

ประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ
เมื่อใช้เป็นฉนวนหลังคาอาคาร ในสภาพอากาศร้อนชื้น



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

THERMAL LAG PERFORMANCE OF PCM-INTEGRATED
ROOF INSULATION IN A HOT-HUMID CLIMATE

Miss Premwipa Siripanyanon



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	ประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นฉนวนหลังคาอาคาร ในสภาพอากาศร้อนชื้น
โดย	นางสาวเปรมวิภา สิริปัญญาพันธ์
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุต

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนะจิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุต)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ณรงค์วิทย์ อารีมิตร)

เปรมวิภา สิริปัญญานนท์ : ประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นฉนวนหลังคาอาคาร ในสภาพอากาศร้อนชื้น (THERMAL LAG PERFORMANCE OF PCM-INTEGRATED ROOF INSULATION IN A HOT-HUMID CLIMATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ. ดร.อรรจน์ เศรษฐบุต, 95 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและการประหยัดพลังงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials; PCM) เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคาของอาคารที่ใช้งานส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน โดยทดลองด้วยการติดตั้ง PCM ด้านบนกล่องทดลอง ในภูมิอากาศจริง เดือนม.ค.-พ.ค. ของกรุงเทพฯ ประเทศไทย และนำข้อมูลทางอุณหภูมิไปจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อคำนวณการใช้พลังงานในอาคารตลอดจนศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุน

การศึกษาขั้นที่ 1 ทดลองเพิ่มประสิทธิภาพพาราฟิน โดยการผสม CaCl_2 Na_2CO_3 และกลีเซอริน ในอัตราส่วน 1:1 เปรียบเทียบกับน้ำ พบว่า CaCl_2 และ Na_2CO_3 ทำให้ประสิทธิภาพพาราฟินลดลง และไม่พบการเปลี่ยนแปลงในกลีเซอริน ขณะที่พาราฟินหน่วงความร้อนและมีค่าความจุความร้อนน้อยกว่าน้ำเล็กน้อย การศึกษาขั้นที่ 2 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ 3 ชนิด คือ กล่องพลาสติก โพลีสไตรีน กล่องสแตนเลส และกล่องเมทัลชีท เปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ เมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่างและแผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม. พบว่ากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน มีอุณหภูมิภายในกล่องทดสอบของหลังคากล่องเมทัลชีทมีต่ำที่สุด และสามารถเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอาคารช่วงเวลากลางวันได้ดีที่สุด และประสิทธิภาพจะดีมากขึ้นเมื่อใช้กล่องเมทัลชีทร่วมกับหลังคาคอนกรีตโดยการวางไว้ด้านบนนอกอาคาร ทำให้อุณหภูมิภายในกล่องทดลองต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต 3-5 °C ในเวลากลางวัน จากการคำนวณกล่องหลังคาเมทัลชีทบรรจุพาราฟินมีค่าความต้านทานความร้อน $3.36 \text{ m}^2\text{K/W}$ และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $0.0067 \text{ W/m}^2\text{K}$

จากการจำลองประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของอาคาร 1 ชั้นที่มีการปรับอากาศพบว่าในอาคารสำนักงานซึ่งปรับอากาศเวลากลางวัน หลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตเดิม สามารถลดภาระในการทำความเย็นของอาคารและประหยัดราคาค่าไฟฟ้าได้ต่อปีได้มากที่สุดซึ่งประหยัดพลังงานถึงร้อยละ 46 เมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตธรรมดา สำหรับอาคารร้านค้าซึ่งปรับอากาศไปจนถึงช่วงกลางวัน การใช้หลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินจะเหมาะสมที่สุด คือ สามารถประหยัดพลังงานร้อยละ 36 เมื่อเทียบกับหลังคาทั่วไปที่ใช้เมทัลชีท ทั้งนี้ในช่วงกลางวันพาราฟินจะคายความร้อนเพื่อคืนสภาพเป็นของแข็ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของร้านค้าต่ำกว่าสำนักงาน ซึ่งมีการใช้งานจนถึงเวลากลางคืน ซึ่งหมายความว่าการทำงานกลางวันจะมีประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานสูงสุด

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5973361825 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: PHASE CHANGE MATERIALS / ROOF INSULATION / THERMAL LAG PERFORMANCE / PARAFFIN

PREMWIPA SIRIPANYANON: THERMAL LAG PERFORMANCE OF PCM-INTEGRATED ROOF INSULATION IN A HOT-HUMID CLIMATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 95 pp.

This research aims to study the thermal performance and energy efficiency of phase-change materials when used as roof insulation in daytime-only used buildings. Experiment was performed using test boxes placed outdoor under climatic conditions of Bangkok during January-May. Energy consumption of buildings was simulated by VisualDOE 4.1 Also, economic feasibility is estimated.

In the first test, settings to enhance the thermal performance of paraffin, mixing it with CaCl_2 , Na_2CO_3 , and Glycerin in 1:1 ratio were conducted in order to compare with water. The results indicated that CaCl_2 and Na_2CO_3 reduced performance of Paraffin whereas there is no change occurred with Glycerin. Due to Paraffin has lower specific heat than water, the performance was slightly lower. In the second test sets, by placing Paraffin in 3 types of containers in order to select the best container; Polystyrene box, Stainless steel box and Metal sheet box compared with normal roofing materials; metal sheet roof with foil and concrete slab 5 cm thickness. It was found that the box with metal sheet roof had the lowest indoor temperature and has capability to reduce indoor temperature fluctuation. Paraffin-integrated in metal sheet box on the top of concrete roof had the best performance for daytime-only used buildings. The indoor temperature was lower by 3-5 °C compared with typical concrete roof. The R value of the Paraffin-integrated roof insulation is $3.36 \text{ m}^2\text{K/W}$ and the thermal conductivity was found to be $0.0067 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

From the energy simulation of a one storey office building, the proposed Paraffin roof insulation can help cut the cooling load by 46 % For retail building, the energy saving is 36% Due to the heat released from paraffin for return to solid made Retail energy saving efficiency lower that office. The proposed material is more suitable for daytime use only.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้จนจบ เพราะได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์เป็นอย่างดีด้วยบุคคลมากมายดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. อรรถจัน เศรษฐบุตร

ที่ให้คำแนะนำทั้งภาคปฏิบัติการทดลองและความรู้ด้านทฤษฎีอย่างเต็มที่ ตั้งแต่เริ่มต้นจนงานวิจัยเสร็จสิ้น

บริษัท แอฟริคัส จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือในการวัด

ขอขอบคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้นและสุดท้ายนี้ คือ

ครอบครัว พ่อ แม่ มาย น้องจ๋วน และเพื่อนๆ

ที่คอยให้ความช่วยเหลือทุกๆด้านและสนับสนุนกันตลอดมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญแผนภูมิ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา.....	5
1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1.4.2 กำหนดสมมติฐานในงานวิจัย	5
1.4.3 กำหนดตัวแปรในงานวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	9
2.1.1 การนำความร้อน (Conduction).....	10
2.1.2 การพาความร้อน (Convection).....	11
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation).....	12
2.1.4 การเปลี่ยนสถานะ (Phase Change).....	13

2.2 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคาร.....	13
2.2.1 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)	14
2.2.2 ความร้อนแฝง (Latent Heat).....	14
2.2.3 ความร้อนแผ่รังสี (Radiant Heat).....	15
2.3 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน	16
2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity – k Value).....	16
2.3.2 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance – R Value)	16
2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Thermal transmittance : U-value)	17
2.3.4 วัสดุมวลอุณหภาพ (Thermal Mass).....	17
2.3.4.1 ระยะเวลาของความร้อนที่จะถ่ายเทผ่านวัสดุ (Thermal lag / Time lag)...	18
2.3.5 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat - C_p), J/kg °C.....	18
2.3.6 ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity - C).....	19
2.4 การป้องกันความร้อนทางหลังคาด้วยวิธีธรรมชาติ.....	20
2.4.1 สร้างความเย็นโดยการระบายอากาศ (Ventilative Cooling).....	20
2.4.2 การสร้างความเย็นโดยการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation)	20
2.4.3 การทำความเย็นโดยการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling).....	20
2.4.4 การใช้วัสดุมวลอุณหภาพเพื่อหน่วงความร้อน (Thermal Mass Insulation).....	21
2.5 การสะสมพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage- TES)	22
2.5.1 การสะสมเคมีความร้อน (Thermochemical Energy Storage)	22
2.5.2 การสะสมความร้อนด้วยความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Storage System)	22
2.5.3 การสะสมความร้อนด้วยความร้อนแฝง (Latent Heat Storage System).....	23
2.6 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material - PCM)	24

2.6.1 คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	24
2.6.2 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	27
2.7 วัสดุเปลี่ยนสถานะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอาคาร	28
2.7.1 พาราฟิน (Paraffin).....	28
2.7.2 เกลือไฮเดรต (Salt Hydrate).....	29
2.8 ลักษณะบรรจุภัณฑ์ของวัสดุเปลี่ยนสถานะ	29
2.8.1 บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในอาคาร	30
2.8.2 ปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์	30
2.8.3 ข้อควรระวังของบรรจุภัณฑ์ที่ผลต่อ PCM.....	30
2.9 วัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้กับอาคาร	31
2.9.1 ตัวอย่างระบบการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อทำหน้าที่ทำความเย็น	32
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	37
3.1 แนวทางการวิจัย	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.3 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิและลักษณะกล่องทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูล	38
3.4 ขั้นตอนการวิจัย	39
3.4.1 กำหนดสมมติฐานในงานวิจัย	39
3.4.2 การทดลองขั้นที่ 1: เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน	39
3.4.3 การทดลองขั้นที่ 2: ประสิทธิภาพของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ เมื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุ หลังคา	41
3.5 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการจำลอง โปรแกรม VisualDOE 4.1.....	44
3.5.1.1 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินที่ใช้ในการทดลอง	44
3.5.1.2 รวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารอ้างอิงที่ใช้จำลองผลการใช้พลังงาน....	46

3.5.2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานด้วยการบ่อนค่าคุณสมบัติของวัสดุกันความร้อนในโปรแกรม คำนวณ VisualDOE 4.1.....	49
3.5.2.1 โปรแกรม VisualDOE 4.1	49
3.5.2.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (R Value) ของหลังคาจากการทดลองชั้นที่ 2.....	49
3.5.2.3 การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้ารวม	51
3.5.3 การพิจารณาด้านความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	52
3.6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	53
4.1 ผลการทดลองชั้นที่ 1: เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน.....	53
4.1.1 การทดลองเปรียบเทียบระหว่างวัสดุต่างๆ 4 วัสดุ โดยทดลองครั้งละ 2 ตัวแปรทดสอบ	53
4.1.2 แผนภูมิแสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}).....	53
4.2 ผลการทดลองชั้นที่ 2: ประสิทธิภาพของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เมื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุหลังคา	57
4.2.1 การทดลองเปรียบเทียบระหว่าง 2 ตัวแปร	57
4.2.2 แผนภูมิแสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}).....	57
4.2.3 การคำนวณค่าต้านทานความร้อน (R-Value) จากอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง	64
4.3 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1	68
4.3.1 อาคารสำนักงาน 1 ชั้น	68
4.3.2 อาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น.....	69
4.4 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	70
4.4.1 อาคารสำนักงาน 1 ชั้น	71
4.4.2 อาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น.....	73

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการวิจัย	75
5.2 ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในอาคารสำนักงานและอาคารร้านค้าปลีก	77
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	78
รายการอ้างอิง	79
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงสาร PCM ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอุณหภูมิภาชนะนำสบาย 3

ตารางที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของวัสดุประสงค์การศึกษา วิธีการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงสถานะของแต่ละสารที่เกี่ยวข้องกับความร้อนแฝง 13

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ ที่ความดันคงที่ 1 atm และอุณหภูมิ 20°C 18

ตารางที่ 2.3 แสดงจุดหลอมเหลว (Melting point) และความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ของพาราฟิน 29

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Passive system และ Active system 35

ตารางที่ 3.1 แสดงสาร PCM ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอากาศของประเทศไทย 40

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินที่ใช้ทดลองจากการวัดด้วยเครื่อง DSC 46

ตารางที่ 3.3 แสดงการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของการใช้งานอาคารแต่ละประเภท 48

ตารางที่ 4.1 แสดงผลสรุปอุณหภูมิในกล่อง (T_{in}) ในแต่ละช่วงเวลาของพาราฟินกับแต่ละตัวแปร 56

ตารางที่ 4.2 แสดงผลสรุปการเปรียบเทียบอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของวันของตัวแปร 63

ตารางที่ 4.3 แสดงผลสรุปค่าทางความร้อนของหลังคาที่ได้จากการทดลอง 67

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาของฉนวน 70

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลลักษณะและราคาของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง 70

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลลักษณะและราคาของวัสดุหลังคาที่ใช้ในการจำลอง 70

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน 1 ชั้น 72

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น 74

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 วงจรใช้พลังงานในระบบและพลังงานที่ใช้ในการดำเนินอาคาร.....	1
ภาพที่ 1.2 หลักการทำงานพื้นฐานการสะสมพลังงาน.....	2
ภาพที่ 1.3 การทำงานของ PCM ในอาคารสำนักงาน เวลากลางวัน.....	2
ภาพที่ 1.4 การทำงานพื้นฐานของ PCM ในอาคาร.....	3
ภาพที่ 2.1 การแผ่รังสีอาทิตย์เข้าสู่ผิวโลก.....	9
ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนในอาคาร.....	10
ภาพที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ.....	11
ภาพที่ 2.4 การแผ่รังสีความร้อนผ่านวัสดุโปร่งแสง.....	12
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของน้ำเมื่อได้รับความร้อนเกิดความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงเมื่อเปลี่ยนสถานะ ...	15
ภาพที่ 2.6 การคำนวณความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำ.....	15
ภาพที่ 2.7 แสดงการแผ่รังสีของวัตถุ.....	15
ภาพที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละวัสดุ.....	16
ภาพที่ 2.9 การต้านทานความร้อนของวัสดุทั่วไป.....	17
ภาพที่ 2.10 การหวนวงความร้อนของ Thermal mass (เส้นทึบ) เทียบกับอุณหภูมิอากาศ.....	18
ภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของน้ำและอากาศ.....	19
ภาพที่ 2.12 การทำงานของ Roof Pond เพื่อการรักษาความเย็นในอาคารเขตร้อน.....	21
ภาพที่ 2.13 การทำงานของ Roof Pond เพื่อการรักษาความร้อนในอาคารเขตหนาว.....	21
ภาพที่ 2.14 การสะสมพลังงานความร้อนด้วยความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง.....	23
ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนแฝงของการหลอมเหลวกับอุณหภูมิของ PCM.....	23
ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความร้อนของ.....	24
ภาพที่ 2.17 กระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำในขณะที่อุณหภูมิคงที่.....	25
ภาพที่ 2.18 เปรียบเทียบการสะสมความร้อนระหว่าง PCM ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) น้ำ และหิน.....	26
ภาพที่ 2.19 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะแบ่งตามลักษณะของวัสดุ.....	27
ภาพที่ 2.20 คุณสมบัติแต่ละประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ.....	28

ภาพที่ 2.21	บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในอาคาร;.....	30
ภาพที่ 2.22	การสะสมความร้อนของ PCM ในอาคารสำนักงานและระบายความร้อนอากาศ	31
ภาพที่ 2.23	การทำงานพื้นฐานของระบบแยกเดี่ยว.....	32
ภาพที่ 2.24	การทดลองโดยอาศัยการทำงานด้วยพัดลม.....	32
ภาพที่ 2.25	ลักษณะแท่งค์บรรจุ PCM ในระบบ Solar cooling.....	33
ภาพที่ 2.26	ระบบ Solar cooling ที่ใช้แท่งค์บรรจุ PCM ที่มหาลัยเซวิลลา ประเทศสเปน.....	33
ภาพที่ 2.27	รูปแบบตัวอย่างของการใช้ PCM ที่ท่อคืนอากาศ (Return Air Duct).....	33
ภาพที่ 2.28	ด้านผิวหน้าของ DELTA-COOL 24.....	34
ภาพที่ 2.29	ผลิตภัณฑ์ PCM เมื่อใช้กับระบบฝ้า.....	34
ภาพที่ 2.30	รูปตัดของหลังคาห้องทดสอบ (a) มี PCM (b) ไม่มี PCM.....	34
ภาพที่ 2.31	แผ่นฝ้า ILKATHERM; 1.แผ่นปิดเหล็ก, 2. โฟม PU, 3. ท่อลม, 4.แผ่นยิปซัม PCM.....	35
ภาพที่ 3.1	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder.....	37
ภาพที่ 3.2	ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองและตำแหน่งการวางวัสดุทดสอบของการทดลอง ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2.....	38
ภาพที่ 3.3	เปรียบเทียบการทำงานของ PCM กับอุณหภูมิที่นำสลายในอาคาร.....	39
ภาพที่ 3.4	รูปตัดกล่องทดลองและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของการทดลองชั้นที่ 1.....	40
ภาพที่ 3.5	กล่องทดลองและตำแหน่งการวางสารทดลองบนกล่องทดลอง.....	41
ภาพที่ 3.6	ลักษณะในบรรจุภัณฑ์ประเภทโพลีโพรพิลีนที่ใช้บรรจุสาร PCM.....	41
ภาพที่ 3.7	รูปตัดกล่องทดลองและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของการทดลองชั้นที่ 2.....	42
ภาพที่ 3.8	รูปกล่องทดลอง.....	42
ภาพที่ 3.9	ตัวแปรการทดลองที่ 2; 1.กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS); 2.กล่องสแตนเลส (SL); 3.กล่อง เมทัลชีท (MS); 4.เมทัลชีทกรุฟอยล์ด้านล่าง (MF); 5.แผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม (CC).....	42
ภาพที่ 3.10	ตัวแปรบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน (ซ้าย), วัสดุหลังคาที่เปรียบเทียบ.....	43
ภาพที่ 3.11	กล่องเมทัลชีท ขนาด 60x60x2.20 ซม.....	43
ภาพที่ 3.12	รูปตัดกล่องเมทัลชีท	43
ภาพที่ 3.13	ลักษณะการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง DSC.....	44

ภาพที่ 3.14 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงให้ความร้อน)	45
ภาพที่ 3.15 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงลดความร้อน 1)	45
ภาพที่ 3.16 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงลดความร้อน 2)	45
ภาพที่ 3.17 ภาพจำลองอาคารสำนักงานในโปรแกรม VisualDOE 4.1	47
ภาพที่ 3.18 ภาพจำลองอาคารร้านค้าในโปรแกรม VisualDOE 4.1	47
ภาพที่ 3.19 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ เมื่อใช้ร่วมกับหลังคาเมทัลชีท.....	50
ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนสถานะของพาราฟินเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง DSC.....	64



สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 4.1 การทดลอง (a) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสม CaCl_2	54
แผนภูมิที่ 4.2 การทดลอง (b) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสม Na_2CO_3	54
แผนภูมิที่ 4.3 การทดลอง (c) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสมกลีเซอริน.....	55
แผนภูมิที่ 4.4 การทดลอง (d) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับน้ำ.....	55
แผนภูมิที่ 4.5 การทดลอง (e) เปรียบเทียบกล่องสแตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนบรรจุพาราฟิน ...	57
แผนภูมิที่ 4.6 การทดลอง (f) เปรียบเทียบกล่องสแตนเลสและกล่องเมทัลซีทบรรจุพาราฟิน	58
แผนภูมิที่ 4.7 การทดลอง (g) เปรียบเทียบกล่องเมทัลซีทบรรจุพาราฟินและแผ่นเมทัลซีทกรุพอยล์	59
แผนภูมิที่ 4.8 การทดลอง (h) เปรียบเทียบกล่องเมทัลซีทบรรจุพาราฟินและแผ่นคอนกรีต 5 ซม.....	60
แผนภูมิที่ 4.9 การทดลอง (i) เปรียบเทียบกล่องเมทัลซีทวางบนคอนกรีตและแผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม.....	61
แผนภูมิที่ 4.10 การทดลอง (j) เปรียบเทียบกล่องเมทัลซีทวางใต้แผ่นคอนกรีตและแผ่นคอนกรีต	61
แผนภูมิที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม	65
แผนภูมิที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องสแตนเลสที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม.....	65
แผนภูมิที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องเมทัลซีท ที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม	66
แผนภูมิที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้ของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน.....	66
แผนภูมิที่ 4.15 ค่าต้านทานความร้อนที่คำนวณได้ของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน (R Value)	66
แผนภูมิที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าต้านทานความร้อนเฉลี่ยของวัสดุที่ทดลอง (R Value)	67
แผนภูมิที่ 4.17 ผลรวมพลังงานการใช้ไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน 1 ชั้น.....	68
แผนภูมิที่ 4.18 ผลรวมการใช้พลังงานการใช้ไฟฟ้าของอาคารร้านค้าชั้นบนสุด 1 ชั้น.....	69
แผนภูมิที่ 4.19 จำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน 1 ชั้น.....	71
แผนภูมิที่ 4.20 จำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้าปลีก	73

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

“พลังงานไฟฟ้า” เป็นพลังงานที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิต ผลิตจากเชื้อเพลิงบรรพชีวิน (Fossil Fuels) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ในกระบวนการเผาผลาญเชื้อเพลิงทำให้สภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไปและอุณหภูมิโลกร้อนขึ้นจนก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก ด้วยการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2558 พบว่าการใช้ไฟฟ้าโดยรวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2 โดยภาคธุรกิจมีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.3 และปี พ.ศ. 2559 คาดว่าการใช้ไฟฟ้ารวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.5 และในช่วงเวลาต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด (on peak) จะมีความต้องการไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงขึ้นจากปีพ.ศ. 2558 (กระทรวงพลังงาน, 2558) ทำให้ต้องใช้เงินจำนวนมากในการนำเข้าเชื้อเพลิงและต้องลงทุนในจัดหาพลังงาน



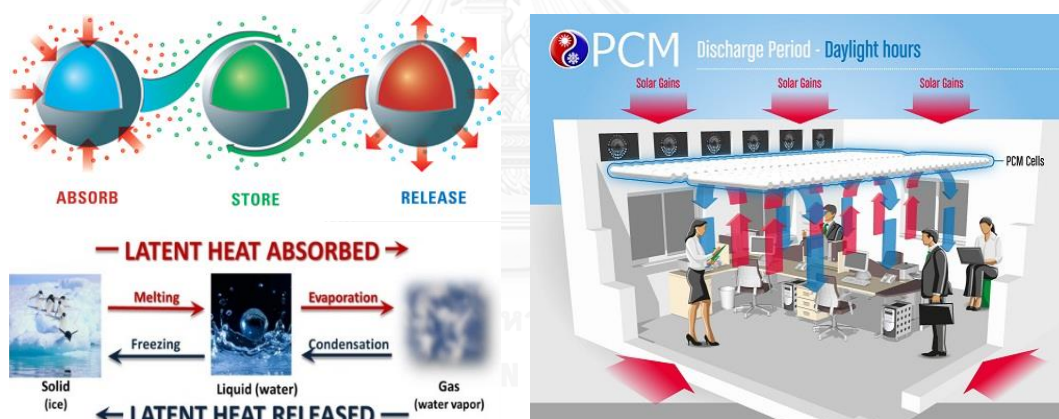
ภาพที่ 1.1 วงจรใช้พลังงานในระบบ (ซ้าย) และพลังงานที่ใช้ในการดำเนินอาคาร(ขวา)

“ระบบปรับอากาศ” มีสัดส่วนการใช้พลังงานในช่วงดำเนินงานระบบอาคารเป็นอันดับสูงสุด (Energy Conservation in Commercial Building, 2528) เพื่อตอบสนองแผนการพัฒนากาการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ 2015-2036 ที่ต้องการลดการใช้พลังงานลงร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2553 (กระทรวงพลังงาน, 2558) ดังนั้นจึงควรมุ่งเน้นการออกแบบที่สามารถลดภาระการทำความเย็นของอาคาร (Cooling Load)

การออกแบบเพื่อลดภาระการทำความเย็นให้กับอาคาร จะต้องลดความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในอาคาร (Heat Gain) ที่เกิดจากประเภทการใช้งาน ขนาดอาคาร รูปทรงของอาคาร ตำแหน่งที่ตั้งและภูมิอากาศ เป็นต้น ซึ่งมีแหล่งที่มา ดังนี้ 1. การนำความร้อนจากภายนอกผ่านผนัง หลังคา และกระจก (Conduction Heat Gain) 2. ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain) ผ่านช่องทางการเปิด (Fenestration) 3. ความร้อนจากการระบายอากาศ (Ventilation Heat Gain) 4. ความร้อนจากการรั่วซึมอากาศ (Infiltration Heat Gain) 5. ความร้อนจากแสงประดิษฐ์ (Lighting Heat Gain) 6. ความร้อนจากผู้ใช้อาคาร (Occupant Heat Gain) 7. ความร้อนจากอุปกรณ์ในอาคาร (Equipment Heat Gain) (ธนิต จินดาวณิก, 2546)

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ทำให้เปลือกอาคารได้รับอิทธิพลความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรงโดยเฉพาะหลังคา จึงเป็นแหล่งสะสมความร้อนจากภายนอกผ่านเปลือกอาคาร ก่อนส่งผ่านความร้อนเข้ามาด้านในอาคาร หากสามารถควบคุมความร้อนสะสมบนเปลือกอาคารได้ น่าจะช่วยลดอุณหภูมิภายใน ลดภาระการทำความเย็นและส่งเสริมการประหยัดพลังงานได้ โดยการควบคุมความร้อนสะสมบนเปลือกอาคารสามารถทำได้โดยอาศัย หลักการของการออกแบบอาคารที่สอดคล้องและเข้ากับสภาพภูมิประเทศ และภูมิอากาศเป็นสิ่งสำคัญ ตลอดจนการเลือกใช้วัสดุในอาคาร มีส่วนสำคัญในการป้องกันความร้อนจะเกิดขึ้นที่หลังคา เช่น การใช้ฉนวนมวลอุณหภาพ เพื่อหน่วงการนำความร้อนเข้าสู่อาคาร การใช้วิธีระบายอากาศธรรมชาติเพื่อพาความร้อนออกจากช่องใต้หลังคา การใช้วัสดุสมัยใหม่ต่างๆ เป็นต้น

วัสดุสมัยใหม่ที่สามารถทำหน้าที่หน่วงความร้อน คือ Phase Change Material (PCM) หรือเรียกว่า “วัสดุเปลี่ยนสถานะ” เป็นวัสดุที่อาศัยหลักการทำงานของความร้อนแฝง โดยพลังงานความร้อนจะสามารถเก็บสะสม เมื่อมีการดูดความร้อนเพื่อเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวหรือคายพลังงานความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะย้อนกลับ ซึ่งมีความสามารถในการหน่วงความร้อน แต่ไม่สะสมความร้อนไว้ตลอดวัน ซึ่งแตกต่างจากฉนวนความร้อนทั่วไป

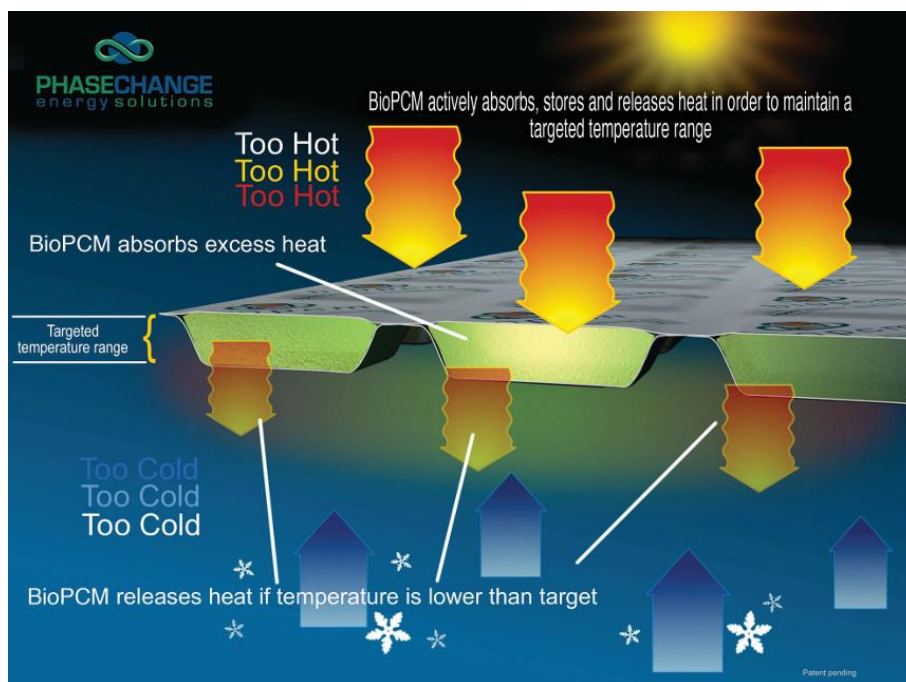


ภาพที่ 1.2 หลักการทำงานพื้นฐานการสะสมพลังงาน (ซ้าย)

ที่มา : <http://pcmfeijie.en.makepolo.com>

ภาพที่ 1.3 การทำงานของ PCM ในอาคารสำนักงาน เวลากลางวัน (ขวา)

ที่มา : www.pcmproducts.net



ภาพที่ 1.4 การทำงานพื้นฐานของ PCM ในอาคาร

ที่มา : <https://www.phasechange.com/how-it-works>

วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของ PCM เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคาอาคาร ภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร เพื่อศึกษา พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนตลอดจนทดสอบความสามารถในการป้องกันความร้อนเข้าสู่เปลือกอาคารด้านบน อุณหภูมิภายในกล่องทดลองที่เปลี่ยนแปลง และความสามารถในการลดภาระการทำความเย็น ซึ่งสามารถช่วยประหยัดพลังงานของอาคารประเภทปรับอากาศ ในสภาวะสภาพอากาศประเทศไทยตลอดจนมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งาน โดยอ้างอิงวัสดุทดสอบที่มีความสามารถในการเปลี่ยนสถานะจากตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงสาร PCM ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอุณหภูมิภาวะน่าสบาย

Materials	Organic	Melting point (°C)	Latent Heat (J/kg)	Thermal Conductivity (W/m ² K)	Density (kg/m ³)
1.Paraffin RT25	Y	24	164	-	-
Paraffin 19-Carbons	Y	32	222	-	-
				0.54 (l 38.7°C)	1,562 (l)
2.Calcium Chloride (CaCl ₂ · 6H ₂ O)	N	29	190.8	1.088 (s 23°C)	1,802 (s)
3.Sodium Carbonate (Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O)	N	32-36	246.5	-	1,442
4.Water	Y	0-100	334	0.61 (30 °C)	996
5.Glycerin	Y	17.9	198.7	-	-

ที่มา : Dutt Sharma, 2004

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันและหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคา
2. ประเมินและเปรียบเทียบการใช้พลังงานของอาคารในบริบทของประเทศไทย เมื่อใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะใช้เป็นวัสดุกันความร้อนประเภทหลังคา
3. ศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานด้วยการลดการปรับอากาศอาคารในสำนักงานและอาคารร้านค้าปลีก ที่ใช้งานเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่ ในสภาพภูมิอากาศประเทศไทย
4. เสนอแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุที่มีความคุ้มค่าในการลงทุน และเหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการก่อสร้างจริง

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคาและลักษณะการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ เพื่อเป็นตัวอย่างพื้นฐานเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาทั่วไป
2. ศึกษา PCM ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับสภาพอากาศประเทศไทย 4 ชนิด พาราฟิน CaCl_2 Na_2CO_3 และกลีเซอริน ในขวดโพลีโพรพิลีนขนาด 14x22 ซม. หนา 2 ซม. บรรจุ PCM 200 กรัม
3. ในการทดลองผสมวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้พาราฟิน (การทดลองขั้นที่ 1) ใช้การผสม CaCl_2 Na_2CO_3 และกลีเซอริน เข้ากับพาราฟินในอัตราผสม 1:1 เท่านั้น
4. ศึกษาวัสดุที่ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ 3 ประเภท พลาสติก สแตนเลส และเหล็กเคลือบสังกะสี (เมทัลชีท) ขนาด 60x60 ซม. ความสูงภายใน 2 ซม. และบรรจุพาราฟินที่ 2,200 กรัม
5. วัสดุหลังคาทั่วไปที่นำมาเปรียบเทียบคือ หลังคาคอนกรีต หลังคาเมทัลชีท และหลังคาเมทัลชีทกรุฟอยล์ด้านล่าง เท่านั้น
6. วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาแนวทางเลือกใช้วัสดุฉนวนหลังคาที่เหมาะสมด้านประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการลงทุน
7. จำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม Visual DOE 4.1 โดยนำค่าที่คำนวณได้จากการทดลอง มาใช้คำนวณปริมาณการใช้พลังงานของอาคารที่มีช่วงเวลาในการใช้งานกลางวันเป็นส่วนใหญ่และมีหลังคาแบนที่มีความเรียบสูง ได้แก่ อาคารสำนักงานขนาดกลางซึ่งใช้หลังคาคอนกรีต และอาคารร้านค้าปลีก (Retail) ที่นิยมใช้หลังคาเมทัลชีท

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. วิธีการสะสมพลังงานความร้อน (Energy Storage Strategies)
2. คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะ เช่น ความหนาแน่น (Density) ความจุความร้อน (Heat Capacity) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) และค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวหรือค่าความร้อนแฝง (Heat of Fusion, Latent heat)
3. ประสิทธิภาพและของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้กับอาคาร
4. งานวิจัยด้านการใช้ถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร
5. ศึกษาบทความที่เกี่ยวกับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่ออุณหภูมิภายในอาคารและการประหยัดพลังงาน

1.4.2 กำหนดสมมติฐานในงานวิจัย

วัสดุเปลี่ยนสถานะมีความสามารถในการหน่วงความร้อน เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคา จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาคาร และมีผลต่อการใช้พลังงานมากกว่าวัสดุมวล อุณหภูมิทั่วไป (Thermal mass) และวัสดุหลังคาทั่วไป ของอาคารประเภทปรับอากาศ ในสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย ตลอดจนมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งานเป็นวัสดุมวลสารหลังคา

1.4.3 กำหนดตัวแปรในงานวิจัย

1. การทดลองขั้นที่ 1: ทดลองผสมกับ PCM ประเภทอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน โดยคัดเลือก PCM ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอุณหภูมิอากาศของประเทศไทย
 - 1.1 ตัวแปรต้น
 - (1) พาราฟิน (PF)
 - (2) พาราฟินผสมแคลเซียมคลอไรด์ (PF+CaCl₂)
 - (3) พาราฟินผสมโซเดียมคาร์บอเนต (PF+Na₂CO₃)
 - (4) พาราฟินผสมกลีเซอริน (PF+Glycerin)
 - (5) น้ำ (Water)
 - 1.2 ตัวแปรตาม อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง

2. การทดลองขั้นที่ 2: ทดสอบประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ต่างๆและเปรียบเทียบกับวัสดุหุ้มกันทั่วไป
 - 2.1 ตัวแปรต้น
 - (1) กล่องพลาสติกโพลีโพรไพลีน (PS)
 - (2) กล่องสแตนเลส (SL)
 - (3) กล่องเมทัลชีท (MS)
 - (4) เมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่าง (MF)
 - (5) แผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม (CC)
 - 2.2 ตัวแปรตาม อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง อุณหภูมิผิวนอกและในของวัสดุ เพื่อใช้ในการคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าต้านทานความร้อน (R Value) ของวัสดุแต่ละชนิด
3. จำลองการใช้งานในอาคารแต่ละประเภทเพื่อเป็นข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้ค่าคุณสมบัติที่คำนวณได้จากการทดลองเป็นข้อมูลของวัสดุแต่ละประเภท
 - 3.1 ตัวแปรต้น วัสดุหุ้มกันแต่ละชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน
 - 3.2 ตัวแปรตาม ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารใน 1 ปี (kWh/year)
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม
5. คำนวณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ พร้อมหาระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period)
6. สรุปผลและเสนอแนะแนวทางการใช้บรรจุภัณฑ์และวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้เป็นฉนวนหลังคา

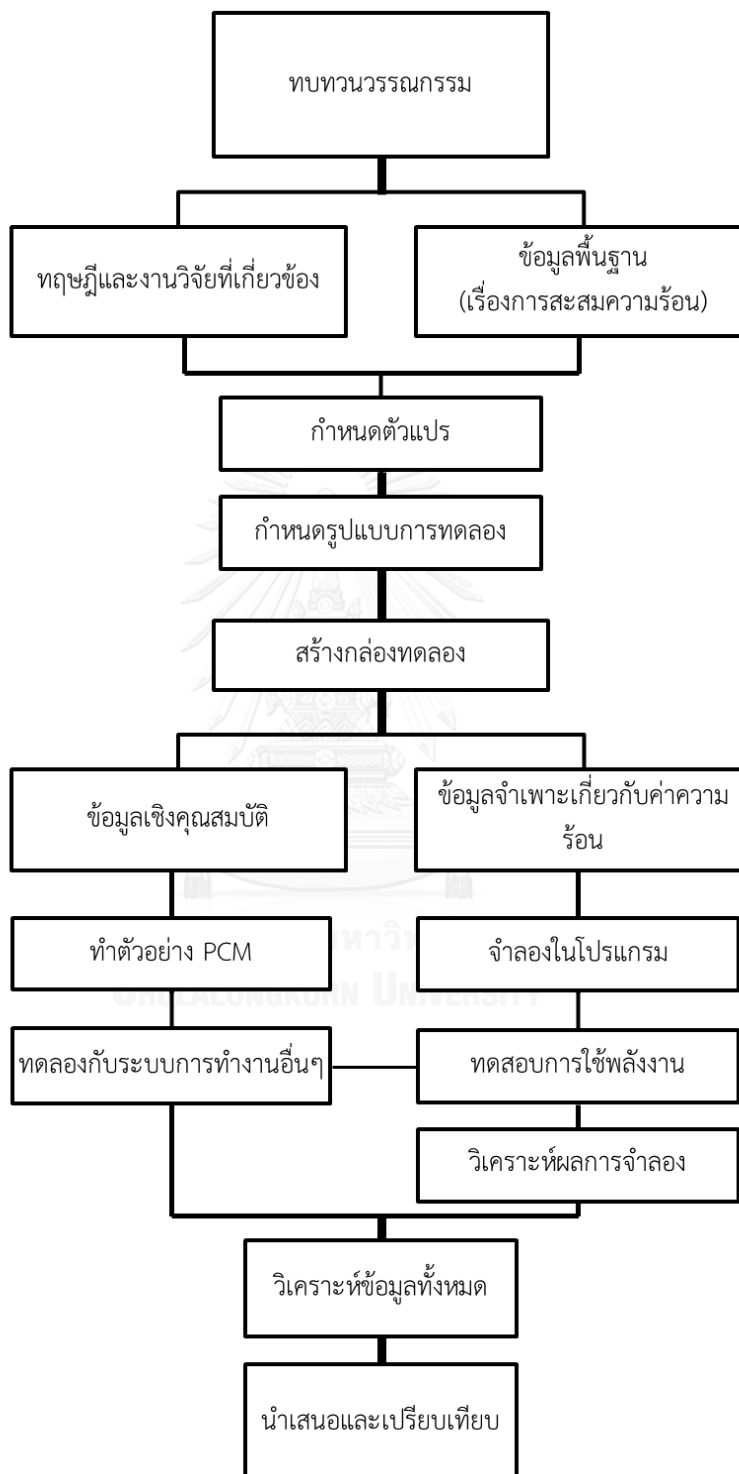
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึง ข้อดี-ข้อเสียและประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะ
2. ได้ทราบถึงการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะเพื่อประเมินค่าการกักความร้อนของวัสดุ
3. ได้แนวทางในการเลือกใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะให้สอดคล้องกับทิศทาง ที่ตั้ง สภาพอากาศ และการใช้สอยที่เหมาะสมกับสภาวะน่าสบายสำหรับอาคารในด้านการประหยัดพลังงาน
4. ได้แนวทางการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันความร้อนทางหลังคา ที่เกิดประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดของอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ
5. ได้แนวทางการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันความร้อนทางหลังคาที่มีความคุ้มค่าในการลงทุน และมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดของอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ

ตารางที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์การศึกษา วิธีการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	วิธีการศึกษา	ประโยชน์
1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนและหน่วงความร้อนของ PCM ในบรรจุภัณฑ์ชนิดต่างๆ ที่พบโดยทั่วไป เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคากับฉนวนอื่น	1. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเปรียบเทียบข้อมูล 2. สร้างกล่องทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและระยะเวลาในการคายความร้อนของวัสดุต้นแบบ	1. ได้ทราบ ข้อดี-ข้อเสียและประสิทธิภาพของ PCM 2. ได้ความรู้การหน่วงความร้อนของ PCM เพื่อประเมินการกันความร้อนของวัสดุ
2. ประเมินการใช้พลังงานของอาคารในบริบทของประเทศไทย เมื่อใช้ PCM และเปรียบเทียบพลังงานดังกล่าวกับการใช้วัสดุกันความร้อนประเภทหลังคา	3. นำข้อมูล คุณสมบัติของวัสดุ เปลี่ยนสถานะที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณความสามารถในการกันความร้อนในโปรแกรม Visual DOE 4.1	3. ได้แนวทางในการเลือกใช้ PCM ให้สอดคล้องกับทิศทางที่ตั้งสภาพอากาศ และการใช้สอยที่เหมาะสมกับสภาวะนำสบายสำหรับอาคารในด้าน การประหยัดพลังงาน
3. ศึกษาแนวทางการประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยการลดการปรับอากาศในอาคารประเภทใช้งานกลางวัน สำหรับอาคารปรับอากาศในประเทศไทย	4. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทั้งจากการเก็บข้อมูลจากกล่องทดลอง และการจำลองลงในอาคาร นำเสนอเปรียบเทียบเป็นกราฟ เพื่อแสดงการหน่วงความร้อนและการใช้พลังงาน	4. ได้แนวทางการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันความร้อนทางหลังคาที่เกิดประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดของอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ
4. สร้างแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุ ที่มีความคุ้มค่าในการลงทุน และเหมาะสมสำหรับการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารต่อไปในอนาคต	5. นำผลจากการวิเคราะห์ทั้งหมด ทำเป็นข้อมูลเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันความร้อน การประหยัดพลังงานสำหรับอาคาร และค่าใช้จ่ายในการลงทุน ซึ่งเป็นเป้าหมายในการทำการศึกษา	5. ได้แนวทางการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะสำหรับป้องกันความร้อนทางหลังคาที่เกิดประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดของอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ และความคุ้มค่าในการลงทุน

แผนภูมิที่ 1.1 ระเบียบวิธีวิจัย



บทที่ 2

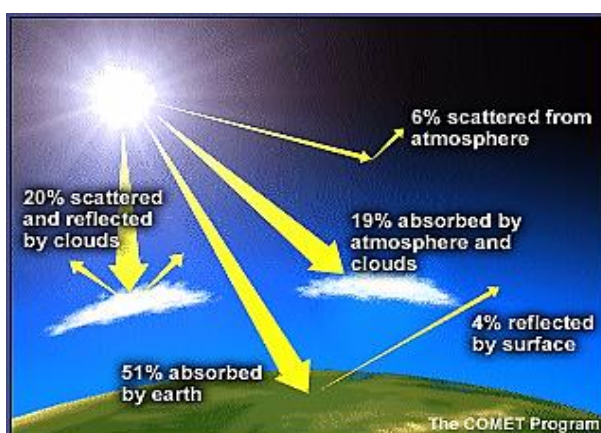
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับจุดประสงค์ของงานวิจัย คือการศึกษาประสิทธิภาพการหน่วงความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะ ตามหัวเรื่องต่อไปนี้

1. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน
2. ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคาร
3. คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน
4. การป้องกันความร้อนทางหลังคาด้วยวิธีธรรมชาติ
5. การสะสมพลังงานความร้อน
6. วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials - PCM)
7. ลักษณะบรรจุภัณฑ์ของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

2.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

แหล่งกำเนิดความร้อนจากภายนอกอาคารที่สำคัญที่สุดคือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งจะถ่ายเทพลังงานมาสู่โลก โดยการแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งบางส่วนชั้นบรรยากาศจะกรองไว้ บางส่วนที่ผ่านเข้ามาอย่างรังสีคลื่นสั้นจะเกิดกระเจิงโดยโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ และฝุ่นละอองในบรรยากาศไปคนละทิศทาง เรียกว่ารังสีการกระเจิง (Diffuse Radiation) และส่วนรังสีคลื่นสั้น ที่ความยาวคลื่น 0.3-4 ไมครอน ที่สามารถเข้ามายังพื้นโลก เรียกว่ารังสีตรง (Direct Radiation) ซึ่งรังสีนี้ที่ผ่านเข้ามาจะเกิดการสะท้อนความร้อนจากวัตถุผิวโลก เรียกว่ารังสีสะท้อน (Reflected Radiation) รังสีต่างๆที่เข้ามาจะทำให้วัตถุเหล่านั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนผ่านการนำความร้อน การพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 2.1 การแผ่รังสีอาทิตย์เข้าสู่ผิวโลก

ที่มา: https://www.ucar.edu/learn/1_3_1.htm

จากกฎของเทอร์โมไดนามิก (Laws of Thermodynamics) พลังงานความร้อนต้องอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นตัวกำหนดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งปรากฏการณ์สามารถเกิดได้ตามกฎดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 0 ของ Thermodynamics

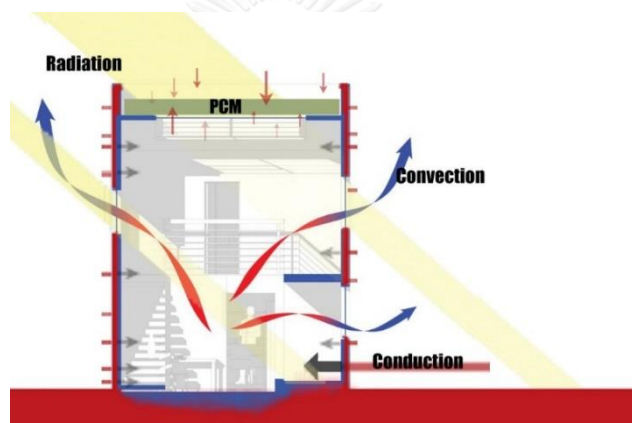
ความสมดุลของพลังงาน (Thermal Equilibrium) ถ้านำวัตถุสองชิ้นมีอุณหภูมิไม่เท่ากันมาวางด้วยกัน วัตถุทั้งสองจะถ่ายเทแลกเปลี่ยนพลังงานกันจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากัน

กฎข้อที่ 1 ของ Thermodynamics

จากพื้นฐานการอนุรักษ์พลังงาน พลังงานจะคงอยู่เสมอและไม่สูญหายไปหรือทำลายได้

กฎข้อที่ 2 ของ Thermodynamics

ความร้อนจะถ่ายโอนหรือส่งผ่านจากวัตถุที่อุณหภูมิสูง ไปสู่วัตถุที่มีวัตถุอุณหภูมิต่ำ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลทางความร้อนหรือสภาพแวดล้อมทั้งสองมีอุณหภูมิที่เท่ากัน มีรูปแบบการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน



ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนในอาคาร

ดัดแปลงจาก: <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/heat-energy-flows-buildings>

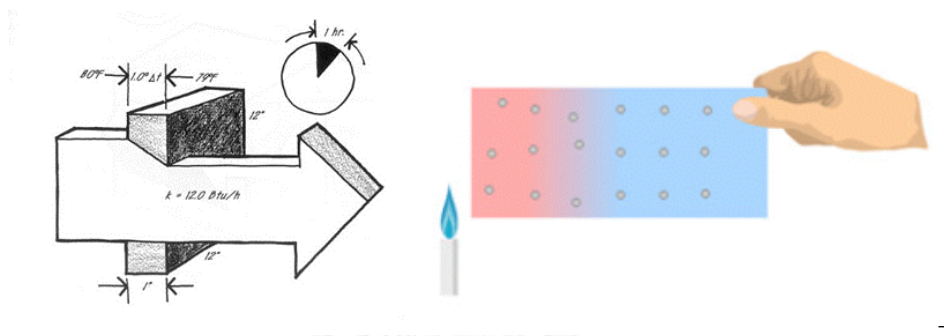
2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางและเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ จะได้รับความร้อนเมื่อเกิดการสัมผัสเนื้อวัสดุ แต่ละโมเลกุลจะส่งความร้อนให้โมเลกุลผ่านการสั่นและส่งต่อโมเลกุลข้างเคียง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเกิดขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการนำความร้อน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (k value) ความหนาแน่นของวัสดุ ความชื้นของวัสดุ ความแตกต่างของอุณหภูมิของวัสดุทั้ง 2 ด้าน ความหนาวัสดุ และระยะเวลาการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Q_{\text{cond}} = U \cdot A \cdot (\Delta T) \quad (1)$$

$$Q_{\text{cond}} = kA (\Delta T / \Delta x) \quad (2)$$

- Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ, Watt - W
 U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value), $W/m^2\text{°K}$
 A = พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน, m^2
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุ, °C
 Δx = ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (ความหนา), m
 K = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity), $W/m\text{°K}$



ภาพที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุ

ที่มา: สื่อการสอนเรื่อง Building Heat Transfer OTTV / RTTV, อรรถจน์ เศรษฐบุษุต, 2559 (ซ้าย)

ที่มา: http://www.hk-phy.org/energy/domestic/print/heat_phy_print_e.html (ขวา)

จากสมการ (1) และ (2) จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K-Value) ที่มีผลโดยตรงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value) คือปัจจัยสำคัญในการนำความร้อนเข้าสู่อาคาร การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างที่มี K-Value ต่ำจะสามารถหน่วงความร้อนที่เข้าสู่พื้นที่ภายในได้ดีกว่า วัสดุที่มี K-Value สูง

2.1.2 การพาความร้อน (Convection)

เป็นการถ่ายโอนความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของของไหล คือของเหลวและก๊าซ เป็นตัวพาความร้อนไปจากบริเวณที่ระดับความร้อนสูง (อุณหภูมิสูง) ไปสู่บริเวณที่มีระดับความร้อนต่ำ (อุณหภูมิต่ำ)

$$Q_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_f - T_p) \quad (3)$$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสของไหลกับวัตถุ, $W/m^2\text{°C}$

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล, m^2

T_p = อุณหภูมิของผิววัตถุ, °C

T_f = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิวหรืออุณหภูมิส่วนต้นของของไหล (อุณหภูมิอากาศ), °C

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

เป็นการส่งพลังงานความร้อนที่อยู่ในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ดังนั้นจึงไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่นการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก โดยทั่วไปวัตถุที่แผ่รังสีได้ดีก็จะรับ (ดูดกลืน) รังสีได้ดีด้วย วัตถุดำ (Black Body) เป็นวัตถุในอุดมคติ วัตถุที่มีลักษณะใกล้เคียงวัตถุดำคือ วัตถุที่มีสีดำ ในทางกลับกันวัตถุขาวจะดูดกลืนรังสีน้อยและแผ่รังสีน้อย โดยพลังงานที่แผ่ออกจากผิววัสดุจะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะธรรมชาติของผิว แสดงได้ดังสมการ

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad (4)$$

σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant = $5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

ϵ = ค่าการแผ่รังสีความร้อนของผิววัสดุ (emissivity)

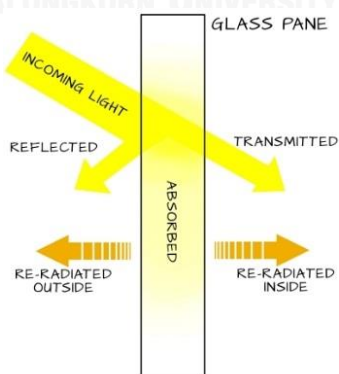
A = พื้นที่ผิวของวัตถุ บริเวณที่แผ่รังสี, m^2

T_s = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (อุณหภูมิของผิววัตถุ - อุณหภูมิที่ได้รับการแผ่รังสี), $^{\circ}\text{C}$

วัตถุเมื่อได้รับรังสีความร้อน วัตถุนั้นจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นขึ้นอยู่กับรังสีความร้อนที่ตกกระทบนั้นถูกสะท้อนรังสี (Reflectance - ρ) และรังสีที่ถูกส่งผ่าน (Transmittance - τ) และรังสีความร้อนที่เหลือจะถูกดูดกลืนรังสี (Absorptance - α) เข้าสู่เนื้อวัตถุซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ทำให้วัตถุนั้นๆมีอุณหภูมิสูงขึ้น คำนวณได้ดังนี้

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{สำหรับวัสดุโปร่งแสง}) \quad (5)$$

$$\rho + \alpha = 1 \quad (\text{วัสดุทึบแสง})$$



ภาพที่ 2.4 การแผ่รังสีความร้อนผ่านวัสดุโปร่งแสง

ที่มา : <http://auworkshop.autodesk.com/library/building-science/thermal-properties-materials>

2.1.4 การเปลี่ยนสถานะ (Phase Change)

เกิดในระบบเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic system) โดยสสารหนึ่งเมื่อเปลี่ยนสถานะจากเดิมไปสู่อีกสถานะหนึ่งโดยการรับความร้อนหรือคายความร้อน เช่นการละลายของน้ำแข็งเป็นน้ำหรือการที่น้ำเปลี่ยนเป็นของแข็ง โดยที่อุณหภูมิทั้งหมดยังคงที่ สถานะพื้นฐานของสสาร 4 รูปแบบจะสามารถเกิดการบวนการเปลี่ยนสถานะได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบการเปลี่ยนสถานะของแต่ละสสารที่เกี่ยวข้องกับความร้อนแฝง

สถานะเริ่มต้น	สถานะที่เปลี่ยนไป	กระบวนการเปลี่ยนสถานะ	ความร้อนแฝง
ของเหลว	ของแข็ง	เปลี่ยนลักษณะเกิดการแข็งตัว (Freeze)	สูญเสีย กระบวนการคายความร้อน
ของแข็ง	ของเหลว	เกิดการละลายจากของแข็ง (Melt)	ได้รับ กระบวนการดูดความร้อน
ก๊าซ	ของเหลว	กระบวนการควบแน่น (Condensation)	สูญเสีย กระบวนการคายความร้อน
ของเหลว	ก๊าซ	เมื่อมีการเดือด หรือระเหยกลายเป็นไอ (Vaporization)	ได้รับ กระบวนการดูดความร้อน

2.2 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคาร

เปลือกอาคาร คือ ส่วนของอาคารที่สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคาร เปลือกอาคารที่ดีควรสามารถลดปริมาณความร้อนและความชื้นที่เข้าสู่อาคารได้ดี และหากใช้ประโยชน์จากสภาพแวดล้อมและลักษณะทางธรรมชาติของที่ตั้ง อาจจะช่วยในระบบคายความร้อนของเปลือกอาคารทำให้เกิดความเย็นภายในอาคาร

สำหรับประเทศไทย “หลังคา” คือเปลือกอาคารที่เป็นส่วนสำคัญของอาคารในเขตร้อน เนื่องจากเปลือกอาคารได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรงและเก็บพลังงานไว้ส่วนหนึ่ง ทำให้เปลือกอาคารมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ความร้อนสัมผัส) ที่ถ่ายเทผ่านเปลือกอาคารเข้ามาในอาคาร ทำให้ระบบทำความเย็นต้องมีภาระหนักขึ้น

เมื่ออุณหภูมิผิวของวัสดุที่อยู่ภายนอกอาคารสูงกว่าอุณหภูมิผิวของวัสดุภายในอาคาร (การถ่ายเทจากบนลงล่าง) จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง และในทางกลับกัน เมื่ออุณหภูมิผิวของวัสดุที่อยู่ภายนอกอาคารต่ำกว่าอุณหภูมิผิวของวัสดุภายในอาคาร (การถ่ายเทจากล่างสู่บน) จะเกิดถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนในช่องอากาศของหลังคา และเกิดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ออกสู่สภาพอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในเวลากลางคืน

2.2.1 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

ความร้อนที่รับรู้ได้ด้วยการวัดอุณหภูมิ หรือประสาทสัมผัสของมนุษย์ โดยปริมาณความร้อนจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ อุณหภูมิและมวลสารวัตถุ หากมีอุณหภูมิหรือมวลมากจะมีปริมาณความร้อนมากตามไปด้วย หมายความว่าเมื่อวัตถุที่หนักหรือมีความหนาแน่นสูงจะมีความจุความร้อน (Heat Capacity) สูงด้วย ตัวอย่างเช่น น้ำ เป็นสสารพิเศษ มีน้ำหนักปานกลางแต่มีค่าความจุความร้อนที่สูงมาก เป็น 3 เท่าของวัสดุก่อสร้างอาคารทั่วไป เช่น คอนกรีต

สมการอธิบายความร้อนสัมผัส คือ

$$q = C\Delta T \quad (6)$$

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (7)$$

- q = ปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทผ่านวัตถุ, kJ
 m = มวลของวัตถุ, kg
 C = ความจุความร้อนของสาร (heat capacity), kJ / °C
 C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat), kJ/kg°C
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุ (T_{เปลี่ยนแปลง} - T_{เริ่มต้น}), °C

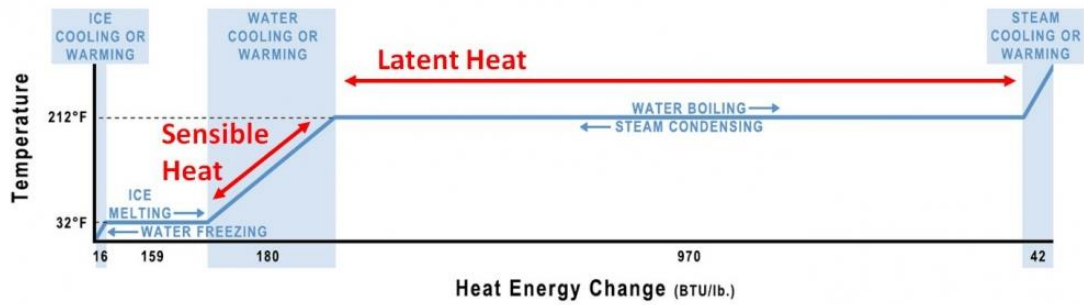
2.2.2 ความร้อนแฝง (Latent Heat)

ปริมาณความร้อนที่สารใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (Phase Change) โดยอุณหภูมิ ในขณะที่สสารกำลังเปลี่ยนสถานะนั้นคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น กระบวนการเปลี่ยนจากน้ำเป็นไอน้ำ

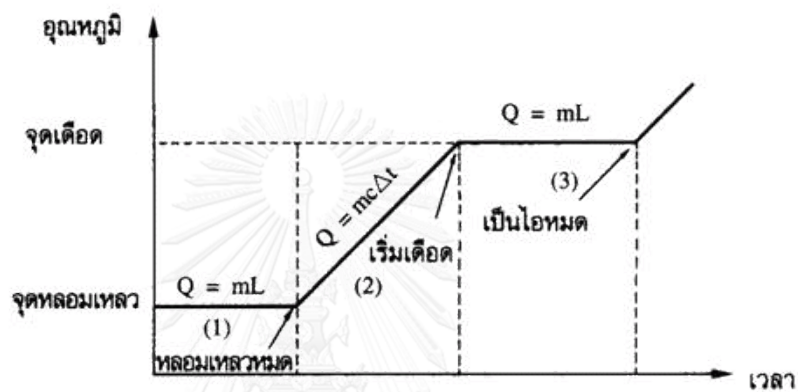
ความร้อนแฝงจำเพาะ (Specific Latent Heat - L) คือ ปริมาณความร้อนที่สสารมวล 1 หน่วย ได้รับหรือคายออก เพื่อใช้เปลี่ยนสถานะ โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็นหน่วยปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวล เช่น แคลอรีต่อกรัม กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมหรือจูลต่อกิโลกรัมสมการอธิบายความร้อนแฝง คือ

$$q_l = mL \quad (8)$$

- q_l = ความร้อนแฝงหรือปริมาณความร้อนที่วัตถุได้รับหรือคายออก, kJ
 m = มวลของวัตถุ, kg
 L = ความร้อนแฝงจำเพาะของวัตถุ, kJ/Kg



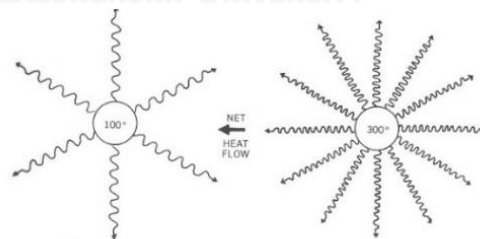
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของน้ำเมื่อได้รับความร้อนซึ่งเกิดความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงเมื่อเปลี่ยนสถานะ
ที่มา: <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/heat-energy-flows-buildings>



ภาพที่ 2.6 การคำนวณความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำ
ที่มา: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1079-2?groupid=240>

2.2.3 ความร้อนแผ่รังสี (Radiant Heat)

ความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีคลื่นไฟฟ้าแม่เหล็ก (Electromagnetic) เช่น ความร้อนจากดวงอาทิตย์



ภาพที่ 2.7 แสดงการแผ่รังสีของวัตถุ

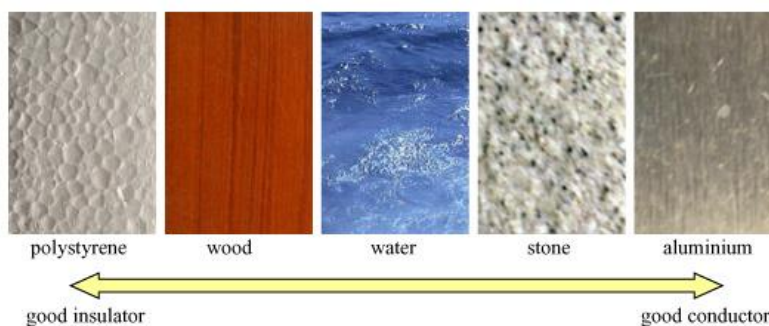
ที่มา: สื่อการสอนเรื่อง Building Heat Transfer OTTV / RTTV, อรรถจน์ เศรษฐบุตร์, 2559

2.3 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity – k Value)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหรืออัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ คือ ปริมาณความร้อนที่ผ่านเนื้อวัสดุ ต่อหน่วยความหนา ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิ (ΔT) และต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หน่วยคือ W/m^2K หาก K-Value มีค่ามากแปลว่ามีความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุเร็ว สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$k = \frac{\Delta x}{R} \quad (9)$$



ภาพที่ 2.8 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแต่ละวัสดุ

ที่มา: http://www.hk-phy.org/energy/domestic/print/heat_phy_print_e.html

2.3.2 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance – R Value)

คือความสามารถในการต้านทานความร้อนผ่านวัสดุ ถ้า R-Value เช่น ฉนวนที่มีค่ามาก แสดงว่ามีประสิทธิภาพของการกันความร้อนได้ดี ซึ่งแปรผันตรงกับความหนาของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่าน และฉนวนที่ดีควรมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุน้อย (K-Value) หน่วยคือ $m^2 \cdot ^\circ C / W$

$$R = \Delta x / k \quad (10)$$

$$R = \frac{1}{U} \quad (11)$$

Δx = ความหนารวมของวัสดุ, m

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ, W/m^2K

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมซึ่งมักจะรวมฟิล์มอากาศภายนอกและภายใน (U-Value), W/m^2K

ฟิล์มอากาศ คือค่าความต้านทานจากการพาความร้อนและการแผ่ความร้อน



ภาพที่ 2.9 การต้านทานความร้อนของวัสดุทั่วไป

ที่มา: <http://auworkshop.autodesk.com/topics/thermal-properties-materials>

2.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Thermal transmittance : U-value)

คือผลรวมของอัตราส่วนผกผันของ R Value ซึ่งเป็นผลรวมการถ่ายเทความร้อนของวัสดุทั้งหมดที่มาประกอบกันเป็นเปลือกอาคาร เช่น ชั้นส่วนหลังคา โดยคำนวณรวมตั้งแต่ ค่าต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกและภายใน ช่องว่างอากาศภายใน ตลอดจนวัสดุและวัสดุปิดผิวของเปลือกอาคาร คือผลรวมการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่ความร้อน)

$$U = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (12)$$

R = ค่าความต้านทานความร้อน (R-Value), $m^2\text{K/W}$

R_n = ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุชั้นที่ n

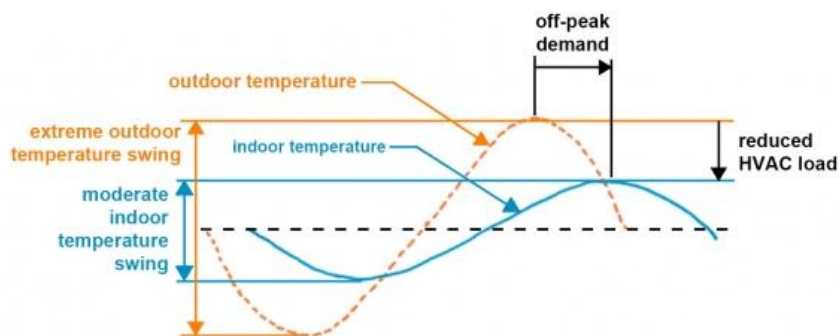
U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value), $W/m^2\text{K}$

2.3.4 วัสดุมวลอุณหภาพ (Thermal Mass)

คือ วัสดุที่มีความสามารถให้การคงอุณหภูมิเดิมได้นานกว่าวัสดุทั่วไปเมื่อมีการเพิ่มหรือลดความร้อนแก่วัสดุนั้น ไม่ได้หมายถึงสามารถต้านทานความร้อนได้ เพียงแต่มีความสามารถในการกักเก็บหรือหน่วงการปริมาณความร้อนที่ไว้ในวัสดุได้นาน โดยขึ้นอยู่กับ 4 ตัวแปร ดังนี้ ปริมาตรระยะเวลาของความร้อนที่จะถ่ายเทผ่านวัสดุ (Time lag) ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และค่าความจุความร้อน (Heat Capacity) และหากปริมาตร (Density) โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะสามารถกักความร้อนไว้ได้มาก ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องร้อนช้าลงและคงที่

2.3.4.1 ระยะเวลาของความร้อนที่จะถ่ายเทผ่านวัสดุ (Thermal lag / Time lag)

ความสามารถหน่วงเหนี่ยวความร้อนที่จะเกิดการถ่ายเทให้คงไว้ภายในมวลสาร เกิดความคลาดเคลื่อนในระยะเวลา โดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นช้าลง (Shift Phase) สามารถวัดได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดระหว่างผิวนอกวัสดุกับผิวในวัสดุ ยิ่งวัสดุหน่วงเหนี่ยวความร้อนได้มากยิ่งมี Time Lag นานขึ้น ช่วยลดภาระการทำความเย็น



ภาพที่ 2.10 การหน่วงความร้อนของ Thermal mass (เส้นทึบ) เทียบกับอุณหภูมิอากาศที่มา : <http://auworkshop.autodesk.com/topics/thermal-properties-materials>

2.3.5 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat - C_p), J/kg °C

เป็นสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด คือ ปริมาณความร้อนที่จะทำให้อุณหภูมิของวัสดุมวลหนึ่ง เพิ่มขึ้นหนึ่งองศา ซึ่งพลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุสูง แปลว่า ต้องใช้พลังงานความร้อนมากขึ้นถึงจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้สูงขึ้นได้

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความจุความร้อนจำเพาะ ที่ความดันคงที่ 1 atm และอุณหภูมิ 20°C

สสาร	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat - C_p)	
	kcal/kg·°C	J/kg·°C
อลูมิเนียม	0.22	900
กระจก	0.20	840
เหล็ก	0.11	450
ไม้	0.4	1700
น้ำ (15 °C)	1.00	4186
ไอน้ำ (110°C)	0.48	2010

2.3.6 ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity - C)

ความจุความร้อน คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้สารมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วยในทุกๆ 1 หน่วยปริมาตร ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันและเป็นค่าจำเพาะสำหรับแต่ละระบบ เพราะค่าความจุความร้อนไม่ใช่สมบัติเฉพาะตัวสำหรับสารใดๆ เนื่องจากขึ้นอยู่กับมวลของวัสดุ สารชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกันก็ย่อมมีค่าความจุความร้อนต่างกัน สมการที่แสดงนิยามของ C คือ

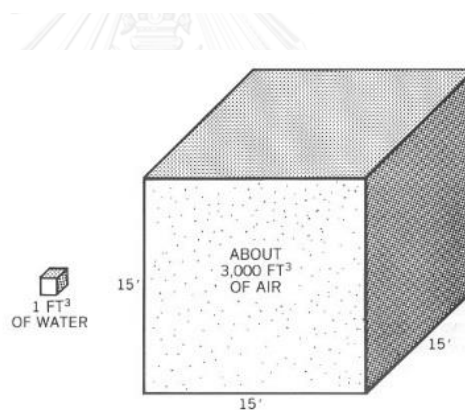
$$C = \Delta q / \Delta T \quad (13)$$

$$C = m \cdot C_p \quad (14)$$

C = ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity), kJ/°K

m = มวลของวัตถุ, กิโลกรัม (kg)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat), kJ/kg°C



ภาพที่ 2.11 การเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของน้ำและอากาศ

ที่มา : สื่อการสอนเรื่อง Building Heat Transfer OTTV / RTTV

(อรรถจน์ เศรษฐบุตร, 2559)

2.4 การป้องกันความร้อนทางหลังคาด้วยวิธีธรรมชาติ

การออกแบบเพื่อป้องกันความร้อน และการระบายความร้อนที่เข้ามาในอาคารด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Cooling) ทำได้ 2 วิธีหลัก คือ ลดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารจากการเพิ่มฉนวนกันความร้อน (Thermal mass) เพื่อลดการรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ และวิธีที่ 2 คือ การเพิ่มการระบายความร้อนออกจากเปลือกอาคารและอุณหภูมิภายในอาคารลดลงด้วยวิธีธรรมชาติ ซึ่งไม่รวมการใช้เครื่องกลต่างๆ เช่น พัดลมระบายอากาศ โดยผ่านตัวนำความร้อน เช่น น้ำ อากาศ ไปยังสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งสามารถแจกแจงเป็นกรณีย่อยดังนี้

2.4.1 สร้างความเย็นโดยการระบายอากาศ (Ventilative Cooling)

อาศัยการพาความร้อนโดยการแทนที่อุณหภูมิในอาคารด้วยอากาศภายนอกที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะพาความร้อนในอาคารออกไปนอกอาคาร เมื่อนำมาประยุกต์กับหลังคา จะช่วยลดอุณหภูมิภายในช่องหลังคาและผิววัสดุภายในช่องหลังคาได้

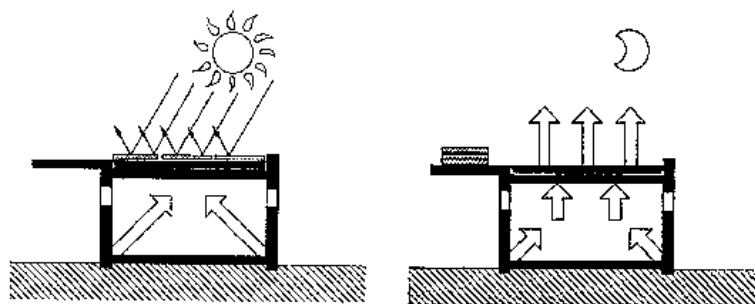
2.4.2 การสร้างความเย็นโดยการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation)

สภาพท้องฟ้า เป็นตัวแปรสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดกลืนรังสีความร้อนและการคายความร้อนซึ่งมีความไม่แน่นอน เนื่องจากเวลากลางวัน หากท้องฟ้ามีฝุ่นละออง เมฆมาก หรือครีမ်ฝน (Overcast Sky) รังสีอาทิตย์จะส่งมายังผิวโลกต่ำกว่าวันที่ฟ้าเปิด (Clear Sky) และเวลากลางคืน สำหรับการรักษาสมดุลของการถ่ายเทความร้อน เกิดการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าซึ่งประสิทธิภาพจะดีขึ้นหากท้องฟ้าปลอดโปร่ง

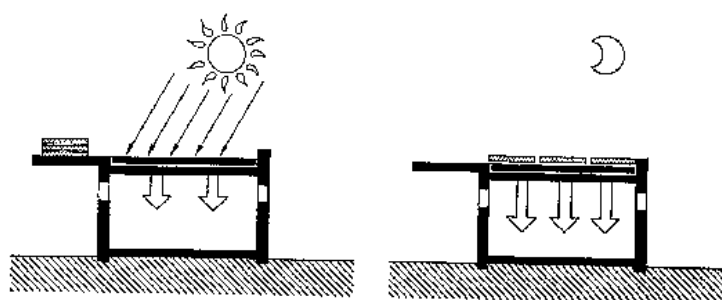
การคายความร้อนของวัสดุที่มีค่าการคายรังสีต่ำ เช่น อลูมิเนียมพอยล์ จะมีความสามารถในการคายรังสีสู่ท้องฟ้าต่ำ

2.4.3 การทำความเย็นโดยการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling)

เมื่อเกิดการระเหยของน้ำ พลังงานความร้อนจะอยู่ในรูปของความร้อนแฝงและมีอุณหภูมิคงที่ ณ ขณะนั้นเพื่อเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ หลังคาซึ่งด้านบนมีบ่อน้ำ (Roof Pond) สำหรับอาคารเขตร้อนที่ต้องการความเย็น ในเวลากลางวันจะปิดบ่อน้ำด้านบนไว้ด้วยฉนวน (movable insulating panels) และทำหน้าที่กับเก็บความร้อนที่เกิดจากภายในอาคาร (Internal Heat Gain) ซึ่งอุณหภูมิของน้ำจะไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากนำพลังงานความร้อนที่ได้รับมาเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ ส่งผลให้อุณหภูมิในห้องคงที่อยู่ในอุณหภูมิที่สบาย และในเวลากลางคืนจะเปิดฝาด้านบนบ่อน้ำ เพื่อการคายความร้อนออกสู่ท้องฟ้า



ภาพที่ 2.12 การทำงานของ Roof Pond เพื่อการรักษาความเย็นในอาคารเขตร้อน
ที่มา: Paul, G., and Dieter A., Climate Responsive Building, (Switzerland: SKAT, 1993)



ภาพที่ 2.13 การทำงานของ Roof Pond เพื่อการรักษาความร้อนในอาคารเขตหนาว
ที่มา: Paul, G., and Dieter A., Climate Responsive Building, (Switzerland: SKAT, 1993)

ในทางกลับกันสำหรับอาคารเขตหนาวที่ต้องการรักษาความร้อน ในเวลากลางวันจะเปิดให้บ่อน้ำรับความร้อน เพื่อสะสมความร้อน (Thermal Energy Storage- TES) และเมื่อถึงเวลากลางคืนจะปิดฉนวนด้านบนเพื่อให้ความร้อนกักเก็บความร้อนไว้ คายความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร

2.4.4 การใช้วัสดุมวลอุณหภาพเพื่อหน่วงความร้อน (Thermal Mass Insulation)

การเลือกใช้ความหนาแน่นของมวลอุณหภาพมาก จะทำให้ความร้อนส่งผ่านไปอาคารได้ช้าลง แต่เมื่อหยุดให้ความร้อนแล้ววัสดุจะยังเกิดการนำความร้อนต่อไป แปลว่าเกิดการสะสมความร้อนไว้ที่เปลือกอาคารนานขึ้น (Time lag) จึงทำให้ค่าความหนาแน่นของวัสดุอุณหภาพแต่ละประเภทมีค่าเหมาะสมเฉพาะตัว การเลือกใช้วัสดุอุณหภาพควรคำนึงที่ R-Value มีค่าสูงซึ่งสามารถต้านทานความร้อนได้มาก ลักษณะการติดตั้งได้ทั้งตำแหน่งใต้หลังคา และติดตั้งบนฝ้าเพดาน แต่การติดตั้งใต้หลังคาสามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารมีประสิทธิภาพมากกว่า (จัญตา บุญเกียรติ, 2537)

2.5 การสะสมพลังงานความร้อน (Thermal Energy Storage-TES)

ช่วงศตวรรษที่ผ่านมากระบวนการสะสมพลังงาน (Energy Storage Method) มีความสำคัญมากขึ้น เนื่องจากความต้องการการใช้ไฟฟ้าของมนุษย์มีอยู่ตลอดเวลาและมีแนวโน้มที่มากขึ้น ซึ่งการผลิตไฟฟ้ายังไม่สอดคล้องต่อการใช้งานในบางช่วงเวลา เช่น Peak Hour การผลิตไม่เพียงพอและค่าไฟฟ้าต่อหน่วยมีราคาแพง ส่วนช่วง Off Peak Hour มีการผลิตที่เกินความต้องการ ทำให้มีราคาต่อหน่วยถูก หากเราสามารถเก็บสะสมพลังงานส่วนเกินในช่วงใช้น้อย มาใช้ในช่วงที่มีความต้องการสูงได้จะเกิดประสิทธิภาพการใช้พลังงานงานไฟฟ้าสูงสุดได้ (ทองศักดิ์ วัฒนา, 2556)

การเก็บพลังงานความร้อนผ่านวัสดุหนึ่งที่มีความสามารถในการสะสม เพื่อใช้พลังงานนี้ในภายหลัง สำหรับระบบทำความร้อน ความเย็นหรือการผลิตพลังงานอื่นๆ และรูปแบบของการสะสมความร้อนเกิดขึ้นจากเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (Internal Energy) ซึ่งเกี่ยวข้องกับโมเลกุลภายในของสารตัวกลางที่จะใช้สะสมความร้อน และการสะสมพลังงานความร้อนจะเก็บอยู่รูปของเคมี และพลังงานความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย ความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง

2.5.1 การสะสมเคมีความร้อน (Thermochemical Energy Storage)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น ปฏิกิริยาดูดร้อน ที่มีการเปลี่ยนสถานะของสารจากของแข็งเป็นของเหลว

2.5.2 การสะสมความร้อนด้วยความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Storage System)

การสะสมความร้อนจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิวัสดุที่เป็นตัวกลางสะสมความร้อน โดยที่ตัวกลางไม่ได้เปลี่ยนสถานะ วัสดุตัวกลาง (Packed Bed) มี 2 แบบคือ ใช้ของเหลวและของแข็ง ความสามารถเก็บความร้อนขึ้นอยู่กับค่าความจุความร้อน (C_p) และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (ρ) อุณหภูมิสะสม ซึ่งปกติจะต่ำกว่า $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตัวอย่างการนำไปใช้ เช่น เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสะสมความร้อน เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ที่ใช้ก้อนหินเป็นตัวสะสมความร้อน วางซ้อนกันอย่างหลวมเพื่อให้ของไหลผ่านไปได้เพื่อช่วยในการสะสมและคายความร้อน สามารถคำนวณพลังงานความร้อนสะสมความร้อนดังสมการ

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T.$$

$$q = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (15)$$

V = ปริมาตรของวัสดุเก็บความร้อน, m^3

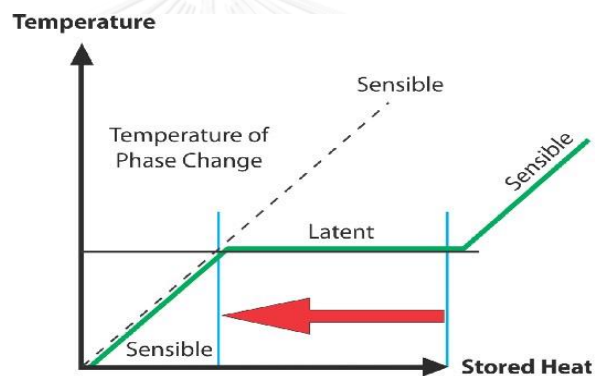
ρ = ความหนาแน่นของวัสดุเก็บความร้อน, kg/m^3

2.5.3 การสะสมความร้อนด้วยความร้อนแฝง (Latent Heat Storage System)

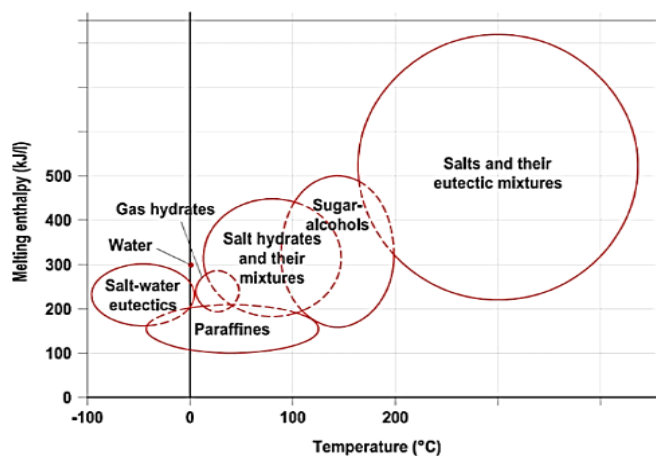
สะสมพลังงานความร้อนในวัสดุโดยการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุกลาง โดยที่อุณหภูมิของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (Phase Changing) เช่น การเปลี่ยนสถานะของสารของเหลวเป็นของแข็งหรือของเหลวเป็นแก๊ส ตัวกลางที่มีลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material-PCM) โดยทั่วไปนิยมใช้ PCM ที่เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว เนื่องจากปริมาณของสารแทบไม่เปลี่ยนแปลง สะดวกต่อการออกแบบบรรจุภัณฑ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q = m \cdot L$$

L = พลังงานความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะในภาวะอุณหภูมิวัสดุเท่ากับจุดหลอมเหลว (ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว, Heat of fusion, Melting Enthalpy), kJ/kg



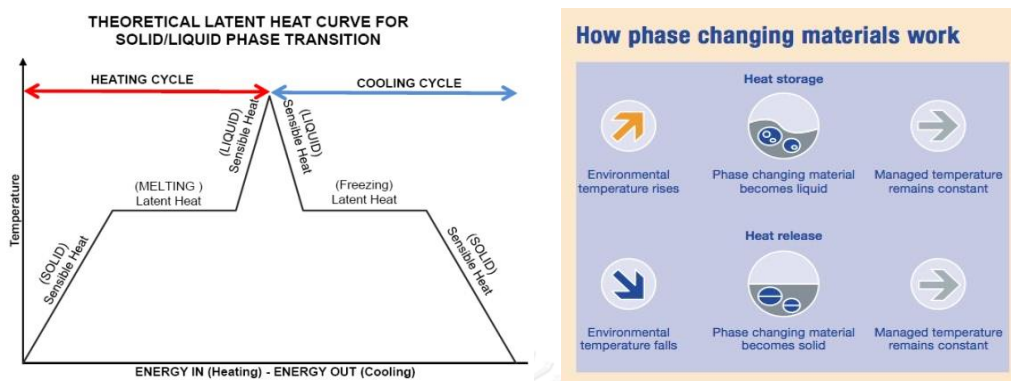
ภาพที่ 2.14 การสะสมพลังงานความร้อนด้วยความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง
ที่มา: <http://www.rgees.com/technology.php>



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนแฝงของการหลอมเหลวกับอุณหภูมิของ PCM
ที่มา: Souayfane, Fardoun et al., 2016

2.6 วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Material - PCM)

สารหนึ่งสารใดที่มีความสามารถในการกักเก็บสะสมและปล่อยพลังงานออกมาจำนวนหนึ่ง จำนวนใด โดยที่อุณหภูมิของสารหนึ่งสารใดนั้นยังมีอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งค่าใด



ภาพที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับความร้อนของ PCM (ซ้าย) และหลักการทำงานของPCM กับอุณหภูมิภายนอก (ขวา)

ที่มา: www.puretemp.com (ซ้าย), ที่มา: www.apartmenttherapy.com (ขวา)

PCM ที่ใช้หลักการของความร้อนแฝง (Latent Heat) โดยอุณหภูมิของสารนั้นมีค่าคงที่เมื่อกักเก็บ (Absorb) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันและเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และคายพลังงาน (Release) ออกภายนอกอาคารโดยคืนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ในเวลากลางคืนที่อุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสาร PCM กระบวนการนี้ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเปลี่ยนแปลงต่ำและคงอุณหภูมิที่น่าสบายแก่ผู้ใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถเลื่อนการใช้พลังงานจากช่วงเวลาที่มีการใช้พลังงานสูงสุดมาเป็นช่วงเวลาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุดได้ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้สำหรับการผลิตพลังงานลดลง PCM จึงเป็นหนึ่งในฉนวนมวลอุณหภูมิภาพสมัยใหม่ที่มีความสามารถในการหน่วงความร้อน แต่ไม่สะสมความร้อนไว้ตลอดวันซึ่งแตกต่างจากฉนวนความร้อนทั่วไป

2.6.1 คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

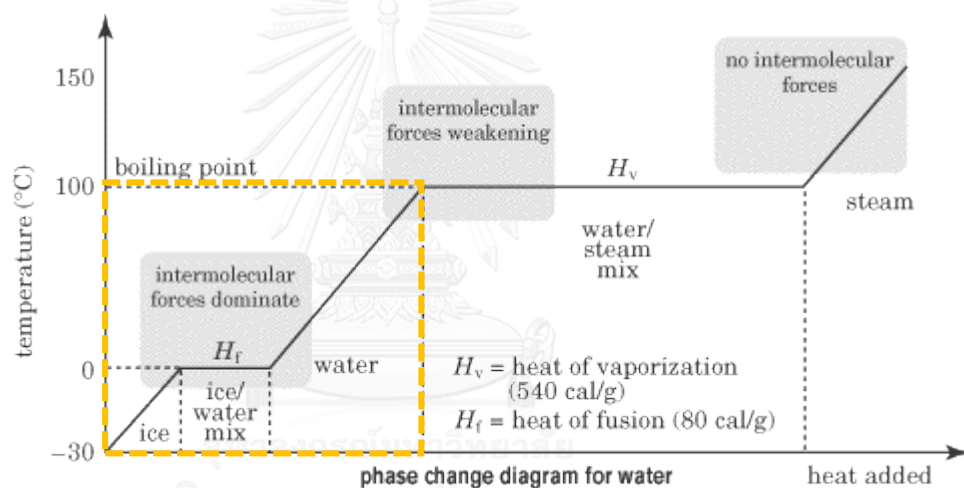
คุณสมบัติทางความร้อนของ PCM ที่ดีคือ เป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง (Thermal conductivity- K value) ค่าความร้อนจำเพาะสูง (Specific Heat) มีความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวสูง กล่าวคือจะมีความสามารถในการเก็บและคายความร้อนได้มาก ในช่วงเปลี่ยนสถานะ (Latent Heat of fusion) อุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting Temperature) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิภายในห้องและสภาวะน่าสบาย 22-27 °C (เมื่อติดตั้งภายในห้อง) หรือสอดคล้องกับภูมิอากาศ (ภายนอกห้อง) และความหนาแน่นและปริมาตรของวัสดุเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อเปลี่ยนสถานะ

ความร้อนของการหลอมเหลว (Latent Heat of fusion - H_f)

พลังงานความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวในภาวะอุณหภูมิวัสดุเท่ากับจุดหลอมเหลว ซึ่งแตกต่างจากวัสดุทั่วไปที่เมื่อให้พลังงาน วัสดุจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นตาม แต่สำหรับ PCM เมื่ออยู่ในสถานะที่ให้พลังงาน (kj) จนอุณหภูมิวัสดุเท่ากับจุดหลอมเหลว อุณหภูมิวัสดุจะไม่เพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากนำพลังงานที่ได้รับไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะของวัสดุนั้นๆ แทน กระบวนการดูดหรือคายความร้อนของวัสดุในการเปลี่ยนสถานะ

โดยทั่วไปสามารถเรียกความร้อนที่จะสะสมจนเกิดการหลอมเหลวจากความร้อนแฝง จึงสามารถเรียกได้ดังนี้ Melting Enthalpy, Enthalpy of fusion หน่วยคือ kj/kg

สำหรับการใช้งานในอาคาร PCM ที่มี Heat of fusion สูง หมายความว่าต้องใช้ความร้อนจำนวนมากในการหลอมเหลว หรือสามารถเก็บสะสมความร้อนได้จำนวนมาก ส่งผลให้อุณหภูมิของวัสดุและภายในอาคารคงที่ได้ยาวนานขึ้น



ภาพที่ 2.17 กระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำในขณะที่ยุณหภูมิคงที่

ที่มา: <http://www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/chemistry/chapter5section5.rhtml>

จากภาพที่ 2.17 จึงสามารถคำนวณพลังงานความร้อนรวมของทั้งระบบหลอมเหลวได้ดังสมการนี้

$$q_{\text{total}} = m \cdot C_{\text{sp}} (T_m - T_i) + m \cdot H_f + m \cdot C_{\text{lp}} (T_{\text{fi}} - T_m) \quad (16)$$

C_{sp} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ช่วงสถานะของแข็ง (specific heat), J/kg°C

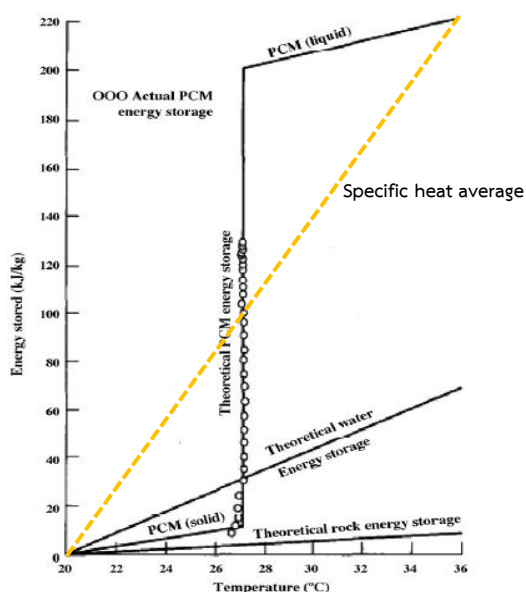
C_{lp} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ช่วงสถานะของเหลว (specific heat), J/kg°C

T_i = อุณหภูมิวัสดุก่อนละลาย, °C

T_m = อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ, °C

T_{fi} = อุณหภูมิวัสดุที่เปลี่ยนไปหลังละลาย, °C

ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, C_p)



ภาพที่ 2.18 เปรียบเทียบการสะสมความร้อนระหว่าง PCM ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) น้ำ และหิน
ที่มา: Kaygusuz (1995)

ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่ได้รับ (kJ/kg) กับอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) จะแปรผันตรงกัน ซึ่งหมายความว่า การที่ PCM มีค่าความร้อนจำเพาะสูง จะสามารถกักเก็บพลังงานได้มาก แต่ PCM การหาค่าความร้อนจำเพาะของทั้งระบบสามารถหาได้อย่างง่าย คือหาค่าเฉลี่ยจากความชันของกราฟ (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$) ดังเส้นประในภาพที่ 2.18 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$C_p = \text{Energy stored} / \text{temperature} \quad (17)$$

คุณสมบัติที่ดีของวัสดุเปลี่ยนสถานะต่ออาคาร

1. ค่าความร้อนของการหลอมเหลวสูง (Heat of fusion, kJ/kg)
2. ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (Melting Temperature) มีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิการใช้งาน
3. สามารถนำความร้อนได้ดี (Thermal conductivity, W/m $^{\circ}\text{K}$) ช่วยคายความร้อนออกได้เร็ว
4. ค่าความร้อนจำเพาะสูง (Specific Heat, kJ/kg $^{\circ}\text{C}$)
ในภาวะที่ไม่เปลี่ยนสถานะ ต้องใช้พลังงานจำนวนมากที่จะทำให้วัสดุมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น
5. ใช้งานง่ายในสภาวะความดันบรรยากาศ
6. มีความเสถียรสูงและทนต่อการเสื่อมสภาพในสภาวะปกติ

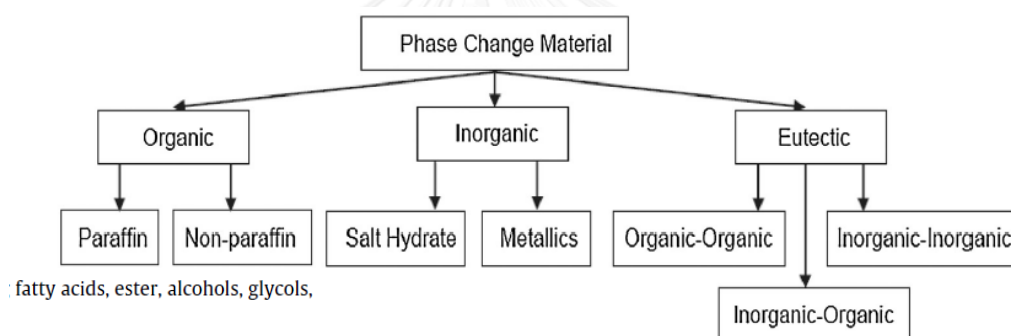
7. ไม่เป็นพิษ หรือมีผลกระทบต่อระบบที่ใช้งานและสิ่งแวดล้อม
8. ไม่เสื่อมสภาพเมื่อมีการหลอมเหลวหรือแข็งตัว จากการใช้งานเป็นเวลานาน
9. ในการใช้งาน สภาวะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ ปริมาตรจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่มาก

ตัวแปรสำคัญของวัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้สำหรับอาคารที่ระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ

1. ภูมิอากาศ ส่งผลต่อการคืนสภาพของ PCM
2. วิธีการบรรจุภัณฑ์ ทนต่อสภาพต่างๆ
3. ตำแหน่งและวิธีการติดตั้งในอาคาร
4. จุดประสงค์หลักในการใช้เป็นวัสดุอาคารต่างๆ
5. วัสดุที่นำมาประกอบ ควรช่วยเรื่องการถ่ายเทความร้อนได้ดี

2.6.2 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

แบ่งได้ 3 ประเภท คือ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และสารผสมยูเทติก สารอินทรีย์



ภาพที่ 2.19 ประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะแบ่งตามลักษณะของวัสดุ

ที่มา: Souayfane, Fardoun et al., 2016

1. สารอินทรีย์ (Organic) ประกอบไปด้วย สารประเภทพาราฟินและสารที่ไม่ใช่พาราฟิน เช่น กรดไขมัน แอลกอฮอล์ โกลคอล เป็นต้น โดยมีช่วงของการหลอมเหลวที่กว้าง และเหมาะสมต่อการใช้งาน มีความเสถียรและไม่เป็นพิษ ไม่ทำปฏิกิริยากับบรรจุภัณฑ์
2. สารอนินทรีย์ (Inorganic) คือสารประเภทเกลือไฮเดรต (Salt Hydrate) และโลหะ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสูง ไม่ติดไฟ มีความเสถียรต่ำระหว่างการเปลี่ยนสถานะ แต่ไม่เหมาะสมกับบรรจุภัณฑ์ประเภทโลหะเนื่องจากเกลือไฮเดรตมีน้ำเป็นองค์ประกอบซึ่งเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและเป็นสนิม
3. สารยูเทติก (Eutectics) เป็นสารผสมของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ลักษณะพิเศษคือมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าสารบริสุทธิ์ที่นำมาประกอบ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในของลักษณะทางเคมี

ผสมเพื่อต้องการค่าความร้อนแฝงที่สูงขึ้นและได้จุดหลอมเหลวที่เจาะจงเป็นค่าเดียว ต่างจากสารอินทรีย์ที่บอกอุณหภูมิการหลอมเหลวเป็นช่วง

Property	Organic Paraffin	Organic Non-Paraffin	Inorganic Salt Hydrate	Inorganic Metal Eutectic
h_f (kJ/kg)	230 - 290	120 - 240	170 - 340	30 - 90
h_{fv} ($[J/m^3] \times 10^6$)	190 - 240	140 - 430	250 - 660	300 - 800
ρ (kg/m^3)	~ 810	900 - 1800	900 - 2200	~ 8000
k ($W/m^\circ C$)	~ 0.25	~ 0.2	0.6 - 1.2	~ 20
Thermal Expansion	High	Moderate	Low	Low
Congruent Melt	Yes	Some Do	Most Do Not	Yes
Supercool	No	No	Most Do	No
Corrosion	Low	Some Are	Highly	Some Are
Toxicity	No	Some Are	Highly	Some Are

ภาพที่ 2.20 คุณสมบัติแต่ละประเภทของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

ที่มา: Souayfane, Fardoun et al., 2016

2.7 วัสดุเปลี่ยนสถานะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในอาคาร

ช่วง 30 ปีที่ผ่านมา PCM หลายชนิดเริ่มเป็นที่นิยมในการเป็นหนึ่งในวัสดุประกอบอาคาร เนื่องจากวัสดุประเภท PCM มีความสามารถในการกักเก็บความร้อน โดยที่อุณหภูมิของเปลือกอาคารคงที่ไว้ได้ ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย และคงสภาวะน่าสบายสำหรับผู้ใช้อาคารได้นานขึ้น โดยประเภทสารอินทรีย์ เช่น พาราฟิน เป็นที่นิยมใช้กับวัสดุอาคารมากที่สุด รองลงมาคือ สารอนินทรีย์ (Salt Hydrate) และสารยูเทคติก ตามลำดับ (Souayfane, Fardoun et al., 2016) ถึงแม้สารประเภท Salt Hydrate จะมี Heat of fusion สูงกว่าสารอินทรีย์ แต่มีความนิยมน้อยกว่าเพราะว่า หลังจากกระบวนการเปลี่ยนสถานะมีการแยกตัวของสารการได้ง่าย และปลอดภัยต่ำกว่า

2.7.1 พาราฟิน (Paraffin)

พาราฟินเป็นที่นิยมสูงที่สุดนั้นเนื่องจาก เป็นผลผลิตที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และเป็นสารในประเภท alkane hydrocarbon ซึ่งประสิทธิภาพของพาราฟินเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางโมเลกุล ($C_n H_{2n+2}$) คือ ยิ่งจำนวนคาร์บอน (Carbon atom) ในสายโมเลกุลมากอุณหภูมิของการหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการหลอมเหลวจะมากขึ้นตาม จำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 15 ขึ้นไปจะมีสถานะเป็นของแข็ง (Wax) (Dutt Sharma, 2004)

คุณสมบัติของพาราฟิน

1. มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวกว้างสามารถเลือกใช้ได้ง่าย
2. ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลง มีความเสถียรในการเปลี่ยนแปลงสถานะภายใต้อุณหภูมิ 500 °C
3. ไม่เกิดการระเหยเมื่อเปลี่ยนสถานะ
4. มีความปลอดภัยในการใช้งาน ไม่เป็นพิษ
5. ราคาถูกและได้ง่ายในท้องถิ่น
6. ใช้เวลานานในการคืนสถานะเป็นของแข็งในช่วงกลางคืน
(อุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าจุดหลอมเหลว)
7. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ

ตารางที่ 2.3 แสดงจุดหลอมเหลว (Melting point) และความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) ของพาราฟิน

No. of carbon atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group ^a
17	21.7	213	II
18	28	244	I
19	32	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44	249	II

^a Group I, ถูกใช้มากที่สุด; Group II, ถูกใช้มาก

ที่มา: Dutt Sharma, 2004

2.7.2 เกลือไฮเดรต (Salt Hydrate)

เกลือที่มีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบ (Crystal Structure) หรือเรียกว่าไอออนของเกลือ มีช่วงของอุณหภูมิหลอมเหลวชัดเจนและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงเมื่อเทียบกับ PCM ชนิดอื่นๆ แต่ขาดความเสถียร ระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น แคลเซียมคลอไรด์ และโซเดียมคาร์บอเนต

2.8 ลักษณะบรรจุกัมมันต์ของวัสดุเปลี่ยนสถานะ

นอกเหนือจากคุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนสถานะที่เป็นตัวแปรสำคัญ ลักษณะบรรจุกัมมันต์มีผลสำหรับประสิทธิภาพการทำงานของ PCM เช่นกัน เนื่องจากเป็นตัวกลางที่ช่วยในการถ่ายเทความร้อน ส่งเสริมประสิทธิภาพทางด้านคุณสมบัติทางความร้อนของ PCM และสะดวกต่อการใช้งาน โดยเริ่มแรกมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการรบกวนจากภายนอกในสภาวะที่เกิดกระบวนการเปลี่ยนสถานะ

2.8.1 บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในอาคาร

1. โลหะ นิยมใช้เมื่อต้องการให้มีการถ่ายเทความร้อนสูง โดยทั่วไปเป็นลักษณะของกล่องอลูมิเนียม เหมาะสมทั้ง PCM ประเภทสารอินทรีย์และอินทรีย์ พื้นผิวทำความสะอาดได้ง่าย กำหนดรูปทรงของบรรจุภัณฑ์ได้หลากหลาย
2. พลาสติก นิยมใช้มากที่สุดสำหรับการสะสมความเย็น มีราคาถูกกว่าโลหะ เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องใช้จำนวนมาก ทั่วไปมักใช้พลาสติกชนิด โพลีโพรพิลีน (Polypropylene - PP) และ โพลีโอเลฟิน (Polyolefin)



ภาพที่ 2.21 บรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในอาคาร;

1. ขวดพลาสติกโพลีโพรพิลีน 2. ถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน 3. ถุงอลูมิเนียมฟอยล์ 4. กล่องโลหะ (ซ้าย-ขวา) ที่มา: <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/makroverkasplung-k%C3%BChlakkus>

2.8.2 ปัจจัยสำคัญในการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของแผ่นบรรจุ PCM และระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงสถานะ มีลักษณะแปรผันตรงกัน (Darzi, Moosania et al., 2013) และจากงานวิจัยของ Xu, Zhang et al., 2005 พบว่าประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับลักษณะวัสดุปิดผิวและระยะห่างของช่องว่างอากาศด้านในกับวัสดุปิดผิว (Air Gap)

2.8.3 ข้อควรระวังของบรรจุภัณฑ์ที่ผลต่อ PCM

บรรจุภัณฑ์ควรเป็นระบบปิดสมบูรณ์ เพื่อป้องกันการรั่วไหลเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว

1. แก๊สไฮเดรต (สารอินทรีย์)

มักจะเกิดปฏิกิริยากับโลหะ เนื่องจากมีส่วนประกอบของน้ำอาจเกิดการระเหยออกมา นอกผิวบรรจุภัณฑ์ได้ ไม่ควรมีอุณหภูมิผิวสูงกว่า 15°K ของจุดหลอมเหลว เนื่องจากอาจส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน

2. สารอินทรีย์

มีความเสถียรและไม่ละลายในน้ำ แต่มักติดไฟ ควรเพิ่มเติมวัสดุกันไฟ ส่วนใหญ่มักเกิดปฏิกิริยากับพลาสติกจึงไม่ควรใช้อุณหภูมิผิวของพลาสติกสูงกว่า 30°K ของจุดหลอมเหลว (ที่มา: <https://www.rubitherm.eu/en/productCategories.html>)

2.9 วัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อใช้กับอาคาร

การประยุกต์ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะในบริบทของการประหยัดพลังงานเมื่อใช้กับอาคาร

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสะสมพลังงานความร้อนในอาคารโดยใช้ PCM มีการพัฒนาขึ้นมาก เป็นแนวทางหนึ่งของการลดความต้องการใช้พลังงานในอาคารและลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า มีสามารถในการสะสมพลังงานความร้อน PCM ช่วยให้อุณหภูมิภายในมีค่าคงที่ รู้สึกถึงสภาวะน่าสบายได้นานขึ้น มักใช้กับเปลือกอาคาร เพราะเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนทั้งภายในและภายนอก มีความสามารถในการรับ (ในเวลากลางวัน) และคืนความร้อน (ในเวลากลางคืน) สำหรับประเทศเขตร้อน

ความรู้สึกสบายของมนุษย์ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น อัตราการทำปฏิกิริยาเคมีในร่างกายซึ่งจะทำให้ร่างกายมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปกติร่างกายจะมีอุณหภูมิ 37.5°C เมื่อทำกิจกรรมต่างๆจะเกิดความร้อนในรูปความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงประมาณ 176 W ถ้าหากพลังงานไม่สามารถถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมรอบตัว เกิดความรู้สึกไม่สบาย (ที่มา: <http://bhrd.dede.go.th/displaycenter>, 15 ต.ค. 2559)



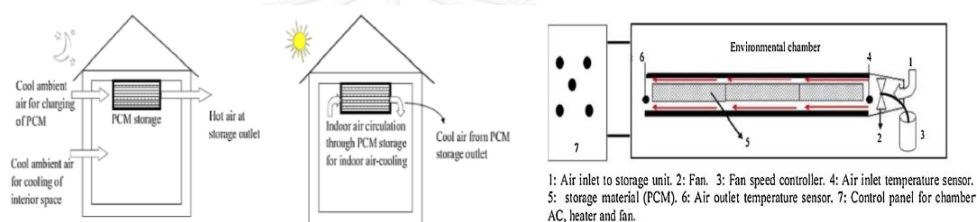
ภาพที่ 2.22 การสะสมความร้อนของ PCM ในอาคารสำนักงานและระบายความร้อนด้วยการถ่ายเทอากาศ

ที่มา: http://www.pcmproducts.net/Passive_Enclosure_Cooling.htm

2.9.1 ตัวอย่างระบบการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเมื่อทำหน้าที่ทำความเย็น

1. Free Cooling System

เป็นหน่วยสะสมพลังงานแยก (separate storage unit) อาศัยการหมุนเวียนอากาศในห้องผ่านหน่วยสะสม เพื่อให้อากาศเย็นเข้าสู่ห้อง โดยใช้เครื่องกล ประสิทธิภาพการทำงานขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิในเวลากลางวัน (Raj and Velraj, 2010) โดยตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ คือ อัตราการไหลเวียนของลม อุณหภูมิของอากาศที่เดิมเข้าและออก คุณสมบัติด้วยความร้อน ความหนาของบรรจุภัณฑ์ (Butala and Stritih, 2009) ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของแผ่นบรรจุ PCM และระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงสถานะ มีลักษณะแปรผันตรงกัน (Darzi, Moosania et al., 2013) และจากการทดลองประสิทธิภาพการทำงานในเขตร้อนแห้ง พบว่าการคืนสภาพของแข็งเร็วขึ้นได้ เมื่ออัตราการไหลเวียนของอากาศ สูงขึ้น และอุณหภูมิภายนอกตอนกลางคืนลดต่ำกว่า (Waqas and Kumar, 2011)



ภาพที่ 2.23 การทำงานพื้นฐานของระบบแยกเดี่ยว (ซ้าย)

ภาพที่ 2.24 การทดลองโดยอาศัยการทำงานด้วยพัดลม (ขวา)

ที่มา : Waqas and Kumar, 2011

2. Solar cooling system

ระบบทำงานเป็นส่วนหนึ่งของ chiller ช่วยดูดซับความร้อน ลดภาระทำความเย็น เป็นทางเลือกที่ใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศที่มีอยู่เดิมได้ สามารถลดการต้องการพลังงานทำความเย็น ในประเทศเขตร้อนสามารถลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าในช่วง on peak hour จึงลดมลพิษที่จะเกิดต่อสิ่งแวดล้อม

จากการทดลอง (Gil, Oró et al., 2014) ใช้ ไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) เป็นสารประเภทอโรมาติกอินทรีย์ (Aromatic organic compound สารเคมีที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมหลายชนิดเช่น พลาสติก) มีจุดหลอมเหลวที่ 166 °C -173 °C เมื่อใช้งานร่วมกับ solar cooling refrigeration ที่ประเทศสเปน เป็นลักษณะถังที่ช่วยสะสมความร้อนจาก chiller และ Fresnel Collectors พบว่า หากใช้ถังที่มีแผง ลดเวลากระบวนการเปลี่ยนสถานะ ค่าถ่ายเทความร้อนดีขึ้น อัตราการถ่ายเทพลังงานสูงขึ้น ทำให้สะสมพลังงานได้เร็วขึ้น แต่มีการลงทุนที่สูงขึ้น ปริมาณการสะสมพลังงานลดลง



ภาพที่ 2.25 ลักษณะแทงค์บรรจ PCM ในระบบ Solar cooling (ซ้าย)

ภาพที่ 2.26 ระบบ Solar cooling ที่ใช้แทงค์บรรจ PCM ที่มหาลัยเซวิลลา ประเทศสเปน (ขวา)
ที่มา : Gil, Oró et al., 2014

3. Air conditioning systems

จากการทดลองและจำลอง (Chaiyat, 2015) เมื่อบรรจ PCM ในท่อ return air ของระบบปรับอากาศ ที่จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ RT20 มีจุดหลอมเหลวที่ 19-22°C บรรจอยู่ในลูกบอลพลาสติกจำนวนมาก โดยวางพื้นสูง 40 ซม. เพื่อลดอุณหภูมิของอากาศที่เกิดการระเหยใน FCU พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศได้ ลดความต้องการการใช้ระบบปรับอากาศ ประหยัดการพลังงานไฟฟ้าเพื่อปรับอากาศลงถึงร้อยละ 9 มีระยะเวลาคืนทุนที่ 4.12 ปี

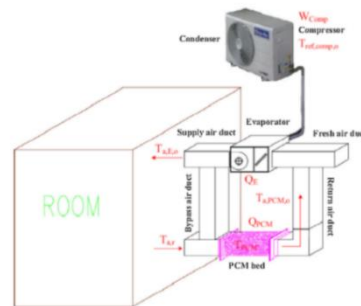


Fig. 22. Prototype of the air-conditioner integrated with the PCM bed [52].

ภาพที่ 2.27 รูปแบบตัวอย่างของการใช้ PCM ที่ท่อคืนอากาศ (Return Air Duct)

ที่มา : Chaiyat, 2015

4. Passive system

ระบบสามารถระบายความร้อนได้ด้วยตัววัสดุเองอย่างมีประสิทธิภาพ

1. Integrated (รวมเป็นหนึ่งเดียวกับวัสดุ)

เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุประกอบอาคาร เช่น พื้น ผนัง หลังคา การทดลอง Xu, Zhang et al., 2005 ทดลองพื้นที่ผสม PCM ต่างๆ และระบายความร้อนด้วย Passive system พบว่าควรใช้กับบริเวณที่ได้รับรังสีความร้อนโดยตรง ประสิทธิภาพอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ วัสดุปิดผิว ความหนาของสาร PCM อุณหภูมิห้องเท่ากับจุดหลอมเหลว

ของ PCM และวัสดุปิดผิวด้านที่ติดกับช่องว่างอากาศด้านใน และควรมีค่าความจุความร้อนมากกว่า 120 kJ/kg (Heat of fusion)

2. Component (วัสดุประกอบอาคาร)

เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ผลิตจากโรงงาน มีความสะดวกในการใช้งาน บริษัท Cosella-Dörken ประเทศแคนาดา ได้ผลิต DELTA-COOL 24 ใช้ผ้าแขวนเพดาน ในสำนักงาน ขนาด 610 x 610x 71 มม. ใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrates บรรจุอยู่ใน polypropylene ที่หนา 15 มม. มีจุดหลอมเหลวที่ 22-28 °C แต่ละแผ่นผ้าสะสมพลังงานความร้อนได้ 62.6 kWh ค่าความร้อนแฝง (พลังงานการเปลี่ยนแปลงสถานะ) 158 kJ/kg และสามารถเก็บความเย็นได้ถึง 44 Wh/kg พบว่า ในสภาวะที่ห้องมีความร้อนสูงสุด อุณหภูมิห้องยังมีความเย็น

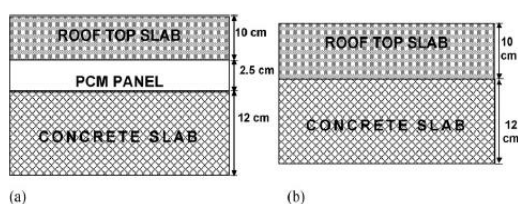


ภาพที่ 2.28 ด้านผิวหน้าของ DELTA-COOL 24 (ซ้าย)

ภาพที่ 2.29 ผลิตภัณฑ์ PCM เมื่อใช้กับระบบฝ้า (ขวา)

ที่มา : http://www.sustainablesteel.eu/p/556/pcm_products.html

Pasupathy and Velraj., 2008 ทดลองใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ 2 ชั้น ที่ทำงานร่วมกับแผ่นมุงหลังคา ในเมือง เซนไน ประเทศอินเดีย ที่มีสภาพอากาศร้อนชื้น โดยใช้สารผสมยูเทคติกอนินทรีย์ ประเภท salts hydrated พบว่าเมื่อเทียบกับห้องปกติ อุณหภูมิภายในห้องเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าและเหมาะสมกับการใช้ทุกฤดู โดย PCM ชั้นใกล้ภายนอก ควร มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 6– 7°C ในช่วงฤดูร้อน และ PCM ชั้นในห้องมี อุณหภูมิจุดหลอมเหลวใกล้เคียงกับอุณหภูมิภายในห้อง



ภาพที่ 2.30 รูปตัดของหลังคาห้องทดสอบ (a) มี PCM (b) ไม่มี PCM (ขวา)

ที่มา : Pasupathy and Velraj., 2008

5. Active System

คือ ระบบที่อาศัยเครื่องกลเข้ามาช่วยถ่ายความร้อน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในภูมิอากาศที่ช่วงต่างของอุณหภูมิกลางวันและกลางคืนต่างกันไม่มาก

1. ใช้อากาศในการถ่ายเทความร้อน

จากการทดสอบ เมื่อวัสดุเปลี่ยนสถานะทำหน้าที่เป็นฝ้าเพดาน ของอาคาร สำนักงาน ในประเทศเยอรมนี และเพิ่มพัดลมขนาดเล็กบนฝ้าเพดาน พบว่าเพิ่ม ประสิทธิภาพการสะสมและระบายความร้อน (Harald Mehling, 2008)



ภาพที่ 2.31 แผ่นฝ้า ILKATHERM; 1.แผ่นปิดเหล็ก, 2. โฟม PU, 3. ท่อลม, 4.แผ่นยิปซัม PCM (บน-ล่าง)

ที่มา: Harald Mehling, 2008

2. ใช้ของเหลวในการถ่ายเทความร้อน

การระบายความร้อนผ่านของไหล เช่น น้ำ หรือสารเคมี เพื่อช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ในช่วงที่ PCM มีการคายความร้อนเพื่อคืนสถานะเป็น ของแข็ง เหมือนการระบายโดยอากาศแต่ใช้ของไหลให้ไหลผ่าน PCM เพื่อนำและพา ความร้อนออกไป ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องตอนกลางคืนไม่เพิ่มขึ้นและช่วยให้ PCM คืนสถานะเร็วขึ้น

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Passive system และ Active system

Passive system	Active system
1. การทำงานขึ้นกับอุณหภูมิภายนอกทั้งหมด	1. ช่วยการคายความร้อนในตอนกลางคืน (คืนสภาพเป็นของแข็งเร็วขึ้นได้)
2. ลมธรรมชาติมีผลมาก	2. เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ PCM
3. สภาพอากาศในแต่ละวันส่งผลมาก	3. ต้องใช้พลังงานเพิ่มในการดำเนินเครื่องกล
4. การสะสมความร้อนได้ปริมาณน้อยกว่า	4. ประสิทธิภาพการคายความร้อนมากกว่า <ul style="list-style-type: none"> ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเวียนของลม ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศที่เติมเข้า
5. ประสิทธิภาพการคายความร้อนต่ำ (ช่วงฤดูร้อน ระบบคายความร้อนมีปัญหา)	5. สามารถควบคุมการทำงานได้
6. ควรติดตั้งบริเวณที่รับรังสีความร้อนโดยตรง	
7. PCM ไม่ควรหนามากกว่า 20-25 มม.	
8. Heat of fusion ควรมากกว่า 120 kJ/ kg	

ที่มา : Souayfane, Fardoun et al., 2016

การออกแบบเพื่อป้องกันความร้อนในอาคารด้วยวิธีธรรมชาติ นับเป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ระบายความร้อน โดยที่ไม่เพิ่มการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายของระบบอาคาร วิธีพื้นฐานที่มักนิยมใช้คือ การเลือกใช้วัสดุมวลอุณหภาพซึ่งเป็นเพียงการชะลอความร้อนเข้ามาในอาคารช้าลงเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการออกแบบให้หลังคาซึ่งมีบ่อน้ำด้านบน โดยสะสมอยู่ในรูปความร้อนแฝงจนเกิดการระเหย ซึ่งในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะอุณหภูมิจะคงที่ ทำให้อุณหภูมิในห้องคงที่ได้ยาวนานขึ้น แต่ปัญหาของระบบนี้คือ น้ำมีน้ำหนักมากและมีโอกาสสูงในการรั่วไหล ทำให้ในปัจจุบันมีวัสดุสมัยใหม่ที่สามารถเปลี่ยนสถานะได้และมีขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานมากกว่า ใช้ทดแทนหลังคาบ่อน้ำได้ซึ่งเรียกว่า วัสดุเปลี่ยนสถานะ (PCM)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่ควรพิจารณาเมื่อเลือกใช้สาร PCM ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อน โดยที่อุณหภูมิของเปลือกอาคารคงที่ไว้ได้ ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย และคงสภาวะน่าสบายสำหรับผู้ใช้อาคารได้นานขึ้น คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K value) มีค่ามากเวลากลางคืนและมีค่าน้อยเวลากลางวัน ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) พลังงานที่ใช้เปลี่ยนสถานะสูง (Heat of fusion) ความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ ค่าความจุความร้อน ไม่ควรต่ำกว่า 120 kJ/ kg (Xu, Zhang et al., 2005) และปัจจัยสำคัญคือ จุดหลอมเหลว ควรมีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิภายในห้องและสภาวะน่าสบาย 22-27 °C (เมื่อติดตั้งภายในห้อง) หรือสอดคล้องกับภูมิอากาศเมื่อติดตั้งภายนอกและควรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 6-7 °C ในช่วงฤดูร้อน (Pasupathy and Velraj, 2008) หากใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ควรใช้กับบริเวณที่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง และลักษณะบรรจุภัณฑ์ ควรคำนึงถึง ลักษณะวัสดุปิดผิว ระยะห่างของช่องว่างอากาศด้านในกับวัสดุปิดผิว และ ความหนาของบรรจุภัณฑ์ (Butala and Stritih, 2009)

“พาราฟิน” คือสารประเภทอินทรีย์ ที่นิยมใช้กับวัสดุอาคารมากที่สุดและ Salt Hydrate สารประเภทอนินทรีย์และสารยูเทติก ตามลำดับ (Souayfane, Fardoun et al., 2016) เพราะมีจุดอุณหภูมิกว้างสามารถเลือกใช้ได้ง่าย มีความเสถียรในการเปลี่ยนแปลงสถานะ มีความปลอดภัยในการใช้งาน ราคาถูกและได้ง่ายในท้องถิ่นและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ แต่จุดบกพร่องของการใช้เวลานานเพื่อคืนสถานะเป็นของแข็งในช่วงกลางคืน เนื่องจากอากาศของประเทศไทยในตอนกลางคืนมีความชื้นสูง การคายความร้อนสู่บรรยากาศจึงต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิในอาคารไม่ลดต่ำลงมากนักในเวลากลางคืน

ดังนั้นการเลือกใช้พาราฟินเป็นวัสดุหน่วงความร้อนให้กับอาคาร และระบายความร้อนด้วยวิธีธรรมชาติ จะสามารถประหยัดพลังงานโดยไม่ต้องพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าเพิ่มได้ แต่ข้อเสียคือจะทำให้การคืนสภาพเกิดช้าลง จึงต้องศึกษาวิธีต่างๆเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับพาราฟิน เช่น การเลือกใช้คู่กับ PCM ที่มี Heat of fusion สูงเข้ามาผสม ลักษณะบรรจุภัณฑ์ และการติดตั้งใกล้บริเวณภายนอก เพื่อที่จะสามารถช่วยในถ่ายเทความร้อนได้ดี ทั้งนี้สิ่งที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิอากาศร้อนชื้น ได้แก่ อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวควรมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิอากาศของประเทศไทย

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 แนวทางการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาของประสิทธิภาพของพาราฟินเมื่อใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนประเภทหลังคาด้วยระบบ Passive ในอาคารประเภทใช้งานกลางวัน โดยการทดลองผ่านการทดสอบในสภาพภูมิอากาศจริง ทำการทดลองขั้นที่ 1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่เปลี่ยนไปเมื่อนำไปผสมสารประเภท Salt Hydrate เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมความร้อนโดยใช้วิธีเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดลองที่มีค่าน้อยที่สุด การทดลองขั้นที่ 2 ทดสอบประสิทธิภาพของพาราฟินเมื่ออยู่ในบรรจุภัณฑ์ต่างๆที่สามารถนำไปใช้ได้จริงเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาจริงที่ใช้ในท้องตลาด เพื่อสร้างแนวทางแก้ไขจุดบกพร่องช่วงการคายความร้อนสู่บรรยากาศได้ต่ำและใช้เวลานาน เนื่องจากอากาศของประเทศไทยในตอนกลางคืนที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้อุณหภูมิในอาคารไม่ลดต่ำลงไม่มากเวลากลางคืนและคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุจากค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองที่ 2 คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และค่าการต้านความร้อนเฉลี่ย (R-value) ของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ และการทดลองขั้นที่ 3 จำลองการใช้งานของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในการป้องกันความร้อน ในอาคารปรับอากาศเวลากลางวันเป็นส่วนใหญ่ ผ่านโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้ค่าที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 2 และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม (Electric End Use) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี (kWh/Year) ตลอดจนคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และความเป็นได้ในการใช้งานจริง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยส่วนการทดลองจริง คือ การทดลองขั้นที่ 1 และการทดลองขั้นที่ 2 ใช้เครื่องมือ 12 Channels Temperature Recorder และ HOBO Temp/RH/2 External Channel Data Logger U12-013 และ ในการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมใช้โปรแกรม VisualDOE 4.1



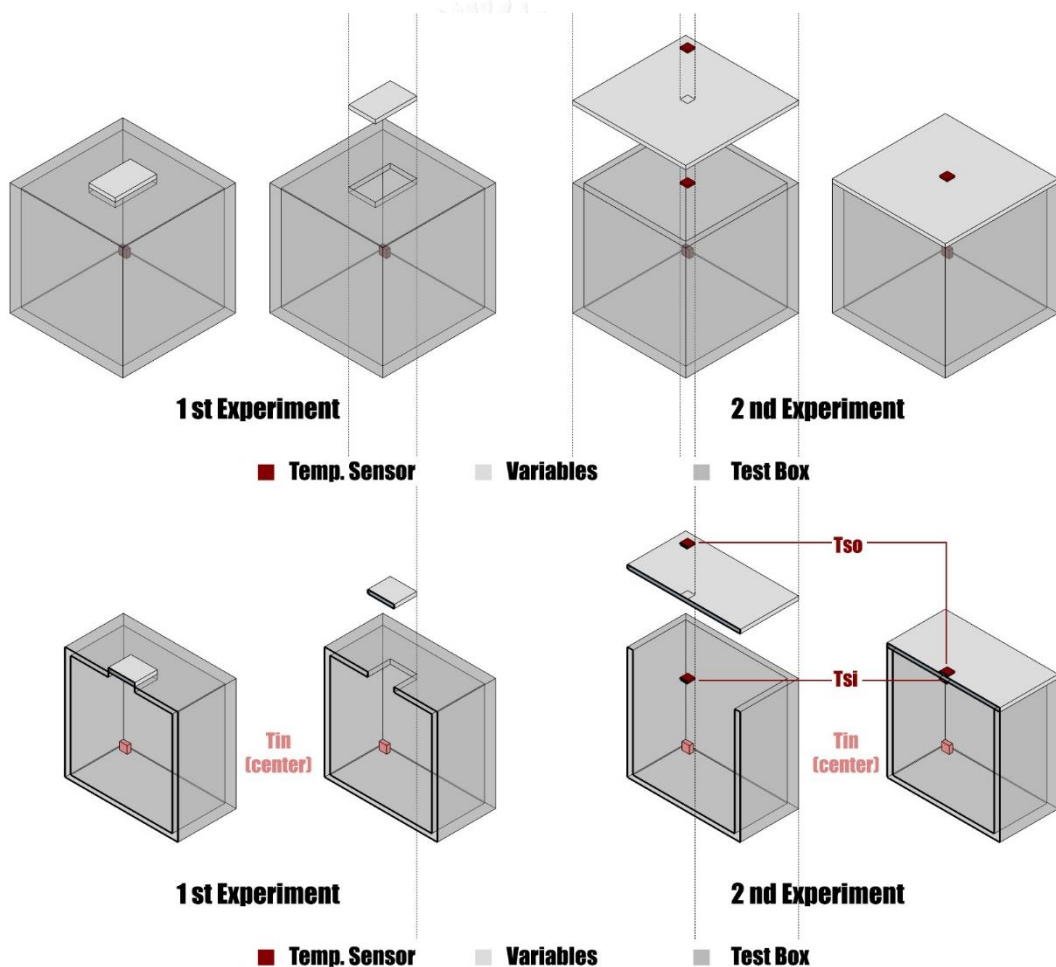
ภาพที่ 3.1 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder (ซ้าย)
และ HOBO Temp/RH/2 External Channel Data Logger U12-013 (ขวา)

3.3 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิและลักษณะกล่องทดลองที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

กล่องทดลองขนาด 60x60x60 ซม. ทำจากโพลีโพลีเอทิลีนหนา 1 นิ้ว ปิดทับด้วยแผ่นเหล็กสีขาวยุติทั้งกล่องทดลอง ทั้ง 3 ด้าน และติดตั้ง PCM ที่ต้องการทดสอบด้านบนกล่องทดลอง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกล่องทดลองของแต่ละตัวแปร เพื่อทราบความสามารถในการหน่วงความร้อนของ PCM ในบรรจุกฎณ์ต่างๆ โดยกล่องทดลองตั้งอยู่ที่ กรุงเทพมหานคร ในบริเวณที่โล่งได้รับแดดทั้งวันทดลองเดือน ม.ค.-พ.ค. เก็บบันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาทีตั้งแต่ 6.00 น.- 22.00 น. ซึ่งวัดอุณหภูมิจาก 4 จุดของแต่ละกล่องทดลองได้แก่

อุณหภูมิอากาศ (T_o)
อุณหภูมิผิวภายนอก (T_{so})

อุณหภูมิในกล่องทดลอง (T_{in})
อุณหภูมิผิวภายใน (T_{si})

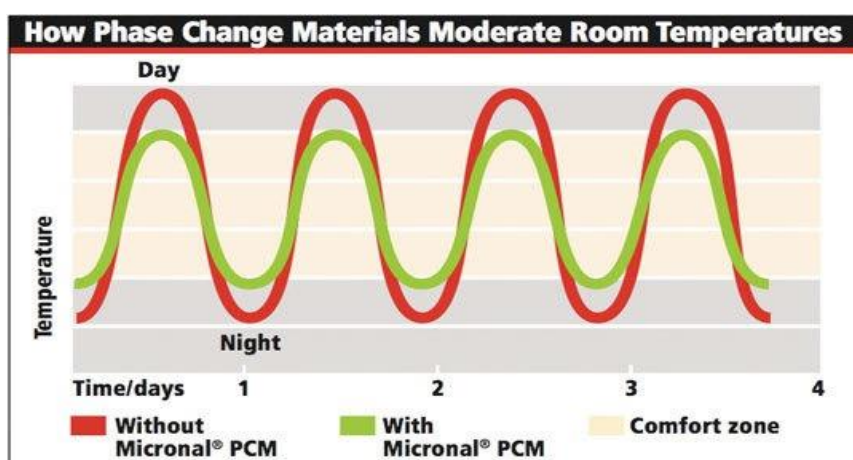


ภาพที่ 3.2 ตำแหน่งจุดวัดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองและตำแหน่งการวางวัสดุทดสอบของการทดลองชั้นที่ 1 (ซ้าย) และชั้นที่ 2 (ขวา)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 กำหนดสมมติฐานในงานวิจัย

พาราฟินซึ่งเป็นวัสดุเปลี่ยนสถานะ เมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนที่หลังคาจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในอาคาร ส่งเสริมให้คงอุณหภูมิที่น่าสบายได้ยาวนานขึ้น มีความสามารถในการลดความต้องการใช้พลังงานในการทำความเย็นที่สามารถช่วยประหยัดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของอาคาร มากกว่าวัสดุมวลอุณหภาพและวัสดุหลังคาทั่วไป ตลอดจนมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งานเป็นวัสดุมวลสารหลังคา



ภาพที่ 3.3 เปรียบเทียบการทำงานของ PCM กับอุณหภูมิที่น่าสบายในอาคาร

ที่มา : <http://www.apartmenttherapy.com/on-the-horizon-building-with-p-124682>

3.4.2 การทดลองขั้นที่ 1: เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน

- ตัวแปรต้น
- (1) พาราฟิน (PF);
 - (2) พาราฟินผสมแคลเซียมคลอไรด์ (PF+CaCl₂);
 - (3) พาราฟินผสมโซเดียมคาร์บอเนต (PF+Na₂CO₃);
 - (4) พาราฟินผสมกลีเซอริน (PF+Glycerin);
 - (5) น้ำ (Water)

คัดเลือก PCM จากการทบทวนวรรณกรรมโดยคัดเลือก PCM ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอุณหภูมิอากาศของประเทศไทย (ตารางที่ 3.1) และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของพาราฟิน จึงทดลองผสมกับ PCM ชนิดอื่นที่มีจุดหลอมเหลวที่ใกล้เคียง โดยใช้อัตราผสม 1: 1 (Zalba, Marín et al., 2004)

ตารางที่ 3.1 แสดงสาร PCM ที่มีจุดหลอมเหลวใกล้เคียงช่วงอากาศของประเทศไทย

Materials	Organic	Melting point (°C)	Latent Heat (J/kg)	Materials	Organic	Melting point (°C)	Latent Heat (J/kg)
1. Paraffin	Y	38-42	222	4. Calcium Chloride (CaCl ₂ · 6H ₂ O)	N	29	190.8
2. Water	Y	0-100	334	5. Sodium Carbonate (Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O)	N	32-36	246.5
3. Glycerin	Y	18.9	198.7				

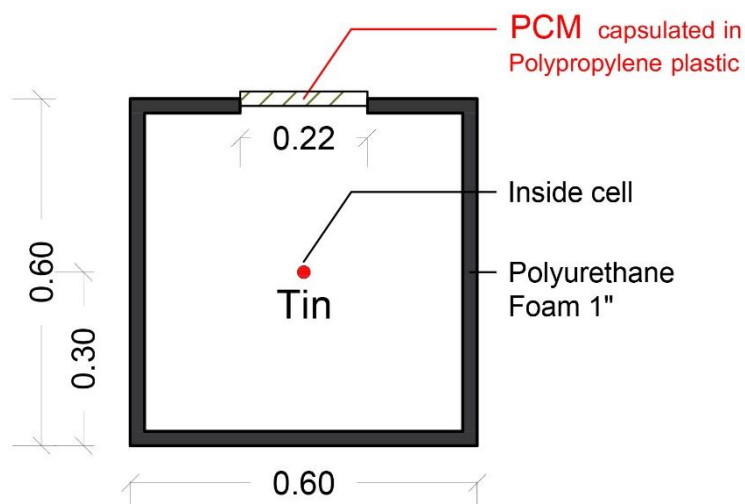
ที่มา: Dutt Sharma, 2004

การทดลองเปรียบเทียบครั้งละ 2 ตัวแปร;

- (a) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมแคลเซียมคลอไรด์ (PF + CaCl₂);
- (b) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมโซเดียมคาร์บอเนต (PF + Na₂CO₃);
- (c) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมกลีเซอริน (PF + Glycerin);
- (d) พาราฟิน (PF) กับ น้ำ (Water)

ตัวแปรตาม อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ

ตัวควบคุม บรรจุในบรรจุภัณฑ์ประเภทโพลีโพรพิลีนเป็นบรรจุภัณฑ์ทั่วไปของสารทำความเย็นขนาด 14x22x2 ซม. น้ำหนัก 200 กรัม



ภาพที่ 3.4 รูปตัดกล่องทดลองและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของการทดลองขั้นที่ 1



ภาพที่ 3.5 กล่องทดลอง (ซ้าย) และตำแหน่งการวางสารทดลองบนกล่องทดลอง (ขวา)



ภาพที่ 3.6 ลักษณะในบรรจุภัณฑ์ประเภทโพลีโพรพิลีนที่ใช้บรรจุสาร PCM

3.4.3 การทดลองขั้นที่ 2: ประสิทธิภาพของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ เมื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุหลังคา

ตัวแปรต้น คัดเลือกจากการทบทวนวรรณกรรม ที่มีคุณสมบัติต่างกันเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาทั่วไป

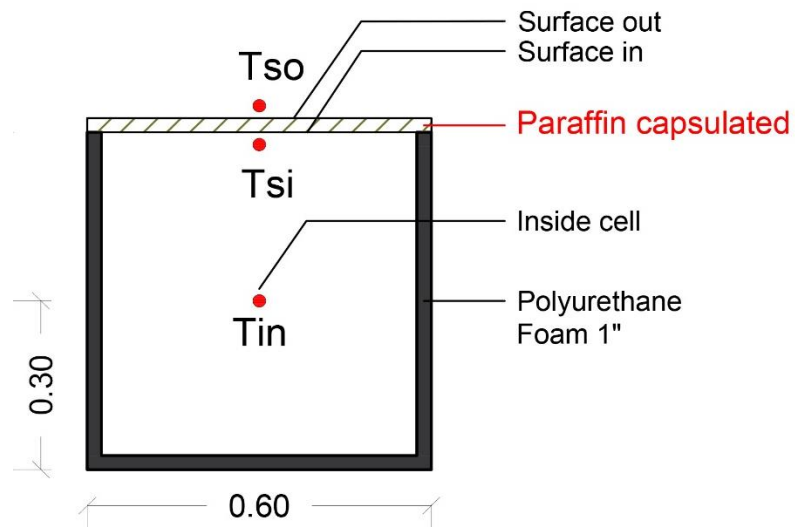
- (1) กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS);
- (2) กล่องสแตนเลส (SL);
- (3) กล่องเมทัลชีท (MS);
- (4) เมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่าง (MF);
- (5) แผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม (CC)

การทดลองเปรียบเทียบครั้งละ 2 ตัวแปร;

- (e) กล่องสแตนเลสกับกล่องพลาสติกโพลีสไตรีน;
- (f) กล่องสแตนเลส กับกล่องเมทัลชีท;
- (g) กล่องเมทัลชีทกับเมทัลชีทกรุพอยล์;
- (h) เมทัลชีทกรุพอยล์กับแผ่นคอนกรีต;
- (i) กล่องเมทัลชีทวางบนแผ่นคอนกรีตกับแผ่นคอนกรีต (MS on CC);
- (j) กล่องเมทัลชีทวางใต้แผ่นคอนกรีตกับแผ่นคอนกรีต (CC on MS)

ตัวแปรตาม อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ K Value และ R Value

ตัวควบคุม บรรจุภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิด ขนาดภายใน 60x60x2 ซม. บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม



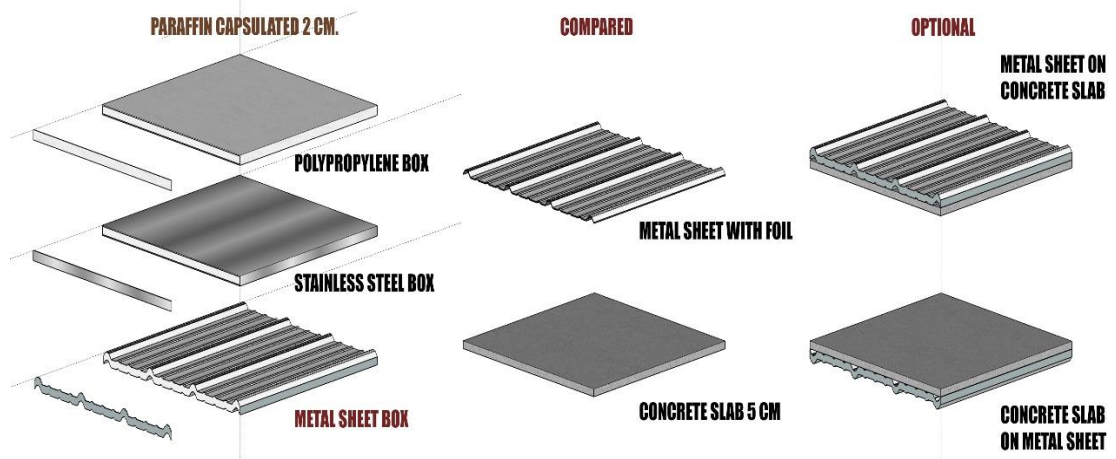
ภาพที่ 3.7 รูปตัดกล่องทดลองและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของการทดลองขั้นที่ 2



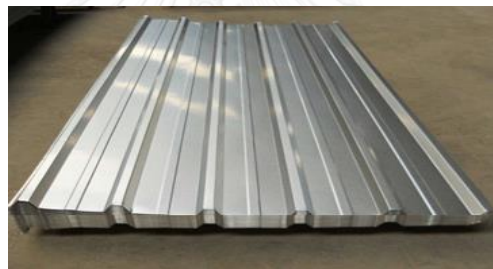
ภาพที่ 3.8 รูปกล่องทดลอง



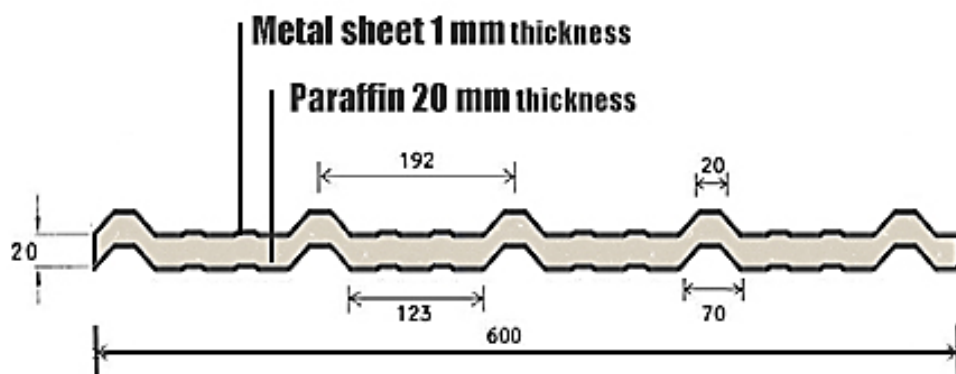
ภาพที่ 3.9 ตัวแปรการทดลองที่ 2; 1.กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS); 2.กล่องสแตนเลส (SL); 3.กล่องเมทัลชีท (MS); 4.เมทัลชีทกรูพอยล์ด้านล้าง (MF); 5.แผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม (CC) (ซ้าย-ขวา)



ภาพที่ 3.10 ตัวแปรบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน (ซ้าย), วัสดุหลังคาที่เปรียบเทียบ (กลาง), และกล่องเมทัลชีทใช้งานร่วมกับแผ่นคอนกรีต (ขวา)



ภาพที่ 3.11 กล่องเมทัลชีท ขนาด 60x60x2.20 ซม.



ภาพที่ 3.12 รูปตัดกล่องเมทัลชีท

3.5 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการจำลอง โปรแกรม VisualDOE 4.1

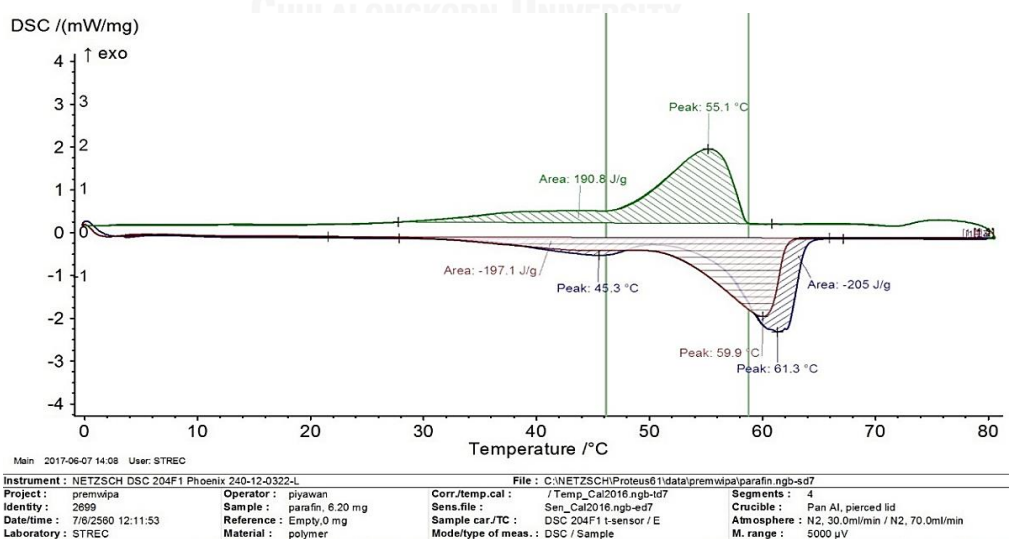
โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณผลการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็นในอาคาร สามารถคำนวณการใช้พลังงานแยกตามประเภทของรายชั่วโมงในหนึ่งปี โดยใช้ฐานข้อมูลทางสภาพอากาศ เฉลี่ยรายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งทั้งหมดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านเปลือกอาคาร ความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ อัตราการรั่วซึมของอากาศ ตลอดจนถึงปัจจัยภายในอาคาร เช่น จำนวนของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ ความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสงสว่าง

นอกจากนี้ยังรวมถึงคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าต้านทานความร้อน ของตัววัสดุเองและบรรจุภัณฑ์

3.5.1.1 คุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินที่ใช้ในการทดลอง

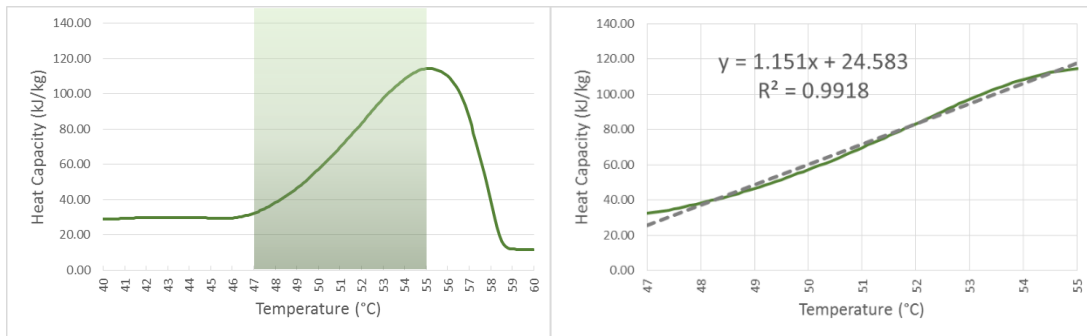
การหาค่าคุณสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิเมื่อเริ่มเปลี่ยนสถานะจนละลายทั้งหมด ($^{\circ}\text{C}$) ค่าความจุความร้อน (Heat of fusion) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) ได้จากการจำลองการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินด้วยเครื่อง differential scan calorimeter (DSC) จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยการวัดอุณหภูมิของพาราฟินเมื่อให้ความร้อน 5°C แก่พาราฟินทุกๆนาที่จนพาราฟินละลายจากของแข็งเป็นของเหลวและลดความร้อนทุก 5°C จนคืนสภาพของแข็งอีกครั้ง

ผลจากการจำลองการเปลี่ยนสถานะจากเครื่อง DSC ได้ดังภาพที่ 3.13 ซึ่งพบว่าช่วงที่กราฟเริ่มมีความชันจนชันมาก คือช่วงที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ กล่าวคือขณะที่ให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้น (แกน y) แต่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงและเพิ่มขึ้นทีละเพียงเล็กน้อยซึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดจากช่วงแรก ซึ่งหมายความว่าความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้คือความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ

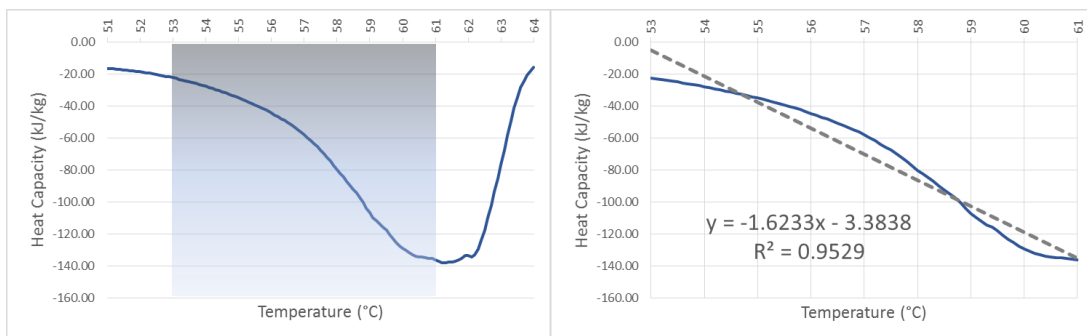


ภาพที่ 3.13 ลักษณะการเปลี่ยนสถานะของพาราฟินที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง DSC

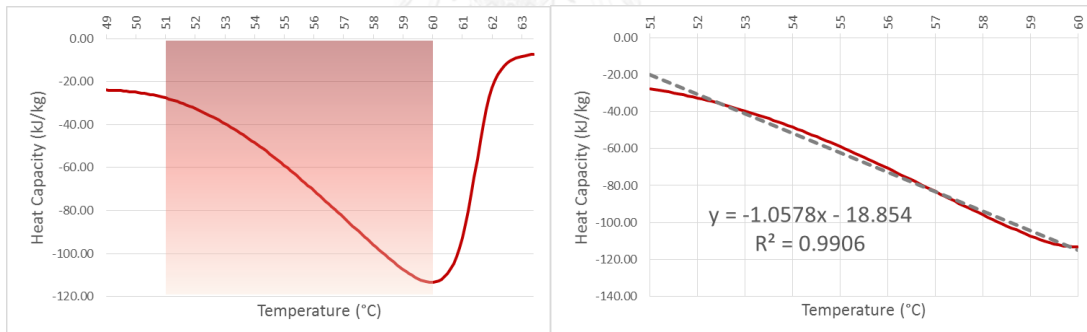
จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.14 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงให้ความร้อน)



ภาพที่ 3.15 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงลดความร้อน 1)



ภาพที่ 3.16 แบบขยายภาพที่ 3.13 เพื่อการคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ (ช่วงลดความร้อน 2)

ดังนั้นจากลักษณะการเปลี่ยนแปลงสถานะนี้สามารถคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$) ได้จากค่าความชันของกราฟ คือ ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (kJ/kg) ของแกน y และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อน ($^{\circ}\text{C}$) ของแกน x ดังสมการที่ 8 นอกจากนี้สามารถหาค่าความจุความร้อน (Heat of fusion) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟดังภาพที่ 3.13

$$C_p = \text{Energy stored} / \text{temperature} \quad (17)$$

$$\text{Slope} = Y \text{ axis} / X \text{ axis}$$

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินที่ใช้ทดลองจากการวัดด้วยเครื่อง DSC

	ช่วงอุณหภูมิเมื่อเริ่ม เปลี่ยนสถานะจน ละลายทั้งหมด (°C)	ค่าความจุความร้อน (Heat of fusion) (kJ/kg)	ค่าความจุความร้อน จำเพาะ (Cp) (kJ/kg °C)
พาราฟิน (ช่วงละลาย)	47-55	190.8	1.151
พาราฟิน (คืนสถานะ 1)	53-61	205	1.623
พาราฟิน (คืนสถานะ 2)	51-60	197.1	1.058
พาราฟิน (โดยเฉลี่ย)	47-60	197.63	1.27

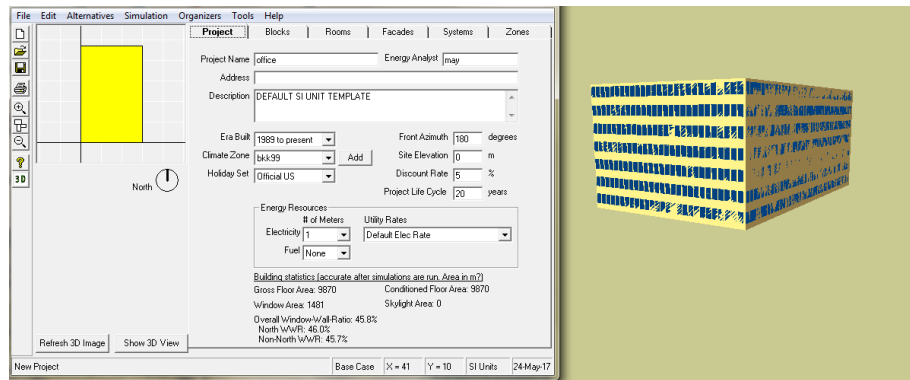
3.5.1.2 รวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารอ้างอิงที่ใช้จำลองผลการใช้พลังงาน

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลและรูปแบบอาคารจากเอกสารทางวิชาการของลักษณะอาคารมาตรฐาน ซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทยมาเป็นอาคารอ้างอิง (Reference Building) เพื่อจำลองผลการใช้พลังงานรวม เพื่อศึกษาเปรียบเทียบและประสิทธิภาพของวัสดุหลังคาในอาคาร นำข้อมูลมาวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขบางประการให้เหมาะสมกับประโยชน์ใช้สอยในปัจจุบัน

ข้อมูลที่ใส่ในโปรแกรม VisualDOE 4.1 คือ ระยะเวลาการใช้เครื่องปรับอากาศของอาคารในแต่ละวัน อุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ประเภทของเครื่องปรับอากาศ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสงสว่างในอาคารประเภทใช้งานเวลากลางวัน เช่น สำนักงาน รวมถึงตารางเวลาการใช้อาคาร และปริมาณผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่อาคาร เพื่อจำลองผลการใช้พลังงานการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอาคาร 2 ประเภทดังนี้

อาคารสำนักงาน

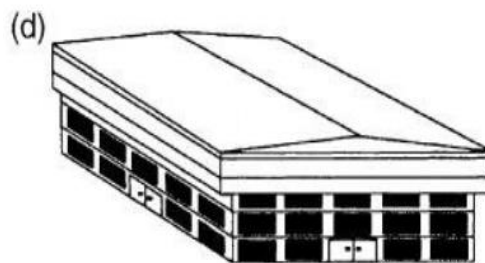
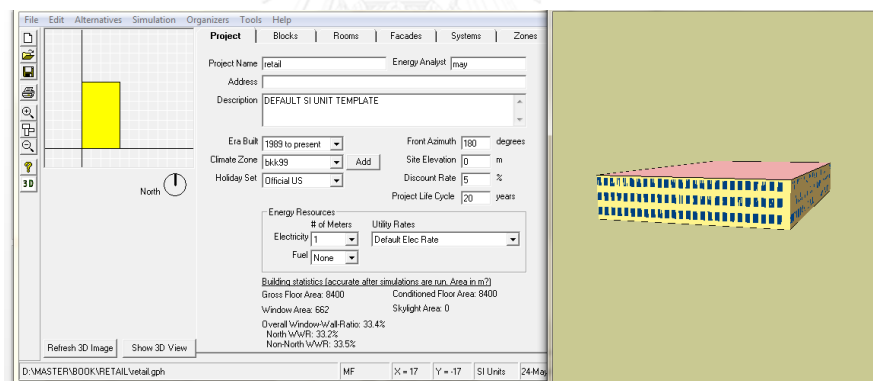
ได้จากตัวอย่างจากงานวิจัยการจัดทำมาตรฐานค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหัวของผู้ใช้อาคาร สำหรับอาคารในประเทศไทยด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นอาคารสำนักงานขนาดกลางที่พื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร มีความสูงไม่เกิน 7 ชั้น และสูงไม่เกิน 23 เมตรและหลังคาเป็นคอนกรีต ซึ่งมีจำนวนมากในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (อรรถจัน เศรษฐบุต, 2552) เพื่อใช้เป็นต้นแบบอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน



ภาพที่ 3.17 ภาพจำลองอาคารสำนักงานในโปรแกรม VisualDOE 4.1

อาคารร้านค้าปลีก

อาคารต้นแบบจากงานวิจัย The technical review of energy conservation programs for commercial and government building in Thailand (Surapong Chirattananon and Taweekun, 2003) ในงานวิจัยนี้หมายถึงกลุ่มร้านไฮเปอร์มาร์ทขนาดใหญ่ที่มีการค้าปลีก ซึ่งมีการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของการใช้งานอาคารแต่ละประเภท โดยมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันต่อเนื่องถึงเวลากลางคืน และโดยทั่วไปนิยมใช้หลังคาเมทัลชีท



ภาพที่ 3.18 ภาพจำลองอาคารร้านค้าในโปรแกรม VisualDOE 4.1

ตารางที่ 3.3 แสดงการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของการทำงานอาคารแต่ละประเภท

ข้อมูลอาคารที่ใช้ในการคำนวณหาค่าใช้จ่ายพลังงานโดยใช้โปรแกรม VisualDOE 4.1		
	อาคารสำนักงาน	อาคารร้านค้า
จำนวนชั้น	7	3
ขนาดอาคาร (กว้างxยาวxสูง), m	30x 47 x 21 ม.	40 x 70 x 12 ม.
วัสดุหลังคา	คอนกรีตหนา (10 ซม.)	แผ่นเมทัลชีท 760 (หนา 0.2 ซม.)
พื้นที่หลังคา, m ²	1,410	2,800
พื้นที่ใช้สอยรวม, m ²	9,870	8,400
พื้นที่ปรับอากาศ, m ²	8,883	8,400
สัดส่วนพื้นที่หน้าต่าง : ผนังทึบ (WWR)	44%	38%
สัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก (SC)	0.64 (6 มม. สีเขียว)	0.96 (6 มม. ใส)
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U _w), W/m ² °k	2.957	2.957
ปริมาณการใช้แสงสว่าง (LPD), W/m ²	13.18	17.48
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า (EPD), W/m ²	12.88	25.05
จำนวนผู้ใช้งานอาคาร (คน/100 ตร.ม.)	7	20
จำนวนวันที่ใช้งานอาคาร (วัน)	5	7
ช่วงเวลาการใช้งาน	8.00 – 17.00 น. (9 ชั่วโมง)	10.00 – 21.00 น. (11 ชั่วโมง)

ที่มา : Surapong Chirattananon and Taweeken, 2003

3.5.2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุกันความร้อนในโปรแกรม คำนวณ VisualDOE 4.1

3.5.2.1 โปรแกรม VisualDOE 4.1

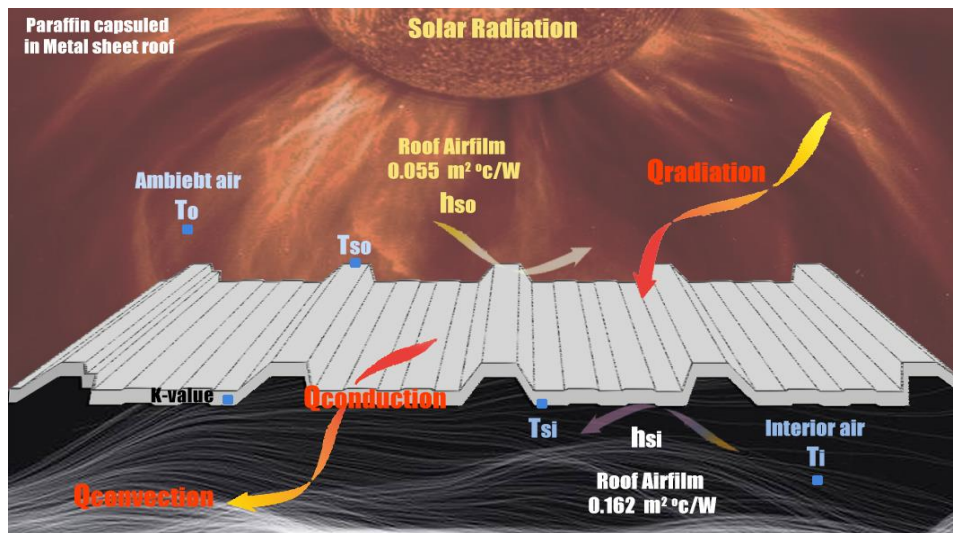
โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณผลการใช้พลังงานจากภาระการทำความเย็นในอาคาร (Load) ระบบไฟฟ้า (System) ระบบทำความเย็น (Plant) และค่าใช้จ่ายทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดย Lawrence Berkley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ถือว่าเป็นเครื่องมือที่น่าเชื่อถือและนิยมใช้อย่างแพร่หลายในการพัฒนาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับกฎหมายในการอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้ฐานข้อมูลทางอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมง เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานแยกตามประเภทและสามารถจัดทำรายงานผล

การคำนวณการใช้พลังงานจากภาระทำความเย็นขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งภายนอกและภายในอาคาร ซึ่งข้อมูลที่สำคัญต่อการคำนวณจากปัจจัยภายนอกประกอบด้วย การแผ่รังสีอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านเปลือกอาคาร และการรั่วซึมของอากาศ เป็นต้น และปัจจัยภายใน เช่น ความแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ อุปกรณ์ไฟฟ้าและแสงสว่างซึ่งก่อให้เกิดความร้อน เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ให้โปรแกรมคำนวณในอาคารต้นแบบที่มีประเภทเครื่องปรับอากาศตามกำหนด จนได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร

3.5.2.2 การคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน (R Value) ของหลังคาจากการทดลองขั้นที่ 2

ในการจำลองการใช้พลังงานในโปรแกรม ต้องใช้การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) เพื่อเป็นข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุหลังคา และเนื่องจากข้อมูลที่ระบุในพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 แก้ไขโดยพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552 (กระทรวงพลังงาน, 2552) ที่ไม่ครอบคลุมรูปแบบของการใช้วัสดุหน่วงความร้อนในงานวิจัย และวัสดุหลังคาบางชนิดที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เช่น พาราฟินที่อยู่ในรูปแบบฉนวนภายในกล่องเมทัลชีทไม่เคลือบสี ดังนั้นจึงอาศัยการทดลองด้วยกล่องทดลองในสภาพอากาศจริงและได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ และคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์จากการวัดค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากจุดต่างๆทั้งในกล่องและนอกกล่องทดลอง จนได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และนำไปหาค่าความต้านทานความร้อน

สมการการหาค่า Heat Transfer



ภาพที่ 3.19 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุเปลี่ยนสถานะ เมื่อใช้ร่วมกับหลังคาเมทัลชีท

จากทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ในภาวะคงที่ของพลังงานความร้อน การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ผ่านผิวนอกหลังคา (Q_{rad}) จะมีความสมดุลกับการนำความร้อน (Conduction) ผ่านชั้นวัสดุ (Q_{cond}) และการพาความร้อน (Convection) ในอาคาร (Q_{conv})

$$Q_{cond} = kA [(T_o - T_{so}) / \Delta x]$$

Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา, Watt - W

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-Value), $W/m^2 \cdot K$

A = พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน, m^2

ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุ, $^{\circ}C$

Δx = ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (ความหนา), m

K = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity), $W/m \cdot K$

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_{si} - T_{in})$$

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสของไหลกับวัตถุ, $W/m^2 \cdot C$

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล, m^2

T_{si} = อุณหภูมิของผิววัตถุ, $^{\circ}C$

T_{in} = อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิวหรืออุณหภูมิส่วนต้นของของไหล, $^{\circ}C$

ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมถึงการวัดค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นสมการในการคำนวณจากการทดลองนี้ใช้ค่าความสมดุลจากการนำความร้อนผ่านหลังคา (Q_{cond}) และการพาความร้อนเข้ามาในอาคาร (Q_{conv}) ทำให้ผลจากการวัดอุณหภูมิทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุและค่าต้านทานความร้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned}(Q_{\text{cond}}) &= (Q_{\text{conv}}) \\ (k / \Delta x) \cdot A \cdot (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) &= h_{\text{in}} \cdot A \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}}) \\ \text{และเนื่องจากสูตร } R &= \Delta x / k \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{w}) \\ (1 / R) \cdot (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) &= 0.95 \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}}) \\ R &= (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) / 0.95 \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}})\end{aligned}$$

หลังจากเข้าสมการแล้วจะทราบค่า k (K-value) ซึ่งมาสามารถคำนวณ R ของวัสดุหลังคาได้ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาอื่นๆได้ และนำไปใช้เป็นข้อมูลวัสดุหลังคาในอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE 4.1 ต่อไป

- h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของไหลกับวัตถุภายใน (convection coefficient), $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$ (ผิววัตถุอยู่ในแนวนอนและถ่ายเทความร้อนจากบนลงสู่ด้านล่าง = $0.95 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$) (ASHRAE, 1981)
- A = พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน, m^2
- Δx = ความหนาวัสดุ, m
- T_o = อุณหภูมิอากาศ, $^{\circ}\text{C}$
- T_{so} = อุณหภูมิผิววัสดุทดสอบภายนอก, $^{\circ}\text{C}$
- T_{in} = อุณหภูมิในกล่องทดลอง, $^{\circ}\text{C}$
- T_{si} = อุณหภูมิผิววัสดุทดสอบภายใน, $^{\circ}\text{C}$
- k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (K Value), $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$
- R = ค่าต้านทานความร้อน (R Value), $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{w}$

3.5.2.3 การวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้ารวม

การจำลองนี้ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุหลังคา ที่มีคุณสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน ด้วยการจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยสร้างทางเลือกของเปลือกอาคารประเภทหลังคาเพื่อพิจารณาค่าการใช้ไฟฟ้ารวมต่อตารางเมตรในระยะเวลาใช้งานใน 1 ปี (kWh/year) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าการใช้พลังงานทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศและเครื่องเป่าลม (Cooling and Fan) การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting) และอุปกรณ์ไฟฟ้า (Equipment) โดยเปรียบเทียบระหว่างวัสดุหลังคาเดิมของอาคารแต่ละประเภทกับวัสดุหลังคาที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองขั้นที่ 2

ตัวแปรต้น ประสิทธิภาพการสะสมความร้อน เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าต้านทานความร้อน และความหนาของวัสดุ

ตัวแปรตาม การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)

ตัวควบคุม ช่วงเวลาการใช้งานของอาคารค้าปลีก (Retail) อาคารใช้วัสดุเมทัลชีทหลังคา
ช่วงเวลาการใช้งานของอาคารสำนักงาน (Office) อาคารใช้หลังคาคอนกรีต

3.5.3 การพิจารณาด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ได้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) โดยนำข้อมูลการใช้พลังงานและจำนวนค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับความคุ้มค่าและอัตราการประหยัดค่าไฟ มาเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาที่ใช้ในปัจจุบัน

การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period-PB)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ (Total Investment)}}{\text{ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี (Annual Energy Cost Saving)}}$$

3.6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลองทั้งหมด วิเคราะห์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials-PCM) คือ พาราฟินและพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ต่างๆเมื่อทำหน้าที่เป็นฉนวนหลังคาอาคาร เพื่อทดสอบความสามารถในการป้องกันความร้อนเข้าสู่เปลือกอาคารด้านบนสำหรับอาคารที่ใช้งานเกือบตลอดวัน ทำการทดลองเดือน ม.ค.-พ.ค. ในภูมิภาคอากาศจริงของกรุงเทพฯ ประเทศไทย โดยติดตั้งสาร PCM ด้านบนกล่องทดลอง และนำผลที่ได้จากการทดลองจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานในอาคารสำนักงานขนาดกลาง ความคุ้มค่าในการลงทุน ตลอดจนเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุหลังคา

การจำลองนี้เป็นการจำลองโดยใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความจุความร้อนจำเพาะของ PCM เท่านั้น (ตารางที่ 3.2: หน้า 46) ไม่ได้สามารถครอบคลุมถึงการทำงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะทั้งหมด เนื่องจากแต่ละช่วงของ PCM ทั้งช่วงก่อนการเปลี่ยนสถานะ ช่วงที่เริ่มเกิดการเปลี่ยนสถานะและช่วงที่เปลี่ยนสถานะเรียบร้อยแล้ว มีค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเปลี่ยนสถานะซึ่งอุณหภูมิต่างๆไม่ส่งผลต่อการทำงานของสาร PCM (ภาพที่ 3.13: หน้า 44) ทั้งนี้การจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 เป็นการจำลองการใช้งานอาคารตลอดทั้งวัน ซึ่งทำให้ไม่สามารถคำนวณแยกตามช่วงของ PCM ได้ กล่าวคือ การจำลองการใช้ค่าเฉลี่ยของค่าความจุความร้อนจำเพาะจากการคำนวณผ่านการทดสอบด้วยเครื่อง DSC มาใส่เป็นข้อมูลการจำลองในโปรแกรม เพื่อเป็นแนวทางการคำนวณการใช้พลังงานรวมต่อปีเบื้องต้นของ PCM เท่านั้น

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองขั้นที่ 1: เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน

4.1.1 การทดลองเปรียบเทียบระหว่างวัสดุต่างๆ 4 วัสดุ โดยทดลองครั้งละ 2 ตัวแปรทดสอบ

- (a) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมแคลเซียมคลอไรด์ (PF + CaCl_2)
- (b) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมโซเดียมคาร์บอเนต (PF + Na_2CO_3)
- (c) พาราฟิน (PF) กับ พาราฟินผสมกลีเซอริน (PF + Glycerin)
- (d) พาราฟิน (PF) กับ น้ำ (Water)

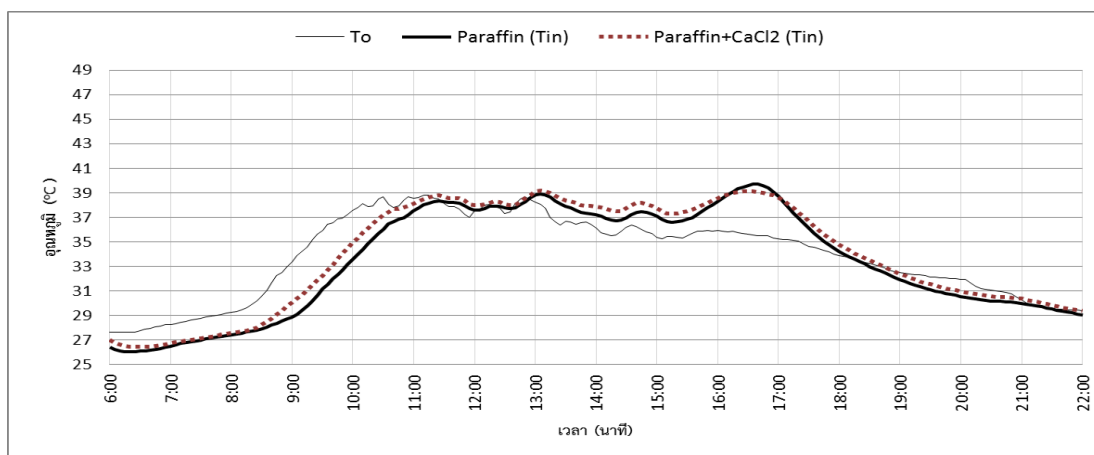
4.1.2 แผนภูมิแสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in})

ช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงเช้า 6.00 – 8.00 น. ทุกตัวแปรทดสอบที่ยังมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ พึ่งได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ จึงยังไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก จนเมื่อเวลา ประมาณ 8.05-18.00 น. วัสดุเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการดูดรังสีอาทิตย์ (Absorptance) และนำความร้อนมาใช้ในการเปลี่ยนสถานะ (Phase Change) จากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้ไม่เกิดถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) เข้าสู่กล่องทดลอง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของตัวแปรทดสอบ และเกินความสามารถจะเกิดการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ผ่านตัวแปรทดสอบและกล่องทดลองต่อไป ทำให้อุณหภูมิในกล่องทดลองสูงขึ้น

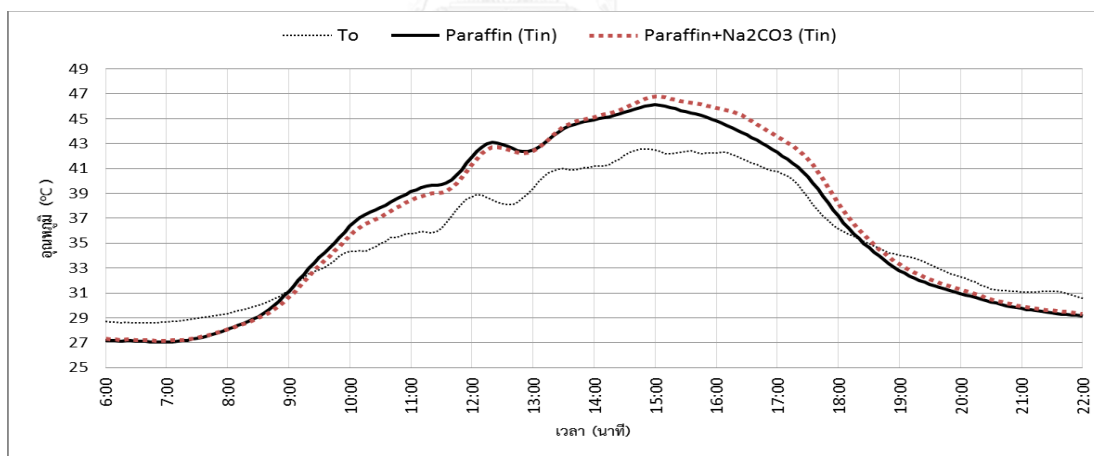
ช่วงเวลากลางคืน

เมื่ออุณหภูมิอากาศลดลงจนต่ำกว่าอุณหภูมิตัวแปรทดสอบ ช่วงเวลา 19.00-6.00 น. จะเกิดการคายความร้อนจากตัวแปรทดสอบคืนสู่ท้องฟ้า (Nightsky Radiation) ทำให้อุณหภูมิตัวแปรทดสอบเริ่มลดต่ำลง และเริ่มกระบวนการเปลี่ยนสถานะ คือคืนสภาพจากของเหลวกลับเป็นของแข็งอีกครั้ง ทำให้อุณหภูมिनอกเหนือจากตัวแปรทดสอบสูงขึ้นหากแต่ในประเทศไทยมีสภาพภูมิอากาศขึ้นการคายความร้อนจึงมีประสิทธิภาพต่ำ



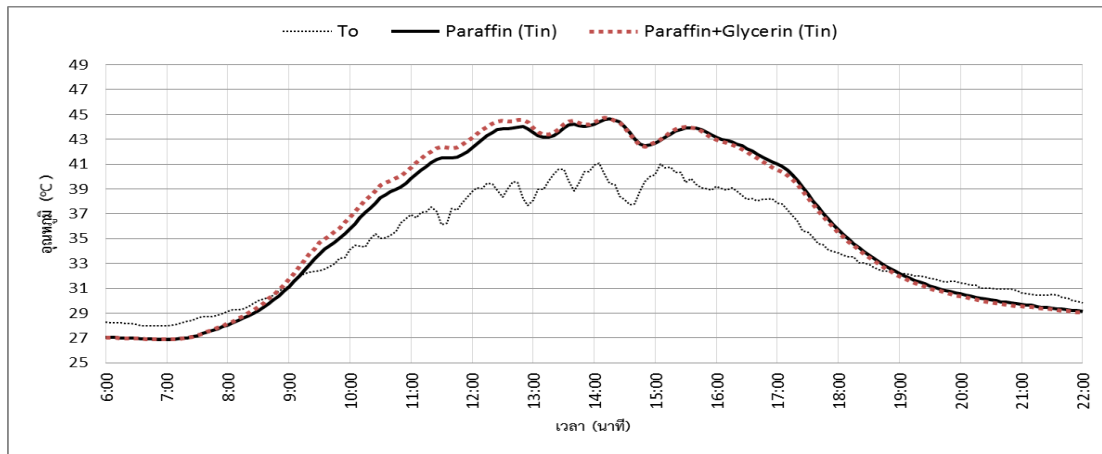
แผนภูมิที่ 4.1 การทดลอง (a) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสม CaCl_2 ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.1 การทดลอง (a) พบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟินมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนผสมกับ CaCl_2 เกือบตลอดวัน โดยเฉพาะช่วง 8.50-10.55 น. มีอุณหภูมิต่ำกว่าถึง $1.20\text{ }^\circ\text{C}$ ยกเว้นช่วง 11.30-13.00 น. และ 16.10-17.00 น. ที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกันไม่เกิน $0.4\text{ }^\circ\text{C}$ หมายความว่าพาราฟินมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนแทบไม่แตกต่างกับพาราฟินผสม CaCl_2



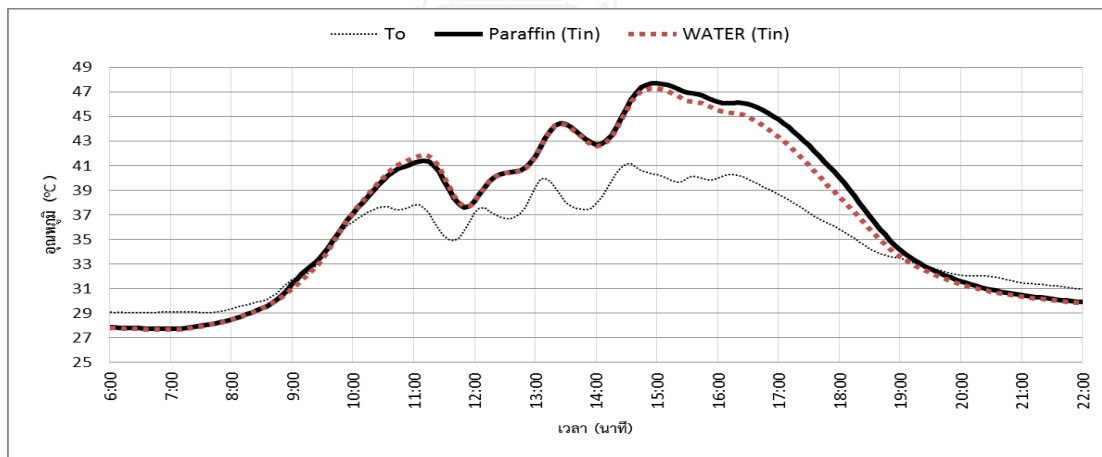
แผนภูมิที่ 4.2 การทดลอง (b) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสม Na_2CO_3 ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.2 การทดลอง (b) พบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟินมีอุณหภูมิต่ำกว่าการผสม Na_2CO_3 เกือบตลอดวัน โดยเฉพาะช่วง 14.45-18.15 น. มีอุณหภูมิต่ำกว่าถึง $1.20\text{ }^\circ\text{C}$ ยกเว้นช่วง 8.10-12.50 น. ที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกันไม่เกิน $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ หมายความว่าพาราฟินมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนในตอนกลางวันได้ดีกว่าพาราฟินผสม Na_2CO_3 เพียงเล็กน้อยในช่วงเช้า และดีกว่าส่วนผสมพาราฟินกับ Na_2CO_3 พอประมาณในช่วงบ่าย



แผนภูมิที่ 4.3 การทดลอง (c) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับพาราฟินผสมกลีเซอริน
ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.3 การทดลอง (c) พบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟิน (PF) มีอุณหภูมิต่ำกว่า PF+Glycerin ในช่วง 8.00-15.00 น. ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย 0.2-1°C และเมื่อผสมกลีเซอรินทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นเพียงเล็กน้อยในช่วง 15.00-10.00 น. ที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 °C แปลว่าทั้ง 2 มีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนใกล้เคียงกัน



แผนภูมิที่ 4.4 การทดลอง (d) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินกับน้ำ
ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.4 การทดลอง (d) อุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟินและน้ำมีค่าใกล้เคียงกันเกือบตลอดวัน ยกเว้นช่วงที่ร้อนที่สุดของวัน 14.45-19.15 น. อุณหภูมิในกล่องทดลองของพาราฟินสูงกว่าน้ำประมาณ 1 °C เนื่องจากน้ำมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) มีค่า 4184 J/kg °C ซึ่งสูงกว่าวัสดุทั่วไป จึงสรุปได้ว่าน้ำมีความสามารถในการหน่วงความร้อนได้มากกว่าพาราฟินเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 แสดงผลสรุปอุณหภูมิในกล่อง (T_{in}) ในแต่ละช่วงเวลาของพาราฟินกับแต่ละตัวแปร

ช่วงเวลาของอุณหภูมิ/ผลต่างของตัวแปรเปรียบเทียบ	PF : PF+CaCl ₂		PF : PF+Na ₂ CO ₃		PF : PF+Glycerin		PF : Water	
	(a)		(b)		(c)		(d)	
1. T_{in} MAX (°C)	45.64	45.47	46.13	46.77	44.41	44.57	45.64	45.47
T_{in} MIN (°C)	28.04	28.00	27.11	27.21	26.89	26.89	28.04	28.00
2. T_{in} (°C)	ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		ใกล้เคียง	
เช้า	ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		ใกล้เคียง	
สาย	น้อยกว่า 1.20 °C (8.50-10.55 AM)		มากกว่า 0.5 °C (8.00-12.50 AM)		น้อยกว่า 1 °C (8.50-12.25 AM)		ใกล้เคียง 0.05 °C (8.00-12.00 AM)	
บ่าย	มากกว่า 0.40 °C (4.15-5.00 PM)		น้อยกว่า 1.20 °C (2.45-6.15 PM)		น้อยกว่า 0.21 °C (12.30-2.55 PM)		มากกว่า 0.40 °C (12.05-5.00 PM)	
เย็น	น้อยกว่า 0.30-0.70 °C (5.05-7.00 PM)		น้อยกว่า 0.58 °C (6.00-7.00 PM)		มากกว่า 0.20 °C (3.00-7.00 PM)		มากกว่า 1.30 °C (5.05-7.00 PM)	
กลางคืน	น้อยกว่า 0.38 °C (7.05-10.00 PM)		น้อยกว่า 0.24 °C (7.05-10.00 PM)		มากกว่า 0.17 °C (7.05-10.00 PM)		มากกว่า 0.20 °C (7.05-10.00 PM)	
3. ประสิทธิภาพการ หน่วงความร้อน	มากกว่าเล็กน้อย		มากกว่าเล็กน้อย		ใกล้เคียง		ต่ำกว่าน้ำเล็กน้อย	

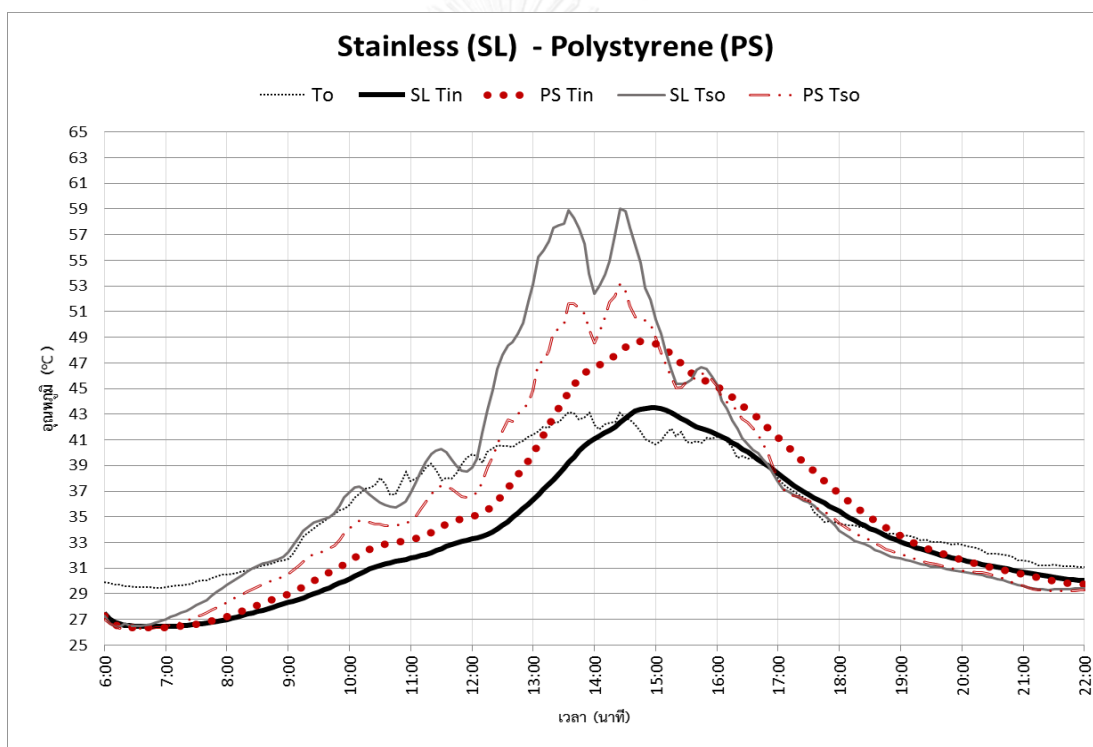
สรุปผลการทดลองขั้นที่ 1 จากการทดลอง (a) และ (b) พบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลอง (T_{in}) ของพาราฟิน (PF) มีอุณหภูมิต่ำกว่า พาราฟินที่ผสม CaCl₂ และ Na₂CO₃ ในอัตราส่วน 1:1 เกือบตลอดวัน โดยอุณหภูมิต่ำมากกว่าที่สุดถึง 1.20 °C หมายความว่าพาราฟินมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้ดีกว่าการผสม CaCl₂ และ Na₂CO₃ เพียงเล็กน้อย การทดลอง (c) พบว่าอุณหภูมิในกล่องมีความแตกต่างกัน น้อยมาก และการทดลอง (d) อุณหภูมิในกล่องของพาราฟินสูงกว่าน้ำตลอดช่วงบ่ายและเย็น จึงสรุปว่าการใช้พาราฟินไม่ผสมมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนได้มากกว่าการผสมเข้ากับ CaCl₂ และ Na₂CO₃ แต่อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่าน้ำมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนดีกว่าพาราฟิน เพียงเล็กน้อย เท่านั้น

4.2 ผลการทดลองขั้นที่ 2: ประสิทธิภาพของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เมื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุหลังคา

4.2.1 การทดลองเปรียบเทียบระหว่าง 2 ตัวแปร

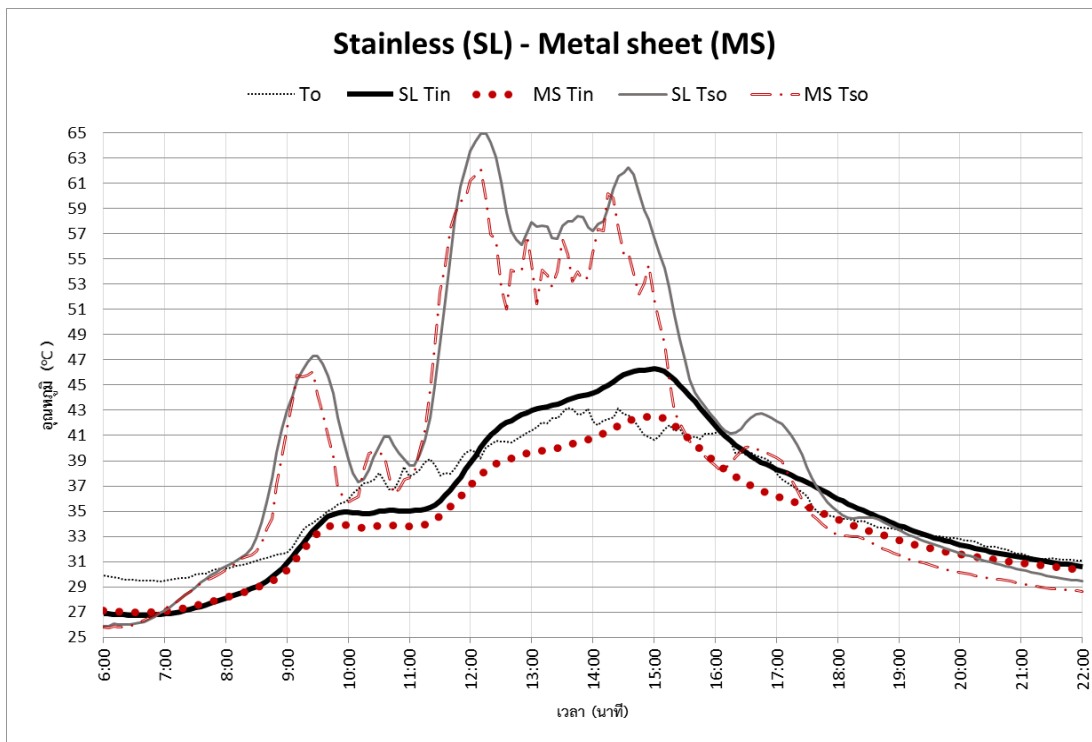
- (e) กล่องสแตนเลส (SL) กับ กล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS)
- (f) กล่องสแตนเลส (SL) กับ กล่องเมทัลชีท (MS)
- (g) กล่องเมทัลชีท (MS) กับ เมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่าง (MF)
- (h) เมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่าง (MF) กับ แผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม (CC)
- (i) กล่องเมทัลชีทวางบนแผ่นคอนกรีต กับ แผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม. (MS on CC)
- (j) กล่องเมทัลชีทวางใต้แผ่นคอนกรีต กับ แผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม. (CC on MS)

4.2.2 แผนภูมิแสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in})



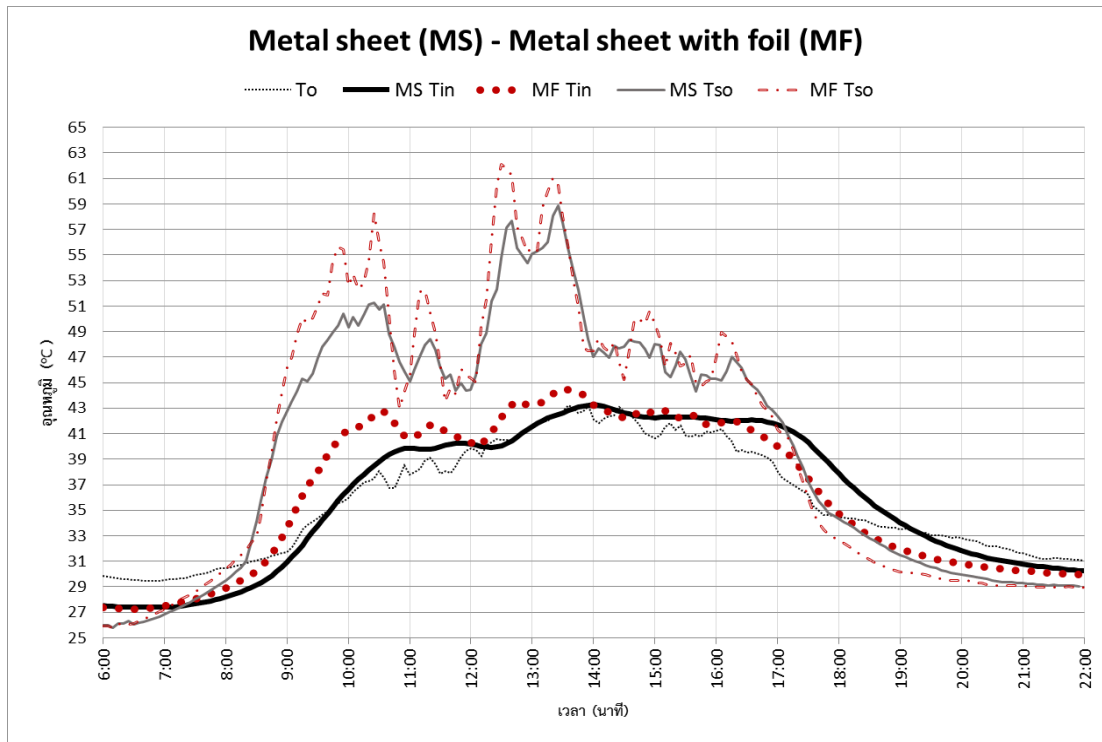
แผนภูมิที่ 4.5 การทดลอง (e) เปรียบเทียบของกล่องสแตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนบรรจุพาราฟิน ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากผลการทดลอง (e) พบว่าอุณหภูมิสูงสุดในกล่องทดลองของกล่องสแตนเลส (SL) มีค่าน้อยกว่ากล่องพลาสติกโพลีสไตรีน (PS) ถึง 5.18 °C โดยความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยในกล่องทดลองในช่วงเวลา 8.00-18.00 น. SL มีค่าน้อยกว่า PS 2.71 °C ขณะที่อุณหภูมิผิวนอกของ SL มีค่าสูงกว่ากว่า PS หมายความว่ากล่องสแตนเลส (SL) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของพาราฟินให้ดีขึ้นได้



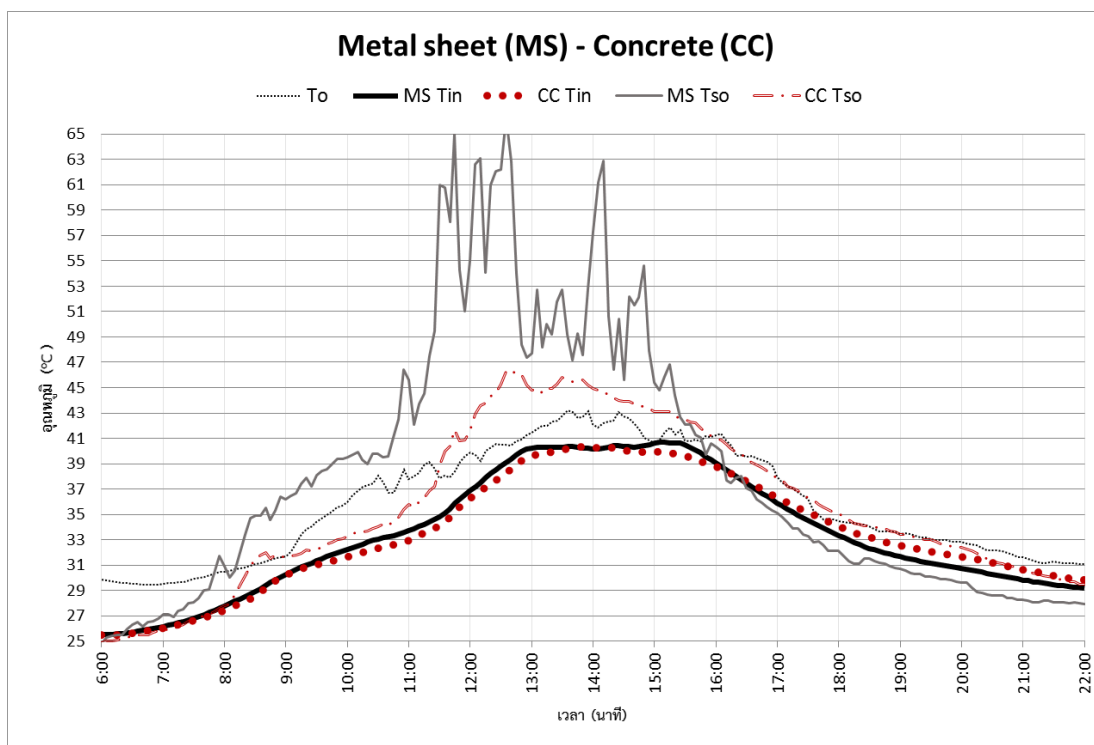
แผนภูมิที่ 4.6 การทดลอง (f) เปรียบเทียบระหว่างกล่องสแตนเลสและกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

ผลการทดลอง (f) แสดงให้เห็นว่ากล่องเมทัลชีท (MS) มีอุณหภูมิภายในกล่องทดลองและอุณหภูมิผิวภายนอกต่ำกว่ากล่องสแตนเลส (SL) ตลอดวัน แต่ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิจนในกล่องทดลองน้อยกว่า SL ในช่วงเวลา 8.00-18.00 น. มีค่า 3.76 °C และ 2.1 °C ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติของเหล็กเคลือบสังกะสีของเมทัลชีททำให้สะท้อนความร้อนได้มากกว่าสแตนเลส ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ 8.6-15 W/m²·K ทำให้อุณหภูมิผิวภายนอกของเมทัลชีทต่ำกว่าและส่งผลให้อุณหภูมิภายในกล่องทดลองต่ำกว่า จึงสรุปได้ว่ากล่องเมทัลชีทประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนดีกว่ากล่องสแตนเลส



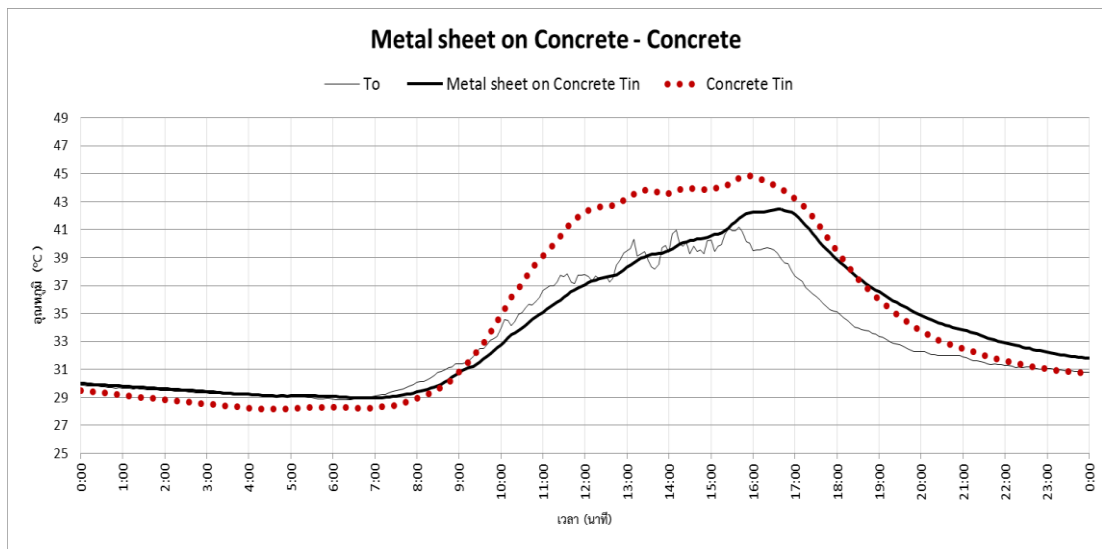
แผนภูมิที่ 4.7 การทดลอง (g) เปรียบเทียบระหว่างกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินและแผ่นเมทัลชีทกรูฟอยล์ ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

ผลการทดลอง (g) พบว่ากล่องเมทัลชีท (MS) มีอุณหภูมิภายในกล่องทดลองช่วงกลางวันสูงสุดและต่ำสุดน้อยกว่าแผ่นเมทัลชีทกรูฟอยล์ด้านล่าง (MF) $1.28\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ แต่อุณหภูมิเฉลี่ยในกล่องทดลองของ MS ช่วงกลางวันมีค่ามากกว่า MF $1.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากแผ่นเมทัลชีทธรรมดาสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการที่บรรจุพาราฟิน ซึ่งสะสมความร้อนตั้งแต่ช่วงกลางวันและคายความร้อนออกเวลากลางคืน อย่างไรก็ตามพาราฟินช่วยให้อุณหภูมิผิววนอกของหลังคาทดลองส่งผลให้อุณหภูมิภายในต่ำกว่าเวลากลางวัน หมายความว่ากล่องเมทัลชีทมีประสิทธิภาพในการหน่วงความร้อนมากกว่าแผ่นเมทัลชีทกรูฟอยล์ด้านล่างในเวลากลางวันเท่านั้น



แผนภูมิที่ 4.8 การทดลอง (h) เปรียบเทียบระหว่างกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินและแผ่นคอนกรีต 5 ซม. ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

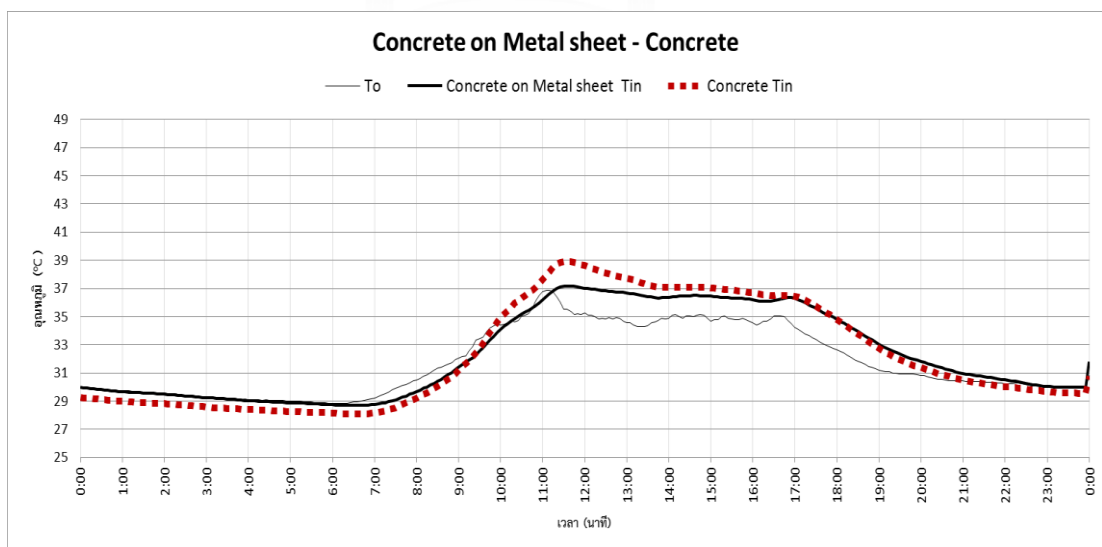
ผลการทดลอง (h) พบว่ากล่องเมทัลชีทสามารถหน่วงความร้อนมากกว่าแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม (CC) ทั้งกลางวันและกลางคืน เนื่องจากขณะที่อุณหภูมิผิวภายนอกของ MS สูงกว่าแผ่นคอนกรีตมาก แต่อุณหภูมิภายในกล่องทดลองช่วงกลางวันกลับพบว่าใกล้เคียงกับแผ่นคอนกรีต นอกจากนี้ช่วงกลางคืน อุณหภูมิภายในกล่องทดลองยังสามารถลดลงต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตถึง $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าของเมทัลชีท ทำให้อุณหภูมิผิวของเมทัลชีทลดลงต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตและอุณหภูมิอากาศถึง $1.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ หมายความว่าเมื่อใช้วัสดุ 2 ประเภทนี้เป็นหลังคาถึงแม้ว่ากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินจะสามารถกักเก็บความร้อนมากกว่าแผ่นคอนกรีต แต่ด้วยอุณหภูมิผิวที่สูงกว่าทำให้อุณหภูมิภายในลดต่ำลงใกล้เคียงกัน



แผนภูมิที่ 4.9 การทดลอง (i) เปรียบเทียบกล่องเมทัลชีทวางบนคอนกรีตและแผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม.

ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.9 การทดลอง (i) เมื่อติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะใกล้กับบริเวณที่ได้รับรังสีความร้อนโดยตรง (External Heat) พบว่าอุณหภูมิภายในกล่องทดลองของกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนแผ่นคอนกรีต ต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตมากที่สุดถึง 5°C ในช่วงเวลา 11.45-12.55 น. และต่ำกว่าโดยเฉลี่ย 3°C ช่วงเวลากลางวัน แต่ในช่วงกลางคืนเมื่อพาราฟินเริ่มมีการคายความร้อนและสะสมกับความร้อนที่คายตัวจากแผ่นคอนกรีต ส่งผลให้อุณหภูมิภายในกล่องทดลองสูงกว่าแผ่นคอนกรีตธรรมดาในช่วงกลางคืน



แผนภูมิที่ 4.10 การทดลอง (j) เปรียบเทียบกล่องเมทัลชีทวางใต้แผ่นคอนกรีตและแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม.

ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ(T_o)

จากแผนภูมิที่ 4.10 การทดลอง (j) เมื่อติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะใกล้กับบริเวณที่ได้รับความร้อนจากภายในอาคาร (Internal Heat) พบว่ากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางใต้แผ่นคอนกรีตมีอุณหภูมิภายในกล่องทดลองต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตธรรมดาในช่วงเวลา 9.30 น. – 17.00 น. เพียงเล็กน้อย และต่ำกว่ามากที่สุดเพียง 1 °C ในช่วงเวลา 11.00 น.-11.30 น. เท่านั้น ในช่วงเวลานอกเหนือจากนี้พบว่ามีอุณหภูมิภายในกล่องทดลองใกล้เคียงกัน

จากการทดลอง (i) และ (j) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในของตัวแปรกับแผ่นคอนกรีตธรรมดาของการทดลอง (i) วางกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนแผ่นคอนกรีต มีความแตกต่างมากกว่าการทดลอง (j) วางกล่องเมทัลชีทไว้ด้านใต้แผ่นคอนกรีต จึงสรุปได้ว่าการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนสถานะใกล้กับบริเวณที่ได้รับความร้อนโดยตรงหรือนอกอาคารที่สัมผัสกับอากาศภายนอก มีความสามารถในการป้องกันความร้อนได้มากกว่าติดตั้งใกล้ภายในอาคาร เพราะวัสดุเปลี่ยนสถานะสามารถสะสมความร้อนไว้ที่วัสดุเองก่อนเพื่อนำไปเปลี่ยนสถานะ ให้ความร้อนที่จะส่งผ่านมายังคอนกรีตลดลงมาก นอกจากนี้ยังสามารถคายรังสีความร้อนออกสู่ภายนอกได้สะดวกในเวลากลางวัน

ผลจากการทดลองขั้นที่ 2 จึงสรุปได้ว่า ในช่วงกลางวันกล่องเมทัลชีทมีประสิทธิภาพการต้านทานความร้อนดีกว่ากล่องสแตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีไทรเร็นตามลำดับ และมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแผ่นคอนกรีตหนา 5 ซม ส่วนในเวลากลางวันเมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่างมีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งดีกว่ากล่องเมทัลชีทเพียงเล็กน้อย แต่กล่องเมทัลชีทอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกล่องต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต หมายความว่าพาราฟินที่บรรจุในกล่องเมทัลชีทสามารถเป็นฉนวนป้องกันความร้อนและคงสภาวะน่าสบายในอาคารช่วงเวลากลางวันได้ และเนื่องจากเมทัลชีทมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงทำให้ในเวลากลางวันพาราฟินสามารถคายความร้อนและถ่ายเทออกสู่ภายนอกอาคารผ่านทางเมทัลชีทได้ ไม่เป็นฉนวนป้องกันความร้อนออกเหมือนมวลอุณหภาพ เช่น คอนกรีต และพบว่าประสิทธิภาพการกันความร้อนจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินวางบนคอนกรีตมากกว่าการวางไว้ด้านใต้ กล่าวคือมีอุณหภูมิภายในกล่องทดลองต่ำกว่าแผ่นคอนกรีตมากที่สุดถึง 3-5 °C ช่วงเวลากลางวัน จึงสรุปได้ว่ากล่องเมทัลชีทส่งเสริมประสิทธิภาพด้านการหน่วงความร้อนของพาราฟินได้ดีที่สุดในตัวแปรและเมื่อใช้หลังคา 2 ชั้น ประสิทธิภาพจะมากกว่าหากวางด้านนอกอาคาร

ตารางที่ 4.2 แสดงผลสรุปการเปรียบเทียบอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของวันของตัวแปร

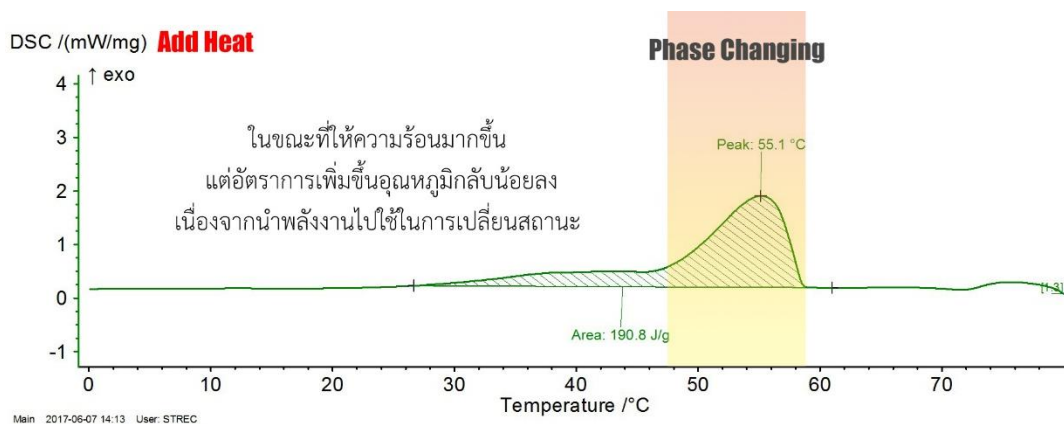
จุดวัดอุณหภูมิ/ตัวแปรเปรียบเทียบ	SL : PS (e)		SL : MS (f)		MS : MF (g)		MS : CC (h)	
1. T_o MAX (°C)	37.87 (2.30 PM)		40.69 (2.25 PM)		39.15 (4.25 PM)		37.51 (12.45 PM)	
T_o MIN (°C)	26.77 (6.40 AM)		27.58 (6.30 AM)		28.49 (6.20 AM)		26.38 (6.00 AM)	
2. T_{in} MAX (°C)	43.53	48.70	46.29	42.535	43.25	44.53	40.69	40.34
	น้อยกว่า 5.18 °C		มากกว่า 3.76 °C		น้อยกว่า 1.28 °C		มากกว่า 0.34 °C	
T_{in} MIN (°C)	26.43	26.33	26.72	26.94	26.00	27.26	25.50	25.50
	ใกล้เคียง		ใกล้เคียง		น้อยกว่า 1.26 °C		เท่ากัน	
T_{in} เฉลี่ย (°C) (เวลา 8.00-18.00)	35.52	38.23	38.55	36.45	39.12	40.04	35.96	35.64
	น้อยกว่า 2.71 °C		มากกว่า 2.1 °C		มากกว่า 2.1 °C		มากกว่า 0.32 °C	
T_{in} เฉลี่ย (°C) (เวลา 18.05-22.00)	31.92	32.07	32.62	31.81	32.50	31.21	30.79	31.64
	น้อยกว่า 0.15 °C		มากกว่า 0.81 °C		มากกว่า 1.29 °C		น้อยกว่า 0.85 °C	
3. ประสิทธิภาพการ หน่วงความร้อน	มากกว่า		ต่ำกว่า		มากกว่าเวลา กลางวัน ร้อนกว่า เวลากลางคืน		ใกล้เคียงเวลา กลางวัน เย็นกว่า เวลากลางคืน	

4.2.3 การคำนวณค่าต้านทานความร้อน (R-Value) จากอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลอง

การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุเปลี่ยนสถานะไม่สามารถคำนวณช่วงเปลี่ยนสถานะได้ เนื่องจากเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะความร้อนจะอยู่ในรูปของความร้อนแฝง (Q_{latent}) และอุณหภูมิคงที่ ไม่ได้แปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิเหมือนวัสดุทั่วไป (ภาพที่ 4.1) แต่ความสามารถในการหน่วงความร้อนจะแปรผันตามมวลของวัสดุ ดังสมการที่ (8)

$$Q_{\text{latent}} = m \cdot L \quad (8)$$

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

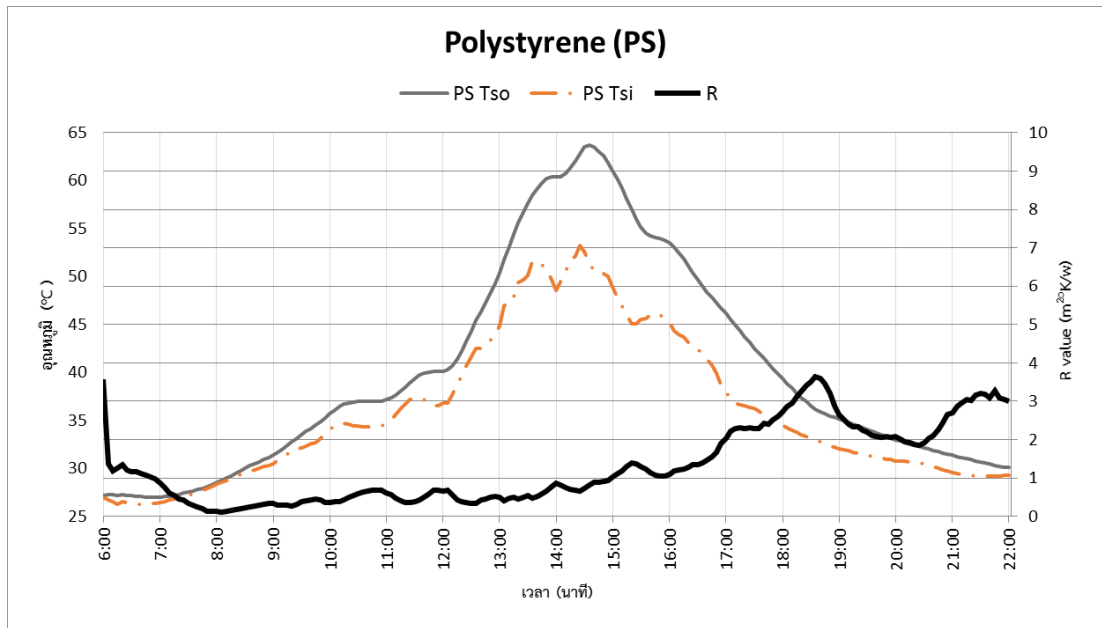


ภาพที่ 4.1 การเปลี่ยนสถานะของพาราฟินจากของแข็งเป็นของเหลวเมื่อได้รับความร้อนด้วยเครื่อง DSC จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

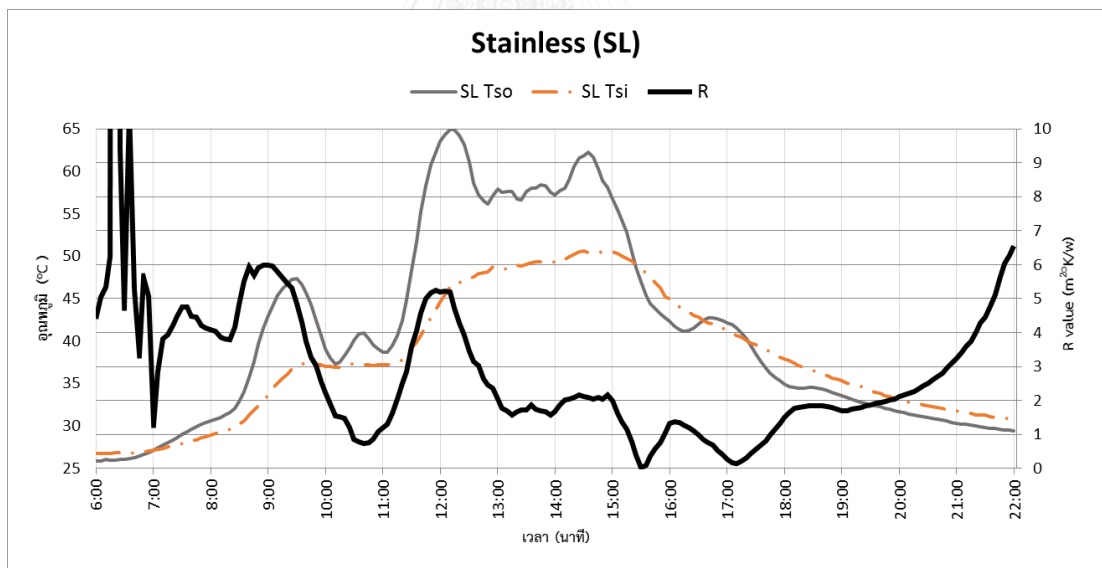
ตัวอย่างการคำนวณพาราฟินในกล่องเมทัลชีท โดยค่า R ได้จากการเฉลี่ยจากช่วงที่คงที่ 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนสถานะ (R_{Day}) และช่วงหลังเปลี่ยนสถานะ (R_{Night}) โดยนำอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิในกล่องทดลองจากแผนภูมิที่ 4.5-4.8 และอุณหภูมิผิวภายนอกและภายในของวัสดุที่ทดสอบจากแผนภูมิที่ 4.11-4.13 มาคำนวณ

$$\begin{aligned} Q_{\text{cond}} &= Q_{\text{conv}} \\ (k / \Delta x) \cdot A \cdot (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) &= h_{\text{in}} \cdot A \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}}) \\ \text{และเนื่องจากสูตร } R &= \Delta x / k \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}) \\ (1 / R) \cdot (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) &= 0.95 \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}}) \\ R &= (T_{\text{so}} - T_{\text{si}}) / 0.95 \cdot (T_{\text{si}} - T_{\text{in}}) \end{aligned} \quad (10)$$

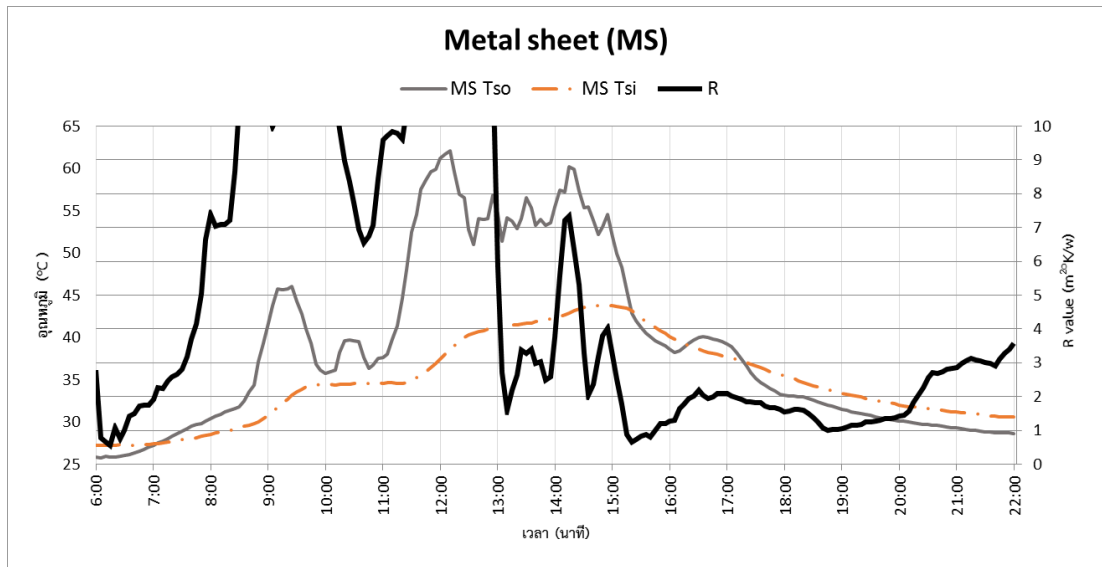
โดยค่า R ไม่สามารถคำนวณจากช่วงเปลี่ยนสถานะได้เนื่องจากอุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการทำงานของสาร PCM ดังนั้นจึงได้คัดเลือกค่า R จากการเฉลี่ยจากช่วงที่คงที่ 2 ช่วง คือ ช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนสถานะ (R_{Day}) และช่วงหลังเปลี่ยนสถานะ (R_{Night}) เป็นค่าต้านทานของวัสดุที่ใช้ทดสอบ



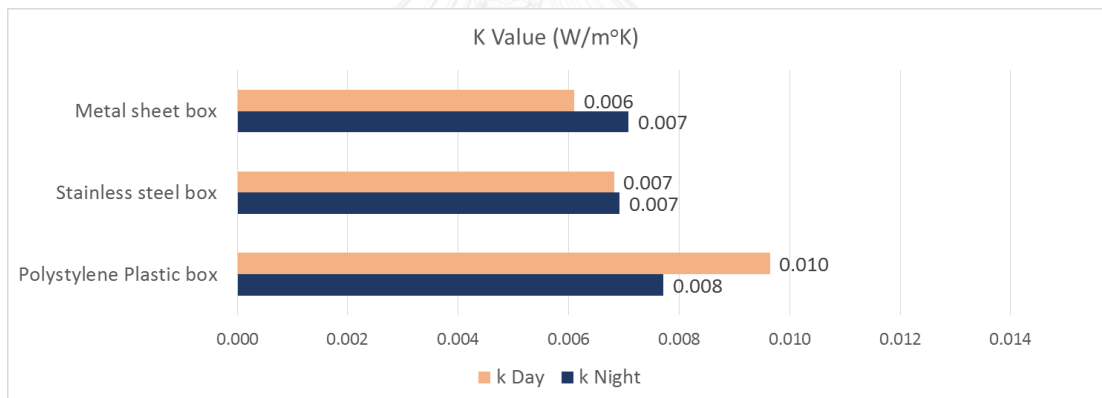
แผนภูมิที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม



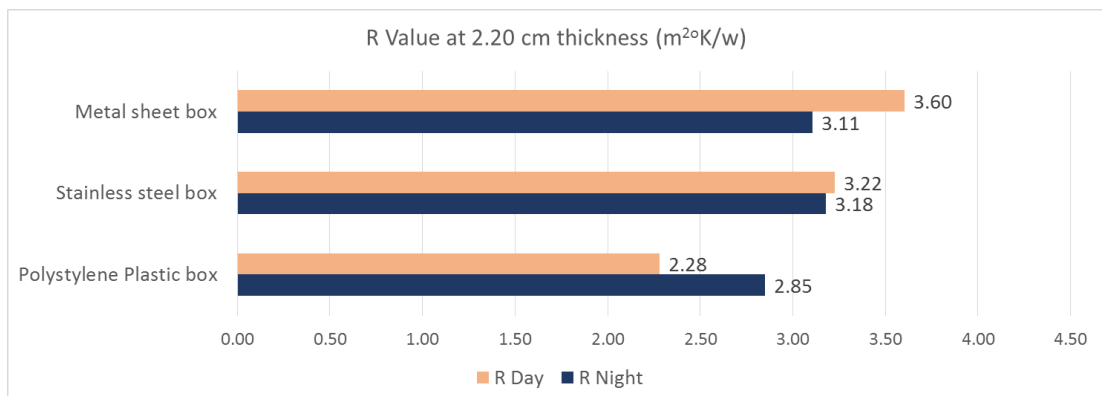
แผนภูมิที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องสแตนเลสที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม



แผนภูมิที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าต้านทานความร้อน อุณหภูมิผิวใน (T_{si}) และอุณหภูมิผิวนอก (T_{so}) ของกล่องเมทัลชีท ที่บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม

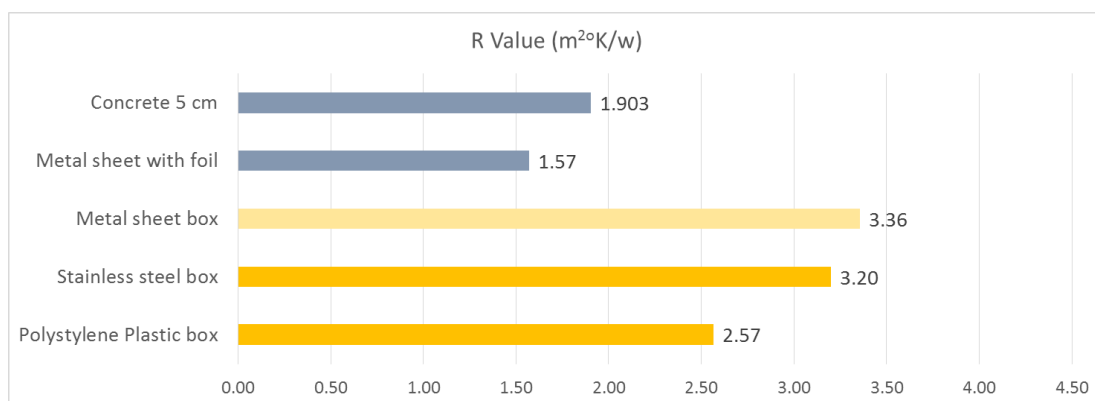


แผนภูมิที่ 4.14 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คำนวณได้ของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน (K-Value)



แผนภูมิที่ 4.15 ค่าต้านทานความร้อนที่คำนวณได้ของบรรจุภัณฑ์ที่บรรจุพาราฟิน (R Value)

จากแผนภูมิที่ 4.14 - 4.15 เมื่อพิจารณาช่วงกลางวันกล่องเมทัลชีทมีค่า R มากที่สุด รองลงมาคือกล่องสแตนเลสและกล่องพลาสติก ตามลำดับ แต่สำหรับช่วงกลางคืนกล่องสแตนเลสมีค่ามากที่สุดและกล่องเมทัลชีท และกล่องพลาสติกตามลำดับ ทั้งนี้กล่องสแตนเลสมีค่ามากกว่ากล่องเมทัลชีทเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแปรผกผันกับค่า k จึงสรุปได้ว่าค่าต้านทานความร้อนระหว่างกล่องสแตนเลสและกล่องเมทัลชีท มีค่าใกล้เคียงและเทียบเท่ากันได้ในตอนกลางคืน และเวลากลางวันกล่องเมทัลชีทต้านทานได้มากที่สุด



แผนภูมิที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าต้านทานความร้อนเฉลี่ยของวัสดุที่ทดลอง (R Value)

ตารางที่ 4.3 แสดงผลสรุปค่าทางความร้อนของหลังคาที่ได้จากการทดลอง

	บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม			เมทัลชีท กรุพอยล์ ด้านล่าง	แผ่น คอนกรีต หนา 5 ซม.
	กล่อง พลาสติก โพลีสไตรีน	กล่อง สแตนเลส	กล่องเมทัล ชีท		
ความหนารวม (m)	0.022	0.022	0.022	0.006	0.05
K Value (W/m ² K)	0.009	0.007	0.0067	0.25	0.026
R Value (m ² K/W)	2.57	3.20	3.36	1.57	1.90

จากตารางที่ 4.3 ผลเฉลี่ยของการคำนวณจากช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะและช่วงหลังเปลี่ยนแปลงสถานะ จากอุณหภูมิที่วัดได้และมาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ พบว่ากล่องเมทัลชีทมีค่าต้านทานความร้อนเฉลี่ยทั้งวันสูงที่สุดในกลุ่มที่บรรจุพาราฟินมีค่า 3.36 m²K/W ซึ่งมีค่ามากกว่าแผ่นคอนกรีต หนา 5 ซม. และหลังคาเมทัลชีทกรุพอยล์ และสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (K Value) กล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินมีค่าน้อยที่สุด 0.0067 W/m²K ตามด้วยกล่องสแตนเลสและกล่องพลาสติกโพลีสไตรีนตามลำดับ หมายความว่ากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินมีความสามารถในการต้านความร้อนสูงที่สุด

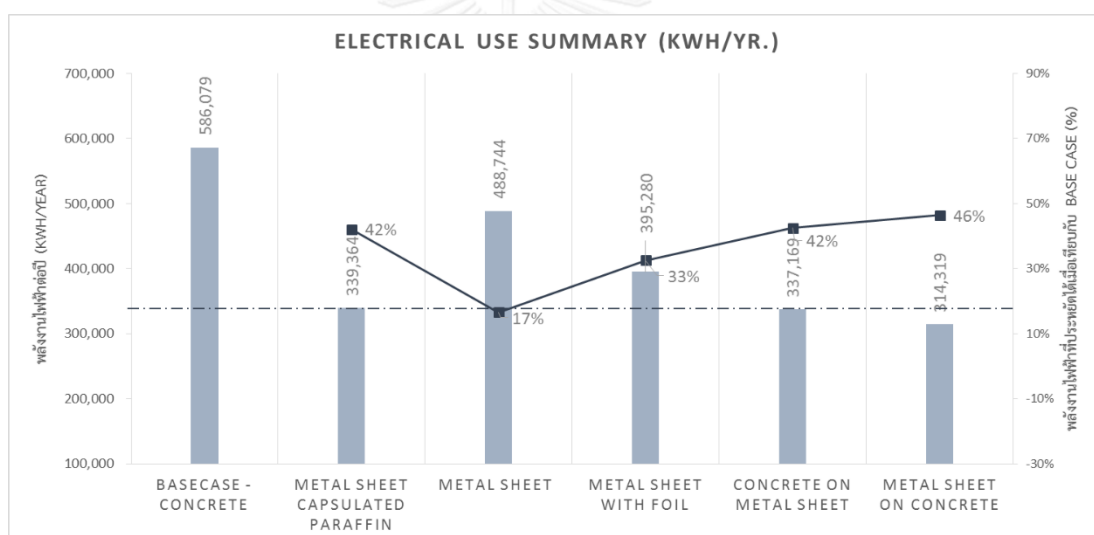
4.3 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

นำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ และค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากกล่องทดลอง และค่าจุดความร้อนจำเพาะของพาราฟินจากการคำนวณผ่านการจำลองการเปลี่ยนสถานะด้วยเครื่อง DSC ใส่เป็นข้อมูลลักษณะของวัสดุหลังคาในอาคารต้นแบบที่ไม่มีฝ้าเพดาน 2 ประเภท ได้แก่ อาคารสำนักงาน (ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน) และอาคารร้านค้า (ใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันถึงกลางคืน) เพื่อหาผลการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในหนึ่งปี (kWh/year)

ในงานวิจัยนี้เพื่อสามารถทราบความแตกต่างของการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้ชัดเจนมากขึ้น จึงจำลองเฉพาะชั้นบนสุดของอาคารเพียง 1 ชั้น ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์โดยตรง

4.3.1 อาคารสำนักงาน 1 ชั้น

อาคารสำนักงาน ใช้เครื่องปรับอากาศเวลากลางวัน 8.00-18.00 น. อาคารมีขนาด 30 x 47 ม. ระยะพื้นถึงหลังคาสูง 3 ม. ใช้หลังคาคอนกรีตหนา 10 ซม. และมีพื้นที่หลังคา รวม 1,410 ตร.ม.



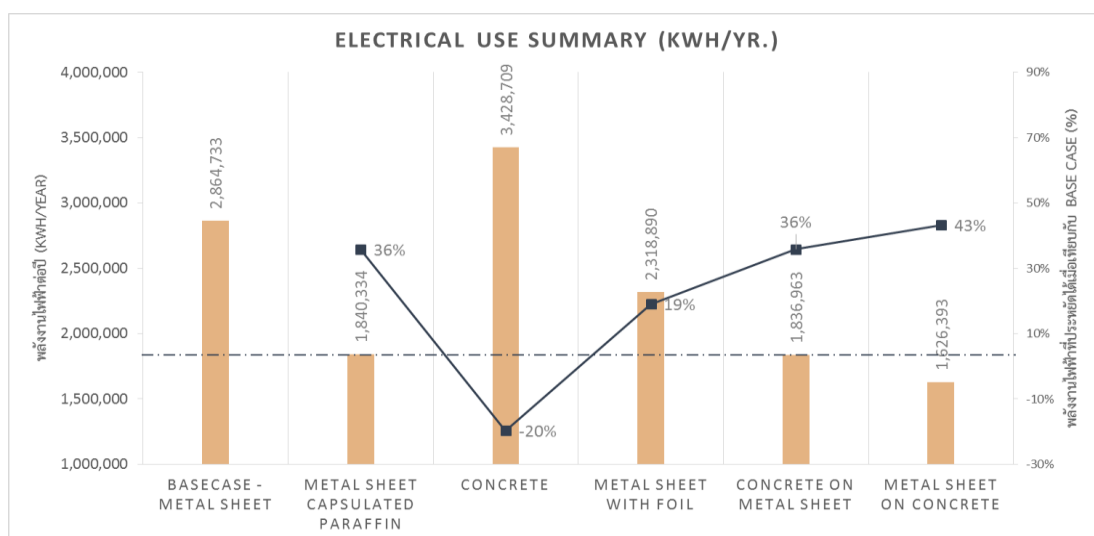
แผนภูมิที่ 4.17 ผลรวมพลังงานการใช้ไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงานชั้นบนสุด 1 ชั้น

ผลจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารสำนักงาน 1 ชั้น พบว่าหลังคาที่มีพาราฟินเป็นองค์ประกอบใช้พลังงานต่ำที่สุดเป็น 3 อันดับแรก โดย 2 อันดับแรกเป็นระบบหลังคาซ้อนกัน 2 ชั้น คือ หลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตหนา 10 ซม.และวางใต้หลังคาแผ่นคอนกรีต ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปีเท่ากับ 314,319 kWh และ 337,169 kWh ตามลำดับซึ่งเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตธรรมดาสามารถประหยัดได้ถึงร้อยละ 46 และ 42 ตามลำดับ ส่วนอันดับที่ 3 คือหลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน หากเปรียบเทียบเฉพาะระบบหลังคา 1 ชั้น พบว่าหลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปีต่ำที่สุดอยู่ที่ 339,364 kWh ซึ่งประหยัดได้ ร้อยละ 42 เทียบเท่ากับระบบหลังคา 2

ชั้นที่วางใต้หลังคาคอนกรีต ซึ่งหากพิจารณาการเลือกใช้หลังคาที่คำนึงถึงการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด และน้ำหนักของระบบหลังคาที่จะมีผลต่อระบบก่อสร้าง ควรเลือกใช้หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุมารราฟฟิน

4.3.2 อาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น

อาคารร้านค้าปลีก ใช้เครื่องปรับอากาศเวลา 10.00-22.00 น. อาคารมีขนาด 40 x 70 ม. ระยะพื้นถึงหลังคาสูง 4 ม. นิยมใช้หลังคาเมทัลชีท และมีพื้นที่หลังคา 2,800 ตร.ม.



แผนภูมิที่ 4.18 ผลรวมการใช้พลังงานการใช้ไฟฟ้าของอาคารร้านค้าชั้นบนสุด 1 ชั้น

ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น พบว่ามีแนวโน้มเหมือนอาคารสำนักงาน คือ หลังคาที่มีพาราฟินเป็นองค์ประกอบเป็นกลุ่มที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ได้แก่ หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุมารราฟฟินวางบนหลังคาคอนกรีต วางใต้หลังคาแผ่นคอนกรีตและหลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุมารราฟฟิน ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปีเท่ากับ 1,626,393 kWh 1,836,963 kWh และ 1,840,334 kWh ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับหลังคาเมทัลชีททั่วไปสามารถประหยัดได้ถึงร้อยละ 43 36 และ 36 ตามลำดับ นอกจากนี้ การที่หลังคาก่อเมทัลชีทใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าหลังคาเมทัลชีทกรูพอยล์ เพราะช่วงกลางวันที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่สามารถทำให้หลังคาก่อเมทัลชีทที่บรรจุมารราฟฟินมีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ (จากการทดลองที่ 2) ซึ่งหมายถึงไม่เพิ่มภาระทำความเย็นให้อาคารในช่วงกลางวัน ซึ่งหากพิจารณาการเลือกใช้หลังคาที่คำนึงถึงการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด และน้ำหนักของระบบหลังคาที่จะมีผลต่อระบบก่อสร้าง ควรเลือกใช้หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุมารราฟฟิน เนื่องจากหลังคาคอนกรีต ไม่เหมาะสมสำหรับทำหลังคาอาคารร้านค้าปลีกและก่อก่อเมทัลชีทสามารถประหยัดได้เทียบเท่ากับระบบหลังคา 2 ชั้นที่วางใต้หลังคาคอนกรีต

ทั้งนี้อาคารร้านค้าปลีกมีการปรับอากาศจนถึงช่วงกลางคืน ซึ่งเป็นช่วงที่พาราฟินเริ่มคายความร้อนเพื่อคืนสภาพ พร้อมทั้งหลังคาเมทัลชีทที่ไม่มีพาราฟินสามารถถ่ายเทความร้อนช่วงกลางคืนได้ดีกว่า ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Base case ต่ำกว่าอาคารสำนักงานที่ใช้งานเฉพาะเวลากลางวัน

4.4 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาของผิวบรรจุภัณฑ์

ลักษณะ	บรรจุภัณฑ์ที่ใช้ทดลอง			
	Polypropylene	Polystyrene	Stainless	Metal sheet
ความหนาผิวบรรจุภัณฑ์ (มม.)	1	1	0.3	0.35

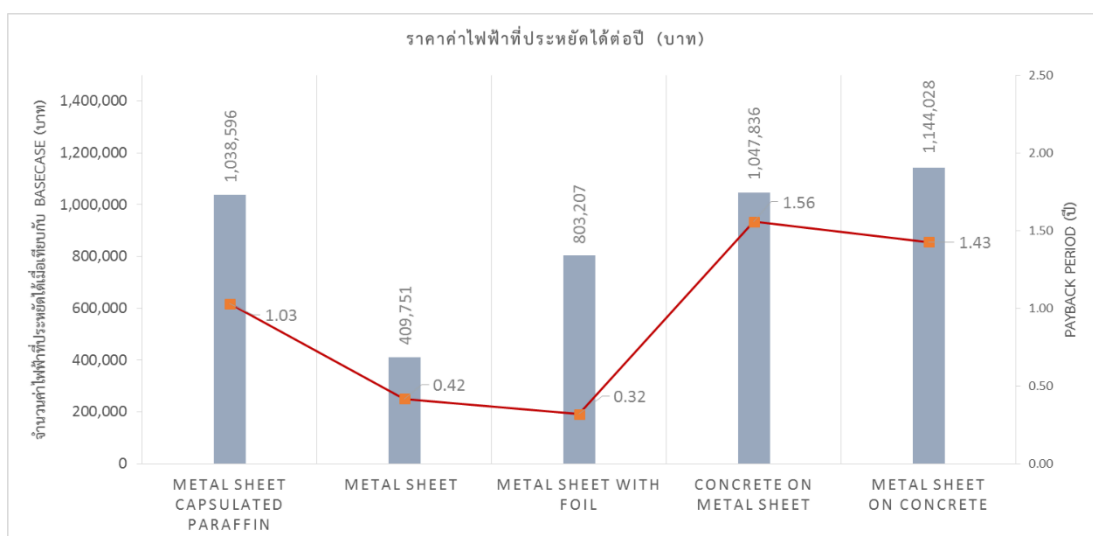
ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลลักษณะและราคาของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	บรรจุพาราฟิน			
	Polypropylene	Polystyrene	Stainless	Metal Sheet
ความหนารวม (มม.)	6	6	4.6	4.7
น้ำหนัก (กก./ตร.ม.)	10.23	9.88	10.78	9.07
ราคา (บาท/ตร.ม.)	2,200.00	2,033.33	3,116.67	756.67

ตารางที่ 4.6 แสดงข้อมูลลักษณะและราคาของวัสดุลังคากที่ใช้ในการจำลอง

ข้อมูล/บรรจุภัณฑ์	Metal Sheet capsulated Paraffin	Metal sheet	Metal Sheet with foil	Concrete	Concrete on Metal sheet	Metal sheet on Concrete
ความหนาหลังคารวม (มม.)	20.7	0.35	5.35	1000	1,002.70	1,002.70
น้ำหนัก (กก./ตร.ม.)	9.02	3.51	3.71	240	249.02	249.02
ราคา (บาท/ตร.ม.)	756.67	120.00	180.00	400.00	876.67	876.67

4.4.1 อาคารสำนักงาน 1 ชั้น



แผนภูมิที่ 4.19 จำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน 1 ชั้น

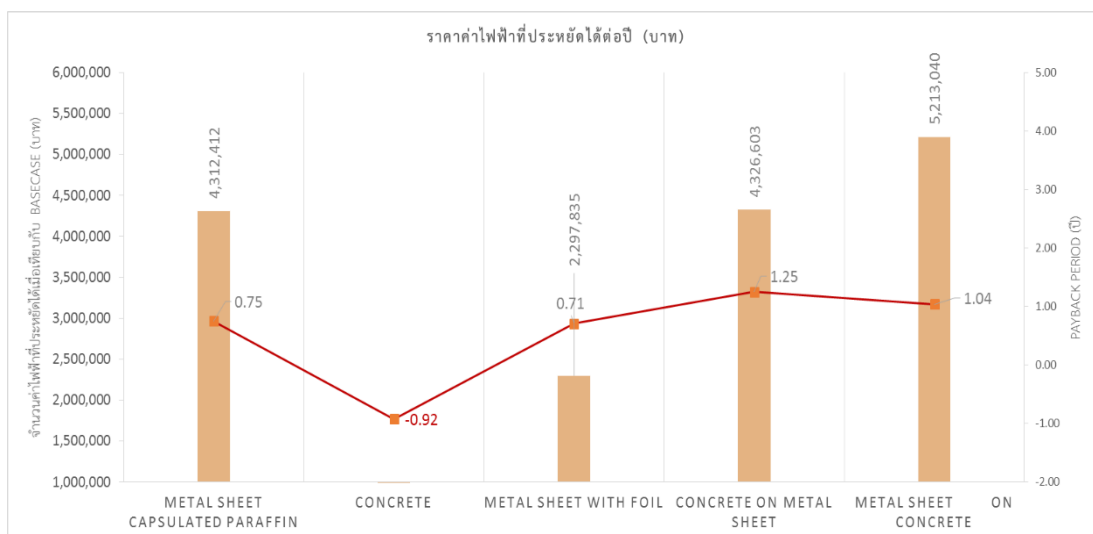
จากผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period) มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับการใช้พลังงานและพลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต คือ หลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีต ใน 1 ปี สามารถประหยัดได้สูงที่สุด คือ 1,144,028 บาท รองลงมาคือ ระบบหลังคา 2 ชั้นวางใต้หลังคาคอนกรีตและหลังคาล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟินประหยัด 1,047,836 บาทและ 1,038,596 บาท ตามลำดับ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาด้านความคุ้มค่ากลับพบว่า ระบบหลังคา 2 ชั้นมีระยะคืนทุนที่นานที่สุดซึ่งมากกว่า 1 ปี และหลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุ พาราฟิน มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1.03 ปี ซึ่งนานกว่าหลังคาเมทัลชีททั้งชนิดธรรมดาและมีฟอยล์ ทั้งที่หลังคาทั้ง 3 ชนิดสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าได้มากที่สุดเป็น 3 อันดับแรก เนื่องจากราคาวัสดุหลังคาที่สูงกว่า

สรุปผลการจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบ จากการนำผลจากการคำนวณ R-Value และคุณสมบัติค่าความจุความร้อนจำเพาะของพาราฟิน จำลองอาคารสำนักงานที่มีดาดฟ้าอาคารเป็นพื้นคอนกรีต พบว่ากลุ่มหลังคาที่มีล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟินสามารถลดภาระในการทำความเย็นของอาคารได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการติดตั้งล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินไว้ด้านนอกอาคารที่ได้ผลดีที่สุด แต่การติดตั้งภายในได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้ล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดา เมื่อพิจารณาระยะเวลา คืนทุนพบว่าระบบหลังคา 2 ชั้นใช้เวลานานที่สุด หมายความว่าถึงแม้ระบบหลังคา 2 ชั้นจะเหมาะสมด้านการประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่การใช้ล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน 1 ชั้น เหมาะสมต่อการใช้งานและความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน 1 ชั้น

	Base case Concrete	Metal Sheet capsulated Paraffin	Metal Sheet	Metal Sheet with foil	Concrete on Metal sheet	Metal sheet on Concrete
พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบทำความเย็น ต่อปี (kWh/year)	586,079	339,364	488,744	395,280	337,169	314,319
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	2,467,217	1,428,621	2,057,466	1,664,010	1,419,380	1,323,189
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน						
1. ค่ากล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟิน (บาท)	-	1,066,900	-	-	1,066,900	1,066,900
2. ค่าคอนกรีต 240ksc หน้า 10 ซม. (บาท)	564,000	-	-	-	564,000	564,000
3. หลังคาเมทัลชีท	-	-	169,200	-	-	-
4. หลังคาเมทัลชีทมี ฟอยล์ (บาท)	-	-	-	253,800	-	-
5. ค่าดำเนินการ ติดตั้ง (บาท/ตร.ม.)	380	400	400	400	780	780
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตร.ม.)	1,410	1,410	1,410	1,410	1,410	1,410
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)	565,790	1,068,710	171,010	255,610	1,633,090	1,633,090
ราคาค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	-	1,038,596	409,751	803,207	1,047,836	1,144,028
ค่าไฟฟ้าจากระบบทำ ความเย็นที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Base case (%)	-	42.10%	16.61%	32.56%	42.47%	46.37%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	-	1.03	0.42	0.32	1.56	1.43

4.4.2 อาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น



แผนภูมิที่ 4.20 จำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้าปลีก

จากผลการคำนวณราคาไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้าปลีก มีแนวโน้มการใช้พลังงานไปในทางเดียวกันกับอาคารสำนักงาน คือ หลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีต ใน 1 ปี สามารถประหยัดได้สูงที่สุด คือ 5,213,040 บาท รองลงมาคือ ระบบหลังคา 2 ชั้นวางใต้หลังคาคอนกรีตและหลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินประหยัด 4,326,603 บาทและ 4,312,412 บาทตามลำดับ แต่การพิจารณาด้านความคุ้มค่าพบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกัน แต่มีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าอาคารสำนักงาน คือ ระบบหลังคา 2 ชั้นคืนทุนที่ประมาณ 1 ปี และถึงแม้ถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินจะมีค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ใกล้เคียงกับถ่วงเมทัลชีทติดตั้งภายในอาคาร แต่กลับมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วกว่าที่ 0.75 ปี นอกจากนี้ยังพบว่าหลังคาคอนกรีตใช้พลังงานมากกว่าหลังคาเมทัลชีททำให้ไม่คุ้มค่าและไม่เหมาะสมต่อการใช้งาน

สรุปการจำลองอาคารร้านค้าปลีกต้นแบบ จากการนำผลจากการคำนวณ R-Value และคุณสมบัติค่าความจุความร้อนจำเพาะของพาราฟิน จำลองอาคารร้านค้าปลีกที่มักนิยมใช้หลังคาเมทัลชีท พบว่าหลังคาถ่วงเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินและติดตั้งภายนอกบนหลังคาคอนกรีต สามารถลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาระยะเวลาคุ้มทุนพบว่า ถึงแม้ว่าถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดาจะมีใช้พลังงานใกล้เคียงกับถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินและติดตั้งภายใน แต่มีระยะคืนทุนที่เร็วกว่าถึง 0.5 ปี ทั้งนี้เนื่องจากการใช้งานและระบบโครงสร้างของอาคารร้านค้า ทำให้การใช้หลังคาคอนกรีตไม่เหมาะสมทั้งด้านราคาและน้ำหนักที่ส่งผลต่อโครงสร้างซึ่งอาจจะทำให้ราคาที่ต้องลงทุนเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้หลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินจึงเหมาะสมมากที่สุดสำหรับอาคารร้านค้าปลีก

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้าปลีก 1 ชั้น

	Base case Concrete	Metal Sheet capsulated Paraffin	Metal Sheet	Metal Sheet with foil	Concrete on Metal sheet	Metal sheet on Concrete
พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบทำความเย็น ต่อปี (kWh/year)	2,864,733	1,840,334	3,428,709	2,318,890	1,836,963	1,626,393
ค่าไฟฟ้าต่อปี	12,059,667	7,747,254	14,433,836	9,761,831	7,733,063	6,846,627
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน						
1. ค่ากล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟิน (บาท)	-	2,118,667	-	-	2,118,667	2,118,667
2. ค่าคอนกรีต 240 ksc หน้า 10 ซม. (บาท)	-	-	1,120,000	-	1,120,000	1,120,000
3. หลังคาเมทัลชีท	336,000	-	-	-	-	-
4. หลังคาเมทัลชีท มีพอยล์	-	-	-	504,000	-	-
5. ค่าดำเนินการติดตั้ง (บาท/ตร.ม.)	400	400	380	400	780	780
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตร.ม.)	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)	1,456,000	3,238,667	2,184,000	1,624,000	5,422,667	5,422,667
ราคาไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	-	4,312,412	-2,374,170	2,297,835	4,326,603	5,213,040
ค่าไฟฟ้าจากระบบทำ ความเย็นที่ประหยัด ได้เมื่อเทียบกับ Base case (%)	-	36%	-20%	19%	36%	43%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	-	0.8	-0.9	0.7	1.3	1.0

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยรวมของประเทศไทยเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งในอาคาร สัดส่วนการใช้พลังงานอันดับสูงสุดคือ ระบบปรับอากาศ เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นหลังคา คือ เปลือกอาคารที่ได้รับความร้อนสะสมจากดวงอาทิตย์โดยตรงเกือบตลอดวัน การออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่สามารถหน่วงความร้อนที่ถ่ายเทมาสู่ภายในอาคาร จะช่วยลดภาระทำความเย็นและส่งเสริมการประหยัดพลังงานได้ หนึ่งในวัสดุสมัยใหม่ที่เหมาะสม เช่น “วัสดุเปลี่ยนสถานะ” (Phase Change Material-PCM) คือ “สารหนึ่งสารใดที่มีความสามารถในการกักเก็บสะสมและปล่อยพลังงานออกมาจำนวนหนึ่ง โดยที่อุณหภูมิของสารหนึ่งสารใดนั้นมีอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งค่าใด” ซึ่งอาศัยหลักพื้นฐานของความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ

จากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการหน่วงเหนี่ยวความร้อน โดยที่อุณหภูมิของเปลือกอาคารคงที่ไว้ได้ ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อย และคงสถานะนำสบายสำหรับผู้ใช้อาคารได้นานขึ้น คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ควรมีค่ามากเวลากลางคืนและมีค่าน้อยเวลากลางวัน ค่าความร้อนจำเพาะ พลังงานที่ใช้เปลี่ยนสถานะสูง (Heat of fusion) ความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ ค่าความจุความร้อน ไม่ควรต่ำกว่า 120 kJ/kg (Xu, Zhang et al., 2005) และปัจจัยสำคัญคือ จุดหลอมเหลว (melting Point) ควรมีค่าใกล้เคียงกับช่วงอุณหภูมิภายในห้องและสถานะนำสบาย 22-27 °C (เมื่อติดตั้งภายในห้อง) หรือสอดคล้องกับภูมิอากาศเมื่อติดตั้งภายนอกและควรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก 6-7 °C ในช่วงฤดูร้อน (Pasupathy and Velraj, 2008) หากใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ควรใช้กับบริเวณที่ได้รับรังสีอาทิตย์โดยตรง และลักษณะบรรจุภัณฑ์ ควรคำนึงถึง ลักษณะวัสดุปิดผิว ระยะห่างของช่องว่างอากาศด้านในกับวัสดุปิดผิว และ ความหนาของบรรจุภัณฑ์ (Butala and Stritih, 2009)

“พาราฟิน” คือสารประเภทอินทรีย์ ที่นิยมใช้กับวัสดุอาคารมากที่สุด รองลงมาคือ Salt Hydrate ซึ่งเป็นสารประเภทอนินทรีย์และสารยูเทติก ตามลำดับ (Souayfane, Fardoun et al., 2016) เพราะมีจุดอุณหภูมิกว้างสามารถเลือกใช้ได้ง่าย มีความเสถียรในการเปลี่ยนแปลงสถานะ มีความปลอดภัยในการใช้งาน ราคาถูกและได้ง่ายในท้องถิ่น และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ แต่จุดบกพร่องคือ การใช้เวลานานในการคืนสถานะเป็นของแข็งในช่วงกลางคืน เนื่องจากอากาศของประเทศไทยในตอนกลางคืนมีความชื้นสูง การคายความร้อนสู่บรรยากาศได้จึงต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิในอาคารไม่ลดต่ำลงมากนักในเวลากลางคืน

งานวิจัยนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของพาราฟิน เมื่อใช้เป็นฉนวนป้องกันความร้อนประเภทหลังคาในอาคารประเภทใช้งานกลางวัน โดยทำการทดสอบในสภาพภูมิอากาศจริงของ

กรุงเทพมหานคร เดือน ม.ค.-พ.ค. โดยติดตั้งสาร PCM ด้านบนกล่องทดสอบขนาด 60x60x60 ซม. ทำจาก โฟมโพลียูรีเทนหนา 1 นิ้ว ปิดทับด้วยแผ่นเหล็กสีขาวทั้งกล่องทดสอบ ซึ่งวัดอุณหภูมิพื้นผิวภายนอก (T_{so}) - ผิวภายใน (T_{si}) อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o) การทดลองขั้นที่ 1 เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพของพาราฟินที่เปลี่ยนไปเมื่อผสมสารประเภท Salt Hydrate ใช้วิธีเปรียบเทียบอุณหภูมิภายใน กล่องทดลองที่มีค่าน้อยที่สุด การทดลองขั้นที่ 2 ทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพของพาราฟินเมื่ออยู่ในบรรจุ ภัณฑ์ต่างๆ ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงเปรียบเทียบกับวัสดุหลังคาทั่วไปในท้องตลาด เพื่อหาบรรจุภัณฑ์ที่ช่วย เพิ่มประสิทธิภาพของพาราฟิน และหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุเพื่อใช้ในการคำนวณ และการ ทดลองขั้นที่ 3 จำลองประสิทธิภาพการทำงานของพาราฟินในบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม ในการป้องกันความร้อน ในอาคารปรับอากาศ ประเภทใช้งานกลางวัน ผ่านโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้ค่าการนำความร้อน ของวัสดุ และค่าต้านทานความร้อน ที่ได้คำนวณจากการทดลองขั้นที่ 2 และค่าความจุความร้อนจำเพาะ จากการทำงานวิจัย เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการทำความเย็น (Cooling Energy) และทำการ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าตลอดทั้งปี ตลอดจนคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุหลังคาในการใช้งานจริง

ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นที่ 1 พบว่าการผสมพาราฟินเข้ากับสาร $CaCl_2 \cdot Na_2CO_3$ และ Glycerin ในอัตราส่วน 1:1 ไม่ได้มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพให้พาราฟิน ซึ่งหมายความว่าพาราฟินบริสุทธิ์ มีความสามารถในการหน่วงความร้อนและมีอิทธิพลต่อการลดความร้อนที่เข้าสู่กล่องทดลองมากกว่า

ผลการทดลองขั้นที่ 2 พบว่าชนิดของบรรจุภัณฑ์มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของพาราฟิน ที่ หนา 2 ซม. 2,200 กรัม ในบรรจุภัณฑ์ พบว่าเมื่อพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดในกล่องทดสอบ กล่องสแตน เลส มีค่าต่ำกว่ากล่องพลาสติกโพลีไสตรีน $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่สูงกว่ากล่องเมทัลชีท $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ และกล่องเมทัลชีทมี อุณหภูมิสูงสุดในกล่องทดสอบต่ำกว่าเมทัลชีทกรุพอยล์ด้านล่าง $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ย ภายในกล่อง ช่วงกลางวันกล่องเมทัลชีทมีค่าต่ำกว่าหลังคาเมทัลชีท $0.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะหน่วงความร้อนได้ มากกว่า ช่วงกลางคืนกล่องเมทัลชีทมีอุณหภูมิต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะคายความร้อนได้ดีกว่า และพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อใช้หลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินร่วมกับหลังคาคอนกรีต โดยการวางไว้ด้านหลังคา ทำให้อุณหภูมิภายในต่ำกว่าแผ่นคอนกรีต $3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลากลางวัน จากการ คำนวณพบว่าค่าความต้านทานความร้อนเฉลี่ยมีค่า $3.36\text{ m}^2\text{K/W}$ และค่ามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เฉลี่ยที่ $0.0067\text{ W/m}^2\text{K}$

5.2 ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในอาคารสำนักงานและอาคารร้านค้าปลีก

ผลจากการจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบ 1 ชั้น โดยนำผลจากการคำนวณ R-Value และค่าความจุความร้อนของพาราฟิน จำลองอาคารสำนักงานที่มีดาดฟ้าอาคารเป็นคอนกรีต พบว่ากลุ่มหลังคาที่มีกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตสามารถลดภาระในการทำความเย็นของอาคารได้มากที่สุด ซึ่งการติดตั้งกล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินไว้ด้านนอกอาคาร สามารถลดได้มากที่สุดถึงร้อยละ 46 เมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตธรรมดา การติดตั้งภายในได้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้กล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดาคืออยู่ที่ร้อยละ 42 เมื่อพิจารณาระยะเวลาคุ้มทุนพบว่าระบบหลังคา 2 ชั้นใช้เวลานานที่สุด หลังคากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินจะคืนทุนอยู่ที่ 1.03 ปี ซึ่งหมายความว่าถึงแม้ระบบหลังคา 2 ชั้นจะเหมาะสมด้านการประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่การใช้กล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน 1 ชั้น เหมาะสมต่อการใช้งานและด้านเศรษฐศาสตร์มากที่สุด

การจำลองอาคารร้านค้าปลีกต้นแบบ 1 ชั้น จากการนำผลจากการคำนวณ R-Value และค่าความจุความร้อนของพาราฟิน จำลองอาคารร้านค้าปลีกนิยมใช้หลังคาเมทัลชีท พบว่าหลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินและวางบนหลังคาคอนกรีต สามารถลดการใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารเมื่อเทียบกับการใช้หลังคาเมทัลชีทถึงร้อยละ 43 ซึ่งมากที่สุด และเช่นเดียวกันการติดตั้งกล่องเมทัลชีทใต้แผ่นคอนกรีตความสามารถในการลดการใช้พลังงานใกล้เคียงกับการใช้กล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดาอยู่ที่ร้อยละ 36 ถึงแม้ว่าจะมีใช้พลังงานใกล้เคียงกัน แต่กล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดามีระยะคืนทุนที่เร็วกว่าถึง 0.5 ปี ทั้งนี้เนื่องจากการใช้งานและระบบโครงสร้างของอาคารร้านค้าปลีก ทำให้การใช้หลังคาคอนกรีตไม่เหมาะสมทั้งด้านราคาและน้ำหนักที่ส่งผลต่อโครงสร้างซึ่งอาจจะทำให้ราคาที่ต้องลงทุนเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหลังคากล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินจึงเหมาะสมมากที่สุดสำหรับอาคารร้านค้าปลีก

ผลการใช้พลังงานในอาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศเวลากลางวัน แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญของการป้องกันความร้อนซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมลดลง คือ ความสามารถในการต้านทานความร้อนไม่ให้ถ่ายเทลงสู่ภายในอาคาร แต่สำหรับอาคารที่มีการปรับอากาศเวลากลางวันจนถึงเวลากลางคืน การใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะเป็นวัสดุหลังคาจะทำให้ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานลดลง เนื่องจากพาราฟินเริ่มก่อให้เกิดภาระทำความเย็นจากการคายความร้อนเพื่อคืนสภาพเป็นของแข็ง

จากการทดลองและศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า อาคารสำนักงานที่ใช้หลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีต สามารถลดภาระในการทำความเย็นของอาคารและประหยัดพลังงานได้ต่อไปได้มากที่สุด และสำหรับอาคารร้านค้าปลีกซึ่งโดยทั่วไปใช้หลังคาเมทัลชีท การใช้หลังคากล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินจะเหมาะสมที่สุด เพราะถึงแม้ว่าการใช้กล่องเมทัลชีทที่บรรจุพาราฟินร่วมกับหลังคาคอนกรีตจะสามารถประหยัดพลังงานได้มากที่สุด แต่จะเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้หลังคาอาคารเกินความจำเป็น

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

การศึกษาทดลองในงานวิจัยนี้ทำการทดลองด้วยกล่องทดลอง ในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน ซึ่งเป็นฤดูแล้งที่ได้รับความร้อนสูงที่สุดในรอบปี จึงอาจไม่ครอบคลุมสภาพอากาศตลอดทั้งปี เช่น ฤดูฝน นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในอีกหลายด้าน ที่อาจส่งผลต่อผลการทดลองและค่าอุณหภูมิหรือการคำนวณ K-value และ R-Value จึงได้สรุปประเด็นข้อเสนอแนะไว้สำหรับผู้ที่จะนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ต่อไปดังนี้

- ควรทำการเปรียบเทียบการใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ ที่หลากหลายชนิดมากขึ้น เนื่องจากในการทดลองนี้มีข้อจำกัดด้านการหาแหล่งซื้อสารเคมี
- ในการทดลองนี้ได้ใช้อัตราผสมแค่ 1:1 และ 3:1 เท่านั้น ซึ่งพบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในพาราฟิน การทดลองครั้งต่อไปควรทดลองใช้อัตราส่วนผสมที่มากขึ้น ซึ่งอาจมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงได้
- การทดลองนี้มีขนาดและความหนาของพาราฟินที่ใช้ อยู่ที่ 60x60x2 ซม. เท่านั้น แต่การทดลองควรทดลองที่ความหนาที่หลากหลายมากกว่านี้
- ลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ใช้เพียง 3 ประเภท คือพลาสติก สเตนเลส และเหล็กเคลือบสังกะสี (เมทัลชีท) ที่หนา 2 ซม.เท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมถึงวัสดุและความหนาอื่นๆ
- การทดลองครั้งนี้ไม่ได้คำนวณน้ำหนักของวัสดุที่เพิ่มขึ้นที่และอาจส่งผลต่อค่าก่อสร้างโครงสร้างอาคาร
- ควรศึกษาเพิ่มเติมเรื่องระยะเวลาเปลี่ยนสถานะอย่างละเอียด และศึกษามากกว่าระยะเวลากลางวัน
- การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นเฉพาะอาคารที่ใช้หลังคาแบนที่แผ่นมีความเรียบสูงเท่านั้น
- อาคารที่ใช้ในการจำลองเป็นอาคารตัวอย่างที่มีการปรับอากาศเพียง 2 รูปแบบเท่านั้น คือ อาคารสำนักงาน ที่มีการปรับอากาศเวลา 8.00-18.00 น. และอาคารร้านค้าปลีกปรับอากาศเวลา 10.00–22.00 น. ซึ่งหากอาคารที่ใช้ในการจำลองมีหลากหลายมากขึ้น จะทำให้ทราบการใช้พลังงานไฟฟ้า และความเหมาะสมเมื่อไปใช้ในอาคารรูปแบบอื่นได้มากขึ้น
- การทดลองยังมีข้อจำกัดด้านวันและเวลา ไม่ครอบคลุมทุกฤดูและสภาพอากาศ การทดลองครั้งต่อไปควรทำการทดลองให้ครอบคลุมทุกสภาพอากาศตลอดทั้งปี
- การดำเนินการยังมีข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ ทำให้ทดลองเปรียบเทียบได้ที่ละ 2 ตัวแปร การทดลองต่อไปควรทดลองตัวแปรพร้อมกันทั้งหมดภายในช่วงเวลาเดียวกัน
- เป็นการทดลองในกล่องจำลองที่ขนาดกล่องทดลอง ความสูงกล่องทดลอง มีขนาดจำกัดอยู่ที่ยาวด้านละ 60 ซม. การศึกษาครั้งต่อไปควรทดลองด้วยกล่องจำลองเท่าขนาดจริงของอาคารต้นแบบที่ใช้งาน

ผลการวิจัยและข้อมูลในวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยหวังว่าจะสามารถเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางการศึกษาหรือพัฒนาประสิทธิภาพด้านพลังงานของวัสดุเปลี่ยนสถานะ เช่น พาราฟิน ในการพิจารณาเลือกใช้เป็นวัสดุฉนวนหลังคาของอาคารจริงในเขตร้อนชื้น เพื่อการประหยัดพลังงานของอาคารต่อไปได้

รายการอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน (2552). หลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารพลังงานแต่ละระบบ การใช้พลังงานโดยรวมของอาคารและการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆของอาคาร พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา. **126**: 47.
- กระทรวงพลังงาน (2558). "สถานการณ์พลังงาน ปี 2558 และแนวโน้ม ปี 2559." Retrieved 15 พ.ย. 2559, from http://www.chanthaburi.buu.ac.th/~office_building/power/documents/energy2015-forecast2016.pdf
- จยูดา บุญยเกียรติ (2537). การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หลังคา. ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต.
- ทองศักดิ์ วัฒนา (2556). "เทคโนโลยีการกักเก็บความร้อนและวัสดุที่กักเก็บความร้อน (Thermal Energy Storage)." Energy Saving **53**: 96-97.
- ชนิด จินดาวงศ์ (2546). "การประหยัดพลังงานในอาคาร." Retrieved 19 ต.ค. 2559, from <http://www.technologymedia.co.th/article/detail.asp?arid=537&pid=74>.
- อรุณ ศรีชูบุตร (2552). การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูงกองทุนรัชดาภิเษก.
- ASHRAE (1981). ASHRAE handbook, 1981 fundamentals. Atlanta, GA : ASHRAE.
- Butala, V. and U. Stritih (2009). "Experimental investigation of PCM cold storage." Energy and Buildings **41**(3): 354-359.
- Chaiyat, N. (2015). "Energy and economic analysis of a building air-conditioner with a phase change material (PCM)." Energy Conversion and Management **94**: 150-158.
- Darzi, A. A. R., et al. (2013). "Numerical investigation of free-cooling system using plate type PCM storage." International Communications in Heat and Mass Transfer **48**: 155-163.
- Dutt Sharma, H. K., Kazunobu Sagara (2004). "Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications." Research Reports of the Faculty of Engineering, Mie University **29**: 31-64.

- Gil, A., et al. (2014). "Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration." International Journal of Refrigeration **39**: 95-103.
- Harald Mehling, L. F. C. (2008). Heat and Cold Storage with PCM. Germany.
- Kaygusuz, K. (1995). "Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems." Energy Conversion and Management **36**: 315-323.
- Pasupathy, A. and R. Velraj (2008). "Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management." Energy and Buildings **40**(3): 193-203.
- Raj, V. A. A. and R. Velraj (2010). "Review on free cooling of buildings using phase change materials." Renewable and Sustainable Energy Reviews **14**(9): 2819-2829.
- Souayfane, F., et al. (2016). "Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review." Energy and Buildings **129**: 396-431.
- Surapong Chirarattananon and J. Taweeken (2003). "A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand." Energy Conversion and Management **44**: 743-762.
- Waqas, A. and S. Kumar (2011). "Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study." Energy and Buildings **43**(10): 2621-2630.
- Xu, X., et al. (2005). "Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings." Energy and Buildings **37**(10): 1084-1091.
- Zalba, B., et al. (2004). "Free-cooling of buildings with phase change materials." International Journal of Refrigeration **27**(8): 839-849.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน, m^2
C	คือ ความจุความร้อนของสาร (heat capacity), $kJ/^\circ C$
C_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat), $kJ/kg^\circ C$
C_{sp}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ช่วงสถานะของแข็ง, $J/kg^\circ C$
C_{lp}	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ช่วงสถานะของเหลว, $J/kg^\circ C$
H_f	คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้สารเปลี่ยนสถานะในภาวะอุณหภูมิวิสต์เท่ากับจุดหลอมเหลว (ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว, Latent Heat of fusion, Melting Enthalpy), kJ/kg
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสของไหลกับวัตถุ (convection heat transfer coefficient), $W/m^2^\circ C$ (ผิววัตถุอยู่ในแนวนอนและถ่ายเทความร้อนจากบนลงสู่ด้านล่าง = $0.95 W/m^2^\circ C$) (ASHRAE, 1981: ตารางที่ 23.12-1)
K	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity– k Value), $W/m^\circ K$
L	คือ ความร้อนแฝงจำเพาะ (Specific Latent Heat), kJ/Kg
m	คือ มวลของวัตถุ, kg
p	คือ ความหนาแน่นของวัสดุเก็บความร้อน, kg/m^3
q	คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัตถุ, J
q_l	คือ ความร้อนแฝงหรือปริมาณความร้อนที่วัตถุได้รับหรือคายออก, J
Q	คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา, Watt - W
Q_{cond}	คือ พลังงานในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (Conduction), W/m^2
Q_{conv}	คือ พลังงานในการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (Convection), W/m^2
Q_{rad}	คือ พลังงานในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation), W/m^2
Q_{latent}	คือ พลังงานความร้อนแฝงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ, W/m^2
R	คือ ค่าการต้านทานความร้อน (Thermal Resistance – R Value), $m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_{Day}	คือ ค่าการต้านทานความร้อนช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนสถานะ, $m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_{Night}	คือ ค่าการต้านทานความร้อนช่วงหลังการเปลี่ยนสถานะ, $m^2 \cdot ^\circ C/W$
R_n	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุชั้นที่ n
SC	คือ สัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก
ΔT	คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองด้านของวัสดุ ($T_{เปลี่ยนแปลง} - T_{เริ่มต้น}$), $^\circ C$

T_o	คือ อุณหภูมิอากาศ, °C
T_{so}	คือ อุณหภูมิของผิววัตถุภายนอกที่ติดกับอุณหภูมิอากาศ, °C
T_{si}	คือ อุณหภูมิของผิววัตถุภายในที่ติดกับอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง, °C
T_{in}	คือ อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง, °C
T_i	คือ อุณหภูมิวัสดุก่อนละลาย, °C
T_m	คือ อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุ (Melting Temperature), °C
T_{fi}	คือ อุณหภูมิวัสดุที่เปลี่ยนไปหลังละลาย, °C
T_p	คือ อุณหภูมิของผิววัตถุ, °C
T_f	คือ อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากผิวหรืออุณหภูมิส่วนต้นของของไหล, °C
T_s	คือ อุณหภูมิของวัตถุแผ่รังสีความร้อน (อุณหภูมิของผิววัตถุ-อุณหภูมิที่ได้รับการแผ่รังสี), °C
U	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value), $W/m^2\cdot K$
U_w	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ ($W/m^2\cdot K$)
V	คือ ปริมาตรของวัสดุเก็บความร้อน, m^3
WWR	คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างต่อพื้นที่ผนังทึบ
Δx	คือ ความหนาของวัตถุ หรือระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (ความหนา), m
LPD	คือ ปริมาณการใช้แสงสว่าง (Lighting Power Density), W/m^2
EPD	คือ ปริมาณการใช้ไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Equipment Power Density), W/m^2
$CaCl_2$	คือ แคลเซียมคลอไรด์
Na_2CO_3	คือ โซเดียมคาร์บอเนต
PS	คือ กล่องพลาสติกโพลีสไตรีนบรรจุพาราฟิน
SL	คือ กล่องสแตนเลสบรรจุพาราฟิน
MS	คือ กล่องเมทัลซีทบรรจุพาราฟิน
MF	คือ เมทัลซีทกรุฟอยล์ด้านล่าง
CC	คือ แผ่นคอนกรีต
α	คือ ค่าการดูดซึมรังสีความร้อน (Absorptance)
ρ	คือ ค่าการสะท้อนรังสีความร้อน (Reflectance)
σ	คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ($5.669 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

- ϵ คือ ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (emissivity)
- τ คือ ค่าการส่องผ่านของรังสีอาทิตย์ (Solar transmittance) รวมทั้งกระจกชั้นนอกและชั้นใน



ภาคผนวก ข

คุณสมบัติและลักษณะของวัสดุเปลี่ยนสถานะและวัสดุหลังคาที่ใช้ในงานวิจัย

1. คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุหลังคาที่ใช้ในการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในโปรแกรม VisualDOE 4.1

ตารางแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของพาราฟินการวัดด้วยเครื่อง DSC

	ช่วงอุณหภูมิเมื่อเริ่มเปลี่ยนสถานะจนละลายทั้งหมด (°C)	ค่าความจุความร้อน (Heat of fusion) (kJ/kg)	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Cp) (kJ/kg °C)
พาราฟิน (โดยเฉลี่ย)	47-60	197.63	1.27

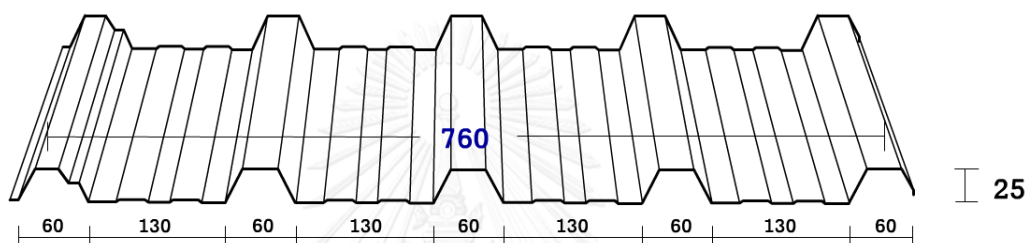
ตารางแสดงค่าทางความร้อนของหลังคาที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

	บรรจุพาราฟิน 2,200 กรัม			เมทัลชีท กรุฟอยล์ ด้านล่าง	แผ่น คอนกรีต หนา 5 ซม.
	กล่อง พลาสติก โพลีไสตรีน	กล่องสแตน- เลส	กล่องเมทัล ชีท		
ความหนารวม (m)	0.022	0.022	0.022	0.006	0.05
K Value (W/m ² K)	0.009	0.007	0.0067	0.25	0.026
R Value (m ² K/W)	2.57	3.20	3.36	1.57	1.90

2. ลักษณะและราคาของหลังคาเมทัลชีทที่ใช้ในงานวิจัย

แผ่นเมทัลชีท คือแผ่นเหล็กคุณภาพสูง High Tensile Steel รีดเป็นลอนด้วยเครื่องจักร เคลือบเหล็กอลูซิงค์ (Aluzinc) ซึ่งเป็นการชุบเคลือบชุบทั้งอลูมิเนียมและสังกะสี สามารถป้องกันสนิม มีอายุการใช้งานยาวนาน มีคุณสมบัติโดยทั่วไปดังนี้

1. มีความแข็งแรง และน้ำหนักเบา ทำให้ติดตั้งง่ายและรวดเร็ว
2. มีความคงทน กันสนิมได้ดีกว่าเหล็กชุบทั่วไปมากกว่า 4 เท่า และอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี
3. มีให้เลือกได้หลากหลายสี สัน และความหนา
4. มีคุณสมบัติลดความร้อน และกันเสียงได้ดี
5. สามารถกำหนดความยาวแผ่น ไม่มีรอยต่อ ประหยัดโครงสร้างได้มากกว่า 25-30 %



ภาพลักษณะหลังคาเมทัลชีทลอนมาตรฐาน 760 ที่ใช้ในงานวิจัยและเป็นที่ยอมรับทั่วไป

ที่มา: <http://www.pmmetalsheet.com>

ตารางแสดงลักษณะของแผ่นเมทัลชีทไม่เคลือบสีที่ใช้ในงานวิจัย

BMT (มม.)	TCT (มม.)	น้ำหนัก	
		กก./ม.	กก./ตร.ม.
0.35	0.40	2.670	3.51

ที่มา: <http://www.ckbplatesteel.com>

ตารางแสดงราคาของแผ่นเมทัลชีทไม่เคลือบสี BMT 0.35

	Metal Sheet	Metal Sheet with foil
ราคา (บาท/ตร.ม.)	฿ 120	฿ 180

ภาคผนวก ค

1. การทดลองเบื้องต้น เพื่อทดสอบอัตราส่วนผสมของตัวแปร

กล่องทดลอง เก็บบันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาทีตั้งแต่ 6.00 น.- 22.00 น. จาก 4 จุดของกล่องทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิผิวภายนอก (T_{so}) และใน (T_{si}) อุณหภูมิในกล่องทดสอบ (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

ตัวแปรต้น (1) พาราฟิน (PF);

(2 พาราฟินผสมกลีเซอริน (PF+Glycerin)

ตัวแปรตาม อุณหภูมิภายในกล่องทดสอบ

ตัวควบคุม ทุกตัวแปรบรรจุกล่องสแตนเลส ขนาด 14x22x2 ซม. น้ำหนักตัวแปร 200 กรัม

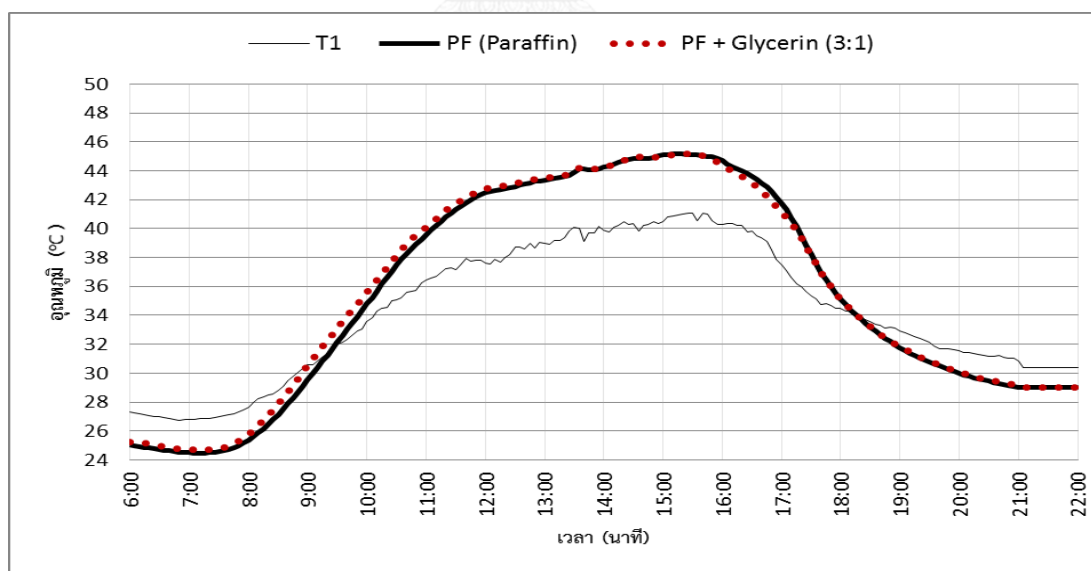
วางตำแหน่งด้านบนกล่อง ทดสอบโดยใช้แสงอาทิตย์จริง ช่วงเดือน ม.ค.

การทดลองเปรียบเทียบวัสดุระหว่าง 2 ตัวแปรทดสอบ

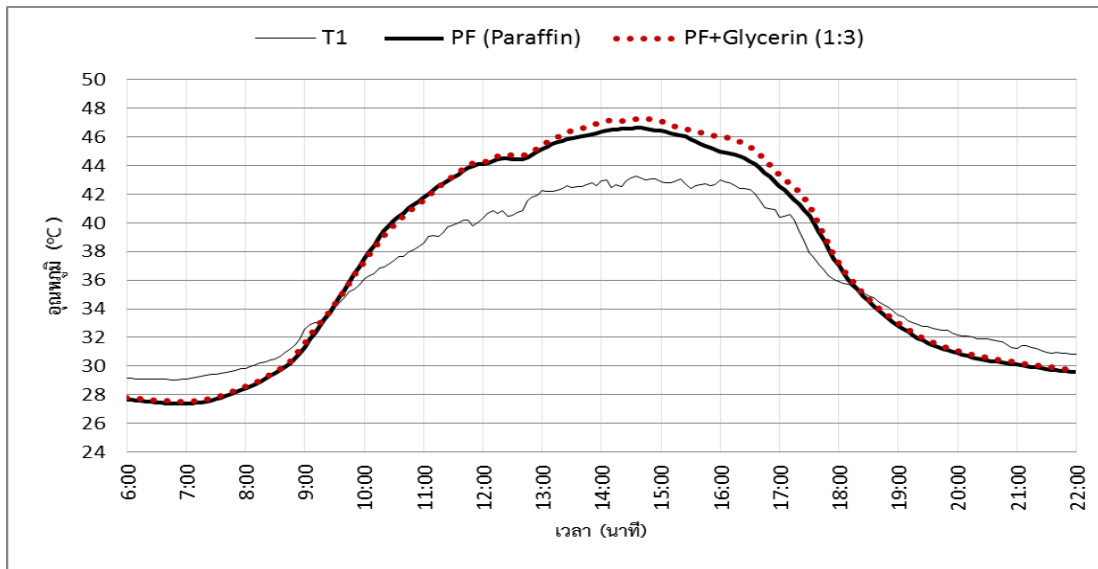
(I) พาราฟิน 100 กรัม กับพาราฟินผสมผสมกลีเซอริน 50 กรัม (3:1)

(II) พาราฟิน 100 กรัม กับพาราฟินผสมกลีเซอริน 150 กรัม (1:3)

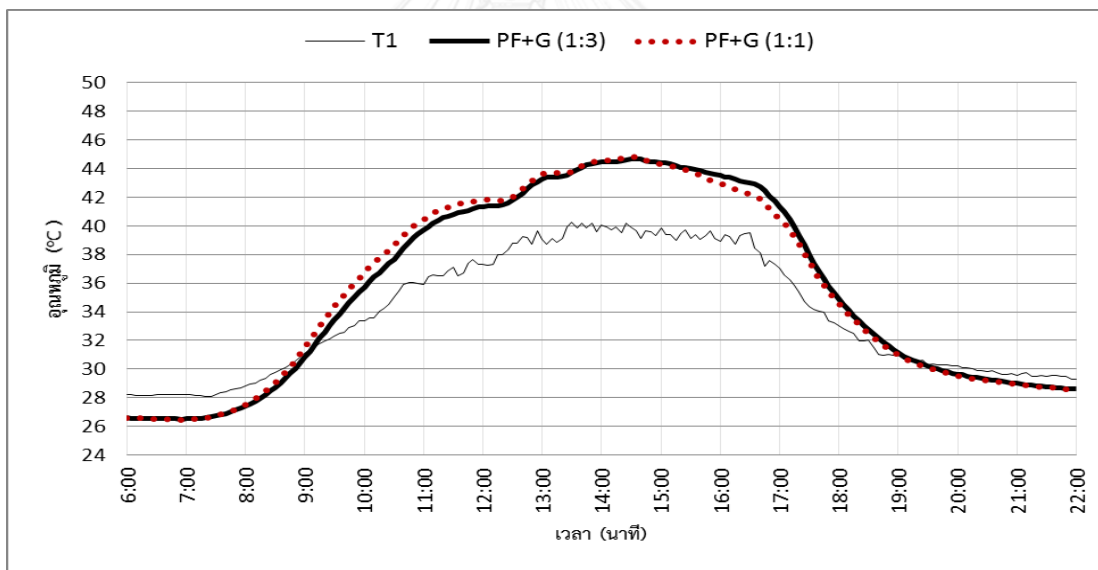
(III) พาราฟินผสมกลีเซอริน 150 กรัม (1:3) กับ พาราฟินผสมกลีเซอริน 100 กรัม (1:1)



แผนภูมิการทดลอง (I) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินและพาราฟินผสมกลีเซอริน อัตราส่วน 3:1 ด้วย อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)



แผนภูมิการทดลอง (II) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินและพาราฟินผสมกลีเซอริน อัตราส่วน 1:3 ด้วย อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)



แผนภูมิการทดลอง (III) เปรียบเทียบระหว่างพาราฟินผสมกลีเซอริน อัตราส่วน 1:3 และพาราฟินผสมกลีเซอริน อัตราส่วน 3:1 ด้วยอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง (T_{in}) และอุณหภูมิอากาศ (T_o)

1.1 ผลการทดลอง

การทดสอบเบื้องต้นพบว่า จากการทดลอง (I) คือ ผสมกลีเซอริน กรัมเข้ากับพาราฟิน 150 50 กรัม (อัตราส่วน 3: 1) แทบไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง การทดลอง (II) ผสมกลีเซอริน 150 กรัม (1: 3) เป็นการลดประสิทธิภาพของพาราฟิน และการทดลอง (III) เปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของพาราฟินต่อกลีเซอรินคือ 1:3 และ 1:1 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงมากกว่า การทดลอง (I) แต่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

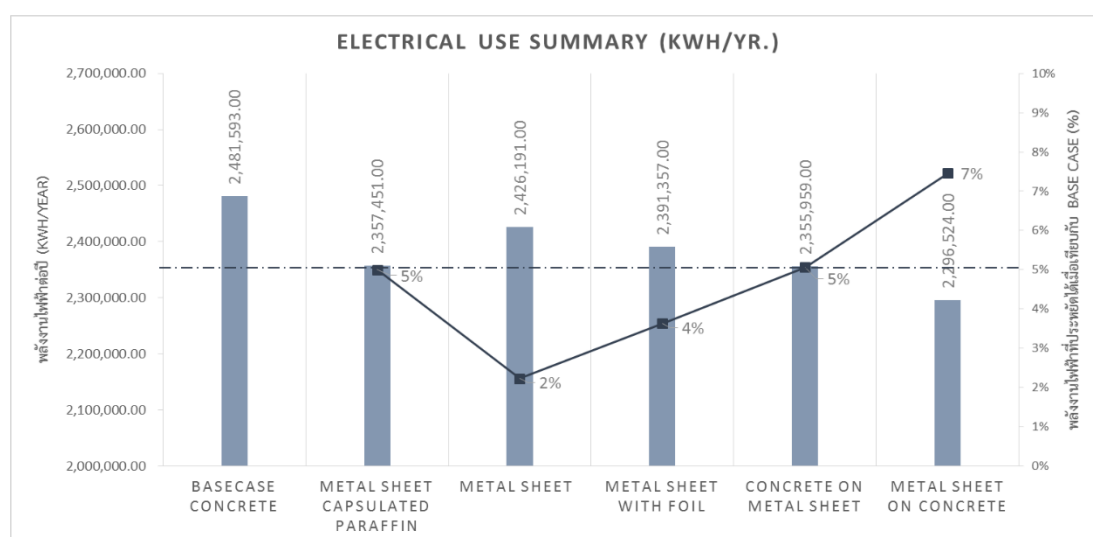
2. การจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารอ้างอิงด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

2.1 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าจากอาคารจริง

ทั้งนี้เพื่อสามารถทราบภาพรวมของการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ชัดเจนมากขึ้น จึงจำลองการใช้พลังงานของอาคารต้นแบบทั้งอาคาร ตามจำนวนชั้นจริง

อาคารสำนักงาน 7 ชั้น

อาคารสำนักงานใช้เครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่เวลากลางวัน 8.00-18.00 น. อาคารมีขนาด 30x47 ม. สูง 7 ชั้น แต่ละชั้นสูง 3 ม. ใช้หลังคาคอนกรีตหนา 10 ซม. และมีพื้นที่หลังคาอาคารรวม 1,410 ตร.ม.

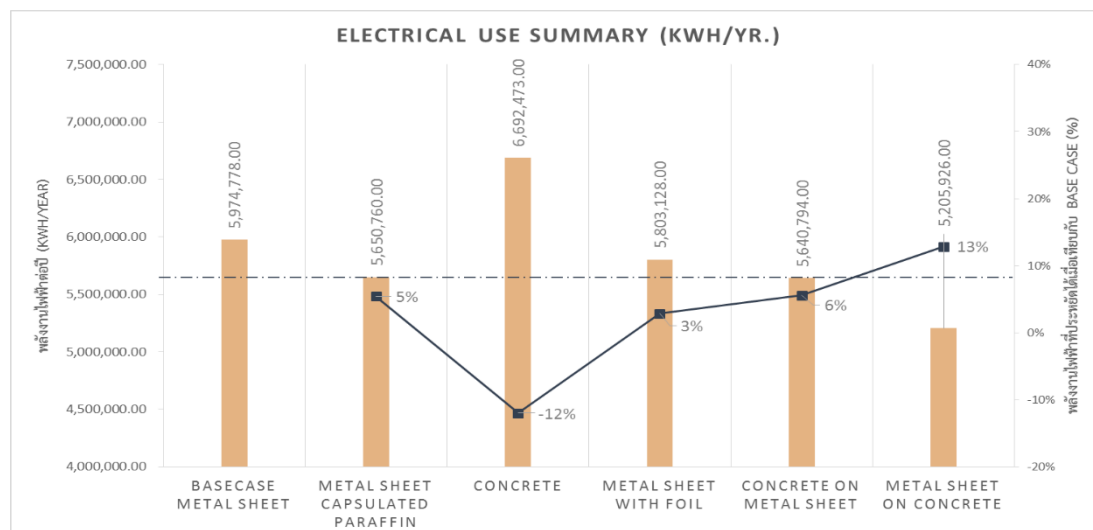


แผนภูมิผลรวมพลังงานการใช้ไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน

ผลการใช้พลังงานรวมของทั้งอาคารสำนักงาน พบว่าหลังคาที่มีพาราฟินเป็นองค์ประกอบใช้พลังงานต่ำที่สุดเป็น 3 อันดับแรก โดย 2 อันดับแรกเป็นระบบหลังคา 2 ชั้น ที่ทำงานร่วมกันกับแผ่นคอนกรีต คือ หลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตและวางใต้หลังคาแผ่นคอนกรีต ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี 2,296,524 kWh และ 2,355,959 kWh ซึ่งเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตธรรมดาสามารถประหยัดได้ถึงร้อยละ 7 และ 5 ตามลำดับ ส่วนอันดับที่ 3 คือหลังคาล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟิน หากเปรียบเทียบเฉพาะระบบหลังคา 1 ชั้น พบว่าหลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปีต่ำที่สุดอยู่ที่ 2,357,451 kWh ซึ่งประหยัดได้ร้อยละ 5 เทียบเท่ากับระบบหลังคา 2 ชั้นที่วางใต้หลังคาคอนกรีต แต่สามารถประหยัดการใช้ไฟฟ้าได้มากกว่าหลังคาเมทัลกรูพอยล์เพียงร้อยละ 1 เนื่องจากจำลองทั้งอาคารซึ่งมีส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการรับรังสีอาทิตย์ด้านบนอยู่มาก นอกจากนี้หากพิจารณาการเลือกใช้ที่คำนึงถึงน้ำหนักของระบบหลังคาที่เพิ่มขึ้นและอาจจะส่งผลกระทบต่อระบบก่อสร้าง การเลือกใช้หลังคาล่องเมทัลชีทบรรจุพาราฟินเหมาะสมที่สุด

อาคารร้านค้าปลีก 3 ชั้น

อาคารร้านค้าปลีกใช้เครื่องปรับอากาศเวลาที่ถึงกลางวันและถึงกลางคืน คือ 10.00-22.00 น. อาคารขนาด 40x70 ม. สูง 3 ชั้น แต่ละชั้นสูง 4 ม. ใช้หลังคาเมทัลชีทและพื้นที่หลังคาอาคารรวม 2,800 ตร.ม.

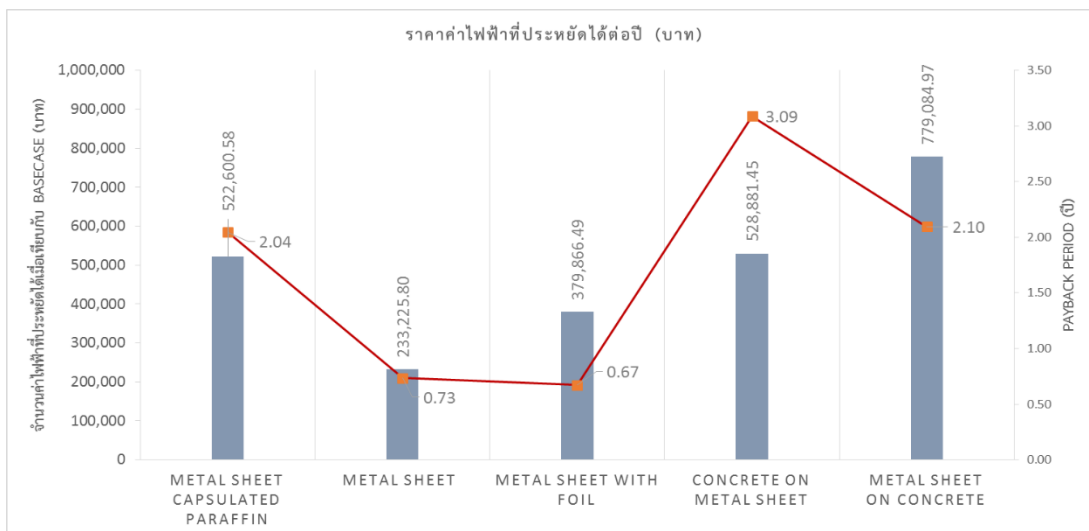


แผนภูมิผลรวมการใช้พลังงานการใช้ไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า

ผลการใช้พลังงานรวมของทั้งอาคารร้านค้า พบว่ามีแนวโน้มเหมือนอาคารสำนักงาน คือ หลังคาที่มีพาราฟินเป็นองค์ประกอบเป็นกลุ่มที่ใช้พลังงานต่ำที่สุด ได้แก่ หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีต วางใต้หลังคาแผ่นคอนกรีตและหลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน ใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 ปี 5,205,926 kWh 5,640,794 kWh และ 5,650,760 kWh ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับหลังคาเมทัลชีททั่วไปสามารถประหยัดได้ถึงร้อยละ 13 6 และ 5 ตามลำดับ นอกจากนี้การที่หลังคาก่อเมทัลชีทใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าหลังคาเมทัลชีทกรุพอยล์เล็กน้อย เนื่องจากช่วงกลางคืนพาราฟินเริ่มคายความร้อนเพื่อคืนสภาพของแข็ง ทำให้ช่วงเวลากลางคืนของร้านค้าที่ยังมีการใช้งานอยู่เกิดภาวะทำความเย็นมากกว่าหลังคาเมทัลชีทธรรมดา ที่สามารถระบายความร้อนออกไปได้เร็วกว่า ทั้งนี้หากพิจารณาการเลือกใช้หลังคาที่คำนึงถึงการใช้งานที่เหมาะสมที่สุด และน้ำหนักของระบบหลังคาที่จะมีผลต่อระบบก่อสร้าง ควรเลือกใช้หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน เนื่องจากหลังคาคอนกรีต ไม่เหมาะสมสำหรับทำหลังคาอาคารร้านค้า และก่อก่อเมทัลชีทสามารถประหยัดได้เทียบเท่ากับระบบหลังคา 2 ชั้นที่วางใต้หลังคาคอนกรีต

2.2 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

อาคารสำนักงาน 7 ชั้น



แผนภูมิจำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน

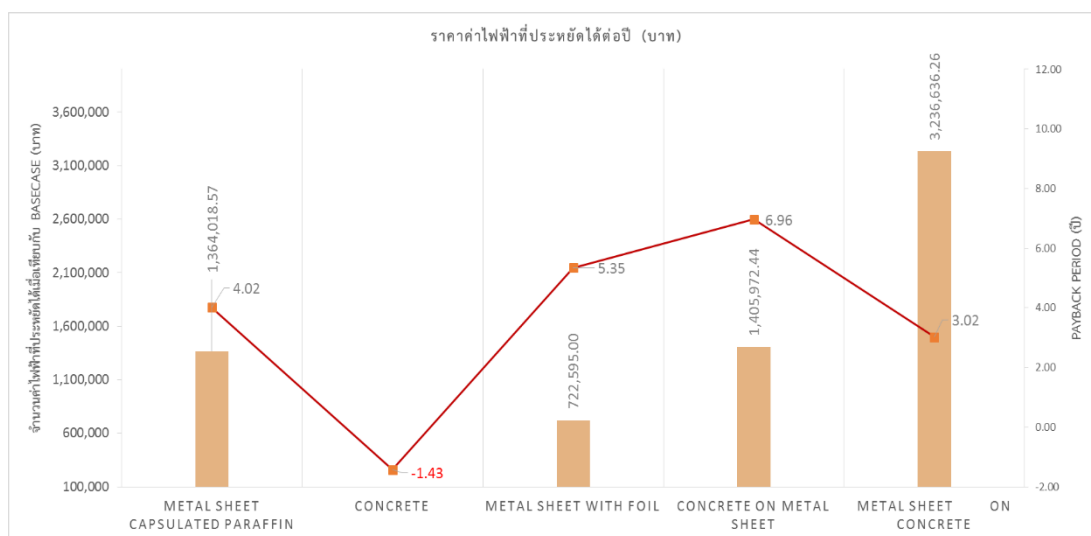
ผลการคำนวณราคาค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของทั้งอาคารสำนักงาน มีแนวโน้มการใช้พลังงานไปในทางเดียวกันกับการจำลองเพียง 1 ชั้น คือ หลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตยังสามารถประหยัดได้สูงที่สุด คือ 779,084 บาท อันดับที่ 2 และ 3 คือ ระบบหลังคา 2 ชั้นวางได้หลังคาคอนกรีตและหลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินมีค่าใกล้เคียงกัน 528,831 บาทและ 522,600 บาท ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามระบบหลังคา 2 ชั้นวางได้หลังคาคอนกรีตกลับมีระยะคืนทุนที่นานกว่าถึง 1.05 ปี แต่ทั้งนี้หลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตมีระยะเวลาคืนทุนใกล้เคียงกับหลังคาถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟิน คือ 2.10 ปี และ 2.04 ปีตามลำดับ

เพราะฉะนั้นสำหรับอาคารสำนักงานที่มีดาดฟ้าอาคารเป็นพื้นคอนกรีต พบว่าการใช้ระบบหลังคา 2 ชั้น โดยติดตั้งถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินไว้บนแผ่นคอนกรีตเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการหน่วงความร้อนได้มากที่สุด จึงลดภาระในการทำความเย็นของอาคารได้มากที่สุด ถึงแม้การลงทุนที่สูงกว่าด้านวัสดุแต่กลับมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 2.1 ปี ซึ่งใกล้เคียงกับถ่วงเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดาที่ราคาต้นทุนต่ำกว่า แต่พลังงานที่สามารถประหยัดได้ยังต่ำกว่า

ตารางแสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของทั้งอาคารสำนักงาน

	Base case Concrete	Metal Sheet capsulated Paraffin	Metal Sheet	Metal Sheet with foil	Concrete on Metal sheet	Metal sheet on Concrete
พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบทำความเย็น ต่อปี (kWh/year)	2,481,593	2,357,451	2,426,191	2,391,357	2,355,959	2,296,524
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	10,446,762	9,924,161	10,213,536	10,066,896	9,917,881	9,667,677
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน						
1. ค่ากล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟิน (บาท)	-	1,066,900	-	-	1,066,900	1,066,900
2. ค่าคอนกรีต 240 kscหนา 10 ซม. (บาท)	564,000	-	-	-	564,000	564,000
3. หลังคาเมทัลชีท	-	-	169,200	-	-	-
4. หลังคาเมทัลชีทมี ฟอยล์ (บาท)	-	-	-	253,800	-	-
5. ค่าดำเนินการ ติดตั้ง (บาท/ตร.ม.)	380	400	400	400	780	780
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตร.ม.)	1,410	1,410	1,410	1,410	1,410	1,410
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)	565,790	1,068,710	171,010	255,610	1,633,090	1,633,090
ราคาค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	-	522,601	233,226	379,866	528,881	779,085
ค่าไฟฟ้าจากระบบทำ ความเย็นที่ประหยัด ได้เมื่อเทียบกับ Base case (%)	-	5 %	2%	3.6%	5%	7%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	-	2.0	0.7	0.7	3.1	2.1

อาคารร้านค้าปลีก 3 ชั้น



แผนภูมิจำนวนเงินที่ประหยัดได้ต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้า

ผลการคำนวณราคาค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของทั้งอาคารร้านค้าปลีก มีแนวโน้มการใช้พลังงานไปในทางเดียวกันกับการจำลองเพียง 1 ชั้น แต่หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตสามารถประหยัดได้สูงที่สุด คือ 3,236,636 บาท ซึ่งห่างจากอันดับที่ 2 และ 3 เป็นจำนวนมาก คือ ระบบหลังคา 2 ชั้นวางใต้หลังคาคอนกรีตและหลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันที่ 1,405,972 บาทและ 1,364,018 บาท ตามลำดับ นอกจากนี้หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางบนหลังคาคอนกรีตยังสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดคือ 3.02 ปี และหลังคาก่อเมทัลชีทอยู่ที่ 4.02 ปีตามลำดับ แต่ก่อก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินวางใต้หลังคามีระยะเวลาคืนทุนนานที่สุดที่ 6.96 ปี

จากผลการจำลองพบว่าสำหรับอาคารร้านค้าที่นิยมใช้หลังคาเมทัลชีทโดยทั่วไป การใช้ระบบหลังคา 2 ชั้น โดยติดตั้งก่อก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินไว้บนแผ่นคอนกรีตยังคงลดภาระในการทำความเย็นของอาคารได้มากที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการหน่วงความร้อนได้มากที่สุด ทั้งนี้ถึงแม้ว่าการใช้ระบบหลังคา 2 ชั้นและติดตั้งก่อก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินไว้บนอกอาคาร จะสามารถประหยัดราคาค่าไฟฟ้าได้มากที่สุดและมีระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด แต่การจำลองครั้งนี้ไม่ได้คำนวณครอบคลุมถึงปริมาณราคาค่าก่อสร้างที่ต้องเพิ่มมากขึ้นเพื่อรองรับน้ำหนักที่มากขึ้นของหลังคา หากพิจารณาถึงความเหมาะสมของอาคารร้านค้าที่นิยมใช้หลังคาเมทัลชีท การเลือกใช้หลังคาก่อเมทัลชีทบรรจุพาราฟินธรรมดาถือว่าเหมาะสมที่สุดในระบบหลังคา 1 ชั้น

ตารางแสดงผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของทั้งอาคารร้านค้า

	Base case Concrete	Metal Sheet capsulate d Paraffin	Metal Sheet	Metal Sheet with foil	Concrete on Metal sheet	Metal sheet on Concrete
พลังงานไฟฟ้าจาก ระบบทำความเย็น ต่อปี (kWh/year)	5,974,778	5,650,760	6,692,473	5,803,128	5,640,794	5,205,926
ค่าไฟฟ้าต่อปี	25,152,023	23,788,004	28,173,304	24,429,428	23,746,051	21,915,387
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน						
1. ค่ากล่องเมทัลชีท บรรจุพาราฟิน (บาท)	-	2,118,667	-	-	2,118,667	2,118,667
2. ค่าคอนกรีต 240 kscหนา 10 ซม. (บาท)	-	-	1,120,000	-	1,120,000	1,120,000
3. หลังคาเมทัลชีท	336,000	-	-	-	-	-
4. หลังคาเมทัลชีทมี ฟอยล์	-	-	-	504,000	-	-
5. ค่าดำเนินการติดตั้ง (บาท/ตร.ม.)	400	400	380	400	780	780
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตร.ม.)	2,800	8,400	8,400	8,400	8,400	8,400
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)	1,456,000	5,478,667	4,312,000	3,864,000	9,790,667	9,790,667
ราคาไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ต่อปี (บาท)	-	1,364,019	-3,021,281	722,595	1,405,972	3,236,636
ค่าไฟฟ้าจากระบบทำ ความเย็นที่ประหยัด ได้เมื่อเทียบกับ Base case (%)	-	5%	-12%	3%	6%	13%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	-	4.0	-1.4	5.4	7	3.0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเปรมวิภา สิริปัญญานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2535 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 Email: premwipanya@gmail.com

