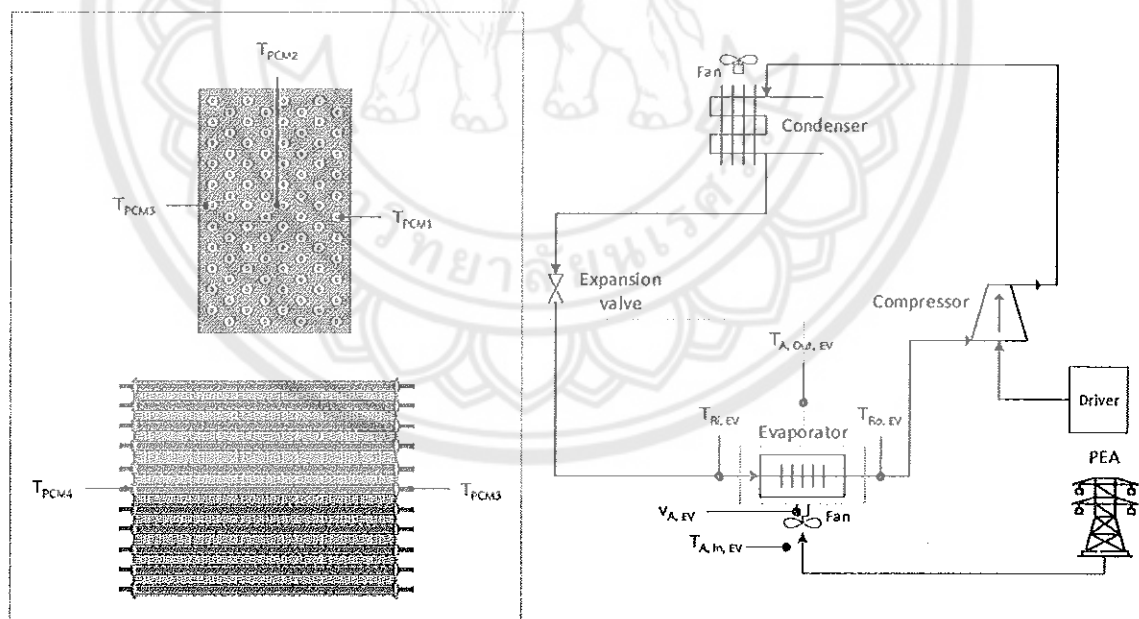
$T_{Ri, CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, CN}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Condenser ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ri, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของ Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM1}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 1 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM2}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 2 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM3}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 3 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM4}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 4 ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายใน Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	หมายถึง	อุณหภูมิภายในห้องทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{F, CN}$	หมายถึง	อุณหภูมิลมจากพัดลม Condenser ( $^{\circ}C$ )



ภาพ 47 แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Charging Process

## 2. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Discharging Process

$T_{Ri, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM1}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 1 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM2}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 2 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM3}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 3 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM4}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 4 ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายใน Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, In, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศขาเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, Out, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศขาออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$V_{A, EV}$	หมายถึง	ค่าความเร็วลมของอากาศขาออก Evaporator (m/s)



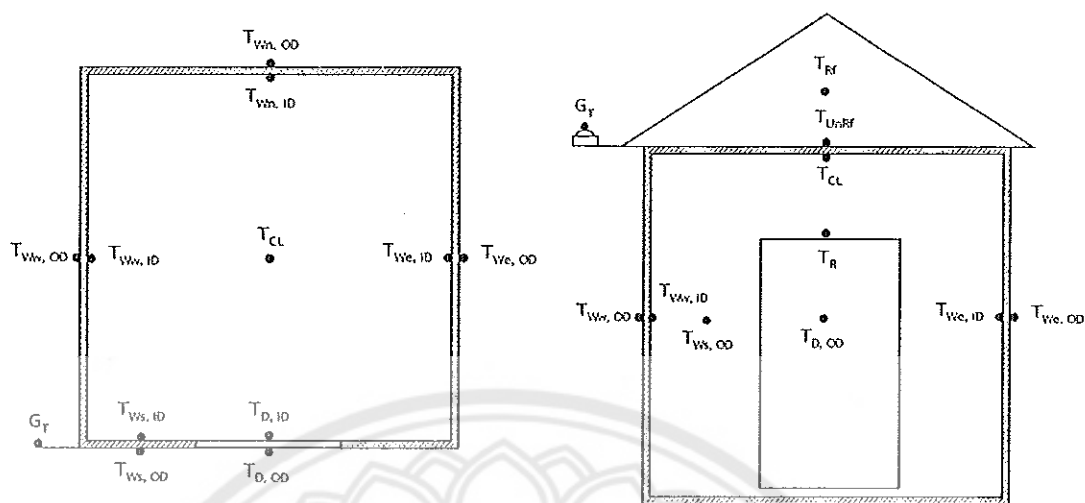
ภาพ 48 แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Discharging Process



### 3. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา

#### 3.1 การทดสอบภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

$T_{Wn, OD}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายนอกอาคารทดสอบทางทิศเหนือ ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ws, OD}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายนอกอาคารทดสอบทางทิศใต้ ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ww, OD}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายนอกอาคารทดสอบทางทิศตะวันตก ( $^{\circ}C$ )
$T_{We, OD}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายนอกอาคารทดสอบทางทิศตะวันออก ( $^{\circ}C$ )
$T_{Wn, ID}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายในอาคารทดสอบทางทิศเหนือ ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ws, ID}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายในอาคารทดสอบทางทิศใต้ ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ww, ID}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายในอาคารทดสอบทางทิศตะวันตก ( $^{\circ}C$ )
$T_{We, ID}$	หมายถึง	อุณหภูมิผนังภายในอาคารทดสอบทางทิศตะวันออก ( $^{\circ}C$ )
$T_{D, OD}$	หมายถึง	อุณหภูมิผิวประตูภายนอกอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{D, ID}$	หมายถึง	อุณหภูมิผิวประตูภายในอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{CL}$	หมายถึง	อุณหภูมิเพดานอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{UnRf}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศใต้หลังคาอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{Rf}$	หมายถึง	อุณหภูมิหลังคาอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_A$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$G_T$	หมายถึง	ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

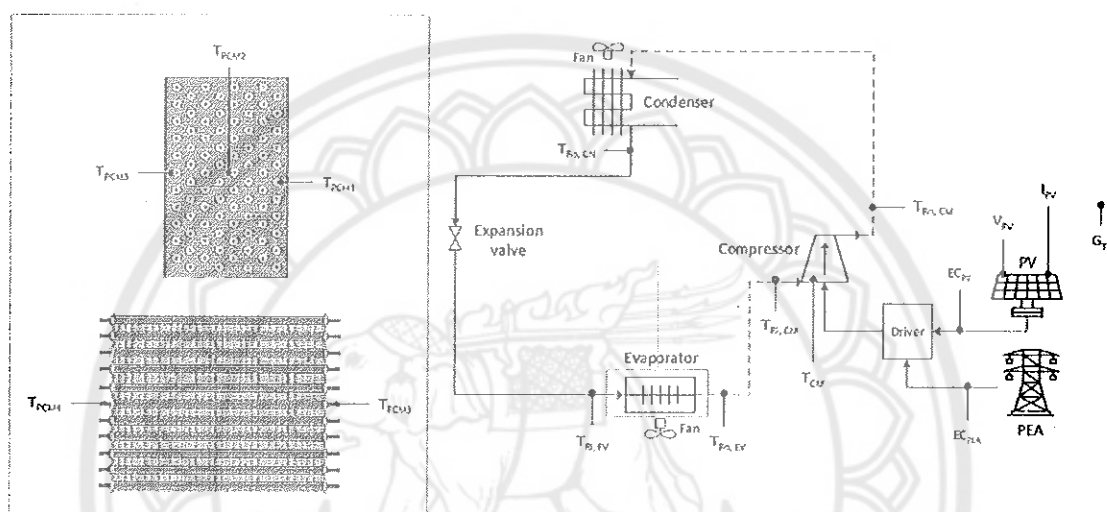


ภาพ 49 แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา มุมมองด้านบนและด้านหน้า ตามลำดับ

### 3.2 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ

$T_{Ri, CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, CN}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Condenser ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ri, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{Ro, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{CM}$	หมายถึง	อุณหภูมิของ Compressor ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM1}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 1 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM2}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 2 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM3}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 3 ( $^{\circ}C$ )
$T_{PCM4}$	หมายถึง	อุณหภูมิของท่อสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 4 ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิภายใน Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_R$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ ( $^{\circ}C$ )
$T_{F, CN}$	หมายถึง	อุณหภูมิilm จากพัดลม Condenser ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, In, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศขาเข้า Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$T_{A, Out, EV}$	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศขาออก Evaporator ( $^{\circ}C$ )
$V_{A, EV}$	หมายถึง	ค่าความเร็วลมของอากาศขาออก Evaporator (m/s)

$EC_{PEA}$	หมายถึง ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (kWh)
$G_T$	หมายถึง ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )
$EC_{PV}$	หมายถึง ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)



ภาพ 50 แสดงตำแหน่งการบันทึกค่าตัวแปรในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ กักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบาช่วง Charging Process

#### การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ เป็นการนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการบันทึกไว้มาวิเคราะห์และคำนวณด้วยสมการของปริมาณทางด้านพลังงานที่เราต้องการศึกษา โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพิจารณาปริมาณทางด้านพลังงานเบื้องต้นก่อนทำการติดตั้งระบบกักเก็บความเย็น และปริมาณทางด้านพลังงานที่มีผลต่อการปรับอากาศหลังจากทำการติดตั้งระบบกักเก็บความเย็นภายในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา ดังต่อไปนี้

#### 1. อัตราการทำงานความเย็น

$$\dot{Q}_{\text{comp}} = \dot{m}_a (h_{a0} - h_{a1}) \quad (35)$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{\text{comp}}$	คือ	อัตราการทำความเย็นของ Compressor (W)
	$\dot{m}_a$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)
	$h_{ao}$	คือ	ค่าเอนทาลปีของอากาศขาออกจาก condenser (kJ/kg)
	$h_{ai}$	คือ	ค่าเอนทาลปีของอากาศขาเข้า condenser (kJ/kg)

## 2. ประสิทธิภาพการกักเก็บความเย็น

$$\eta_{C,\text{Charg}} = \frac{\dot{Q}_{\text{pcm}}}{\dot{Q}_R} \times 100 \quad (36)$$

โดยที่

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_R (h_{Ro} - h_{Ri}) \quad (37)$$

เมื่อ	$\eta_{C,\text{Charg}}$	คือ	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงการกักเก็บความเย็นของระบบ (%)
	$\dot{Q}_{\text{pcm}}$	คือ	อัตราการกักเก็บความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะ (W)
	$\dot{Q}_R$	คือ	อัตราการถ่ายเทพลังงานของสารทำความเย็น (W)
	$\dot{m}_R$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
	$h_{Ro}$	คือ	ค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็นขาออกจากชุด evaporator (kJ/kg)
	$h_{Ri}$	คือ	ค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็นขาเข้าชุด evaporator (kJ/kg)

## 3. ประสิทธิภาพการคายความเย็น

$$\eta_{C,\text{Discharg}} = \frac{\dot{Q}_{\text{cs,discharg}}}{\dot{Q}_{\text{pcm}}} \times 100 \quad (38)$$

เมื่อ	$\eta_{C,\text{Discharg}}$	คือ	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนช่วงการคายความเย็นของระบบ (%)
-------	----------------------------	-----	---

$\dot{Q}_{cs,discharg}$	คือ	อัตราการคายความร้อนของ PCM-CSS (W)
$\dot{Q}_{pcm}$	คือ	อัตราการกักเก็บความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ (W)

#### 4. สมรรถนะการทำความเย็น

$$COP = \frac{\dot{m}_R(\Delta h_{Ro})}{\dot{m}_R(\Delta h_{Ri})} \quad (39)$$

เมื่อ	COP	คือ	สัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็น (W/W)
	$\dot{m}_R$	คือ	อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น (kg/s)
	$\Delta h_{Ro}$	คือ	ผลต่างค่าเอนทาลปีด้านทำความเย็น (kJ/kg)
	$\Delta h_{Ri}$	คือ	ผลต่างค่าเอนทาลปีด้าน Compressor (kJ/kg)

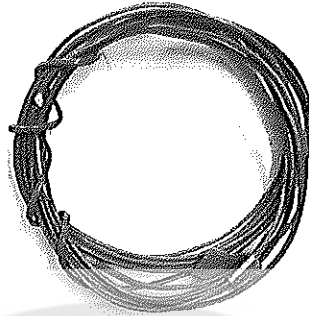
#### 5. อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน

$$EER = \frac{Q}{W} \quad (40)$$

เมื่อ	EER	คือ	อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Btu/hr.)/W
	Q	คือ	ขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิ (Btu/hr.)
	W	คือ	กำลังไฟฟ้าของระบบทำความเย็น (W)

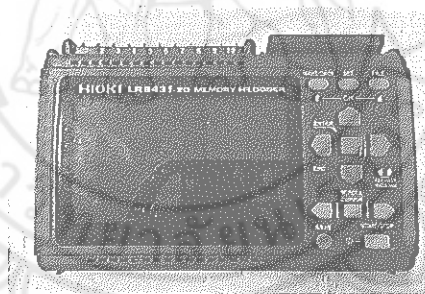
#### อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

1. สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดเค สำหรับการวัดอุณหภูมิและค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ในการทดลองแสดงผลเป็นองศาเซลเซียสและวัตต์ต่อตารางเมตร สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -270 ถึง 1,372 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 2.2$  องศาเซลเซียส หรือ  $\pm 0.75\%$  (REOTEMP Instrument Corporation, 2011) ต่อเข้ากับช่องสัญญาณของเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ



ภาพ 51 แสดงสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิดเค

2. เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger) เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งสามารถบันทึกข้อมูลได้หลายรูปแบบ เช่น อุณหภูมิ แรงดันไฟฟ้าฯ มีช่องสัญญาณจำนวน 10-ช่องสัญญาณ ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR8431-20 ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ เช่น อุณหภูมิ ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ เป็นต้น



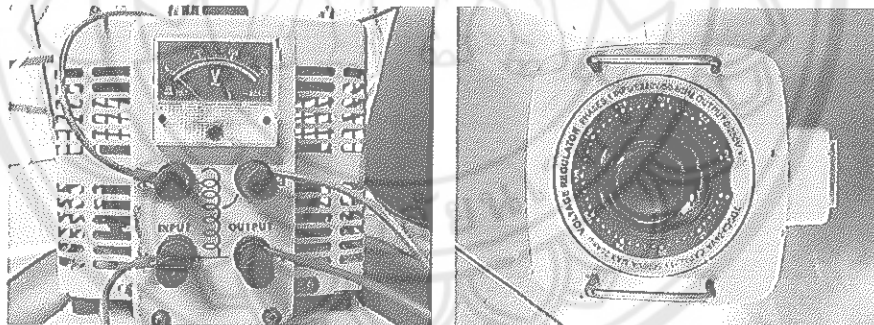
ภาพ 52 แสดงเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger)

3. ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ใช้สำหรับวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์รวม ยี่ห้อ ZONEN รุ่น CM6B มีค่า sensitivity เท่ากับ 9.92 ไมโครโวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร โดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ



ภาพ 53 แสดงไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

4. หม้อแปลงแบบปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer) หรือวาริแอกซ์ (Variac) เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้าแรงเสถียรจากวงจรหนึ่ง ไปยังอีกวงจรหนึ่ง ส่วนมากจะใช้เพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Voltage) ให้มีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้น จากเดิม โดยยังมีความถี่ไฟฟ้าเท่าเดิม ใช้ในการปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า เพื่อปรับค่าความเร็วของพัดลมในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process



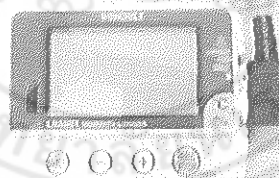
ภาพ 54 แสดงหม้อแปลงแบบปรับค่าได้ (Variable Voltage Transformer)

5. เครื่องวัดค่าความเร็วลมแบบใบพัด (Windmill Anemometer) สำหรับวัดความเร็วลมของพัดลม Evaporator ยี่ห้อ TENMARS รุ่น TM-740 โดยสามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิของลมที่ไหลผ่าน



ภาพ 55 แสดงเครื่องวัดค่าความเร็วลมแบบใบพัด (Windmill Anemometer)

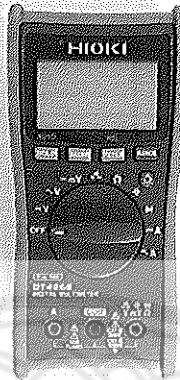
6. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR5001 เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม



ภาพ 56 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม (Humidity Logger)

7. เครื่องวัดมัลติมิเตอร์แบบดิจิทัล ยี่ห้อ HIOKI รุ่น DT4252 มีความแม่นยำ  $\pm 0.4\%$  หน้าจอแบบ LCD พร้อม Back light สำหรับดูบาร์กราฟ มีฟังก์ชัน Min/ Max และ ฟังก์ชัน Hold ค้างหน้าจอ USB Interface วัดแรงดัน AC-DC สูงสุด 1,000 โวลต์





ภาพ 57 แสดงดิจิตัลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็น ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคหรือไฟบ้านร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นตัวกักเก็บพลังงานไว้ในรูปแบบความเย็นทดแทนการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งข้อดีของสารเปลี่ยนสถานะคือสามารถกักเก็บได้ทั้งพลังงานในรูปแบบของความร้อนและความเย็น โดยเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนสารเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้อยมาก ขณะที่กักเก็บพลังงานความร้อนสารเปลี่ยนสถานะจะมีลักษณะเป็นของเหลว และขณะที่กักเก็บพลังงานความเย็นสารเปลี่ยนสถานะก็จะมีลักษณะเป็นของแข็ง โดยมีรูปแบบของการศึกษาทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ การใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว กับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

โดยได้ทำการศึกษาระบบกักเก็บความเย็นทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ส่วนที่ 2 ประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process ณ ห้องทดสอบของ บริษัท บีทีวี่ส์(ประเทศไทย) จำกัด ตามมาตรฐานห้องทดสอบ ISO 17025 จังหวัดสมุทรปราการ และส่วนที่ 3 ทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา ณ บริษัท อินทรี ซุปเปอร์บิลด์ จำกัด จังหวัดสิงห์บุรี โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์

**ผลการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ**

#### 1. การคัดเลือกสารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะแต่ละประเภทจะแบ่งออกเป็นหลายชนิด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะชนิดนั้น ๆ ซึ่งประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น สภาพอากาศจะร้อนอบอ้าว และมีอุณหภูมิสูงสุด – ต่ำสุดเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ 40 และ 25 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยในช่วงฤดูร้อนสภาวะความสบาย (Thermal Comfort) ของมนุษย์จะอยู่ระหว่าง 23

ถึง 27 องศาเซลเซียส (ASHRAE, 2015) เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนที่เพียงพอต่อโหลดความร้อน อุณหภูมิหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะควรมีอุณหภูมิต่างจากอุณหภูมิอากาศประมาณ 3 ถึง 5 องศาเซลเซียส แสดงว่าอุณหภูมิหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะควรอยู่ระหว่าง 19 ถึง 24 องศาเซลเซียส (Nattaporn Chaiyat, 2015, pp. 150 - 158)

ซึ่งจากตาราง 3 และ 4 จะพบว่าสารเปลี่ยนสถานะประเภท Inorganics และ Eutectics ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในระบบกักเก็บความเย็นเนื่องจาก สารเปลี่ยนสถานะประเภท Inorganics ไม่เหมาะสมในด้านกายภาพและเคมี เพราะมีฤทธิ์กัดกร่อนเหล็ก มีการเกิด Supercooling และมีการแยกเฟส ส่วนสารเปลี่ยนสถานะประเภท Eutectics ไม่เหมาะสมในด้านเศรษฐศาสตร์ เพราะมีราคาที่สูง ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภท Organics ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะอยู่ระหว่าง 19 ถึง 24 องศาเซลเซียส เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในระบบกักเก็บความเย็น โดยมีสมบัติเบื้องต้นแสดงดังตาราง 7

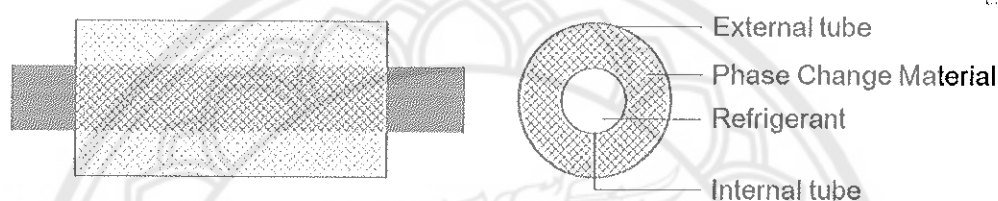
ตาราง 7 แสดงสมบัติเบื้องต้นของสารเปลี่ยนสถานะที่นำมาใช้ในระบบกักเก็บความเย็น

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ประเภทของ PCM	พาราฟิน
อุณหภูมิหลอมเหลว, ของเหลว ( $^{\circ}\text{C}$ )	22
อุณหภูมิเยือกแข็ง, ของแข็ง ( $^{\circ}\text{C}$ )	18
ค่าความหนาแน่น ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	636
ค่าความร้อนแฝง ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	220
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ( $\text{kJ}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ )	3.22
ค่าการนำความร้อน, ของเหลว ( $\text{W}/\text{mK}$ )	0.74
ค่าการนำความร้อน, ของแข็ง ( $\text{W}/\text{mK}$ )	0.93
การดูดซับพลังงาน (ละลาย) ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	492.80
การคายพลังงาน (แข็งตัว) ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )	498.55

## 2. การเลือกให้รูปแบบชุดกักเก็บความเย็น

ในการนำสารเปลี่ยนสถานะมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการระบายอากาศหรือการปรับอากาศภายในอาคาร จำเป็นต้องมีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในภาชนะหรือวัสดุที่สามารถป้องกันการรั่วไหล และการติดไฟของสารเปลี่ยนสถานะได้ อีกทั้งยังต้องเป็นภาชนะหรือวัสดุที่

แข็งแรงทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและสามารถนำความร้อนได้ดี เพื่อช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็น กับสารเปลี่ยนสถานะ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะได้ โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบท่อกลม 2 ชั้น แบบ Module beam (Cylindrical) ดังภาพ 58 เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและสารเปลี่ยนสถานะได้อย่างสม่ำเสมอ โดยจะทำการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะไว้ที่ท่อชั้นนอก และใช้ท่อชั้นในเป็นท่อสำหรับสารทำความเย็น



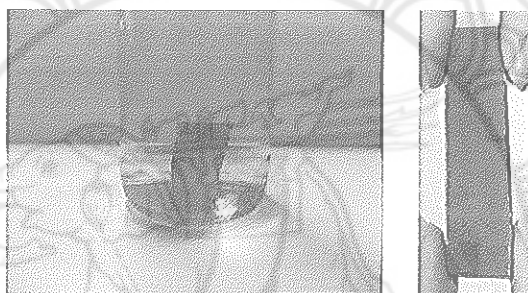
ภาพ 58 แสดงชุด Evaporator แบบท่อ 2 ชั้น

จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพการกัดกร่อนระหว่างสารเปลี่ยนสถานะกับวัสดุทั้ง 6 ประเภท ได้แก่ ทองแดง อะลูมิเนียม สแตนเลส สังกะสี เหล็กเคลือบ และเหล็ก เพื่อเลือกใช้ประเภทของท่อสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ โดยได้ทำการนำชิ้นส่วนของวัสดุทั้ง 6 ประเภท ไปแช่ไว้ในขวดแก้วที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุอยู่ ดังภาพ 59 จากนั้นทำการปิดฝาและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์

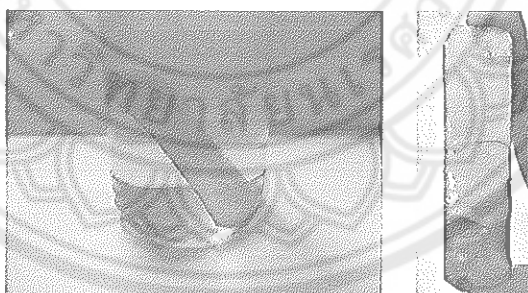


ภาพ 59 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพการกัดกร่อนระหว่างสารเปลี่ยนสถานะกับวัสดุทั้ง 6 ประเภท

จากการทดสอบประสิทธิภาพการกักต้อนระหว่างสารเปลี่ยนสถานะกับวัสดุทั้ง 6 ประเภท พบว่าสารเปลี่ยนสถานะไม่มีฤทธิ์กักต้อนวัสดุทั้ง 6 ประเภท แต่มีปฏิกิริยากับวัสดุที่มีสารเคลือบผิวอยู่ได้แก่ ทองแดงและเหล็กเคลือบ ซึ่งจากภาพ 60 และ 61 จะเห็นได้ว่าเมื่อสารเปลี่ยนสถานะทำปฏิกิริยากับสารเคลือบทองแดงจะทำให้เกิดเมือกสีเขียวเกาะอยู่บริเวณผิวของชิ้นวัสดุทองแดง ในขณะที่สารเปลี่ยนสถานะทำปฏิกิริยากับสารเคลือบเหล็กจะทำให้เกิดเมือกสีขาวขุ่นเกาะอยู่บริเวณผิวของชิ้นวัสดุเหล็กเคลือบ แต่เมื่อทำการเข็ดออกจะเห็นได้ว่าสารเปลี่ยนสถานะไม่ได้ทำการกักต้อนตัววัสดุให้เกิดการเสียหาย เพียงแต่ทำให้สารที่เคลือบอยู่บนผิววัสดุประเภททองแดงและเหล็กหลุดออกมา



ภาพ 60 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเปลี่ยนสถานะและสารเคลือบผิวทองแดง



ภาพ 61 แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเปลี่ยนสถานะและสารเคลือบผิวเหล็ก

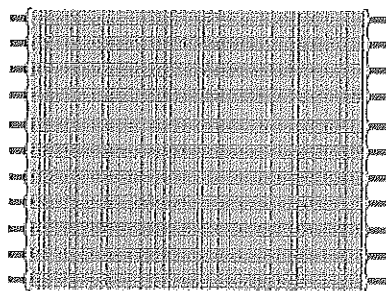
ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกักต้อนระหว่างสารเปลี่ยนสถานะกับวัสดุทั้ง 6 ประเภท สามารถสรุปได้ว่าสารเปลี่ยนสถานะไม่มีฤทธิ์กักต้อนวัสดุทั้ง 6 ประเภท เพียงแต่เกิดปฏิกิริยากับสารเคลือบผิวของวัสดุประเภททองแดงและเหล็กเท่านั้น ซึ่งไม่ได้มีผลต่อตัววัสดุ ทำให้สามารถยอมรับได้ จึงทำการเลือกใช้ประเภทของท่อสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะโดยพิจารณาจากค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุทั้ง 5 ชนิด (สังกะสี, ทองแดง,

สแตนเลส, อะลูมิเนียม และเหล็ก) แสดงดังตาราง 8 จะเห็นได้ว่าวัสดุประเภททองแดงมีค่าการนำความร้อนสูงที่สุดอยู่ที่ 386.0 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน โดยวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุดได้แก่ สแตนเลส มีค่าเท่ากับ 16.5 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะเพิ่มมากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะประเภททองแดง เพื่อช่วยให้กระบวนการกักเก็บและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ตาราง 8 แสดงเปรียบเทียบค่าการนำความร้อนของวัสดุทั้ง 5 ชนิด

ประเภท	ค่าการนำความร้อน (W/mK)
สังกะสี	112.2
ทองแดง	386.0
สแตนเลส	16.5
อะลูมิเนียม	204.0
เหล็ก	73.0

สำหรับการเลือกใช้รูปแบบครีบบระบายความร้อน ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้ครีบบระบายความร้อนแบบแผ่น ดังที่แสดงในตาราง 5 จะเห็นได้ว่าครีบบระบายความร้อนรูปแบบอื่นยังไม่มี การนำมาสร้างระบบเพื่อทดลองจริง เป็นเพียงแค่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่านั้น เนื่องจากครีบบระบายความร้อนแบบแผ่นเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการปรับอากาศ สามารถหาได้ง่าย และมีกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนการสร้างระบบกักเก็บความเย็นได้ โดยลักษณะของชุดกักเก็บความเย็นสำหรับระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ จะมีลักษณะแสดงดังภาพ 62



ภาพ 62 แสดงลักษณะท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบ 2 ชั้น แบบติดครีบบแบบแผ่น

## ผลการดำเนินการสร้างระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ

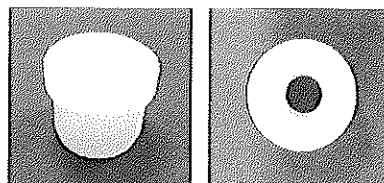
ผู้วิจัยได้ดำเนินการสร้างระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ภายใต้การกำกับดูแล และแนะนำของบุคลากรผู้เชี่ยวชาญด้านระบบปรับอากาศของ บริษัท บีทีวี่ส์ (ประเทศไทย) จำกัด โดยมีผลแสดงดังต่อไปนี้

### 1. โครงสร้างระบบกักเก็บความเย็น

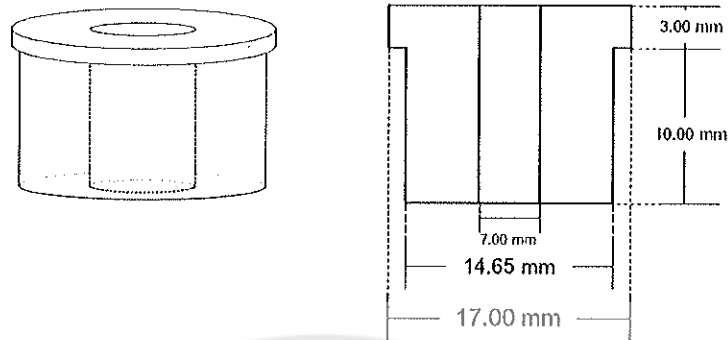
#### 1.1 Indoor Unit

Indoor Unit ของระบบกักเก็บความเย็นแบบท่อทองแดง 2 ชั้น โดยใช้ท่อชั้นนอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.88 มิลลิเมตร ใช้สำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ (PCM) และท่อชั้นใน เป็นท่อสารทำความเย็น (R410A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.00 มิลลิเมตร ซึ่งจำนวนของชุดท่อทองแดงแบบ 2 ชั้น ที่ต้องใช้สำหรับ Indoor Unit จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่ต้องบรรจุไว้ในชุดกักเก็บความเย็น โดยปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่ต้องบรรจุไว้ในชุดกักเก็บความเย็นจะขึ้นอยู่กับปริมาณโหลดความร้อนหรือภาระการทำความเย็น (Cooling Load) ในช่วงเวลากลางคืน (20.00 – 06.00 น.) ของอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา โดยบ้านอาคารทดสอบมีภาระการทำความเย็นอยู่ที่ประมาณ 2,368.67 กิโลจูล หรือคิดเป็น 2,245.06 Btu/hr. ซึ่งจากตาราง 6 สารเปลี่ยนสถานะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานเท่ากับ 492.80 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ดังนั้น ปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่ต้องบรรจุไว้ในชุดกักเก็บความเย็นอยู่ที่ประมาณ 4.81 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 7.56 ลิตร

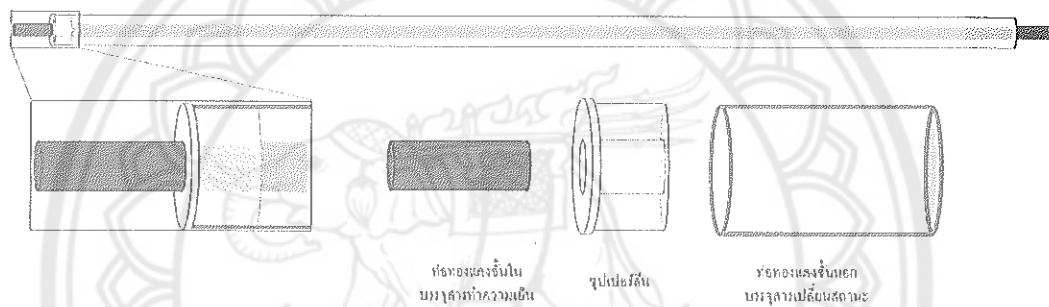
ในการปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ซูเปอร์ลี้น (Superlean) ที่เป็นพลาสติกวิศวกรรมชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นวัตถุทึบแสง สีขาวใส สามารถปรับขนาดให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยได้นำไปกลึงให้เป็นทรงกระบอกกลวงสูง 13 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 มิลลิเมตร สำหรับใส่ท่อสารทำความเย็น และให้ขอบนอกของซูเปอร์ลี้นปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะได้พอดี ซึ่งขนาดและลักษณะจริงของซูเปอร์ลี้นแสดงดังภาพ 63 และ 64 โดยใช้ซูเปอร์ลี้นปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะเพียงแค่อันเดียว และอีกด้านจะทำการเชื่อมปิดด้วยทองแดง ดังภาพ 65 เพื่อลดการสูญเสียปริมาตรในการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ



ภาพ 63 แสดงลักษณะจริงของซูเปอร์ลี้นสำหรับปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะ



ภาพ 64 แสดงขนาดของซูปเปอร์ลินสำหรับปิดท่อสารเปลี่ยนสถานะ



ภาพ 65 แสดงลักษณะของท่อ 2 ชั้น ในชุด Evaporator

ตาราง 9 แสดงเปรียบเทียบการเลือกให้ความยาวและจำนวนท่อของชุดกักเก็บความเย็น

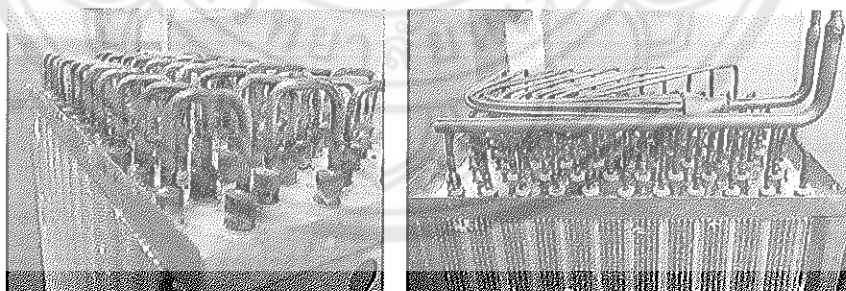
ปริมาณ PCM (L)	ความยาวท่อ (mm)		ปริมาณบรรจุ PCM/ท่อ		จำนวนท่อ
	non superlean	superlean	(ml)	(L)	
7.56	1000	990	157.98	0.16	48
	950	940	150.00	0.15	51
	900	890	142.02	0.14	54
	850	840	134.04	0.13	57
	800	790	126.06	0.13	60
	750	740	118.08	0.12	64
	700	690	110.11	0.11	69
	650	640	102.13	0.10	74



ตาราง 9 (ต่อ)

ปริมาณ PCM (L)	ความยาวท่อ (mm)		ปริมาณบรรจุ PCM/ท่อ		จำนวนท่อ
	non superlean	superlean	(ml)	(L)	
7.56	600	590	94.15	0.09	81
	550	540	86.17	0.09	88
	500	490	78.19	0.08	97

จากตาราง 9 จะเห็นได้ว่าความยาวของท่อมีผลต่อจำนวนท่อที่ใช้ในการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ แต่การเลือกใช้ท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะที่มีความยาวมากเกินไป จะทำให้ท่อสารทำความเย็นที่ถูกต้องไว้ด้านในท่อสารเปลี่ยนสถานะเกิดการหย่อน และงอได้ อีกทั้งยังทำให้ชุดมอเตอร์พัดลมที่ใช้สำหรับ Indoor Unit ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 300 มิลลิเมตร ไม่สามารถดึงความเย็นจากสารเปลี่ยนสถานะได้อย่างทั่วถึง งานวิจัยนี้จึงไม่เลือกใช้ท่อที่มีความยาวขนาดมากกว่า 600 มิลลิเมตร ขึ้นไป โดยทำการเลือกใช้ความยาวท่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ความยาวขนาด 550 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นความยาวที่ไม่ทำให้ท่อสารทำความเย็นที่ถูกต้องไว้ด้านในท่อสารเปลี่ยนสถานะเกิดการหย่อน และเป็นความยาวที่ทำให้จำนวนคอล์มัน์ของท่อเป็นจำนวนเลขคู่ เพื่อให้สารทำความเย็นสามารถเชื่อมต่อกันได้ทุกท่อ

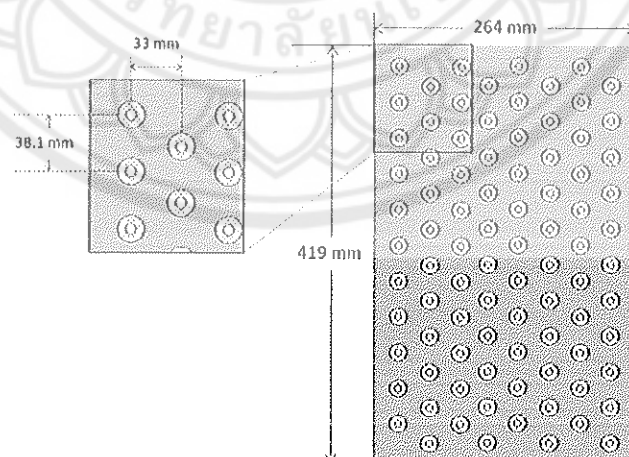


ภาพ 66 แสดงการปิดท่อทองแดงแบบ 2 ชั้น โดยการใช้ซูเปอร์ลินและเชื่อมปิดด้วยทองแดง

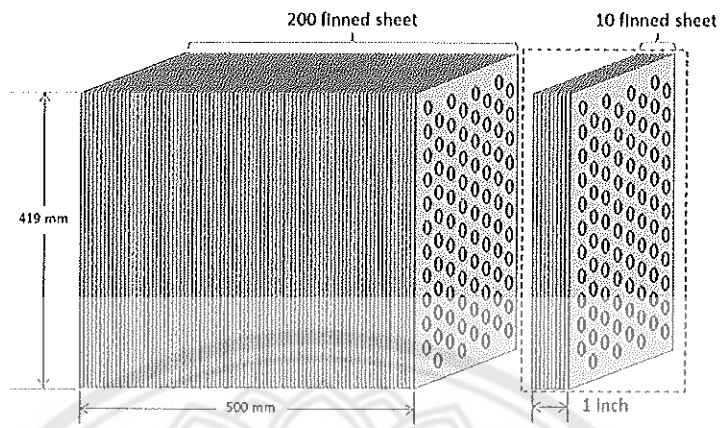
การเลือกใช้ท่อบรรจุสารเปลี่ยนสถานะที่ขนาดความยาว 550 มิลลิเมตร ทำให้ชุด Evaporator แบบท่อ 2 ชั้น จะมีจำนวนท่อทั้งหมด 88 ท่อ (8 คอล์มัน์ และ 11 แถว) วางเรียงกันตามขนาดและระยะห่างช่องใส่ท่อของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น โดยจะมีลักษณะผิวสัมผัสเรียบ ไม่

ขรุขระ ขนาดกว้าง 264 มิลลิเมตร และยาว 419 มิลลิเมตร ดังภาพ 67 และ 68 จะถูกนำไปเจาะช่องสำหรับใส่ท่อ Evaporator ซึ่งมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางคอล์มน์และแถวเท่ากับ 33.0 และ 38.1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตามรูปแบบที่ทางบริษัท บีทีวี่ส์ (ประเทศไทย) จำกัด มีอยู่แล้ว โดยอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่นจะถูกวางเรียงกันที่ระยะห่าง 10 finned inch (ระยะห่าง 1 นิ้ว) มีอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น 10 แผ่น ดังภาพ 69 และ 70 โดยชุดมอเตอร์พัดลมที่ใช้สำหรับ Indoor Unit เป็นแบบ AC230V ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 300 มิลลิเมตร 0.10 กิโลวัตต์ ดังภาพ 71 ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ด้านหน้าของ Indoor Unit เมื่อเปิดใช้งานพัดลมจะดูดอากาศจากทางด้านหลังระบบผ่าน Evaporator ทำให้อากาศแลกเปลี่ยนความร้อนกับตัวสารเปลี่ยนสถานะที่ถูกบรรจุไว้ในท่อชั้นนอก ดังภาพ 72

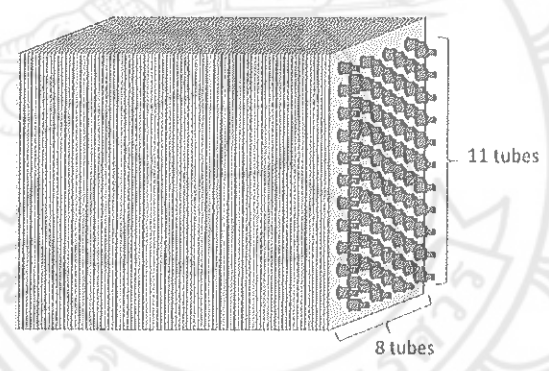
ภาพ 67 แสดงลักษณะของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น



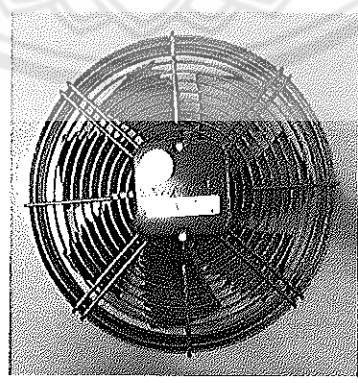
ภาพ 68 แสดงขนาดและระยะห่างช่องใส่ท่อของอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น



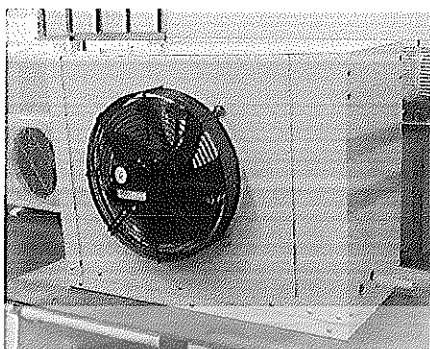
ภาพ 69 แสดงลักษณะการวางอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น สำหรับ Indoor Unit ที่ระยะห่าง 10 finned inch



ภาพ 70 แสดงลักษณะการใส่ท่อ 2 ชั้นกับอะลูมิเนียมฟินแบบแผ่น

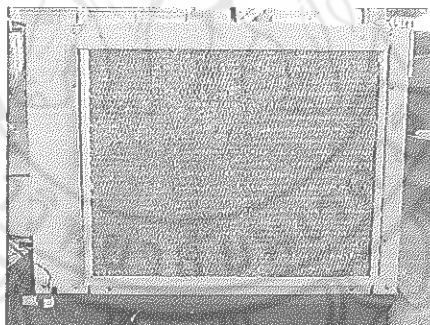


ภาพ 71 แสดงชุดมอเตอร์พัดลมแบบ AC230V ขนาด 0.10 กิโลวัตต์ ที่ใช้สำหรับ Indoor Unit



ภาพ 72 แสดงการติดตั้งชุดมอเตอร์พัดลมไว้ด้านหน้า Indoor Unit

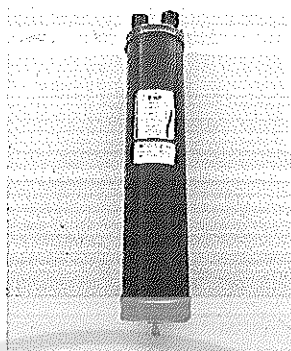
Indoor Unit ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อีก ได้แก่ ฟิลเตอร์กรองอากาศ และถาดรองน้ำ โดยฟิลเตอร์กรองอากาศจะถูกติดตั้งไว้ทางด้านหลังของ Indoor Unit ดังภาพ 73 ซึ่งฟิลเตอร์เป็นส่วนประกอบแรกที่สัมผัสกับอากาศที่เข้าสู่ระบบ ตัวฟิลเตอร์จะมีหน้าที่ปกติทั่วไป นั่นก็คือการกรองมลภาวะเบื้องต้นที่มากับอากาศ



ภาพ 73 แสดงการติดตั้งฟิลเตอร์กรองอากาศสำหรับ Indoor Unit

## 1.2 Outdoor Unit

Outdoor Unit ของระบบก็เก็บความเย็น จะมีความแตกต่างจาก Outdoor Unit ของระบบปรับอากาศทั่วไป โดยจะมีการใช้แอกคิวมูเลเตอร์ (Accumulator) ดังภาพ 74 เพื่อทำการดักจับสารทำความเย็นที่อยู่ในสถานะของเหลวไหลกลับเข้าสู่ Compressor โดย Compressor ที่ใช้เป็นแบบ twin rotary ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สารทำความเย็น R410A ดังภาพ 75 และมีรายละเอียดแสดงดังตาราง 10 และชุดมอเตอร์พัดลมที่ใช้สำหรับ Outdoor Unit เป็นแบบ DC310V ขนาด 30 วัตต์ ดังภาพ 77



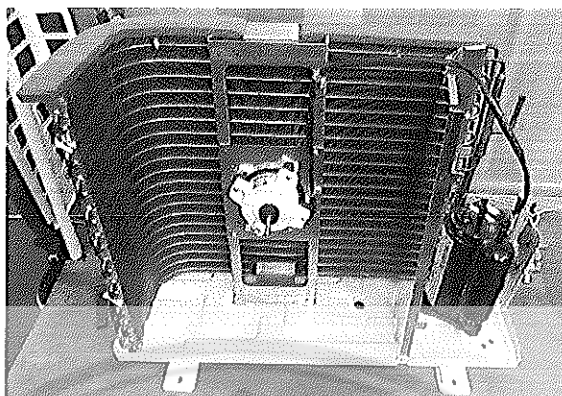
ภาพ 74 แสดงลักษณะของ Accumulator ที่ใช้ในระบบกักเก็บความเย็น



ภาพ 75 แสดง Compressor แบบ twin rotary ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สารทำความเย็น R410A

ตาราง 10 แสดงรายละเอียดของ Compressor ที่ใช้ในระบบกักเก็บความเย็น

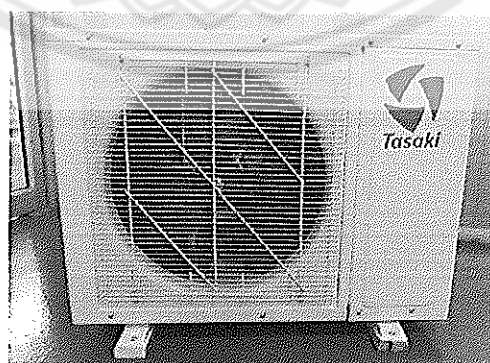
Model		SNB110FGYMT (15-130RPS)
Capacity	W	3,400
	Btu/hr.	11,601
Input	Watt	1,035
	Amps	7.00
COP	w/w	3.29
EER	(Btu/hr.)/W	11.21
weight	kgs.	7.8
Oil Q'ty	cc.	350



ภาพ 76 แสดง Condenser และ Compressor



ภาพ 77 แสดงชุดมอเตอร์พัดลมแบบ DC310V ขนาด 30 วัตต์ ที่ใช้สำหรับ Outdoor Unit

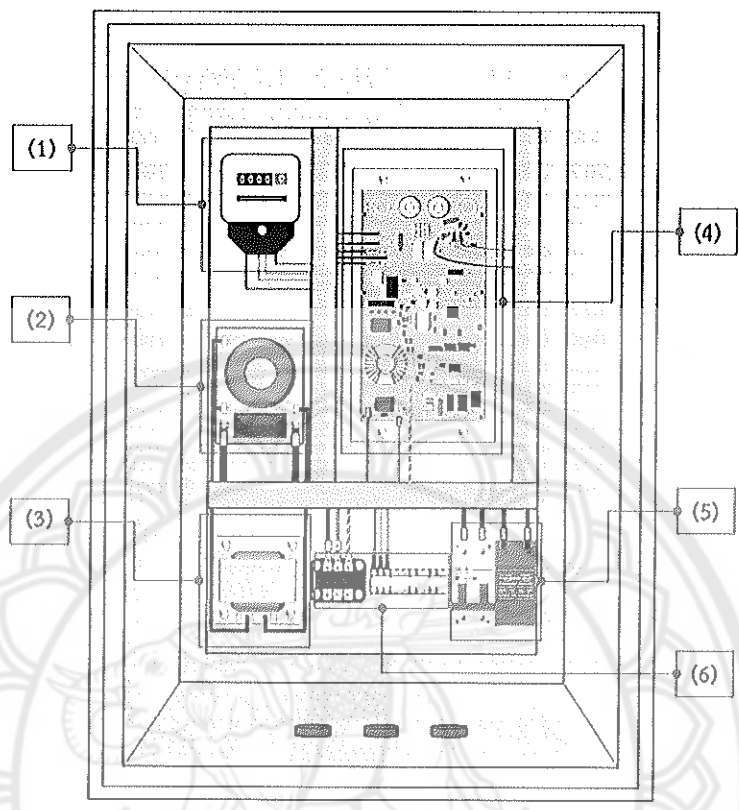


ภาพ 78 แสดง Outdoor Unit สำหรับระบบกักเก็บความเย็น

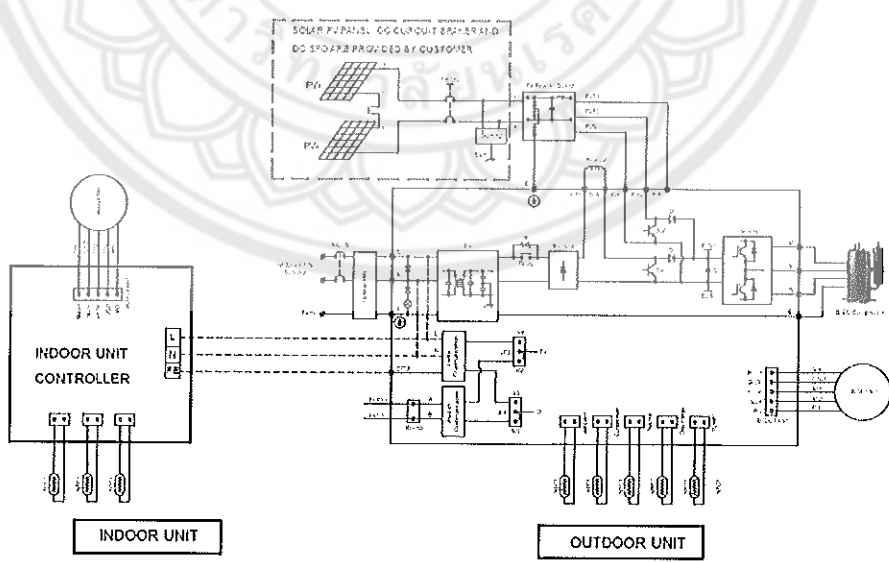
### 1.3 ชุดกล่องควบคุม

ชุดกล่องควบคุม ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานไฟฟ้าทั้งจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการออกแบบและคิดค้นจากผู้เชี่ยวชาญถือเป็น ส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ใหม่ของเครื่องปรับอากาศยี่ห้อ Tasaki ภายใต้การดูแลของ บริษัท บีทีไวส์ (ประเทศไทย) จำกัด โดยทางบริษัทได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดทำชุดกล่อง ควบคุม เพื่อถือเป็นการสนับสนุนการศึกษางานวิจัยนี้

ซึ่งชุดกล่องควบคุมจะมีส่วนประกอบหลักทั้งหมด 6 ส่วน ดังภาพ 79 ได้แก่ (1) มิเตอร์ไฟฟ้า มีหน้าที่บอกปริมาณพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ที่เข้าสู่ระบบกักเก็บความเย็น (2) ตัวกรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง มีหน้าที่กรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (3) ตัวกรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน้าที่กรองสัญญาณ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยตัวกรองสัญญาณทั้ง 2 แบบ จะทำ การกรองสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ก่อนปล่อยเข้าสู่ Compressor (4) บอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ เปรียบเสมือน เมนบอร์ด (Main Board) ที่ทำหน้าที่ ควบคุมการทำงานของ Compressor เป็นหลัก ตัวบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์จะมีวงจรการทำงาน แสดงดังภาพ 73 โดยหมายเลข (2) (3) และ (4) เป็นส่วนประกอบชุดเดียวกัน เรียกว่าชุดบอร์ดวงจร อินเวอร์เตอร์ ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นส่วนประกอบแรกที่รับพลังงาน ไฟฟ้าก่อนปล่อยเข้าสู่ Compressor (5) เบรกเกอร์สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์ แสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วย เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) และ เบรกเกอร์กันฟ้าผ่า (Surge Protection) (6) จุดเชื่อมต่อสายไฟ (Terminal)



ภาพ 79 แสดงส่วนประกอบของชุดกล่องควบคุมสำหรับระบบกักเก็บความเย็น



ภาพ 80 แสดงการทำงานของชุดบอร์ดวงจรอินเวอร์เตอร์ในระบบกักเก็บความเย็น



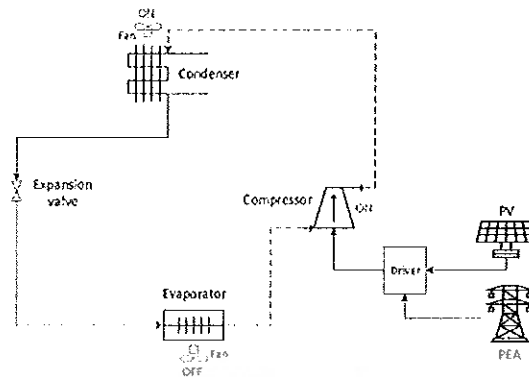
ชุดบอร์ตวงจรมอเตอร์ ถือเป็นศูนย์ควบคุมการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบกักเก็บความเย็น โดยเฉพาะการทำงานของ Compressor ตัวบอร์ตวงจรมอเตอร์ทำให้ระบบสามารถรับพลังงานไฟฟ้าได้ทั้ง 2 แบบ ทั้งพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ หรือสามารถใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ในเวลาเดียวกัน เนื่องจากตัวบอร์ตอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แทนโซลาร์อินเวอร์เตอร์ ที่จะทำการแปลงพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนเข้าสู่ Compressor โดยไม่จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่ ซึ่งบอร์ตวงจรมอเตอร์จะเลือกให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อน แต่เมื่อโหลดความร้อนเพิ่มขึ้นหรือค่าความเข้มแสงอาทิตย์ลดลง ทำให้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์อย่างเดียวไม่เพียงพอ ตัวบอร์ตจะสั่งการให้ดึงพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเข้ามาชดเชย หรือในช่วงเวลากลางคืนที่ไม่มีพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ระบบก็ยังทำงานได้ปกติโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว ทำให้ระบบกักเก็บความเย็นสามารถทำงานได้ทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

## 2. การทำงานของระบบกักเก็บความเย็น

### 2.1 ช่วง Charging Process

ในช่วง Charging Process ระบบกักเก็บความเย็นจะนำพลังงานไฟฟ้ามาผลิตเป็นพลังงานความเย็นสะสมไว้ในสารเปลี่ยนสถานะ เมื่อทำการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบชุดบอร์ตวงจรมอเตอร์จะทำการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าทั้งแบบกระแสตรงและกระแสสลับให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ก่อนจ่ายให้กับ Compressor เพื่อทำความเย็นให้กับสารทำความเย็น เข้าสู่ Evaporator โดยท่อแบบ 2 ชั้นของ Evaporator ท่อชั้นในสำหรับสารทำความเย็น และท่อชั้นนอกสำหรับบรรจุน้ำเปลี่ยนสถานะ ทำให้ขณะที่สารทำความเย็นไหลเข้าสู่ Evaporator จะเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและสะสมความเย็นไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะที่บรรจุไว้ในท่อชั้นนอก จากนั้นสารทำความเย็นก็จะไหลกลับเข้าสู่ Compressor วนเป็นวัฏจักรการทำงานความเย็นต่อไป

ดังภาพ 81

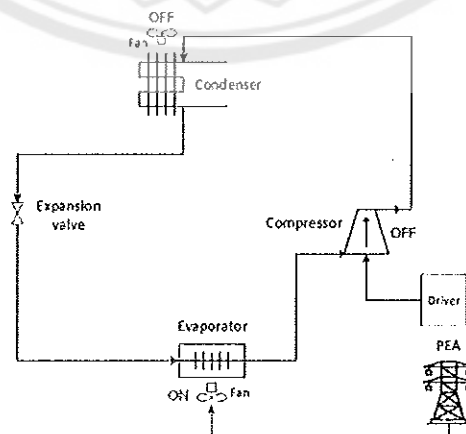


ภาพ 81 แสดงการทำงานของระบบในช่วง Charging Process

จะเห็นได้ว่าในช่วง Charging Process ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในระบบจะทำงานเหมือนกับระบบปรับอากาศทั่วไป ยกเว้นมอเตอร์พัดลมใน Indoor Unit หรือพัดลมสำหรับ Evaporator ที่จะไม่มีการทำงานในช่วงนี้ เนื่องจากต้องการเก็บสะสมความเย็นเอาไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะในท่อชั้นนอกของ Evaporator

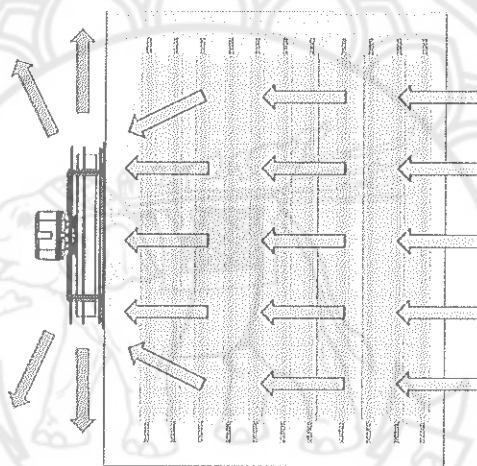
## 2.2 ช่วง Discharging Process

ในช่วง Discharging Process จะเป็นการนำพลังงานความเย็นที่ถูกเก็บสะสมไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะออกมาใช้งาน โดยจะเป็นการทำงานของมอเตอร์พัดลมในชุด Indoor Unit เพียงอย่างเดียว และเป็นช่วงที่ Compressor หยุดการทำงาน ไม่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ยกเว้นจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับหรือไฟบ้านให้กับมอเตอร์พัดลมของ Evaporator ดังภาพ 82



ภาพ 82 แสดงการทำงานของระบบในช่วง Discharging Process

ชุดมอเตอร์พัดลมของ Evaporator มีลักษณะเป็นพัดลมแบบดูดออก จะถูกติดตั้งไว้ด้านหน้าของชุด Indoor Unit หรือ Indoor Unit เมื่อสั่งให้มอเตอร์มีการทำงานตัวใบพัดจะดูดอากาศจากทางด้านหลังของ Indoor Unit เมื่ออากาศผ่านชุดท่อทักเก็บความเย็นที่บรรจุสารเปลี่ยนสถานะเอาไว้ จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศและสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้อากาศที่ออกมาจาก Indoor Unit มีอุณหภูมิต่ำลงประมาณ 1 - 2 องศาเซลเซียส โดยลักษณะทิศทางการที่ออกมาจากมอเตอร์พัดลมจะไม่ได้มีทิศพุ่งออกมาข้างหน้า แต่จะกระจายออกมาด้านข้างรอบ ๆ มอเตอร์แทน ดังภาพ 83

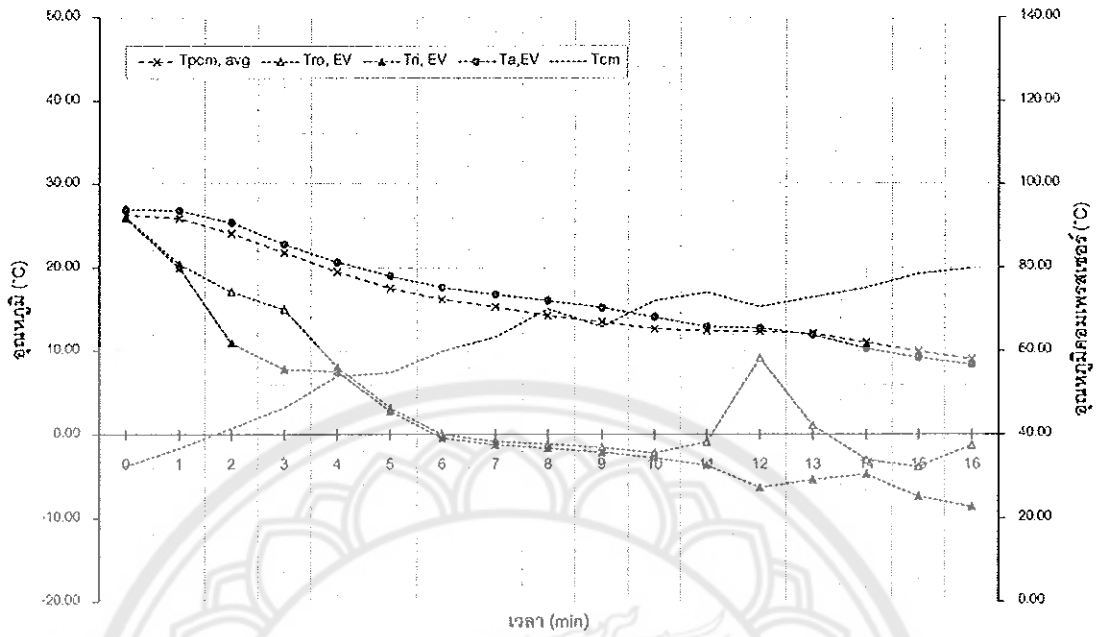


ภาพ 83 แสดงการไหลเวียนของอากาศเมื่อทำการเปิดมอเตอร์พัดลม

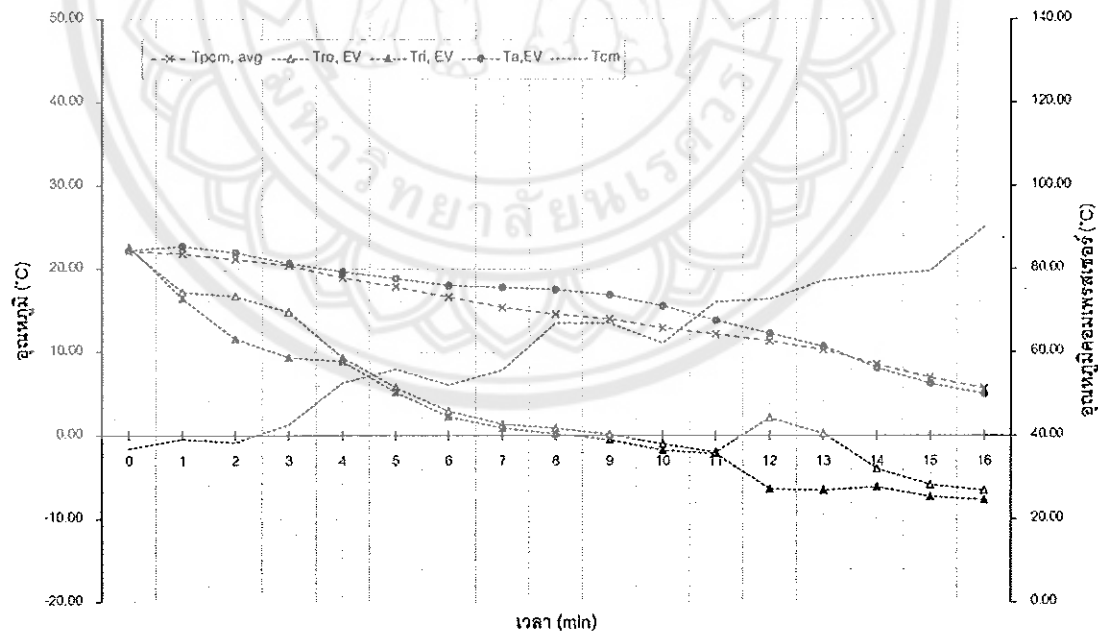
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

#### 1. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process

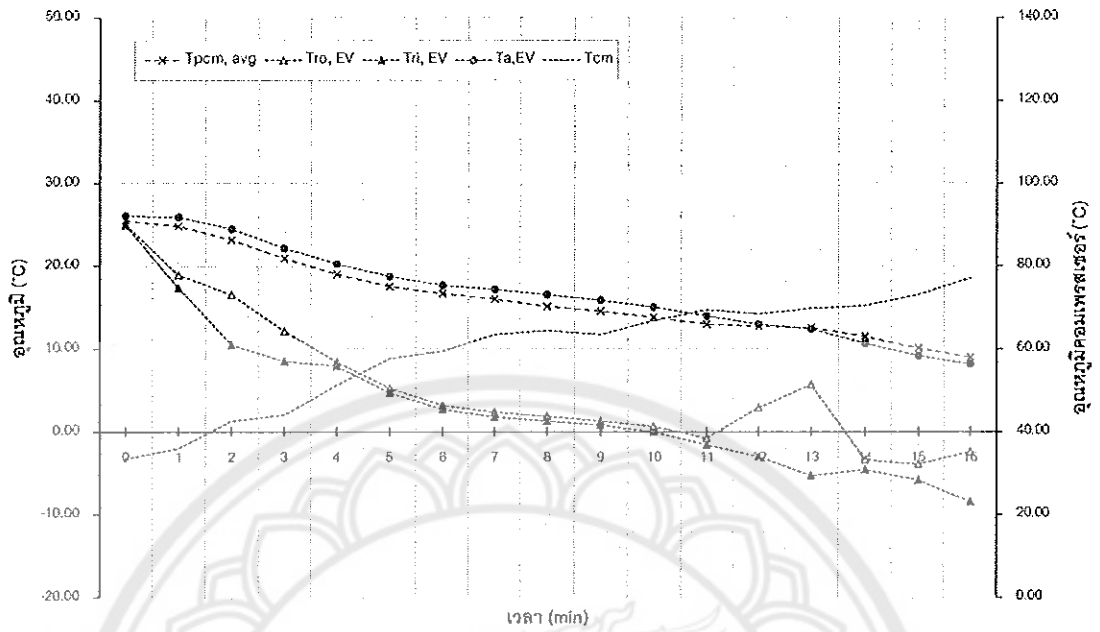
ในช่วง Charging Process เป็นช่วงที่ Compressor มีการทำงานเพื่อทำความเย็นไปกักเก็บไว้ที่สารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้ Compressor ขนาด 11,601 Btu/hr. ในการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ โดยทำการปรับค่าความถี่ได้จากแผงควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศหรือรีโมทควบคุม สามารถปรับค่าความถี่ได้หลายระดับ ตั้งแต่ 90 เฮิร์ตซ์ ลงไป เนื่องจากชุดระบบทำความเย็นที่ใช้ทำงานที่ความถี่ Compressor 90 เฮิร์ตซ์ จึงได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ ที่ความถี่ 90 70 60 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นในสารเปลี่ยนสถานะที่ความถี่แต่ละระดับ ทำให้การกักเก็บความเย็นในสารเปลี่ยนสถานะมีลักษณะและระยะเวลาในการกักเก็บที่แตกต่างกันไป



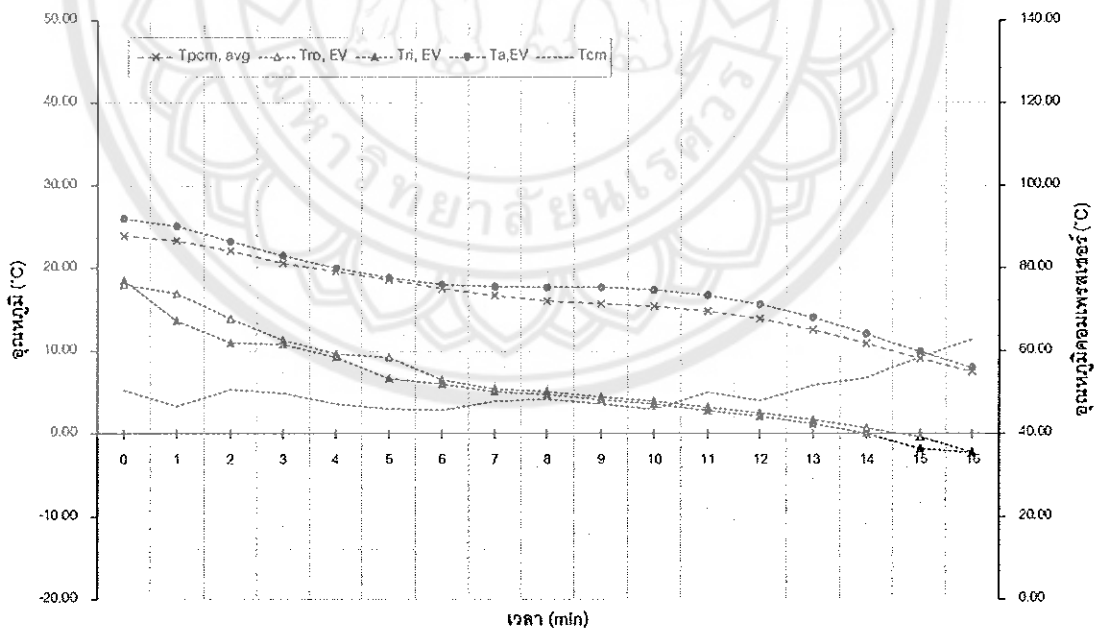
ภาพ 84 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 90 เฮิร์ตซ์



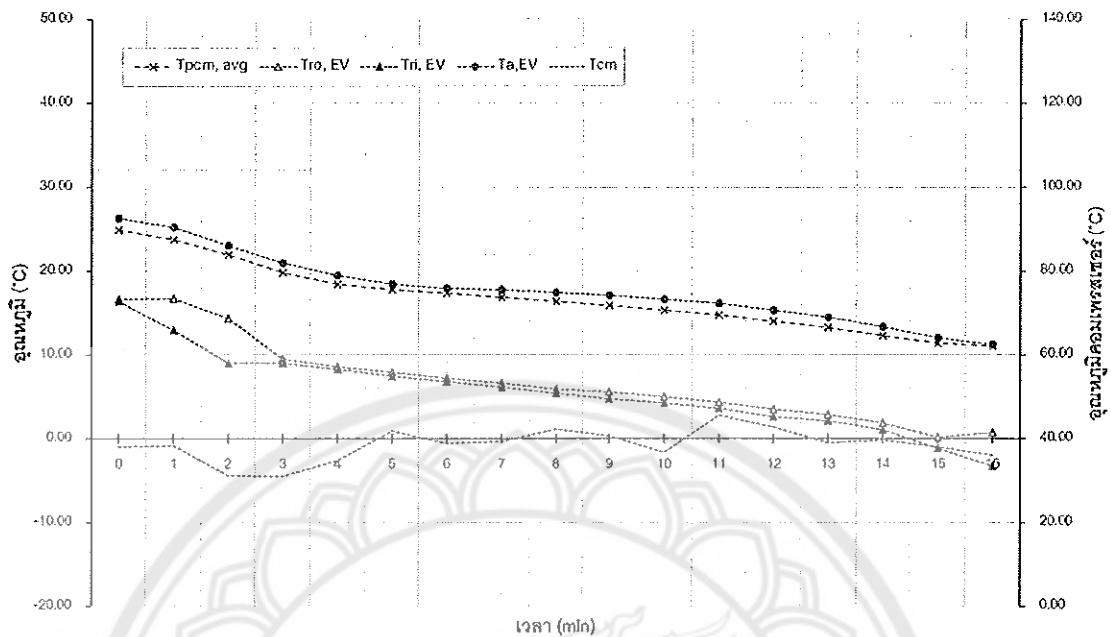
ภาพ 85 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 70 เฮิร์ตซ์



ภาพ 86 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 60 เฮิร์ตซ์



ภาพ 87 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 50 เฮิร์ตซ์



ภาพ 88 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ด้วยความถี่ของ Compressor 40 เฮิร์ตซ์

จากภาพ 84 – 88 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบก็เก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ (PCM-CSS) ในช่วง Charging Process โดยให้ Compressor ทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน 5 กรณี โดยจะแสดงผลการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ เปรียบเทียบกันเป็นระยะเวลา 16 นาที (ระยะเวลาที่ Compressor สามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้สั้นที่สุด) พบว่า ที่ความถี่ 90 เฮิร์ตซ์ อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ไหลเข้า Evaporator ( $T_{r, EV}$ ) มีค่าลดลงถึง 0 องศาเซลเซียส และเริ่มติดลบในนาทีที่ 7 โดยมีค่าลดลงต่ำที่สุดเท่ากับ -8.67 องศาเซลเซียส สามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้  $T_{pcm, avg}$  มีค่าลดลงต่ำสุดอยู่ที่ 9.03 องศาเซลเซียส ดังภาพ 84 และเมื่อทำการปรับความถี่ของ Compressor ให้ทำงานที่ 70 และ 60 เฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่า  $T_{r, EV}$  เริ่มติดลบช้ากว่าที่ความถี่ 90 เฮิร์ตซ์ ประมาณ 2 ถึง 3 นาที ดังภาพ 85 และ 86 โดยมีค่าลดลงต่ำที่สุดเท่ากับ -7.73 และ -8.37 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งสามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะทำให้  $T_{pcm, avg}$  มีค่าลดลงต่ำที่สุดอยู่ที่ 5.68 และ 9.01 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และที่ความถี่ 50 และ 40 เฮิร์ตซ์ ใช้เวลาทำให้  $T_{r, EV}$  เริ่มติดลบมากกว่า 3 กรณีแรก โดยติดลบในนาทีที่ 15 ทั้ง 2 กรณี ดังภาพ 87 และ 88 จะเห็นได้ว่า  $T_{pcm, avg}$  มีค่าลดลงต่ำที่สุดอยู่ที่ 7.51 และ 11.04 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิ Compressor ( $T_{cm}$ ) จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ที่ความถี่ 90 70 และ 60 เฮิร์ตซ์

ดังภาพ 84 -- 86 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ 89.97 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ 70 เฮิรตซ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 61.66 61.15 และ 59.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ความถี่ 50 และ 40 เฮิรตซ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 50.01 และ 38.47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตาราง 11 แสดงอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะในช่วง Charging Process ในแต่ละกรณี  
ทดสอบ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะ (°C)				
	90 Hz	70 Hz	60 Hz	50 Hz	40 Hz
0	26.33	22.18	25.50	23.90	24.88
1	25.88	21.79	24.78	23.33	23.77
2	24.06	21.13	23.18	22.09	21.94
3	21.83	20.37	20.93	20.61	19.80
4	19.50	18.96	19.06	19.62	18.43
5	17.53	17.83	17.57	18.64	17.74
6	16.19	16.58	16.70	17.57	17.35
7	15.28	15.42	16.01	16.69	16.90
8	14.25	14.56	15.17	16.06	16.38
9	13.48	13.94	14.53	15.68	15.84
10	12.64	12.92	13.83	15.38	15.30
11	12.40	12.20	12.98	14.82	14.73
12	12.36	11.38	12.74	13.88	14.03
13	12.08	10.31	12.56	12.54	13.24
14	11.03	8.56	11.53	10.92	12.24
15	9.92	6.94	10.09	9.04	11.36
16	9.03	5.68	9.01	7.51	11.04
$\Delta T$	17.30	16.50	16.49	16.39	13.84

จากตาราง 11 เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะจากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Charging Process ของแต่ละความถี่ จะเห็นได้ว่าในระยะเวลา 16

นาที่ ที่ความถี่ 90 เฮิร์ตซ์ สามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะได้มากที่สุดถึง 17.30 องศาเซลเซียส โดยที่ความถี่ 70 60 และ 50 เฮิร์ตซ์ สามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะมีค่าใกล้เคียงกัน มีค่าเท่ากับ 16.50 16.49 และ 16.39 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และกรณี ที่ความถี่ 40 เฮิร์ตซ์ สามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะได้น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 13.84 องศาเซลเซียส

ตาราง 12 แสดงอุณหภูมิ Compressor ในช่วง Charging Process ในแต่ละกรณีทดสอบ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ Compressor (°C)				
	90 Hz	70 Hz	60 Hz	50 Hz	40 Hz
0	32.40	36.80	33.40	50.50	38.10
1	36.80	39.10	35.90	46.72	38.30
2	41.47	38.30	42.63	50.70	31.13
3	46.37	42.57	44.10	49.79	31.03
4	54.07	52.63	51.23	47.16	34.77
5	54.87	55.87	57.60	46.02	41.73
6	59.90	52.17	59.47	45.72	38.80
7	63.30	55.80	63.43	47.89	39.27
8	70.17	67.00	64.40	48.40	42.30
9	65.87	66.90	63.53	47.17	40.60
10	72.10	62.23	66.80	45.79	36.77
11	74.00	72.07	69.50	49.98	45.63
12	70.53	72.80	68.37	48.00	42.73
13	72.83	77.13	69.80	51.72	39.07
14	75.27	78.57	70.50	53.46	39.67
15	78.43	79.57	73.07	58.39	38.07
16	79.87	89.97	77.03	62.73	36.07
เฉลี่ย	61.66	61.15	59.46	50.01	38.47
SD	14.95	16.22	13.32	4.60	3.82



จากตาราง 12 เมื่อนำอุณหภูมิ Compressor จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ในช่วง Charging Process มาเปรียบเทียบกันในแต่ละความถี่จะเห็นได้ว่าที่ความถี่สูงส่งผลให้  $T_{cm}$  สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ความถี่ 90 เฮิรตซ์  $T_{cm}$  เฉลี่ยอยู่ที่ 61.66 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความถี่ 40 เฮิรตซ์  $T_{cm}$  เฉลี่ยอยู่ที่ 38.47 องศาเซลเซียส เท่านั้น ซึ่งหากทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะด้วยความถี่สูง อย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้  $T_{cm}$  สูงมากเกินไป จนทำให้ Compressor ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และระบบควบคุมจะทำการหยุดการทำงานของ Compressor เพื่อป้องกันการเสียหายของ Compressor และการทำงานของระบบ โดยที่ความถี่ 90 70 และ 60 เฮิรตซ์ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่าที่ความถี่ 50 และ 40 เฮิรตซ์ อยู่ที่ 14.95 16.22 และ 13.32 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวมากกว่าที่ความถี่ 50 และ 40 เฮิรตซ์

จากนั้นทำการนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการบันทึกไว้มาวิเคราะห์และคำนวณด้วย สมการของปริมาณทางด้านพลังงานที่เราต้องการศึกษา ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ในช่วง Charging Process ได้ทำการพิจารณาปริมาณทางด้านพลังงาน ได้แก่ อัตราการทำความเย็นของ Compressor ( $\dot{Q}_{comp}$ ), สมรรถนะการทำความเย็น (Coefficient of Performance: COP), อัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (Energy Efficiency Ratio: EER) และประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ ( $\eta_{C,Charg}$ ) โดยเป็นการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบ จากการทดสอบประสิทธิภาพในการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ ในระยะเวลา 16 นาที แสดงดังตาราง 13 และ 14

ตาราง 13 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบ

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
<b>เฉลี่ย</b>	<b>2.25</b>	<b>7,680.13</b>	<b>3.11</b>	<b>10.61</b>

จากตาราง 13 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบ พบว่า อัตราการทำความเย็นของ Compressor ( $\dot{Q}_{comp}$ ) ที่ความถี่ 90 70 60 50 และ 40 เฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 2.16 1.90 2.48 2.56 และ 2.14 วัตต์ ตามลำดับ คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.25 วัตต์ หรือ 7,680.13 Btu/hr. โดยเป็นอัตราการทำความเย็นที่ Compressor สามารถทำได้ ขณะทำการชาร์จทำความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ ในระยะเวลา 16 นาที โดยมีค่าสมรรถนะการทำความเย็น (COP) คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า กรณีทดสอบที่ 90 เฮิรตซ์ มีค่า COP สูงที่สุด จากการทดสอบทั้งหมด 5 กรณี มีค่าเท่ากับ 3.64 ส่งผลให้มีค่าอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) เท่ากับ 12.43 (Btu/hr.)/W รองลงมาเป็นกรณีทดสอบที่ 60 และ 50 เฮิรตซ์ โดยมีค่า COP เท่ากับ 3.44 และ 3.09 ตามลำดับ และมีค่า EER อยู่ที่ 11.75 และ 10.53 Btu/hr. ต่อวัตต์ ตามลำดับ

ตาราง 14 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ

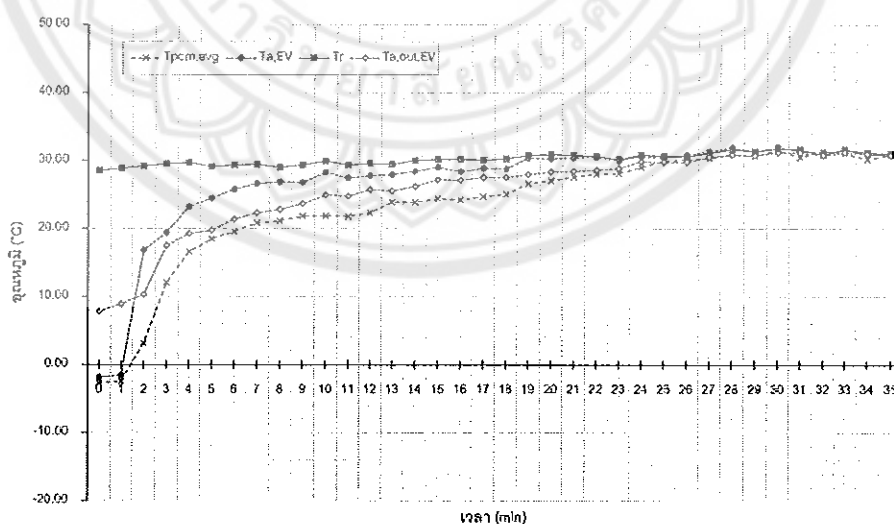
กรณีทดสอบ	$\dot{Q}_R$ (W)	$Q_{pcm}$		$\dot{Q}_{pcm}$		$\eta_{C,Charg}$ (%)
		kJ	Btu	W	Btu/hr.	
90 Hz	18.32	1,089.72	1,032.86	1.14	3.88	6.20
70 Hz	16.44	1,088.25	1,031.46	1.13	3.87	6.90
60 Hz	19.65	1,088.25	1,031.46	1.13	3.87	5.77
50 Hz	16.13	1,088.07	1,031.30	1.13	3.87	7.03
40 Hz	21.19	1,083.40	1,026.87	1.13	3.85	5.33
เฉลี่ย	18.35	1,087.54	1,030.79	1.13	3.87	6.24

จากตาราง 14 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ พบว่า ระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ มีค่าอัตราการถ่ายเทพลังงานของสารทำความเย็น ( $\dot{Q}_R$ ) ที่ความถี่ 90 70 60 50 และ 40 เฮิรตซ์ มีค่าเท่ากับ 18.32 16.44 19.65 16.13 และ 21.19 วัตต์ คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 18.35 วัตต์ โดยกรณีทดสอบที่ 40 เฮิรตซ์ มีค่า  $\dot{Q}_R$  สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 21.19 วัตต์ เมื่อพิจารณาปริมาณการกักเก็บความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะ ( $Q_{pcm}$ ) ของกรณีทดสอบทั้ง 5 กรณี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่า  $Q_{pcm}$  เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1,087.54 กิโลจูล หรือ 1,030.79 บีทียู ซึ่งเมื่อทำการลดค่าความถี่ของ Compressor มีผลทำให้  $Q_{pcm}$  มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน และผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบ ( $\eta_{C,Charg}$ ) มี

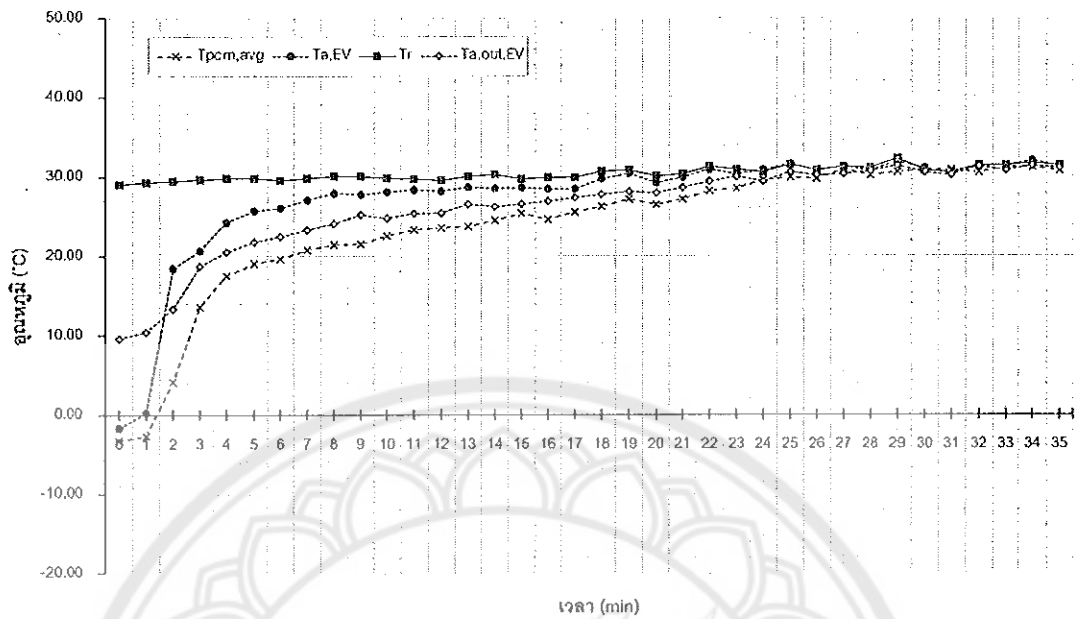
ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 6.24 ซึ่งกรณีทดสอบที่ 50 เฮิร์ตซ์ เป็นกรณีที่มีค่า  $\eta_{C,Charg}$  สูงที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 7.03

## 2. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process

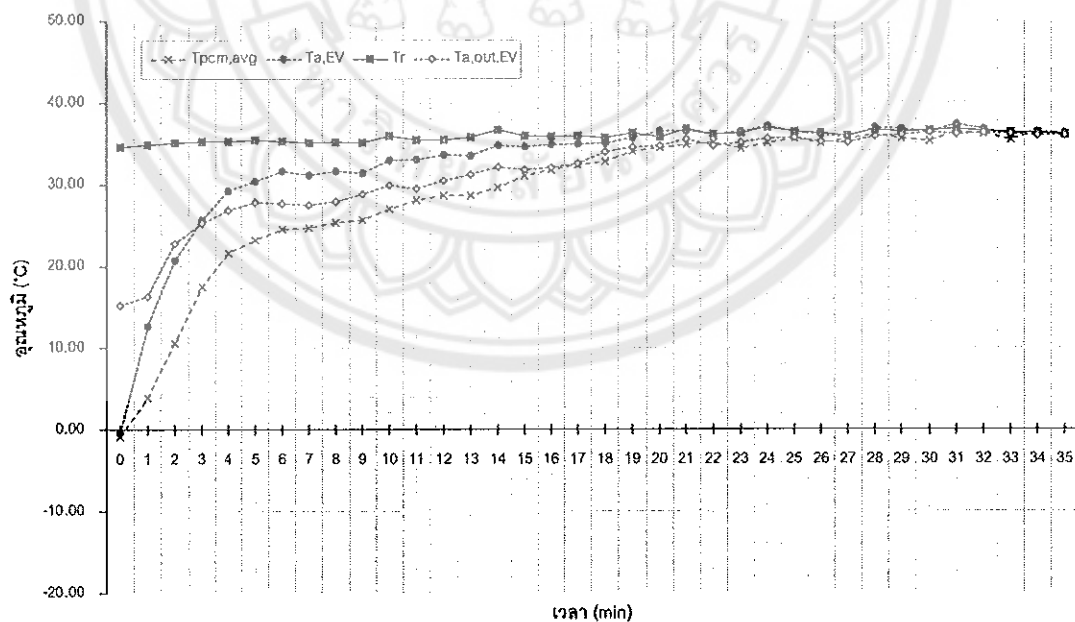
ในช่วง Discharging Process เป็นช่วงที่ไม่มีการทำงานของ Compressor เนื่องจากเป็นช่วงที่ทำการดึงความเย็นที่กักเก็บไว้ในสารเปลี่ยนสถานะออกมาใช้งานสำหรับปรับอากาศภายในอาคาร โดยใช้พัดลมของ Evaporator หรือ Indoor Unit ขนาด 0.10 กิโลวัตต์ (230 V) ในการดึงความเย็นที่กักเก็บไว้ออกมาใช้งาน พัดลมของ Evaporator สามารถปรับความเร็วของใบพัดได้โดยใช้ Variac หม้อแปลงแบบปรับค่าได้ ทำการปรับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของมอเตอร์พัดลม ซึ่งปกติมอเตอร์พัดลมมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่ 230 โวลต์ ทำให้มีค่าความเร็วลมเท่ากับ 1.90 เมตรต่อวินาที และแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้องไม่ต่ำกว่า 180 โวลต์ มอเตอร์พัดลมถึงจะสามารถทำงานได้ โดยทำการทดสอบระบบในช่วง Discharging Process ในห้องทดสอบที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของห้องทดสอบให้มีค่าคงที่ แบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 และ 35 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วลม 1.56 (190 V) และ 1.90 (230 V) เมตรต่อวินาที เพื่อทำการศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะการคายความเย็นที่ความเร็วลมแต่ละระดับ และในอุณหภูมิอากาศภายในห้องที่แตกต่างกัน โดยทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะด้วยความถี่ของ Compressor 50 เฮิร์ตซ์



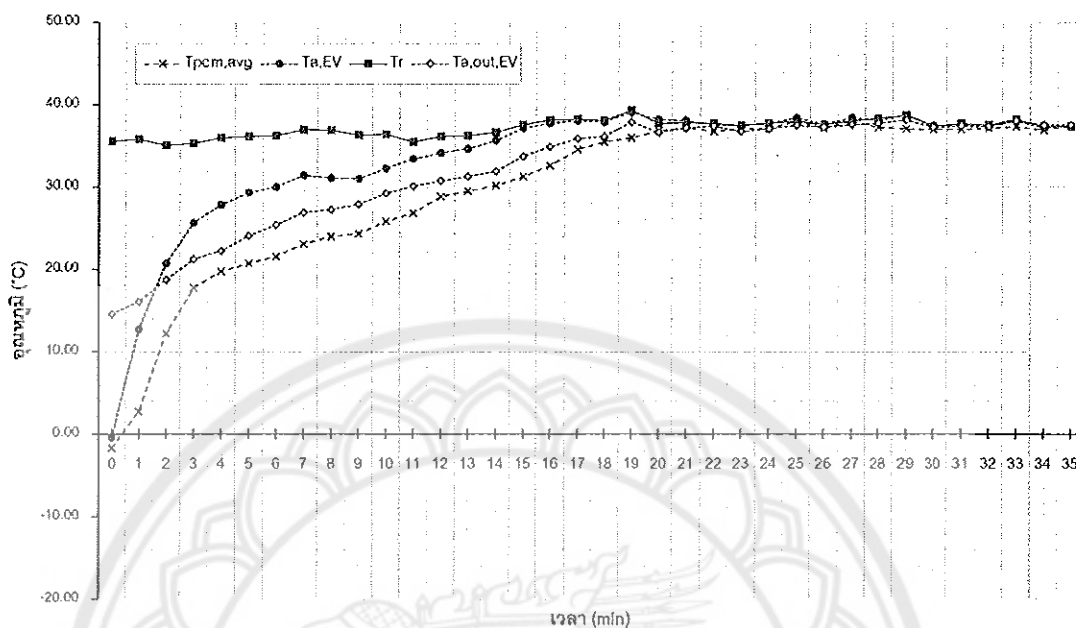
ภาพ 89 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที



ภาพ 90 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที

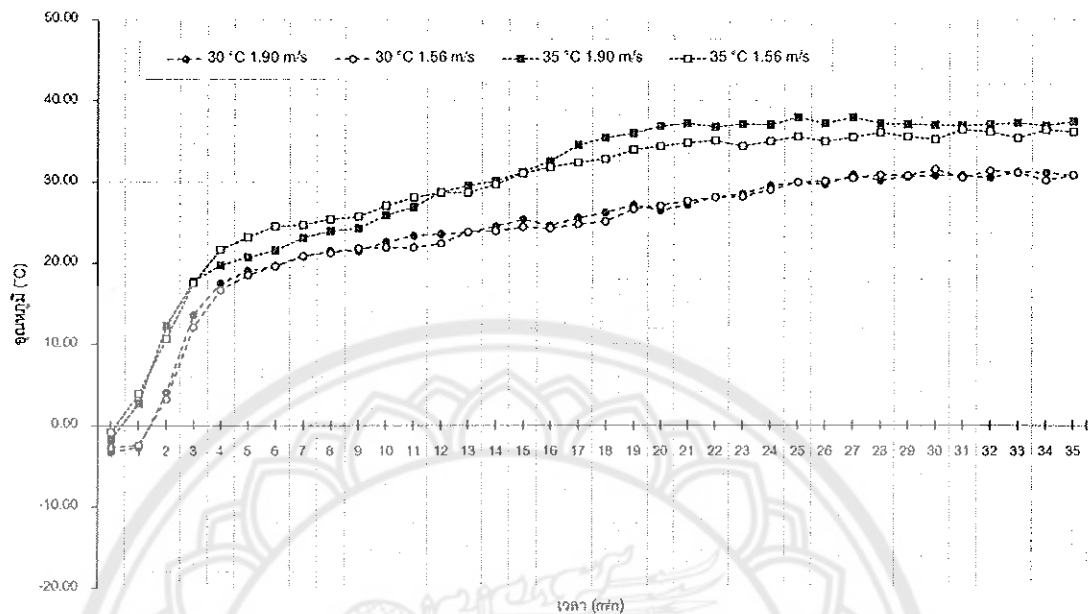


ภาพ 91 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที



ภาพ 92 แสดงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที

จากภาพ 89 – 92 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่เก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ (PCM-CSS) ในช่วง Discharging Process โดยทำการหยุดการทำงานของ Compressor และเปิดพัดลมของ Evaporator เป็นระยะเวลา 35 นาที จนกว่าอุณหภูมิอากาศขาออกจาก Evaporator ( $T_{a,out,EV}$ ) จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ ( $T_R$ ) พบว่าที่  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส สามารถลด  $T_{a,out,EV}$  ให้มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 9.57 และ 7.83 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยผลต่างประมาณ 4.51 องศาเซลเซียส ดังภาพ 89 และ 90 ที่  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส สามารถลด  $T_{a,out,EV}$  ให้มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 14.57 และ 15.24 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยผลต่างประมาณ 4.74 องศาเซลเซียส ดังภาพ 91 และ 92 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการคายความเย็นและดูดซับความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ จะเห็นได้ว่า ที่กรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาประมาณ 26 ถึง 27 นาที ในการทำให้สารเปลี่ยนสถานะคายความเย็นจน  $T_{pcm,avg}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $T_R$  ในขณะที่กรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำให้สารเปลี่ยนสถานะคายความเย็นจน  $T_{pcm,avg}$  มีค่าใกล้เคียงกับ  $T_R$  เวลาประมาณ 20 ถึง 21 นาที



ภาพ 93 แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะจากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process

จากภาพ 93 เมื่อนำ  $T_{pcm,avg}$  จากการทดสอบในช่วง Discharging Process มาเปรียบเทียบกันทั้ง 4 กรณี ได้แก่ 1)  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที 2)  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที 3)  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที และ 4)  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที จะเห็นได้ว่ากรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลมทั้ง 2 ระดับ อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะมีการเพิ่มขึ้นได้ไวกว่ากรณีทดสอบที่  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ถึง 2 นาที แต่จะเห็นได้ว่าที่ระดับความเร็วลมทั้ง 2 ระดับ ในกรณีทดสอบที่  $T_R$  เท่ากัน มีผลต่อการคายความร้อนน้อยมาก ทำให้  $T_{pcm,avg}$  มีค่าใกล้เคียงกัน โดยสารเปลี่ยนสถานะจะค่อย ๆ ดูดซับความร้อนจากอากาศเข้า Evaporator จนทำให้  $T_{pcm,avg}$  และ  $T_{a,out,EV}$  มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ  $T_R$  หากทำการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่าง  $T_{a,in,EV}$  และ  $T_{a,out,EV}$  ( $\Delta T_{a,EV}$ ) จะเห็นระยะเวลาที่ชัดเจน ว่าสารเปลี่ยนสถานะเกิดการคายความร้อนจนหมด แสดงดังตาราง 15

ตาราง 15 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้า และออกจาก Evaporator

เวลา (นาที)	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศ (°C)			
	30 °C, 1.56 m/s	30 °C, 1.90 m/s	35 °C, 1.56 m/s	35 °C, 1.90 m/s
0	20.73	19.43	19.36	21.03
1	19.94	18.86	18.50	19.78
2	18.87	16.13	12.30	16.30
3	12.03	10.87	10.07	14.03
4	10.50	9.37	8.45	13.77
5	9.33	8.07	7.63	12.10
6	8.00	7.03	7.57	10.87
7	7.07	6.47	7.57	10.03
8	6.17	5.93	7.23	9.67
9	5.67	4.87	6.27	8.40
10	4.97	5.03	6.03	7.17
11	4.53	4.33	6.00	5.40
12	3.90	4.13	4.97	5.43
13	3.87	3.53	4.57	4.97
14	3.77	4.03	4.60	4.77
15	3.03	3.13	4.20	3.80
16	3.03	2.97	3.80	3.30
17	2.60	2.57	3.34	2.30
18	2.73	2.87	1.73	1.93
19	2.80	2.73	1.79	1.40
20	2.57	2.10	1.06	1.07
21	2.30	1.67	1.20	0.67
22	2.10	1.83	1.37	0.37
23	1.33	0.93	1.17	0.77
24	1.00	1.17	1.33	0.63

ตาราง 15 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศ (°C)			
	30 °C, 1.56 m/s	30 °C, 1.90 m/s	35 °C, 1.56 m/s	35 °C, 1.90 m/s
25	0.93	1.00	0.77	0.53
26	0.80	0.70	1.10	0.37
27	0.53	0.97	0.77	0.50
28	0.87	0.43	0.83	0.60
29	0.57	0.90	0.40	0.60
30	0.60	0.27	0.27	0.17
31	0.47	0.47	0.63	0.33
32	0.13	0.20	0.30	0.20
33	0.43	0.67	0.17	0.23
34	0.17	0.30	0.40	-0.20
35	0.37	0.37	0.10	-0.13
เฉลี่ย	4.69	4.34	4.38	5.09

จากตาราง 15 ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้า และออกจาก Evaporator จะเห็นได้ว่า กรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.56 และ 1.90 เมตรต่อวินาที สามารถลดอุณหภูมิระหว่าง  $T_{a,in,EV}$  และ  $T_{a,out,EV}$  ทำให้  $\Delta T_{a,EV}$  มีค่าสูงถึง 20.73 และ 19.43 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ย  $\Delta T_{a,EV}$  อยู่ที่ประมาณ 4.69 และ 4.34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งกรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.56 และ 1.90 เมตรต่อวินาที สามารถลดอุณหภูมิระหว่าง  $T_{a,in,EV}$  และ  $T_{a,out,EV}$  ได้ใกล้เคียงกรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า  $\Delta T_{a,EV}$  สูงสุดเท่ากับ 19.36 และ 21.03 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย  $\Delta T_{a,EV}$  อยู่ที่ประมาณ 4.38 และ 5.09 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่  $\Delta T_{a,EV}$  มีค่าลดลงเข้าสู่ 0 องศาเซลเซียส พบว่า กรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 35 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 1.90 เมตรต่อวินาที เป็นกรณีที่  $T_{a,out,EV}$  เพิ่มขึ้นเร็วที่สุด โดยใช้เวลาประมาณ 21 นาที ที่ทำให้  $\Delta T_{a,EV}$  เริ่มมีค่าเข้าสู่ 0 องศาเซลเซียส ขณะที่กรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 25 นาที ที่ทำให้  $\Delta T_{a,EV}$  เริ่มมีค่าเข้าสู่ 0 องศาเซลเซียส



จากนั้นทำการนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการบันทึกไว้มาวิเคราะห์และคำนวณด้วยสมการของปริมาณทางด้านพลังงาน ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบในช่วง Discharging Process ได้ทำการพิจารณาปริมาณทางด้านพลังงาน ได้แก่ อัตราการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ( $\dot{Q}_{cs,discharg}$ ) และประสิทธิภาพในการคายความร้อนของระบบ ( $\eta_{C,Discharg}$ ) แสดงดังตาราง 16 จากการทดสอบประสิทธิภาพในการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ในระยะเวลา 35 นาที

ตาราง 16 แสดงผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคายความร้อนของระบบ

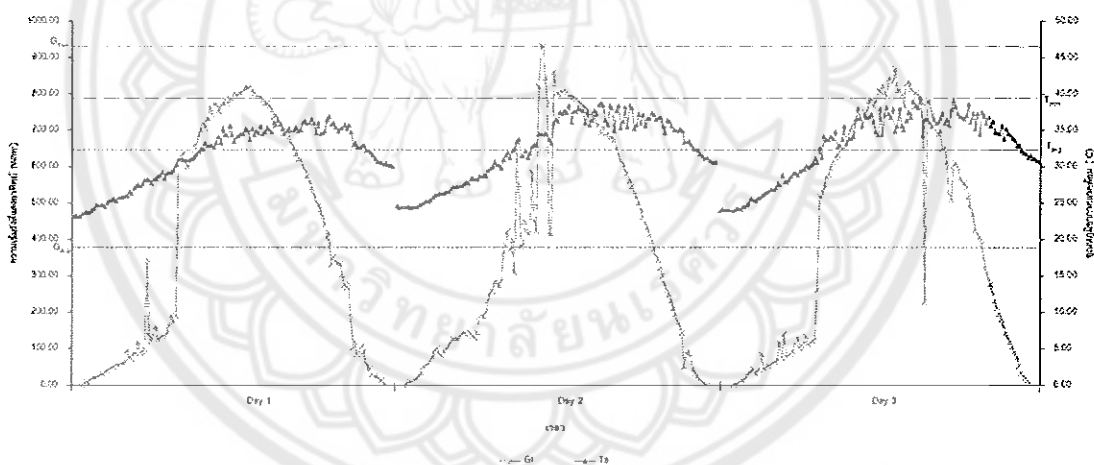
กรณีทดสอบ	$\dot{Q}_{cs,discharg}$ (Btu/hr.)	$Q_{pcm}$		$\dot{Q}_{pcm}$		$\eta_{C,Discharg}$ (%)
		kJ	Btu	W	Btu/hr.	
30 °C, 1.56m/s	1,505.44	1,029.30	975.59	489.82	1,672.44	90.01
30 °C, 1.90m/s	1,462.49	1,030.22	976.46	490.25	1,673.93	86.08
35 °C, 1.56m/s	974.82	1,026.39	972.83	488.43	1,667.71	58.45
35 °C, 1.90m/s	861.78	1,024.56	971.10	487.56	1,664.74	51.77
เฉลี่ย	1,201.13	1,027.62	974.00	489.02	1,669.71	71.58

จากตาราง 15 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการคายความร้อนของระบบ พบว่า อัตราการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ( $\dot{Q}_{cs,discharg}$ ) ที่กรณีทดสอบทั้ง 4 กรณี มีค่าเท่ากับ 1,505.44 1,462.49 974.82 และ 861.78 Btu/hr. คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1,201.13 Btu/hr. จะเห็นได้ว่ากรณีทดสอบ  $T_R$  เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม 1.56 เมตรต่อวินาที มีอัตราการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ( $\dot{Q}_{cs,discharg}$ ) สูงที่สุด โดยเป็นอัตราการคายความร้อนที่สารเปลี่ยนสถานะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในห้องทดสอบเป็นระยะเวลา 35 นาที ส่งผลให้เป็นกรณีทดสอบที่มีค่าประสิทธิภาพในการคายความร้อนของระบบ ( $\eta_{C,Discharg}$ ) สูงที่สุด อยู่ที่ร้อยละ 90.01 คิดเป็น  $\eta_{C,Discharg}$  เฉลี่ยของทุกกรณีทดสอบ เท่ากับร้อยละ 71.58 เมื่อพิจารณาปริมาณการกักเก็บความร้อน ( $Q_{pcm}$ ) ที่สารเปลี่ยนสถานะสามารถกักเก็บได้ในแต่ละกรณี พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,027.62 กิโลจูล หรือ 974.00 บีทียู ส่งผลให้มีค่าอัตราการกักเก็บความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ( $\dot{Q}_{pcm}$ ) อยู่ที่ 489.02 วัตต์ หรือ 1,669.71 Btu/hr.

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารบ้านทดสอบคอนกรีตมวลเบา

### 1. การทดสอบภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

การทดสอบภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ขนาดกว้าง 2.4 เมตร ยาว 2.4 เมตร และสูง 2.3 เมตร (ไม่รวมความสูงของหลังคา) หลังคาทรงสามเหลี่ยมทำมุม 30 องศา ไปด้วยกระเบื้องซีแพ็ค มีความสูง 1 เมตร ชายคายื่นออกจากตัวบ้าน 0.4 เมตร มีประตู PVC ขนาดกว้าง 0.84 เมตร สูง 1.84 เมตร หันหน้าไปทางทิศใต้ โดยทำการเก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ตั้งแต่เวลา 06.00 ถึง 18.00 น. รวมทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง ต่อวัน (วันที่ 7 พ.ย. 2562, 12 พ.ย. 2562 และ 16 พ.ย. 2562) การเก็บค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ด้วยไพรานอมิเตอร์ที่มีค่า sensitivity เท่ากับ 9.92 ไมโครโวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ในส่วนของการเก็บค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมโดยใช้สายเทอร์มิคัปเปิลแบบเค ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เช่นเดียวกัน



ภาพ 94 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาระการทำความเย็นของอาคาร (7 พ.ย. 2562, 12 พ.ย. 2562 และ 16 พ.ย. 2562)

จากภาพ 94 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในแต่ละวันจะเริ่มต้นประมาณ 23 ถึง 24 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 32 องศาเซลเซียส และผันแปรขึ้นลงระหว่าง 32 ถึง 40 องศาเซลเซียส และเริ่มลดลงเมื่อถึงเวลา 17.00 น. ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าผันแปรกับความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิ

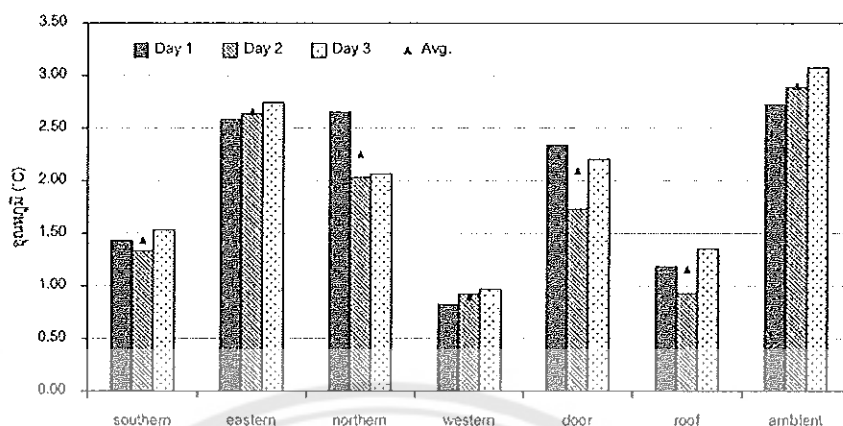
อากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้นตาม โดยค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 874.33 และ -4.37 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 38.40 และ 23.77 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังตาราง 17

ตาราง 17 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาระการทำงานเย็นของอาคาร

วันที่	ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )				อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)			
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	SD
1	821.07	-4.03	379.59	312.42	36.90	23.10	31.36	4.04
2	933.47	-5.04	356.10	284.46	38.80	24.30	32.31	4.49
3	868.45	-4.03	386.41	315.87	39.50	23.90	32.73	4.53
เฉลี่ย	874.33	-4.37	374.03	304.25	38.40	23.77	32.13	4.36

จากตาราง 17 ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาระการทำงานเย็นของอาคารทั้ง 3 วัน พบว่าค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 374.03 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 32.13 องศาเซลเซียส โดยค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยสูงอยู่ที่ 304.25 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการกระจายตัวสูง ซึ่งเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ และการกระจายตัวของเมฆ ที่ทำให้ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์แปรผันตาม ในส่วนของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 4.36

ในการทดสอบภาระการทำงานเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ได้ทำการติดตั้งตำแหน่งสายเทอร์โมคัปเปิลแบบแคตเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เพื่อทำการบันทึกค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคารทดสอบ อุณหภูมิผนังภายนอก - ภายในอาคารทดสอบ ทั้ง 5 ทิศ (ทิศใต้ ทิศตะวันตก ทิศเหนือ ทิศตะวันออก และเพดาน) และอุณหภูมิประตูภายนอก - ภายในอาคารทดสอบ เป็นระยะเวลา 3 วัน (7 พ.ย. 2562, 12 พ.ย. 2562 และ 16 พ.ย. 2562) ตลอด 24 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

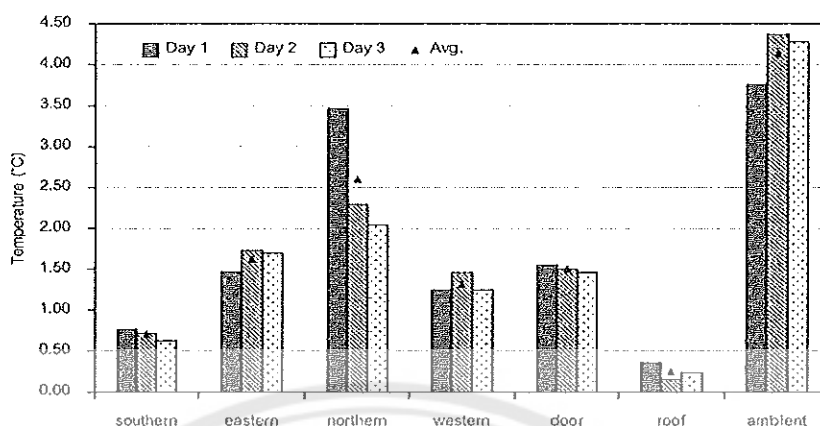


ภาพ 95 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู ภายนอก - ภายใน และหลังคาอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ในช่วงเวลากลางวัน

ตาราง 18 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคาร ในช่วงเวลา กลางวัน

วันที่	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)						
	ทิศใต้	ทิศตะวันตก	ทิศเหนือ	ทิศตะวันออก	ประตู	หลังคา	อากาศ
1	1.43	2.59	2.65	0.82	2.34	1.19	2.72
2	1.34	2.64	2.03	0.92	1.73	0.93	2.89
3	1.54	2.74	2.07	0.97	2.21	1.36	3.08
เฉลี่ย	1.43	2.65	2.25	0.91	2.09	1.16	2.90

จากตาราง 17 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคาร ในช่วงเวลากลางวัน พบว่า ทิศตะวันตกและทิศเหนือ ของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา เป็นทิศที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิล้อมอยู่ที่ 2.65 และ 2.25 องศาเซลเซียส ซึ่งอาคาร ทดสอบหันหน้าไปทางทิศใต้ และทำการติดตั้งประตู PVC ที่ด้านหน้าของอาคารทดสอบ จะเห็นได้ ว่าทางทิศใต้ของอาคารทดสอบมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผนังอาคารอยู่ที่ 1.43 องศา เซลเซียส และมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งประตูอาคารอยู่ที่ 2.09 องศาเซลเซียส

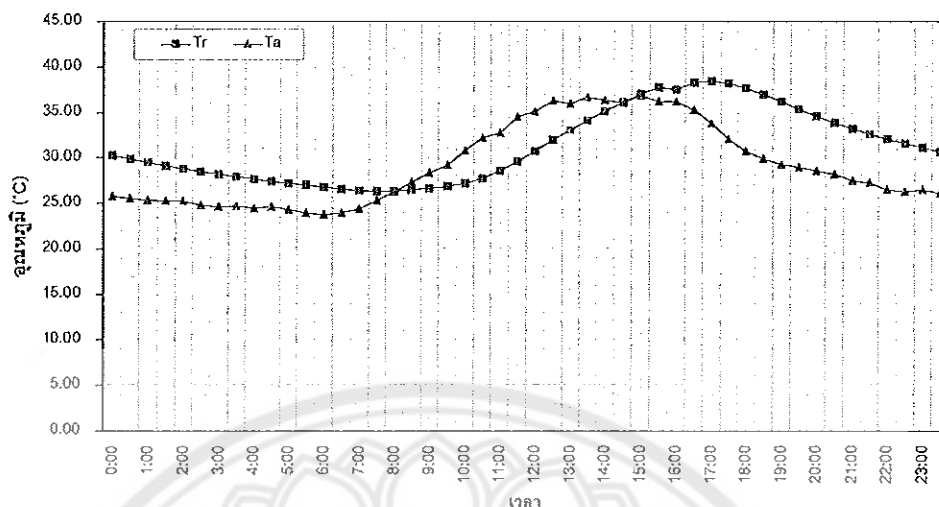


ภาพ 96 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู ภายนอก - ภายใน และหลังคาอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา ในช่วงเวลากลางคืน

ตาราง 19 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคาร ในช่วงเวลา กลางคืน

วันที่	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°C)						
	ทิศใต้	ทิศตะวันตก	ทิศเหนือ	ทิศตะวันออก	ประตู	หลังคา	อากาศ
1	0.77	1.47	3.47	1.24	1.55	0.35	3.76
2	0.72	1.73	2.30	1.46	1.50	0.15	4.37
3	0.63	1.70	2.04	1.25	1.46	0.24	4.28
เฉลี่ย	0.70	1.63	2.60	1.32	1.50	0.25	4.14

จากตาราง 18 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง ประตู และหลังคาอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา และอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคาร ในช่วงเวลากลางคืน จะเห็นได้ว่า ทิศเหนือของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา เป็นทิศที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนังอาคาร สูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.60 องศาเซลเซียส โดยในช่วงเวลากลางคืนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ อากาศภายนอก - ภายในอาคารทดสอบ มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 4.14 องศาเซลเซียส ซึ่งอาคารทดสอบ เกิดการสะสมความร้อนจากช่วงเวลากลางวันส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบช่วง 15.00 ถึง 08.00 น. มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคาร แสดงดังภาพ 97



ภาพ 97 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอก - ภายในอาคารทดสอบ คอนกรีตมวลเบา

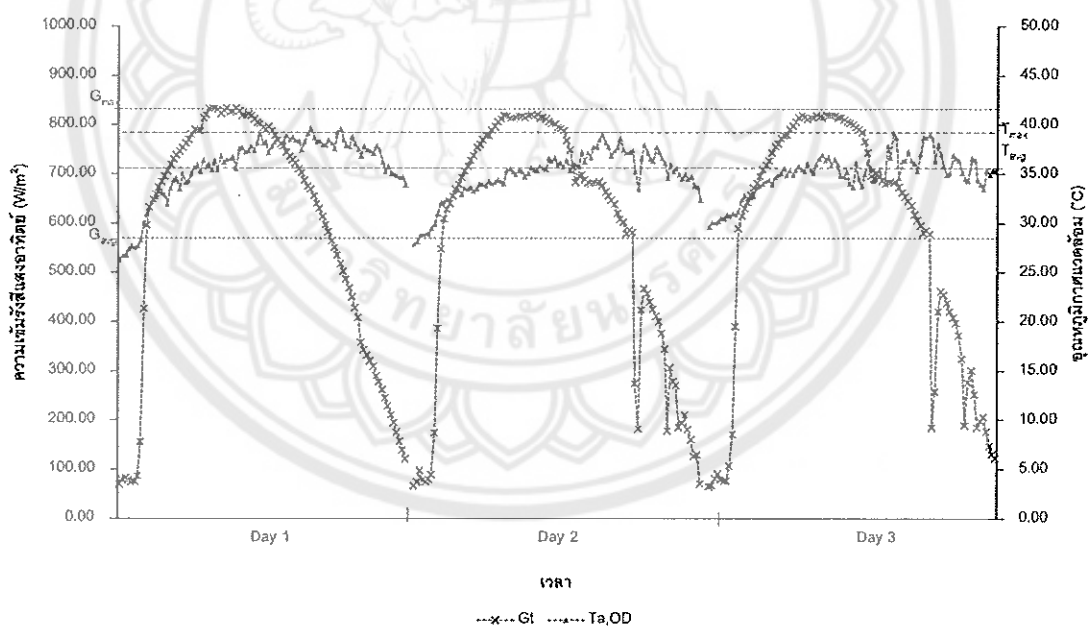
ตาราง 19 แสดงภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

ช่วงเวลา	$q_w$		$q_c$		$Q_c$	
	W	Btu/hr.	W	Btu/hr.	W	Btu/hr.
กลางวัน	199.90	682.25	707.78	2,415.66	907.68	3,097.90
กลางคืน	186.86	637.76	470.93	1,607.30	705.32	2,245.06
ผลต่าง	13.03	44.48	236.85	808.36	202.36	852.84

จากตาราง 19 การประเมินภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา ได้แก่ ช่วงเวลากลางวัน 12 ชั่วโมง (06.00 – 18.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน 12 ชั่วโมง (18.01 – 05.59 น.) พบว่าในช่วงเวลากลางวันมีภาระการทำความเย็นจากตัวอาคาร ( $q_w$ ) สูงกว่าช่วงเวลากลางคืน คิดเป็นผลต่างอยู่ที่ 44.48 Btu/hr. โดยภาระการทำความเย็น การปรับอากาศ ( $q_c$ ) ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน อยู่ที่ 2,415.66 และ 1,607.30 Btu/hr. ตามลำดับ คิดเป็นผลต่างเท่ากับ 808.36 Btu/hr. ส่งผลทำให้ภาระการทำความเย็นของอาคารทดสอบในช่วงเวลากลางวันสูงกว่าในช่วงเวลากลางคืน มีค่าเท่ากับ 3,097.90 Btu/hr. ในขณะที่ภาระการทำความเย็นในช่วงเวลากลางคืนเท่ากับ 2,245.06 Btu/hr. มีค่าน้อยกว่าช่วงเวลากลางวันถึง 852.84 Btu/hr.

## 2. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างระบบกักเก็บความเย็นที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวและระบบกักเก็บความเย็นที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยได้ทำการบันทึกค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ในช่วงระยะเวลา 09.00 ถึง 00.00 น. เป็นระยะเวลา 6 วัน (28 พ.ย. 2562, 2 ธ.ค. 2562, 3 ธ.ค. 2562, 18 ธ.ค. 2562, 19 ธ.ค. 2562 และ 20 ธ.ค. 2562) โดยแบ่งเป็นการทดสอบแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าฝ่ายภูมิภาคเพียงอย่างเดียว 3 วัน (28 พ.ย. 2562, 2 ธ.ค. 2562 และ 3 ธ.ค. 2562) และแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 วัน (18 ธ.ค. 2562, 19 ธ.ค. 2562 และ 20 ธ.ค. 2562) มีค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคารทดสอบ แสดงดังภาพ 98



ภาพ 98 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศภายนอก-ภายในอาคารทดสอบของการทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ช่วง 9.00 – 17.00 น. (18 ธ.ค. 2562, 19 ธ.ค. 2562 และ 20 ธ.ค. 2562)

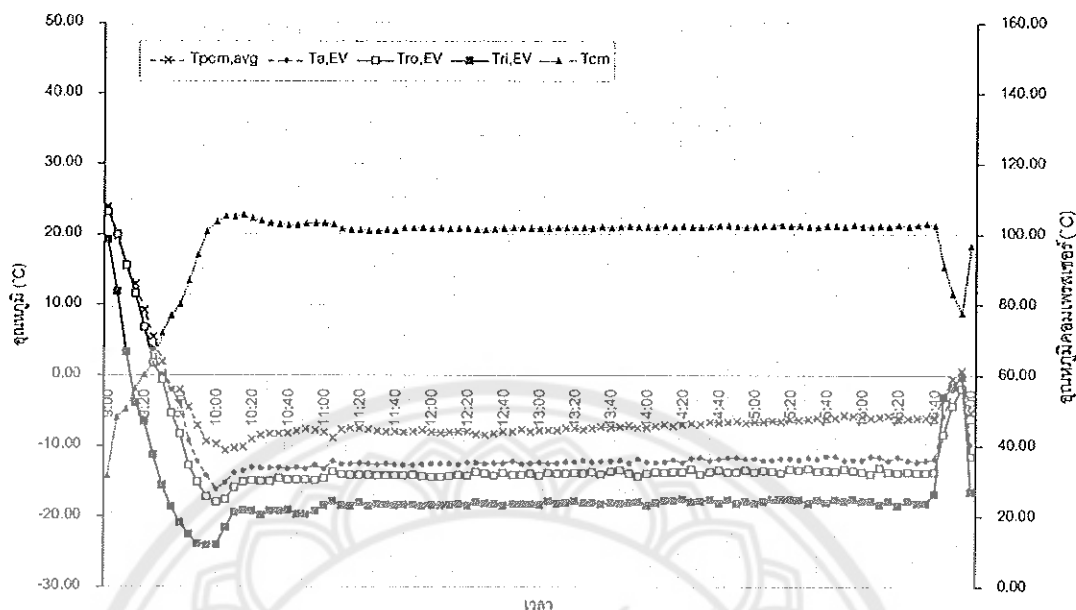
ตาราง 21 แสดงค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบ ประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งใน อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

วันที่	ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m <sup>2</sup> )				อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (°C)			
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	SD
1	833.67	69.76	582.03	250.63	39.60	26.26	35.73	3.26
2	820.36	65.93	566.57	253.11	38.98	27.86	34.85	2.45
3	820.67	65.52	566.11	253.87	39.16	29.64	34.92	2.13
เฉลี่ย	824.90	67.07	571.57	252.54	39.25	27.92	35.17	2.61

จากภาพ 98 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในแต่ละวันจะเริ่มต้นประมาณ 26 – 29 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิมักมีการผันแปรขึ้นลงระหว่าง 33 – 38 องศาเซลเซียส และเริ่มลดลงเมื่อถึงเวลา 16.30 น. โดยค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 824.90 และ 67.07 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 39.25 และ 27.92 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากตาราง 20 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 2.61 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยอยู่ที่ 252.54 เนื่องจากมีการผันแปรตามทิศทางการเคลื่อนที่ดวงอาทิตย์ และปริมาณการกระจายตัวของก้อนเมฆ

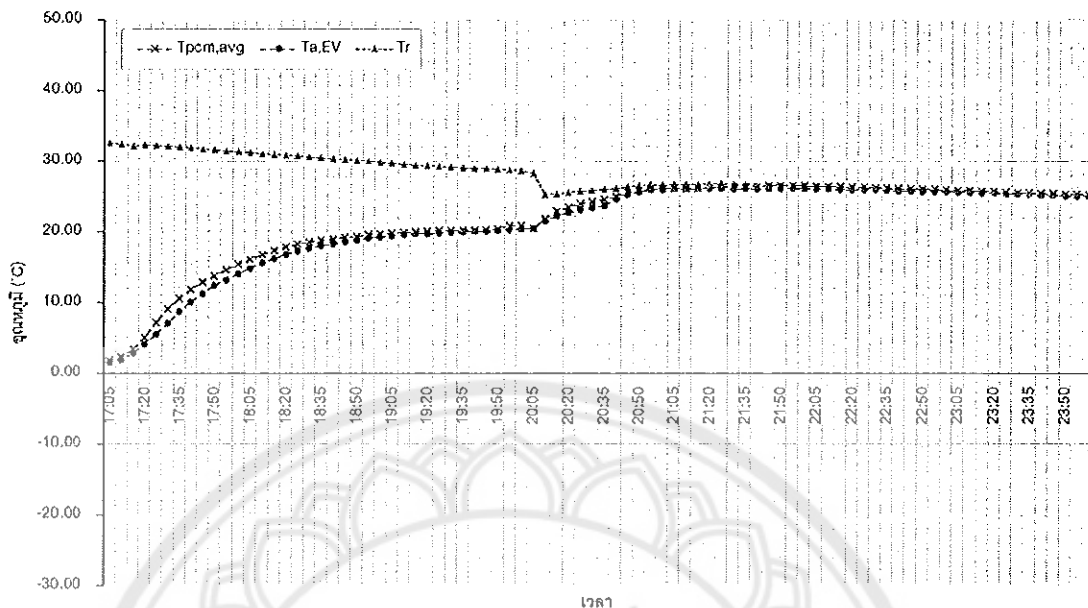
เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะด้วยความถี่ของ Compressor 50 เฮิร์ตซ์ เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ตั้งแต่ 9.00 ถึง 17.00 น. ในทุกวันของการทดสอบ จากนั้นทำการหยุดการทำงานของ Compressor และทำการคายความเย็นออกจากสารเปลี่ยนสถานะในเวลา 20.00 น.





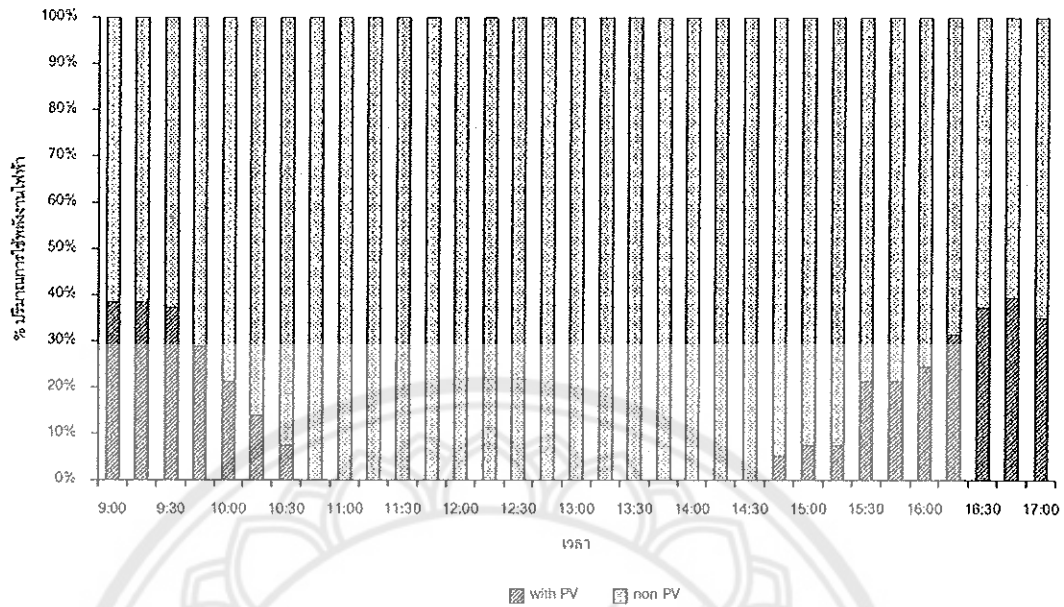
ภาพ 99 แสดงลักษณะการกักเก็บความเย็นของระบบในช่วง Charging Process  
ระยะเวลา 8 ชั่วโมง ตั้งแต่ 9.00 – 17.00 น.

จากภาพ 99 เป็นลักษณะการกักเก็บความเย็นของระบบในช่วงการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ตั้งแต่ 9.00 ถึง 17.00 น. จะเห็นได้ว่าใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ในการดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้สารเปลี่ยนสถานะมีค่าอุณหภูมิติดลบต่ำสุด เท่ากับ  $-10.65$  องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิติดลบคงที่ในช่วง  $-6$  ถึง  $-8$  องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิอากาศภายในระหว่างชุดท่อ Evaporator มีค่าติดลบต่ำสุดอยู่ที่  $-16.02$  องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาอุณหภูมิของ Compressor พบว่ามีค่าสูงที่สุด อยู่ที่  $105.70$  องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิกงที่อยู่ในช่วง 100 ถึง 102 องศาเซลเซียส

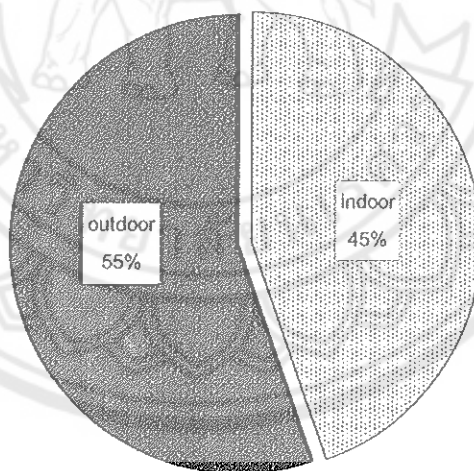


ภาพ 100 แสดงลักษณะการคายความเย็นของระบบในช่วง Discharging Process  
ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ตั้งแต่ 17.00 – 00.00 น.

จากภาพ 100 เป็นลักษณะการคายความเย็นของระบบหลังจากทำการชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหยุดการทำงานของ Compressor สารเปลี่ยนสถานะมีการคายความเย็น และค่อย ๆ ลดระดับความร้อนจากอุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบ แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะในช่วง 17.00 น. ถึง 20.00 น. เนื่องจากชุดท่อ Evaporator มีการสัมผัสอากาศโดยตรงผ่านช่องของพัดลม Evaporator โดยทำการเปิดพัดลม Evaporator เพื่อคายความเย็นออกจากสารเปลี่ยนสถานะ ตั้งแต่เวลา 20.00 น. เป็นต้นไป พบว่าอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิอากาศภายในระหว่างชุดท่อ Evaporator เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และใช้ระยะเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะคายความเย็นและลดระดับความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายในอาคารทดสอบ



ภาพ 101 แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บความเย็น ระหว่างการใช้และไม่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพ 102 แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของส่วนประกอบในระบบกักเก็บความเย็น

การเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบกักเก็บความเย็นที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ เมื่อใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว ตลอดระยะเวลาการชาร์จความเย็น 8 ชั่วโมง ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง โดยในกรณีที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง อยู่ที่ประมาณ 1.13 กิโลวัตต์ชั่วโมง จากภาพ 101 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลา 10.45 น. ถึง 14.30 น. ระบบมีการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเวลา 09.00 น. ถึง 10.30 น. และ 14.45 น. ถึง 17.00 น. ระบบมีการดึงพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเข้ามาช่วย เพื่อให้ Compressor มีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่เพียงพอ และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

โดยส่วนประกอบภายในระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน ได้แก่ Compressor มอเตอร์พัดลม Condenser ที่อยู่ในส่วน Outdoor Unit ภายนอกอาคาร และมอเตอร์พัดลม Evaporator ที่อยู่ในส่วน Indoor Unit ภายในอาคาร เมื่อให้ระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะทำงานเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยทำการเปิดมอเตอร์พัดลม Evaporator ให้ทำงานไปพร้อมกับ Compressor เพื่อประเมินสัดส่วนการใช้พลังงานของส่วนประกอบในระบบ จากภาพ 102 จะเห็นได้ว่า Outdoor Unit ภายนอกอาคารเป็นส่วนประกอบที่ใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด โดยคิดเป็นร้อยละ 55 เมื่อเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งหมด

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการศึกษาออกแบบระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (สำหรับปรับอากาศในบ้านที่อยู่อาศัยที่มีการปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน) เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนา ปรับปรุง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นในโครงสร้างอาคาร โดยได้ทำการศึกษา 3 ส่วนหลักๆ คือ ด้านการออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ด้านประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และด้านการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างการให้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งผลการศึกษาดังต่อไปนี้

การออกแบบโครงสร้างและรูปแบบการทำงานของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ ผู้วิจัยเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภท Organics ชนิดพาราฟิน ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 22 องศาเซลเซียส ใช้รูปแบบชุดคอยล์เย็นแบบท่อกลม 2 ชั้นแบบ Module beam (Cylindrical) จำนวนทั้งหมด 88 ท่อ โดยใช้ท่อชั้นนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.88 มิลลิเมตร ใช้สำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ขนาดความยาว 550 มิลลิเมตร และท่อชั้นในเป็นท่อสารทำความเย็น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.00 มิลลิเมตร ร่วมกับครีบริบายความร้อนแบบแผ่น เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและสารเปลี่ยนสถานะได้อย่างสม่ำเสมอ ปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่บรรจุไว้ในชุดกักเก็บความเย็นอยู่ที่ประมาณ 4.81 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 7.56 ลิตร ใช้คอมเพรสเซอร์แบบ twin rotary ระบบอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สารทำความเย็นชนิด R410A ขนาด 11,601 Btu/hr. สำหรับชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะ โดยที่ระบบมีรูปแบบการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ Charging Process หรือช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ทำหน้าที่สร้างไหลลดความเย็นเก็บสะสมไว้ในระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ และ Discharging Process หรือช่วงการคายความเย็น ที่ทำหน้าที่ดึงไหลลดความเย็นที่เก็บสะสมไว้มาใช้ในช่วงเวลากลางคืน โดยไม่มีการเปิดเครื่องทำความเย็น

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะ โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะเบื้องต้นทั้งหมด 9 กรณี

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบช่วงการกักเก็บความเย็นแบ่งออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ ที่ความถี่ 90 70 60 50 และ 40 เฮิรตซ์ พบว่าที่ความถี่น้อยกว่า ทำให้อุณหภูมิสารทำความเย็นลดลงช้ากว่าและสามารถดึงความร้อนออกจากสารเปลี่ยนสถานะได้น้อยกว่าที่ความถี่สูง แต่ที่ความถี่น้อยกว่าจะทำให้คอมเพรสเซอร์ ทำงานได้เสถียรกว่า ดังนั้นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับชาร์จความเย็นให้กับสารเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 50 เฮิรตซ์ โดยมีค่าอัตราการทำความเย็นของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 2.56 วัตต์ หรือ 8,749.07 Btu/hr. สมรรถนะการทำความเย็น (COP) และอัตราส่วนประสิทธิภาพพลังงาน (EER) อยู่ที่ 3.09 และ 10.53 Btu/hr. ต่อวัตต์ คิดเป็นร้อยละประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของระบบเท่ากับ 7.03 การทดสอบช่วงการคายความเย็นแบ่งออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 และ 35 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วลม 1.56 และ 1.90 เมตรต่อวินาที พบว่าที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบที่สูงกว่า ทำให้สารเปลี่ยนสถานะเกิดการคายความเย็นได้เร็วกว่าประมาณ 5 ถึง 6 นาที โดยความเร็วลมในการคายความเย็นทั้ง 2 กรณีมีผลต่อการคายความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะเพียงเล็กน้อย โดยมีอัตราการคายความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะเฉลี่ยเท่ากับ 1,201.13 Btu/hr. และมีประสิทธิภาพในการคายความเย็นเฉลี่ยของระบบร้อยละ 71.58

การใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่างการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียวกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพียงอย่างเดียว มีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอยู่ที่ 6.11 กิโลวัตต์ชั่วโมง สำหรับการทำความเย็น 8 ชั่วโมง โดยในกรณีที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ระบบมีปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง อยู่ที่ประมาณ 1.13 กิโลวัตต์ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละการประหยัดเท่ากับ 81.57 ซึ่งส่วนประกอบของระบบที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดได้แก่ ชุดคอยล์ร้อนภายนอกอาคาร คิดเป็นร้อยละ 55

### ข้อเสนอแนะ

1. สารเปลี่ยนสถานะที่นำมาใช้ มีการนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งค่าขนส่งมีมูลค่าสูง หากสามารถผลิตสารเปลี่ยนสถานะได้ภายในประเทศจะช่วยลดต้นทุน และระยะเวลาในการจัดส่ง
2. ควรพัฒนาและปรับปรุงรูปแบบการติดตั้งพัดลมของชุดคอยล์เย็น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งพัดลมไว้ด้านของชุดคอยล์เย็น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพในการกักเก็บความเย็นของสารเปลี่ยนสถานะก่อนทำการดึงความเย็นไปใช้งาน



บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. (2562). การรับซื้อไฟฟ้าจากการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา. สืบค้น 25 ตุลาคม 2562, จาก <http://webkc.dede.go.th/testmax/node/157>
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. (2560). โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2560. สืบค้น 28 สิงหาคม 2561, จาก [https://www.dede.go.th/more\\_news.php?cid=547&filename=index](https://www.dede.go.th/more_news.php?cid=547&filename=index).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน. (2560). ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน: หลักการเบื้องต้นของการถ่ายเทความร้อน. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2561, จาก [http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file\\_handbook/Pre\\_Heat/pre\\_heat\\_4.pdf](http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Heat/pre_heat_4.pdf)
- การไฟฟ้านครหลวง. (2561). อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ. สืบค้น 18 กุมภาพันธ์ 2562, จาก <https://www.mea.or.th/profile/109/111>.
- จักรพันธ์ ภวังค์รัตน์. (2551). ระบบกักเก็บความเย็น. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2561, จาก [www.acat.or.th/download/acat\\_or\\_th/journal-3/03%20-%2008.pdf](http://www.acat.or.th/download/acat_or_th/journal-3/03%20-%2008.pdf).
- จิโรจ ไชยสาร. (2556). การพัฒนาหลังคาสองชั้นที่มีส่วนประกอบของแผ่นสะท้อนรังสีความร้อนและสารเปลี่ยนสถานะ (วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- ประกอบ สุรวัฒนาวรรณ, และเจิดศักดิ์ สืบทรัพย์. (2559). การออกแบบและเลือกอุปกรณ์สำหรับการประยุกต์ใช้งาน Ice Thermal Storage. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รพีพรรณ คุ่มปรางค์. (2559). การเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นตัวดูดซับความร้อนใต้แผงเซลล์ (วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.



- สำนักงานคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน (สำนักงาน กกพ.). (2562). *แผนการดำเนินงาน ประจำปี 2562*. สืบค้น 25 ตุลาคม 2562, จาก <https://www.erc.or.th/ERCWeb2/Upload/Document/แผนการดำเนินงานประจำปี2562.pdf>
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน. (2561). *แผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561 - 2580 (PDP2018)*. สืบค้น 28 สิงหาคม 2561, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/นโยบายและแผน/tieb/pdp>.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน. (2562). *รายงานภาพรวมพลังงาน เดือนกันยายน 2562*. สืบค้น 25 ตุลาคม 2562, จาก <http://www.eppo.go.th/index.php/th/ข้อมูลพลังงาน/สถานการณ์พลังงานรายเดือน>.
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน. (2560). *ระบบกักเก็บพลังงาน (Energy Storage System: ESS)*. สืบค้น 25 สิงหาคม 2561, จาก <https://thai-smartgrid.com/เกี่ยวกับสมาร์ทกริด/tech-basic-related-smartgrid/ess/>
- A., A., R., Darzi, S., M., Moosania, F., L., Tan, & M., Farhadi. (2013). Numerical investigation of freecooling system using plate type PCM storage. *Int. Commun. Heat Mass Trans*, 48,155–163.
- B., A., Habeebullah. (2007). Economic feasibility of thermal energy storage systems. *Energy Build.*, 39, 355–363
- B., Zalba, J., M., Marin, L., F., Cabeza, & H., Mehling. (2004). Free cooling of buildings with phase change materials, *Int. J. Refrig.*, 27, 839–849.
- Cabeza, L., et al. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011, 15(3),1675–1695.
- Charles, E., Dorgan, & James, S., Elleson. (2019). *Design Guid for Cool Thermal storage*. ASHRAE Atlanta. Georgia.
- D., Li, C., Yang, & H., Yang. (2019). Experimental and numerical study of a tube-fin cool storage heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.*, 149, 712–722.
- D., MacPhee, & I., Dincer. (2009). Performance assessment of some ice TES systems. *Int.J. Therm. Sci.*, 48, 2288–2299.

- F., Rouault, D., Bruneau, P., Sébastien, & J., Lopez. (2014). Experimental investigation and modelling of a low temperature PCM thermal energy exchange and storage system. *Energy Build.*, 83, 96–107.
- Garg, HP., Mullick, SC., & Bhargava, AK. (1985). Solar thermal energy storage. *Dordrecht: Reidel Publishing Company.*
- Hasnain, SM. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39, 1127–1138.
- Hed, G., & Bellander, R. (2006). Mathematical modelling of PCM air heat exchanger. *Energy Build.*, 38(2), 82–89.
- H., Mehling, & S., Hiebler. (2004). Review on PCM in buildings – current R&D. Paper presented at the *IEA Annex 17 workshop in Arvika*. Sweden.
- I., Dincer. (2002). On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy Build.*, 34, 377–388.
- Jasim, M., Mahdi, Sina, Lohrasbi, Emmanuel, & C., Nsofor. (2019). Hybrid heat transfer enhancement for latent-heat thermal energy storage systems: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 137, 630–649.
- Jessica, Giro-Paloma, Mònica, Martínez, Luisa, F., Cabeza, A., & Inés, Fernández. (2016). Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1059–1075.
- Khedari, J., Yamtraipat, J., Pratintong, N., & Hirunlabh, J. (2000). Thailand ventilation comfort chart. *Energy & Buildings*, 32, 245-249.
- Laura, Colla, a., Laura, Fedele, Simone, Mancin, Ludovico, Danza, & Oronzio, Manca. (2017). Nano-PCMs for enhanced energy storage and passive cooling applications. *Applied Thermal Engineering*, 110, 584-589.
- Li, Dong, Zheng, Yumeng, Liu, Changyu, & Wu, Guozhong. (2015). Numerical analysis on thermal performance of roof contained PCM of a single residential building. *Energy Conversion and Management*, 100, 147-156.

- M., M., Farid, A., M., Khudhair, S., A., Razack, S., & Al-Hallaj. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion Management, 45*, 1597-1615.
- Mohammad, Hoseini, Rahdar, Abolghasem, Emamzadeh, & Abtin, Ataei. (2016). A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *Applied Thermal Engineering, 96*, 391–399.
- M., Sheikholeslami, S., Lohrasbi, D., & D., Ganji. (2016). Numerical analysis of discharging process acceleration in LHTESS by immersing innovative fin configuration using finite element method. *Appl. Therm. Eng., 107*, 154–166.
- Muriel, Iten, Shuli, Liu, & Ashish, Shukla. (2016). A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61*, 175–186.
- Muthuvelan, Thambidurai, Karthik, Panchabikesan, Krishna, Mohan, & N., Velraj, Ramalingam. (2015). Review on phase change material based free cooling of buildings—the way toward sustainability. *Journal of Energy Storage, 4*, 74–88.
- Nattaporn, Chaiyat. (2015). Energy and economic analysis of a building air-conditioner with a phase change material (PCM). *Energy Conversion and Management, 94*, 150–158.
- N., H., S., Tay, F., Bruno, & M., Belusko. (2013). Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD. *Appl. Energy, 104*, 79–86.
- N., Stathopoulos, M., El, Mankibi, & M., Santamouris. (2017). Numerical calibration and experimental validation of a PCM-air heat exchanger model. *Appl. Therm. Eng., 114*, 1064–1072.
- Octavian, G., Pop, Lucian, Fechet, Tutunaru., Florin, Bode, Ancuța, C., Abrudan, Mugur, ... C., Balan. (2018). Energy efficiency of PCM integrated in fresh air cooling systems in different climatic conditions. *Applied Energy, 212*, 976–996.

- Osterman, E., Butala, V., & Stritih, U. (2015). PCM thermal storage system for 'free' heating and cooling of buildings. *Energy Build*, 106, 125–133.
- Osterman, E. (2015). Parametrical analysis of latent heat and cold storage for heating and cooling of rooms. *Appl Therm Eng*, 84, 138–149.
- Parfait, Tatsidjodoung, Nolwenn, LePierres, & Lingai, Luo. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327–349.
- Paula, Marin, Mohammad, Saffari, Alvaro, de, Gracia, Xibingyan, Zhu, Mohammad, M., Farid, Luisa, F., Cabeza, ... Svetlana, Ushak. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable lightweight buildings passive heating in different weather conditions. *Energy and Buildings*, 129, 274–283.
- Paul, Evans. (2018). *Cooling Load Calculation – Cold Room*. Retrieved January 25, 2017, from <http://www.eppo.go.th/index.php/th/component/k2/item/6586-cutpeakpb.html>
- Pillai, KK., & Brinkwarth, BJ. (1976). The storage of low-grade thermal energy using phase change materials. *Applied Energy*, 2, 205–216.
- Rami, Zeinelabdein, Siddig, Omer, & Guohui, Gan. (2018). Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2843–2868.
- R., Ansuini, R., Larghetti, A., Giretti, & M., Lemma. (2011). Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control. *Energy Build*, 43(11), 3019–3026.
- Riffat, S., Mempo, B., & Fang, W. (2013). Phase change material developments: a review. *Int J Ambient Energy*, 2013, 1–14.
- Rodriguez-Ubinas, E., et al. (2012). Applications of phase change material in highly energy efficient houses. *Energy Build*, 50, 49–62.
- Sharma, A., Tyagi, VV., Chen, CR., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 18–45.

- Simen, Edsjø, Kalnæsa, & Bjørn, Petter, Jelle. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150–176.
- S., M., Borhani, M., J., Hosseini, A., A., Ranjbar, R., Bahrampoury. (2019). Investigation of phase change in a spiral-fin heat exchanger. *Appl. Math. Model.*, 67, 297–314.
- S., Medved, & C., Arkar. (2008). Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage. *Energy Build.*, 40, 429–437.
- S., M., Vakialtojar, & W., Saman. (2001). Analysis and modeling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Appl. Therm. Eng.*, 21, 249–263.
- Stritih, U, & Butala, V. (2011). Energy savings in building with a PCM free cooling system. *Stroj Vestn-J Mech Eng*, 57(2),125–134.
- T., Muthuvelan, K., M., Nibhanupudi, K., Panchabikesan, V., Ramalingam, R., Munisamy. (2018). Experimental investigation of free cooling using phase change material-filled air heat exchanger for energy efficiency in buildings. *Adv. Build. Energy Res.*, 12(2), 139–149.
- U., Stritih, & V., Butala, (2010). Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage. *Int. J. Refrig.*, 33, 1676–1683.
- X., Yang, Z., Lu, Q., Bai, Q., Zhang, L., Jin, & J., Yan. (2017). Thermal performance of a shell and-tube latent heat thermal energy storage unit: role of annular fins. *Appl. Energy*, 202, 558–570.
- Yanbing, K., Yi, J., & Yinping, Z. (2003). Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy Build*, 35(4), 417–425.
- Yaxue, Lin, Yuting, Jia, Guruprasad, Alva, & Guiyin, Fang. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730–2742.
- Zakir, Khan, Zulfiqar, Khan, & Abdul, Ghafoor. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of

materials, thermal stability and compatibility. *Energy Conversion and Management*, 115, 132–158.

Zalba, B. (2004). Free cooling of buildings with phase change materials. *Int. J. Refrig.*, 27(8), 839–49.





ผลการทดสอบ

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 90 Hz

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
0	26.33	25.90	26.10	27.00	27.20	32.40	30.90	30.80	28.00
1	25.88	20.00	20.40	26.80	27.17	36.80	23.00	35.73	29.13
2	24.06	10.93	17.07	25.43	26.87	41.47	16.30	44.67	29.63
3	21.83	7.83	14.97	22.77	26.43	46.37	15.63	48.90	28.83
4	19.50	7.57	8.07	20.67	26.30	54.07	13.47	51.60	26.07
5	17.53	2.83	3.23	19.00	25.97	54.87	7.10	62.87	31.60
6	16.19	-0.40	0.03	17.63	25.47	59.90	1.77	62.87	29.47
7	15.28	-1.23	-0.83	16.80	25.17	63.30	0.90	66.30	29.27
8	14.25	-1.67	-1.17	16.07	24.83	70.17	5.10	68.03	26.57
9	13.48	-2.10	-1.53	15.23	24.63	65.87	-4.77	62.37	28.23
10	12.64	-2.80	-2.20	14.07	24.33	72.10	2.13	68.00	26.00
11	12.40	-3.67	-0.93	12.93	24.10	74.00	5.57	72.97	27.07
12	12.36	-6.37	9.13	12.77	24.03	70.53	5.47	76.03	28.90
13	12.08	-5.43	1.10	11.93	23.83	72.83	2.83	70.13	28.27
14	11.03	-4.80	-3.03	10.27	23.77	75.27	7.73	75.50	29.60
15	9.92	-7.40	-3.90	9.23	23.43	78.43	11.00	80.20	28.03
16	9.03	-8.67	-1.30	8.40	23.07	79.87	8.87	83.63	30.07

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 70 Hz

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
0	22.18	22.60	22.50	22.20	26.60	36.80	28.50	35.00	30.30
1	21.79	16.43	17.17	22.70	25.47	39.10	17.47	36.00	28.00
2	21.13	11.60	16.70	21.97	25.80	38.30	7.40	40.07	32.37



เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
3	20.37	9.37	14.80	20.67	25.63	42.57	8.47	47.10	33.63
4	18.96	8.83	9.33	19.63	25.47	52.63	15.43	57.37	31.23
5	17.83	5.17	5.73	18.80	25.17	55.87	7.67	56.03	29.03
6	16.58	2.30	2.93	18.03	25.03	52.17	-1.13	53.27	33.33
7	15.42	0.83	1.33	17.80	24.80	55.80	1.90	65.63	33.93
8	14.56	0.23	0.83	17.53	24.67	67.00	2.97	63.63	28.53
9	13.94	-0.50	0.13	16.87	24.63	66.90	0.90	63.77	28.03
10	12.92	-1.80	-1.03	15.57	24.30	62.23	-1.80	67.67	32.80
11	12.20	-2.17	-2.00	13.80	24.10	72.07	7.70	74.23	29.00
12	11.38	-6.37	2.10	12.27	23.87	72.80	1.40	71.10	28.37
13	10.31	-6.57	0.20	10.70	24.33	77.13	8.47	79.87	29.93
14	8.56	-6.10	-4.00	8.13	24.07	78.57	11.93	85.07	31.03
15	6.94	-7.30	-5.87	6.23	24.07	79.57	2.60	82.73	32.13
16	5.68	-7.73	-6.57	5.00	24.37	89.97	8.57	94.47	29.97

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 60 Hz

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
0	25.50	24.90	25.00	26.10	26.40	33.40	29.50	31.10	25.80
1	24.78	17.37	18.93	25.93	26.30	35.90	20.13	35.43	24.63
2	23.18	10.47	16.53	24.50	26.10	42.63	13.40	37.73	23.43
3	20.93	8.50	12.17	22.20	25.67	44.10	15.23	49.77	28.40
4	19.06	7.90	8.40	20.27	25.40	51.23	15.73	55.23	26.87
5	17.57	4.73	5.23	18.77	24.97	57.60	7.90	52.40	23.07
6	16.70	2.73	3.17	17.73	24.53	59.47	6.77	63.77	27.07
7	16.01	1.80	2.33	17.17	24.20	63.43	2.87	62.13	25.03
8	15.17	1.30	1.87	16.57	24.00	64.40	2.50	63.50	25.60
9	14.53	0.77	1.33	15.90	23.70	63.53	2.93	69.50	27.57

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
10	13.83	-0.03	0.60	15.07	23.77	66.80	3.20	68.10	25.57
11	12.98	-1.57	-0.77	13.97	23.43	69.50	1.77	66.93	23.27
12	12.74	-3.03	2.87	13.00	23.00	68.37	5.17	73.87	27.03
13	12.56	-5.33	5.67	12.43	22.57	69.80	2.87	72.00	26.30
14	11.53	-4.57	-3.43	10.67	21.77	70.50	2.37	69.00	25.10
15	10.09	-5.80	-3.93	9.20	21.60	73.07	8.93	78.77	26.10
16	9.01	-8.37	-2.43	8.17	21.37	77.03	10.27	80.30	24.87

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 50 Hz

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
0	23.90	18.50	18.00	26.00	26.60	50.5	10.1	44.2	29.6
1	23.33	13.60	16.91	25.09	26.73	46.72	7.83	45.22	30.02
2	22.09	10.93	13.90	23.28	26.87	50.7	9.23	48.1	27.29
3	20.61	10.81	11.28	21.53	27.01	49.79	8.28	48.57	28.24
4	19.62	9.24	9.68	20.01	27.26	47.16	6.37	45.74	29.02
5	18.64	6.67	9.20	18.83	27.33	46.02	6.84	45.33	28.94
6	17.57	6.01	6.48	17.99	27.48	45.72	10.13	47.95	30.35
7	16.69	5.05	5.43	17.75	27.52	47.89	11.23	48.71	29.21
8	16.06	4.70	5.04	17.71	27.58	48.4	10.94	47.67	28.21
9	15.68	4.05	4.41	17.67	27.68	47.17	8.83	45.8	28.91
10	15.38	3.57	3.95	17.39	27.68	45.79	8.82	48.66	29.93
11	14.82	2.75	3.20	16.74	27.64	49.98	9.99	48.07	27.63
12	13.88	2.09	2.52	15.64	27.57	48	5.43	48.66	29.57
13	12.54	1.21	1.68	14.04	27.64	51.72	6.32	52.82	28.72
14	10.92	0.04	0.70	12.03	27.70	53.46	3.71	54.93	29.24
15	9.04	-1.86	-0.37	9.87	27.77	58.39	4.36	59.97	29.14
16	7.51	-2.33	-2.23	7.97	28.59	62.73	3.36	65.74	29.12

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการกักเก็บความเย็น ที่ความถี่คอมเพรสเซอร์ 40 Hz

เวลา (min.)	PCM (°C)	R410A เข้า Evap. (°C)	R410A ออก Evap. (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งวัดค้ำ (°C)
0	24.88	16.60	16.40	34.80	38.10	26.80	26.30	27.10	29.40
1	23.77	16.67	12.97	25.23	26.70	41.77	23.47	43.03	28.40
2	21.94	14.33	8.97	23.03	26.40	41.77	12.93	43.13	31.07
3	19.80	9.50	9.00	21.00	26.17	45.63	12.37	48.00	30.30
4	18.43	8.63	8.23	19.47	25.90	47.73	10.00	51.53	30.67
5	17.74	7.90	7.47	18.43	25.33	55.63	11.13	56.33	27.27
6	17.35	7.23	6.80	17.93	25.07	58.67	11.63	57.23	27.30
7	16.90	6.63	6.10	17.77	24.93	57.97	9.27	56.33	27.73
8	16.38	5.90	5.37	17.47	24.60	56.13	6.40	55.30	29.70
9	15.84	5.53	4.73	17.10	24.40	56.50	5.20	55.50	29.33
10	15.30	4.97	4.23	16.60	24.10	58.10	6.10	56.17	28.67
11	14.73	4.37	3.57	16.10	24.10	54.23	6.40	62.03	32.23
12	14.03	3.50	2.63	15.33	23.80	55.63	3.37	58.63	30.47
13	13.24	2.83	2.13	14.47	23.47	53.73	-1.97	57.07	31.23
14	12.24	1.90	1.10	13.37	23.30	61.73	7.60	63.23	29.00
15	11.36	0.13	-1.17	12.07	22.93	56.97	-0.63	58.83	30.83
16	11.04	0.70	-3.30	11.23	22.73	58.97	-0.53	62.53	30.13

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการคายความเย็น ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 °C,  
ความเร็วลม 1.56 m/s

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
0	-2.73	-1.83	28.56	7.83
1	-2.47	-1.53	28.84	8.90
2	3.22	16.90	29.17	10.30
3	12.09	19.47	29.53	17.50
4	16.62	23.27	29.73	19.23

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
5	18.52	24.50	29.13	19.80
6	19.58	25.83	29.40	21.40
7	20.84	26.60	29.43	22.37
8	21.21	26.87	29.03	22.87
9	21.83	26.83	29.33	23.67
10	21.89	28.30	29.93	24.97
11	21.88	27.47	29.33	24.80
12	22.37	27.77	29.60	25.70
13	23.88	27.93	29.43	25.57
14	23.93	28.43	30.03	26.27
15	24.40	29.07	30.23	27.20
16	24.23	28.37	30.17	27.13
17	24.75	28.90	30.13	27.53
18	25.08	28.80	30.30	27.57
19	26.65	30.33	30.80	28.00
20	27.06	30.27	30.97	28.40
21	27.63	30.43	30.77	28.47
22	28.07	30.50	30.70	28.60
23	28.13	30.07	30.23	28.90
24	29.03	30.63	30.83	29.83
25	29.93	30.43	30.70	29.77
26	30.08	30.83	30.60	29.80
27	30.40	31.33	31.10	30.57
28	30.87	31.93	31.70	30.83
29	30.73	31.33	31.33	30.77
30	31.50	32.03	31.77	31.17
31	30.55	31.37	31.67	31.20
32	31.35	31.27	30.90	30.77
33	31.10	31.70	31.67	31.23
34	30.17	30.90	31.17	31.00
35	30.86	31.10	31.13	30.77

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการคายความเย็น ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 30 °C,  
ความเร็วลม 1.90 m/s

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
0	-3.31	-1.67	29.00	9.57
1	-2.69	0.23	29.29	10.43
2	4.11	18.43	29.43	13.30
3	13.61	20.63	29.60	18.73
4	17.48	24.27	29.83	20.47
5	19.02	25.70	29.83	21.77
6	19.63	26.07	29.50	22.47
7	20.79	27.07	29.80	23.33
8	21.48	27.90	30.03	24.10
9	21.51	27.73	30.03	25.17
10	22.54	28.07	29.83	24.80
11	23.30	28.37	29.67	25.33
12	23.60	28.17	29.57	25.43
13	23.78	28.70	30.07	26.53
14	24.51	28.53	30.27	26.23
15	25.36	28.60	29.70	26.57
16	24.63	28.47	29.87	26.90
17	25.50	28.43	29.87	27.30
18	26.24	29.70	30.63	27.77
19	27.15	30.37	30.83	28.10
20	26.48	29.17	30.03	27.93
21	27.12	29.90	30.30	28.63
22	28.18	30.87	31.23	29.40
23	28.50	30.27	30.90	29.97
24	29.51	30.80	30.57	29.40
25	29.89	31.60	31.53	30.53
26	29.70	30.70	30.80	30.10

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
27	30.88	31.23	31.27	30.30
28	30.17	30.77	31.07	30.63
29	30.57	31.80	32.27	31.37
30	30.79	31.07	30.73	30.47
31	30.81	30.27	30.57	30.10
32	30.51	31.37	31.40	31.20
33	31.16	31.33	31.40	30.73
34	31.12	31.97	31.67	31.37
35	30.73	31.33	31.43	31.07

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการคายความเย็น ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 °C,  
ความเร็วลม 1.56 m/s

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
0	-0.83	-0.40	34.60	15.24
1	3.88	12.70	34.85	16.35
2	10.65	20.70	35.07	22.77
3	17.48	25.67	35.30	25.23
4	21.64	29.20	35.30	26.85
5	23.18	30.40	35.47	27.83
6	24.48	31.63	35.23	27.67
7	24.66	31.13	35.10	27.53
8	25.38	31.63	35.17	27.93
9	25.67	31.40	35.07	28.80
10	27.02	32.93	35.93	29.90
11	28.05	33.07	35.47	29.47
12	28.69	33.63	35.40	30.43
13	28.68	33.57	35.80	31.23
14	29.68	34.80	36.70	32.10
15	31.01	34.63	35.97	31.77

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
16	31.82	34.87	35.87	32.07
17	32.36	34.93	35.90	32.56
18	32.82	35.03	35.70	33.97
19	34.01	35.70	36.30	34.51
20	34.43	36.50	35.73	34.67
21	34.87	36.53	36.73	35.53
22	35.11	36.13	36.07	34.70
23	34.37	36.43	36.23	35.07
24	35.03	37.07	36.93	35.60
25	35.61	36.47	36.43	35.67
26	35.02	36.00	36.30	35.20
27	35.53	35.77	35.90	35.13
28	36.08	36.90	36.67	35.83
29	35.56	36.73	36.43	36.03
30	35.29	36.47	36.60	36.33
31	36.43	37.30	36.77	36.13
32	36.21	36.77	36.53	36.23
33	35.43	36.13	36.33	36.17
34	36.44	36.47	36.30	35.90
35	36.14	36.27	36.00	35.90

ประสิทธิภาพของระบบในช่วงการคายความเย็น ที่อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ 35 °C,  
ความเร็วลม 1.90 m/s

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
0	-1.65	-0.40	35.60	14.57
1	2.73	12.70	35.85	16.07
2	12.26	20.70	35.07	18.77
3	17.72	25.67	35.30	21.27
4	19.73	27.83	36.00	22.23

เวลา (min.)	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	ลมออก Evap. (°C)
5	20.73	29.30	36.13	24.03
6	21.54	29.97	36.27	25.40
7	23.09	31.40	36.97	26.93
8	23.97	31.07	36.87	27.20
9	24.28	30.97	36.30	27.90
10	25.85	32.27	36.43	29.27
11	26.85	33.40	35.47	30.07
12	28.78	34.17	36.17	30.73
13	29.51	34.63	36.20	31.23
14	30.13	35.67	36.67	31.90
15	31.23	37.13	37.57	33.77
16	32.58	37.70	38.17	34.87
17	34.58	38.03	38.23	35.93
18	35.44	37.90	38.07	36.13
19	36.00	39.10	39.30	37.90
20	36.83	38.27	37.73	36.67
21	37.22	38.10	37.80	37.13
22	36.77	37.57	37.77	37.40
23	37.10	37.50	37.50	36.73
24	37.04	37.70	37.70	37.07
25	37.96	38.37	38.00	37.47
26	37.17	37.67	37.57	37.20
27	37.97	38.40	38.10	37.60
28	37.23	38.10	38.30	37.70
29	37.08	38.70	38.77	38.17
30	37.01	37.50	37.43	37.27
31	36.97	37.60	37.70	37.37
32	37.14	37.40	37.53	37.33
33	37.28	38.00	38.27	38.03
34	36.93	37.23	37.37	37.57
35	37.44	37.33	37.40	37.53



ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบภาระการทำงานทำความเย็นของอาคาร

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
6:00	-2.52	23.10	-1.01	24.50	-2.02	23.90
6:05	-2.52	23.20	-1.01	24.30	-2.02	24.10
6:10	-0.50	23.10	-0.50	24.40	-2.52	24.00
6:15	0.00	23.10	1.01	24.40	-2.02	24.00
6:20	0.50	23.50	4.03	24.40	-1.51	24.00
6:25	4.54	23.60	6.55	24.50	-0.50	23.90
6:30	9.58	23.80	9.07	24.30	0.00	23.90
6:35	13.10	23.70	10.08	24.40	2.52	24.10
6:40	16.13	23.90	15.12	24.40	5.54	24.20
6:45	21.17	24.20	18.65	24.50	8.57	24.10
6:50	22.68	24.60	25.71	24.70	13.10	24.40
6:55	24.70	24.60	33.77	24.80	15.63	24.50
7:00	28.23	24.60	49.40	25.00	19.66	24.70
7:05	30.24	24.70	55.95	25.20	34.27	24.90
7:10	34.78	24.50	55.95	25.20	34.78	25.50
7:15	39.31	25.00	64.52	25.40	44.35	25.40
7:20	44.35	25.30	76.11	25.70	34.27	25.30
7:25	46.88	25.40	96.27	26.00	37.80	25.60
7:30	49.90	25.50	98.79	26.10	41.83	25.70
7:35	55.95	25.30	82.66	26.20	84.17	26.00
7:40	55.44	25.70	81.15	26.20	46.88	26.20
7:45	57.96	25.70	93.25	26.30	50.40	26.40
7:50	61.49	25.80	98.29	26.50	52.92	26.60
7:55	63.00	25.90	106.35	26.60	56.45	26.80
8:00	94.25	26.00	115.93	26.90	59.98	26.80
8:05	74.09	26.50	126.51	27.20	63.00	27.00

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
8:10	71.07	26.20	127.52	27.20	68.55	27.60
8:15	86.19	27.00	126.51	27.20	114.92	27.40
8:20	85.69	27.30	126.51	27.30	73.59	28.80
8:25	116.43	27.40	139.62	27.30	139.62	27.90
8:30	87.20	27.30	142.14	27.60	78.63	27.80
8:35	91.23	27.60	141.13	27.90	80.65	28.10
8:40	98.29	28.10	148.19	27.70	84.68	28.60
8:45	343.25	28.20	140.63	28.30	89.72	29.00
8:50	135.58	28.10	132.06	28.40	110.38	29.10
8:55	119.96	27.70	129.54	28.20	127.52	28.80
9:00	136.09	28.20	143.65	28.20	101.31	29.30
9:05	159.27	28.30	185.48	28.60	108.87	29.50
9:10	125.00	28.60	190.02	28.60	113.91	29.60
9:15	129.54	28.80	189.01	28.80	134.07	30.10
9:20	132.56	29.20	199.60	28.70	111.39	29.90
9:25	136.59	28.40	231.35	29.50	116.43	30.20
9:30	139.62	29.00	253.02	29.70	119.96	30.40
9:35	162.80	29.10	257.06	29.90	127.02	31.10
9:40	190.52	29.20	283.27	30.60	260.08	30.50
9:45	170.36	29.50	283.77	30.20	517.64	32.50
9:50	190.52	30.20	272.18	30.10	517.64	31.20
9:55	602.82	31.00	284.78	29.80	538.31	34.10
10:00	614.42	31.00	362.40	30.90	571.07	33.60
10:05	633.06	30.90	383.57	31.50	576.11	33.60
10:10	619.96	30.80	422.88	31.90	596.77	34.10
10:15	599.29	30.80	369.96	31.20	609.88	33.80
10:20	621.47	30.80	397.68	32.20	623.99	34.70
10:25	622.98	31.00	307.96	32.40	631.55	32.60
10:30	654.74	31.20	634.07	33.40	639.11	32.90

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
10:35	660.28	31.60	549.90	33.70	648.19	33.70
10:40	685.48	32.00	380.04	31.40	649.70	35.50
10:45	699.09	32.40	387.10	31.40	661.79	33.10
10:50	718.25	32.30	447.08	32.10	689.01	33.80
10:55	705.65	33.20	417.34	31.20	702.62	33.80
11:00	732.36	32.80	419.86	31.80	716.23	34.10
11:05	766.63	32.80	583.17	32.70	724.29	36.50
11:10	744.46	32.90	449.09	33.00	731.85	38.00
11:15	772.18	32.60	421.88	32.90	732.36	36.60
11:20	771.17	33.20	820.06	34.40	755.54	35.50
11:25	753.02	34.00	933.47	34.40	740.93	37.00
11:30	767.64	33.20	929.44	34.30	753.53	36.70
11:35	774.19	35.20	843.75	34.50	780.24	36.90
11:40	783.77	34.30	781.75	34.40	782.26	37.20
11:45	773.69	34.20	414.82	33.70	768.15	36.20
11:50	787.80	35.60	415.32	33.20	779.23	34.70
11:55	782.26	34.30	858.37	36.00	809.98	34.30
12:00	801.92	33.40	803.93	36.50	807.46	37.90
12:05	793.35	34.10	800.40	36.20	823.08	34.30
12:10	802.92	34.20	807.46	37.50	803.93	37.10
12:15	804.94	34.40	805.95	37.30	791.83	38.10
12:20	808.97	34.50	809.98	37.70	840.73	37.30
12:25	821.07	35.10	803.93	37.40	838.71	36.70
12:30	817.54	35.00	793.35	38.40	836.69	37.90
12:35	818.04	33.60	794.35	36.10	868.45	34.80
12:40	808.97	35.10	791.83	37.60	810.48	35.50
12:45	800.91	34.30	785.28	37.60	809.98	37.90
12:50	792.84	34.80	778.23	38.00	796.37	35.50
12:55	792.34	34.60	773.19	37.80	767.14	35.00

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
13:00	790.83	35.50	767.14	37.70	829.64	36.30
13:05	785.28	34.40	763.61	36.00	833.67	37.50
13:10	774.70	34.70	754.54	37.40	812.50	36.70
13:15	774.19	35.30	743.45	35.70	806.45	38.90
13:20	766.13	35.10	745.46	36.40	803.43	38.40
13:25	757.56	34.70	731.35	37.70	797.88	38.10
13:30	736.90	36.10	718.75	37.20	777.72	39.50
13:35	741.43	35.70	714.21	38.50	775.20	34.20
13:40	730.34	36.40	691.03	38.80	227.32	36.50
13:45	720.77	35.80	706.65	38.40	778.23	36.50
13:50	688.00	35.10	686.49	36.40	782.76	36.10
13:55	702.12	34.50	691.03	35.70	740.42	35.50
14:00	699.09	34.90	680.44	38.40	728.33	36.60
14:05	681.45	35.20	680.44	38.10	699.09	35.90
14:10	661.79	34.80	673.39	34.90	688.51	36.10
14:15	649.70	35.00	650.20	37.70	698.59	36.60
14:20	634.07	35.30	632.06	38.40	648.69	37.30
14:25	620.97	34.80	617.44	35.30	651.71	35.90
14:30	620.46	35.00	607.86	36.20	610.38	36.50
14:35	601.31	36.10	587.20	38.20	524.70	35.70
14:40	590.73	36.30	580.14	35.40	508.57	37.80
14:45	572.08	35.90	560.48	38.40	600.81	39.10
14:50	558.47	36.00	545.36	38.10	610.89	38.30
14:55	540.32	36.50	532.26	35.20	599.29	37.30
15:00	523.19	36.00	512.60	35.70	568.04	36.90
15:05	502.52	34.60	500.50	37.20	559.48	36.80
15:10	492.94	36.00	482.86	35.90	553.93	36.60
15:15	481.85	34.40	460.18	37.10	542.34	37.00
15:20	463.21	34.60	444.56	35.60	517.64	38.60

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
15:25	441.03	34.80	431.45	36.60	484.88	36.10
15:30	403.23	36.50	412.80	36.60	468.75	37.35
15:35	418.35	36.90	393.15	37.40	424.40	35.20
15:40	331.65	35.80	372.98	37.10	413.81	37.30
15:45	351.31	36.00	354.33	36.50	406.25	34.40
15:50	338.71	35.40	341.23	36.80	387.60	37.40
15:55	336.19	34.80	321.07	36.70	345.77	37.00
16:00	332.16	35.20	297.88	35.50	315.52	35.90
16:05	302.42	35.30	277.72	34.60	293.85	36.80
16:10	274.70	35.70	260.08	36.40	276.21	35.60
16:15	267.64	35.20	246.98	36.20	257.06	36.20
16:20	277.72	35.70	229.84	35.60	229.84	34.70
16:25	191.03	34.70	209.17	35.00	211.69	34.60
16:30	101.81	33.00	193.55	35.00	195.06	34.40
16:35	117.44	33.20	174.40	34.80	179.44	35.50
16:40	82.66	32.70	159.78	35.10	161.79	33.80
16:45	89.72	32.60	142.14	34.90	141.63	35.20
16:50	105.34	32.80	50.91	33.30	129.03	34.50
16:55	90.73	32.80	88.21	33.30	117.44	34.30
17:00	59.98	32.20	92.24	33.40	103.83	33.90
17:05	48.39	32.20	78.13	33.00	90.73	33.70
17:10	46.37	31.90	44.35	32.40	76.61	32.90
17:15	28.73	31.60	32.26	32.30	51.92	32.90
17:20	24.19	31.10	23.19	32.20	32.26	32.20
17:25	24.19	30.70	16.13	31.70	25.71	31.90
17:30	18.15	30.60	10.58	31.40	19.66	31.70
17:35	12.60	30.50	5.04	31.10	12.60	31.20
17:40	7.06	30.30	0.50	31.20	6.55	31.50
17:45	2.52	30.40	-2.02	30.80	2.02	31.10

เวลา	7 พ.ย. 62		12 พ.ย. 62		16 พ.ย. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
17:50	-1.51	30.20	-3.53	30.60	-1.51	31.10
17:55	-3.53	30.10	-4.54	30.50	-3.02	30.80
18:00	-4.03	30.00	-5.04	30.60	-4.03	30.70

ความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมวันทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เวลา	28 พ.ย. 62		2 ธ.ค. 62		3 ธ.ค. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
9:00	69.76	26.26	65.93	27.86	65.52	29.64
9:05	79.94	26.70	74.09	28.08	66.73	30.02
9:10	82.06	26.80	96.88	28.74	80.95	30.06
9:15	77.72	27.42	77.92	28.84	90.32	30.20
9:20	74.60	27.62	74.80	28.94	78.02	30.48
9:25	74.40	27.50	78.33	28.96	76.21	30.44
9:30	85.28	27.68	88.71	29.50	75.60	30.80
9:35	155.65	28.28	174.09	29.92	106.75	30.76
9:40	426.01	30.02	385.48	30.98	170.56	30.92
9:45	596.98	30.96	547.76	32.08	389.96	30.86
9:50	633.47	31.68	609.68	32.12	590.12	31.18
9:55	648.99	32.36	628.23	32.42	614.72	32.44
10:00	659.07	32.70	640.12	32.40	630.75	32.74
10:05	672.98	33.28	654.74	32.86	642.94	32.50
10:10	684.48	33.08	669.46	33.24	657.86	32.64
10:15	695.16	32.94	679.74	33.34	671.98	32.80
10:20	707.46	31.90	693.55	32.90	681.85	33.68
10:25	719.15	33.54	705.54	33.50	696.17	33.80

เวลา	28 พ.ย. 62		2 ธ.ค. 62		3 ธ.ค. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
10:30	730.65	34.38	715.83	33.48	707.96	34.02
10:35	739.11	34.48	727.22	33.60	718.55	34.30
10:40	746.17	33.44	738.31	33.24	727.12	34.40
10:45	755.04	34.98	754.03	33.46	742.94	33.92
10:50	763.10	34.14	760.58	34.00	755.75	34.62
10:55	769.56	34.28	769.76	33.98	762.00	34.94
11:00	781.05	35.00	778.13	33.82	772.08	35.08
11:05	790.12	35.68	778.53	34.24	778.33	35.64
11:10	788.10	35.88	788.71	34.04	779.44	34.86
11:15	787.30	35.26	795.87	34.18	791.13	35.38
11:20	814.72	36.38	805.44	34.34	797.38	34.94
11:25	819.96	35.74	812.20	34.22	806.65	35.44
11:30	832.26	36.00	818.65	34.04	814.11	35.78
11:35	833.27	35.42	817.14	35.36	818.65	35.48
11:40	833.67	36.34	813.00	35.48	816.33	35.30
11:45	831.85	35.44	812.90	35.18	811.69	36.06
11:50	822.98	36.80	814.82	35.00	814.72	35.42
11:55	830.44	36.18	816.94	35.38	814.42	35.16
12:00	833.47	36.48	816.63	35.26	818.04	36.00
12:05	825.81	36.50	815.02	34.74	815.93	36.60
12:10	827.02	36.68	819.05	35.06	814.92	36.96
12:15	833.67	35.54	820.36	35.60	820.67	36.38
12:20	828.23	37.56	817.04	35.44	818.95	36.66
12:25	818.95	37.64	819.86	35.38	817.94	35.82
12:30	819.15	37.24	814.11	35.78	818.65	36.46
12:35	821.77	37.36	814.52	35.62	814.31	35.96
12:40	818.95	37.76	812.10	35.52	814.11	34.82
12:45	812.10	37.40	806.15	36.60	810.48	34.70
12:50	804.84	38.12	803.93	36.32	806.25	35.18

เวลา	28 พ.ย. 62		2 ธ.ค. 62		3 ธ.ค. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
12:55	801.81	39.04	801.71	36.60	803.33	34.02
13:00	795.56	38.12	794.96	35.86	800.50	33.70
13:05	790.93	38.18	791.94	36.14	794.56	36.12
13:10	796.17	37.16	787.30	35.78	790.93	34.48
13:15	787.30	37.80	768.65	36.40	785.08	33.76
13:20	778.83	38.20	749.09	35.38	765.22	34.98
13:25	767.74	38.72	714.52	36.02	743.75	36.16
13:30	760.89	38.12	683.27	35.96	695.46	35.58
13:35	756.85	38.26	695.46	35.76	690.63	34.28
13:40	743.95	38.90	698.79	37.24	702.92	34.50
13:45	736.09	38.52	689.42	36.28	694.76	35.48
13:50	729.03	38.80	682.36	37.14	686.49	34.52
13:55	721.77	38.42	680.95	36.64	680.14	34.44
14:00	711.49	38.38	681.55	37.70	683.37	37.84
14:05	702.62	37.42	682.36	37.74	682.66	36.66
14:10	687.50	38.30	684.88	38.46	682.16	39.16
14:15	675.40	39.14	676.61	38.98	684.38	38.68
14:20	669.76	39.60	663.61	38.14	672.88	34.58
14:25	654.84	38.70	655.44	37.82	663.00	36.34
14:30	639.31	38.26	647.08	36.80	653.33	36.32
14:35	630.04	38.38	638.51	37.34	645.36	37.24
14:40	612.90	37.92	621.07	37.66	636.29	36.38
14:45	596.17	37.96	608.17	38.54	617.64	36.10
14:50	583.06	38.40	602.02	37.46	606.65	35.30
14:55	565.12	38.14	578.13	37.14	595.77	37.02
15:00	550.81	37.56	585.69	37.22	579.33	38.70
15:05	534.88	39.26	581.15	37.40	585.69	38.70
15:10	517.34	39.52	274.19	35.22	578.33	38.92
15:15	502.42	38.52	182.56	33.48	184.68	38.72



เวลา	28 พ.ย. 62		2 ธ.ค. 62		3 ธ.ค. 62	
	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)	ความเข้มแสง (W/m <sup>2</sup> )	สิ่งแวดล้อม (°C)
15:20	486.69	37.88	423.49	36.62	257.76	36.34
15:25	467.94	37.80	466.94	37.90	421.17	37.92
15:30	449.80	38.78	457.06	37.16	462.00	37.00
15:35	427.82	38.04	440.52	36.52	454.64	35.74
15:40	407.86	37.54	424.60	36.36	437.70	34.92
15:45	358.06	36.80	410.99	37.72	421.37	35.10
15:50	343.35	37.78	399.40	37.20	408.37	36.88
15:55	331.05	37.44	376.92	36.60	397.28	36.62
16:00	320.36	37.34	344.05	36.14	371.77	36.42
16:05	308.87	37.12	177.72	34.56	324.80	35.16
16:10	290.12	37.86	306.55	35.96	188.91	34.50
16:15	277.42	37.54	278.93	35.26	276.31	34.30
16:20	262.10	36.18	270.46	35.54	300.40	36.60
16:25	245.16	35.28	185.48	34.90	251.92	36.48
16:30	227.62	35.80	194.05	34.50	185.48	34.40
16:35	210.28	35.08	210.18	34.92	198.29	33.98
16:40	194.15	35.02	180.65	34.54	206.55	33.44
16:45	174.80	34.80	159.38	34.74	176.81	35.38
16:50	157.26	34.68	126.51	33.72	147.18	34.90
16:55	138.71	34.64	129.13	33.64	130.24	35.36
17:00	120.77	33.86	70.67	32.32	121.88	35.30

ประสิทธิภาพของวงจรกักเก็บความเย็นของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งในอาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
9:00	23.45	23.60	24.30	35.90	1.50	21.80	26.50
9:05	23.92	23.87	24.27	31.63	19.30	23.17	26.37

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งสกปรก (°C)
9:10	19.68	19.84	22.88	48.10	11.89	19.98	26.44
9:15	15.43	15.64	21.20	50.42	3.32	15.60	27.30
9:20	12.97	11.62	20.28	56.34	-3.88	11.64	27.50
9:25	9.26	6.90	19.58	60.14	-6.54	6.86	27.74
9:30	5.42	3.76	19.02	63.10	-11.30	1.74	27.14
9:35	1.95	0.08	18.66	72.06	-15.58	-0.58	27.34
9:40	-1.99	-1.90	20.08	77.04	-18.58	-5.38	27.82
9:45	-2.05	-3.86	24.10	80.36	-20.80	-8.28	27.46
9:50	-4.42	-9.26	24.72	86.84	-22.48	-12.78	28.42
9:55	-7.11	-12.14	25.40	94.36	-23.88	-15.06	28.54
10:00	-9.32	-14.24	25.72	101.00	-24.06	-17.18	28.64
10:05	-9.68	-16.02	26.18	103.70	-23.94	-17.92	27.60
10:10	-10.65	-15.22	26.06	105.20	-21.48	-17.48	28.40
10:15	-10.35	-13.82	26.26	105.12	-19.38	-15.90	28.60
10:20	-10.15	-13.56	26.54	105.70	-19.12	-15.06	29.08
10:25	-9.04	-13.04	26.68	104.56	-19.20	-14.86	29.12
10:30	-8.51	-13.14	26.88	103.88	-19.76	-15.02	29.52
10:35	-8.27	-13.10	27.00	103.36	-19.18	-15.00	28.46
10:40	-8.31	-13.08	26.96	102.88	-19.18	-14.64	28.88
10:45	-8.19	-13.22	27.40	102.68	-19.04	-14.78	29.12
10:50	-7.86	-13.08	27.92	102.72	-19.64	-14.84	31.06
10:55	-7.60	-13.20	27.58	103.12	-19.70	-14.80	29.32
11:00	-7.76	-12.72	27.72	103.30	-19.20	-14.92	28.92
11:05	-8.06	-13.22	27.32	103.32	-18.44	-14.64	28.48
11:10	-8.81	-12.20	27.38	102.92	-17.86	-13.66	29.24
11:15	-7.66	-12.56	27.50	101.70	-18.36	-14.04	29.94
11:20	-7.44	-12.54	27.38	101.36	-18.52	-14.16	30.48
11:25	-7.52	-12.44	27.48	101.28	-18.04	-14.10	30.04
11:30	-7.71	-12.54	27.64	101.22	-18.46	-14.14	29.74
11:35	-7.83	-12.66	27.62	100.88	-18.22	-14.20	30.60

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
11:40	-7.97	-12.56	27.86	101.38	-18.34	-14.20	31.42
11:45	-7.98	-12.68	27.86	101.08	-18.44	-14.22	31.16
11:50	-8.04	-12.74	28.06	101.94	-18.28	-14.18	31.34
11:55	-7.97	-12.74	28.16	101.86	-18.28	-14.16	31.06
12:00	-7.74	-12.68	28.30	101.94	-18.50	-14.34	30.62
12:05	-8.06	-12.60	28.30	101.60	-18.44	-14.36	31.46
12:10	-8.19	-12.60	28.62	101.68	-18.38	-14.42	31.56
12:15	-8.04	-12.58	28.72	101.48	-18.32	-14.34	31.40
12:20	-7.93	-12.66	28.80	101.66	-18.22	-14.14	31.50
12:25	-7.93	-12.40	28.92	101.66	-18.38	-14.24	31.34
12:30	-8.32	-12.40	29.14	101.40	-17.90	-13.76	30.78
12:35	-8.47	-12.52	29.20	101.36	-18.08	-13.90	31.72
12:40	-8.24	-12.44	29.20	101.60	-18.18	-14.24	32.02
12:45	-7.96	-12.48	29.38	101.62	-18.36	-13.86	31.64
12:50	-7.99	-12.20	29.74	101.84	-18.24	-14.12	32.32
12:55	-7.65	-12.52	29.94	101.92	-18.16	-14.12	31.16
13:00	-7.99	-12.44	29.82	101.72	-18.18	-13.90	32.64
13:05	-7.75	-12.36	30.06	101.74	-18.28	-14.20	31.36
13:10	-7.78	-12.50	30.20	101.72	-17.86	-13.82	31.94
13:15	-7.80	-12.44	30.46	101.86	-18.06	-13.88	32.24
13:20	-7.51	-12.26	30.56	101.92	-18.00	-13.90	31.66
13:25	-7.46	-12.28	30.42	101.90	-17.84	-13.84	31.40
13:30	-7.64	-12.06	30.72	101.94	-18.02	-13.94	32.22
13:35	-7.50	-12.28	30.72	101.78	-18.00	-13.70	32.10
13:40	-7.29	-12.20	31.04	102.02	-18.18	-13.98	31.76
13:45	-7.43	-12.20	31.06	101.96	-18.00	-13.66	32.08
13:50	-7.34	-12.10	31.22	102.04	-18.06	-13.42	31.70
13:55	-7.10	-12.46	31.26	102.24	-17.98	-13.96	32.52
14:00	-7.39	-11.86	31.56	102.18	-17.90	-14.28	31.14
14:05	-7.36	-12.30	31.74	102.08	-18.44	-13.94	32.68

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
14:10	-7.16	-12.32	31.70	102.02	-17.98	-13.74	32.56
14:15	-6.97	-12.26	31.90	102.42	-17.74	-13.78	32.44
14:20	-7.15	-12.00	32.00	102.02	-17.68	-13.72	32.02
14:25	-6.98	-12.34	31.84	102.36	-17.52	-13.74	32.64
14:30	-6.77	-11.82	32.22	102.02	-17.88	-13.38	32.04
14:35	-6.93	-11.64	32.44	102.08	-17.80	-14.00	33.10
14:40	-6.62	-12.06	32.38	102.30	-17.66	-13.68	31.92
14:45	-6.69	-11.86	32.56	102.54	-18.06	-13.40	32.82
14:50	-6.58	-11.72	32.60	102.48	-17.66	-13.74	31.96
14:55	-6.48	-11.70	32.74	102.36	-18.12	-13.74	32.06
15:00	-6.70	-11.90	32.70	102.12	-17.84	-13.40	32.34
15:05	-6.63	-11.78	32.96	102.36	-18.06	-13.76	32.56
15:10	-6.48	-12.06	32.94	102.40	-17.78	-13.56	32.40
15:15	-6.38	-11.98	33.00	102.54	-17.50	-13.60	31.46
15:20	-6.48	-11.82	33.16	102.70	-17.54	-13.78	30.70
15:25	-6.22	-11.82	33.16	102.44	-17.54	-13.32	30.66
15:30	-6.36	-11.94	32.72	102.46	-17.62	-13.40	31.44
15:35	-6.18	-11.70	33.14	102.22	-18.10	-13.26	31.26
15:40	-6.02	-11.84	33.36	102.12	-17.64	-13.58	30.90
15:45	-6.02	-11.46	33.64	102.42	-18.00	-13.48	30.56
15:50	-6.06	-11.50	33.70	102.42	-17.64	-13.66	29.88
15:55	-5.60	-12.10	33.32	102.34	-17.86	-13.34	30.14
16:00	-5.72	-11.96	33.28	102.72	-17.56	-13.54	29.22
16:05	-5.81	-11.92	33.40	102.28	-17.80	-13.68	28.58
16:10	-6.06	-11.46	33.66	102.32	-17.82	-13.98	29.10
16:15	-5.89	-11.62	33.60	102.42	-18.34	-13.16	29.26
16:20	-5.72	-12.10	33.26	102.26	-17.78	-13.72	28.74
16:25	-6.09	-11.60	33.56	102.68	-18.40	-13.82	28.38
16:30	-6.08	-12.06	33.26	102.38	-17.84	-13.76	27.80
16:35	-6.01	-12.22	33.08	102.78	-18.10	-13.82	27.42

เวลา	PCM (°C)	ไอน้ำ Evap. (°C)	ไอน้ำห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
16:40	-5.99	-12.02	33.02	103.02	-18.08	-13.82	27.36
16:45	-6.01	-11.90	33.14	102.70	-16.78	-13.72	27.04
16:50	-2.89	-5.72	33.04	90.94	-3.04	-8.34	26.66
16:55	-0.50	-2.00	32.92	83.20	-1.56	-4.24	26.58
17:00	0.66	0.08	32.82	77.74	-0.14	-1.86	26.48

เวลา	PCM (°C)	ไอน้ำ Evap. (°C)	ไอน้ำห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
9:00	20.91	21.58	24.50	28.38	16.15	21.20	28.93
9:05	17.13	18.38	23.40	46.48	-0.06	16.98	29.64
9:10	12.06	12.80	23.16	61.18	-6.48	11.18	30.08
9:15	6.26	2.36	23.02	70.94	-12.62	0.88	30.00
9:20	1.20	-5.34	23.34	78.38	-17.32	-6.68	30.28
9:25	-2.37	-9.46	23.54	85.10	-20.56	-11.20	30.70
9:30	-4.71	-12.70	23.60	92.18	-23.46	-14.54	31.48
9:35	-6.50	-15.06	24.02	98.28	-25.02	-17.26	31.16
9:40	-8.18	-15.70	23.82	104.18	-25.00	-17.72	31.44
9:45	-9.46	-16.52	24.22	108.28	-24.64	-18.04	31.10
9:50	-10.12	-16.30	24.64	109.84	-22.52	-18.36	31.58
9:55	-10.02	-15.54	24.42	109.92	-21.50	-16.94	30.96
10:00	-9.91	-15.08	24.72	110.20	-21.18	-16.72	31.70
10:05	-9.81	-14.54	25.00	109.88	-20.72	-16.42	31.00
10:10	-9.66	-14.44	25.02	109.62	-20.78	-16.36	31.36
10:15	-9.84	-14.62	25.20	106.76	-20.58	-16.26	30.68
10:20	-9.90	-14.64	25.50	107.74	-20.48	-16.34	30.38
10:25	-10.10	-14.68	25.74	108.48	-20.70	-16.18	32.08
10:30	-10.39	-14.58	25.84	108.56	-20.94	-16.18	32.64
10:35	-10.14	-14.86	26.04	108.58	-20.82	-16.60	32.32
10:40	-10.19	-14.58	26.30	108.68	-20.74	-16.52	32.36
10:45	-10.96	-14.62	26.68	108.74	-19.06	-16.30	32.22
10:50	-10.54	-14.52	26.70	108.50	-19.23	-15.38	32.18

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
10:55	-10.50	-14.44	26.78	108.32	-19.59	-15.70	32.56
11:00	-10.48	-14.30	26.78	108.04	-19.86	-15.48	32.92
11:05	-9.49	-13.98	26.80	107.32	-19.72	-15.60	32.84
11:10	-9.09	-13.84	27.18	107.08	-19.42	-15.50	32.60
11:15	-8.78	-13.62	27.32	106.62	-19.14	-15.22	32.12
11:20	-8.72	-13.54	27.44	106.54	-19.14	-14.94	32.98
11:25	-8.83	-13.18	27.64	106.50	-19.04	-15.04	33.54
11:30	-8.80	-13.44	28.00	106.10	-18.92	-15.24	33.20
11:35	-8.86	-13.62	28.48	105.76	-19.50	-15.14	33.12
11:40	-8.37	-13.36	28.60	105.72	-19.08	-14.98	31.40
11:45	-8.16	-13.32	28.66	105.74	-18.92	-15.06	33.96
11:50	-8.33	-13.26	28.84	105.94	-18.86	-14.80	33.80
11:55	-8.12	-12.84	28.98	105.70	-18.62	-14.80	33.42
12:00	-8.28	-12.98	29.06	105.54	-19.24	-14.40	34.30
12:05	-8.52	-13.02	29.26	105.22	-18.84	-14.56	32.98
12:10	-8.40	-13.46	29.39	104.89	-18.96	-14.66	33.02
12:15	-8.28	-13.59	29.52	105.31	-19.08	-14.79	33.59
12:20	-8.15	-13.31	29.77	105.67	-18.47	-14.26	33.27
12:25	-8.14	-13.19	29.84	105.49	-18.59	-14.33	33.40
12:30	-8.37	-12.86	29.54	105.18	-18.92	-14.36	32.54
12:35	-8.11	-12.92	29.90	105.12	-18.90	-14.62	34.48
12:40	-7.82	-12.94	30.06	104.92	-18.68	-14.68	35.36
12:45	-7.89	-12.82	30.18	105.08	-18.88	-14.56	34.16
12:50	-7.51	-12.76	30.34	105.28	-18.58	-14.56	34.20
12:55	-7.53	-12.70	30.60	104.38	-18.38	-14.36	32.80
13:00	-7.56	-12.56	30.74	104.56	-18.46	-14.32	34.06
13:05	-7.66	-12.62	30.88	104.72	-18.56	-14.20	33.94
13:10	-7.74	-12.56	30.96	104.60	-18.80	-14.22	33.50
13:15	-7.46	-12.90	31.18	104.44	-18.54	-14.30	34.00
13:20	-7.55	-12.48	31.24	104.78	-19.44	-13.90	33.96

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
13:25	-7.15	-12.94	31.34	105.28	-18.62	-14.30	34.58
13:30	-7.09	-12.64	31.56	105.66	-18.62	-14.12	34.10
13:35	-7.35	-12.28	31.86	105.24	-18.42	-14.18	33.38
13:40	-7.27	-12.06	31.82	104.72	-18.20	-13.94	32.50
13:45	-7.42	-12.38	32.02	104.64	-18.20	-13.86	33.38
13:50	-7.12	-12.34	32.24	105.10	-18.54	-14.04	34.78
13:55	-7.06	-12.40	32.38	105.44	-18.48	-14.06	33.14
14:00	-7.01	-12.24	32.58	105.50	-18.10	-13.92	34.34
14:05	-6.74	-12.36	32.60	106.22	-18.26	-13.94	34.72
14:10	-6.78	-12.44	32.70	105.98	-18.38	-13.88	34.86
14:15	-6.87	-11.86	33.04	106.56	-18.08	-13.88	34.38
14:20	-6.66	-12.80	32.84	105.94	-17.60	-13.88	33.16
14:25	-6.40	-12.36	32.62	106.24	-18.30	-13.60	34.20
14:30	-6.53	-12.38	32.92	105.78	-18.00	-13.58	32.82
14:35	-6.87	-11.82	33.48	105.92	-17.94	-13.92	33.32
14:40	-6.50	-11.94	33.46	105.44	-17.98	-13.58	32.44
14:45	-6.68	-11.82	33.64	105.00	-17.80	-13.60	32.42
14:50	-6.58	-11.86	33.60	104.86	-17.92	-13.54	32.36
14:55	-6.46	-11.94	33.62	104.62	-18.18	-13.62	32.92
15:00	-6.82	-11.86	33.71	104.79	-17.85	-13.42	32.72
15:05	-6.66	-11.65	33.78	104.53	-17.59	-13.11	32.68
15:10	-6.50	-11.23	33.82	104.17	-17.36	-13.02	32.41
15:15	-6.53	-11.48	33.85	104.25	-17.62	-13.28	32.26
15:20	-6.45	-11.76	33.91	104.64	-17.84	-13.53	32.22
15:25	-6.56	-11.88	33.94	104.38	-18.12	-13.68	32.16
15:30	-6.31	-12.02	33.99	104.68	-18.00	-13.52	32.28
15:35	-6.20	-11.74	33.90	104.52	-18.00	-13.56	31.42
15:40	-6.16	-11.68	33.98	104.78	-18.16	-13.64	31.96
15:45	-6.04	-11.78	34.02	104.82	-18.32	-13.80	32.00
15:50	-6.16	-11.86	34.06	104.74	-18.08	-13.64	31.98

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
15:55	-6.20	-11.88	34.02	104.76	-18.40	-13.42	31.08
16:00	-6.23	-11.86	34.00	104.36	-18.18	-13.54	30.92
16:05	-6.19	-11.78	34.10	104.36	-18.48	-13.78	31.48
16:10	-6.04	-12.06	34.10	104.68	-18.22	-13.60	30.88
16:15	-5.97	-11.88	34.04	104.80	-18.48	-13.72	30.50
16:20	-6.07	-12.02	33.98	104.88	-18.36	-13.68	30.10
16:25	-6.09	-11.98	33.96	104.92	-18.42	-13.76	30.00
16:30	-6.08	-11.90	33.98	104.52	-18.46	-13.72	29.92
16:35	-6.04	-12.02	33.92	104.56	-18.52	-13.74	29.64
16:40	-6.12	-12.04	33.76	104.58	-18.46	-13.76	28.76
16:45	-6.15	-12.16	33.70	104.46	-18.78	-13.82	28.42
16:50	-6.05	-12.40	33.50	103.86	-17.12	-13.68	28.26
16:55	-2.75	-5.70	33.62	92.12	-2.70	-8.36	28.04
17:00	-0.68	-2.40	33.50	85.70	-1.87	-4.70	27.90

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
9:00	22.17	22.57	25.37	27.63	21.87	22.47	28.83
9:05	19.48	19.58	24.58	45.74	-0.76	17.88	29.56
9:10	14.44	14.66	24.16	61.50	-4.76	12.62	29.72
9:15	8.74	5.04	23.78	69.78	-10.28	3.40	30.24
9:20	3.62	-3.20	24.00	77.94	-15.36	-4.58	30.68
9:25	0.15	-7.88	24.22	84.52	-18.58	-9.06	30.16
9:30	-2.70	-10.78	24.24	90.64	-20.90	-12.12	30.28
9:35	-4.79	-13.10	24.34	95.54	-23.50	-14.76	30.46
9:40	-6.15	-14.84	24.58	101.98	-24.70	-17.04	31.66
9:45	-7.83	-15.36	24.48	106.84	-24.34	-17.64	31.00
9:50	-8.57	-16.64	25.00	110.86	-24.50	-17.98	30.70
9:55	-9.40	-16.84	25.18	111.42	-23.06	-18.32	30.62
10:00	-9.58	-15.54	25.22	111.24	-20.68	-16.98	31.08
10:05	-9.33	-14.74	25.42	112.36	-20.08	-15.90	31.78



เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
10:10	-8.93	-13.82	25.80	113.40	-19.74	-16.10	32.44
10:15	-8.69	-13.50	26.04	113.28	-19.68	-15.90	32.48
10:20	-8.81	-13.72	26.54	113.34	-19.44	-15.42	31.66
10:25	-9.00	-14.16	26.16	112.38	-19.26	-15.12	31.82
10:30	-8.81	-13.34	26.30	111.96	-19.90	-14.98	32.38
10:35	-8.66	-13.60	26.74	112.40	-19.32	-15.42	32.16
10:40	-8.67	-13.06	26.86	112.88	-19.58	-15.20	32.64
10:45	-8.73	-13.65	26.91	112.64	-19.56	-15.18	32.71
10:50	-8.89	-13.32	27.34	112.02	-18.94	-15.10	33.68
10:55	-9.42	-12.68	27.48	111.98	-17.40	-14.22	33.64
11:00	-8.43	-12.50	27.54	110.74	-18.40	-13.80	32.92
11:05	-8.07	-12.32	27.68	109.76	-18.26	-13.88	33.16
11:10	-8.11	-12.38	26.80	109.84	-18.26	-13.88	32.36
11:15	-7.84	-12.34	27.18	109.92	-18.38	-13.88	32.22
11:20	-7.67	-12.40	27.32	110.20	-18.08	-13.60	32.18
11:25	-7.47	-12.24	27.44	109.88	-17.60	-13.58	32.56
11:30	-7.61	-12.36	27.64	109.62	-18.30	-13.92	32.92
11:35	-8.18	-12.36	27.96	109.20	-17.82	-13.78	32.96
11:40	-8.24	-12.40	28.08	108.40	-17.68	-13.92	33.76
11:45	-7.98	-12.44	28.36	107.68	-17.82	-13.90	34.64
11:50	-7.68	-12.44	28.50	107.50	-18.20	-13.78	35.24
11:55	-7.67	-12.28	28.92	107.64	-18.08	-14.02	34.20
12:00	-7.51	-12.20	29.02	107.62	-17.60	-13.98	33.40
12:05	-7.59	-12.20	29.22	107.12	-18.08	-13.80	33.06
12:10	-7.74	-12.28	29.36	106.76	-17.64	-13.74	34.26
12:15	-7.54	-12.24	29.56	106.86	-18.06	-13.68	34.72
12:20	-7.06	-12.10	30.02	106.88	-18.08	-13.70	34.44
12:25	-7.02	-12.04	30.08	106.58	-17.50	-14.02	35.10
12:30	-6.81	-11.98	30.12	106.32	-17.70	-13.38	34.84
12:35	-6.94	-11.86	30.46	106.54	-17.58	-13.54	35.64

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบหุ้ม (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
12:40	-6.84	-11.68	30.56	106.46	-17.56	-13.66	35.36
12:45	-6.90	-11.58	30.82	106.58	-17.60	-13.52	34.04
12:50	-7.06	-11.70	31.02	106.26	-17.50	-13.16	34.04
12:55	-7.01	-11.66	31.34	106.22	-17.42	-13.16	35.00
13:00	-6.63	-11.84	31.24	106.68	-17.52	-13.32	33.74
13:05	-6.82	-11.86	31.24	106.54	-17.85	-13.42	33.40
13:10	-6.66	-11.65	31.34	106.50	-17.59	-13.11	32.54
13:15	-6.50	-11.23	31.56	106.10	-17.36	-13.02	34.48
13:20	-6.53	-11.48	31.86	105.76	-17.62	-13.28	35.36
13:25	-6.45	-11.76	31.82	105.72	-17.84	-13.53	34.16
13:30	-6.57	-11.40	31.40	106.58	-17.38	-13.22	35.06
13:35	-6.38	-11.42	31.68	106.34	-17.12	-13.14	33.18
13:40	-6.41	-11.26	31.72	106.30	-17.20	-13.10	34.16
13:45	-6.32	-11.60	31.96	106.12	-17.32	-13.14	35.06
13:50	-6.44	-11.16	32.00	105.92	-17.10	-13.02	34.66
13:55	-6.33	-11.42	32.32	106.10	-17.10	-12.90	35.08
14:00	-6.36	-11.48	32.44	105.94	-17.08	-13.00	35.86
14:05	-6.03	-11.32	32.48	105.98	-17.24	-13.10	35.50
14:10	-6.22	-11.04	32.90	105.96	-17.04	-13.08	34.58
14:15	-5.94	-11.66	32.54	106.06	-16.82	-12.76	33.80
14:20	-5.79	-11.34	32.80	106.22	-17.32	-12.60	35.56
14:25	-5.85	-11.30	33.18	105.74	-17.94	-12.70	35.44
14:30	-5.63	-11.38	33.14	106.08	-17.04	-12.56	34.00
14:35	-5.83	-11.08	33.58	105.86	-16.78	-13.00	34.56
14:40	-5.65	-11.24	33.72	105.82	-16.84	-12.64	33.56
14:45	-5.73	-11.06	33.86	106.08	-16.64	-12.40	33.90
14:50	-5.50	-10.94	33.82	105.76	-17.00	-12.50	33.94
14:55	-5.47	-10.86	33.94	105.90	-17.16	-12.40	33.66
15:00	-5.45	-10.76	34.08	105.74	-16.50	-12.46	32.78
15:05	-5.42	-10.84	34.02	105.54	-16.42	-12.32	33.52

เวลา	PCM (°C)	โพ Evap. (°C)	โพห้อง (°C)	Comp. (°C)	R410A เข้า Comp. (°C)	R410A ออก Comp. (°C)	สิ่งแวดล้อม (°C)
15:10	-5.48	-10.80	34.26	105.42	-16.86	-12.32	34.46
15:15	-5.29	-10.74	34.42	105.04	-16.88	-12.34	33.90
15:20	-5.33	-10.86	34.50	105.68	-16.58	-12.40	33.00
15:25	-5.33	-10.68	34.66	105.38	-16.82	-12.26	33.74
15:30	-5.34	-10.52	34.58	105.28	-16.82	-12.06	32.66
15:35	-5.23	-10.52	34.62	105.44	-16.46	-12.22	32.42
15:40	-5.26	-10.56	34.62	105.16	-16.48	-12.04	32.26
15:45	-5.10	-10.54	34.76	105.28	-16.72	-12.16	32.72
15:50	-5.04	-10.42	34.82	105.20	-16.82	-12.42	33.18
15:55	-5.11	-10.68	34.80	105.54	-16.80	-12.42	33.50
16:00	-5.14	-10.60	34.96	105.68	-16.96	-12.46	32.50
16:05	-4.97	-10.68	34.76	105.78	-17.16	-12.54	32.52
16:10	-4.92	-10.66	34.88	105.68	-16.98	-12.32	32.58
16:15	-5.00	-10.70	34.86	105.98	-16.86	-12.34	31.70
16:20	-4.99	-10.52	34.96	106.12	-16.90	-12.44	30.92
16:25	-5.05	-10.58	34.90	106.10	-16.76	-12.32	30.44
16:30	-4.97	-10.70	34.82	105.70	-16.86	-12.48	30.00
16:35	-4.93	-11.00	34.64	106.20	-16.96	-12.24	29.52
16:40	-5.19	-10.50	34.76	106.22	-16.76	-12.68	29.10
16:45	-4.74	-11.04	34.46	106.42	-17.04	-12.32	28.82
16:50	-4.92	-10.56	34.66	106.78	-17.42	-12.22	28.66
16:55	-4.97	-10.60	34.54	106.84	-17.44	-12.16	28.46
17:00	-3.68	-8.40	34.28	100.96	-8.20	-10.34	28.12

ประสิทธิภาพของการคายความเย็นของระบบกักเก็บความเย็นด้วยสารเปลี่ยนสถานะที่ติดตั้งใน  
อาคารทดสอบคอนกรีตมวลเบา

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
17:05	2.70	0.90	36.10
17:10	3.60	1.28	35.86
17:15	4.69	1.86	35.86
17:20	5.88	2.60	35.88
17:25	7.96	4.10	35.78
17:30	10.03	6.30	35.70
17:35	11.52	8.54	35.66
17:40	12.77	10.26	35.54
17:45	14.12	11.72	35.40
17:50	15.33	13.22	35.38
17:55	16.29	14.42	35.22
18:00	17.12	15.50	35.14
18:05	17.88	16.52	35.04
18:10	18.46	17.30	34.94
18:15	18.87	17.90	34.76
18:20	19.22	18.32	34.64
18:25	19.48	18.70	34.52
18:30	19.74	19.02	34.38
18:35	19.95	19.30	34.24
18:40	20.15	19.58	34.14
18:45	20.32	19.78	34.00
18:50	20.50	20.04	33.88
18:55	20.63	20.24	33.76
19:00	20.80	20.38	33.62
19:05	20.91	20.58	33.48
19:10	20.99	20.70	33.34
19:15	21.09	20.78	33.18

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
19:20	21.17	20.90	33.06
19:25	21.29	21.04	32.96
19:30	21.35	21.10	32.80
19:35	21.43	21.20	32.70
19:40	21.46	21.28	32.54
19:45	21.51	21.36	32.42
19:50	21.58	21.40	32.37
19:55	21.67	21.44	32.31
20:00	21.76	21.46	32.26
20:05	22.26	21.92	29.82
20:10	23.52	22.98	27.58
20:15	24.66	24.06	28.00
20:20	25.97	25.34	28.38
20:25	27.19	26.60	28.74
20:30	28.10	27.70	29.18
20:35	28.52	28.40	29.44
20:40	28.80	28.74	29.60
20:45	28.84	28.82	29.60
20:50	28.89	28.90	29.62
20:55	29.01	28.96	29.68
21:00	29.07	29.00	29.70
21:05	29.15	29.00	29.70
21:10	29.23	29.00	29.70
21:15	29.33	29.04	29.72
21:20	29.41	29.10	29.72
21:25	29.47	29.10	29.76
21:30	29.53	29.10	29.76
21:35	29.58	29.12	29.74
21:40	29.60	29.10	29.74
21:45	29.65	29.12	29.70
21:50	29.65	29.10	29.70

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)
21:55	29.63	29.12	29.64
22:00	29.60	29.10	29.60
22:05	29.59	29.10	29.50
22:10	29.58	29.10	29.50
22:15	29.47	29.02	29.42
22:20	29.45	29.00	29.40
22:25	29.39	28.94	29.34
22:30	29.35	28.92	29.30
22:35	29.29	28.86	29.24
22:40	29.25	28.80	29.20
22:45	29.25	28.84	29.20
22:50	29.17	28.76	29.12
22:55	29.15	28.74	29.02
23:00	29.05	28.68	28.92
23:05	29.05	28.66	28.92
23:10	28.99	28.58	28.84
23:15	28.95	28.52	28.80
23:20	28.86	28.50	28.72
23:25	28.82	28.42	28.70
23:30	28.79	28.36	28.66
23:35	28.73	28.30	28.60
23:40	28.69	28.30	28.56
23:45	28.64	28.28	28.50
23:50	28.59	28.24	28.44
23:55	28.54	28.20	28.40
0:00	28.46	28.14	28.34

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห้อง (°C)
17:05	1.85	1.50	32.60
17:10	2.26	1.90	32.36

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
17:15	3.33	2.90	32.14
17:20	4.99	4.00	32.32
17:25	7.19	5.46	32.22
17:30	9.05	7.08	32.10
17:35	10.54	8.66	32.00
17:40	11.77	10.06	31.86
17:45	12.85	11.28	31.76
17:50	13.77	12.38	31.62
17:55	14.61	13.20	31.46
18:00	15.38	14.04	31.32
18:05	16.12	14.86	31.20
18:10	16.76	15.60	31.06
18:15	17.30	16.20	30.94
18:20	17.80	16.76	30.82
18:25	18.22	17.24	30.70
18:30	18.54	17.66	30.56
18:35	18.79	18.02	30.44
18:40	18.94	18.26	30.30
18:45	19.17	18.56	30.18
18:50	19.33	18.76	30.04
18:55	19.55	19.06	29.94
19:00	19.67	19.22	29.80
19:05	19.79	19.42	29.68
19:10	19.88	19.54	29.50
19:15	19.97	19.68	29.43
19:20	20.09	19.72	29.26
19:25	20.14	19.79	29.15
19:30	20.18	19.84	29.07
19:35	20.13	19.95	29.00
19:40	20.21	20.04	28.92
19:45	20.28	20.11	28.87

เวลา	PCM (°C)	ใบ Evap. (°C)	ใบห่อ (°C)
19:50	20.33	20.18	28.81
19:55	20.80	20.26	28.74
20:00	20.86	20.32	28.57
20:05	20.45	20.48	28.26
20:10	21.78	21.50	25.20
20:15	22.84	22.22	25.32
20:20	23.51	22.68	25.54
20:25	23.91	23.08	25.70
20:30	24.23	23.38	25.78
20:35	24.54	23.70	25.94
20:40	24.91	24.50	26.12
20:45	25.47	25.20	26.30
20:50	25.81	25.62	26.44
20:55	26.01	25.90	26.56
21:00	26.04	25.92	26.60
21:05	26.05	26.00	26.62
21:10	26.05	26.02	26.70
21:15	26.08	26.02	26.68
21:20	26.17	26.04	26.72
21:25	26.30	26.08	26.72
21:30	26.33	26.02	26.62
21:35	26.37	26.00	26.60
21:40	26.42	26.00	26.60
21:45	26.45	26.00	26.60
21:50	26.47	26.08	26.58
21:55	26.45	26.10	26.50
22:00	26.44	26.02	26.44
22:05	26.40	25.98	26.40
22:10	26.40	26.00	26.38
22:15	26.33	25.92	26.28
22:20	26.30	25.92	26.20



เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
22:25	26.30	25.86	26.20
22:30	26.19	25.88	26.10
22:35	26.17	25.84	26.10
22:40	26.05	25.70	26.00
22:45	26.05	25.70	25.98
22:50	25.99	25.64	25.88
22:55	25.95	25.62	25.84
23:00	25.88	25.60	25.78
23:05	25.84	25.52	25.70
23:10	25.77	25.50	25.66
23:15	25.71	25.44	25.58
23:20	25.67	25.40	25.58
23:25	25.56	25.30	25.44
23:30	25.53	25.28	25.42
23:35	25.51	25.20	25.36
23:40	25.44	25.14	25.30
23:45	25.38	25.10	25.24
23:50	25.31	25.04	25.16
23:55	25.31	25.00	25.16
0:00	25.21	24.92	25.02

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
17:05	0.05	-1.25	33.45
17:10	0.76	0.28	33.32
17:15	1.55	1.12	33.32
17:20	2.74	1.96	33.22
17:25	4.83	3.16	33.08
17:30	6.88	4.62	32.96
17:35	8.56	6.28	32.84
17:40	10.05	7.90	32.72

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
17:45	11.35	9.44	32.60
17:50	12.50	10.82	32.54
17:55	13.49	12.00	32.40
18:00	14.37	12.92	32.26
18:05	15.17	13.78	32.10
18:10	15.89	14.62	32.00
18:15	16.52	15.36	31.88
18:20	17.05	16.00	31.74
18:25	17.55	16.64	31.58
18:30	17.97	17.20	31.44
18:35	18.31	17.62	31.32
18:40	18.61	18.04	31.20
18:45	18.81	18.30	31.00
18:50	19.00	18.58	30.82
18:55	19.20	18.82	30.70
19:00	19.40	19.08	30.66
19:05	19.50	19.24	30.44
19:10	19.64	19.38	30.38
19:15	19.81	19.60	30.28
19:20	19.87	19.66	30.18
19:25	19.93	19.70	30.06
19:30	19.98	19.76	30.00
19:35	20.04	19.81	29.95
19:40	20.09	19.88	29.91
19:45	20.14	19.94	29.87
19:50	20.19	19.99	29.82
19:55	20.22	20.05	29.78
20:00	20.23	20.09	29.56
20:05	20.27	20.10	29.10
20:10	21.92	21.68	25.70
20:15	23.19	22.42	25.90

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
20:20	23.91	22.98	26.20
20:25	24.39	23.46	26.40
20:30	24.75	23.80	26.52
20:35	25.15	24.36	26.62
20:40	25.79	25.24	26.88
20:45	26.28	25.84	27.04
20:50	26.56	26.14	27.16
20:55	26.72	26.34	27.20
21:00	26.89	26.40	27.30
21:05	27.04	26.50	27.36
21:10	27.16	26.54	27.38
21:15	27.16	26.52	27.30
21:20	27.18	26.50	27.30
21:25	27.19	26.54	27.24
21:30	27.19	26.60	27.22
21:35	27.18	26.60	27.20
21:40	27.16	26.62	27.20
21:45	27.07	26.58	27.12
21:50	27.05	26.60	27.04
21:55	27.05	26.60	27.00
22:00	26.95	26.50	26.90
22:05	26.94	26.50	26.90
22:10	26.83	26.50	26.80
22:15	26.80	26.44	26.76
22:20	26.72	26.42	26.64
22:25	26.70	26.40	26.60
22:30	26.60	26.30	26.50
22:35	26.56	26.26	26.46
22:40	26.50	26.20	26.40
22:45	26.42	26.12	26.32
22:50	26.38	26.08	26.22

เวลา	PCM (°C)	ใน Evap. (°C)	ในห้อง (°C)
22:55	26.30	26.00	26.16
23:00	26.22	25.94	26.14
23:05	26.15	25.88	26.04
23:10	26.06	25.80	25.94
23:15	25.98	25.72	25.86
23:20	25.94	25.66	25.80
23:25	25.88	25.68	25.74
23:30	25.80	25.60	25.70
23:35	25.74	25.54	25.60
23:40	25.68	25.48	25.52
23:45	25.60	25.40	25.50
23:50	25.54	25.34	25.42
23:55	25.50	25.30	25.38
0:00	25.39	25.20	25.22