

ประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคาร ในเขตสภาพ  
อากาศแบบร้อนชื้น



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์  
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY EFFICIENCY OF PCM BOARD INTEGRATED INTERIOR WALL IN A HOT-  
HUMID CLIMATE

Mr. Suttiporn Termkla



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคาร ในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น
โดย	นายสุทธิพร เต็มกล้า
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. อรรถจัน เศรษฐบุตุตร

---

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนนัฐติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรรถจัน เศรษฐบุตุตร)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พันธุดา พุฒิไพโรจน์)

สุทธิพร เต็มกล้า : ประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคาร ในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น (ENERGY EFFICIENCY OF PCM BOARD INTEGRATED INTERIOR WALL IN A HOT-HUMID CLIMATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
 หลัก: รศ. ดร. อรรถจัน เศรษฐบุต, 77 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material Board : PCM board) ที่ติดตั้งที่ผนังภายในอาคาร การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นการสร้างห้องทดลองขนาด 3 x 3 x 2.4 เมตร ติดตั้งเครื่องปรับอากาศจริง แบ่งเป็นห้องที่ติดและห้องที่ไม่ติด แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะและแบ่งย่อยออกเป็นอีก 2 กรณีตามลักษณะการใช้งานอาคาร คือ อาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการปรับอากาศ และความสามารถในการรักษาสถานะนำสบายของ แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ หลังจากปิดระบบปรับอากาศ ส่วนที่สองเป็นการจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดทั้งปีกับอาคารอ้างอิงด้วยโปรแกรม VisualDOE ผลการเก็บข้อมูลจากห้องทดลองพบว่า การติดแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ผนังภายในเมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงานสามารถลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศลงได้ถึง 18.91% และเมื่อใช้งานเป็นอาคารพักอาศัยสามารถการใช้พลังงานลงได้ 6.02% ในส่วนของการรักษาสถานะนำสบายหลังจากการปิดเครื่องปรับอากาศ เมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถห่วงความเย็นในห้องให้อยู่ในสถานะนำสบายได้ดีกว่าห้องธรรมดาเป็นเวลา 1:30 - 2:30 ชั่วโมง และ 1:10 - 1:20 ชั่วโมงตามลำดับ ในส่วนของผลการจำลองด้วยโปรแกรม Visual DOE เมื่อติดตั้งแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะในอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยอ้างอิง สามารถลดพลังงานในการปรับอากาศลงได้ 13.80% และ 1.28% ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า การติดตั้งแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะช่วยลดพลังงานในการปรับอากาศเมื่อใช้กับอาคารสำนักงาน และสามารถเพิ่มเวลาในการใช้งานหลังปิดเครื่องปรับอากาศได้มากขึ้นกับทั้งกรณีอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

# # 5973371025 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: PHASE CHANGE MATERIAL / PCM / ENERGY STORAGE MATERIAL

SUTTIPORN TERMKLA: ENERGY EFFICIENCY OF PCM BOARD INTEGRATED INTERIOR WALL IN A HOT-HUMID CLIMATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 77 pp.

This research aims to study the energy efficiency of Phase change material board (PCM board) that are mounted on the interior wall of building. The research is divided into two sections. Section one, with the construction of experimental rooms sized 3 x 3 x 2.4 meters and equipped with air conditioners. One room was installed with PCM board while the other not. The experiment is further subdivided into two cases according to building typology, office and residential, in order to compare the cooling energy use and ability to maintain comfort conditions of PCM board after turning off air conditioners. The results indicated that the PCM board can reduce the cooling energy by 18.91% for office case and 6.02% for residential one. Using PCM board, the comfort hours after turning off air conditioners are better than the ordinary room 1:30 - 2:30 hours for office case and 1:10 - 1:20 hours for residential use. By using VisualDOE to simulate case study office and condominium, it was found that PCM board can reduce the cooling energy by 13.80% for office and 1.28% for condominium. PCM board can not only save energy but also prolong the period of indoor comfort after air conditioners are turned off.

Department: Architecture

Student's Signature .....

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำความรู้ช่วยเหลือ และคำแนะนำที่ดีมาตลอด รวมทั้งช่วยแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ทำให้เป็นวิทยานิพนธ์ที่สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ และรองศาสตราจารย์ ดร.พันธุ์ดา พุฒิปาโรจน์ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบริษัท SK KAKEN (THAILAND) CO., LTD. ที่สนับสนุนวัสดุสำหรับการวิจัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทิดศักดิ์ เตชะกิจขจร ซึ่งเป็นผู้ริเริ่มโครงการวิจัยและให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานรวมถึงให้คำแนะนำปรับปรุงขั้นตอนการวิจัยต่าง ๆ

ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน ที่สนับสนุนทุนในการดำเนินการวิจัย

ขอบคุณบริษัท AFRICVS CO., LTD ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลชนิดต่าง ๆ ขอขอบคุณผู้ที่ร่วมเรียนด้วยกัน ที่คอยช่วยเหลือในการเรียนและขอบคุณครอบครัวที่ให้ความสำคัญในการเรียนตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฉ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	4
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.4 ระเบียบวิธีศึกษา.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสะสมพลังงาน .....	7
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร.....	17
2.3 ภาระการทำความเย็นที่เกิดภายในอาคารปรับอากาศ .....	18
2.4 วิธีการคำนวณภาระการทำความเย็น.....	19
2.5 สภาวะน่าสบาย.....	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	28
3.1 แนวทางการวิจัย .....	28

3.2 ตัวแปรในการวิจัย .....	28
3.3 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง.....	28
3.4 การจำลองผล.....	36
3.5 การประเมินผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล .....	41
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	42
4.1 ผลการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง .....	42
4.2 การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	61
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล .....	66
5.1 วัสดุสะสมพลังงานกับองค์ประกอบสถาปัตยกรรม .....	66
5.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงานของการติดตั้งแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะภายในอาคาร.....	67
5.3 ประสิทธิภาพการรักษาสถานะนำสบายหลังปิดเครื่องปรับอากาศ .....	70
5.4 แนวทางการนำไปใช้.....	71
5.5 ข้อเสนอแนะ .....	71
รายการอ้างอิง .....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	77



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานไฟฟ้าตามตามช่วงเวลาของการใช้ หรือ ทีโอยู (Time of Use Rate - TOU) .....	2
ตารางที่ 2 ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 °C ของวัสดุที่ใช้ทั่วไปในระบบเก็บความร้อนสัมผัส .....	10
ตารางที่ 3 ตารางสรุปประเภทการทดลองและช่วงเวลาการเก็บข้อมูล .....	35
ตารางที่ 4 รายละเอียดสถาปัตยกรรมอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง .....	37
ตารางที่ 5 รายละเอียดการก่อสร้างและการใช้งานอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง.....	38
ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดสถาปัตยกรรมอาคารพักอาศัยอ้างอิงที่ปรับปรุง.....	40
ตารางที่ 7 แสดงรายละเอียดการก่อสร้างและการใช้งานอาคารพักอาศัยอ้างอิงที่ปรับปรุง .....	40
ตารางที่ 8 ผลการวัดค่าการใช้พลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน .....	43
ตารางที่ 9 ผลการวัดการใช้พลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารพักอาศัย.....	47
ตารางที่ 10 ผลการวัดข้อมูลอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงหลังปิดเครื่องปรับอากาศของห้องทดลอง Base case และ PCM board case เมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน.....	51
ตารางที่ 11 ผลการวัดข้อมูลอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงหลังปิดเครื่องปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารพักอาศัย.....	56
ตารางที่ 12 การใช้พลังงานในการปรับอากาศจากการจำลองของอาคารสำนักงานอ้างอิง .....	62
ตารางที่ 13 ตารางแสดงผลการใช้พลังงานในการปรับอากาศจากการจำลองของอ้างอิงอาคารพักอาศัยรวม .....	63

## สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	สรุปขั้นตอนการวิจัย .....	6
ภาพที่ 2	ลำดับชั้นในระบบการกักเก็บความร้อนแบบสมบูร์ณ : นำเข้าความร้อน กักเก็บความร้อน และปล่อยความร้อน.....	8
ภาพที่ 3	รูปแบบพื้นฐานของการทำงานกักเก็บความร้อน : ความร้อนและความเย็นจากแหล่งถ่ายเทเข้าสู่ตัวกักเก็บแล้วสะสมไว้จนกระทั่งถ่ายเทออกสู่ตัวระบายความร้อน .....	9
ภาพที่ 4	แผ่นผนังยิปซัมผสม PCM.....	16
ภาพที่ 6	การเพิ่มวัสดุเปลี่ยนสถานะด้วยวิธีไมโครแคปซูลในผนังเบาของอาคาร .....	23
ภาพที่ 7	แผ่นผนังผนังคอมโพสิต PCM Dupont.....	23
ภาพที่ 8	รายละเอียดผนังเซลล์ทดลองของ Ahmad et al. (2006).....	24
ภาพที่ 9	อาคารที่ใช้ทำการทดลองประกอบผนังวัสดุเปลี่ยนสถานะ .....	25
ภาพที่ 10	รายละเอียดผนังอาคารทดลองของ Mandilatas et al. (2013).....	25
ภาพที่ 11	รูปแบบห้องทดลองอาคารสำนักงานที่ไม่ติด PCM board (ซ้าย) และห้องที่ติด PCM board (ขวา).....	29
ภาพที่ 12	รูปแบบห้องทดลองอาคารพักอาศัยที่ไม่ติด PCM board (ซ้าย) และห้องที่ติด PCM board (ขวา).....	30
ภาพที่ 13	รายละเอียดผนังของห้องทดลองทั้ง 2 กรณี.....	30
ภาพที่ 14	การก่อสร้างโครงสร้างของห้องทดลอง.....	31
ภาพที่ 15	การติดตั้งวัสดุผิวและฉนวนกันความร้อนของห้องทดลอง .....	31
ภาพที่ 16	การติดตั้งวัสดุภายในและหลอดไฟ.....	31
ภาพที่ 17	ห้องทดลองทั้ง 2 ห้องที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว .....	32
ภาพที่ 18	PCM sheet หนา 3 mm. ....	32
ภาพที่ 19	การติดตั้ง PCM board (3 mm.) และไม้อัด (3 mm.).....	32
ภาพที่ 20	แสดงตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ ผนัง (ซ้าย) รูปตัด (ขวา).....	33

ภาพที่ 21	เครื่อง 12 channel temperature data logger .....	33
ภาพที่ 22	การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิห้อง.....	34
ภาพที่ 23	การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิผิว.....	34
ภาพที่ 24	เครื่อง Digital Energy Monitor 2 .....	34
ภาพที่ 25	อาคารสำนักงานอ้างอิง (ซ้าย) และอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง (ขวา) .....	36
ภาพที่ 26	รูปแบบอาคารสำนักงานที่สร้างในโปรแกรม Visual DOE 4.....	37
ภาพที่ 27	อาคารพักอาศัยอ้างอิง (ซ้าย) อาคารอ้างอิงที่ปรับปรุงแล้ว (ขวา) .....	39
ภาพที่ 28	รูปแบบอาคารพักอาศัยที่สร้างในโปรแกรม Visual DOE 4.....	39
ภาพที่ 29	หลักการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ .....	67



สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 1 ความแตกต่างของ Sensible TES และ Latent TES ..... 11

แผนภูมิที่ 2 ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะและความสามารถในการเก็บพลังงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ ..... 12

แผนภูมิที่ 3 แสดงการหลอมเหลวและแข็งตัวจากการเข้าเครื่องวัดคุณสมบัติวัสดุ (DSC) ของสาร Butyl Stearate ในแผ่นผนัง..... 16

แผนภูมิที่ 4 แสดงผลของ Thermal Storage ที่เกิดจากภาระการทำความเย็นจากอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคาร..... 19

แผนภูมิที่ 5 แบบจำลองค่าความจุความร้อน PCM สำหรับใช้ในการคำนวณ..... 26

แผนภูมิที่ 6 การประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน ทั้ง 3 วันของการเก็บข้อมูล..... 44

แผนภูมิที่ 7 การใช้พลังงานของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 1 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน..... 44

แผนภูมิที่ 8 การใช้พลังงานของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 2 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน..... 45

แผนภูมิที่ 9 การใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารสำนักงาน ในวันที่ 1..... 46

แผนภูมิที่ 10 การใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารสำนักงานในวันที่ 2..... 46

แผนภูมิที่ 11 การประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน ทั้ง 3 วันของการเก็บข้อมูล..... 48

แผนภูมิที่ 12 การใช้พลังงานในการปรับอากาศของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 1 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารพักอาศัย..... 48

แผนภูมิที่ 13 การใช้พลังงานในการปรับอากาศของจากการเก็บข้อมูล วันที่ 2 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารพักอาศัย..... 49

แผนภูมิที่ 14 แผนภูมิแสดงการใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลอง อาคารพักอาศัยในวันที่ 1 .....	50
แผนภูมิที่ 15 แผนภูมิแสดงการใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลอง อาคารพักอาศัยในวันที่ 2 .....	50
แผนภูมิที่ 16 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารสำนักงานวันที่ 1 .....	52
แผนภูมิที่ 17 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารสำนักงานวันที่ 2 .....	53
แผนภูมิที่ 18 ค่า MRT สำนักงานวันที่ 1 .....	54
แผนภูมิที่ 19 ค่า MRT สำนักงานวันที่ 2 .....	54
แผนภูมิที่ 20 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 1 .....	55
แผนภูมิที่ 21 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 2 .....	55
แผนภูมิที่ 22 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารพักอาศัย วันที่ 1 .....	57
แผนภูมิที่ 23 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารพักอาศัย วันที่ 2 .....	58
แผนภูมิที่ 24 MRT อาคารพักอาศัยวันที่ 1 .....	59
แผนภูมิที่ 25 MRT อาคารพักอาศัยวันที่ 2 .....	59
แผนภูมิที่ 26 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 1 .....	60
แผนภูมิที่ 27 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 2 .....	60
แผนภูมิที่ 28 แบบจำลองการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะสำหรับการคำนวณ .....	61
แผนภูมิที่ 29 การใช้พลังงานในการปรับอากาศแต่ละเดือนจากการจำลองอาคารสำนักงานอ้างอิง..	63
แผนภูมิที่ 30 การใช้พลังงานในการปรับอากาศแต่ละเดือนจากการจำลองอาคารพักอาศัยอ้างอิง ...	64

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่บนบริเวณเขตเส้นศูนย์สูตร มีสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ทำให้มีอุณหภูมิและความชื้นสูงเกือบตลอดทั้งปี ลักษณะอากาศดังกล่าวส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาสู่อาคารในปริมาณมาก นำไปสู่การสะสมความร้อนภายในอาคาร เมื่ออุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้นจนเกินเขตสภาวะน่าสบายของผู้ใช้อาคาร อาคารจำนวนมากในประเทศ เช่น อาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยจึงนิยมติดตั้งเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิในพื้นที่ใช้สอยให้คงที่และเกิดความน่าสบายมากที่สุด แต่พลังงานที่ถูกใช้ในการปรับอากาศนับว่ามีสัดส่วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบอื่น ๆ ของอาคาร ดังนั้น การออกแบบอาคารจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงการลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร เพื่อลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ เช่น การออกแบบโดยคำนึงถึงสภาพอากาศโดยออกแบบให้มีการป้องกันความร้อนแก่ผนังอาคาร การวางผังอาคาร เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีความพยายามในการพัฒนาประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ รวมถึงการพัฒนาวัสดุประกอบอาคารที่มีประสิทธิภาพสูง เช่น วัสดุฉนวนกันความร้อน หรือกระจกที่มีประสิทธิภาพสูง เป็นต้น เพื่อลดพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายของการดำเนินการอาคาร และรวมไปถึงเพื่ออนุรักษ์พลังงานของประเทศอย่างยั่งยืน

ความร้อนที่สะสมในอาคารโดยทั่วไปจะมาจาก 4 สาเหตุ ได้แก่ ความร้อนจากดวงอาทิตย์ ความร้อนจากคนที่ทำงานในอาคาร ความร้อนจากระบบไฟฟ้าแสงสว่าง และความร้อนจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในอาคาร ความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนที่มีปริมาณมากที่สุด เมื่อเทียบกับความร้อนจากส่วนอื่น ๆ ความร้อนในส่วนนี้โดยทั่วไปจะเข้าสู่อาคารได้ 2 ทาง ได้แก่ ทางหลังคาและทางหน้าต่าง ผนังหรือกำแพง แต่การออกแบบสถาปัตยกรรมในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นอาคารสำนักงานหรืออาคารพักอาศัย มักมีการออกแบบรูปลักษณะให้ดูโปร่งและทันสมัยด้วยการใช้ช่องเปิดกระจกจำนวนมาก โดยไม่มีการบังแดดที่เพียงพอ ซึ่งไม่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและสะสมความร้อนภายในอาคารในปริมาณมาก เกิดผลกระทบโดยตรงต่อความน่าสบายและเป็นสาเหตุหลักของการใช้พลังงานในเครื่องปรับอากาศปริมาณมาก ดังนั้น การออกแบบสถาปัตยกรรมจึงควรสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมให้มากที่สุด โดยจะต้องคำนึงถึงการวางผังอาคาร รูปลักษณะอาคาร รวมไปถึงการใช้วัสดุก่อสร้างที่เหมาะสม

อาคารสำนักงานโดยทั่วไปมักมีการกำหนดเวลาปิดเครื่องปรับอากาศตามเวลาการใช้งาน ซึ่งความเย็นจากเครื่องปรับอากาศสามารถรักษาสถานะน่าสบายภายในพื้นที่ใช้สอยไปได้อีกหนึ่งชั่วโมงในกรณีที่มีการทำงานล่วงเวลา (Overtime) อาคารสำนักงานที่มีเครื่องปรับอากาศแบบรวมศูนย์มักจะกำหนดเวลาเปิด - ปิดเครื่องปรับอากาศที่ตามช่วงของการใช้งานหลัก คือ ในช่วงกลางวันทำให้การทำงานในช่วงล่วงเวลามักไม่มีการปรับอากาศ ประกอบกับการเปิดเครื่องปรับอากาศของอาคารในช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามาก (On Peak) คือ 9.00 - 22.00 น. จะเป็นช่วงที่มีค่าพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าในช่วงที่มีการใช้พลังงานน้อย (Off Peak) (การไฟฟ้านครหลวง, 2017) (ตารางที่ 1) อาคารสำนักงานส่วนใหญ่จึงจำเป็นต้องปิดเครื่องปรับอากาศให้เร็วที่สุด เพื่อลดภาระค่าใช้จ่าย ส่งผลโดยตรงผู้ใช้งานในช่วงล่วงเวลาอาจเกิดความไม่สบายขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานไฟฟ้าตามตามช่วงเวลาของการใช้ หรือ ทีโอยู (Time of Use Rate - TOU) (ที่มา: การไฟฟ้านครหลวง, 2017)

ระดับแรงดัน	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	
	On Peak	Off Peak
แรงดัน 69 กิโลโวลต์ขึ้นไป	4.1283	2.6107
แรงดัน 12-24 กิโลโวลต์	4.2097	2.6295
แรงดันต่ำกว่า 12 กิโลโวลต์	4.3555	2.6627

พื้นที่ใช้งานในอาคารพักอาศัย เช่น ห้องนอนเป็นห้องที่มีเวลาการใช้งานที่ชัดเจน คือ ช่วงกลางคืนเป็นหลัก โดยทั่วไปจะพบว่าผู้ใช้อาคารจะตั้งเวลาปิดเครื่องปรับอากาศโดยอัตโนมัติก่อนเวลาเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากความเย็นจากเครื่องปรับอากาศสามารถรักษาสถานะน่าสบายภายในห้องไปได้อีกหนึ่งระยะเวลาหนึ่ง เช่นเดียวกับอาคารสำนักงาน กล่าวได้ว่า การรักษาสถานะน่าสบายของพื้นที่ใช้งานหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศทำให้สามารถปิดเครื่องปรับอากาศได้เร็วขึ้น ช่วยลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศ

จากลักษณะการใช้งานในอาคารปรับอากาศที่เกิดขึ้นดังกล่าวทั้งอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย ปัจจุบันจึงได้มีการคิดค้นหาวัสดุอาคารที่สามารถเก็บรักษาความเย็นจากเครื่องปรับอากาศไว้ให้นานที่สุด โดยใช้หลักการของวัสดุสะสมพลังงาน หรือวัสดุสะสมอุณหภูมิ (Thermal Energy Storage Material : TES) (Mehling & Cabeza, 2008) โดยมีแนวคิดที่ว่าวัสดุสะสมพลังงานสามารถดูดความร้อนเข้าไปได้ในปริมาณที่มากทำให้อุณหภูมิของห้องสูงขึ้นช้ากว่าปกติ ส่งผลให้ลดรอบการทำงานของเครื่องปรับอากาศ และลดการใช้พลังงานโดยตรง นอกจากนี้หลังจากการปิด

เครื่องปรับอากาศ วัสดุสะสมอุณหภูมิจะดูดความร้อนในห้องเข้าไปเพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิห้องมิให้สูงเกินสถานะนำสบายต่อไปได้นานขึ้น เพื่อจะเพิ่มเวลาการใช้งานพื้นที่หลังจากปิดเครื่องปรับอากาศได้ยาวนานขึ้น

วัสดุสะสมพลังงานสามารถสะสมอุณหภูมิได้ทั้งความเย็นและความร้อน โดยมี 3 ขั้นตอนหลัก คือ การเก็บพลังงาน (charging) การสะสมพลังงาน (storing) และการปล่อยพลังงาน (discharging) โดยขั้นตอนทั้งหมดสามารถเกิดขึ้นซ้ำได้หลายรอบ (Gil et al., 2010) รูปแบบของ TES ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ คือ วัสดุสะสมพลังงานโดยใช้หลักการสะสมความร้อนแฝง (Latent Thermal storage) โดยเมื่อวัสดุรับพลังงานจนถึงจุดที่เปลี่ยนสถานะ เช่น จากของแข็งหลอมเหลวไปสู่ของเหลว ในช่วงที่เกิดการหลอมเหลว (Phase change) วัสดุนั้น ๆ จะสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนและความเย็นในปริมาณมาก โดยอุณหภูมิในขณะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะนั้นเรียกว่า “อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ” (Phase-change temperature) (Mehling & Cabeza, 2008)

จากหลักการดังกล่าว จึงมีการพัฒนาวัสดุที่ใช้อุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะขึ้นเรียกว่า Phase change material (PCM) (Mehling & Cabeza, 2008) ในปัจจุบันมีการนำประโยชน์จากการสะสมพลังงานความร้อนและความเย็นของ PCM มาใช้ในหลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน เช่น ใช้ในวัสดุนำความร้อนในระบบอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนประกอบของเครื่องปรับอากาศ ในวัสดุผนังอาคาร และฝ้าเพดาน เป็นต้น

ในการศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของวัสดุสะสมพลังงานประเภท PCM สำหรับอาคาร ในช่วงแรกจะเป็นความพยายามในการหาวิธีการที่จะใช้ PCM กับวัสดุอาคารเป็นหลัก เช่น ในงานวิจัยของ Athienitis et al. (1997) มุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพของ PCM โดยผสม PCM เข้ากับอิพซิมบอร์ดที่ใช้ในอาคาร พบว่าสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในห้องลงได้ และช่วยควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวให้เหมาะสมในช่วงกลางวันอีกด้วย

การประยุกต์ PCM ที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรมที่ผ่านมาส่วนมากเป็นการใช้เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารเป็นหลัก การใช้วัสดุสะสมอุณหภูมิชนิดเปลี่ยนสถานะกับผนังอาคาร เพื่อใช้ลดพลังงานการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ยังไม่มีการศึกษามากนักทั้งในไทยและต่างประเทศ การใช้แผ่นวัสดุสะสมอุณหภูมิซึ่งใช้หลักการสะสมความร้อนแฝง ติดตั้งที่ผนังภายในอาคารจึงยังไม่มีคำตอบชัดเจนว่าจะสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศ และจะสามารถเพิ่มเวลาการใช้งานในพื้นที่หลังจากปิดเครื่องปรับอากาศได้ยาวนานมากขึ้นอย่างไร โดยเฉพาะเมื่อมีการนำมาใช้ในประเทศไทย เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าว ส่วนใหญ่ยังไม่เน้นศึกษาในเรื่องการประหยัด



พลังงานจากเครื่องปรับอากาศโดยตรง จึงเกิดคำถามของการวิจัยว่า แผ่นวัสดุสะสมเปลี่ยนสถานะ (Phase change material board : PCM Board) ที่ติดตั้งที่ผนังภายในอาคารจะมีส่วนช่วยในการควบคุมอุณหภูมิภายในให้สามารถใช้งานต่อเนื่องได้ยาวนานขึ้นหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ และมีส่วนช่วยในการช่วยลดพลังงานในการปรับอากาศของอาคารเท่าใด ผลที่ได้สามารถนำไปกำหนดรูปแบบการใช้งานของแผงวัสดุเปลี่ยนสถานะรวมถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาคุณสมบัติและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเปลี่ยนสถานะที่มีการนำมาใช้เป็นองค์ประกอบของสถาปัตยกรรม

1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ผนังที่ติดตั้งแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะกับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น

1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการรักษาสภาพเสถียรจากการใช้แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM board) โดยติดตั้งที่ผนังภายในอาคารเท่านั้น

1.3.2 ศึกษาอาคารประเภทอาคารพักอาศัยและอาคารสำนักงาน

1.3.3 ในการศึกษาจากการทดลองและจำลองผล จำแนกตามรูปแบบการใช้งานของอาคาร 2 ประเภท โดยอ้างอิงรูปทรงและรูปแบบการใช้งานอาคารจริงที่ได้มีการศึกษามาก่อนแล้ว

## 1.4 ระเบียบวิธีศึกษา

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นการเก็บข้อมูลด้วยห้องทดลองขนาดเท่าจริง เพื่อให้สภาพใกล้เคียงกับการใช้งานจริง และส่วนที่สองเป็นการนำข้อมูลจากห้องทดลองและคุณสมบัติของวัสดุ PCM board ไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดทั้งปี โดยมีระเบียบวิธีศึกษาดังนี้

#### 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีและตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและสะสมความร้อนของอาคาร

1.4.1.2 ศึกษาคุณสมบัติในการสะสมพลังงานของวัสดุ เช่น ความหนาแน่น (Density) ความจุความร้อน (Heat Capacity) จากการทดสอบด้วยวิธี Differential scanning calorimetry (DSC)

#### 1.4.2 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองขนาดเท่าจริง

1.4.2.1 กำหนดรูปแบบและการทำงานของห้องทดลอง

1.4.2.2 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและการรักษาสภาวะน่าสบาย จากห้องทดลองขนาดจริงซึ่งมีการใช้งานใกล้เคียงอาคาร 2 ประเภท

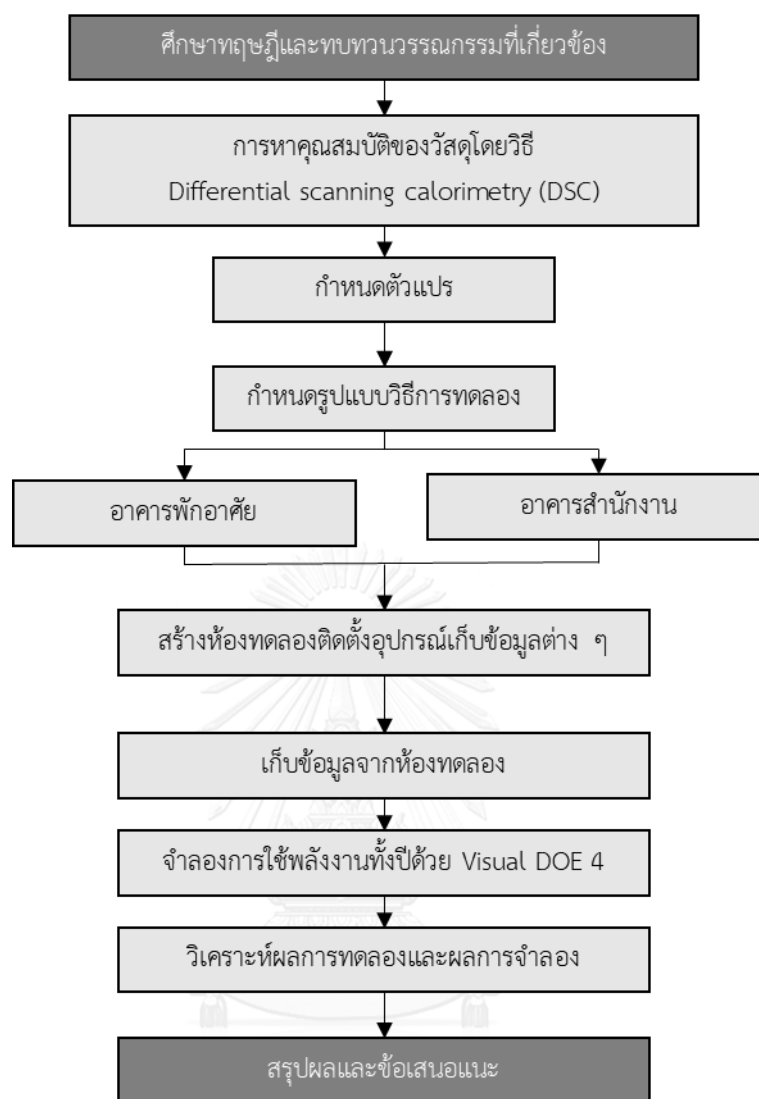
#### 1.4.3 การจำลองการใช้พลังงานตลอดทั้งปีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.3.1 ศึกษาและกำหนดรูปแบบอาคารอ้างอิง ของอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย

1.4.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ PCM board เพื่อการจำลองผล

1.4.3.3 จำลองผลและวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการใช้พลังงานตลอดทั้งปีของอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยอ้างอิงเมื่อใช้ PCM board

1.4.4 สรุปและอภิปรายผลการเก็บข้อมูลและผลจากห้องทดลองและจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 1 สรุปขั้นตอนการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของการใช้ผนัง PCM board กับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยในประเทศไทย

1.5.2 ทราบประสิทธิภาพการรักษาสภาพระนาบสบายหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศของการใช้ผนัง PCM board กับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยในประเทศไทย

1.5.3 ประเมินข้อมูลที่ได้ทั้งจากประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานและประสิทธิภาพในการรักษาสภาพระนาบสบาย และเสนอแนะการนำไปใช้งานที่เหมาะสม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคาร ในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งประกอบไปด้วย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสะสมพลังงาน ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร การระงับการทำความเย็นที่เกิดภายในอาคารปรับอากาศ วิธีการคำนวณการทำความเย็น และสถานะน่าสบาย รวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสะสมพลังงาน

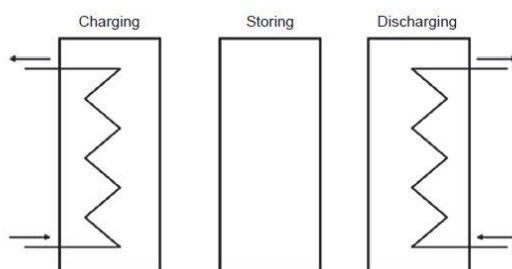
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสะสมพลังงานโดยอาศัยความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะ หรือวัสดุเปลี่ยนสถานะ สามารถจำแนกเป็น 4 หัวข้อหลัก ดังนี้

##### 2.1.1 หลักการพื้นฐานของการสะสมพลังงาน (Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)

การสะสมพลังงานความร้อน (Thermal energy storage: TES) คือ ตัวกลางหรือวัสดุที่สามารถให้พลังงานความร้อนและเย็นที่กักเก็บไว้ได้ในปริมาณมาก (Mehling & Cabeza, 2008) ซึ่งแหล่งกักเก็บนี้จะมีประสิทธิภาพในการสำรองพลังงานความร้อนเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างการผลิตพลังงานกับการใช้พลังงาน ภายใต้เงื่อนไขของเวลา อุณหภูมิ หรือที่ตั้งซึ่งมีข้อดี ได้แก่

- คุ่มค่า เพราะลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการ
- มีประสิทธิภาพสูง เพราะใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ลดมลพิษในอากาศและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

หลักการนี้ใช้ได้กับการใช้งานตัวเก็บพลังงานความร้อนทุกแบบโดยพลังงานจะถูกสะสมในระบบเพื่อรองรับการใช้งานภายหลัง (Dincer & Rosen, 2002) กระบวนการที่สมบูรณ์จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (ภาพที่ 2) การนำเข้าพลังงาน (Charging) การกักเก็บพลังงาน (Storing) และการปล่อยพลังงาน (Discharging) แต่ในการใช้งานจริงในบางขั้นตอนอาจเกิดขึ้นพร้อมกันและสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่าหนึ่งครั้งในแต่ละรอบ (Gil et al., 2010)



ภาพที่ 2 ลำดับขั้นในระบบการกักเก็บความร้อนแบบสมบูรณ์ : นำเข้าความร้อน กักเก็บความร้อน และปล่อยความร้อน

(ที่มา: Gil et al., 2010)

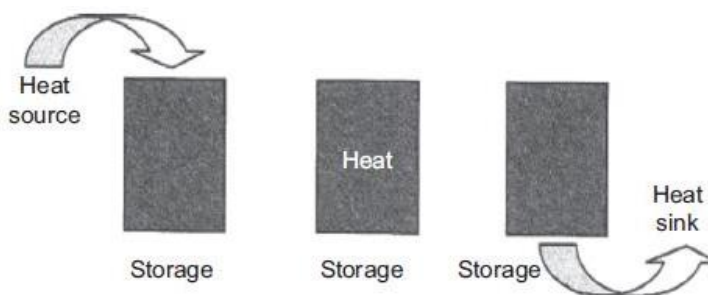
ทั้งนี้หากจะเลือกจากชนิดและลักษณะต่าง ๆ ของระบบกักเก็บพลังงานความร้อนควรพิจารณาหลายด้าน โดยเฉพาะเรื่องประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานความร้อน อย่างไรก็ตาม การเลือกระบบที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัย เช่น พิจารณาจากความคุ้มค่าเงินลงทุน เภณท์เรื่องความชำนาญของบุคลากรที่ดูแลระบบ และเภณท์เรื่องสิ่งแวดล้อม เป็นต้น (Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)

ปัจจัยที่เป็นต้นทุนของระบบการกักเก็บพลังงานความร้อน ได้แก่ ชนิดวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวกักเก็บพลังงาน เครื่องมือแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับใช้ในการนำเข้าและปล่อยพลังงานความร้อน ค่าก่อสร้างพื้นที่และผนังปิดล้อม (Gil et al., 2010)

ทั้งนี้ยังได้มีข้อกำหนดสำคัญต่าง ๆ ของการสะสมพลังงาน ได้แก่

- ถ่ายเทความร้อนได้ดีระหว่างของเหลวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนกับตัวกักเก็บพลังงาน
- ความเสถียรในทางกลและทางเคมีของวัสดุเก็บพลังงาน (ควรรองรับกระบวนการนำเข้าและปล่อยออกของพลังงานที่เกิดขึ้นหลายครั้ง)
- ความเข้ากันระหว่างของเหลวถ่ายเทความร้อน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือตัวกลางเก็บพลังงาน
- การหมุนเวียนกระบวนการเก็บและปล่อยประจุได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
- มีการสูญเสียพลังงานความร้อนน้อย
- ควบคุมง่าย

จากภาพที่ภาพที่ 3 แสดงรูปแบบการทำงานของตัวเก็บความร้อน ความร้อนหรือความเย็นที่ถูผลิตโดยแหล่งพลังงานความร้อนจะถูกถ่ายไปยังตัวกักเก็บความร้อนและสะสมไว้จนกระทั่งถ่ายเทออกโดยตัวระบายความร้อนเพื่อการใช้งานต่อไป (Mehling & Cabeza, 2008)



ภาพที่ 3 รูปแบบพื้นฐานของการทำงานกักเก็บความร้อน : ความร้อนและความเย็นจากแหล่งถ่ายเทเข้าสู่ตัวกักเก็บแล้วสะสมไว้จนกระทั่งถ่ายเทออกสู่ตัวระบายความร้อน (ที่มา: Mehling & Cabeza, 2008)

## 2.1.2 ประเภทของการสะสมพลังงาน

### 2.1.2.1 Sensible heat storage การเก็บความร้อนสัมผัส

พลังงานจะถูกสะสมไว้ด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางที่ใช้กักเก็บพลังงาน เช่น น้ำ อากาศ น้ำมัน แผ่นหิน อิฐ คอนกรีต และทราย โดยพลังงานจะถูกนำเข้าไปในระบบการกักเก็บจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของตัวกลางในการเก็บพลังงาน และค่าความจุความร้อนของตัวกลาง ตัวกลางหรือวัสดุแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับค่าความจุความร้อนและพื้นที่เพียงพอสำหรับการเก็บวัสดุตัวกลาง (Dincer & Rosen, 2002) สมการในการคำนวณปริมาณการเก็บความร้อนสัมผัส คือ

$$Q = m C_p \Delta T \dots \dots \dots (1)$$

กำหนดให้	Q	คือ ปริมาณการเก็บความร้อน (J)
	m	คือ มวลของวัสดุที่ใช้เก็บพลังงาน (kg)
	$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (J/kg·K)
	$\Delta T$	คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (°C)

การกักเก็บความร้อนสัมผัสนั้นเป็นวิธีการพื้นฐานในการเก็บความร้อนและความเย็น วัสดุที่ใช้ต้องไม่แพงและควรมีการจุความร้อนได้ดีสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ โดยวัสดุเก็บความร้อนพื้นฐานที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรม จะได้แก่ อิฐ ดิน และไม้ เป็นต้น (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 20 °C ของวัสดุที่ใช้ทั่วไปในระบบเก็บความร้อน  
สัมผัส

(ที่มา: Dincer & Rosen, 2002)

Material	Density ( $\text{kg m}^{-3}$ )	Specific heat ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	Volumetric thermal capacity ( $\times 10^6$ , $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ )
Clay	1458	879	1.28
Brick	1800	837	1.51
Sandstone	2200	712	1.57
Wood	700	2390	1.67
Concrete	2000	880	1.76
Glass	2710	837	2.27
Aluminum	2710	896	2.43
Iron	7900	452	3.57
Steel	7840	465	3.68
Gravelly earth	2050	1840	3.77
Magnetite	5177	752	3.89
Water	988	4182	4.17

นอกจากความหนาแน่นและความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุแล้ว คุณสมบัติอื่นที่มีความสำคัญได้แก่ อุณหภูมิที่สามารถใช้งานได้ การนำและการกระจายความร้อน แร่งตันไอ การทำงานร่วมกันระหว่างวัสดุ ความเสถียร ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนตามอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรของพื้นผิว (Gil et al., 2010)

ระบบเก็บความร้อนสัมผัสประกอบไปด้วยตัวกลางเก็บพลังงาน ภาชนะหรือตัวบรรจุ โดยทั่วไปใช้ถังบรรจุ ท่อเข้าและท่อออก ดังที่ใช้ต้องกักเก็บความร้อนและป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนได้ดี (Gil et al., 2010) การเก็บความร้อนสัมผัสเกิดขึ้นได้จากทั้งตัวกลางที่เป็นของแข็งและของเหลว ตัวกลางที่เป็นของแข็งมักทำให้วัสดุมีลักษณะเป็นลอน เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเก็บพลังงานและลดพื้นที่สำหรับเก็บวัสดุ ค่าความจุความร้อนในของตัวกลางลอนแข็งจะสำคัญเมื่อของแข็งถูกใช้ร่วมกับของเหลวซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ระบบกักเก็บแบบคู่ (Dual-storage system) ในระบบการทำความร้อนและเย็นของอาคาร ระบบเก็บความร้อนสัมผัสมักใช้ในเครื่องทำน้ำร้อนในที่พักอาศัยในรูปแบบการเก็บพลังงานชั่วคราว (Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)

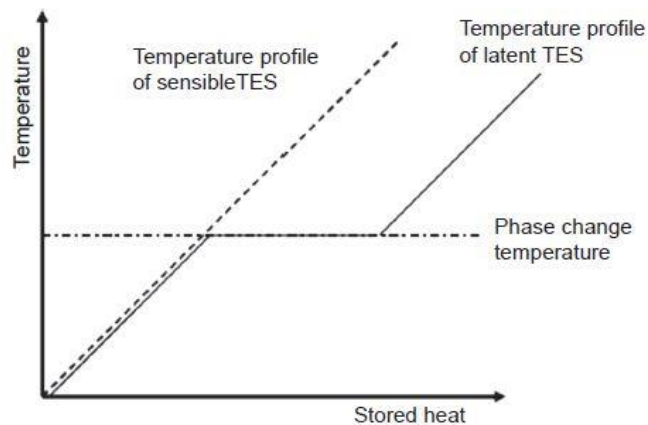
### 2.1.2.2 Latent heat storage การเก็บความร้อนแฝง

ความร้อนจะถูกเก็บในรูปของความร้อนแฝงเมื่อวัสดุเกิดการสะสมความร้อนในช่วงเปลี่ยนแปลงสถานะ ช่วงที่มีการเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลวหรือในทางกลับกัน จะสามารถกักเก็บความร้อนและความเย็นได้จำนวนมาก ในกระบวนการนี้หากเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม เมื่อเกิดกระบวนการหลอมเหลวขณะที่ความร้อนถ่ายเทสู่วัสดุเก็บพลังงาน วัสดุจะยังคงรักษาระดับอุณหภูมิในระดับจุดหลอมเหลว เรียกว่าอุณหภูมิช่วงเปลี่ยนสถานะ (Mehling and Cabeza, 2008) ซึ่งแตกต่างจากความร้อนสัมผัส สามารถคำนวณหาปริมาณการเก็บความร้อนได้จาก สมการ

$$Q = m \Delta h \dots \dots \dots (1)$$

โดยที่  $Q$  คือ ปริมาณการเก็บความร้อน (J)  
 $m$  คือ มวลของวัสดุเก็บความร้อน (kg)  
 $\Delta h$  คือ ค่าความร้อนช่วงเปลี่ยนสถานะ หรือเรียกว่าค่า

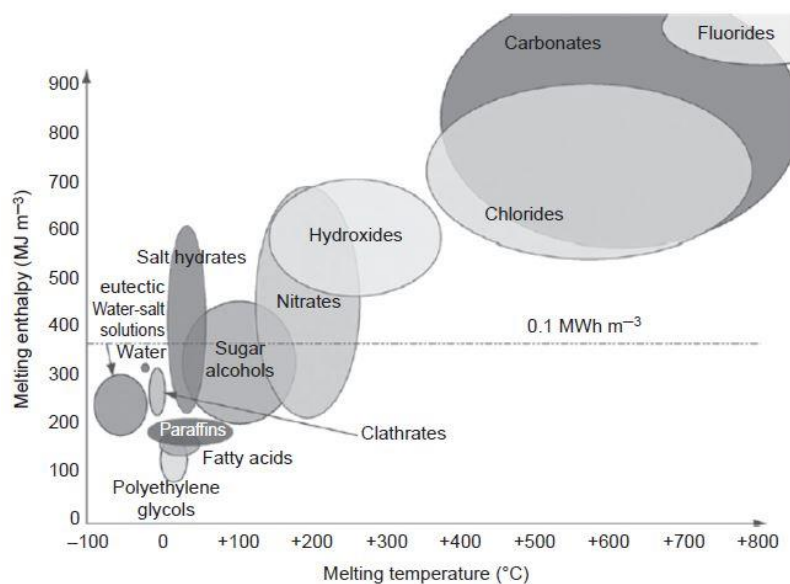
พลังงานความร้อน ณ จุดหลอมเหลว หรือ Heat of fusion ( $J \text{ g}^{-1}$ )



แผนภูมิที่ 1 ความแตกต่างของ Sensible TES และ Latent TES

(Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)





แผนภูมิที่ 2 ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะและความสามารถในการเก็บพลังงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะชนิดต่าง ๆ (ที่มา: Mehling & Cabeza, 2008)

แผนภูมิที่ 2 แสดงค่าจุดหลอมเหลวและค่าการสะสมพลังงานของวัสดุที่มักถูกใช้เป็นตัววัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCMs: Phase-Change Materials) (Mehling & Cabeza, 2008) วัสดุที่นิยมใช้คือน้ำ หรือสารละลายน้ำกับเกลือใช้เป็นตัววัสดุสำหรับอุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C ส่วนในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0 – 130 °C มักจะใช้พาราฟิน เกลือไฮเดรต กรดไขมัน และน้ำตาลแอลกอฮอล์ ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 150 °C จะใช้เกลือและวัสดุพวกที่เป็นสารอนินทรีย์ ในปัจจุบันมีสารมากมายที่ได้มีการศึกษาประสิทธิภาพของการเปลี่ยนสถานะแต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรม การเลือกใช้วัสดุเก็บความร้อนแฝงต้องพิจารณาทั้งจากความเหมาะสมและราคา นอกจากนี้วัสดุเปลี่ยนสถานะมักจะทำให้เกิดปัญหาจากหลายปัจจัย เช่น การแยกเฟส ความเย็นยิ่งยวด การกัดกร่อน และการคงรูปในระยะยาว เป็นต้น ซึ่งหลายส่วนยังอยู่ในช่วงการวิจัยวัสดุ (Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)

วัสดุเปลี่ยนสถานะควรมีคุณสมบัติ คือ มีความร้อนแฝงในปริมาณที่มากและนำความร้อนได้ดี แต่ตัวแปรหลักในการเลือกอย่าง เช่น จุดหลอมเหลวของวัสดุมักถูกใช้มากในทางปฏิบัติ ตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ สารประกอบหลอมเหลว ความเย็นยิ่งยวดต่ำสุด ความเสถียรทางเคมี ต้นทุนที่ต่ำ การปลอดสารพิษ และความทนทานการกัดกร่อน วัสดุที่ผ่านการศึกษาแล้วเช่น พาราฟิน กรดไขมัน (Luisa F. Cabeza & Eduard Oró, 2016)

จากวิจัยของ Kenisarin and Mahkamov (2007) สามารถสรุปคุณสมบัติเด่นของตัวเก็บความร้อนแฝงได้ ดังนี้

- ให้ค่าความร้อนของจากการหลอมเหลวและความร้อนจำเพาะต่อหน่วยต่อปริมาตร และต่อน้ำหนักที่สูง

- มีจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน
- ความดันไอต่ำ (น้อยกว่า 1) ในอุณหภูมิปฏิบัติการ
- มีความเสถียรทางเคมีและไม่มีการกัดกร่อน
- ปลอดภัย ไม่ติดไฟ และไม่มีสารพิษ
- ทำซ้ำการเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งไปมาได้เรื่อย ๆ โดยปราศจากการ

เปลี่ยนรูป

- อุณหภูมิความเย็นยิ่งยวดน้อย และค่าการเกิดการแข็งตัวสูง
- การเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยระหว่างกระบวนการเปลี่ยนสถานะเป็น

ของแข็ง

- มีค่าการนำความร้อนสูง
- มีประสิทธิภาพและมีจำนวนที่เพียงพอ

พาราฟินมีราคาถูก ทำให้เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรม ด้วยความหนาแน่นปานกลางในการเก็บพลังงานความร้อน ( $\sim 200 \text{ kJ kg}^{-1}$  หรือ  $150 \text{ MJ m}^{-3}$ ) และระยะอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่กว้าง ทนต่อความเย็นยิ่งยวดและทนต่อปฏิกิริยาเคมี อย่างไรก็ตามพาราฟินมีข้อจำกัดในการนำไปใช้คือนำความร้อนต่ำ ( $\sim 0.2 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

เกลือไฮเดรตมีข้อจำกัดหลักคือความไม่เสถียรทางเคมี เมื่อได้รับความร้อนอุณหภูมิจะสูงขึ้นและสูญเสียน้ำในทุครั้งของกระบวนการ ยิ่งไปกว่านั้น เกลือยังทำปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุโครงสร้างและนำความร้อนได้ต่ำ อีกทั้งเกลือไฮเดรตยังเป็นตัวทำความเย็นยิ่งยวด

เกลือไฮเดรตถูกนำมาใช้ในกระบวนการเก็บพลังงานความร้อนเนื่องจากมีความหนาแน่นของปริมาณเก็บสะสมที่สูง ( $\sim 350 \text{ MJ m}^{-3}$ ) มีค่าการนำความร้อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุจากสารอินทรีย์อื่น ๆ ( $\sim 0.5 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) และมีค่าใช้จ่ายในการนำไปใช้น้อยกว่าพาราฟิน

การเก็บความร้อนแฝงถูกใช้ในอาคารทั้งในระบบ Passive และ Active เพื่อลดการใช้พลังงานในอาคาร เพื่อการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ได้ดีขึ้น หรือเพื่อการทำความเย็นอิสระ (Free Cooling)

### 2.1.2.3 Thermochemical heat storage การเก็บความร้อนอุณหเคมี

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีสามารถนำมาใช้ในระบบกักเก็บพลังงานความร้อนได้ก็ต่อเมื่อผลผลิตจากปฏิกิริยานั้นเอื้อต่อการกักเก็บได้ และความร้อนที่เก็บไว้นั้นสามารถปล่อยออกมาเมื่อเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับ (Mehling & Cabeza, 2008)

ความหนาแน่นของพลังงานในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีมีค่อนข้างสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ข้อดีของพลังงานการเปลี่ยนแปลงทางเคมีคือสามารถควบคุมการปฏิบัติการเก็บพลังงานให้มีประสิทธิภาพได้ ซึ่งส่งผลดีต่อระบบการเก็บพลังงานความร้อนโดยเฉพาะการเก็บทางเคมีสามารถทำให้พลังงานที่เป็นสารตั้งต้นมีการสูญเสียที่เล็กน้อย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องหาปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับที่เหมาะสมสำหรับช่วงอุณหภูมิของสารที่เป็นแหล่งพลังงาน (Kato, 2007)

ระบบการเก็บพลังงานความร้อนจะถูกทำขึ้นโดยการใช้ประโยชน์จากปฏิกิริยาทางเคมี (Hauer, 2007) กระบวนการดูดซับของวัสดุที่เป็นของแข็งหรือของเหลว การดูดซับหมายถึงการประสานที่ผิวภายในวัสดุที่ซึมได้ด้วยองค์ประกอบในรูปของเหลวหรือก๊าซ ระหว่างขั้นตอนการคายก็จะมี การเพิ่มความร้อนภายในผิวของวัสดุ สารที่ดูดซับไปก็จะย้ายออกจากผิวภายใน ทันทันทีที่เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ(การดูดซับ) ความร้อนก็จะถูกปล่อยออกมา ดังนั้นขั้นตอนการดูดซับก็เปรียบเหมือนกระบวนการปล่อยออก (Discharging Process) ระบบการกักเก็บการดูดซับมี 2 แบบคือระบบปิดและระบบเปิด ในระบบปิด ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากตัวดูดซับหนึ่งไปอีกร่างหนึ่งโดยตัวแลกเปลี่ยนความร้อนหรือตัวควบแน่นหรือตัวระเหย กระบวนการถ่ายความร้อนไปยังตัวดูดซับจะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันกับการออกจากตัวควบแน่นเพื่อรักษาการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยของเหลวให้ไหลจากตัวดูดซับไปยังตัวควบแน่น

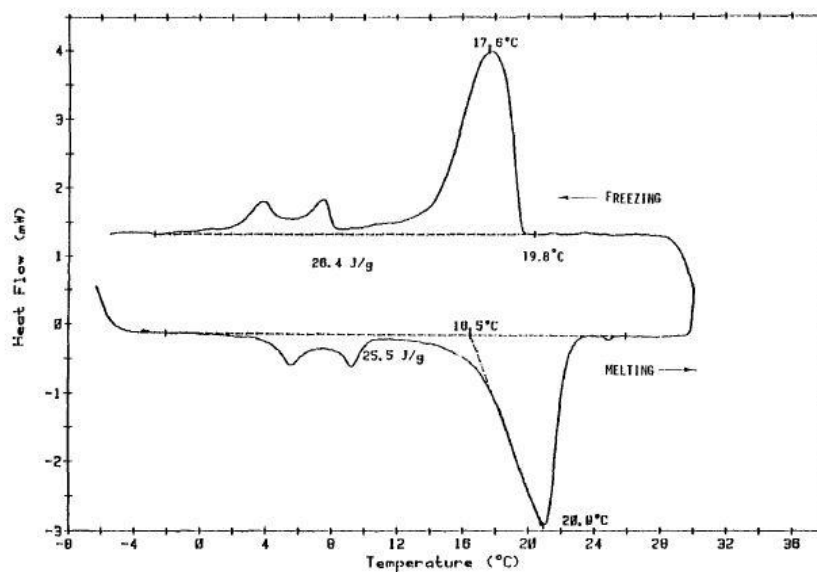
### 2.1.3 หลักการในการเลือก PCM ในการเป็นองค์ประกอบสถาปัตยกรรม

วัสดุเก็บพลังงานชนิดเปลี่ยนสถานะ (PCM) ที่สามารถควบคุมได้มีการนำไปใช้ที่หลากหลาย โดยทั่วไปเป็นการเก็บและปล่อยความร้อนในวงจรพื้นฐาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยในแง่พลังงานและในแง่ธุรกิจที่เป็นปัจจัยในการก่อสร้างอาคารที่เข้ามามีความสำคัญต่อการพิจารณา ดังนี้ (Hawes, Feldman, & Banu, 1993)

- คุณสมบัติทางกายภาพ เช่น รูปร่าง การเปลี่ยนแปลงปริมาตร ความหนาแน่น
- การคำนึงการเปลี่ยนแปลงความร้อน เช่น ความร้อนแฝงจากการหลอมเหลว คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน ช่วงของการหลอมเหลว ความสมดุลของสถานะ ความดันไอ
- การพิจารณาทางจลน์ การหลีกเลี่ยงความเย็นยิ่งยวด อัตราการตกผลึก
- การคำนึงถึงการเป็นพิษเช่น การติดไฟและอุบัติเหตุอื่น ๆ
- ความคุ้มค่าทางการการเงิน

#### 2.1.3.1 การประเมินประสิทธิภาพความร้อนของ PCM

ประสิทธิภาพทางความร้อนของวัสดุอาคารที่เป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ โดยทั่วไปจะถูกประเมินด้วยวิธี Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยที่พื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง ตามแผนภูมิที่ 3 เส้นโค้งในอุดมคติจะมีจุดเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว และมีช่วงของอุณหภูมิค่อนข้างแคบในจุดที่มีการเปลี่ยนสถานะ (D.W. Haews, 1993)

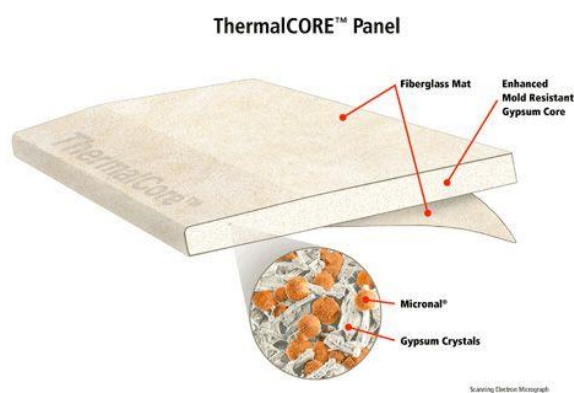


แผนภูมิที่ 3 แสดงการหลอมเหลวและแข็งตัวจากการเข้าเครื่องวัดคุณสมบัติวัสดุ (DSC) ของสาร Butyl Stearate ในแผ่นผนัง (ที่มา: Hawes et al., 1993)

## 2.1.4 ประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะในวัสดุอาคาร

### 2.1.4.1 วัสดุผสมยิปซัมผสม PCM

แผ่นผนังยิปซัมสามารถบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะได้มากถึง 50% ของปริมาตรตัวเอง อย่างไรก็ตามพบว่าสัดส่วนของวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 25-30% จึงจะให้ประสิทธิภาพที่ดี (Hawes et al., 1993)



ภาพที่ 4 แผ่นผนังยิปซัมผสม PCM (ที่มา: Thermalcore, 2016)

#### 2.1.4.2 วัสดุคอนกรีตผสม PCM

คอนกรีตโดยทั่วไปบรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะได้ 20% ของปริมาตรตัวเอง (Hawes et al., 1993) แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการบรรจุยังขึ้นอยู่กับชนิดของคอนกรีต ยิ่งคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นก็บรรจุวัสดุเปลี่ยนสถานะได้มาก การทดสอบการติดไฟในห้องทดลองแสดงให้เห็นว่ามีการทนไฟได้ดีและไฟลามได้น้อยโดยยังอยู่ในระหว่างการทดลองเพื่อหาอัตราการไหม้จากการทดลองด้วยสถานการณ์จริง

ตัวอย่างของวัสดุคอนกรีตเปลือยปกติและคอนกรีตผสมวัสดุเปลี่ยนสถานะถูกทดลองควบคุมให้อยู่ภายในวงจร 6 ชั่วโมงในระยะ 560 รอบ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ -25 °C ถึง +33 °C พบว่ามีการสูญเสีย PCM เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบคอนกรีตผสม PCM เปรียบเทียบกับคอนกรีตทั่วไป พบว่า การดูดซับความชื้นลดลงอย่างมากในคอนกรีตผสม PCM ความเสถียรของวัสดุคอนกรีตผสมดีมาก ค่าความจุพลังงานในคอนกรีตผสม PCM อยู่ที่ 200-230% (Hawes et al., 1993)

### 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร

การศึกษาการใช้พลังงานในอาคารพบว่า การใช้พลังงานขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อกันและในลักษณะที่ซับซ้อน ยากที่จะระบุว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลในสถานการณ์นั้นมากหรือน้อยกว่ากัน (สุนทร บุญญาธิการ, 2542) โดยสามารถแบ่งตัวแปรดังกล่าวออกเป็น 3 ดังนี้

#### 2.2.1 ที่ตั้งอาคารและสภาพภูมิอากาศ (Site and Climate)

สภาพดินฟ้าอากาศของท้องถิ่นรวมกับสภาพภูมิอากาศบริเวณที่ตั้งอาคาร (Microclimate) ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ ในการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงาน จำเป็นต้องหาแนวทางในการปรับปรุงสภาพภูมิอากาศ ณ บริเวณที่ตั้งอาคารให้เอื้ออำนวยต่อการนำเอาอิทธิพลของสภาพแวดล้อมดังกล่าว มาเป็นปัจจัยในการออกแบบอาคาร เพื่อให้ได้การประหยัดพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

## 2.2.2 อาคารและระบบของอาคาร (Building and Systems)

ระบบเปลือกอาคาร ระบบโครงสร้าง และระบบเครื่องกล เป็นกลุ่มตัวแปรที่เกี่ยวกับอาคาร และระบบของอาคาร ในการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงาน จำเป็นจะต้องวิเคราะห์รูปแบบของ อาคารและงานระบบต่าง ๆ ให้มีความสอดคล้องกัน เพื่อให้ระบบของอาคารมีประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด

## 2.2.3 ผู้ใช้อาคารและการใช้งาน (User and Operation)

ผู้ใช้อาคารและการใช้งานคือกลุ่มตัวแปรที่ประกอบด้วย ประเภทของผู้ใช้อาคาร รูปแบบการใช้งานหรือลักษณะของกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในอาคาร ตลอดจนตารางการใช้งานและ การควบคุมงานระบบต่าง ๆ ภายในอาคาร ลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันของแต่ละอาคารย่อมส่งผล โดยตรงต่อการใช้พลังงานในอาคาร

## 2.3 ภาระการทำความเย็นที่เกิดภายในอาคารปรับอากาศ

ภาระการทำความเย็นที่เกิดภายในอาคารปรับอากาศนั้นเกิดจากความร้อนซึ่งมาจากปัจจัย ต่าง ๆ ทั้งภายนอกและภายในอาคารที่ส่งผลต่อภาระการทำความเย็นของอาคาร โดยจะแตกต่างกัน ตามสภาพแวดล้อมของอาคารนั้น ๆ รวมทั้งลักษณะการใช้งาน ผู้ใช้งานภายใน โดยสามารถแบ่งปัจจัย ดังกล่าวออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

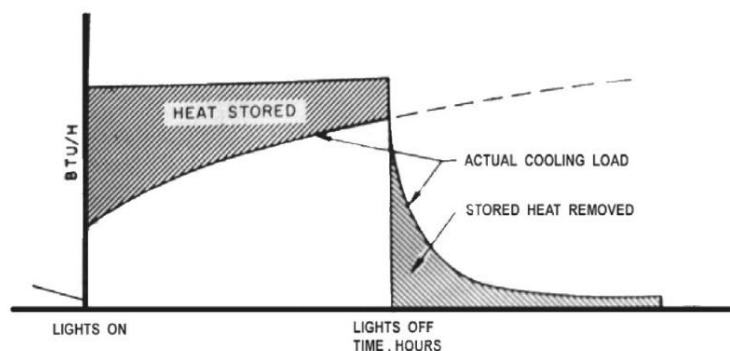
### 2.3.1 ความร้อนจากสภาพภูมิอากาศภายนอกอาคาร

ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น คือ อุณหภูมิของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อ เปรียบเทียบกับประเทศในภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก อุณหภูมิระหว่างเวลากลางวันและกลางคืนมีความ แตกต่างไม่มากนัก อีกทั้งยังมีลมที่เป็นปัจจัยในการลดความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย แต่ก็ยังมีปัญหาคือมี ความชื้นสูงเกินสภาวะน่าสบาย (Comfort Zone) ทำให้เกิดภาระการทำความเย็น (สุนทร บุญญาธิ การ, 2542)

### 2.3.2 ความร้อนจากอุปกรณ์ภายในอาคารปรับอากาศ (Appliance)

อีกปัจจัยที่ทำให้เกิดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศนั้นเกิดจากการใช้งาน เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในห้องปรับอากาศ โดยการแผ่รังสีความร้อนของเครื่องใช้ไฟฟ้า และวัสดุต่าง ๆ ภายในห้องดูดกลืนรังสีนั้นไว้จนมีอุณหภูมิพื้นผิวสูงกว่าอุณหภูมิภายในห้อง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ

Cooling Load ของเปลือกอาคาร เนื่องจากอาคารส่วนมากมักปิดไฟทุกดวงพร้อมเครื่องปรับอากาศ หลังเลิกงาน ทำให้เกิดความร้อนสะสมในตัววัสดุภายในห้อง และจะกลายเป็นภาระการทำความเย็น ของวันถัดไป เรียกว่า Cooling Load Factor (CLF) (ASHRAE Handbook Fundamental SI, 1993)



แผนภูมิที่ 4 แสดงผลของ Thermal Storage ที่เกิดจากภาระการทำความเย็นจากอุปกรณ์  
เครื่องใช้ไฟฟ้าในอาคาร

(ASHRAE Handbook Fundamental SI, 1993)

### 2.3.3 ภาระการทำความเย็นจากคน (Occupant)

การออกแบบสภาวะภายในอาคารที่สามารถทำให้เกิดความน่าสบายในการใช้งาน จำเป็นจะต้องทราบถึงลักษณะการตอบสนองของร่างกายมนุษย์ต่อสภาพแวดล้อม โดยปกติร่างกายของมนุษย์จะมีกระบวนการเผาผลาญอาหารเพื่อทำให้เกิดพลังงานอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้เกิดความร้อนของร่างกายมนุษย์ โดยอัตราการเกิดความร้อนจะแตกต่างกันไปตาม เพศ อายุ และกิจกรรมที่ทำ ในการรักษาอุณหภูมิในร่างกายให้คงที่คือ  $37^{\circ}\text{C}$  ร่างกายจะต้องคายความร้อนออกมาตลอดเวลาในอัตราที่เท่ากับการกำเนิดความร้อน ความร้อนที่เกิดจากการทำกิจกรรมนั้นมีปริมาณที่ต่างกันตามลักษณะของกิจกรรมที่ทำ กิจกรรมที่เบา ๆ ไม่ต้องใช้กำลังมากค่าความร้อนก็ออกมาน้อย (ASHRAE Handbook, 1989)

### 2.4 วิธีการคำนวณภาระการทำความเย็น

การคำนวณภาระการทำความเย็นแบ่งออกเป็น 3 วิธี ประกอบด้วย (Al-Rabghi & Al-Johani, 1997)



1. Total Equivalent Temperature Difference (TETD) เป็นวิธีการคำนวณจากรังสีความร้อนและความร้อนสะสมภายในผนัง เป็นค่ารวมภาระการทำความเย็นภายในอาคาร ซึ่งไม่รวมความร้อนจากภายในอาคารเช่น อุปกรณ์ไฟฟ้า ไฟฟ้าแสงสว่าง และผู้ใช้อาคาร

2. Transfer Function Method (TFM) เป็นวิธีการคำนวณความร้อนสำหรับอาคาร พัฒนาโดย ASHRAE โดยคำนวณความร้อนรายชั่วโมงที่เกิดจากผนัง หลังคา และกระจก รวมทั้งปัจจัยภายในอาคารที่ทำให้เกิดความร้อนที่ส่งผลถึงการทำความเย็นภายในอาคาร เป็นการคำนวณที่มีความซับซ้อนสูงและต้องใช้ในการจำลองผลทางคอมพิวเตอร์

3. The Cooling Load Temperature Difference, Cooling Load Factor (CLTD/CLF) เป็นวิธีการคำนวณที่ดัดแปลงมาจาก Transfer Function Method เป็นวิธีที่สามารถคำนวณด้วยมือได้ โดยค่าทั้งหมดจะเป็นค่าเฉลี่ยและต้องอ้างอิงจากคู่มือและตารางใน ASHRAE manual 1989

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Visual DOE ในการจำลองผล ด้วยวิธีการ Transfer Function Method (TFM) ในการคำนวณเป็นหลัก เป็นการคำนวณความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นรายชั่วโมง ที่ตกกระทบบนพื้นผนังภายนอกอาคาร

## 2.5 สภาวะน่าสบาย

สภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ (Thermal Comfort) คือ สภาวะที่ร่างกายและจิตใจแสดงถึงความพึงพอใจ เป็นสภาวะที่สมดุลระหว่างอุณหภูมิ หรือร่างกายไม่รู้สึกร้อนหรือหนาว ไม่รู้สึกว่าได้สูญเสียความร้อนหรือได้รับความร้อนจากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละบุคคล สภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิเป็นความพึงพอใจในแต่ละบุคคลซึ่งจะแตกต่างกันตาม ความชอบ ความคุ้นเคย วัฒนธรรม และลักษณะทางกายภาพและจิตใจของแต่ละบุคคล (ASHRAE Standard 55, 1992)

ในสภาพแวดล้อมหนึ่งที่มีอุณหภูมิเหมือนกัน บุคคลหนึ่งอาจรู้สึกสบายดีในขณะที่อีกบุคคลอาจรู้สึกแตกต่างและไม่สามารถทนได้ ตัวแปรที่มีผลต่อความน่าสบายที่สามารถวัดได้ในทางทฤษฎีประกอบด้วยตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อมและตัวแปรทางด้านบุคคล แบ่งออกได้เป็น 6 ตัวแปร (Fanger, 1970) ดังนี้ ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม 4 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอากาศ (Ambient air temperature) อุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อน (Mean radiant temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) และความเร็วลม (Wind speed) ตัวแปรทางด้านบุคคล 2 ตัวแปร คือ ระดับกิจกรรม (Activity Rate) และเสื้อผ้าที่สวมใส่ (Clo-value)

### 2.5.1 อุณหภูมิอากาศ (Ambient air temperature)

อุณหภูมิอากาศเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสภาวะน่าสบาย โดยส่วนมากร่างกายจะสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าสภาวะน่าสบายร่างกายจะเกิดการสูญเสียความร้อนจากการระเหยในรูปแบบของเหงื่อ หากอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ต่ำหรือสูงกว่าช่วงนี้ผู้ใช้อาคารสามารถปรับโดยการทำความร้อนหรือการทำความเย็นเพื่อให้อยู่ในสภาวะน่าสบาย นอกจากนี้อุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม มีผลกระทบในการช่วงส่งเสริมสภาวะน่าสบายให้ดีขึ้นหรือแย่ลงได้

อย่างไรก็ตามประชากรทั่วไปในประเทศไทยมีการรับรู้และคาดหวังต่อสภาวะน่าสบายเชิงอุณหภูมิแตกต่างจากมาตรฐานของ ASHRAE ซึ่ง Busch Jr (1990) ได้เก็บข้อมูลอาคารสำนักงานในกรุงเทพฯ กว่า 1100 คน พบว่า ประชากรไทยคาดหวังสภาวะน่าสบายเชิงอุณหภูมิที่ไม่เกิน 24.5 °C ในห้องปรับอากาศ และ 28.5 °C ในห้องที่ไม่ปรับอากาศ

### 2.5.2 อุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อน (Mean radiant temperature)

อุณหภูมิเฉลี่ยการแผ่รังสีความร้อน (Mean radiant temperature: MRT) คืออุณหภูมิเฉลี่ยการแผ่รังสีโดยรอบ สามารถวัดได้โดยใช้ลูกกลมพลาสติกสีดำด้านเจาะรูกลมเล็กๆ และสอดเทอร์โมมิเตอร์เข้าไปให้อยู่ประมาณกึ่งกลางของลูกกลม เทอร์โมมิเตอร์จะอ่านค่าออกมาเป็น Globe temperature ซึ่ง MRT จะคำนวณได้จากค่า Globe temperature โดยใช้สมการ (Designing Buildings Wiki, 2016)

$$MRT = T_g + 2.42 \times V (T_g - T_a) \dots \dots \dots (1)$$

โดยที่	$T_g$	คือ Globe temperature (°C)
	$V$	คือ ความเร็วลม (m/s)
	$T_a$	คือ อุณหภูมิอากาศ (°C)

### 2.5.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือสัดส่วนของมวลไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิหนึ่งต่อไอน้ำสูงสุดที่อากาศสามารถรับได้ ความชื้นจะมีความสำคัญต่อการระเหยตัวของเหงื่อในร่างกาย ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมอยู่ประมาณร้อยละ 60-70 ในฤดูหนาวจะมีค่าความสัมพัทธ์ต่ำ การระเหยตัวสูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากร่างกาย จะรู้สึกไม่สบายตัวและผิวหนังแห้งส่วนในฤดูร้อนเราจะรู้สึกว่าร้อนอบอ้าวและมีความชื้นในอากาศมาก (Fanger, 1970)

#### 2.5.4 ความเร็วลม (Air velocity, Wind speed)

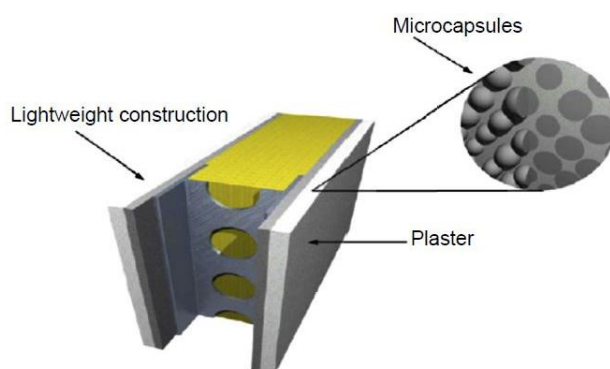
ความเร็วลม คืออัตราส่วนของระยะทางต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ มวลอากาศเคลื่อนที่ไป ซึ่งลมที่พัดผ่านร่างกายจะช่วยให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผิวหนังรวมทั้งความร้อนโดยรอบ และเกิดการระบายความร้อนมากขึ้นทำให้รู้สึกเย็น และเกิดสภาวะน่าสบายขึ้น แต่ควรมีความเร็วลมที่พอดี ไม่มากหรือน้อยเกินไป หากความเร็วลมที่มากเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดความรำคาญ รู้สึกอึดอัด หรือรบกวนการทำงานและกิจกรรมต่าง ๆ (Fanger, 1970)

### 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาประสิทธิภาพแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะมุ่งเน้นศึกษาการนำวัสดุเปลี่ยนสถานะมาใช้เป็นองค์ประกอบหรือเป็นส่วนหนึ่งของวัสดุก่อสร้างสถาปัตยกรรม การใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะในอาคารโดยทั่วไปแล้วมีจุดประสงค์เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานของอาคารในการควบคุมความร้อนและความเย็นเนื่องจาก เป็นองค์ประกอบหนึ่งในการการช่วยเพิ่มมวลอุณหภูมิให้แก่ผนังอาคาร

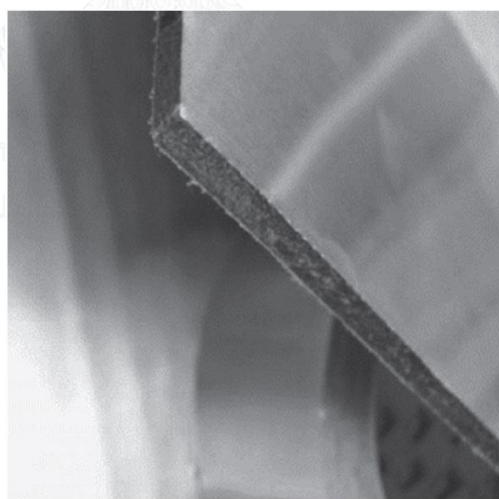
การใช้แผ่นผนังวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อให้อาคารอยู่ในภาวะน่าสบายของอาคารผนังเบา PCM เหมาะกับการรวมเข้ากับวัสดุอาคาร ประสิทธิภาพของส่วนประกอบ PCM ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น วิธีการผสมวัสดุ PCM กับแผ่นผนัง สภาพภูมิอากาศ ทิศทางการรับแสงอาทิตย์ การดูดกลืนความร้อนโดยพื้นผิวและสีของพื้นผิววัสดุ อัตราการระบายอากาศ ชนิดของวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เลือกใช้ อุณหภูมิที่จุดเปลี่ยนสถานะของ PCM และช่วงระยะของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสถานะ เป็นต้น

ปัจจุบันมีการผสม PCM เข้ากับวัสดุก่อสร้างอาคาร จากการวิจัยของ Schossig, Henning, Gschwander, and Haussmann (2005) แสดงให้เห็นว่าวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถผสมไปในวัสดุก่อสร้างได้ โดยผสมในลักษณะไมโครแคปซูลกับอิปีซิมบอร์ต (ภาพที่ 5) เป็นวิธีที่เหมาะสมในการป้องกันกันรั่วไหลของ PCM



ภาพที่ 5 การเพิ่มวัสดุเปลี่ยนสถานะด้วยวิธีไมโครแคปซูลในผนังเบาของอาคาร  
(ที่มา: Schossig et al., 2005)

Kuznik, Virgone, and Noel (2008) ได้พยายามเพิ่มประสิทธิภาพการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะกับอาคาร โดยใช้พาราฟิน 60 % มีจุดหลอมเหลวที่ 22 °C ผสมเข้ากับแผ่นผนังคอมโพสิต Dupont และหาความหนาที่เหมาะสมของแผ่น PCM ที่ส่งผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารตลอดช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ความหนาที่เหมาะสมของ PCM Dupont คือ 1 cm. จะมีประสิทธิภาพลดต้นทุนได้มากกว่าวัสดุเก็บความร้อนทั่วไปที่ใช้กับอาคาร และมีส่วนช่วยในการลดความร้อนภายในห้องในช่วงกลางวัน

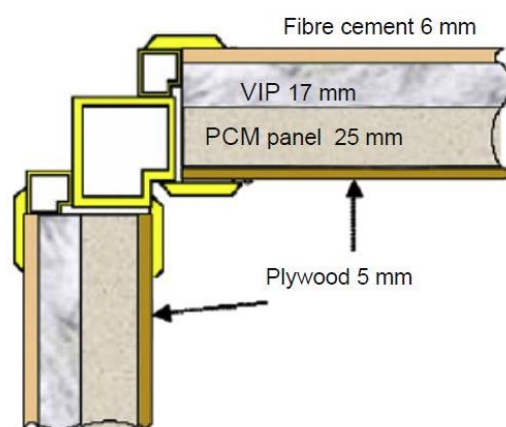


ภาพที่ 6 แผ่นผนังผนังคอมโพสิต PCM Dupont  
(ที่มา: Kuznik et al., 2008)

Athienitis et al. (1997) ใช้แผ่นยิปซัมบอร์ดเคลือบด้วย PCM รับความร้อนโดยตรงจากนอกห้องทดลอง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความร้อนของยิปซัมบอร์ดเคลือบ PCM ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิในห้องทดลองลดลงได้มากถึง 4 °C ในช่วงกลางวัน

Ahmad et al. (2006) ออกแบบเซลล์ทดลอง 2 ชนิด แต่ละเซลล์ประกอบด้วยกระจก 1 ด้าน และเซลล์ทดลองด้วยหุ้มฉนวนสุญญากาศ (VIP: Vacuum Isolation Panel) หนึ่งในเซลล์ทดสอบติดตั้งผนังวัสดุเปลี่ยนสถานะปิดทับด้วยไม้อัด ดังภาพภาพที่ 7

ผลการเก็บข้อมูลพบว่า ในฤดูหนาวผนัง PCM จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาความอบอุ่นภายในอาคารและป้องกันความเย็นจากภายนอกเข้ามาสู่ในอาคาร นอกจากนี้ผนัง PCM ยังมีความสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนที่ตีแผ่จะผ่านการใช้งานมาแล้วกว่า 480 รอบ



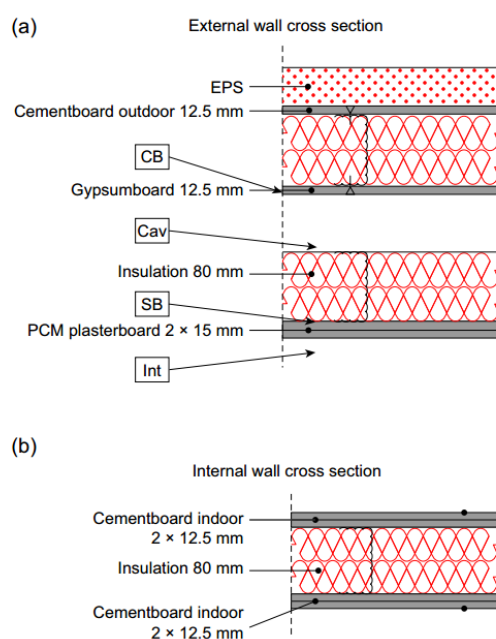
ภาพที่ 7 รายละเอียดผนังเซลล์ทดลองของ Ahmad et al. (2006)

(ที่มา: Ahmad et al., 2006)

Mandilatas et al. (2013) ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่อาคารขนาดจริงที่ประเทศกรีซ (ภาพที่ 8) โดยการใช้แผ่นยิปซัมชุบ PCM ที่ผนังภายนอกและภายในอาคาร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศภายในอาคารไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงทั้งกลางวันกลางคืน เนื่องจากอาคารที่ใช้ทำการทดลองมีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ผนังทั้งหมดทำให้ไม่เกิดความแตกต่างด้านอุณหภูมิภายในและภายนอก (ภาพที่ 9)



ภาพที่ 8 อาคารที่ใช้ทำการทดลองประกอบผนังวัสดุเปลี่ยนสถานะ  
(ที่มา: Mandilaras et al., 2013)

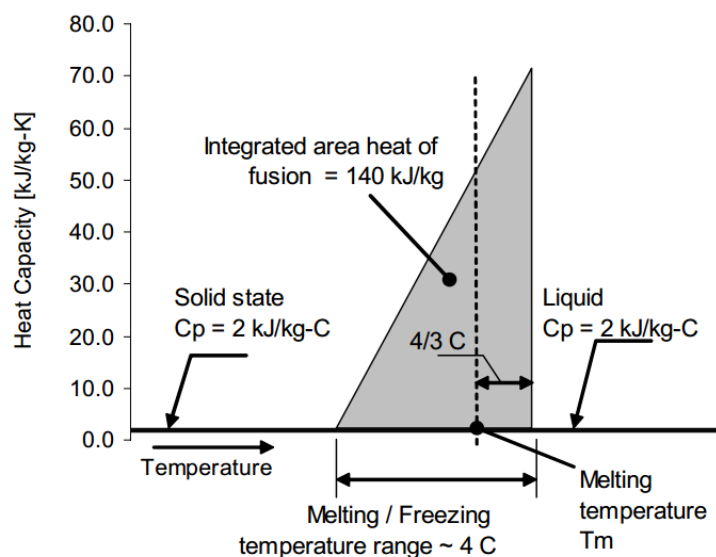


ภาพที่ 9 รายละเอียดผนังอาคารทดลองของ Mandilatas et al. (2013)  
(ที่มา: Mandilaras et al., 2013)

ในประเทศไทยมีการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุเปลี่ยนสถานะกับงานสถาปัตยกรรมเช่นกัน โดยชลธิศ เอี่ยมวรอุฒิกุล (2550) ได้นำ PCM ประเภท Paraffin wax ผสมกับกับคอนกรีตจากนั้นทดสอบด้วยกระบวนการ DSC หาความจุความร้อนจำเพาะ ข้อมูลจากกระบวนการ DSC ข้อมูลที่ได้ไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหา Paraffin wax ที่มีจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมสำหรับการใช้ผสมกับคอนกรีตเพื่อเป็นผนังอาคาร

ผลการจำลองพบว่า Paraffin wax ที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากับ  $39.83\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะสามารถให้ผลการดูดซับความร้อนสูงสุด ซึ่งช่วยให้ผนังมีมวลอุณหภาพเพิ่มขึ้นให้แก่วัสดุในรูปแบบความร้อนแฝง

สามารถช่วยให้อุณหภูมิของผนังมีการเปลี่ยนแปลงน้อยลง และลดอุณหภูมิอื่นเนื่องมาจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ ส่งผลให้สามารถควบคุมให้ภาระความเย็นภายในคงที่ ลดความต้องการการทำความเย็นสูงสุด (Peak cooling load) ของอาคารได้



แผนภูมิที่ 5 แบบจำลองค่าความจุความร้อน PCM สำหรับใช้ในการคำนวณ  
(ที่มา: ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูกร, 2550)

### สรุปจากการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. วัสดุสะสมพลังงาน ชนิดที่มีการเปลี่ยนสถานะ (PCM) มีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานที่สูง สาร PCM โดยทั่วไปจะมีค่าความจุความร้อนมากกว่า 10 เท่าของของค่าความจุความร้อนของคอนกรีต
2. งานวิจัยที่เกิดขึ้นทั้งในและต่างประเทศ ในช่วงต้นส่วนมากนั้นเป็นการศึกษาหาชนิดของสาร PCM ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ เป็นหลัก
3. หลังจากทราบคุณสมบัติของสาร PCM ชนิดต่าง ๆ แล้วจึงเป็นการทดลองเป็นการนำสาร PCM ผสมเข้ากับวัสดุก่อสร้าง ในช่วงต้นเป็นการทดลองหาวิธีที่จะใช้ PCM กับวัสดุก่อสร้าง เช่น การผสม การฉาบ หรือ การชุบกับวัสดุผนังเบา เป็นต้น

4. การศึกษาประสิทธิภาพของสาร PCM กับองค์ประกอบสถาปัตยกรรมที่ผ่านมาเป็น การใช้คุณสมบัติที่ดีของสาร PCM ในการป้องกันและควบคุมความร้อนเข้าและออกจากอาคารเป็นหลัก เนื่องจากสาร PCM มีความสามารถในการเพิ่มมวลอุณหภาพให้กับวัสดุ
5. รูปแบบการทดลองของงานวิจัยที่ผ่านมาโดยมากเป็นการวิจัยโดยการสร้างห้องทดลอง หรือกล่องทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านอุณหภูมิของการใช้ PCM สามารถนำมาปรับในการวิจัยขั้นนี้ได้ แต่อย่างไรก็ดียังไม่รู้รูปแบบการวิจัย PCM ที่เก็บข้อมูลตรวจวัดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศโดยตรง
6. การใช้ PCM ติดตั้งที่ผนังภายในอาคารในรูปแบบแผ่น PCM board เพื่อลดพลังงานในการปรับอากาศโดยตรง ยังไม่มีคำตอบชัดเจนว่าจะสามารถช่วยในการประหยัดพลังงานจากเครื่องปรับอากาศเท่าใด และสามารถเพิ่มเวลาการใช้งานในพื้นที่หลังจากปิดเครื่องปรับอากาศได้ยาวนานมากยิ่งขึ้นอย่างไร โดยเฉพาะกับการใช้งานงานในเขตอากาศแบบร้อนชื้น



### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 แนวทางการวิจัย

การศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคารในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก โดยส่วนแรกเป็นการเก็บข้อมูลด้วยห้องทดลองขนาดเท่าจริงติดตั้งเครื่องปรับอากาศใกล้เคียงกับการใช้งานจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ PCM board ส่วนที่สองเป็นการนำข้อมูลจากห้องทดลองและคุณสมบัติของวัสดุ PCM board เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจำลองผลด้วยโปรแกรม Visual DOE เพื่อหาคำนวนค่าการใช้พลังงานตลอดทั้งปีจากอาคารอ้างอิง

#### 3.2 ตัวแปรในการวิจัย

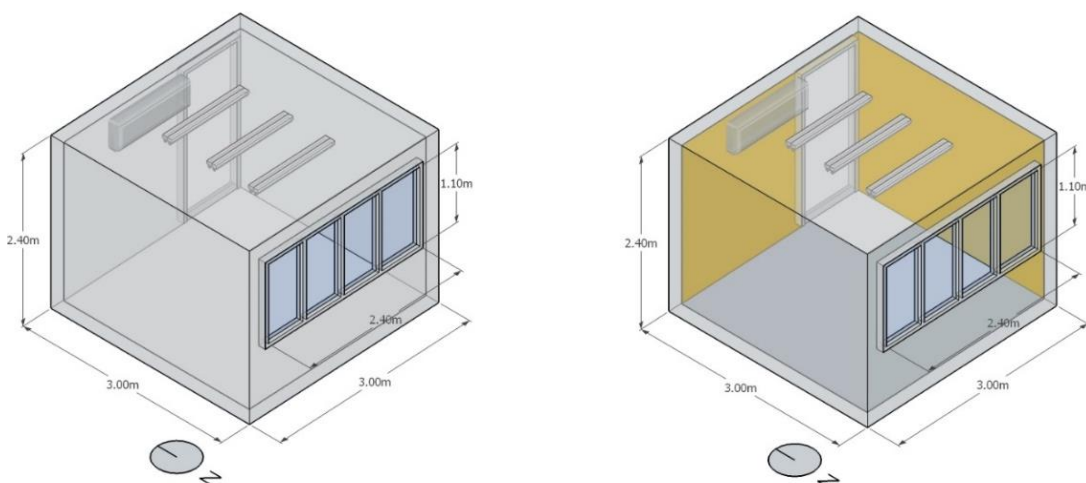
- ตัวแปรต้น - อุณหภูมิภายนอก ความร้อนจากอุปกรณ์ ความร้อนจากแสงสว่าง
- ตัวแปรตาม - อุณหภูมิภายในห้อง และอุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบ ค่าการใช้พลังงาน
- ตัวแปรควบคุม - อุณหภูมิการปรับอากาศ และเวลาที่เปิดเครื่องปรับอากาศ

#### 3.3 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง

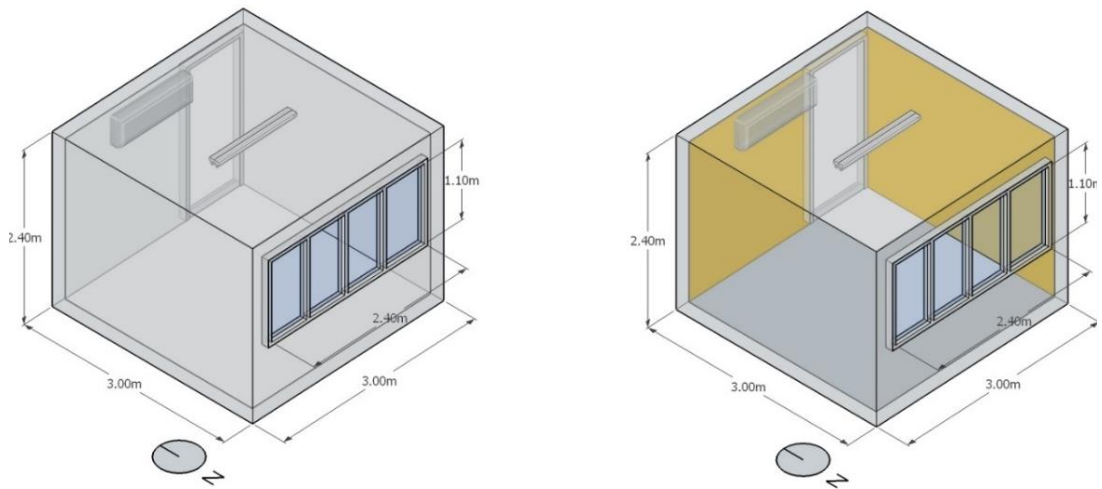
##### 3.3.1 กำหนดรูปแบบห้องทดลอง

- ห้องทดลองมีขนาด 3.00 x 3.00 x 2.40 m.
- พื้น ผนัง หลังคา ของห้องทดลองกันความร้อนด้วยแผ่นโฟมหนา 50 mm. ปิดทับด้วยแผ่นสมาทบอร์ดทั้งด้านในและด้านนอก
- แบ่งเป็น 2 กรณีหลัก คือ ห้องที่ไม่ติด PCM board (Base case) และที่ติด PCM board (PCM board case)
- แบ่งย่อยเป็นอีก 2 ประเภทตามช่วงเวลาการใช้งานอาคาร คือ สำนักงาน และ อาคารพักอาศัย
- ห้องที่ติด PCM Board ติดตั้ง PCM Board ในผนังทั้ง 4 ด้าน ยกเว้นช่องเปิดและประตู โดย PCM Board มีขนาด 0.3 x 0.6 m. ความหนา 3 mm. ถูกปิดทับด้วยแผ่นไม้อัดหนา 3 mm. ตามมาตรฐานการติดตั้งของผู้ผลิตเพื่อปกป้องผิววัสดุ PCM board แล้วทาทับด้วยสีทาภายในสีขาว

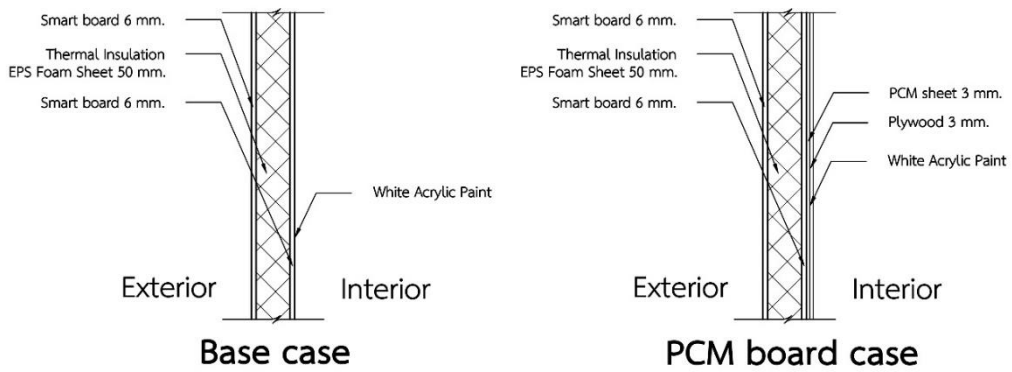
- เจาะช่องแสงกระจกเขียวหนา 5 mm. ขนาด 1.1 x 2.4 m.
- ห้องทดลองแบบอาคารสำนักงานและห้องทดลองแบบอาคารพักอาศัยติดหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ขนาด 36 วัตต์ เพื่อจำลองความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร โดยประมาณการจาก ความร้อนจากแสงสว่าง (LPD) และความร้อนจากอุปกรณ์ (EQD) ต่อพื้นที่ห้องทดลอง
  - สำนักงาน LPD 10.5 W/m<sup>2</sup> EPD 10.5 W/m<sup>2</sup> เท่ากับ 6 หลอด โดยประมาณ
  - อาคารพักอาศัย LPD 7.5 W/m<sup>2</sup> EPD 8.6 W/m<sup>2</sup> เท่ากับ 2 หลอด โดยประมาณ
- ติดตั้งเครื่องปรับอากาศขนาดให้สอดคล้องกับขนาดพื้นที่ของห้องทดลอง คือ
  - ขนาด 9400 BTU/hr
  - ค่า EER 12.25
  - กำลังไฟฟ้า 750 วัตต์
- ในช่วงที่เปิดเครื่องปรับอากาศ ตั้งอุณหภูมิที่ 25 °C ในห้องทดลองทั้งสองประเภทการใช้งาน



ภาพที่ 10 รูปแบบห้องทดลองอาคารสำนักงานที่ไม่ติด PCM board (ซ้าย) และห้องที่ติด PCM board (ขวา)



ภาพที่ 11 รูปแบบห้องทดลองอาคารพักอาศัยที่ไม่ติด PCM board (ซ้าย) และห้องที่ติด PCM board (ขวา)



ภาพที่ 12 รายละเอียดผนังของห้องทดลองทั้ง 2 กรณี



ภาพที่ 13 การก่อสร้างโครงสร้างของห้องทดลอง



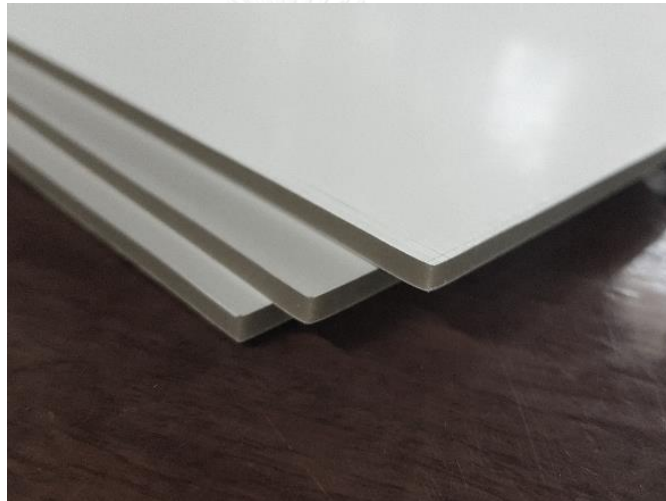
ภาพที่ 14 การติดตั้งวัสดุผิวและฉนวนกันความร้อนของห้องทดลอง



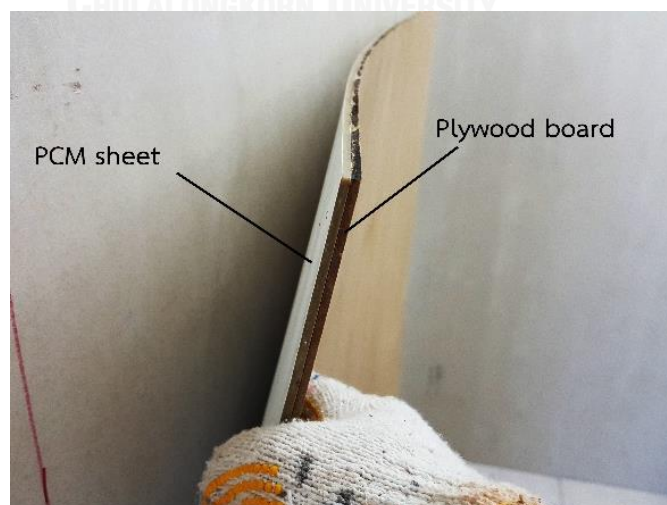
ภาพที่ 15 การติดตั้งวัสดุภายในและหลอดไฟ



ภาพที่ 16 ห้องทดลองทั้ง 2 ห้องที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว



ภาพที่ 17 PCM sheet หนา 3 mm.

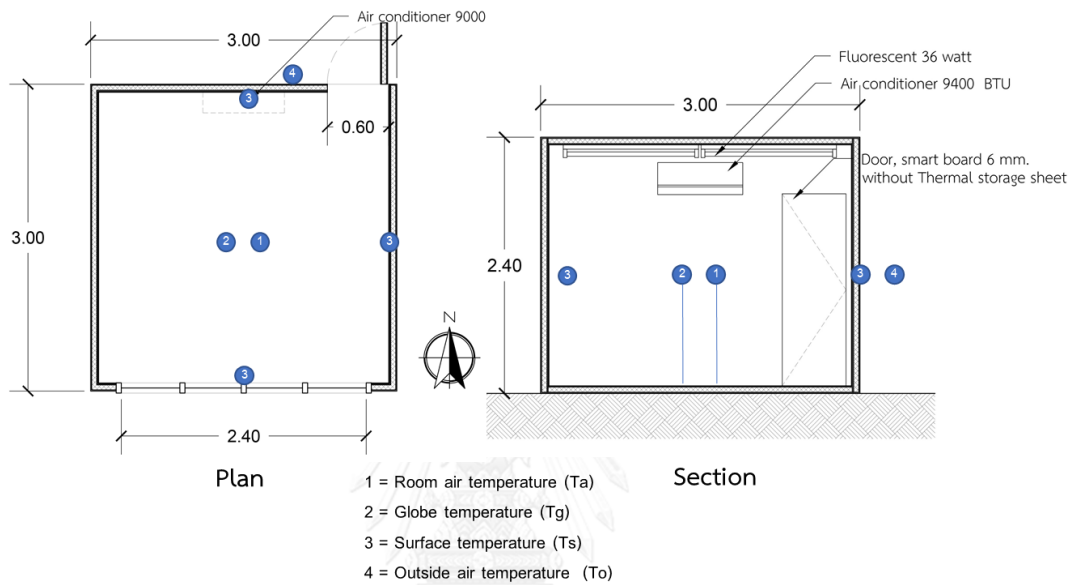


ภาพที่ 18 การติดตั้ง PCM board (3 mm.) และไม้อัด (3 mm.)



### 3.3.2 เครื่องมือในการเก็บข้อมูล

- เครื่อง 12 channel temperature data logger 1 เครื่อง พร้อมสายวัด 9 สาย สำหรับวัดอุณหภูมิและ 2 สายสำหรับวัด Globe temperature
- เครื่อง Digital Energy Monitor 2 เครื่อง



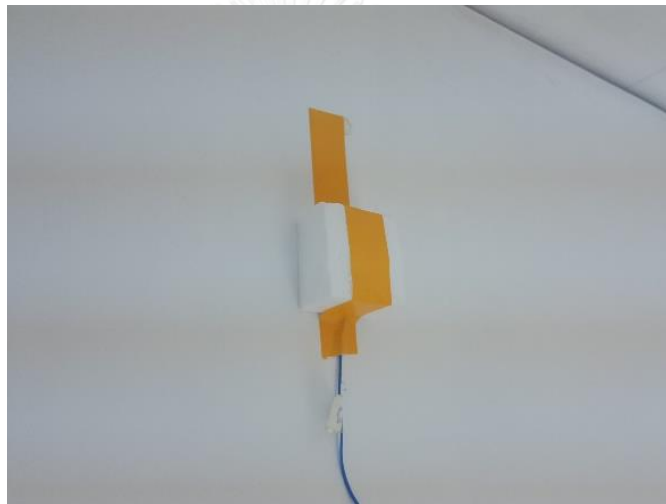
ภาพที่ 19 แสดงตำแหน่งการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ ผังพื้น (ซ้าย) รูปตัด (ขวา)



ภาพที่ 20 เครื่อง 12 channel temperature data logger



ภาพที่ 21 การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 22 การติดตั้งสายวัดอุณหภูมิผิว



ภาพที่ 23 เครื่อง Digital Energy Monitor 2

### 3.3.3 ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล

- กรณีสำนักงานที่ติด PCM board และไม่ติด PCM board เก็บข้อมูลเวลา 8.00 – 00.00 น. โดยเปิดเครื่องปรับอากาศเวลา 8:00 - 18:00 น.
- กรณีอาคารพักอาศัยที่ติด PCM board และไม่ติด PCM board เก็บข้อมูลเวลา 23:00 – 12:00 น. เปิดเครื่องปรับอากาศ 23:00 - 6:00 น.
- เก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศภายนอก ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง
- แต่ละประเภทการใช้งานทำการทดลองซ้ำ 3 วัน
- ความถี่ในการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 5 นาที

ตารางที่ 3 ตารางสรุปประเภทการทดลองและช่วงเวลาการเก็บข้อมูล

ประเภทการใช้งาน	ห้องทดลอง	ช่วงเวลาทำงานของเครื่องปรับอากาศ	ช่วงเวลาเก็บข้อมูล	เก็บซ้ำ
สำนักงาน	Base case	08:00 - 18.00	08:00 - 23.00	3-day
	PCM board case			
อาคารพักอาศัย	Base case	23:00 - 06.00	23:00 - 11.00	3-day
	PCM board case			

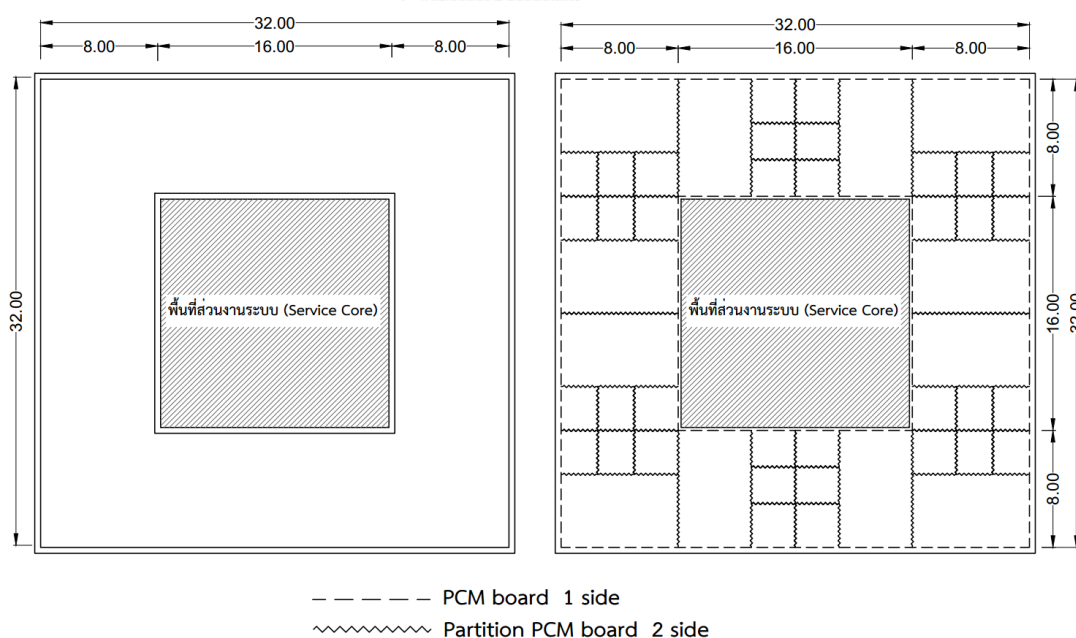


### 3.4 การจำลองผล

การศึกษานี้ได้จำลองการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ด้วยโปรแกรม Visual DOE 4 โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุตามที่ได้จากผลการทดสอบ กับอาคารอ้างอิงทั้งอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย เพื่อทราบค่าการใช้พลังงานตลอดทั้งปี

#### 3.4.1 อาคารสำนักงาน

อาคารสำนักงานตัวอย่าง (Reference Building) ได้จากการนำแบบอาคารจากการวิเคราะห์ เอกสารทางวิชาการและ งานวิจัย การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE 4 (อรรถน์ เศรษฐบุตร, 2552) ในระยะเวลาตลอดทั้งปี นำมาปรับปรุงผนังของอาคารให้มีสัดส่วนพื้นที่ผนังกันห้องภายในต่อพื้นที่อาคารให้มากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการหาประสิทธิภาพด้านพลังงานของ PCM board

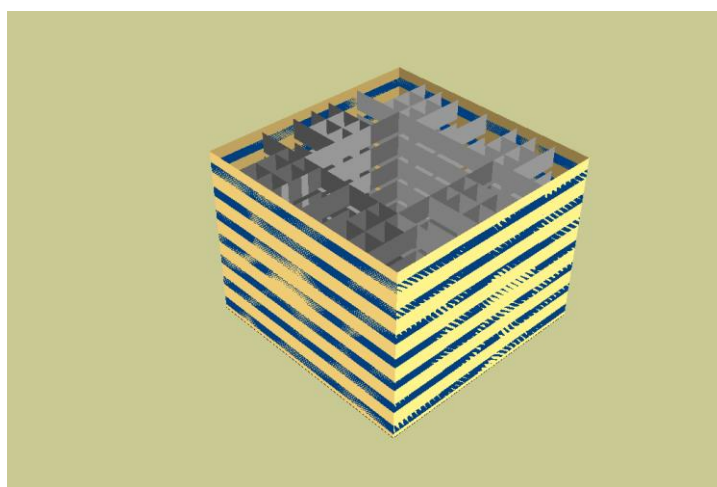


ภาพที่ 24 อาคารสำนักงานอ้างอิง (ซ้าย) และอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง (ขวา)

ตารางที่ 4 รายละเอียดสถาปัตยกรรมอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง

รายการ	ห้องทดลอง	สำนักงานอ้างอิง	
ขนาดอาคาร (m)	3 x 3	32 x 32	
พื้นที่ต่อชั้น (m <sup>2</sup> )	9.00	1,024.00	
จำนวนชั้น	1	7	
พื้นที่อาคารทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	8.17	7,168.00	
พื้นที่ปรับอากาศ/ชั้น (m <sup>2</sup> )	8.17	768.00	
พื้นที่ปรับอากาศทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	8.17	5,376.00	
ระยะพื้นถึงพื้น (m)	2.40	3.50	
ระยะพื้นถึงฝ้า (m)	2.25	2.60	
ปริมาตรพื้นที่ปรับอากาศ/ชั้น (m <sup>3</sup> )	18.38	1,996.80	
พื้นที่ผนังต่อชั้น (m <sup>2</sup> )	ผนังทึบ (m <sup>2</sup> )	23.48	140.80
	ช่องเปิด (m <sup>2</sup> )	2.64	192.00
	รวม (m <sup>2</sup> )	26.12	332.80
PCM board /ชั้น (m <sup>2</sup> )	21.98	1,680.00	
PCM board ทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	21.98	11,760.00	
PCM board wall/พื้นที่ปรับอากาศ	2.69	2.19	
PCM board Wall/ ปริมาตร (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	1.20	0.84	

CHULALONGKORN UNIVERSITY



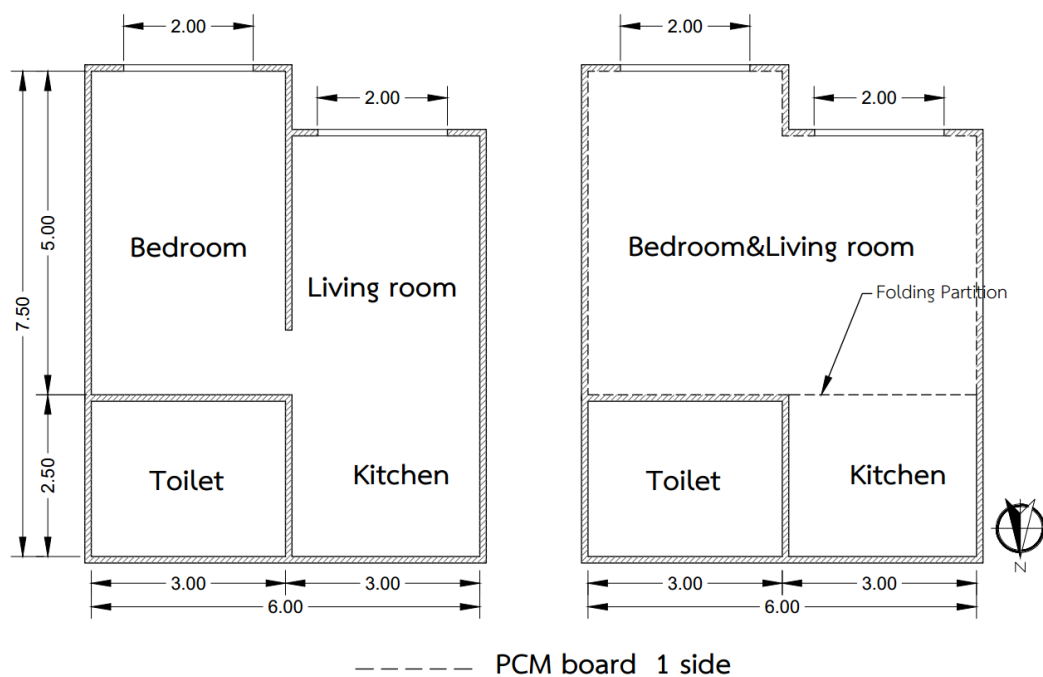
ภาพที่ 25 รูปแบบอาคารสำนักงานที่สร้างในโปรแกรม Visual DOE 4

ตารางที่ 5 รายละเอียดการก่อสร้างและการใช้งานอาคารสำนักงานอ้างอิงที่ปรับปรุง

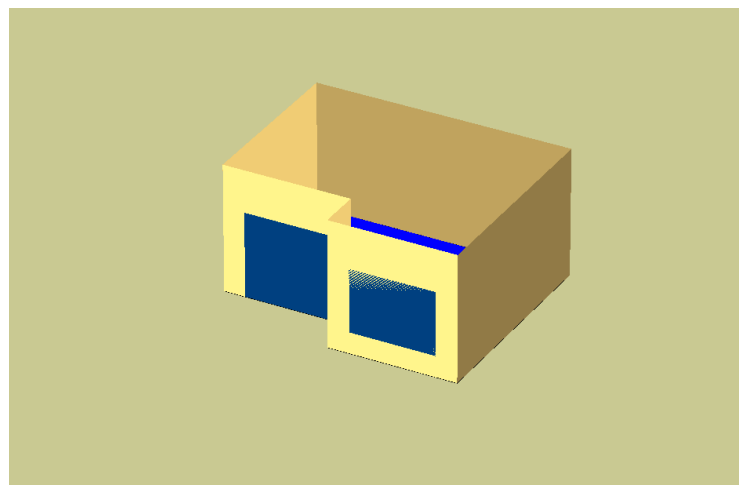
รายการ	อาคารอ้างอิงประเภทสำนักงาน	
	Base case	PCM Board case
ผนัง	แผ่นอลูมิเนียมสำเร็จรูป หน้า 4 mm. ช่องว่างอากาศภายในผนัง หน้า 100 mm. บุฉนวนในแก้ว ความหนาแน่น 24 kg/m <sup>3</sup> หน้า 50 mm. ผนังภายในยิปซัมบอร์ด หน้า 12 mm.	เหมือน Base case แต่ภายในเพิ่มแผ่น PCM 3 mm. ทับด้วยสมาร์ทบอร์ด หน้า 6 mm.
ผนังกันห้อง	ฉนวนกันเสียง หน้า 50 mm. ทับด้วยยิปซัมบอร์ด หน้า 12 mm. ทั้งสองด้าน	เหมือน Base case แต่เพิ่มแผ่น PCM 3 mm. ทับด้วยสมาร์ทบอร์ดหน้า 6 mm. ทั้งสองด้าน
พื้น	คอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 cm.	
หลังคา	หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก 25 cm. ฉนวนใยแก้ว 150 mm. ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด 12 mm.	
กระจก	กระจกใสหนา 6mm.	
วันที่ใช้งาน	วันธรรมดา	
เครื่องปรับอากาศ	Variable air volume	
เวลาใช้งาน	8:00 - 18:00	
เครื่องปรับอากาศ	Variable air volume	
ผู้ใช้อาคาร	7 m <sup>2</sup> /Person	
LPD	10.5 W/m <sup>2</sup>	
EPD	10.5 W/m <sup>2</sup>	
เครื่องปรับอากาศ	Variable air volume	

### 3.4.1 อาคารพักอาศัย

อาคารพักอาศัยทำการจำลองผลในอาคารตัวอย่าง (Reference Building) ซึ่งเป็นอาคารที่เน้นการใช้งานในช่วงกลางวัน โดยเลือกมา 1 ห้องจากอาคารคอนโดมิเนียมต้นแบบ อ้างอิงจากงานวิจัยของอภิญา บุญมา (2555) ซึ่งสำรวจอาคารคอนโดมิเนียมในกทม. จำนวน 13 อาคาร และสำรวจข้อมูลผู้พักอาศัย จำนวน 381 คน ทำให้ได้ข้อมูลอาคารคอนโดมิเนียมต้นแบบ ดังภาพที่ 26 และนำมาปรับเพื่อให้เป็นห้องแบบสตูดิโอ เพื่อให้การให้เวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารอ้างอิงใกล้เคียงกับการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง



ภาพที่ 26 อาคารพักอาศัยอ้างอิง (ซ้าย) อาคารอ้างอิงที่ปรับปรุงแล้ว (ขวา)



ภาพที่ 27 รูปแบบอาคารพักอาศัยที่สร้างในโปรแกรม Visual DOE 4

ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดสถาปัตยกรรมอาคารพักอาศัยอ้างอิงที่ปรับปรุง

รายการ	ห้องทดลอง	อาคารพักอาศัยในการจำลอง
ขนาดอาคาร (m)	3 x 3	5 x 6
พื้นที่ต่อชั้น (m <sup>2</sup> )	9.00	27.00
จำนวนชั้น	1	1
พื้นที่อาคารทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	8.17	27.00
พื้นที่ปรับอากาศ/ชั้น (m <sup>2</sup> )	8.17	27.00
พื้นที่ปรับอากาศทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	8.17	27.00
ระยะพื้นถึงพื้น (m)	2.40	3.00
ระยะพื้นถึงฝ้า (m)	2.25	2.50
ปริมาตรพื้นที่ปรับอากาศ/ชั้น (m <sup>3</sup> )	18.38	67.50
พื้นที่ผนังต่อชั้น (m <sup>2</sup> )	ผนังทึบ (m <sup>2</sup> )	48.00
	ช่องเปิด (m <sup>2</sup> )	7.00
	รวม (m <sup>2</sup> )	55.00
PCM board /ชั้น (m <sup>2</sup> )	21.98	48.00
PCM board ทั้งหมด (m <sup>2</sup> )	21.98	48.00
PCM board wall/พื้นที่ปรับอากาศ	2.69	1.78
PCM board Wall/ ปริมาตร (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	1.20	0.71

ตารางที่ 7 แสดงรายละเอียดการก่อสร้างและการใช้งานอาคารพักอาศัยอ้างอิงที่ปรับปรุง

รายการ	อาคารอ้างอิงอาคารพักอาศัยรวม	
	Base case	PCM Board case
ผนัง	ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป ฉาบปูนเรียบ หนา 10 ซม.	เหมือน Base case แต่ภายในเพิ่มแผ่น PCM 3 mm. ทับด้วยสมาร์ทบอร์ดหนา 6 mm.
พื้น	คอนกรีตเสริมเหล็กหนา 25 cm.	

กระจก	กระจกใสหนา 6mm.
วันที่ใช้งาน เครื่องปรับอากาศ	วันธรรมดา / วันหยุด
เวลาใช้งาน เครื่องปรับอากาศ	วันธรรมดา 19:00 - 6:00 / วันหยุด 18:00 - 7:00
ผู้ใช้อาคาร	2 คน
LPD	7.5 W/m <sup>2</sup>
EPD	8.6 W/m <sup>2</sup>
ระบบปรับอากาศ	Split type

### 3.5 การประเมินผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ผนังที่ติด PCM board กับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยในประเทศไทย โดยเปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานในการปรับอากาศจากห้องทดลอง และจากการจำลองผล

3.5.2 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรักษาสภาพหน้าสabayหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ ด้วยข้อมูลที่ได้จากห้องทดลอง เปรียบเทียบกับสภาวะหน้าสabayอ้างอิง

3.5.3 ประเมินความคุ้มค่าเบื้องต้นด้วยข้อมูลการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศทั้งปีที่ได้จากการจำลองผล

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ผลการวิจัยประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นผนังภายในอาคาร ในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) กับห้องทดลองขนาดจริงที่ใช้งานเป็น 2 ประเภทคือ อาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย เพื่อให้ทราบว่าแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase change material Board : PCM board) มีประสิทธิภาพจริงจากการใช้วัสดุจริง และส่วนที่สองเป็นการจำลองเพื่อหาประสิทธิภาพด้านพลังงานของการใช้ PCM board ตลอดทั้งปีกับอาคารอ้างอิง 2 ประเภทการใช้งานเช่นกัน คือ อาคารสำนักงาน และอาคารพักอาศัย โดยมีผลการเก็บข้อมูลและผลการจำลอง ดังนี้

### 4.1 ผลการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง

การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองเป็นการเก็บข้อมูลในช่วงเดือน เมษายน ปี พ.ศ. 2560 เป็นช่วงที่มีอุณหภูมิอากาศค่อนข้างสูง สลับกับมีฟ้าครึ้ม และฝนตกเป็นในบางช่วงของวัน ข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลประกอบด้วย

- ค่าการใช้พลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองแต่ละกรณี มีหน่วยเป็นวัตต์-ชั่วโมง (Wh) เก็บจากมิเตอร์แยก
- อุณหภูมิภายนอก มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส:  $T_o$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- อุณหภูมิภายในห้องทดลอง มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส:  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- อุณหภูมิ Globe Temperature:  $T_g$  ( $^{\circ}\text{C}$ )
- อุณหภูมิผิวภายในห้องทดลอง:  $T_s$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

จากชุดข้อมูลที่ได้จากห้องทดลองข้างต้นทำให้สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของ PCM board แยกเป็น 2 ประเด็น คือ ประสิทธิภาพด้านพลังงาน และประสิทธิภาพด้านการรักษาสภาวะน่าสบายของห้องทดลองหลังการปิดเครื่องปรับอากาศ

#### 4.1.1 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

การหาประสิทธิภาพด้านพลังงานของ PCM board จากห้องทดลองทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานในการปรับอากาศ (Wh) ของห้องทดลอง Base case และห้องทดลองที่ติดตั้ง PCM board โดยแบ่งประเภทห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย

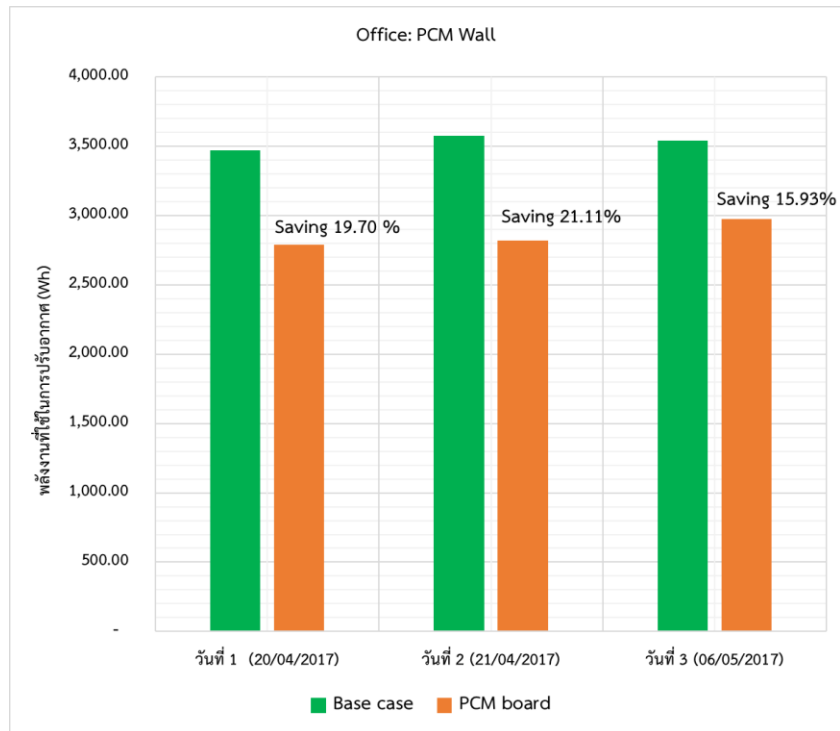
##### 4.1.1.1 ห้องทดลองอาคารสำนักงาน

จากการเก็บข้อมูลค่าการใช้พลังงานการปรับอากาศของห้องทดลองประเภทอาคารสำนักงาน โดยเปิดเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C เวลา 8:00 – 18:00 ตลอดช่วงเวลา 3 วัน พบว่าห้องทดลอง Base case ใช้พลังงานในแต่ละวันประมาณ 3,400 – 3,600 Wh ห้องทดลอง PCM Board case ใช้พลังงานในการปรับอากาศประมาณ 2,700 – 3,000 Wh เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ห้องทดลองพบว่า ห้อง PCM Board มีค่าการประหยัดพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับห้องทดลอง Base case คือ 21.11% และต่ำที่สุด 15.93% โดยเฉลี่ยทั้ง 3 วันจะประหยัดพลังงานในการปรับอากาศอยู่ที่ 18.91% แสดงไว้ใน ตารางที่ 8 และ แผนภูมิที่ 6

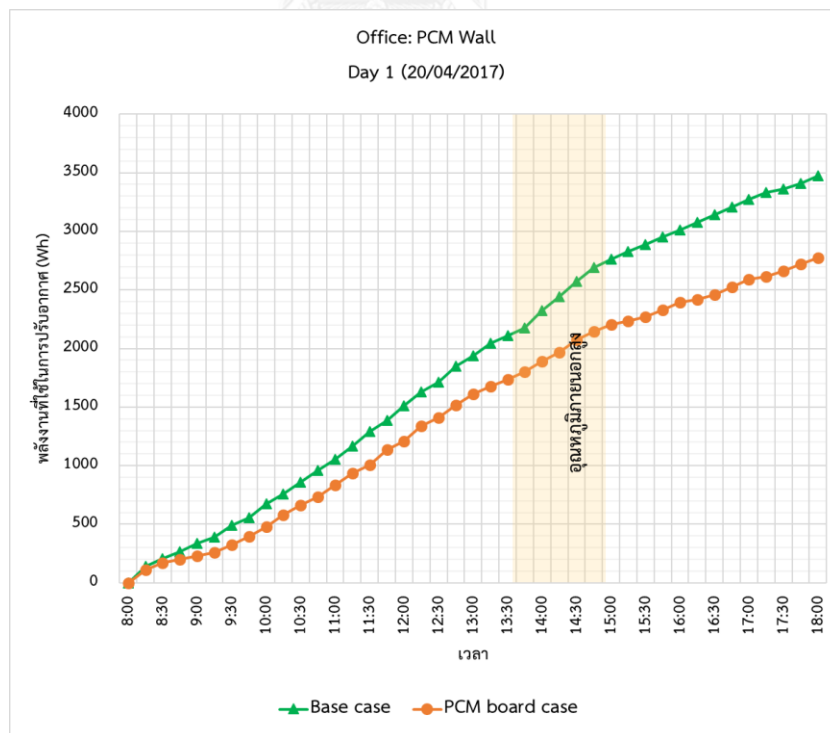
ตารางที่ 8 ผลการวัดค่าการใช้พลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน

วันที่	พลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศ (Wh)		Saving (%)		
	Base case (Wh)	PCM board(Wh)	Saving (Wh)	Saving (%)	Average (%)
วันที่ 1 (20/04/2017)	3,472.00	2,788.00	684.00	19.70%	<b>18.91%</b>
วันที่ 2 (21/04/2017)	3,576.00	2,821.00	755.00	21.11%	
วันที่ 3 (06/05/2017)	3,541.00	2,977.00	564.00	15.93%	

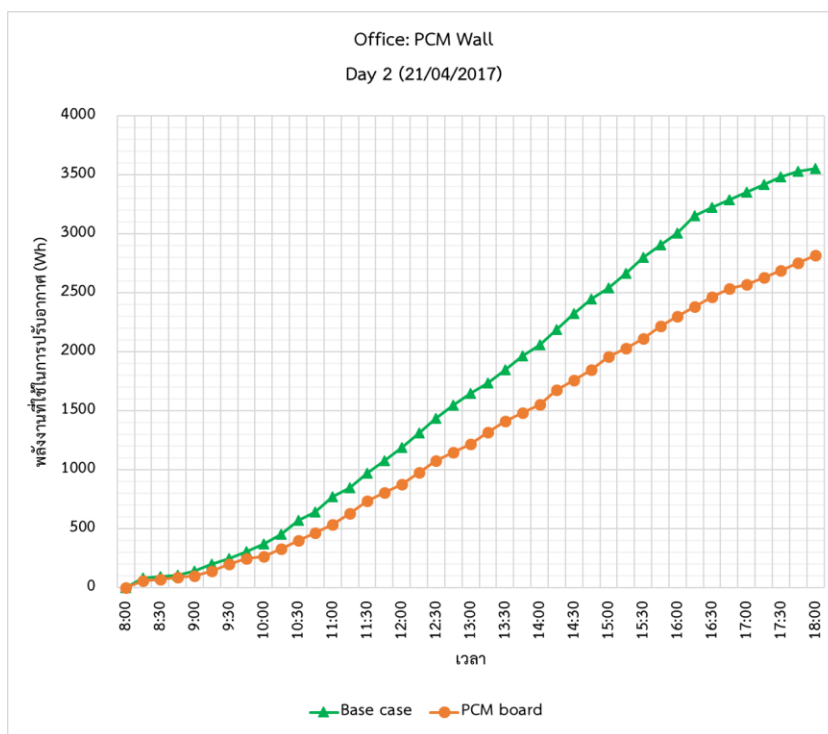




แผนภูมิที่ 6 การประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงานทั้ง 3 วันของการเก็บข้อมูล



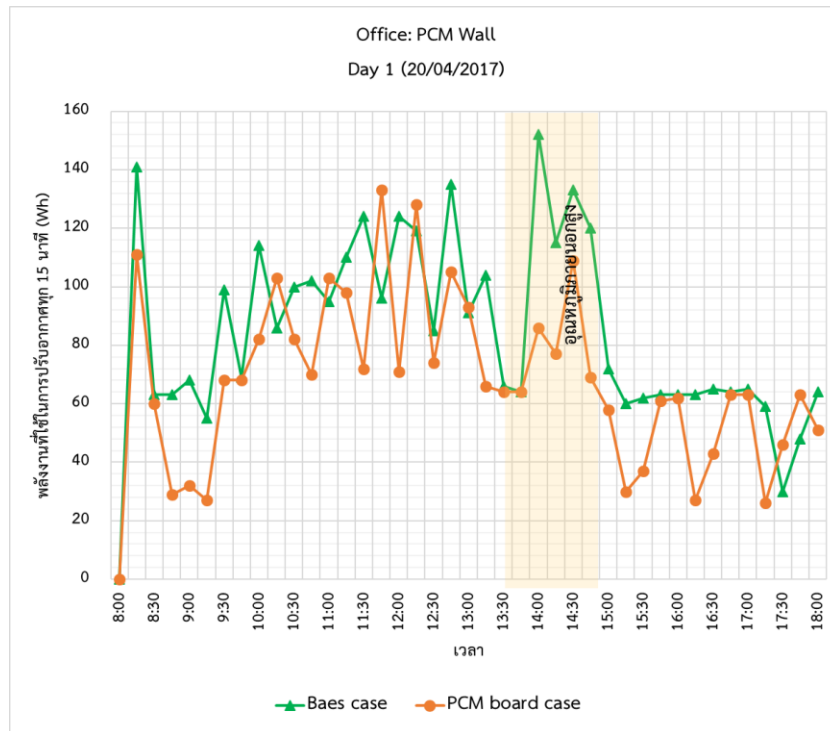
แผนภูมิที่ 7 การใช้พลังงานของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 1 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน



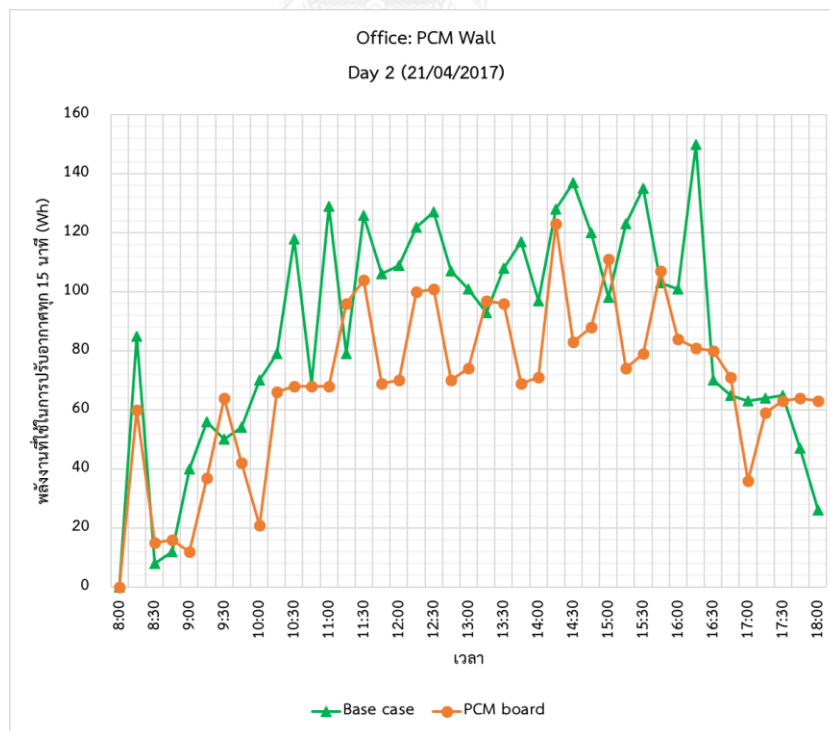
แผนภูมิที่ 8 การใช้พลังงานของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 2 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน

จากแผนภูมิที่ 7 และ แผนภูมิที่ 8 เป็นการแสดงค่าการใช้พลังงานสะสมของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงาน ตลอดช่วงเวลากการปรับอากาศ ซึ่งเป็นการปรับอากาศในช่วงกลางวันเวลา 8:00 – 18:00 น. จะเห็นว่าการใช้พลังงานของห้องทดลอง Base case จะมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเร็วมากกว่าห้องที่ติดตั้ง PCM board ซึ่งความต่างของการใช้พลังงานสะสมจะแตกต่างกันมากขึ้นเรื่อย ๆ แปรผันตามเวลา โดยมีจุดที่น่าสังเกต คือ ในช่วงที่อุณหภูมิอากาศมีอุณหภูมิสูงมาก การใช้พลังงานของห้องทดลอง Base case จะเพิ่มขึ้นอย่างมากเห็นได้ชัดจากการเก็บข้อมูลในวันที่ 1 (แผนภูมิที่ 7) ช่วงเวลาประมาณ 13:00 – 15:00 น. ที่ความชันของกราฟสูงมากกว่าในช่วงเช้า

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายนอกห้องทดลองในช่วงกลางวันทำให้เกิดความแตกต่าง ในการใช้พลังงานของห้องทดลองทั้ง 2 ห้อง จากแผนภูมิที่ 9 แสดงการใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาทีจะเห็นความแตกต่างของการใช้พลังงานอย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงเวลาประมาณ 13:00 – 15:00 น.



แผนภูมิที่ 9 การใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารสำนักงานใน  
วันที่ 1



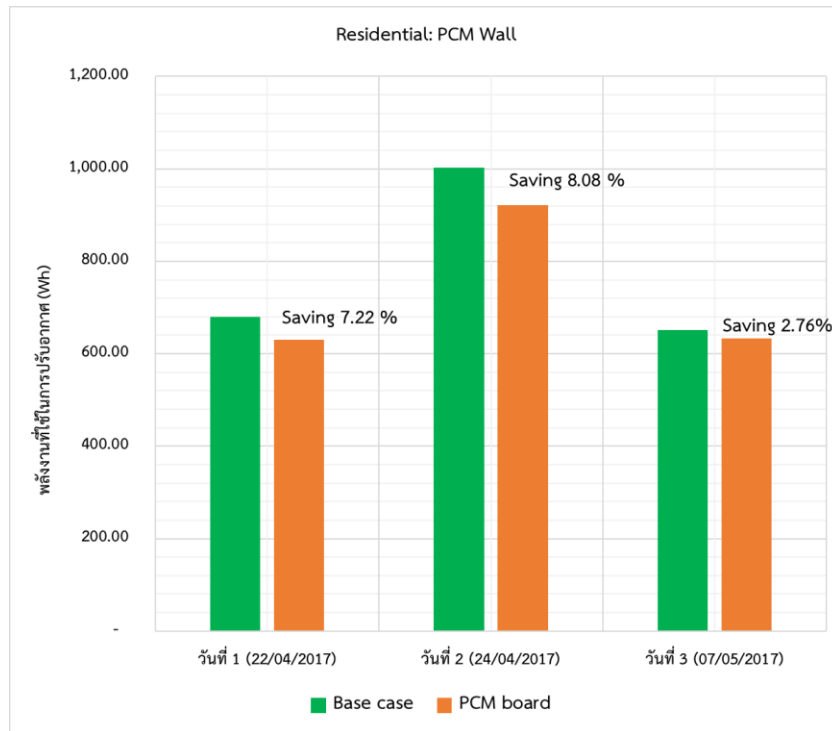
แผนภูมิที่ 10 การใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารสำนักงานใน  
วันที่ 2

#### 4.1.1.2 ห้องทดลองอาคารพักอาศัย

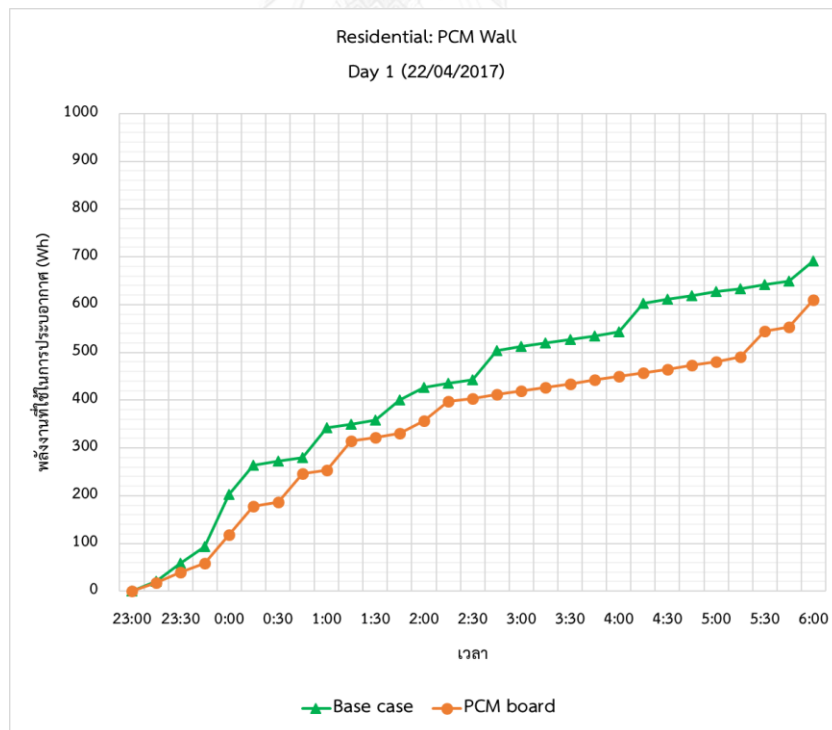
จากการเก็บข้อมูลค่าการใช้พลังงานการปรับอากาศของห้องทดลองประเภทอาคารพักอาศัย โดยเปิดเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C เวลา 23:00 – 06:00 ตลอดช่วงเวลา 3 วัน พบว่าห้องทดลอง Base case ใช้พลังงานในแต่ละวันประมาณ 650 – 1000 Wh ห้องทดลอง PCM Board ใช้พลังงานในการปรับอากาศประมาณ 630 – 920 Wh เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง 2 ห้องทดลองพบว่า ห้อง PCM Board มีค่าการประหยัดพลังงานมากที่สุดเมื่อเทียบกับห้องทดลอง Base case คือ 8.08% และต่ำที่สุด 2.76% โดยเฉลี่ยทั้ง 3 วันจะประหยัดพลังงานในการปรับอากาศอยู่ที่ 6.02% แสดงไว้ในตารางที่ 9 และ แผนภูมิที่ 11 การประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงานทั้ง 3 วันของการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 9 ผลการวัดการใช้พลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารพักอาศัย

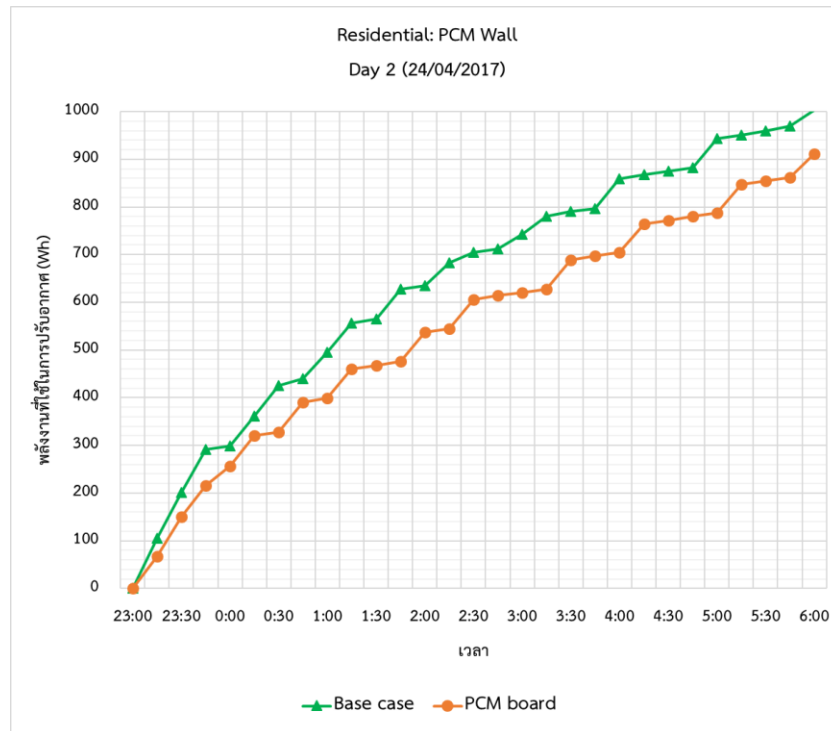
วันที่	พลังงานที่ใช้ในการปรับอากาศ (Wh)		Saving (%)		
	Base case (Wh)	PCM board(Wh)	Saving (Wh)	Saving (%)	Average (%)
วันที่ 1 (22/04/2017)	679.00	630.00	49.00	7.22%	<b>6.02%</b>
วันที่ 2 (24/04/2017)	1,003.00	922.00	81.00	8.08%	
วันที่ 3 (07/05/2017)	651.00	633.00	18.00	2.76%	



แผนภูมิที่ 11 การประหยัดพลังงานในการปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้เป็นอาคารสำนักงานทั้ง 3 วันของการเก็บข้อมูล



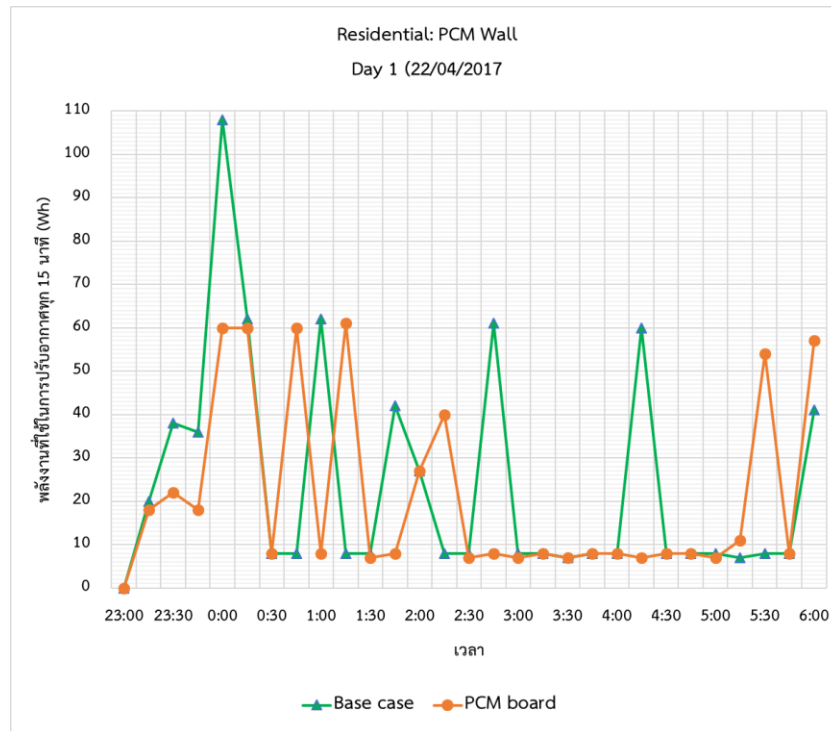
แผนภูมิที่ 12 การใช้พลังงานในการปรับอากาศของจากการเก็บข้อมูลวันที่ 1 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารพักอาศัย



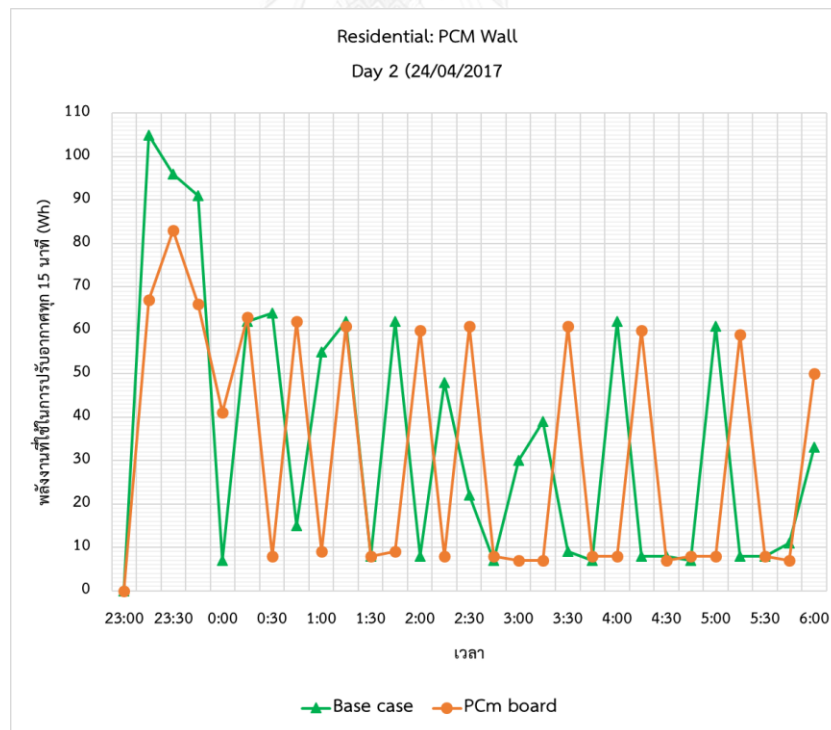
แผนภูมิที่ 13 การใช้พลังงานในการปรับอากาศของจากการเก็บข้อมูล วันที่ 2 ของห้องทดลองทั้ง 2 ห้องเมื่อใช้เป็นอาคารพักอาศัย

จากแผนภูมิที่ 12 และ แผนภูมิที่ 13 ห้องทดลองประเภทอาคารพักอาศัย ซึ่งเป็นการใช้งานเครื่องปรับอากาศช่วงกลางคืนเป็นหลัก พบว่า อัตราการใช้พลังงานในการปรับอากาศของ Base case และ PCM Board case แตกต่างกันน้อยกว่าห้องทดลองประเภทอาคารสำนักงาน เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นและเข้ามาในห้องมีปริมาณน้อยกว่าในช่วงกลางวัน ทำให้พลังงานในการปรับอากาศน้อย ส่งผลให้รอบการทำงานของเครื่องปรับอากาศลดลงทั้ง 2 กรณี

วันที่ 1 และวันที่ 2 มีความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกค่อนข้างชัดเจนวันที่ 1 มีอุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 25.70 °C ขณะที่ในวันที่มีอุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย 27.08 °C ส่งผลให้มีอัตราการใช้พลังงานในการปรับอากาศมากกว่าวันที่ 1 ค่อนข้างมาก เมื่อดูการใช้พลังงานในการปรับอากาศสะสมในทุก 15 นาทีจะพบว่าวันที่ 1 ช่วงเวลาประมาณ 3:00 – 5:00 น. ห้องทดลอง PCM board มีการใช้พลังงานค่อนข้างน้อยเนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำกว่าในห้องทดลองมาก (แผนภูมิที่ 14 และ แผนภูมิที่ 15)



แผนภูมิที่ 14 แผนภูมิแสดงการใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารพักอาศัยในวันที่ 1



แผนภูมิที่ 15 แผนภูมิแสดงการใช้พลังงานในการปรับอากาศในทุก ๆ 15 นาที ของห้องทดลองอาคารพักอาศัยในวันที่ 2

#### 4.1.2 ประสิทธิภาพด้านการรักษาภาวะน่าสบาย

จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิด้วยเครื่อง 12 channel data logger ที่ความถี่ทุก 5 นาที เพื่อทราบแนวโน้มอุณหภูมิภายในห้องที่เปลี่ยนไปหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ นำไปสู่การวิเคราะห์เปรียบเทียบความน่าสบาย โดยการวิเคราะห์ช่วงเวลาในห้องทดลองทั้งสองประเภทสามารถรักษาไว้ได้ อ้างอิงจากงานวิจัยของ (Busch Jr, 1990) ที่เก็บข้อมูลผู้ใช้อาคารสำนักงานในกรุงเทพมหานคร กว่า 1100 คน อากาศ พบว่า กลุ่มตัวอย่างคาดหวังสภาวะน่าสบายไม่เกิน 24.5 °C ในห้องปรับอากาศ และกลุ่มตัวอย่างคาดหวังสภาวะน่าสบายไม่เกิน 28.5 °C ในห้องที่ไม่ปรับอากาศ ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ ดังนี้

##### 4.1.2.1 ห้องทดลองอาคารสำนักงาน

จากการเก็บข้อมูลห้องทดลองอาคารสำนักงานในช่วงเวลาหลังปิดเครื่องปรับอากาศ 18:00 – 23:00 พบว่า ห้องทดลอง Base case มีอุณหภูมิเฉลี่ยวันที่ 1 และวันที่ 2 29.84 °C และ 30.11 °C ตามลำดับ ในห้องทดลองที่ติดตั้ง PCM board มีอุณหภูมิภายในเฉลี่ยวันที่ 1 และวันที่ 2 28.00 °C และ 28.41 °C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าห้องทดลอง Base case นอกจากอุณหภูมิภายในห้องแล้วห้องทดลอง PCM board ยังมีประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิดีกว่าห้องทดลอง Base case ชัดเจน ทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยการแผ่รังสีโดยรอบ (MRT) และอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิว สามารถสรุปข้อมูลได้ ดังนี้ (ตารางที่ 10)

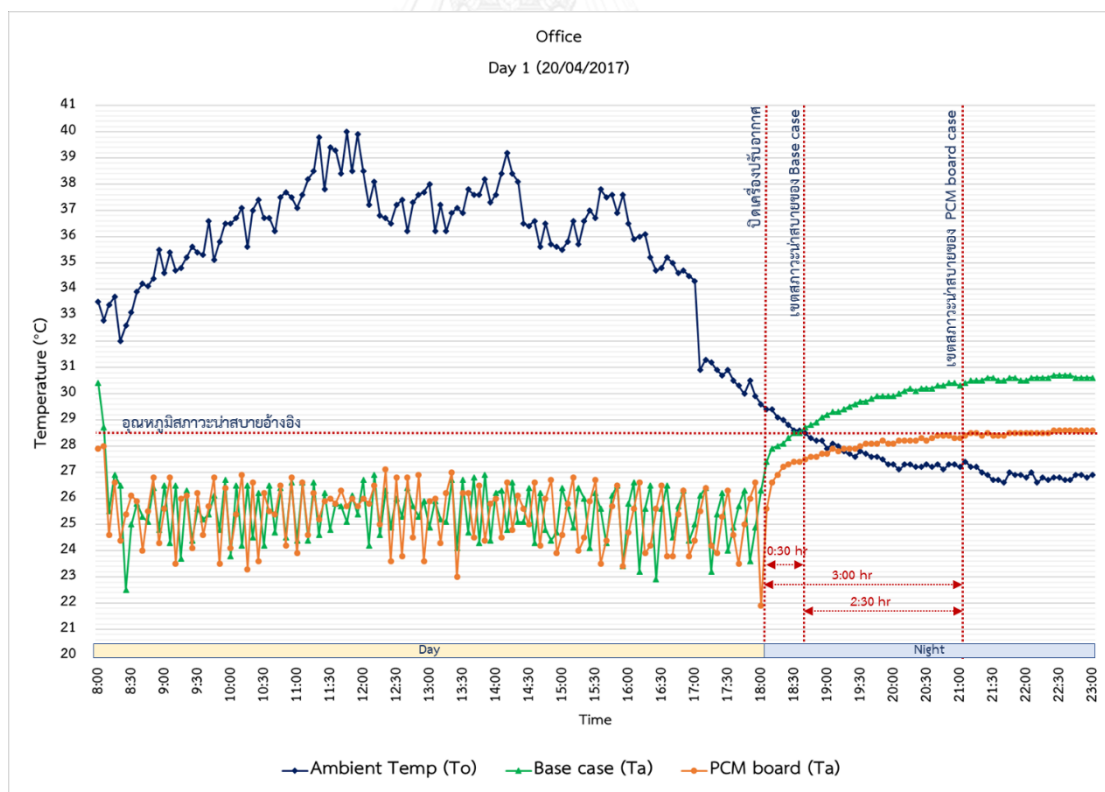
ตารางที่ 10 ผลการวัดข้อมูลอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงหลังปิดเครื่องปรับอากาศของห้องทดลอง Base case และ PCM board case เมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน

อุณหภูมิ		Base case		PCM board case	
		วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2
อุณหภูมิภายนอก ( $T_o$ )	ต่ำสุด (°C)	26.60	27.50	26.60	27.50
	สูงสุด (°C)	29.60	30.30	29.60	30.30
	เฉลี่ย (°C)	27.50	28.53	27.50	28.53
อุณหภูมิห้อง ( $T_a$ )	ต่ำสุด (°C)	26.30	26.00	21.90	22.80
	สูงสุด (°C)	30.70	31.20	28.60	29.10

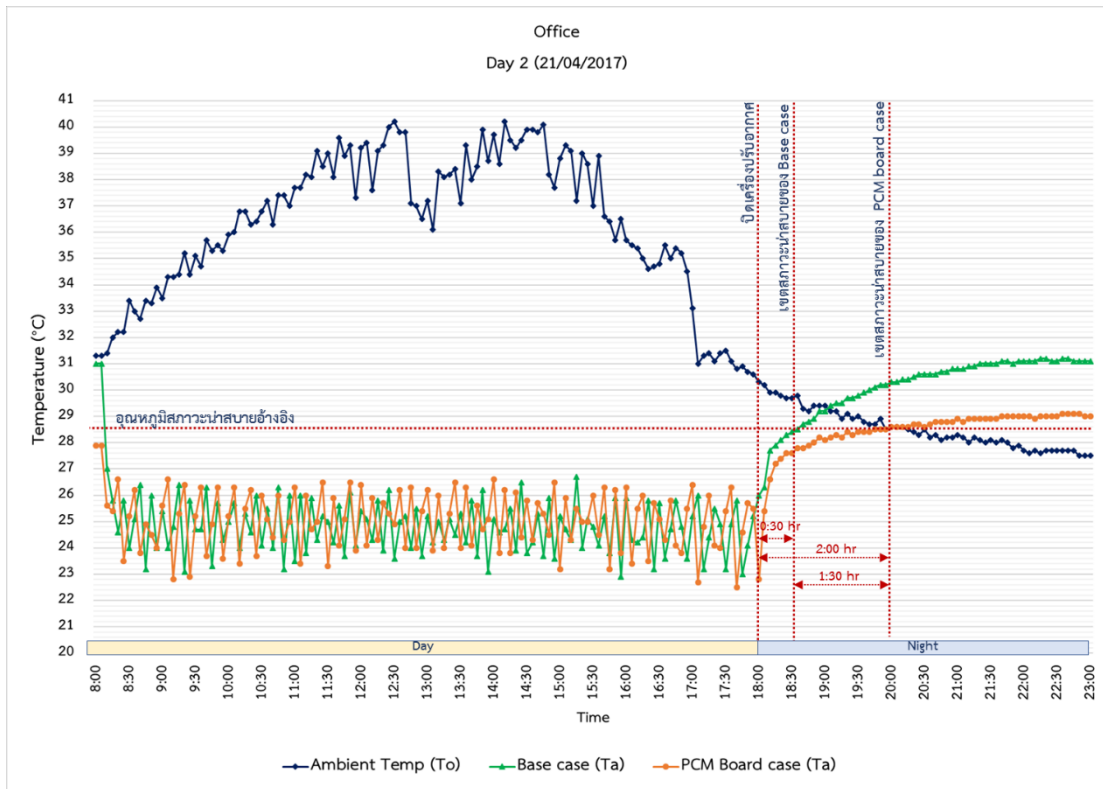


	เฉลี่ย (°C)	29.84	30.11	28.00	28.41
Mean radiant temperature (MRT)	ต่ำสุด (°C)	25.76	26.30	25.67	24.15
	สูงสุด (°C)	30.70	31.20	29.04	28.36
	เฉลี่ย (°C)	29.80	30.03	28.49	27.79
อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิว (Ts)	ต่ำสุด (°C)	26.17	26.00	26.27	26.47
	สูงสุด (°C)	29.87	30.43	28.07	28.37
	เฉลี่ย (°C)	28.93	29.21	27.47	27.73

ห้องทดลองประเภทอาคารสำนักงานมีการเปิดเครื่องปรับอากาศเวลา 8.00 – 18.00 น. จากแผนภูมิที่ 16 พบว่าในช่วงที่มีการปรับอากาศทั้งห้องทดลอง Base case และ PCM Board case จะมีอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 23.5 – 26.5 °C โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25.20 °C ซึ่งใกล้เคียงในเขตน่าสบาย โดยอุณหภูมิอ้างอิงสภาวะน่าสบายในห้องที่มีการปรับอากาศ คือ 24.50 °C ตามงานวิจัยของ (Busch Jr, 1990)



แผนภูมิที่ 16 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารสำนักงานวันที่ 1

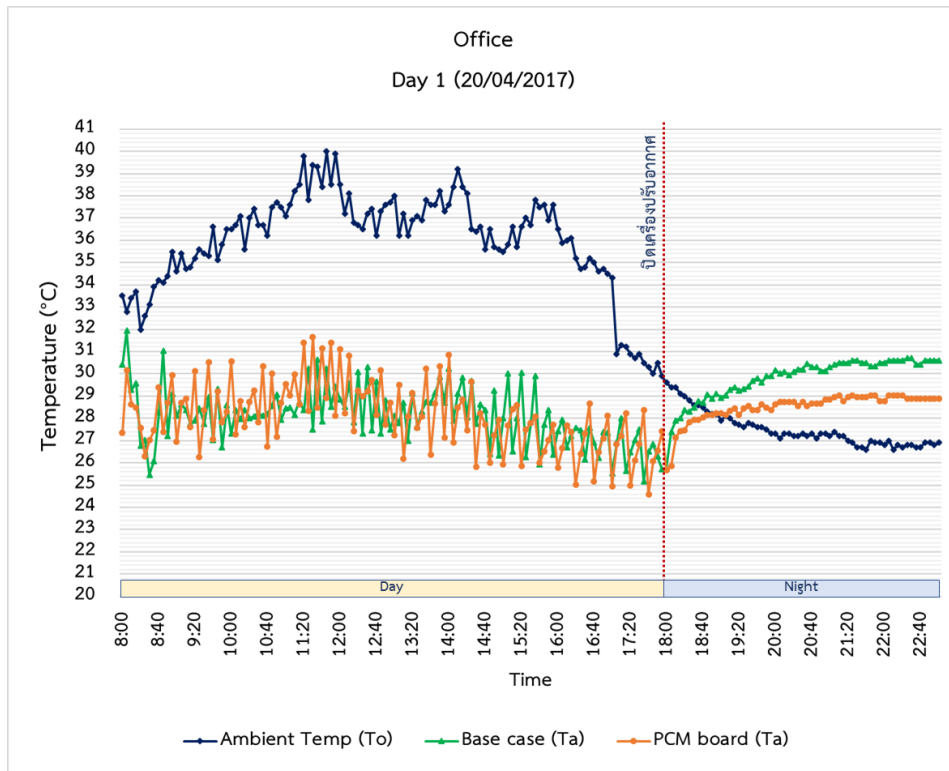


แผนภูมิที่ 17 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารสำนักงานวันที่ 2

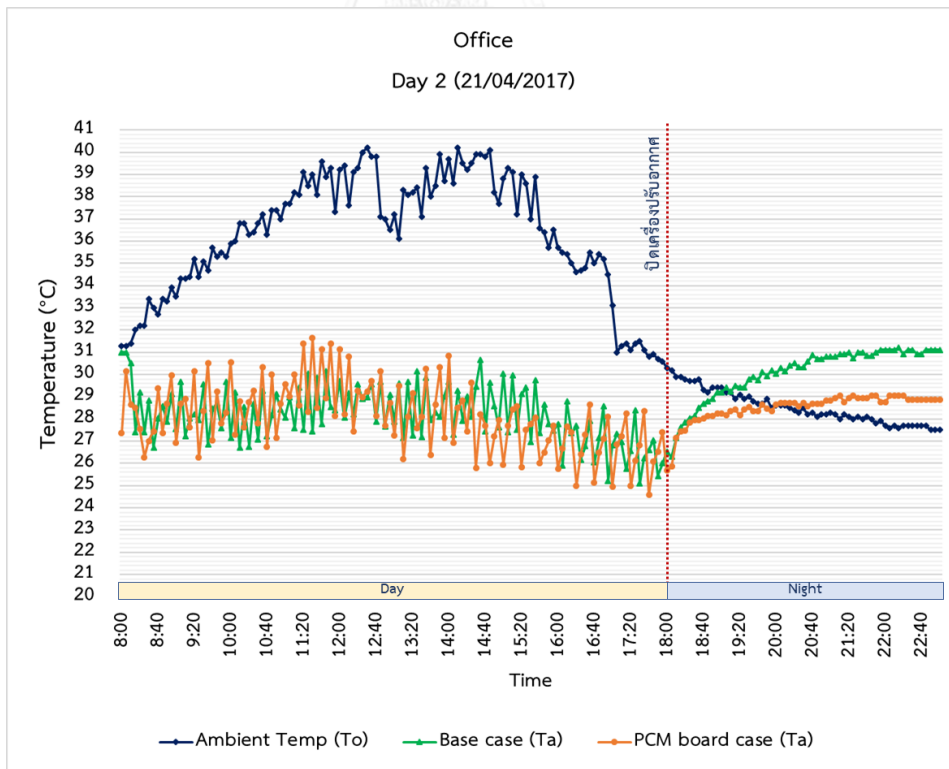
ในการเก็บข้อมูลวันที่ 1 หลังปิดเครื่องปรับอากาศอุณหภูมิอ้างอิงสถานะนำสลายอยู่ที่ไม่เกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  จากแผนภูมิที่ 16 ห้องทดลอง Base case อุณหภูมิเกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาเพียงประมาณ 0:30 ชั่วโมง ขณะที่ห้องทดลองที่ติดตั้ง PCM Board สามารถรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกินสถานะนำสลายไปอีกถึง 3:00 ชั่วโมง มากกว่าห้องทดลอง Base case ถึง 2:30 ชั่วโมง

ในการเก็บข้อมูลวันที่ 2 จากแผนภูมิที่ 17 ห้องทดลอง Base case อุณหภูมิเกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาประมาณ 0:30 ชั่วโมง ขณะที่ห้องทดลอง PCM Board case สามารถรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกินสถานะนำสลายไปอีกถึง 2:00 ชั่วโมง มากกว่าห้องทดลอง Base case ถึง 1:30 ชั่วโมง

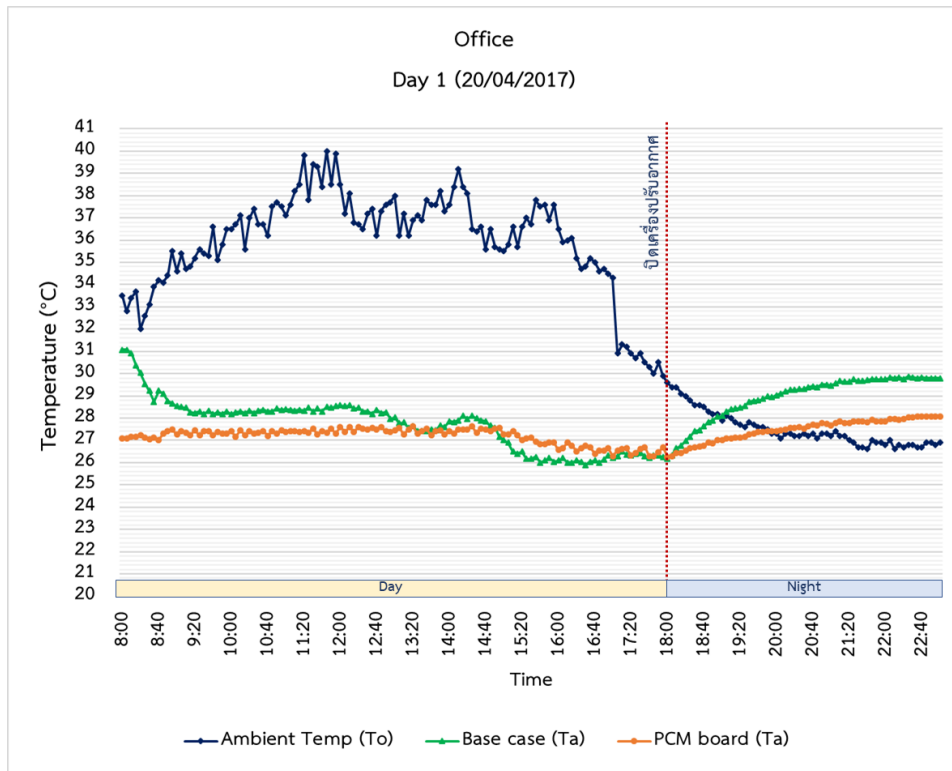
นอกจากประสิทธิภาพของการรักษาอุณหภูมิภายในห้องที่แล้ว PCM board ยังมีประสิทธิภาพที่ด้านอุณหภูมิอื่น ๆ อีกที่แปรผันตามอุณหภูมิห้อง จากที่ได้เก็บข้อมูลมาคือ MRT และอุณหภูมิผิวภายในห้องทดลอง (แผนภูมิที่ 18 - แผนภูมิที่ 21) ห้องที่ติดตั้ง PCM board ก็ยังสามารถรักษาอุณหภูมินี้ให้ไม่สูงรวดเร็วเกินไปหลังปิดเครื่องปรับอากาศ ซึ่งนั่นคือความสามารถในการหน่วงความร้อนภายในอาคารที่เกิดจากหลอดไฟ และความร้อนจากบรรยากาศภายนอกที่เข้ามาทางเปลือกอาคาร ความสามารถในการหน่วงความร้อนนี้เป็นข้อดีกับอาคารสำนักงานโดยตรง คือ สามารถใช้งานห้องต่อเนื่องไปได้ยาวนานมากขึ้นหลังปิดระบบปรับอากาศ



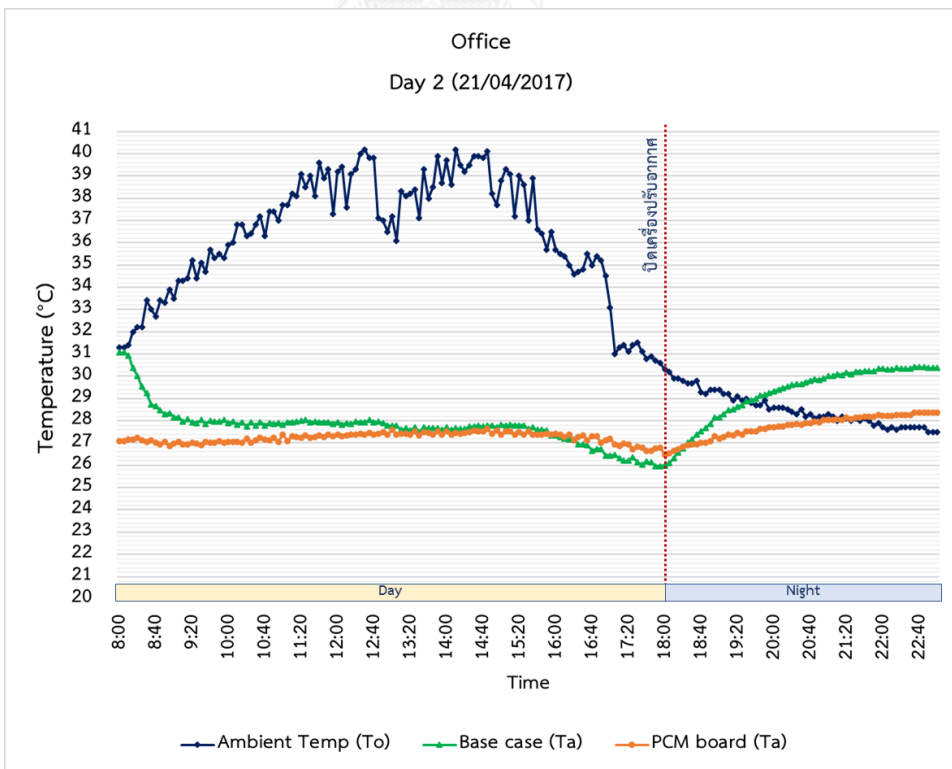
แผนภูมิที่ 18 ค่า MRT สำนักงานวันที่ 1



แผนภูมิที่ 19 ค่า MRT สำนักงานวันที่ 2



แผนภูมิที่ 20 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 1



แผนภูมิที่ 21 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 2

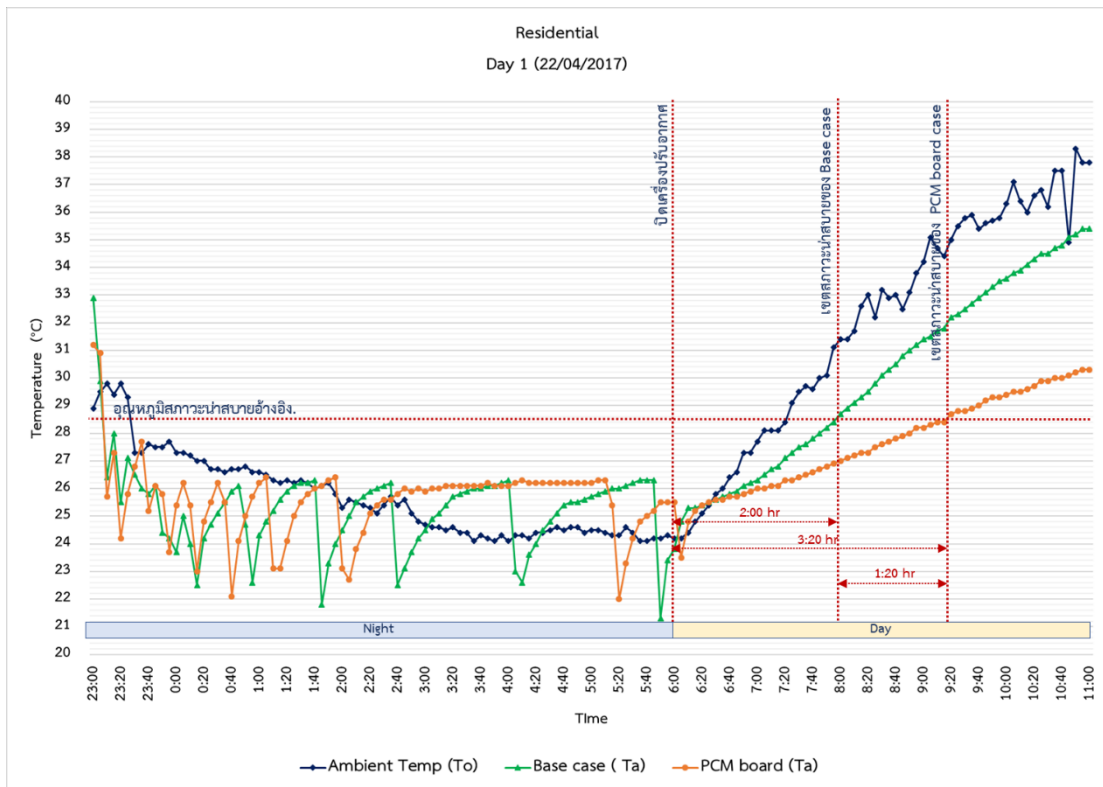
#### 4.1.2.2 อาคารพักอาศัย

จากการเก็บข้อมูลห้องทดลองประเภทอาคารพักอาศัยในช่วงที่มีการปิดเครื่องปรับอากาศ 06:00 – 11:00 พบว่า ห้องทดลอง Base case มีอุณหภูมิเฉลี่ยวันที่ 1 และวันที่ 2 30.02 °C และ 30.24 °C ตามลำดับ ในห้องทดลองที่ติด PCM board มีอุณหภูมิภายในเฉลี่ยวันที่ 1 และวันที่ 2 27.63 °C และ 28.12 °C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าห้องทดลอง Base case นอกจากนี้ อุณหภูมิห้องแล้วห้องทดลองที่ติด PCM board ยังมีประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิดีกว่าห้องทดลอง Base case ชัดเจน ทั้งอุณหภูมิเฉลี่ยการแผ่รังสีโดยรอบ (MRT) และอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิว สามารถสรุปข้อมูลได้ ดังนี้ (ตารางที่ 11)

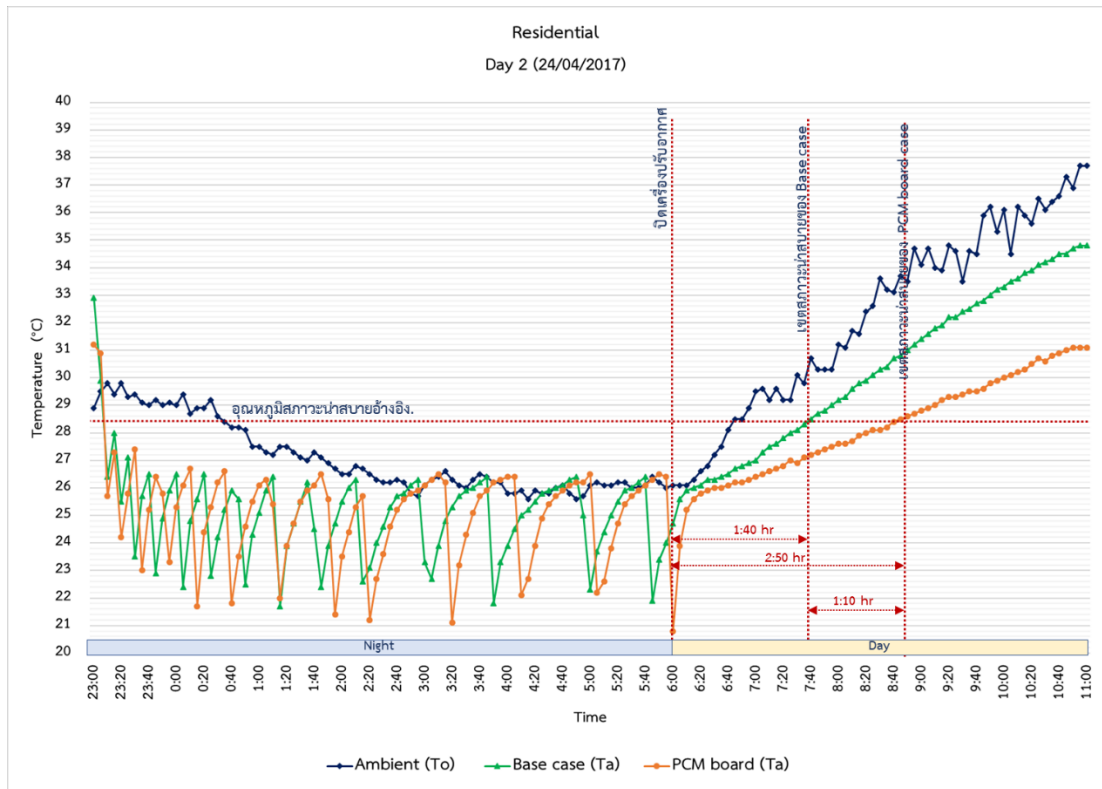
ตารางที่ 11 ผลการวัดข้อมูลอุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงหลังปิดเครื่องปรับอากาศของห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารพักอาศัย

อุณหภูมิ		Base case		PCM board case	
		วันที่ 1	วันที่ 2	วันที่ 1	วันที่ 2
อุณหภูมิภายนอก (To)	ต่ำสุด (°C)	24.20	26.10	24.20	26.10
	สูงสุด (°C)	38.30	37.70	38.30	37.70
	เฉลี่ย (°C)	<b>31.97</b>	<b>32.24</b>	<b>31.97</b>	<b>32.24</b>
อุณหภูมิห้อง (Ta)	ต่ำสุด (°C)	23.80	24.70	23.50	20.80
	สูงสุด (°C)	35.40	34.80	30.30	31.10
	เฉลี่ย (°C)	<b>30.02</b>	<b>30.24</b>	<b>27.63</b>	<b>28.12</b>
Mean radiant temperature (MRT)	ต่ำสุด (°C)	24.61	24.97	24.80	24.17
	สูงสุด (°C)	35.40	34.80	31.11	31.91
	เฉลี่ย (°C)	<b>30.01</b>	<b>30.15</b>	<b>28.17</b>	<b>28.62</b>
อุณหภูมิเฉลี่ย พื้นผิว (Ts)	ต่ำสุด (°C)	24.47	24.73	25.47	25.63
	สูงสุด (°C)	35.00	34.67	28.73	30.30
	เฉลี่ย (°C)	<b>29.73</b>	<b>29.94</b>	<b>26.92</b>	<b>27.67</b>

ห้องทดลองประเภทอาคารพักอาศัยมีการเปิดเครื่องปรับอากาศเวลา 23.00 – 06.00 น. จากแผนภูมิที่ 22 และแผนภูมิที่ 23 จะพบว่าในช่วงที่มีการปรับอากาศทั้งห้องทดลอง Base case และ PCM Board case จะมีอุณหภูมิห้องอยู่ในช่วงประมาณ 22.0 – 26.5 °C โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25.22 °C ซึ่งใกล้เคียงในเขตน่าสบาย โดยอุณหภูมิอ้างอิงสภาวะน่าสบายในห้องที่มีการปรับอากาศที่ 24.50 °C



แผนภูมิที่ 22 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารพักอาศัย วันที่ 1

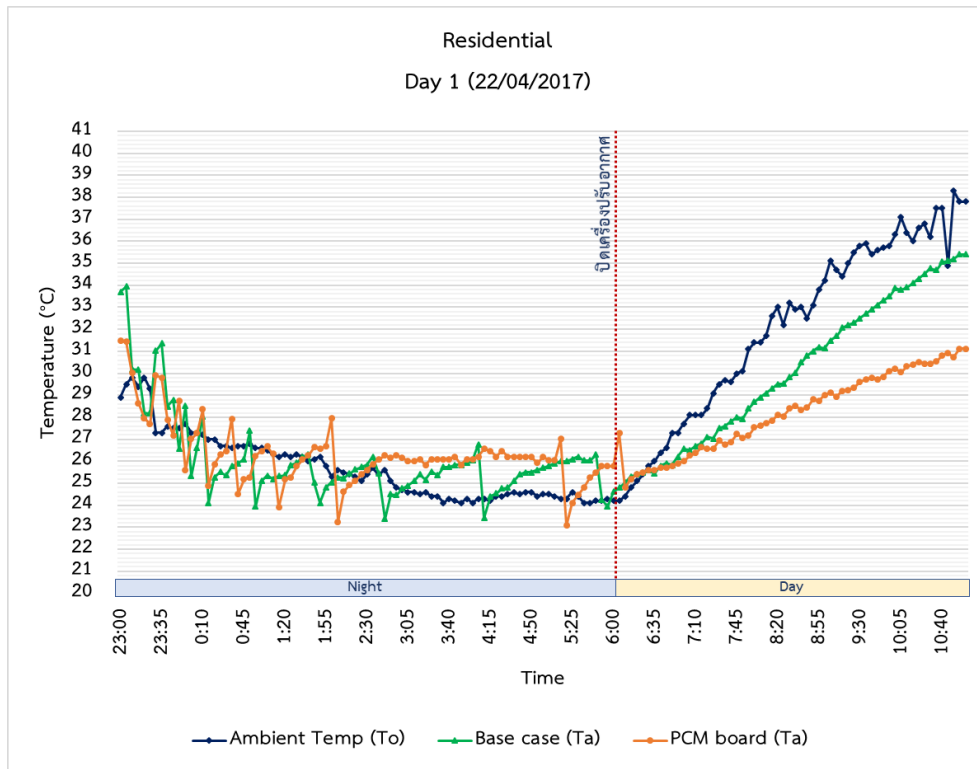


แผนภูมิที่ 23 อุณหภูมิภายในห้องทดลองอาคารพักอาศัย วันที่ 2

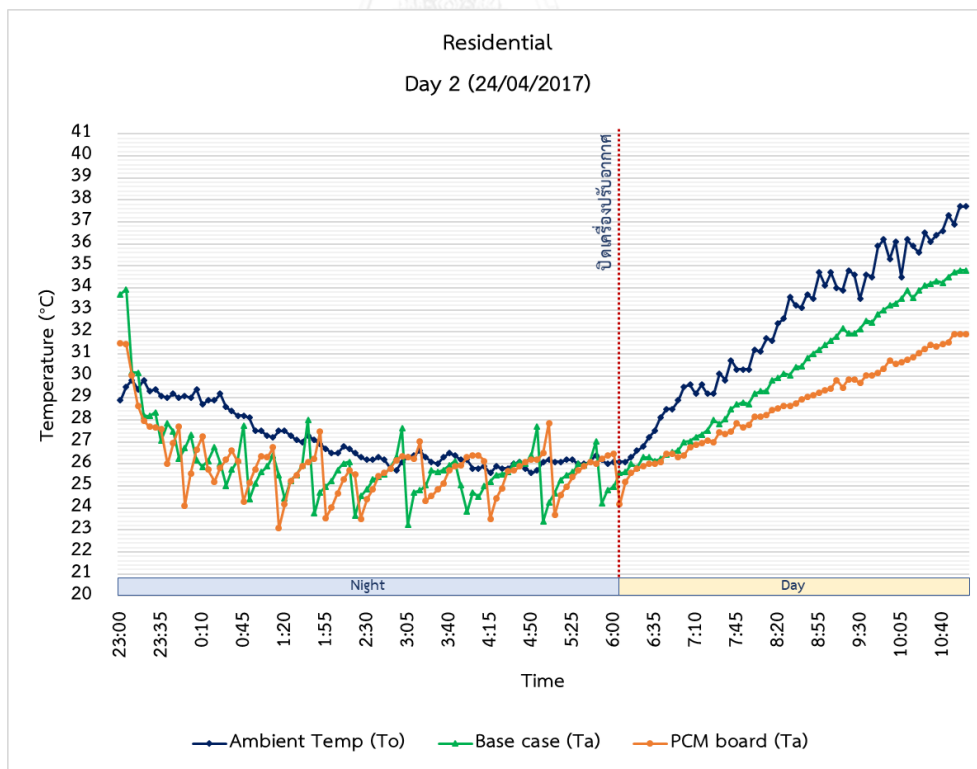
ในการเก็บข้อมูลวันที่ 1 หลังปิดเครื่องปรับอากาศอุณหภูมิอ้างอิงสถานะนำสบายอยู่ที่ไม่เกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  จากแผนภูมิที่ 22 ห้องทดลอง Base case อุณหภูมิเกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาประมาณ 2:00 ชั่วโมง ขณะที่ห้องทดลองที่ติดตั้ง PCM Board สามารถรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกินสถานะนำสบายไปอีกถึง 3:20 ชั่วโมง มากกว่าห้องทดลอง Base case ถึง 1:20

ในการเก็บข้อมูลวันที่ 2 จากแผนภูมิที่ 23 ห้องทดลอง Base case อุณหภูมิเกิน  $28.5^{\circ}\text{C}$  โดยใช้เวลาประมาณ 1:40 ชั่วโมง ขณะที่ห้องทดลอง PCM Board case สามารถรักษาอุณหภูมิให้ไม่เกินสถานะนำสบายไปอีกถึง 2:50 ชั่วโมง มากกว่าห้องทดลอง Base case ถึง 1:10 ชั่วโมง

นอกจากประสิทธิภาพของการรักษาอุณหภูมิภายในห้องที่แล้ว PCM board ยังมีประสิทธิภาพที่ด้านอุณหภูมิอื่น ๆ อีกที่แปรผันตามอุณหภูมิห้อง จากที่ได้เก็บข้อมูลมาคือ MRT และอุณหภูมิผิวภายในห้องทดลอง (แผนภูมิที่ 24 - แผนภูมิที่ 27) ห้องที่ติดตั้ง PCM board ก็ยังสามารถรักษาอุณหภูมินี้ให้ไม่สูงรวดเร็วเกินไปหลังปิดเครื่องปรับอากาศ ซึ่งนั่นคือความสามารถในการหน่วงความร้อนภายในอาคารที่เกิดจากหลอดไฟ และความร้อนจากบรรยากาศภายนอกที่เข้ามาทางเปลือกอาคาร ความสามารถในการหน่วงความร้อนนี้เป็นข้อดีกับอาคารพักอาศัย คือ สามารถใช้งานห้องต่อเนื่องไปได้นานมากขึ้น และสามารถนำไปใช้ตั้งเวลาปิดเครื่องปรับอากาศได้เร็วมากขึ้น

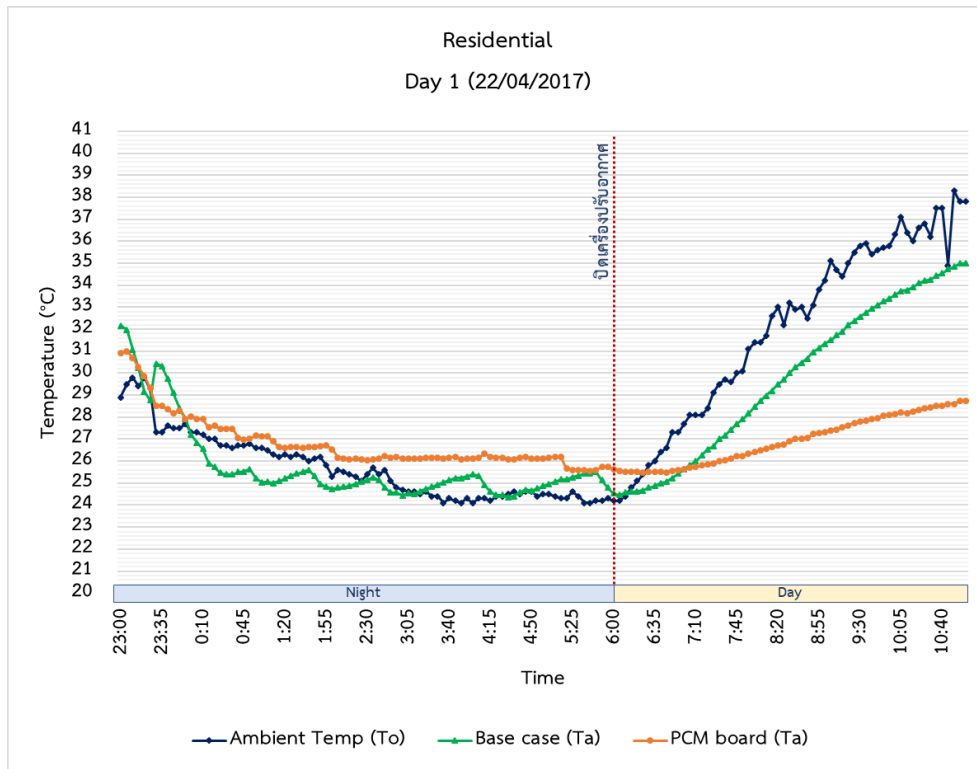


แผนภูมิที่ 24 MRT อาคารพักอาศัยวันที่ 1

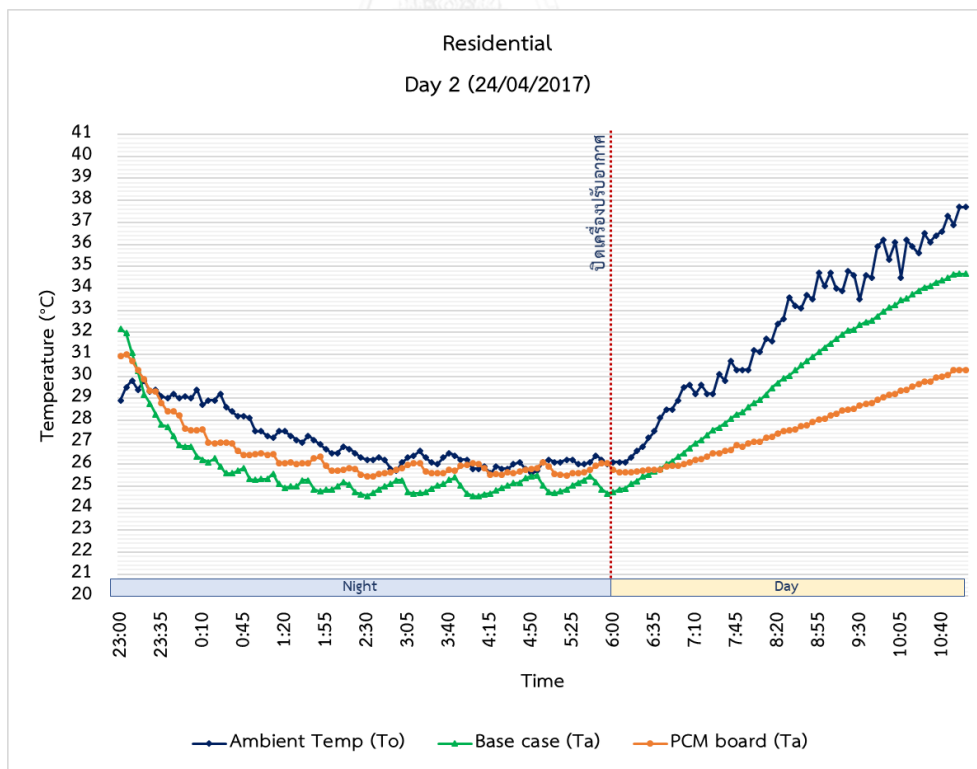


แผนภูมิที่ 25 MRT อาคารพักอาศัยวันที่ 2





แผนภูมิที่ 26 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 1

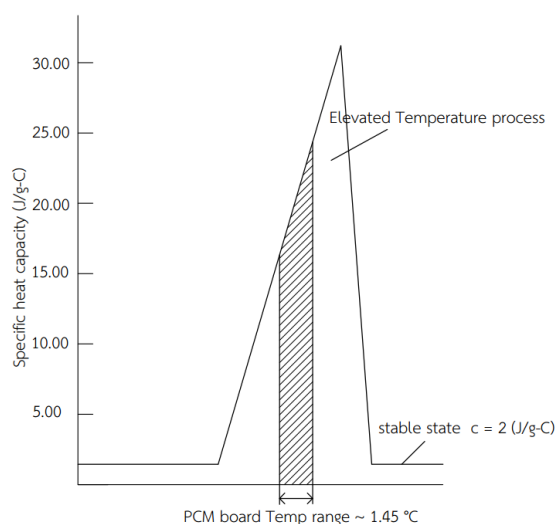


แผนภูมิที่ 27 อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวภายในวันที่ 2

## 4.2 การจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 4.2.1 คุณสมบัติของ PCM board ที่ใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

PCM board เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการกักเก็บความร้อนมากในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity:  $c$ ) จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง การจำลองผลด้วยโปรแกรม VisualDOE มีข้อจำกัดที่สามารถใส่ ค่า Specific heat capacity ได้เพียงค่าเดียว จึงใช้วิธีคำนวณหาค่า Specific heat capacity เฉลี่ยจากช่วงอุณหภูมิของ PCM board ที่เก็บข้อมูลมาจากห้องทดลอง และอาศัยข้อมูล Specific heat capacity ในแต่ละช่วงอุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการ DSC ดังนี้



แผนภูมิที่ 28 แบบจำลองการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะสำหรับการคำนวณ

อุณหภูมิของ PCM board ในช่วงเปิดเครื่องปรับอากาศที่วัดได้ห้องทดลองอยู่ที่ประมาณ 26.25 – 27.70 °C จากแผนภูมิที่ 28 ทำให้สามารถคำนวณค่า Specific heat เฉลี่ยได้ประมาณ 22,300 J/kg-°C และใช้ค่า Specific heat นี้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่อไป

### 4.2.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

การหาประสิทธิภาพใช้พลังงานได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม VisualDOE เพื่อหาการใช้พลังงานตลอดทั้งปีของ PCM board เมื่อติดตั้งในอาคารอ้างอิง 2 ประเภท คืออาคารพักอาศัยและอาคารสำนักงานมีผลดังนี้

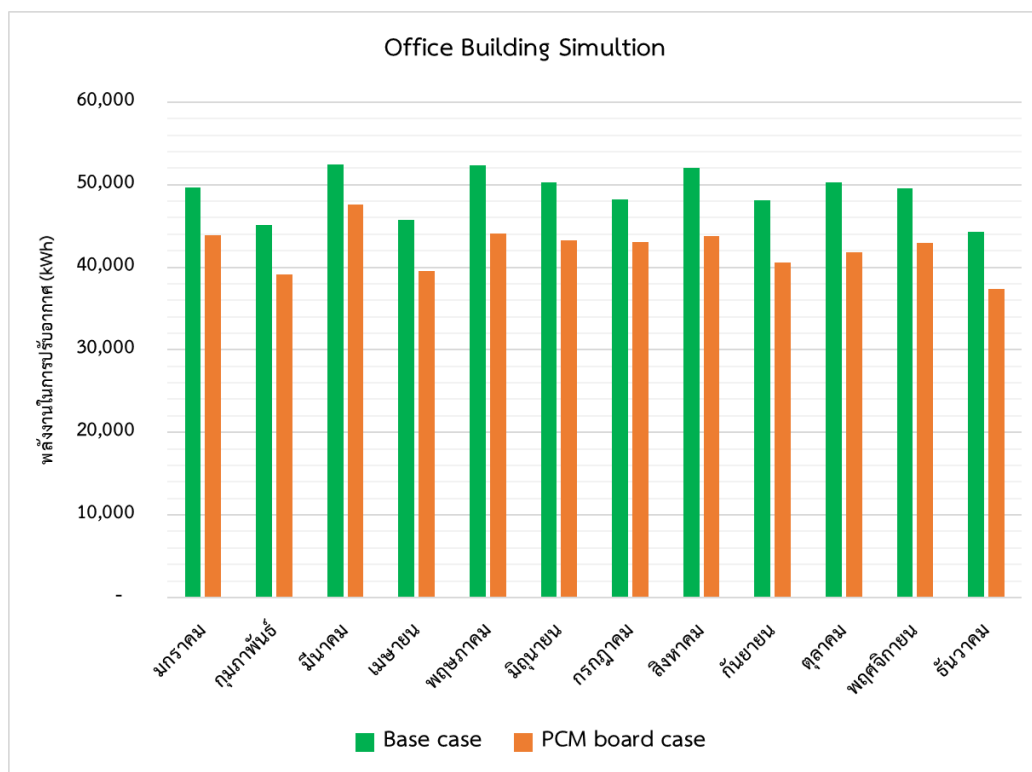
#### 4.2.2.1 อาคารสำนักงาน

จากการจำลองจากอาคารอ้างอิงอาคารสำนักงาน 7 ชั้นพื้นที่ 7,168.00 ตารางเมตรโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุ PCM board ที่ได้จากการทดลอง แสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การใช้พลังงานในการปรับอากาศจากการจำลองของอาคารสำนักงานอ้างอิง

เดือน	Base case (kWh)	PCM board (kWh)	Saving (kWh)	Saving (%)
มกราคม	49,637	43,847	5,790	11.66%
กุมภาพันธ์	45,092	39,122	5,970	13.24%
มีนาคม	52,494	47,617	4,877	9.29%
เมษายน	45,771	39,530	6,241	13.64%
พฤษภาคม	52,332	44,112	8,220	15.71%
มิถุนายน	50,244	43,309	6,935	13.80%
กรกฎาคม	48,237	43,013	5,224	10.83%
สิงหาคม	52,015	43,760	8,255	15.87%
กันยายน	48,154	40,524	7,630	15.84%
ตุลาคม	50,240	41,795	8,445	16.81%
พฤศจิกายน	49,607	42,951	6,656	13.42%
ธันวาคม	44,293	37,389	6,904	15.59%
<b>รวม</b>	<b>588,116</b>	<b>506,969</b>	<b>81,147</b>	<b>13.80%</b>

จากตารางที่ 12 จะเห็นว่าอาคารอ้างอิง Base case ที่ไม่มีการติด PCM board ใช้พลังงานในการปรับอากาศเท่ากับ 588,116 kWh ขณะที่อาคารอ้างอิงที่ติด PCM board ใช้ 506,969 kWh ถือว่าลดลง 81,147 kWh คิดเป็นค่าการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ 13.80% ตลอดทั้งปี โดยมีการประหยัดในแต่ละเดือนกระจายตัวตั้งแต่ประมาณ 9 – 16 % ทั้งนี้การประหยัดพลังงานในแต่ละเดือนที่แตกต่างกันนั้นยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอื่น ๆ ด้านสภาพอากาศโดยรอบอาคาร เช่น ความร้อนและความชื้นภายนอก เป็นต้น (แผนภูมิที่ 29)



แผนภูมิที่ 29 การใช้พลังงานในการปรับอากาศแต่ละเดือนจากการจำลองอาคารสำนักงานอ้างอิง

#### 4.2.2.2 อาคารพักอาศัย

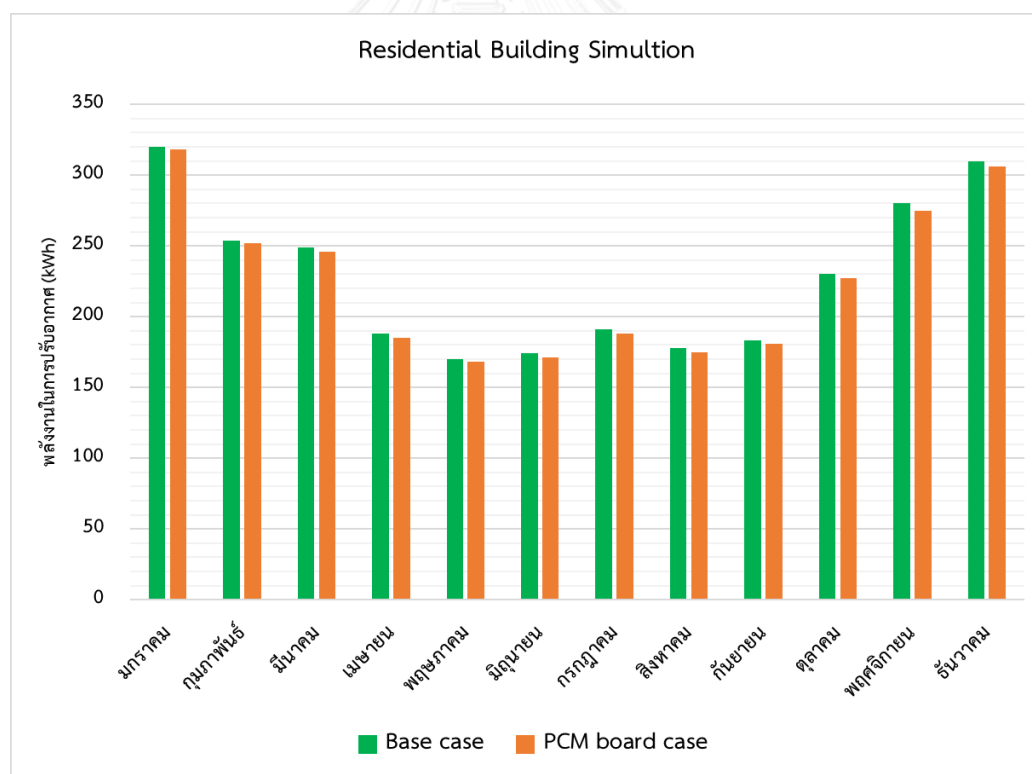
อาคารพักอาศัยจำลองโดยเลือกอาคารพักอาศัยรวมแบบคอนโดมิเนียมมา 1 ห้อง โดยใช้คุณสมบัติของวัสดุ PCM board ที่ได้จากการทดลอง มีผลการจำลองแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ตารางแสดงผลการใช้พลังงานในการปรับอากาศจากการจำลองของอ้างอิงอาคารพักอาศัยรวม

เดือน	Base case (kWh)	PCM board (kWh)	Saving (kWh)	Saving (%)
มกราคม	320	318	2	0.63%
กุมภาพันธ์	254	252	2	0.79%
มีนาคม	249	246	3	1.20%
เมษายน	188	185	3	1.60%
พฤษภาคม	170	168	2	1.18%
มิถุนายน	174	171	3	1.72%

กรกฎาคม	191	188	3	1.57%
สิงหาคม	178	175	3	1.69%
กันยายน	183	181	2	1.09%
ตุลาคม	230	227	3	1.30%
พฤศจิกายน	280	275	5	1.79%
ธันวาคม	310	306	4	1.29%
รวม	2,727	2,692	35	1.28%

จากตารางที่ 13 จะเห็นว่าอาคารอ้างอิง Base case ที่ไม่มีการติด PCM board ใช้พลังงานในการปรับอากาศทั้งปีเท่ากับ 2,727 kWh ขณะที่อาคารอ้างอิงที่ติด PCM board ใช้ 2,692 kWh ถือว่าลดลง 35 kWh คิดเป็นค่าการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ 1.28% ตลอดทั้งปี โดยมีการประหยัดในแต่ละเดือนกระจายตัวตั้งแต่ประมาณ 0.8 – 1.8 % (แผนภูมิที่ 30)



แผนภูมิที่ 30 การใช้พลังงานในการปรับอากาศแต่ละเดือนจากการจำลองอาคารพักอาศัยอ้างอิง

จากแผนภูมิที่ 30 มีข้อสังเกต คือในช่วงเดือนเมษายน – กันยายน มีการใช้พลังงานในการปรับอากาศลดต่ำลงอย่างชัดเจน เป็นผลมาจากห้องคอนโดมิเนียมที่ใช้ในการจำลองมีช่องเปิดของอาคารอยู่ที่ทิศใต้ทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับช่องเปิดของห้องทดลอง ในช่วงเดือนเดือนเมษายน – กันยายน ส่วนใหญ่แล้วเป็นช่วงที่พระอาทิตย์โคจรทางทิศเหนือหรือตั้งฉากกับหลังคาของอาคารจำลอง ทำให้ในช่วงกลางวันมีการสะสมความร้อนไว้ในอาคารไม่มาก เมื่อเทียบกับเดือนที่พระอาทิตย์โคจรทางทิศใต้เป็นหลัก ดังนั้น ความร้อนที่สะสมจากช่วงกลางวันเป็นจะส่งผลโดยตรงกับการใช้พลังงานในการปรับอากาศของอาคารคอนโดมิเนียมอ้างอิง ทำให้ช่วงเดือนเมษายน – กันยายน มีค่าการใช้พลังงานที่น้อยเทียบกับเดือนอื่น ๆ



## บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ผนังที่ติดแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะกับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัยในเขตสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น และศึกษาประสิทธิภาพการรักษาสถานะน่าสบายของการใช้จากการใช้แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ โดยมีสมมติฐานว่าแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM board) สามารถประหยัดพลังงานในการปรับอากาศลงได้ เนื่องจากพลังงานในการปรับอากาศนับว่าเป็นพลังงานส่วนใหญ่ในการดำเนินงานของอาคาร การลดพลังงานในสิ่งนี้ลงได้ก็ย่อมจะช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของอาคารและยังเป็นส่วนหนึ่งของการอนุรักษ์พลังงานอย่างยั่งยืน โดยวิธีการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ทบทวนทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเปลี่ยนสถานะ การทดลองจากห้องทดลองจริง และการจำลองการใช้พลังงานรวมตลอดทั้งปี ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

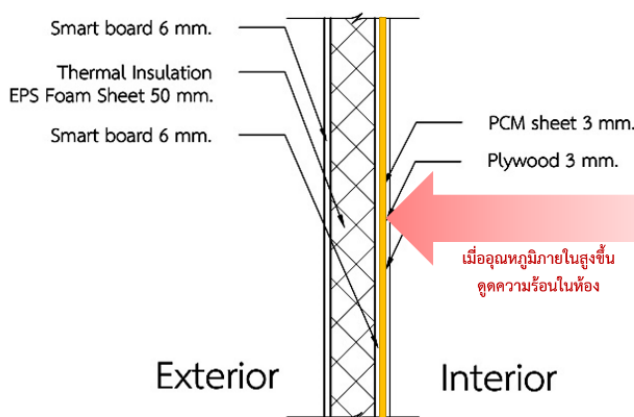
### 5.1 วัสดุสะสมพลังงานกับองค์ประกอบสถาปัตยกรรม

วัสดุสะสมพลังงาน (TES) ชนิดเปลี่ยนสถานะ (PCM) มีคุณสมบัติในการสะสมพลังงานทั้งความร้อนและความเย็นได้มากกว่าวัสดุทางสถาปัตยกรรมทั่วไป เนื่องจาก PCM สามารถเก็บพลังงานได้มากในช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะ ทำให้ในปัจจุบันเริ่มมีการนำ PCM มาประยุกต์ใช้ในหลาย องค์ประกอบของสถาปัตยกรรม เช่น ส่วนประกอบของระบบปรับอากาศ วัสดุผนังอาคาร และวัสดุฝ้าอาคาร เป็นต้น การศึกษาเกี่ยวกับ PCM ที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรมส่วนมากเป็นการใช้เพื่อป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารเป็นหลัก เนื่องจาก PCM เป็นวัสดุที่สามารถเพิ่มมวลอุณหภูมิขององค์ประกอบสถาปัตยกรรมได้มาก แต่ยังไม่มีการนำแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM board) มาติดตั้งที่ผนังภายในอาคารเพื่อลดการใช้พลังงานการปรับอากาศโดยตรงของอาคาร

รูปแบบการใช้งาน PCM ในงานวิจัยนี้ คือเป็นการติด PCM board ความหนา 3 mm. ที่ผนังภายในอาคารโดยตรง จากนั้นติดทับด้วยวัสดุสำหรับผนังภายใน เช่น ยิปซัมบอร์ด สมาทบอร์ด หรือไม้อัดที่มีความหนาไม่มาก ในการวิจัยนี้ใช้ไม้อัดความหนา 3 mm. ปิดทับ PCM board เพื่อเป็นการปกป้องผิวของ PCM board โดยหลักการทำงานของระบบผนังนี้ คือ PCM board จะทำหน้าที่ในการรักษาอุณหภูมิภายในห้องในช่วงที่เครื่องปรับอากาศตัดการทำงานหรือในช่วงหลังจากปิดเครื่องปรับอากาศ ซึ่งอาศัยความสามารถในการจุความร้อนที่มากในการเปลี่ยนสถานะดูดความร้อนเข้ามาเก็บไว้ที่ตัววัสดุ ทำให้ห้องที่ติด PCM board มีอุณหภูมิสูงขึ้นช้ากว่าห้องปกติ ทำให้รอบการปรับอากาศ ส่งผลโดยตรงในการลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ ทำให้ลดพลังงานใน

การปรับอากาศโดยตรง เมื่อเครื่องปรับอากาศกลับมาทำงานอุณหภูมิภายในห้องจะต่ำกว่า PCM board ส่งผลให้ PCM board คายความร้อนออกมาอย่างช้า ๆ แต่การคายของห้องที่ติด PCM board จะไม่มากเท่ากับห้องที่ไม่ติด เนื่องจากอุณหภูมิผิวของ PCM board มีความคงที่มากกว่า หลังจากคายความร้อนแล้ว PCM board ก็พร้อมสำหรับการดูดซับความร้อนในรอบต่อไปหลังจากการตัดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ

หลังจากปิดระบบปรับอากาศ PCM board ยังมีความสามารถในการสะสมความร้อนอีกมากจนกว่าจะถึงช่วงที่วัสดุ PCM เปลี่ยนสถานะจนหมด ส่งผลโดยตรงให้ห้องที่ติด PCM board สามารถรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะน่าสบายได้นานมากขึ้น



ภาพที่ 28 หลักการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 ประสิทธิภาพด้านพลังงานของการติดตั้งแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะภายในอาคาร

### 5.2.1 อาคารสำนักงาน

#### 5.2.1.1 ห้องทดลองอาคารสำนักงาน

ห้องทดลองอาคารสำนักงานมี PCM board ต่อพื้นที่ห้องเท่ากับ 2.69 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองเมื่อใช้งานเป็นอาคารสำนักงาน ค่าการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศเฉลี่ยทั้ง 3 วันเท่ากับ 18.91% โดยค่าการประหยัดพลังงานแปรผันตามความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องทดลอง เมื่อมีความร้อนที่เข้ามาสะสมในห้องมากก็จะมีแนวโน้มว่าจะมีค่าการประหยัดพลังงานมากกว่าในวันที่มีความร้อนน้อย



### 5.2.1.2 การจำลองอาคารสำนักงาน

อาคารสำนักงานอ้างอิงมี PCM board ต่อพื้นที่ห้องเท่ากับ 2.19 ผลจากการจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานของ PCM board มีค่าการประหยัดพลังงานทั้งปีเฉลี่ย 13.80 % เมื่อเทียบกับอาคารอ้างอิง โดยแต่ละเดือนมีการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศกระจายตัวตั้งแต่ประมาณ 9 – 16 % โดยการประหยัดพลังงานที่แตกต่างกันยังขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันในแต่ละเดือน เช่น ความชื้นของอากาศ หรือทิศทางการโคจรของดวงอาทิตย์

เมื่อเปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานของการจำลองอาคารอ้างอิงกับการเก็บข้อมูลจากห้องทดลอง จะพบมีค่าการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศแตกต่างกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการเก็บข้อมูลจากห้องทดลองเป็นการเก็บข้อมูลในช่วงเดียวของปี คือ เดือนเมษายน ที่มีอากาศร้อน ประกอบกับเครื่องปรับอากาศที่ใช้ในห้องทดลองเป็นเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ขณะที่เครื่องปรับอากาศของอาคารอ้างอิงเป็นระบบสำหรับอาคารขนาดใหญ่ ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าและมีระบบเป่าลมเย็นแบบปรับได้หรือ Variable Air Volume (VAV) ทำให้มีกลไกการทำงานที่แตกต่างกันและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศ เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผนังในการติดตั้ง PCM board ของทั้งสองกรณี ในห้องทดลองจะมีสัดส่วนพื้นที่ PCM board ต่อพื้นที่ห้องและต่อปริมาตรมากกว่าในอาคารจำลองอ้างอิง ซึ่งจำนวนของ PCM จะมีผลโดยตรงกับผลการประหยัดพลังงาน

### 5.2.1.3 การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เมื่อใช้แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะกับอาคารสำนักงาน

ปัจจุบันยังไม่มีกำหนดราคาแผ่นวัสดุสะสมอุณหภูมิจากผู้ผลิตเพื่อจำหน่ายในประเทศไทย ทำให้ยังไม่สามารถคำนวณจุดคืนทุนได้ แต่อย่างไรก็ตาม จากค่าการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศตลอดทั้งปีที่ได้จากการจำลองอาคารสำนักงานอ้างอิงสามารถ ประเมินราคาวัสดุเบื้องต้นได้ โดยอ้างอิงจากข้อกำหนดของสินเชื่อเงินกู้เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ของธนาคารกสิกรไทยที่กำหนดจุดคืนทุนไว้ภายใน 7 ปี ดังนั้นจึง สามารถกำหนดราคาวัสดุเบื้องต้นได้ ดังนี้

ภายใน 1 ปีประหยัดไฟฟ้า 81,147 หน่วย ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยละ 5 บาท

7 ปีจะประหยัดเงิน 2,840,145 บาท

วัสดุ PCM board ที่ติดตั้งทั้งหมด 11,760 ตารางเมตร

ดังนั้นวัสดุ PCM board นี้ควรมีราคาประมาณ 241 บาท/ตารางเมตร (รวมค่าแรงติดตั้ง)

นอกจากการอ้างอิงจากสินเชื่อเงินกู้เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ของธนาคารกสิกรไทย แล้ว เมื่อคำนึงถึงการใช้วัสดุประกอบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานเป็นหลัก หากสามารถเพิ่มระยะเวลาคืนทุนของการติดตั้งออกไปอีก เช่น 15 ปี สามารถกำหนดราคาวัสดุเบื้องต้นได้ ดังนี้

ภายใน 1 ปีประหยัดไฟฟ้า 81,147 หน่วย ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยหน่วยละ 5 บาท

15 ปีจะประหยัดเงิน 6,086,025 บาท

วัสดุ PCM board ที่ติดตั้งทั้งหมด 11,760 ตารางเมตร

ดังนั้นวัสดุ PCM board นี้ควรมีราคาประมาณ 517 บาท/ตารางเมตร (รวมค่าแรงติดตั้ง)

## 5.2.2 อาคารพักอาศัย

### 5.2.1.1 ห้องทดลองอาคารพักอาศัย

ห้องทดลองอาคารพักอาศัยมี PCM board ต่อพื้นที่ห้องเท่ากับ 2.69 การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองมีค่าการประหยัดพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 6.02% แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการใช้ไฟฟ้าในช่วงกลางคืนของห้องทดลองอาคารพักอาศัยมีน้อยมากเมื่อเทียบกับห้องทดลองอาคารสำนักงานที่ใช้งานในช่วงกลางวัน ด้วยเหตุที่อุณหภูมิอากาศในช่วงกลางคืนไม่สูงมากอีกทั้งในบางช่วงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เป็นปัจจัยหลักให้มีค่าการประหยัดพลังงานไม่มาก

### 5.2.1.1 การจำลองอาคารพักอาศัยรวม

อาคารคอนโดมิเนียมอ้างอิง PCM board ต่อพื้นที่ห้องเท่ากับ 1.78 ผลการจำลองพบว่ามีการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศเพียง 1.28% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการประหยัดพลังงานจากห้องทดลอง ห้องทดลองจะมีค่าการประหยัดพลังงานมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผนังในการติดตั้ง PCM board ของทั้งสองกรณี ในห้องทดลองอาคารพักอาศัยจะมีสัดส่วนพื้นที่ PCM board ต่อพื้นที่ห้องและต่อปริมาตรมากกว่า ซึ่งจำนวนของ PCM จะมีผลโดยตรงกับค่าการประหยัดพลังงาน เช่นเดียวกับในอาคารประเภทสำนักงาน

โดยสรุป จากผลการทดลองจากห้องทดลองประเภทอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย พบว่า ห้องทดลองอาคารสำนักงานมีการประหยัดพลังงานในการทำความเย็นถึง 18.91% ในขณะที่ห้องทดลองประเภทอาคารพักอาศัยมีค่าการประหยัดพลังงานในการทำความเย็นที่ 6.02% ซึ่งมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากในช่วงกลางคืนมีความร้อนที่เกิดขึ้นกับห้องทดลองน้อยกว่าในช่วงกลางวัน ทำให้ในช่วงกลางคืนเครื่องปรับอากาศทำงานน้อยกว่าประมาณ 4-5 เท่าของช่วงกลางวัน ค่าการประหยัดพลังงานจึงน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ เมื่อ

พิจารณาการเปิดเครื่องปรับอากาศปกติ แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะจะมีประสิทธิภาพด้านพลังงานสูงสุดกับอาคารที่ใช้งานช่วงกลางวัน และประสิทธิภาพด้านพลังงานของแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะมีแนวโน้มที่จะแปรผันตามปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในห้อง

### 5.3 ประสิทธิภาพการรักษาสถานะนำสabayหลังปิดเครื่องปรับอากาศ

#### 5.3.1 อาคารสำนักงาน

การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองอาคารสำนักงานที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงกลางวันเป็นหลัก หลังปิดเครื่องปรับอากาศ ห้องที่ติด PCM board สามารถรักษาสถานะนำสabay ไปได้ 2:00 – 3:00 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าห้องที่ไม่มีติด PCM board 1:5 – 2:30 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอกห้องในแต่ละวัน ซึ่งเป็นผลดีให้กับอาคารหลังปิดเครื่องปรับอากาศ ผู้ใช้อาคารสามารถใช้งานได้นานยิ่งขึ้น

#### 5.3.2 อาคารพักอาศัย

การเก็บข้อมูลจากห้องทดลองที่ใช้เป็นอาคารพักอาศัยมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงกลางคืนเป็นหลัก หลังปิดเครื่องปรับอากาศ ห้องที่ติด PCM board สามารถรักษาสถานะนำสabay ไปได้ 2:50– 3:20 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าห้องที่ไม่มีติด PCM board 1:10 - 1:20 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอกห้องในแต่ละวัน

PCM board ที่ติดตั้งที่ผนังภายในของอาคารมีประสิทธิภาพในการช่วยรักษาสถานะนำสabayของห้องไปได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับห้องที่ไม่ติด โดยสามารถนำ PCM board ไปประยุกต์ใช้กับอาคารสำนักงานในกรณีที่มีการทำงานล่วงเวลา (Over time) พนักงานก็สามารถใช้ห้องทำงานต่อไปได้อีกระยะหนึ่ง โดยที่ยังอยู่ในสถานะนำสabay และไม่ต้องอาศัยการทำงานของเครื่องปรับอากาศเพิ่ม หรือในอาคารประเภทพักอาศัยสามารถนำความสามารถในการรักษาความนำสabayไปตั้งเวลาปิดเครื่องปรับอากาศให้เร็วมากขึ้นเพื่อลดพลังงานในการปรับอากาศ

โดยสรุป งานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะที่ผ่านมา เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการเน้นการศึกษาเกี่ยวกับสาร PCM ที่ใช้ในงานสถาปัตยกรรม ซึ่งส่วนมากแล้วเป็นการผสมสาร PCM เข้ากับวัสดุประกอบอาคารใช้เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร และเป็นการศึกษาคุณสมบัติของ PCM ในแต่ละชนิดเป็นหลัก งานวิจัยนี้เป็นการใช้ PCM

board ติดที่ผนังภายในอาคารโดยตรง เพื่อใช้ในลดพลังงานการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ และเป็นการศึกษาอย่างรอบด้านทั้งประสิทธิภาพในการลดพลังงานในการปรับอากาศโดยการติดเครื่องปรับอากาศจริง และใช้เครื่องมือในการวัดการใช้พลังงานจริง รวมไปถึงนำคุณสมบัติของวัสดุไปจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ซึ่งยังไม่มีพบการวิจัยประสิทธิภาพพลังงานทั้งปีของ PCM board มาก่อน

#### 5.4 แนวทางการนำไปใช้

จากการวิจัยทั้งสองส่วนหลัก พบว่าการใช้ PCM board ติดเข้าที่ผนังภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงานในการปรับอากาศเหมาะสมกับอาคารที่ใช้งานในช่วงกลางวันเป็นหลัก เช่น อาคารสำนักงาน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการใช้พลังงานสูง โดยควรมีสัดส่วน PCM board ต่อพื้นที่ห้องประมาณ 2 – 2.5 จึงจะมีประสิทธิภาพด้านพลังงานที่เหมาะสม

ในส่วนของประสิทธิภาพในการรักษาสถานะนำสabayหลังปิดเครื่องปรับอากาศ พบว่า PCM board มีผลดีทั้งกับอาคารสำนักงานและอาคารพักอาศัย โดยในอาคารสำนักงาน PCM board สามารถช่วยรักษาสถานะนำสabayให้สามารถใช้พื้นที่ทำงานต่อไปได้นานมากขึ้น และในอาคารพักอาศัยสามารถนำข้อดีนี้ไปตั้งเวลาปิดเครื่องปรับอากาศให้เร็วมากขึ้น เพื่อลดการใช้พลังงาน โดยควรมีสัดส่วน PCM board ต่อพื้นที่ห้องประมาณ 1.5 – 2.5 ก็จะสามารถรักษาสถานะนำสabayหลังปิดเครื่องปรับอากาศได้นานมากขึ้น

#### 5.5 ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการเก็บข้อมูลจากห้องทดลองและจากการจำลองผลพบว่าการใช้ PCM board มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานในการปรับอากาศจริง และสามารถนำมาใช้กับอาคารในประเทศไทยได้ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับอาคารที่มีการใช้งานในช่วงกลางวัน เช่น อาคารสำนักงาน แต่อย่างไรก็ดีในอนาคตควรมีการกำหนดราคาของวัสดุ PCM board ที่เหมาะสมต่อไปเพื่อให้มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ และเป็นการอนุรักษ์พลังงานอีกทางหนึ่ง

2. การเก็บข้อมูลจริงจากห้องทดลอง งานวิจัยนี้เป็นการเก็บข้อมูลจากห้องทดลองขนาดจริงเพียงขนาดเดียว แผ่นวัสดุเปลี่ยนสถานะอาจมีประสิทธิภาพในอาคารที่ตึ้นหรือลดลงด้วยหลายปัจจัย เช่น สัดส่วนพื้นที่ผนังภายในต่อพื้นที่รวมของอาคาร รวมไปถึงวัสดุก่อสร้างที่หลากหลาย จึงควรมีการนำไปทดลองกับอาคารที่ใช้งานจริงกับครที่มีรูปแบบหลากหลายมากยิ่งขึ้น

3. การเก็บข้อมูลของงานวิจัยนี้เป็นการเก็บเพียงช่วงระยะเวลาเดียวของปี อาจทำให้ไม่สามารถหาประสิทธิภาพของแผ่นสะสมความเย็นตลอดทั้งปีจากการเก็บข้อมูลจริงได้ จึงควรนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ต่อยอดเพิ่มเติม เช่น การเก็บข้อมูลเพิ่มเติมในแต่ละช่วงเวลาของปี

4. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานตลอดทั้งปียังมีข้อจำกัดที่สามารถใส่ค่า Specific heat capacity ได้เพียงค่าเดียว ในการจำลองจึงใช้ค่า Specific heat capacity เฉลี่ยในช่วงอุณหภูมิของ PCM board ที่วัดได้จากห้องทดลอง อย่างไรก็ตามค่า Specific heat ของ PCM board จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในห้อง ในอนาคตจึงควรมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำลองผลที่มากขึ้น



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

การไฟฟ้านครหลวง. (2017). อัตราค่าไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ. ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่.

Retrieved 5 December, 2016, from <http://www.mea.or.th/profile/109/114>

ชลธิศ เอี่ยมวรวุฒิกุล. (2550). อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 21.

สุนทร บุญญาธิการ. (2542). เทคนิคออกแบบบ้านประหยัดพลังงาน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิญา บัญญา. (2555). ผลกระทบจากการกำหนดค่าการใช้พลังงานรวมของอาคารตามกฎหมายที่มีต่อการออกแบบคอนโดมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรรจน์ เศรษฐบุตร. (2552). การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี *Life Cycle Assessment (LCA)* โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยทำการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ *Visual DOE 4*. โครงการส่งเสริมการวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูงของทุนรัชดาภิเษก.

### ภาษาอังกฤษ

Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., & Quenard, D. (2006). Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and buildings*, 38(6), 673-681.

Al-Rabghi, O. M., & Al-Johani, K. M. (1997). Utilizing transfer function method for hourly cooling load calculations. *Energy conversion and management*, 38(4), 319-332.

ASHRAE Handbook. (1989). Fundamentals volume. *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga, 2*.

- ASHRAE Handbook Fundamental SI. (1993). American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. *Inc., Atlanta, GA.*
- ASHRAE Standard 55. (1992). 55.(1992). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.*
- Athienitis, A., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., & Feldman, D. (1997). Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Building and environment, 32(5)*, 405-410.
- Busch Jr, J. F. (1990). *From comfort to kilowatts: an integrated assessment of electricity conservation in Thailand's commercial sector.* Retrieved from Designing Buildings Wiki. (2016). Mean radiant temperature. Retrieved 5 December, 2016, from [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Mean\\_radiant\\_temperature](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Mean_radiant_temperature)
- Dincer, I., & Rosen, M. (2002). *Thermal energy storage: systems and applications:* John Wiley & Sons.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., & Cabeza, L. F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(1)*, 31-55.
- Hauer, A. (2007). Sorption theory for thermal energy storage. *Thermal energy storage for sustainable energy consumption, 393-408.*
- Hawes, D., Feldman, D., & Banu, D. (1993). Latent heat storage in building materials. *Energy and buildings, 20(1)*, 77-86.
- Kato, Y. (2007). 23. CHEMICAL ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT ENERGY USE. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design, 234, 377.*
- Kenisarin, M., & Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(9)*, 1913-1965.

- Kuznik, F., Virgone, J., & Noel, J. (2008). Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*, 28(11), 1291-1298.
- Luisa F. Cabeza, & Eduard Oró. (2016). Thermal energy storage for renewable heating and cooling systems. In Gerhard Stryi-Hipp (Ed.), *Renewable Heating and Cooling* (Vol. Series in Energy 89, pp. 139-179). 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA: Woodhead Publishing.
- Mandilaras, I., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Zannis, G., & Founti, M. (2013). Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and environment*, 61, 93-103.
- Mehling, H., & Cabeza, L. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications *Berlin: Springer*, 16(308), 4.
- Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S., & Hausmann, T. (2005). Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(2), 297-306.
- Thermalcore. (2016). ThermalCORE PCM Panel By National Gypsum. Retrieved 5 December, 2016, from <http://www.thermalcore.info/product-info.htm>





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุทธิพร เต็มกล้า เกิดเมื่อวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2536 ที่จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรมไทย ในปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทรศัพท์: 09-22808686 Email : [suttiporn.tk86@gmail.com](mailto:suttiporn.tk86@gmail.com)

