



มหาวิทยาลัยศรีปทุม

รายงานการวิจัย
เรื่อง

การใช้สารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างภายนอกเพื่อการจัดการ
พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนภายในอาคาร
UTILIZATION OF PHASE CHANGE MATERIALS IN
BUILDING ENVELOPE STRUCTURE FOR
THERMAL ENERGY MANAGEMENT

ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูริกุล

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2549

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ในการสนับสนุนงบประมาณสำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ รวมถึง รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการเป็นที่ปรึกษาและ คำแนะนำอันทรงคุณค่าตลอดการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ขอแสดงความขอบคุณต่อ Professor Richard D. Gould, Ph.D. แห่ง North Carolina State University, USA ที่ได้แนะนำถึง คุณประโยชน์ของการใช้สารเปลี่ยนสถานะสำหรับการจัดการพฤติกรรมทางความร้อนในงาน วิศวกรรมต่างๆ และจุดประกายให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้ขึ้น สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักวิจัย เจ้าหน้าที่ส่วนต่างๆแห่งมหาวิทยาลัยศรีปทุม รวมถึง เพื่อนอาจารย์ และ ลูกศิษย์ ในภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดการทำงานวิจัย ณ มหาวิทยาลัยแห่งนี้

กุมภาพันธ์ 2551

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

หัวข้อวิจัย : การใช้สารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างภายนอกเพื่อการจัดการพฤติกรรม
การถ่ายเทความร้อนภายในอาคาร

ผู้วิจัย : นาย ชลธิศ เขียมวรวิฑูกร

หน่วยงาน : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

ปีที่พิมพ์ : พ.ศ. 2551

บทคัดย่อ

การใช้สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) เป็นส่วนประกอบในผนัง
โครงสร้างเปลือกของอาคารภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ได้ถูกศึกษาโดยวิธีการ
จำลองเชิงตัวเลข (finite-difference numerical method) เพื่อประเมินถึงศักยภาพในการเพิ่มมวล
ความร้อนให้แก่โครงสร้างผนังในรูปของความร้อนแฝง สำหรับการจัดการพฤติกรรมทางความร้อน
ของผนังอาคารในการลดอุณหภูมิสูงสุดของผนัง และบรรเทาภาระความร้อนที่อาคารได้รับในช่วง
กลางวันเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวผนังภายนอกมีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ ผลงาน
วิจัยยังใช้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและออกแบบการใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อการจัดการ
การถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างผนังอาคารในรูปแบบเฉพาะต่างๆ รวมถึงโอกาสในการใช้ PCM
สำหรับงานทางวิศวกรรมอื่นๆ

การศึกษาพบว่า การผนวกสารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม
ในปริมาณที่เพียงพอ และลักษณะการผนวกเข้าไปในโครงสร้างผนังที่ถูกต้อง สามารถเปลี่ยน
พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนในแต่ละรอบวันของผนังเปลือกอาคารในกรุงเทพมหานครได้ ทำ
ให้อุณหภูมิผิวผนังสูงสุดมีค่าลดลงและช่วงเวลาของการเกิดขึ้นให้ช้าลง เป็นผลให้ปริมาณการ
ถ่ายเทความร้อนสู่ภายในอาคารในช่วงเวลากลางวันมีค่าลดลงได้เป็นอย่างมาก การศึกษาพบว่า
อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิเฉลี่ยในรอบวันของวัสดุผนัง ณ ตำแหน่งที่มี
สารเปลี่ยนสถานะติดตั้งอยู่ โดยการติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะเข้าไปในโครงสร้างควรมีลักษณะเป็น
ชั้นของ PCM ที่ไม่หนาจนเกินไป ติดตั้งเข้าไปในชั้นโครงสร้างผนังในตำแหน่งที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย
ของผนังเท่ากับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้ โดยมีปริมาณ PCM น้อยที่สุดที่
ส่งผลให้มีการใช้ความจุความร้อนแฝงหรือประสิทธิภาพการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ (%
Active PCM) เท่ากับ 100% พอดี

คำสำคัญ: สารเปลี่ยนสถานะ, ภาระความร้อนในอาคาร, ภาระความร้อนสูงสุด, มวลความร้อน

ResearchTitle : Utilization of Phase Change Materials in Building Envelope
Structure for Thermal Energy Management

Researcher Name : Mr. Chonlathis Eiamworawutthikul

Name of Institution : Mechanical Engineering Department, Sripatum University

Year of Publication : B.E. 2551

ABSTRACT

Utilization of paraffin type phase change material (PCM) in building envelope with the purpose to enhance latent heat storage of the structure is investigated. The study is performed using finite-difference numerical method to solve transient heat transfer characteristic of typical composite wall structures under Bangkok's weather conditions. The objective is to estimate potential of using PCM to alter daily wall thermal behavior, so maximum inner wall surface temperature and peak daytime heat gain to inner space can be reduced. The investigation also aims to provide general guidelines for proper design methodology of how to integrate PCM into a typical wall structure, as well as to acquire fundamental information for further study of using PCM in other engineering applications.

The computational results indicate that using PCM with suitable phase transition temperature, adequate amount of PCM, and proper impregnated position inside the wall can effectively stabilize daily wall temperature and minimize amount of daytime heat gain to interior space. The phase transition temperature that allows the best utilization of PCM's latent heat storage is equal to the daily wall average temperature at the location where PCM is placed inside the wall. When impregnated inside a wall structure, PCM should be formed as a thin layer instead of mixing it uniformly throughout the wall thickness, so better performance of PCM can be obtained. The optimal amount of PCM used is found to be the least amount where all latent heat storage is exploited during an operating cycle.

Keywords: phase change material, building thermal management, peak cooling load

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 คำถามการวิจัย.....	3
1.4 สมมุติฐานการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5.1 กลุ่มเป้าหมาย หรือประชากร.....	3
1.5.2 เนื้อหาของการวิจัย.....	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	6
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	9
3.1 ระเบียบงานวิจัย.....	9
3.1.1 แบบแผนทางการวิจัย.....	9
3.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	9
3.1.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง.....	10
3.1.4 เครื่องมือและวัสดุสำหรับการวิจัย.....	10
3.1.5 การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	10
3.2 รูปแบบจำลองผนังและสมการการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.3 สมการเชิงตัวเลขของแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนัง.....	14
3.4 สมการจำลองพฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ.....	19
3.5 ข้อมูลภูมิอากาศและการคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์.....	28
4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่อการทำงานของ PCM.....	28
4.2 วิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม.....	35
4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของกำแพงภายใต้สภาพแวดล้อมในแต่ละวัน ตลอดเดือน.....	42
4.4 การประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด...	45
4.5 การใช้ PCM ในผนังเบา.....	50
บทที่ 5 สรุปงานวิจัย.....	58
บรรณานุกรม.....	61
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก. ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายชั่วโมงบนพื้นผิวใน กรุงเทพมหานคร.....	66
ภาคผนวก ข. ข้อมูลการวัดค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างโดยเครื่อง differential scan calorimeter (DSC).....	81
ประวัติผู้วิจัย.....	84

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	คุณสมบัติทางความร้อนของ PCM ที่สถานะของแข็งหรือของเหลว.....	19
2	คุณสมบัติทางความร้อนของอิฐและ PCM.....	30
3	คุณสมบัติทางความร้อนของส่วนประกอบผนังเบา.....	51



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

สารบัญภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แบบจำลองเปลือกผนังโครงสร้างและการถ่ายเทพลังงาน.....	11
2 FDE node สำหรับ node ภายในชั้นกำแพง.....	15
3 FDE node สำหรับ node บริเวณรอยต่อของชั้นกำแพง.....	16
4 FDE node สำหรับ node บนผิวผนังภายนอก.....	17
5 FDE node สำหรับ node บนผิวผนังภายใน.....	18
6 ตัวอย่างค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ PCM ที่อุณหภูมิระหว่าง การเปลี่ยนสถานะ จากการวัดโดยใช้เครื่อง DSC.....	20
7 แบบจำลองค่าความจุความร้อนของ PCM สำหรับใช้ในการคำนวณ.....	21
8 ความเข้มแสงอาทิตย์ในรอบวันเฉลี่ยบนพื้นนอนราบของ กรุงเทพมหานคร.....	22
9 อุณหภูมิอากาศ (dry-bulb) เฉลี่ยในรอบวัน ของกรุงเทพมหานคร.....	22
10 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยที่ตกกระทบบนพื้นนอนราบของ กรุงเทพมหานคร.....	23
11 อุณหภูมิอากาศ เฉลี่ย/สูงสุด/ต่ำสุดในแต่ละเดือนของ กรุงเทพมหานคร.....	23
12 แสดงมุมรังสีแสงอาทิตย์ (direct radiation) และ ทิศทางระนาบพื้นผิว...	25
13 แบบจำลองผนังและการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ.....	29
14 อุณหภูมิผิวผนังภายนอกและภายในเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเปลี่ยน สถานะของ PCM เท่ากับ 25 °C.....	31
15 อุณหภูมิผิวผนังอาคารภายในและภายนอกเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ เปลี่ยนสถานะของ PCM เท่ากับ 40 °C.....	32
16 อุณหภูมิผิวผนังอาคารภายในและภายนอกเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ เปลี่ยนสถานะของ PCM เท่ากับ 55 °C.....	33
17 ปริมาณพลังงานความร้อนที่กำแพง PCM สามารถดูดซับได้ ที่อุณหภูมิ เปลี่ยนสถานะต่างๆ.....	36

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
18	อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในรอบวันของผิวผนังอาคารภายในและภายนอก.....	38
19	ร้อยละความร้อนแฝงของ PCM ที่ถูกใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆในกำแพง.....	40
20	อุณหภูมิเฉลี่ยกำแพงตลอดความหนา ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่างๆของ.....	41
21	อุณหภูมิและพฤติกรรมทางความร้อนของผนังตลอดช่วงเดือนเมษายนของกรุงเทพมหานคร.....	43
22	รูปแบบจำลองผนังและวงจรความต้านทานความร้อนสำหรับการประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพง.....	46
23	รูปส่วนประกอบผนังเบา และ สภาพแวดล้อม.....	50
24	อุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุดและเวลาที่เกิดขึ้น.....	52
25	อุณหภูมิผิวผนังภายในของผนังเบาที่เงื่อนไขต่างๆเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นราบของกรุงเทพมหานครในเดือนเมษายน.....	53
26	ปริมาณพลังงานความร้อนถ่ายเทจากผนังเบาสู่พื้นที่ภายใน.....	55
27	ปริมาณความร้อนถ่ายเทสู่พื้นที่ผิวภายในที่ลดลงในช่วงกลางวัน และประสิทธิภาพการใช้ความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะในชั้น PCM.....	57

สัญลักษณ์

ตัวอักษรอังกฤษ

C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
day_{yr}	จำนวนวันของปี
E	พลังงาน
E_{time}	ค่า equation of time
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
\dot{I}''	ค่าความเข้มพลังงานแสงอาทิตย์
H	มุมชั่วโมง (hour angle) ของแสงอาทิตย์
i	ลำดับ node ในหนึ่งในการคำนวณเชิงตัวเลข
j	ลำดับขั้นที่ของผนังในการคำนวณเชิงตัวเลข
k	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity)
L	ความหนาของผนัง
n	ลำดับขั้นเวลาในการคำนวณเชิงตัวเลข
\dot{q}''	อัตราพลังงานความร้อนต่อ 1 หน่วยพื้นที่
T	อุณหภูมิ
t	เวลา
t_{sun}	เวลาแสงอาทิตย์ หรือ solar time
U	พลังงานภายในของวัสดุ
x	ระยะความหนาของผนังวัดจากผิวด้านนอก
Δx	ระยะความกว้างของ node ในการคำนวณเชิงตัวเลข
Δt	ระยะความห่างของลำดับขั้นเวลา ในการคำนวณเชิงตัวเลข

ตัวอักษรกรีก

α	thermal diffusivity ของวัสดุ
β	มุมรังสีแสงอาทิตย์ที่ทำมุมจากพื้นราบ
δ	มุม declination ตามการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์
φ	มุม solar azimuth angle หรือแนวรังสีแสงอาทิตย์วัดตามเข็มนาฬิกาจากทิศใต้
ε	สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีหรือการแผ่รังสีความร้อน

สัญลักษณ์ (ต่อ)

∞	สภาพอากาศแวดล้อม
φ_{lat}	ตำแหน่ง latitude ของพื้นผิวที่พิจารณา
ρ	ความหนาแน่น
σ	ค่า Stefan Boltzman = 5.67×10^{-8} [W/m ² -K ⁴]
σ	มุมเอียงของผนังกับพื้นราบ
θ	มุมระหว่างรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง และ ทิศ vector ของพื้นผิว

Subscript

<i>abs</i>	การดูดซับรังสีความร้อน
<i>cond</i>	การถ่ายเทความร้อนจากการนำ
<i>conv</i>	การถ่ายเทความร้อนจากการพา
<i>emit</i>	การแผ่รังสีความร้อน
<i>i</i>	ลำดับ node ในผนังสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข
<i>ini</i>	ค่าเริ่มต้น (initial)
<i>j</i>	ลำดับชั้นที่ของผนังในการคำนวณเชิงตัวเลข
<i>L</i>	ที่ระยะ $x = L$ (ผิวผนังภายใน)
<i>m</i>	การเปลี่ยนสถานะ
<i>o</i>	ภายนอก (outside) (ผิวผนังภายนอก)
<i>rad</i>	การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี
<i>s</i>	พื้นผิวผนัง
<i>solar</i>	แสงอาทิตย์
<i>sol,dir</i>	แสงอาทิตย์โดยตรง (direct solar)
<i>sol,diff</i>	แสงอาทิตย์กระจาย (diffuse solar)
<i>surr</i>	สภาพแวดล้อม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาระทำความเย็นทั้งหมดภายในอาคารจำนวนมาก มีอัตราส่วนที่มากกว่าครึ่งมาจากความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโครงสร้างเปลือกห่อหุ้มอาคาร (เช่น หลังคา ผนังภายนอก) โดยเฉพาะอาคารในท้องถิ่นเขตร้อนซึ่งรวมถึงประเทศไทย ผนังเปลือกห่อหุ้มอาคารจะดูดซับพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งไว้ในลักษณะ sensible heat ทำให้วัสดุและผิวผนังด้านภายในอาคารมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากผิววัสดุที่อุณหภูมิสูงไปยังอากาศภายในอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดเป็นภาระทำความเย็นแก่ระบบปรับอากาศ สำหรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกเข้ากระทบกับโครงสร้างภายในอาคาร (เช่น พื้น ฝ้าเพดาน ผนังภายใน) การถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายในอาคารสามารถอธิบายได้ด้วยกระบวนการแบบเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ภาระทำความเย็นของอาคารจะมีปริมาณขึ้นลงตามกำลังแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเวลาของแต่ละวัน ก่อให้เกิดสภาวะภาระทำความเย็นสูงสุดที่ต้องจัดการระบบปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่เพียงพอสำหรับภาระทำความเย็นสูงสุดที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังเกิดสภาวะการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคารซึ่งมีผลต่อการคำนวณอัตราค่าไฟฟ้า นอกเหนือจากนี้ การที่ผิวผนังภายในอาคารมีอุณหภูมิสูงยังก่อให้เกิดสภาวะที่ไม่สบายสำหรับผู้ที่อยู่ภายในอาคาร

เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศภายในอาคารในช่วงที่มีกำลังแสงอาทิตย์สูง ผู้ออกแบบจึงมักระบุการใช้ฉนวนกันความร้อนหรือวัสดุที่มีการนำความร้อนต่ำในโครงสร้างเปลือกห่อหุ้มอาคาร หรือ สถาปนิกอาจออกแบบตัวอาคารให้บริเวณใช้งานภายในอาคารหลีกเลี่ยงการกระทบแสงอาทิตย์โดยตรง อย่างไรก็ตามวัสดุกันความร้อนที่ใช้โดยทั่วไปมักไม่พอเพียงเนื่องจากมีข้อจำกัดของขนาดความหนาของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างอาคาร และโดยมากเนื่องจากข้อจำกัดด้านความสวยงาม ตัวอาคารจึงไม่สามารถถูกออกแบบให้หลีกเลี่ยงการกระทบแสงอาทิตย์ได้โดยตรงเสมอไป นวัตกรรมใหม่ที่ถูกนำมาใช้ในประเทศไทย คือ radiant floor cooling ในสนามบินสุวรรณภูมิ ที่ถูกออกแบบเพื่อรองรับภาระความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรง อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบต้องการความละเอียดซับซ้อนอีกทั้งเพิ่มอุปกรณ์ระบบที่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเป็นอย่างมาก

อีกวิธีการหนึ่งที่สามารถลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของวัสดุโครงสร้างอาคารเนื่องจากการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ คือการเลือกใช้วัสดุโครงสร้างที่มีมวลความร้อน (thermal mass) ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามวัสดุโครงสร้างโดยทั่วไปซึ่งดูดเก็บความร้อนแบบ sensible heat มีมวล

ความร้อนแปรผันโดยตรงกับมวลของวัสดุ ดังนั้นการเพิ่มมวลความร้อนจึงหมายถึงการเพิ่มขนาดและน้ำหนักโครงสร้างของตัวอาคารซึ่งมักจะถูกจำกัดโดยค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ประโยชน์ใช้สอยและความสวยงามของอาคาร

ดังนั้นหากสามารถใช้วัสดุเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) ที่ดูดเก็บความร้อนในลักษณะ latent heat ในโครงสร้างอาคารทั่วไปได้ จะช่วยเพิ่มมวลความร้อนให้แก่วัสดุโครงสร้างเป็นอย่างมากโดยไม่มีผลกระทบต่อมวลโครงสร้างรวม เนื่องจากกระบวนการเก็บความร้อนของ PCM เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนสถานะซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก ทำให้ลดขนาดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงของผิวผนังภายในอาคารในแต่ละวันเนื่องจากการดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ส่งผลให้ภาระทำความเย็นของอาคารมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ลดอัตราการทำความเย็นสูงสุดและขนาดของระบบทำความเย็น รวมถึงลดอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดของอาคาร

การนำ PCM มาใช้ เป็นส่วนประกอบของวัสดุโครงสร้างอาคารได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะสำหรับสภาพภูมิอากาศในเขตนานในแถบ ยุโรป และ อเมริกาเหนือ เพื่อการใช้งานในระบบ passive solar heating รายงานผลการศึกษาดังกล่าวได้ชี้ให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้ PCM ในความสามารถการเก็บและการจัดการการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อใช้การทำความร้อนและความเย็นแก่อาคารในแต่ละวัน อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการเลือกใช้ PCM ที่มีอยู่หลากหลายชนิดและมีจุดเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน หรือ วิธีการออกแบบลักษณะติดตั้งหรือวิธีการผนวก PCM เข้าไปในโครงสร้างอาคารของงานวิจัยที่ผ่านมา เป็นไปในแบบที่เฉพาะเจาะจงสำหรับลักษณะการใช้งานของอาคารและสภาพภูมิอากาศที่ใช้ในการศึกษาแต่ละกรณี ซึ่งผลสรุปที่รายงานไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยทั่วไป โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน และ ในอาคารที่มีลักษณะการใช้งานที่ต่างกัน

เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด การนำ PCM ไปใช้ในวัสดุโครงสร้างของอาคารแต่ละประเภทในแต่ละท้องถิ่นจำเป็นต้องศึกษาการทำงานของ PCM ที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศ และลักษณะภาระทำความเย็นของอาคาร ดังนั้นงานวิจัยที่เสนอนี้จะศึกษาถึงศักยภาพและการใช้ PCM เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของอาคารธุรกิจทั่วไปบนพื้นฐานของสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ในการควบคุมพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนภายในอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- เพื่อศึกษาถึงศักยภาพการจัดการภาระทำความเย็นภายในอาคารเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material) เป็นองค์ประกอบของผนัง โครงสร้างภายนอกอาคาร ในสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร
- เพื่อเป็นองค์ความรู้และแนวทางถึงโอกาสในการใช้สารเปลี่ยนสถานะในการจัดการความร้อนสำหรับงานทางวิศวกรรมอื่นๆ

1.3 คำถามการวิจัย

- การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเปลือกผนังโครงสร้างผนังภายนอก ของอาคารภายใต้สภาพ ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครมีลักษณะเป็นเช่นไร
- อุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมของสารเปลี่ยนสถานะที่จะถูกนำไปใช้ในผนัง โครงสร้างอาคารควรมีค่าที่เท่าไร
- สารเปลี่ยนสถานะมีประเภทอะไรบ้างที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่อาจจะสามารถถูกนำมาใช้ ได้
- หากสารเปลี่ยนสถานะถูกนำมาใช้ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเปลือกผนัง โครงสร้างอาคารจะเปลี่ยนแปลงไปเช่นใด

1.4 สมมติฐานการวิจัย

การนำสารเปลี่ยนสถานะมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของผนังโครงสร้างอาคารจะสามารถควบคุม ให้ตัวอาคารมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและภาระทำความเย็นสูงสุด (peak cooling load) น้อยลง ส่งผลให้สามารถลดขนาดของระบบทำความเย็นรวมที่ต้องใช้ และ ลดค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน ของอาคารได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 กลุ่มเป้าหมาย หรือประชากร

ข้อมูลจากการจำลองพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากคอมพิวเตอร์

1.5.2 เนื้อหาของการวิจัย

- ศึกษาข้อมูลสภาพภูมิอากาศและความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของกรุงเทพมหานครฯ

- จำลองพฤติกรรมทางความร้อนของเปลือกผนังโครงสร้างอาคารทั่วไปที่ตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง
- ศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะที่จะถูกนำมาพิจารณา โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต และ ค่าการความจุความร้อนจากการวัด โดยเครื่อง differential scan calorimeter (DSC) เพื่อนำมาเป็นตัวแทนในการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผนวกเข้าเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองทางความร้อนของเปลือกผนังโครงสร้างอาคาร
- ศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผนังโครงสร้างอาคารระหว่างแบบที่มีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมอยู่

รวมระยะเวลาการดำเนินวิจัย 1 ปี

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

- สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) หมายถึง วัสดุ เช่น ชีพิ้ง กรดไขมัน เกลือ และสารอื่นๆ ที่ถูกนำมาใช้เพื่อ ดูดและคาย พลังงานความร้อนแฝง ขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่าง ของเหลวและของ แข็ง ซึ่งมีคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะเกือบจะคงที่ โดยที่สารเปลี่ยนสถานะแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกันและเหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน
- มวลความร้อน (thermal mass) หมายถึง ความสามารถในการเก็บพลังงานความร้อนของวัสดุ ต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ วัสดุที่มีมวลความร้อนสูง สามารถดูดซับหรือคาย ปริมาณพลังงานความร้อน ได้มากโดยที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่า วัสดุที่มีมวลความร้อนที่ต่ำ เมื่อดูดซับหรือคายพลังงานความร้อน ในปริมาณที่เท่ากัน
- ภาระทำความเย็นสูงสุด (peak cooling load) หมายถึง ช่วงเวลาที่อาคารต้องการขนาดทำความเย็นจากระบบทำความเย็นสูงสุด เพื่อให้สมดุลกับอัตราความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวอาคารที่มีมากที่สุดในช่วงเวลานั้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในอาคารให้เป็นไปตามที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ในเวลาบ่ายของฤดูร้อนที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบตัวอาคารมากที่สุด มีอุณหภูมิอากาศภายนอกสูง และมีผู้อยู่อาศัยในตัวอาคารจำนวนมากที่สุด
- ความร้อนสัมผัส (sensible heat) หมายถึง ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากวัสดุ และส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของวัสดุ

- ความร้อนแฝง (latent heat) หมายถึง ความร้อนที่วัสดุดูดซับหรือถ่ายเทออก ระหว่างการเปลี่ยนสถานะ โดยที่มีอุณหภูมิคงที่
- Radiant floor cooling หมายถึง ระบบการทำความเย็นโดยการจ่ายน้ำเย็นไปตามท่อใต้พื้น ทำให้อุณหภูมิของพื้นโครงสร้างต่ำลง ส่งผลให้ผู้ที่อยู่บนพื้นรู้สึกเย็นลง หรือ อาจถูกออกแบบให้ตัวพื้นและน้ำเย็นดูดซับพลังงานความร้อนรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เพื่อป้องกันไม่ให้อพลังงานความร้อนแฝงไปสู่ส่วนอื่นๆของอาคาร



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

สารเปลี่ยนสถานะ หรือ phase change material (PCM) ได้ถูกนำมาศึกษาและใช้งานเพื่อควบคุมจัดการการถ่ายเทความร้อนในงานวิศวกรรมหลายด้านนอกเหนือจากการใช้ในการควบคุมความร้อนภายในอาคาร อาทิเช่น การใช้ในแผ่นระบายความร้อน (thermal pad) สำหรับตัวกำเนิดสัญญาณแสง laser ในอุปกรณ์การสื่อสาร optical amplifier ที่ต้องการการระบายความร้อนที่อุณหภูมิคงที่เพื่อควบคุมให้ได้แสง laser ที่มีความยาวคลื่นที่เที่ยงตรง การศึกษาทดลองถึงการระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ของไหลระบายความร้อน ethylene glycol-water ผสมด้วย PCM ชนิด octacosane ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของแข็งเป็นของเหลวที่ประมาณ 60°C และถูกห่อหุ้มภายในเปลือกพลาสติกในลักษณะ micro-encapsulated phase change material (MEPCM) ได้ถูกรายงานในเอกสารอ้างอิง (Eiamworawutthikul 2001) ในรายงานได้ระบุถึงประสิทธิภาพของ MEPCM ในการช่วยเพิ่มค่าความจุความร้อนของสารระบายความร้อนได้ถึง 5 เท่าและช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้สูงถึง 20%-60% อย่างไรก็ตามการศึกษาได้รายงานว่าคุณสมบัติการทำงานของ PCM นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของ PCM ที่เลือกใช้ ที่ต้องมีความเหมาะสมกับการทำงานของระบบระบายความร้อนที่นำไปใช้

สำหรับการใช้งาน PCM ในวัสดุโครงสร้างอาคารเพื่อการจัดการกระบวนการถ่ายเทความร้อนได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง (Athienitis and others 1997: 405-410, Banu and others 1998: 39-45, Benard 1982: 101-109, Christensen and Benson 1983, Feldman and others 1995: 147-157, Hawes and others 1989a: 335-348, Hawes and others 1989b: 103-118, Hawes and others 1993: 77-86, Ismail and Castro 1997: 1281-1296, Lee and others 2000: 217-237, Neepor 2000: 393-403, Rudd 1993 และ Stovall and Tomlinson 1995) แต่โดยมากงานวิจัยถูกจำกัดอยู่ในสภาพท้องถิ่นที่มีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ เช่นในประเทศสหรัฐอเมริกา และ ประเทศในทวีปยุโรป เพื่อนำ PCM ไปใช้ในระบบการทำความร้อนแบบ passive solar heating โดยที่ PCM ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมได้ถูกผสมเข้าไปในวัสดุโครงสร้างอาคาร เช่น ผนังกำแพง Trombe-wall หรือ แผ่นผนังยิปซั่ม เพื่อเพิ่มมวลความร้อนในรูปของความร้อนแฝงให้แก่โครงสร้างผนัง โดยทั่วไปแล้วสาร PCM ประเภทอินทรีย์ (organic PCM) จะมีค่าความจุความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง-ของเหลว มากกว่า 10 เท่าของค่าความจุความร้อนของคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้างอาคารทั่วไปที่มีขนาดน้ำหนักเท่ากัน ดังนั้นการ

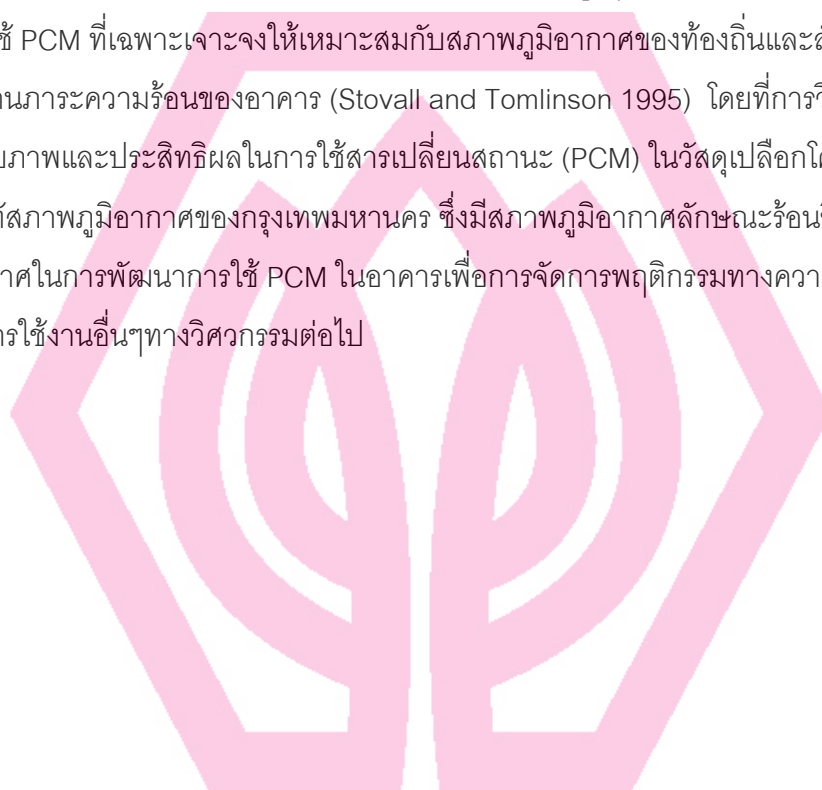
ใช้ PCM เป็นส่วนผสมในคอนกรีตโครงสร้างสามารถเพิ่มค่ามวลความร้อนของวัสดุ (thermal mass) โดยมีผลเพียงเล็กน้อยต่อขนาดน้ำหนักของโครงสร้าง (Hawes and others 1989a: 335-348, Hawes and others 1989b: 103-118, Hawes and others 1993: 77-86 และ Ismail and Castro 1997: 1281-1296)

ในการศึกษาการพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของกำแพงที่มี PCM ผสม เมื่อ PCM มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งเป็นของเหลวในช่วงกลางวันเนื่องจากการดูดซับความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ และคายความร้อนออกสู่ภายในอาคารในช่วงกลางคืนที่สภาพอากาศภายนอกเย็นลงโดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ความร้อนที่คายออกจาก PCM นี้ช่วยการประหยัดพลังงานในการทำความร้อนให้แก่พื้นที่ภายในอาคารจากเชื้อเพลิงหรือไฟฟ้า การศึกษาระบุถึงอัตราการประหยัดที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้ โดยได้ระบุว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมคือคุณสมบัติเฉื่อยของอากาศในพื้นที่ใช้งานที่สัมผัสผนัง PCM (Rudd 1993 และ Stovall and Tomlinson 1995)

PCM ที่ถูกนำมาพิจารณาเพื่อการใช้งานในอาคารอาจจะเป็นทั้งประเภท inorganic materials (เช่น salt-hydrate) หรือ ประเภท organic materials (เช่น paraffin waxes หรือ fatty acid) (Hawes and others 1993: 77-86) โดยที่ PCM ประเภท organic materials ถูกระบุว่ามีความเหมาะสมแก่การใช้งานมากกว่า กระทรวงพลังงานของประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Energy หรือ DOE) ได้ระบุประเภทของ PCM หลายชนิดที่สามารถใช้ในการผสมเข้ากับ ผนังอาคารและแผ่นฝ้าสำหรับระบบการออกแบบอาคารที่ใช้ระบบ passive solar heating (U.S. Department of Energy 2001a และ 2001b) งานวิจัยที่สนับสนุนโดย DOE หรือสถาบันอื่น ๆ ทั้งในประเทศแถบยุโรปและแคนาดา ได้รายงานสนับสนุนถึงการใช้ PCM ในผนังอาคารทั้งภายในและภายนอก ที่ช่วยให้มีการประหยัดพลังงานที่มากขึ้นรวมถึงการปรับปรุงสภาพอากาศภายในอาคารให้มีความสบายมากขึ้น PCM บางชนิดเช่น butyl stearate, n-octadecane, polyethelene glycol ได้ถูกศึกษาเป็นพิเศษและได้รับการระบุว่ามีความเหมาะสมในการใช้ผสมกับวัสดุที่ใช้งานภายในอาคารเนื่องจากมีคุณสมบัติในการหลอมเหลวใกล้เคียงกับคุณสมบัติเฉื่อยของอากาศภายในอาคารทั่วไป (Christensen and Benson 1983, Hawes and others 1993: 77-86 และ Rudd 1993)

ถึงแม้ว่าการศึกษาวิจัยได้มีการดำเนินการอย่างกว้างขวางทั้งการทดลองและการคำนวณ โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังที่กล่าวมาในข้างต้น การศึกษาวิจัยเพิ่มเติมยังมีความจำเป็นเพื่อที่จะระบุถึงประสิทธิภาพในการทำงานของ PCM ที่สภาวะสภาพแวดล้อม หรือสภาพ

ภูมิอากาศอื่นๆ งานวิจัยที่ได้มีรายงานออกมาแล้วนั้นยังขาดการระบุถึงแนวทางทั่วไปในการออกแบบ สำหรับวิธีการกำหนดคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม และ แนวทางในการผนวก PCM เข้าไปในวัสดุโครงสร้างสำหรับการใช้งานในอาคารภายใต้สภาพภูมิอากาศและลักษณะการใช้งานที่ต่างต่างกัน การออกแบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาเลือกใช้ PCM ที่เฉพาะเจาะจงให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของท้องถิ่นและลักษณะพฤติกรรมทางด้านภาระความร้อนของอาคาร (Stovall and Tomlinson 1995) โดยที่การวิจัยในที่นี้ได้ศึกษาถึงศักยภาพและประสิทธิผลในการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (PCM) ในวัสดุเปลือกโครงสร้างอาคารภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีสภาพภูมิอากาศลักษณะร้อนชื้น เพื่อวิเคราะห์ถึงโอกาสในการพัฒนาการใช้ PCM ในอาคารเพื่อการจัดการพฤติกรรมทางความร้อนของอาคารและการใช้งานอื่นๆทางวิศวกรรมต่อไป



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์ผลการคำนวณ จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เพื่อศึกษาถึงศักยภาพของการใช้ PCM เป็นส่วนประกอบในเปลือกผนังโครงสร้างของอาคาร ในการตอบสนองต่อสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร โดยได้วิเคราะห์เปรียบเทียบถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิ และการดูดซับความร้อนของผนังโครงสร้าง เมื่อมี PCM และ ไม่มี PCM ผสมอยู่ในเนื้อวัสดุ

ในบทนี้ได้อธิบายรูปแบบการดำเนินงานวิจัยในภาพรวมตามหัวข้อที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดวิธีการวิจัย วิธีการกำหนดสมการเชิงตัวเลขของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และข้อมูลสภาพภูมิอากาศกรุงเทพมหานครที่ใช้ในการคำนวณได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ถึง 3.5

3.1 ระเบียบงานวิจัย

3.1.1 แบบแผนทางการวิจัย

- ศึกษาค้นคว้าจากเอกสารตีพิมพ์ทางวิชาการและจากหน่วยงานต่างๆ ในหัวข้อที่เกี่ยวข้อง
- สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการการคำนวณวิเคราะห์ให้ได้ผลสรุปในการศึกษา

3.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- ศึกษาค้นคว้าถึงสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร
- ศึกษาค้นคว้าถึงชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ รวมถึงลักษณะทั่วไปของการดูดซับความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะบางชนิด ที่สามารถถูกนำมาใช้พิจารณาเป็นตัวแทนในการสร้างแบบจำลอง โดยการวัดค่าความจุความร้อนของตัวอย่างสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้เครื่อง differential scan calorimeter (DSC)
- สร้างโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะทางความร้อนของโครงสร้างผนังอาคาร โดยผนวกการจำลองพฤติกรรมการดูดซับความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะและสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร
- ศึกษารวบรวมข้อมูลจากการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ และ วิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้

- สรุปและรายงานผล

3.1.3 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ผลข้อมูลงานวิจัย ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงพฤติกรรมทางความร้อนของเปลือกโครงสร้างอาคาร (หลังคา และ ผนังภายนอก) ในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร

3.1.4 เครื่องมือและวัสดุสำหรับการวิจัย

- เครื่องคอมพิวเตอร์
- สารเปลี่ยนสถานะตัวอย่างประเภท paraffin
- เครื่อง differential scan calorimeter
- โปรแกรมเขียนภาษาทางคอมพิวเตอร์ FORTRAN
- อุปกรณ์วิเคราะห์ผลและผลิตรายงาน (โปรแกรม MS Word, MS Excel, กล้องถ่ายรูป, printer)

3.1.5 การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

รวบรวมบันทึกผลการคำนวณจาก แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยวิธีเชิงตัวเลข และ โดยการสังเคราะห์ทางเลขคณิต เพื่อตอบคำถามสำหรับงานวิจัยที่ได้กำหนดไว้ โดยที่การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับแผ่นผนังเปลือกอาคารถูกกำหนดขึ้นโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) แบบ finite differences ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.2 และ 3.3 เพื่อคำนวณพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ และ อุณหภูมิวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (1-D transient heat transfer) อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และ อุณหภูมิบรรยากาศ ของกรุงเทพมหานคร จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา และ โปรแกรม Weather Maker (U.S. National Renewable Energy Laboratory 2002 และ กรมอุตุนิยมวิทยา 2547)

การจำลองพฤติกรรมการดูดซับความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะที่ถูกใช้เป็นส่วนประกอบในโครงสร้างผนัง ได้ถูกอธิบายในหัวข้อที่ 3.4 โดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ โดยมีค่าสูงขึ้นขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งและของเหลว การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบที่ปรับเปลี่ยนตามเวลาและการจัดวางของผนังที่พิจารณาในการคำนวณได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.5 การคำนวณ

แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังตามที่แสดงในภาพประกอบ 1 มีการกระจายอุณหภูมิภายในผนังแต่ละชั้น เป็นไปตามสมการการนำความร้อน 1 มิติ แบบไม่คงตัว (1-D transient conduction heat transfer equation)

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

โดยที่

$T(x,t)$ คือ อุณหภูมิของผนังที่ตำแหน่ง x และเวลา t ใดๆ

α_j คือ thermal diffusivity ของวัสดุในชั้นที่ $j = (1), (2), (3), (4), \text{ หรือ } (5)$

$$\alpha_j = \frac{k_j}{(\rho C_p)_j}$$

และมีข้อกำหนดจุดเวลาเริ่มต้น (initial condition) และขอบเขต (boundary condition) ดังนี้

ที่เวลา $t = 0$

$$T(x, 0) = T_{ini} \quad (3.2)$$

โดยที่

T_{ini} คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผนัง

ที่ตำแหน่งผิวผนังด้านนอก ($x=0$)

$$-k_{j=1} \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \dot{q}''_{solar,o} + \dot{q}''_{rad,o} + \dot{q}''_{conv,o} \quad (3.3)$$

โดยที่

$k_{j=1}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของกำแพงชั้นที่ 1

$\dot{q}''_{solar,o}$ คือ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ผิวกำแพงภายนอกดูดซับได้ต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$\dot{q}''_{rad,o}$ คือ ความร้อนจากการแผ่รังสี (radiation) ที่กำแพงได้รับจากสิ่งแวดล้อม

ภายนอก ต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$\dot{q}''_{conv,o}$ คือ ความร้อนจากการพา (convection) ที่กำแพงได้รับจากอากาศภายนอกต่อ 1 หน่วยพื้นที่

ที่ตำแหน่งผิวผนังด้านในอาคาร ($x=L$)

$$+k_{j=5} \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = \dot{q}''_{solar,i} + \dot{q}''_{rad,i} + \dot{q}''_{conv,i} \quad (3.4)$$

โดยที่

$k_{j=5}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ของกำแพงชั้นที่ 5

$\dot{q}''_{solar,i}$ คือ ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ผิวกำแพงภายในดูดซับได้ต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$\dot{q}''_{rad,i}$ คือ ความร้อนจากการแผ่รังสี (radiation) ที่กำแพงได้รับจากสิ่งแวดล้อมภายในต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$\dot{q}''_{conv,i}$ คือ ความร้อนจากการพา (convection) ที่กำแพงได้รับจากอากาศภายในต่อ 1 หน่วยพื้นที่

ที่ตำแหน่งรอยต่อระหว่างชั้นผนัง

$$\left[k_j \frac{\partial T(t)}{\partial x} \right]_{layer j} = \left[k_{j+1} \frac{\partial T(x_{j,j+1},t)}{\partial x} \right]_{layer j+1} \quad (3.5)$$

โดยที่

$x_{j,j+1}$ คือ ตำแหน่งของกำแพงที่รอยต่อระหว่างชั้นที่ j และ $j+1$

การคำนวณค่าพลังงานความร้อน หรือ heat flux (\dot{q}'') ของการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ (3.3) และ (3.4) เป็นไปตามสมการดังนี้

จาก รังสีแสงอาทิตย์

$$\dot{q}''_{solar} = \varepsilon_{abs} \dot{I}''_{solar} \quad (3.6)$$

จากการแผ่รังสีระหว่างผิวผนังกับสิ่งแวดล้อม

$$\dot{q}''_{rad} = \varepsilon_{emit} \sigma (T_{sur}^4 - T_s^4) \quad (3.7)$$

จากการพาความร้อน

$$\dot{q}''_{conv} = h(T_\infty - T_s) \quad (3.8)$$

โดยที่

ε_{abs}	คือ สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีความร้อนแสงอาทิตย์ของผิวผนัง
ε_{emit}	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของผิวผนัง
I''_{solar}	คือ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบบนผิวผนังจากข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร
σ	คือ ค่า Stefan Boltzman = 5.67×10^{-8} [W/m ² -K ⁴]
T_s	คือ อุณหภูมิผิวผนัง
T_{sur}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของสภาพแวดล้อม
T_∞	คือ อุณหภูมิอากาศจากข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร

3.3 สมการเชิงตัวเลขของแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนัง

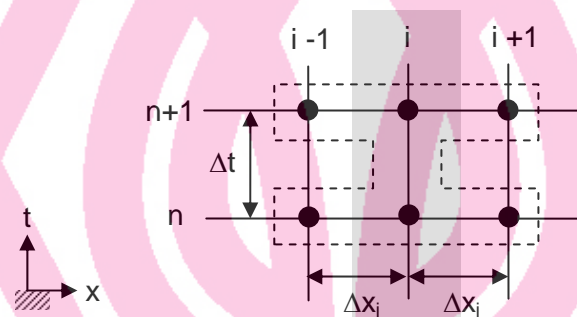
การคำนวณเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของรูปแบบผนังจำลองและสมการการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้องซึ่งอยู่ในรูปของ partial differential equation (PDE) ดังอธิบายโดยสมการ (3.1)-(3.5) ในหัวข้อที่ 3.2.1 ได้ใช้วิธีเชิงตัวเลขแบบ finite-difference numerical methods ที่มีลักษณะรูปแบบ algorithm ของ Crank-Nicolson implicit method (Tannehill, Anderson and Pletcher 1997)

สมการที่เกี่ยวข้องแบบ PDE ในแต่ละตำแหน่งของกำแพงสามารถเปลี่ยนเป็นสมการ finite-difference (FDE) โดยแต่ละตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิของเนื้อวัสดุ หรือ node “ i ” ถูกกำหนดมีระยะห่างเท่าๆกันเท่ากับ Δx_j ในแต่ละชั้นของกำแพง j ซึ่งการคำนวณค่าอุณหภูมิของแต่ละ node ถูกดำเนินไปแต่ละชั้นของเวลา (time step) “ n ” ที่มีระยะช่วงของเวลาเท่ากับ Δt

กำแพงดังแสดงในภาพประกอบ 1 สามารถแบ่งการตั้งสมการ FDE เพื่อการคำนวณค่า อุณหภูมิได้เป็นส่วนคือ a) ส่วนที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุของชั้นกำแพง, b) ส่วนที่เป็นรอยต่อระหว่าง ชั้นกำแพง c) ส่วนที่เป็นผิวกำแพงภายนอก และ d) ส่วนที่เป็นผิวกำแพงภายใน ดังนี้

Node ภายในกำแพง

Node ภายในกำแพงซึ่งมีการกระจายอุณหภูมิเป็นไปตามสมการ (3.1) สามารถตั้ง Crank-Nicolson FDE ตามภาพประกอบ 2 ได้ดังนี้



ภาพประกอบ 2 FDE node สำหรับ node ภายในชั้นกำแพง

จากสมการ PDE
$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T}{\partial t}$$

ได้สมการ FDE

$$\frac{(T_i^{n+1} - T_i^n)}{\Delta t} = \frac{\alpha_j}{\Delta x_j^2} \left[\frac{(T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}) + (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)}{2} \right]$$

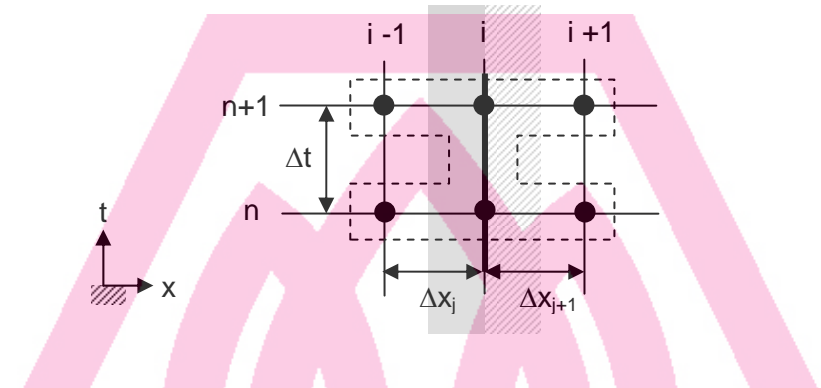
สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$T_{i+1}^{n+1} - 2\frac{(1+r)}{r}T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} = -T_{i+1}^n - 2\frac{(1-r)}{r}T_i^n - T_{i-1}^n$$

โดยที่
$$r = \frac{\alpha_j \Delta t}{(\Delta x_j)^2} \quad (3.9)$$

Node รอยต่อระหว่างชั้นกำแพง

Node รอยต่อระหว่างกำแพงสามารถวิเคราะห์โดยใช้การสมดุลพลังงานสำหรับ control volume ส่วนที่แรเงาทั้งสองฝั่งของรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดในภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 FDE node สำหรับ node บริเวณรอยต่อของชั้นกำแพง

$$\Sigma(\dot{E})_{in} = \Sigma(\dot{E})_{out} + \frac{dE_{CV}}{dt}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left[\frac{k_j(T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1})}{\Delta x_j} + \frac{k_j(T_{i-1}^n - T_i^n)}{\Delta x_j} \right] \\ = \frac{1}{2} \left[\frac{k_{j+1}(T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1})}{\Delta x_{j+1}} + \frac{k_{j+1}(T_i^n - T_{i+1}^n)}{\Delta x_{j+1}} \right] \\ + \left\{ \left(\rho \frac{\Delta x}{2} C_p \right)_j + \left(\rho \frac{\Delta x}{2} C_p \right)_{j+1} \right\} \left(\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \right) \end{aligned}$$

สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$\begin{aligned} mT_{i+1}^{n+1} - \left(1 + m + 2C_m \frac{\Delta x_j}{k_j \Delta t} \right) T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1} \\ = -mT_{i+1}^n + \left(1 + m - 2C_m \frac{\Delta x_j}{k_j \Delta t} \right) T_i^n - T_{i-1}^n \end{aligned}$$

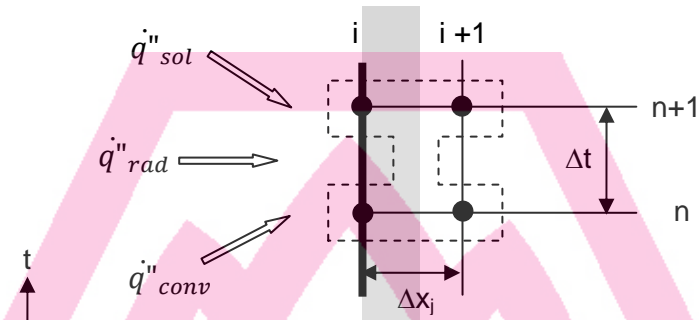
โดยที่

(3.10)

$$m = \frac{k_{j+1}}{k_j} \frac{\Delta x_j}{\Delta x_{j+1}} \quad \text{และ} \quad C_m = \left(\rho \frac{\Delta x}{2} C_p \right)_j + \left(\rho \frac{\Delta x}{2} C_p \right)_{j+1}$$

Node บนผิวกำแพงภายนอก ($x = 0$)

Node บนผิวกำแพงภายนอกอาคารสามารถวิเคราะห์โดยใช้การสมดุลพลังงานสำหรับ control volume ส่วนที่แรเงาในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 FDE node สำหรับ node บนผิวผนังภายนอก

$$\Sigma(\dot{E})_{in} = \Sigma(\dot{E})_{out} + \frac{dE_{CV}}{dt}$$

$$\begin{aligned} \dot{q}''_{sol,o} + \dot{q}''_{rad,o} + \dot{q}''_{conv,o} \\ = \frac{k_j}{\Delta x_j} \left[\frac{(T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1}) - (T_i^n - T_{i+1}^n)}{2} \right] + \frac{\Delta x_j (\rho C_p)_j}{2 \Delta t} (T_i^{n+1} - T_i^n) \end{aligned}$$

จากสมการ (3.6)-(3.8) โดยให้ $T_{sur,o} \sim T_{\infty,o}$ สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} T_{i+1}^{n+1} + \left(\frac{h_o \Delta x_j}{2k_j} + \frac{1}{2r} + \frac{1}{2} \right) T_i^{n+1} + 0 T_{i-1}^{n+1} \\ = \frac{\Delta x_j}{k_j} \left[\varepsilon_{abs,o} \dot{q}''_{sol,o} + \varepsilon_{emit,o} \sigma (T_{sur,o}^4 - T_i^n{}^4) + h_o T_{\infty,o}^n - \frac{h_o}{2} T_i^n \right] \\ - \frac{1}{2} (T_i^n - T_{i+1}^n) + \frac{1}{2r} T_i^n \end{aligned}$$

โดยที่

$$r = \frac{\alpha_j \Delta t}{(\Delta x_j)^2}$$

(3.11)

3.4 สมการจำลองพฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้พิจารณาในการศึกษาเป็นสารอินทรีย์ประเภท paraffin wax (เช่น octacosane, dodecane, ฯลฯ) โดยที่มีสภาวะการทำงานการเปลี่ยนสถานะระหว่างสถานะของแข็งและของเหลว สาร paraffin wax โดยทั่วไปมีคุณสมบัติทางความร้อนที่สถานะของแข็งหรือของเหลว (single phase) ดังแสดงสรุปไว้ในตาราง 1

ตาราง 1 คุณสมบัติทางความร้อนของ PCM ที่สถานะของแข็งหรือของเหลว

Single Phase Properties	PCM (typical paraffin)
Density [kg/m^3]	800
Heat Capacity [kJ/kg-K]	2.00
Thermal Conductivity [W/m-K]	0.2
Heat of Fusion [kJ/kg]	140

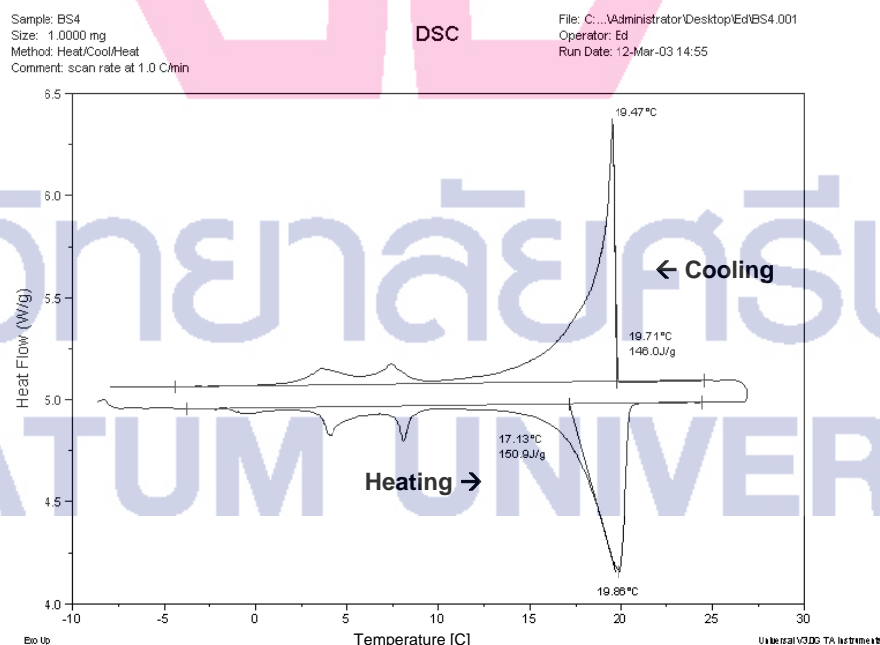
การจำลองการเปลี่ยนสถานะของ PCM ได้ใช้ค่าความจุความร้อน (C_p) ของสารที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วงของการเปลี่ยนสถานะ เป็นผลให้ PCM มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยขณะดูดซับหรือคายความร้อนที่ประมาณ 4°C สำหรับ PCM ประเภท paraffin โดยทั่วไป

ความสามารถของการดูดซับหรือคายความร้อน หรือค่าความจุความร้อนในช่วงการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่อุณหภูมิต่างๆสามารถวัดได้โดยใช้เครื่อง differential scan calorimeter (DSC) โดยที่ผลจากการวัดโดยเครื่อง DSC ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่สารเปลี่ยนสถานะตัวอย่างเพื่อควบคุมให้สารตัวอย่างมีอัตราการเพิ่มขึ้น (heating) หรือลดลง (cooling) ของอุณหภูมิที่คงที่ ซึ่งผลอัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดได้สามารถนำมาคำนวณกลับเป็นค่าความจุความร้อน (C_p) ของสารตัวอย่างได้ เนื่องจากมวลของสารตัวอย่างและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการทดสอบเป็นค่าที่กำหนดไว้ใน การทดสอบ

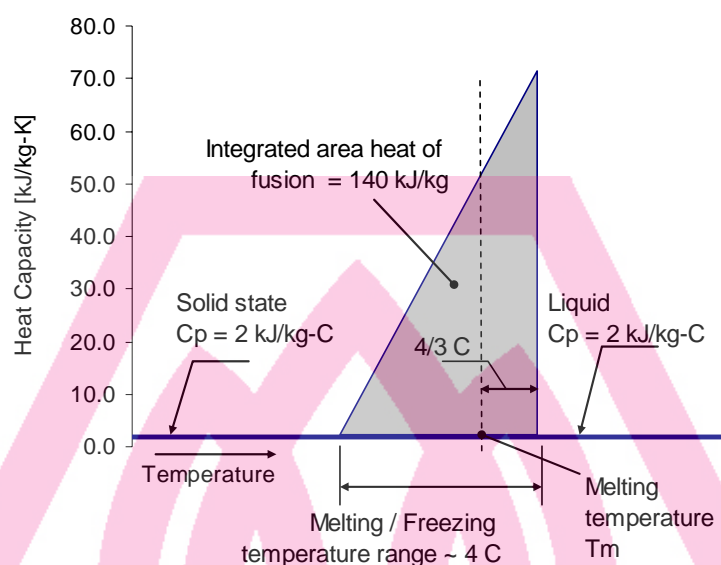
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดได้จากเครื่อง DSC ของ PCM ประเภทสารอินทรีย์ (เช่น paraffin และ กรดไขมัน) โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 6 ซึ่งแสดงตัวอย่างสำหรับ butylstearate ทั้งการวัดแบบ heating และ แบบ cooling จากรูปจะเห็นได้ว่าระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (heating) และ จากของเหลวเป็นของแข็ง (cooling)

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่สารตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 16-20 °C และสำหรับช่วงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนสถานะค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่สารตัวอย่างมีค่าคงที่ ซึ่งผลที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนของสารที่แปรผันตรงกันตามอัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดได้โดยเครื่อง DSC

จากลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับและคายความร้อนของ PCM ในช่วงการเปลี่ยนสถานะดังแสดงในภาพประกอบ 6 จึงสามารถจำลองค่าความจุความร้อนของ PCM ที่แปรผันตามอุณหภูมิได้โดย ให้มีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่าความจุความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะเป็นรูปสามเหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในภาพประกอบ 7 เพื่อใช้ในโปรแกรมการคำนวณเชิงตัวเลข โดยการจำลองกำหนดให้การเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้นอยู่ภายในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ 4 °C และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะอ้างอิงเท่ากับ T_m ความสูงของพื้นที่สามเหลี่ยมถูกกำหนดโดยให้ค่าความจุความร้อนรวมของ PCM ระหว่างการเปลี่ยนสถานะ (ซึ่งคือพื้นที่ใต้กราฟในส่วนแรเงา) มีค่าเท่ากับค่าความจุความร้อนระหว่างการเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 140 kJ/kg ตามที่ระบุในตารางที่ 1 และค่าความจุความร้อนของ PCM ขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เท่ากับ 2 kJ/kg-°C ทั้งสถานะของแข็งและของเหลว



ภาพประกอบ 6 ตัวอย่างค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ PCM ที่อุณหภูมิระหว่างการเปลี่ยนสถานะ จากการวัดโดยใช้เครื่อง DSC



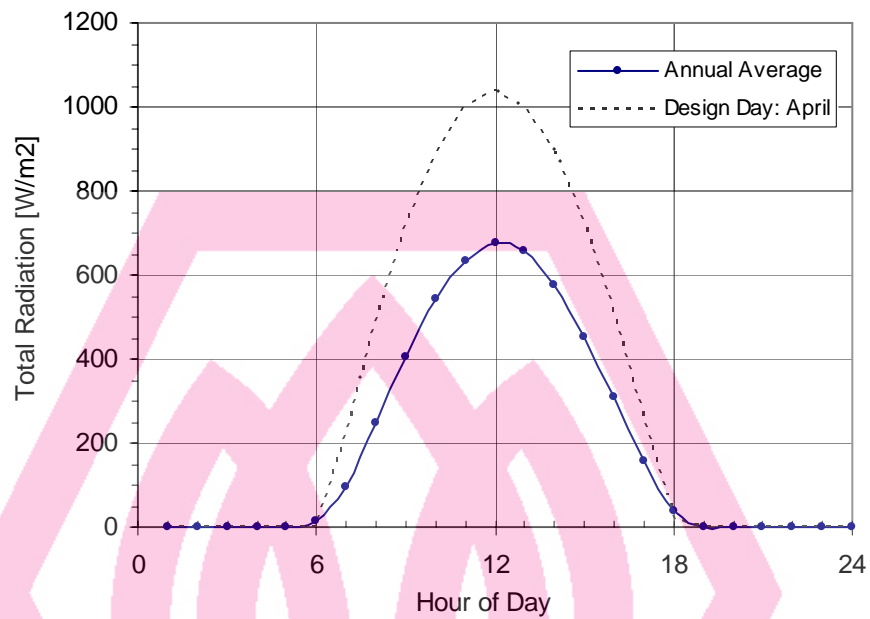
ภาพประกอบ 7 แบบจำลองค่าความจุความร้อนของ PCM สำหรับใช้ในการคำนวณ

3.5 ข้อมูลภูมิอากาศและการคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลจากโปรแกรม Weather Maker (U.S. National Renewable Energy Laboratory 2002) ซึ่งมีข้อมูลทั้งความเข้มแสงอาทิตย์ อุณหภูมิบรรยากาศ และข้อมูลอื่นๆ ทั้งที่เป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงและข้อมูลสำหรับการออกแบบ (design day) โดยที่ข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศ จากโปรแกรม Weather Maker ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา ระหว่างช่วงปี พ.ศ. 2544-2546 (กรมอุตุนิยมวิทยา 2547) พบว่ามีความใกล้เคียงภายในค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล 2550)

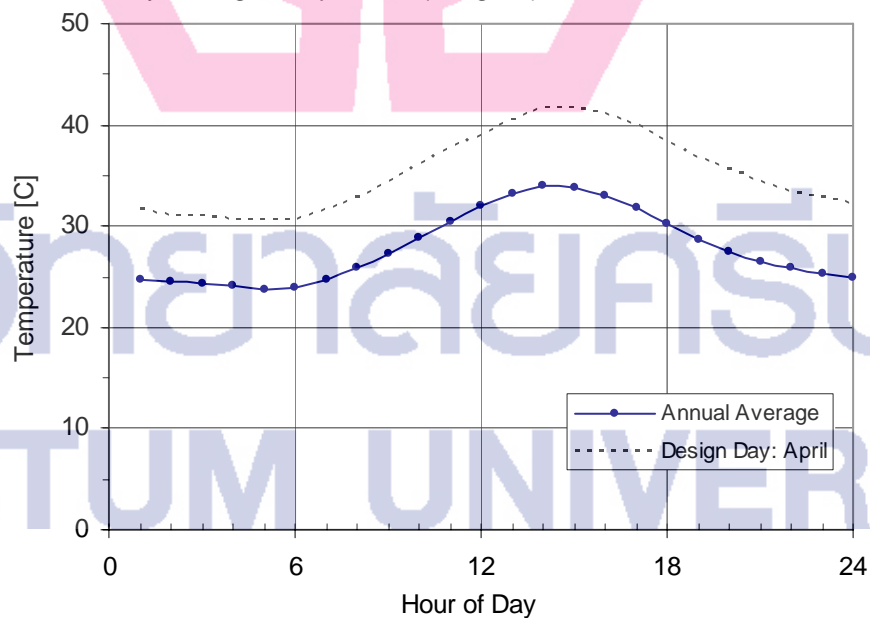
ค่าเฉลี่ยในรอบ 1 ปีของละชั่วโมงในรอบวันของความเข้มแสงอาทิตย์รวม ที่ตกกระทบบนพื้นนอนราบ และ อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ของกรุงเทพมหานคร เปรียบเทียบกับข้อมูลสำหรับวันออกแบบ (Design Day) ในเดือนเมษายน แสดงไว้ดังภาพประกอบ 8 และ 9 ตามลำดับ สำหรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นนอนราบ และ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรวมในแต่ละเดือนดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 10 และ 11 ซึ่งสามารถระบุได้ว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายน

Hourly Average Total Horizontal Solar Radiation (Bangkok)

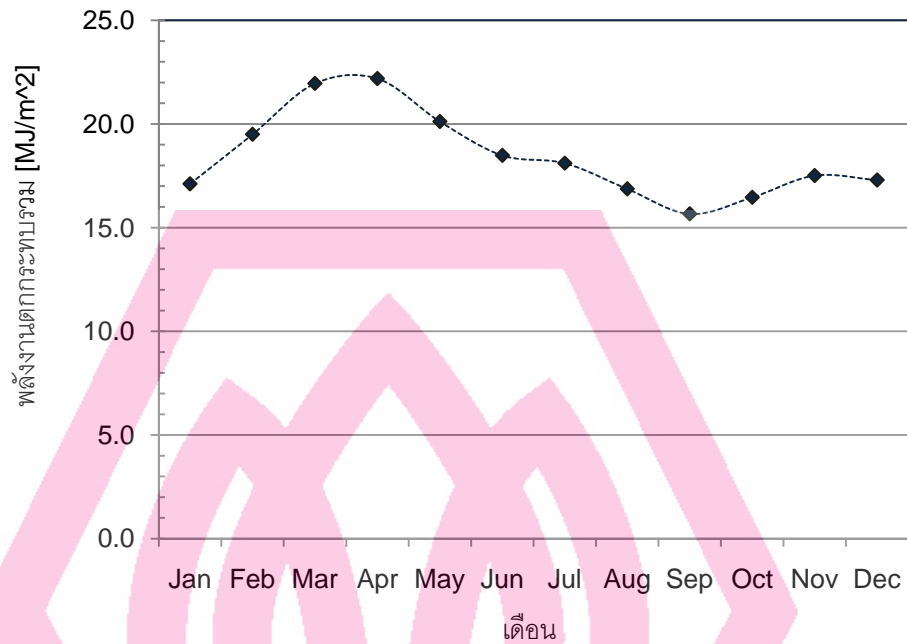


ภาพประกอบ 8 ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ในรอบวันเฉลี่ยบนพื้นนอนราบ ของกรุงเทพมหานคร

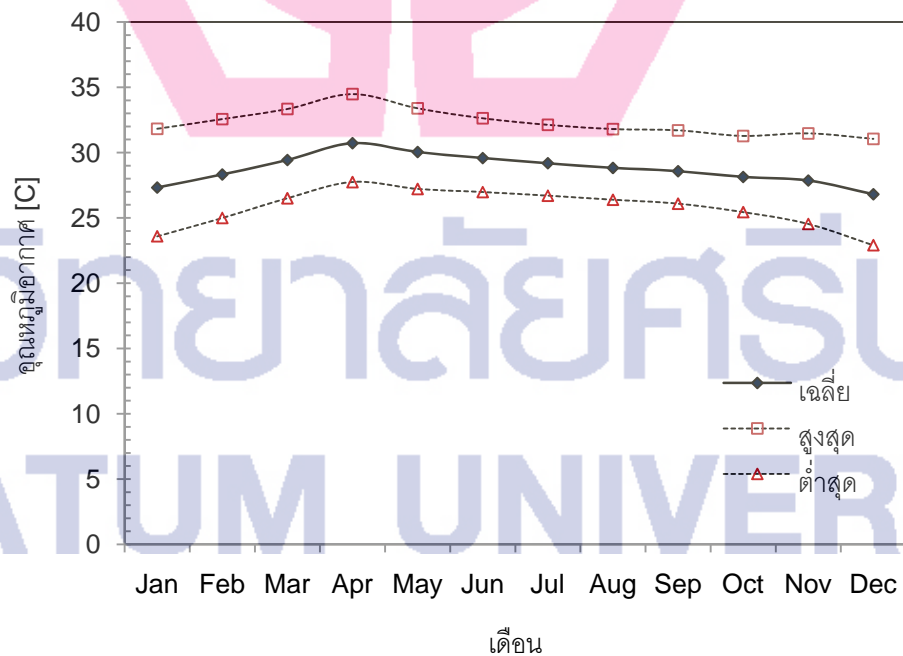
Hourly Average Temperature (Bangkok)



ภาพประกอบ 9 อุณหภูมิอากาศ (dry-bulb) เฉลี่ยในรอบวัน ของกรุงเทพมหานคร



ภาพประกอบ 10 ค่าพลังงานแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยที่ตกกระทบบนพื้นนอนราบ ของ กรุงเทพมหานคร



ภาพประกอบ 11 อุณหภูมิอากาศ เฉลี่ย/สูงสุด/ต่ำสุด ในแต่ละเดือน ของกรุงเทพมหานคร

การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิว

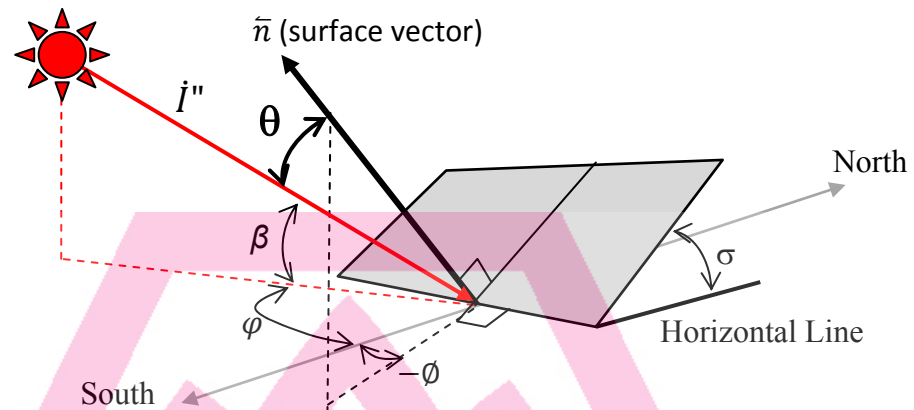
ค่าพลังงานรวมแสงอาทิตย์ (\dot{q}''_{solar}) ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ ประกอบด้วย พลังงานจากรังสีโดยตรง (direct solar radiation, $\dot{q}''_{sol,dir}$) และ พลังงานจากการกระจายของรังสีแสงอาทิตย์ (diffuse solar radiation, $\dot{q}''_{sol,diff}$) จากท้องฟ้าและสภาพแวดล้อม

$$\dot{q}''_{solar} = \dot{q}''_{sol,dir} + \dot{q}''_{sol,diff} \quad (3.13)$$

ค่าพลังงานรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่พิจารณา สามารถประมาณได้อย่างง่ายขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดวาง (orientation) ของพื้นผิว โดยให้มีค่าเป็นสัดส่วนตามมุมมองระหว่างท้องฟ้าและสภาพแวดล้อม โดยกำหนดให้รังสีกระจายที่ได้รับจากมุมมองกับท้องฟ้ามีค่าเป็น 100% ของค่าที่ระบุในข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และ ส่วนที่ได้รับจากมุมมองของสภาพแวดล้อมมีค่าลดลงตามค่าประมาณการสะท้อนรังสีเฉลี่ยของสภาพแวดล้อม

การคำนวณค่าความเข้มพลังงานจาก direct solar radiation ที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่พิจารณา นอกจากจะขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดวางของพื้นผิวแล้ว ยังมีค่าเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งทิศทางการสัมผัสระหว่างดวงอาทิตย์และตำแหน่งบนพื้นผิวโลกตามเวลาในรอบปี ดังนั้นการคำนวณหาความเข้มรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงที่ตกกระทบบนพื้นผิว จำเป็นต้องปรับมุมตกกระทบให้อยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว (normal irradiation flux) ซึ่งการคำนวณมุมตกกระทบระหว่างรังสีแสงอาทิตย์และพื้นผิว (มุม) เป็นไปตามที่ได้อธิบายไว้โดย Balcomb (1992) และ Duffie and Beckman (1991)

ในที่นี้กำหนดนิยามของมุมทิศทางของรังสีและพื้นผิวดังภาพประกอบ 12 ด้านล่างสำหรับตำแหน่งตำแหน่งของกรุงเทพมหานคร ที่ latitude N 13.73 และ longitude E 100.57



ภาพประกอบ 12 แสดงมุมรังสีแสงอาทิตย์ (direct radiation) และ ทิศทางระนาบพื้นผิว

จากภาพประกอบ 12 ให้พื้นผิวที่พิจารณามีทิศ vector \hat{n} วางเอียงจากพื้นราบเป็นมุม σ และหันไปในทิศที่มีมุมเบี่ยงจากทิศใต้ (วัดตามเข็มนาฬิกา) เท่ากับ ϕ ดังนั้นรังสีความเข้มแสงอาทิตย์ (i'') ตกกระทบในทิศตั้งฉากกับพื้นผิว (normal irradiation) มีค่าเท่ากับ

$$\dot{q}''_{sol,dir} = I'' \cos(\theta) \quad (3.14)$$

โดยที่ มุม θ คือมุมระหว่างรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง และ ทิศ vector ของพื้นผิว ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\varphi - \phi) \sin(\sigma) + \sin(\beta) \cos(\sigma) \quad (3.15)$$

โดยที่ β คือมุมรังสีแสงอาทิตย์ที่ทำมุมจากพื้นราบ และ φ เป็นมุม solar azimuth angle หรือแนวรังสีแสงอาทิตย์วัดตามเข็มนาฬิกาจากทิศใต้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sin(\beta) = \cos(\alpha_{lat}) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(\alpha_{lat}) \sin(\delta) \quad (3.16)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{\sin(\beta) \sin(\alpha_{lat}) - \sin(\delta)}{\cos(\beta) \cos(\alpha_{lat})} \quad (3.17)$$

โดยที่

φ_{lat} = ตำแหน่ง latitude ของพื้นผิวที่พิจารณา (สำหรับกรุงเทพฯ เท่ากับ $N 13.733^\circ$)

δ = มุม declination ตามการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

H = มุมชั่วโมง (hour angle) ของแสงอาทิตย์

มุม declination และ hour angle มีหน่วยเป็น radian สามารถคำนวณได้ตามนี้

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + day_{yr}) \left(\frac{2\pi}{360} \right) \right] \left(\frac{2\pi}{360} \right) \quad [\text{rad}] \quad (3.18)$$

$$H = 15 \left(\frac{t_{sun}}{3600} - 12 \right) \left(\frac{2\pi}{360} \right) \quad [\text{rad}] \quad (3.19)$$

ซึ่ง day_{yr} คือจำนวนวันของปี เช่น วันที่ 3 กุมภาพันธ์ มีค่า $day_{yr} = 34$

t_{sun} คือเวลาแสงอาทิตย์ หรือ solar time เป็นวินาทีของวัน และ มีความสัมพันธ์กับ
วินาทีของวันตามเวลาท้องถิ่น t_{local} ดังนี้

$$t_{sun} = t_{local} + 240(\varphi_{lon, std} - \varphi_{lon}) \left(\frac{360}{2\pi} \right) - E_{time} \quad [\text{sec}] \quad (3.20)$$

โดยที่ $\varphi_{lon, std} - \varphi_{lon}$ คือความแตกต่างของมุม longitudinal ระหว่างตำแหน่งของพื้นผิวที่
พิจารณาและที่ตำแหน่งอ้างอิงเวลามาตรฐานของท้องถิ่น ซึ่งสำหรับกรุงเทพมหานครไม่มีค่าความ
แตกต่างนี้

E_{time} คือค่า equation of time และมีสมการตามที่อธิบายโดย Balcomb (1992) ดังนี้

$$E_{time} = 445 \sin(D) - 15.44 \cos(D) + 554 \sin(2D) + 217 \cos(2D) \quad [\text{sec}]$$

$$\text{โดยที่ } D = 2\pi \left(\frac{Day_{year}}{365} \right) \quad [\text{rad}] \quad (3.21)$$

สมการ ที่ (3.15) - (3.21) และวิธีการคำนวณข้างต้นสามารถใช้ประเมินรังสีความเข้ม
แสงอาทิตย์โดยตรงเฉลี่ยที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่พิจารณาในแต่ละเวลาของวันได้จากสมการ

(3.14) และค่าพลังงานแสงอาทิตย์รวม (direct and diffuse solar radiation) ที่ตกกระทบบนพื้นผิวที่พิจารณาสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.13) ผลการคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์รวมจากข้อมูลของวันออกแบบ (Design Day) และข้อมูลเฉลี่ยรายเดือน ที่ตกกระทบบนพื้นผิวแนวนอนและแนวตั้งที่มีการจัดวางในทิศต่างๆ (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) ของทั้ง 12 เดือนของปี ได้แสดงสรุปไว้ในภาคผนวก ก



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังภายใต้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครได้ถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิของผนังที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบวัน ซึ่งได้คำนวณเปรียบเทียบผนังเมื่อมีและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมอยู่ในโครงสร้างเพื่อทำความเข้าใจถึงอิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะต่อพฤติกรรมทางความร้อนของผนัง และเพื่อที่จะสามารถกำหนดถึงวิธีการเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะให้เหมาะสม (อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ปริมาณ และ ลักษณะการผนวกเข้าในโครงสร้างผนัง) โดยที่การศึกษาได้ถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ดังนี้

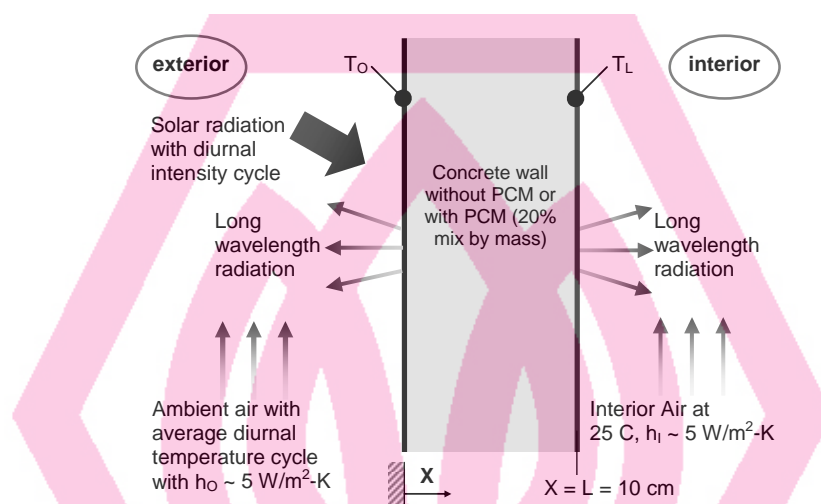
- วิเคราะห์เบื้องต้นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังอิฐที่มี PCM ผสมอย่างสม่ำเสมอตลอดความหนา
- การกำหนดอุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมต่อลักษณะโครงสร้างของผนังและเงื่อนไขสภาพแวดล้อม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มมวลความร้อน
- กรณีศึกษาตัวอย่างของการใช้สารเปลี่ยนสถานะในโครงสร้างหลังคาผนังเบา

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่อการทำงานของ PCM

การเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะ (PCM) ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการเพิ่มมวลความร้อนของโครงสร้างผนังและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางความร้อนของผนัง ดังนั้นการศึกษาในเบื้องต้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อการวิเคราะห์ถึงการเลือกใช้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่ค่าต่างๆ และศึกษาถึงการทำงานของ PCM ที่ถูกผสมเข้าภายในโครงสร้างของกำแพง ต่อการเปลี่ยนแปลงมวลความร้อนและลักษณะการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคาร โดยที่ผลการวิเคราะห์จะสามารถระบุถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมในการเพิ่มมวลความร้อนให้แก่ผนัง ที่มีการถ่ายเทความร้อนแบบไม่คงตัวเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของกรุงเทพมหานคร

เนื่องจากการวิเคราะห์ในขั้นนี้ไม่ได้กำหนดเฉพาะเจาะจง สำหรับลักษณะโครงสร้างผนังประเภทใดประเภทหนึ่ง แต่เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปของผนังที่มี PCM ผสมอยู่ เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน จึงกำหนดใช้ลักษณะโครงสร้างของผนังอิฐก่อแบบชั้นเดียว และ รับแสงอาทิตย์ในแนวรอบเพื่อหลีกเลี่ยงถึงเงื่อนไขในทิศทางผนังและมุมตกกระทบต่อ

รังสีแสงอาทิตย์โดยตรง (direct radiation) โดยกำหนดให้ผนังอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมสมมุติตามที่ระบุในภาพประกอบ 13 ด้านล่าง



ภาพประกอบ 13 แบบจำลองผนังและการถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการคำนวณ

จากรูปจำลองด้านบน กำหนดให้ผิวผนังที่ $x = 0$ สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคารและรับแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ส่วนผิวผนังที่ตำแหน่ง $x = L$ สัมผัสกับสภาพแวดล้อมด้านในอาคาร โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศภายในมีค่าคงที่ 25°C และไม่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (convective heat transfer coefficient) ระหว่างอากาศกับผิวผนังภายนอกและภายในสมมุติให้มีค่าคงที่ $5\text{ W/m}^2\text{-K}$

การคำนวณพฤติกรรมกรรมการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติโดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ให้ผลค่าอุณหภูมิวัสดุของผนังที่ตำแหน่งต่างๆเปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และอุณหภูมิบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยการคำนวณกำหนดกรอบให้อยู่ในรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ภายใต้ค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง (hourly average) ในรอบหนึ่งวันของข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร สำหรับเดือนที่พิจารณา ซึ่งในที่นี้ใช้ค่าเฉลี่ยของเดือน เมษายน ซึ่งมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดในรอบปี

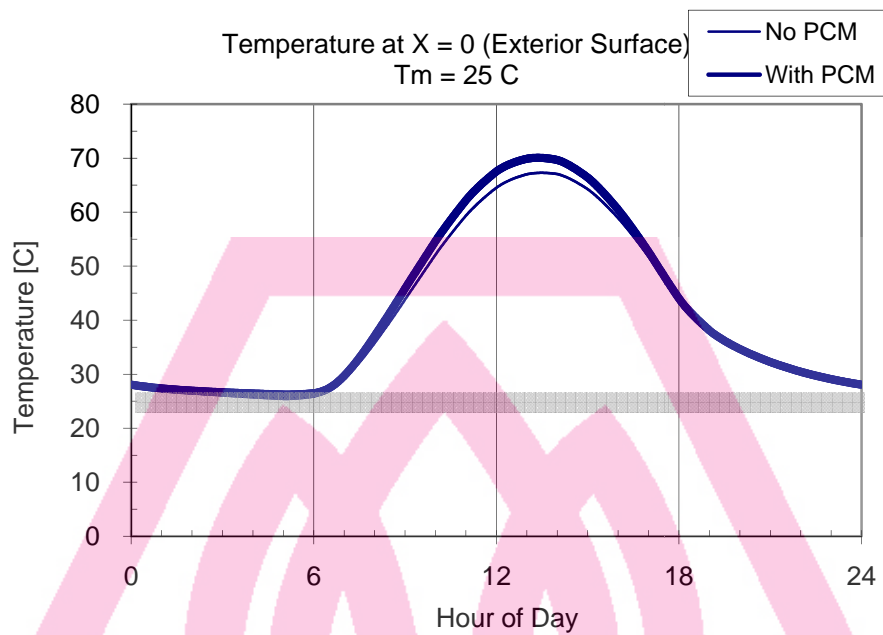
โปรแกรมจำลองคำนวณการถ่ายเทความร้อน ให้ผลอุณหภูมิของวัสดุที่เป็น quasi-steady สำหรับวัฏจักรรอบ 24 ชั่วโมง คืออุณหภูมิของผนังที่เปลี่ยนแปลงแบบไม่คงตัว (transient) ระหว่างวัน ถูกคำนวณซ้ำจนกระทั่ง อุณหภูมิสุดท้ายของวันที่ 24:00 น. มีค่าเท่ากับอุณหภูมิตั้งต้นที่ 0:00 น. และค่าอุณหภูมิผนังที่ตำแหน่งต่างๆ ในเวลาที่กำหนดใดๆ ไม่เปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบวัน

การคำนวณได้ถูกดำเนินการใน 2 กรณีคือ แบบไม่มี และ แบบมี สารเปลี่ยนสถานะผสมอยู่ในผนังอิฐเพื่อการเปรียบเทียบ โดยแบบที่มี PCM กำหนดให้ปริมาณส่วนผสมของสาร PCM อยู่ที่ 20% ของมวลรวมของผนัง และ มีการผสมอย่างทั่วถึง สม่าเสมอ โดย PCM ที่เลือกใช้เป็นประเภทสาร paraffin wax โดยคุณสมบัติทางความร้อนทั่วไป ของทั้งกำแพงอิฐก่อ และ paraffin wax ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงไว้ในตาราง 2

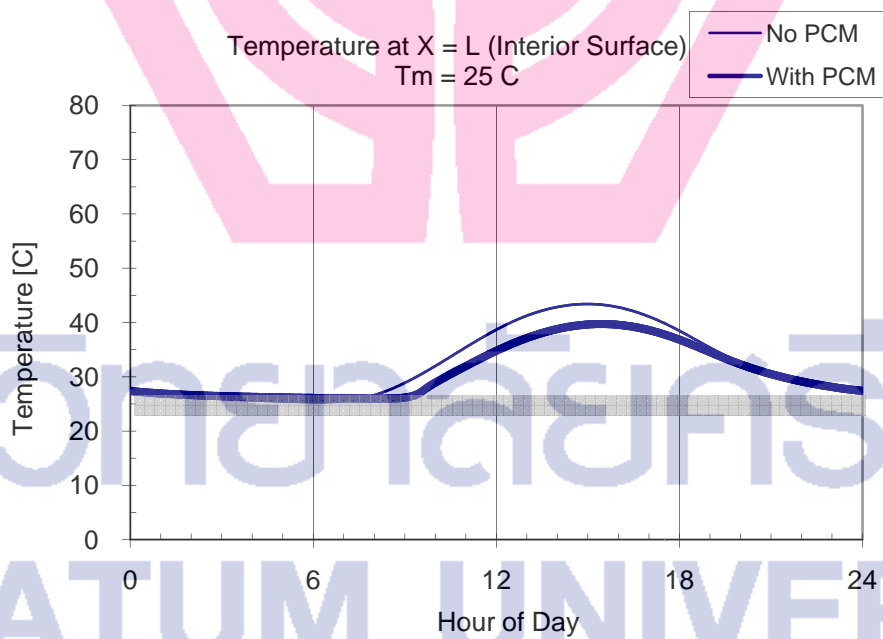
ตาราง 2 คุณสมบัติทางความร้อนของอิฐและ PCM

Properties	Common Brick Wall	PCM (typical paraffin)
Density [kg/m ³]	2,000	800
Heat Capacity [kJ/kg-K]	0.80	2.00
Thermal Conductivity [W/m-K]	0.9	0.2
Heat of Fusion [kJ/kg]	-	140

ผลการคำนวณ quasi-steady ของอุณหภูมิผิวผนังกำแพงในรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง จากอิทธิพลของ รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบและอุณหภูมิบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร สามารถแสดงเปรียบเทียบระหว่างผนังที่มีและไม่มี PCM ผสมอยู่ ที่ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เลือกใช้ต่างๆกัน คือที่ 25 °C, 40 °C, และ 55 °C ดังแสดงในภาพประกอบ 14-16

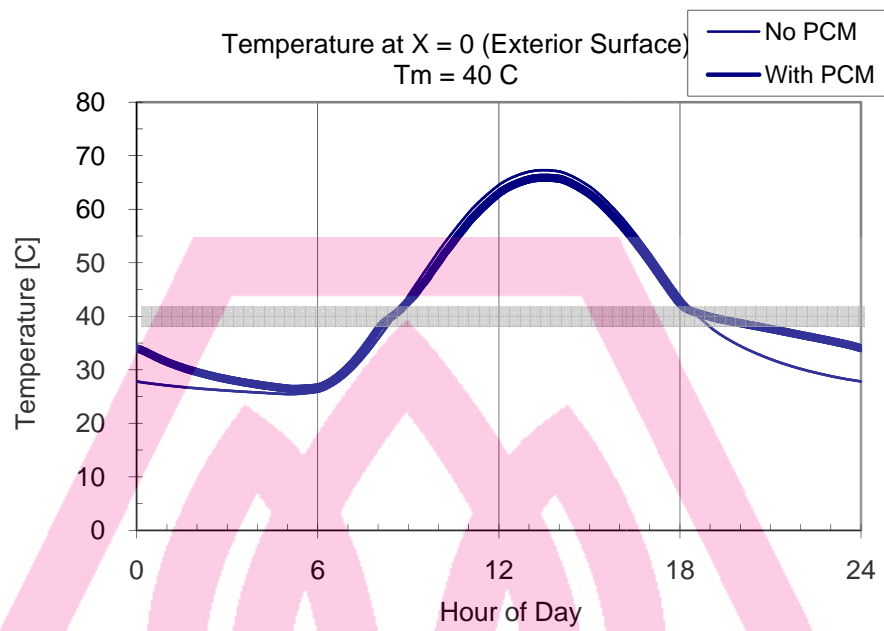


(a) จุดอุณหภูมิผิวภายนอก

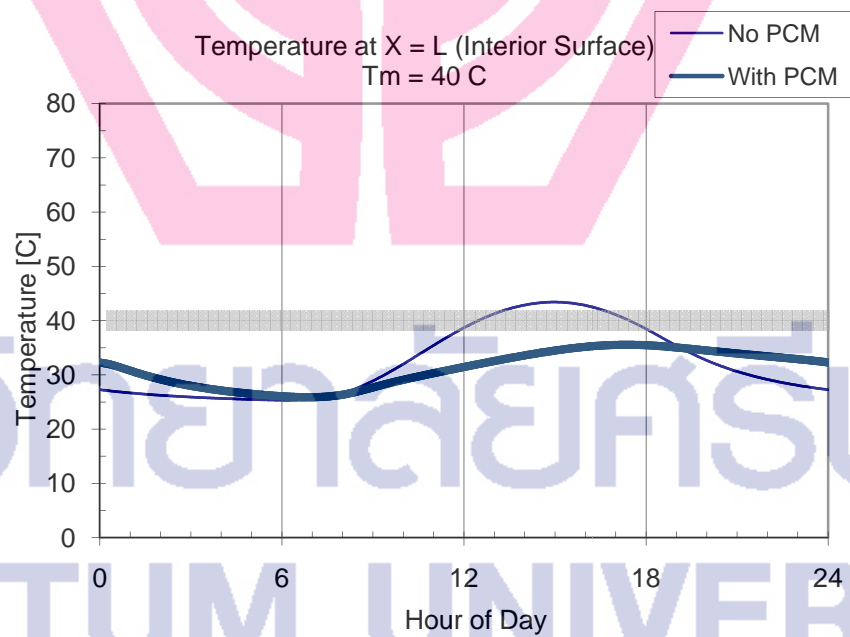


(b) จุดอุณหภูมิผิวภายใน

ภาพประกอบ 14 จุดอุณหภูมิผิวผนังภายนอกและภายในเปรียบเทียบที่จุดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะของ PCM เท่ากับ 25 °C

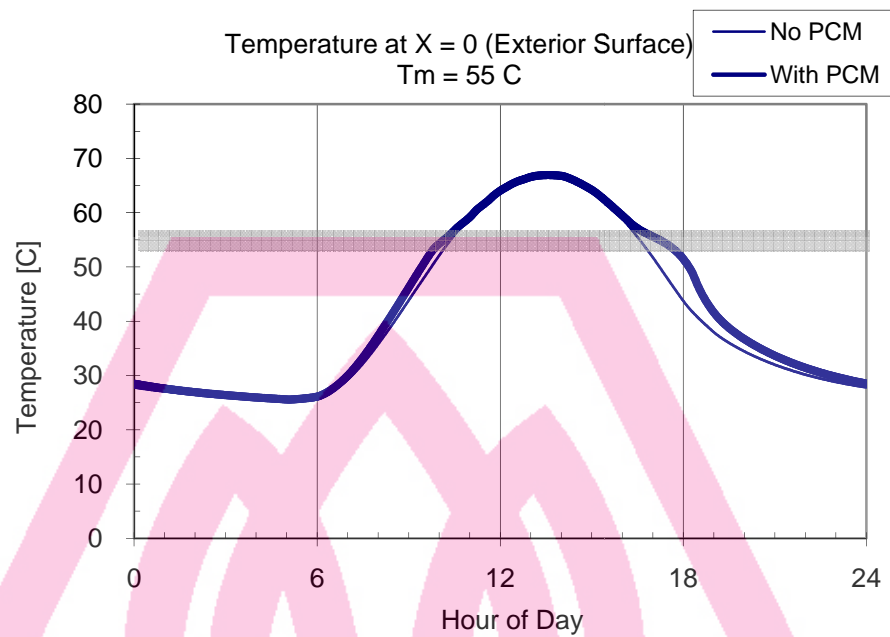


(a) อุณหภูมิผิวภายนอก

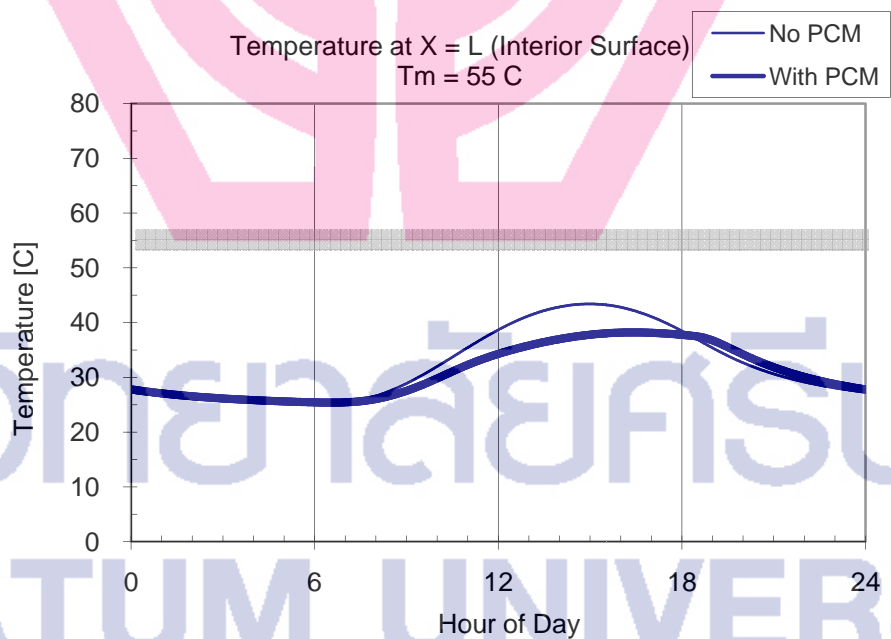


(b) อุณหภูมิผิวภายใน

ภาพประกอบ 15 อุณหภูมิผิวผนังอาคารภายในและภายนอกเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะของ PCM เท่ากับ 40 °C



(a) จุดอุณหภูมิผิวภายนอก



(b) จุดอุณหภูมิผิวภายใน

ภาพประกอบ 16 จุดอุณหภูมิผนังอาคารภายในและภายนอกเปรียบเทียบที่จุดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะของ PCM เท่ากับ 55 °C

จากภาพประกอบ 14 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผิวผนังภายในและภายนอก ไม่มีความแตกต่างมากนักระหว่างกำแพงที่มีและไม่มี PCM ผสมอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผนังตลอด 24 ชั่วโมง อยู่ในช่วงที่มีค่าสูงกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้ที่ 25 °C (แรงเสียดทานในกราฟ) ดังนั้นสาร PCM ที่ผสมอยู่ในวัสดุผนัง อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวตลอดการทำงาน และ ความจุความร้อนแฝงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของ PCM ไม่ได้ถูกใช้แต่อย่างใด ส่งผลให้อุณหภูมิผิวกำแพงภายในตลอดช่วง 24 ชั่วโมง แทบไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกำแพงที่มีและไม่มี PCM ผสมอยู่ ซึ่งทั้ง 2 กรณี อุณหภูมิผิวสูงสุดเกิดขึ้นที่ประมาณ 67-70 °C ที่ประมาณ 14:00 น. สำหรับผิวด้านนอก และ ที่ประมาณ 40-43 °C ที่ประมาณ 15:00 น. สำหรับผิวด้านใน

เมื่อเลือกใช้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่ 40 °C ซึ่งอยู่ประมาณกึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของกำแพงดังที่แสดงในภาพประกอบ 14 ผลการคำนวณที่ได้ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของความจุความร้อนแฝงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนสถานะของ PCM อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพประกอบ 15 โดยที่อุณหภูมิของผนังที่มี PCM ผสมอยู่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงในรอบวันที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการดูดซับความร้อนของ PCM ขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว โดยเฉพาะที่ผิวผนังด้านในอาคาร ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM ผสมอยู่ต่ำกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่ 08:00-19:00 น. และ ชล่อการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังภายในออกไปในช่วงบ่ายเป็นประมาณเวลา 16:00 ถึง 19:00 และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 35°C (ลดลงจาก 43°C เมื่อไม่มี PCM ผสม) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM ผสมอยู่ มีค่าสูงกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM ตลอดช่วงเวลากลางคืน (19:00-9:00 น.)

เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ PCM ดูดซับไว้ในช่วงกลางวันถูกคายออกขณะที่ PCM เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับมาอยู่ในสภาพของแข็ง

ภาพประกอบ 16 แสดงอุณหภูมิของผิวผนังเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 55°C ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผนังตลอดเวลาส่วนใหญ่ของการทำงานในรอบ 24 ชั่วโมง ดังนั้น PCM ที่ผสมอยู่ในเนื้อวัสดุกำแพง จึงไม่ได้ถูกใช้ความร้อนแฝงอย่างเต็มที่ ส่งผลให้อุณหภูมิของผนังมีค่าไม่แตกต่างจากผนังที่ไม่มี PCM ผสมมากนัก

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าหากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่ถูกเลือกใช้มีค่าเหมาะสมเป็นผลให้ค่าความจุความร้อนแฝงของ PCM ถูกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถเพิ่มมวลความร้อนให้แก่กำแพงได้เป็นอย่างมาก ทำให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดของกำแพง

มีค่าลดลง ช่วยลดค่าอุณหภูมิสูงสุดและชลดการถ่ายเทความร้อนจากผิวผนังภายนอกสู่ผิวผนังภายใน จนทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดของผิวกำแพงออกไปเกิดขึ้นอยู่ในช่วงเย็นของวันได้ อย่างไรก็ตาม ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมของ PCM ที่เลือกใช้ไม่สามารถถูกระบุเป็นค่าคงที่ที่แน่นอนได้ แต่ขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของกำแพง อันเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ทำกำแพง และ เงื่อนไขขอบเขต (thermal boundary condition) ของการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากสภาพภูมิอากาศรอบๆผิวของกำแพงเอง

อย่างไรก็ตามหากสามารถกำหนดแนวทางการเลือกอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมได้ จะเป็นความสะดวกในการพิจารณาเลือกชนิดของ PCM ซึ่งมีอยู่หลายประเภทซึ่งมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกันได้ ให้มีความเหมาะสมต่อลักษณะของโครงสร้างผนังและสภาพภูมิอากาศสำหรับผู้ออกแบบที่พิจารณาการใช้ PCM หรือ อย่างน้อยที่สุดเพื่อสำหรับการศึกษา วิจัย ต่อเนื่องต่อการใช้งาน PCM ในโครงสร้างอาคารอื่นๆต่อไป

4.2 วิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม

ปริมาณความจุความร้อนของกำแพงที่มี PCM

การระบุหาอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม ได้ดำเนินการโดยคำนวณถึงการใช้ปริมาณความร้อนแฝงของ PCM ที่ผสมอยู่ภายในกำแพงในหนึ่งรอบวันของการถ่ายเทความร้อน โดยได้คำนวณความสามารถในการดูดซับพลังงานปริมาณความร้อนรวมในรอบ 24 ชั่วโมงของกำแพง เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิผลของการใช้ความร้อนแฝงของ PCM ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่างๆกัน ผลการคำนวณที่ได้หากพบว่า ที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่กำหนด กำแพงสามารถดูดซับปริมาณความร้อนได้มากแสดงว่ามีการใช้ความร้อนแฝงของ PCM มาก หรือ PCM ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษายังคงใช้รูปแบบจำลองและเงื่อนไขการคำนวณเดิมดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่

4.1 ข้างต้น โดยได้กำหนดปริมาณพลังงานความร้อนที่กำแพงสามารถดูดซับได้ในแต่ละวันจากสมการการสมดุลพลังงานของกำแพงดังนี้

$$\sum_{in} \dot{Q} - \sum_{out} \dot{Q} = \frac{dU_{wall}}{dt} \quad (4.1)$$

โดยที่ \dot{Q} คืออัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนเข้าสู่และออกจากผนัง
 U_{wall} คือพลังงานภายในของวัสดุผนัง และ

t คือเวลา

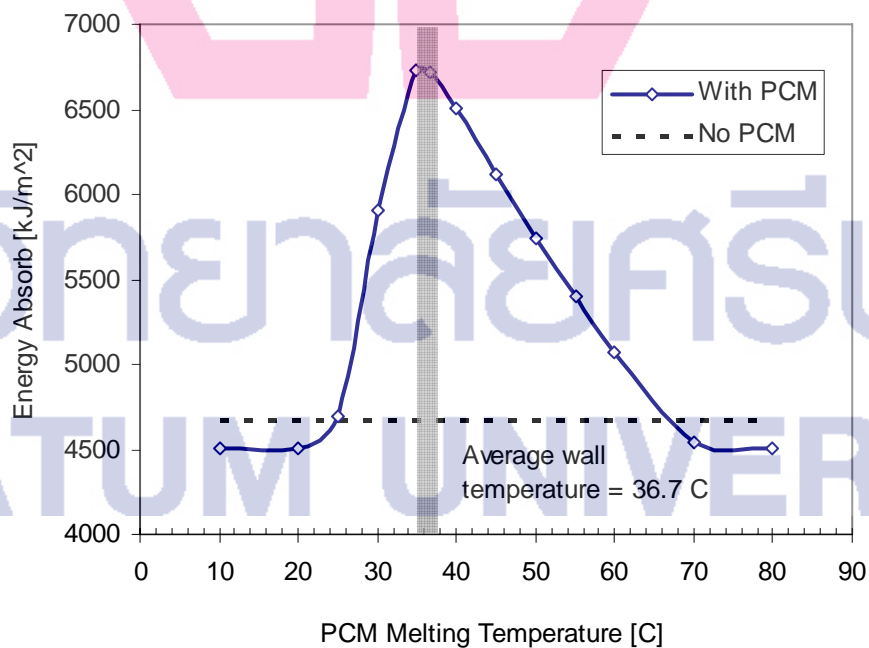
ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ผนังดูดซับได้ในแต่ละวัน (U_{abs}) จึงสามารถประเมินได้จากการ integrate ในรอบวัฏจักรเวลา 24 ชั่วโมง

$$U_{abs} = \int_{24\text{hour}} dU^+ \quad (4.2)$$

โดยที่ dU^+ คือค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในเฉพาะช่วงเวลาที่มามีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีค่าเป็นบวก

โปรดหมายเหตุว่าค่าพลังงานภายในเปลี่ยนแปลงสุทธิในแต่ละวันสำหรับการคำนวณ ในที่นี้มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายความว่าพลังงานที่ถูกดูดซับไว้มีปริมาณเท่ากับพลังงานรวมที่ถูกคายออก ในแต่ละรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ในหนึ่งวัน

ผลการคำนวณค่าปริมาณดูดซับพลังงานความร้อนของกำแพงที่มีส่วนผสมของ PCM ในแต่ละรอบวัน เมื่อ PCM มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะต่างๆกัน ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ปริมาณพลังงานความร้อนที่กำแพง PCM สามารถดูดซับได้ ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่างๆ

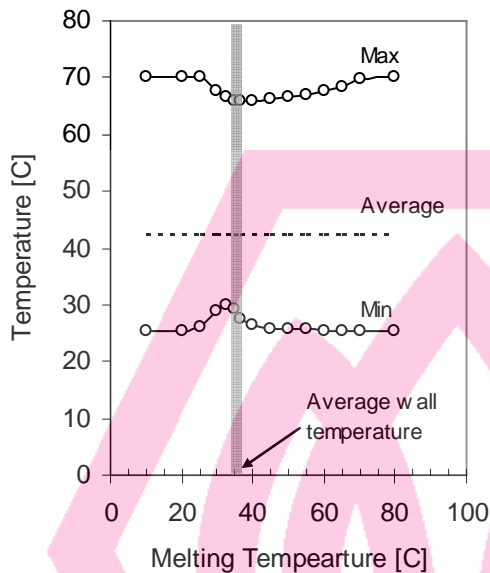
จากผลการคำนวณที่แสดงในภาพประกอบ 17 ซึ่งให้เห็นว่ากำแพงที่มี PCM ผสมกระจายทั่วทั้งผนังที่จำลองสำหรับการศึกษาในที่นี้ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานความร้อนในปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ (T_m) มีค่าอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในรอบวันของผนังที่ไม่มี ความจุความร้อนแฝง ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 25-70 °C หากอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะมีค่าน้อยกว่า 20 °C และ มากกว่า 70 °C การดูดซับพลังงานความร้อนมีค่าคงที่ หมายความว่า PCM ไม่มีการเปลี่ยนสถานะระหว่างการทำงานในแต่ละรอบวันและความจุความร้อนแฝงไม่ได้ถูกนำมาใช้ ดังนั้นการใช้งาน PCM ที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะอยู่นอกช่วงอุณหภูมิกำแพงต่ำสุด-สูงสุด จะไม่มีประโยชน์ในการเพิ่มมวลความร้อนให้แก่วัสดุผนังแต่ประการใด แต่ในทางตรงข้ามกลับลดความสามารถในการดูดซับความร้อนแบบสัมผัส ของวัสดุผนังเนื่องจากค่าความจุความร้อนของ PCM มีค่าน้อยกว่าค่าความจุความร้อนของอิฐก่อผนัง

ความสามารถดูดซับความร้อนของกำแพงที่มี PCM มีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะอยู่ระหว่าง 20-70 °C และมีค่าสูงกว่า single phase wall ถึงประมาณ 44% ที่จุดสูงสุด ที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM มีค่าประมาณ 35-37 °C ซึ่งเป็นค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยรวมของผนังตลอดการทำงานในรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ดังนั้นจากผลการคำนวณสามารถประเมินในขั้นนี้ได้ว่า PCM ในโครงสร้างของผนังสามารถช่วยให้ผนังมีมวลความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังในรอบวัฏจักรการทำงานที่พิจารณา

อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ของการใช้ PCM ในโครงสร้างผนังนอกเหนือจากเพื่อให้มวลความร้อนของผนังมีค่าเพิ่มขึ้นแล้ว ยังต้องการเพื่อให้อุณหภูมิของผิวผนังมีค่าสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ในแต่ละรอบวัน โดยเฉพาะเพื่อให้อุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังภายในมีลดลงลงเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เกิดขึ้นและลดภาระทำความเย็นภายในอาคาร ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวันของผิวผนังด้านนอกและในของกำแพงจำลองที่มี PCM ผสมได้ถูกแสดงเปรียบเทียบในภาพประกอบ 18a และ b ที่ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะต่างๆกัน

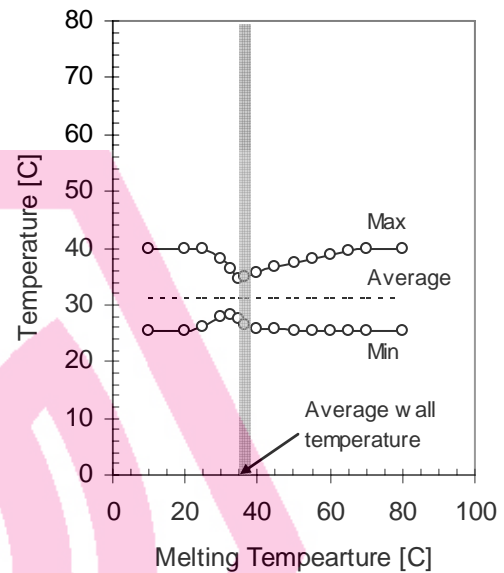
จากภาพประกอบชี้ให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่อยู่ระหว่าง 20 ถึง 70 °C ซึ่งความจุความร้อนแฝงของ PCM ได้ถูกใช้ในช่วงวัฏจักรการทำงานและมวลความร้อนของกำแพงมีค่าสูงขึ้น ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดของผิวกำแพงมีค่าลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวด้านนอกและผิวด้านในมีค่าลดลง ในอัตราที่ต่างกันขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้ โดยที่อุณหภูมิผนังมีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิวัฏจักรเฉลี่ยของกำแพง (มีค่าเท่ากับ 36.7 °C)

Temperature at $X = 0$
(Exterior Surface)



(a) อุณหภูมิผิวภายนอก

Temperature at $X = L$
(Interior Surface)



(b) อุณหภูมิผิวภายใน

ภาพประกอบ 18 อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในรอบวันของผิวผนังอาคารภายในและภายนอก

จากผลการคำนวณที่แสดงในภาพประกอบ 17 และ 18 ซึ่งให้เห็นว่าการเลือกใช้ PCM ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ที่อุณหภูมิวัฏจักรเฉลี่ยรวมตลอดความหนาของกำแพง (ซึ่งในที่นี้เท่ากับ 36.7°C) จะสามารถให้ค่าการดูดซับความร้อนรวมสูงสุด หรือ กำแพงโดยรวมมีค่ามวลความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของ PCM

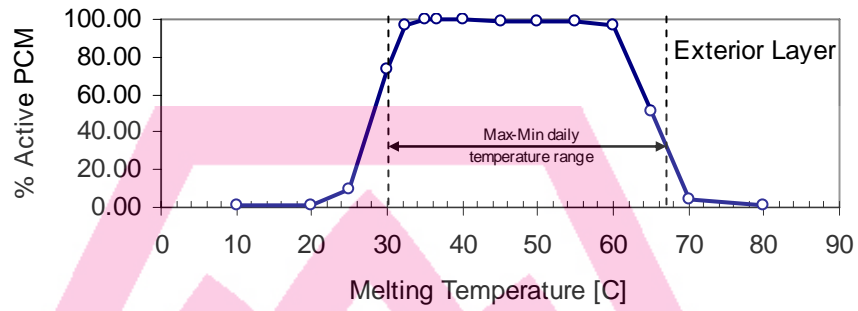
อย่างไรก็ตามข้อสรุปนี้ไม่ได้หมายความว่า PCM ในแต่ละตำแหน่งภายในเนื้อวัสดุกำแพงสามารถทำงานได้ที่ประสิทธิภาพสูงที่สุด (หรือมีการใช้ปริมาณ ความร้อนแฝงสูงสุด) ซึ่งหากสังเกตค่าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดของการลดลงของอุณหภูมิสูงสุดและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำสุดบนผิวกำแพงด้านในและด้านนอกในภาพประกอบ 18 ไม่ได้เกิดขึ้นที่การใช้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะเดียวกัน หมายความว่าความหนาของ PCM ถูกใช้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันที่ตำแหน่งต่างๆตลอดความหนาของกำแพง

ประสิทธิภาพการทำงานของ PCM

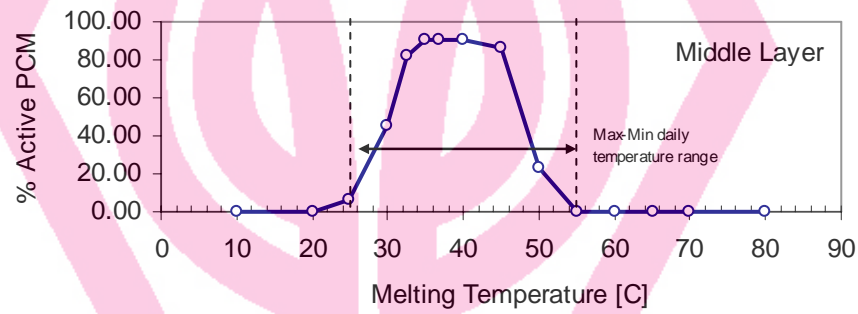
เพื่อศึกษาดูว่าการทำงานของ PCM ที่ผสมอยู่ในผนังที่ตำแหน่งต่างกันมีประสิทธิภาพการทำงานเป็นอย่างไร การคำนวณจึงได้กำหนดค่า ร้อยละประสิทธิภาพการทำงานของ PCM หรือ ค่า % Active PCM ซึ่งเป็นค่า ร้อยละของปริมาณความร้อนแฝงของ PCM ที่ถูกใช้ระหว่างวัฏจักรการทำงาน ต่อ ปริมาณความร้อนแฝงทั้งหมดที่มีอยู่ โดยที่การวิเคราะห์ที่ได้แบ่งกำแพงเดิมออกเป็นชั้นบางๆ 5 ชั้น (ความหนาชั้นละ 5 mm) และคำนวณค่า % Active PCM ในแต่ละชั้นในรอบวัฏจักรทำงานของกำแพง 24 ชั่วโมง โดยผลการคำนวณได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 19a, b, และ c ซึ่งเป็นค่า % Active PCM ที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เลือกใช้ต่าง ๆ กัน และได้แสดงเปรียบเทียบกับช่วงอุณหภูมิทำงานสูงสุด-ต่ำสุดที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นของผนังที่ไม่มีความจุความร้อนแฝงผสมอยู่ไว้ด้วย

จากภาพประกอบ 19 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าที่ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะหนึ่งๆ ค่าประสิทธิภาพการทำงานของ PCM (% Active PCM) ในแต่ละตำแหน่งความหนาของผนังมีค่าไม่เท่ากัน หรือหมายความว่าปริมาณความร้อนแฝงของ PCM ถูกใช้ไม่เท่ากันตลอดความหนาของกำแพงในรอบวัฏจักรการทำงานที่พิจารณา ถึงแม้ว่า PCM จะถูกกำหนดให้ถูกผสมอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอทั้งกำแพง ซึ่งก็เนื่องมาจากว่าช่วงอุณหภูมิการทำงานที่ตำแหน่งความหนาต่างๆของกำแพงมีค่าแตกต่างกัน

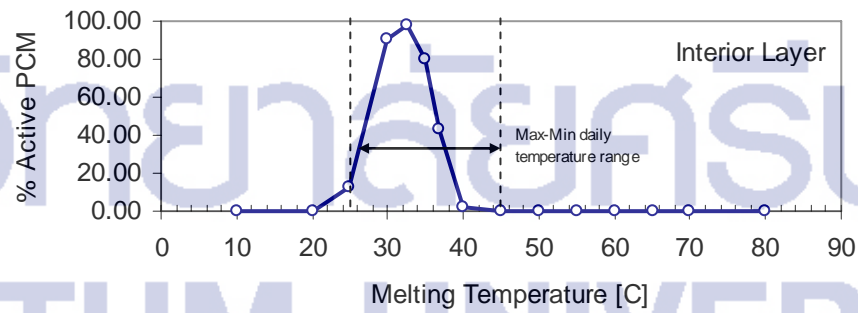
ผลการคำนวณในภาพประกอบ 19 เห็นได้ว่า PCM ที่ตำแหน่งต่างๆในกำแพงมีการทำงาน (หรือความร้อนแฝงได้ถูกใช้) เฉพาะเมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่ตำแหน่งนั้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิทำงานของกำแพงเมื่อไม่มีความจุความร้อนแฝงผสมอยู่ และมีค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด (หรือความร้อนแฝงได้ถูกใช้) อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด) เมื่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM มีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิของกำแพงที่ตำแหน่งนั้นๆ สำหรับผลการคำนวณที่แสดงในภาพประกอบ 19 ค่า % Active PCM ในแต่ละชั้นผนังมีค่าสูงสุดเท่ากับ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของชั้นผิวภายนอก ชั้นกลางกำแพง และชั้นผิวภายใน ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะเท่ากับ 40.2 °C, 36.7 °C, และ 33.2 °C ตามลำดับ



a) ชั้นผิวภายนอก



b) ชั้นกลางกำแพง

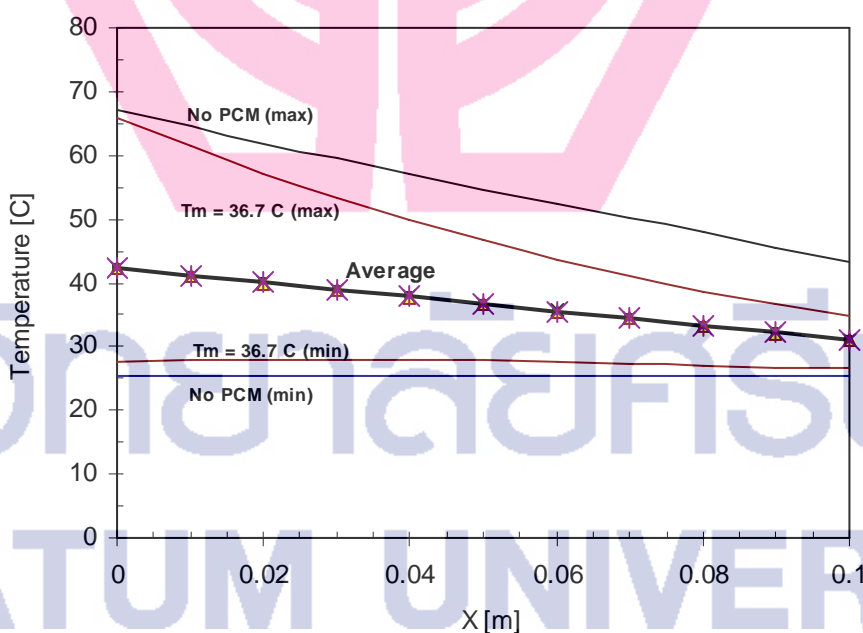


c) ชั้นผิวภายใน

ภาพประกอบ 19 ร้อยละความร้อนแฝงของ PCM ที่ถูกใช้ ณ ตำแหน่งต่างๆในกำแพง

อิทธิพลของ PCM ต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพง

ข้อสังเกตที่น่าสนใจประการหนึ่งจากผลการคำนวณดังแสดงในภาพประกอบ 18 คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงมีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่ใช้ และ ค่ามวลความร้อนของกำแพง นอกจากนี้ผลการคำนวณของอุณหภูมิ ณ จุดอื่นๆภายในกำแพงตลอดความหนา มีค่าคงที่เช่นเดียวกัน ไม่ว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM จะเป็นเท่าไร โดยอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรง ลดลงจากอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวด้านนอกไปยังอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวด้านใน มีลักษณะเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังในแบบคงตัว (steady-state) ซึ่งค่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดตำแหน่งความหนาของผนังที่มี PCM ผสมที่อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะต่างๆ ได้แสดงในภาพประกอบ 20 เปรียบเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของกำแพงแบบไม่มี และ แบบมี PCM ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่ 36.7°C โดยที่ทุกเงื่อนไขการคำนวณสำหรับกำแพงทุกประเภทที่พิจารณา มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในรอบวันเท่ากัน ดังแสดงเป็นเส้นทึบหนาในกราฟ



ภาพประกอบ 20 อุณหภูมิเฉลี่ยกำแพงตลอดความหนา ที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะต่างๆของ PCM

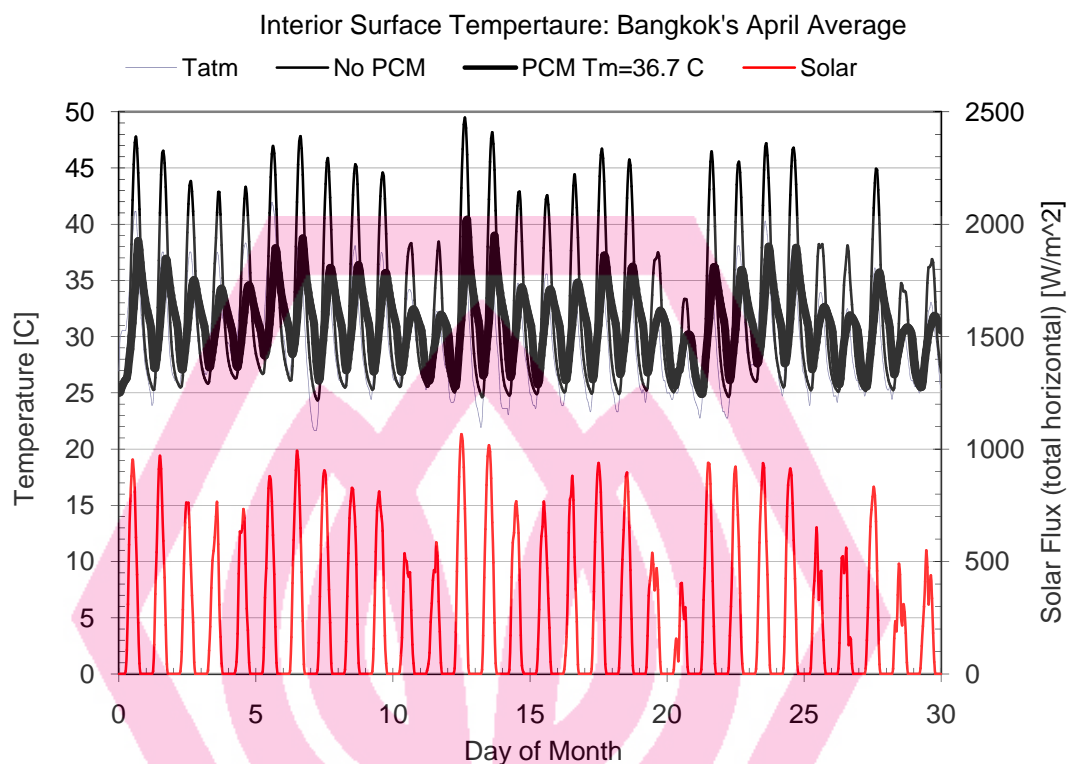
4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของกำแพงภายใต้สภาพแวดล้อมตลอดเดือน

การศึกษาคำนวณได้ถูกดำเนินการเพิ่มเติมโดยไม่ได้ใช้วิธีการแบบ quasi-steady เพื่อดูผลการตอบสนองของพฤติกรรมทางความร้อนของกำแพงแบบมีและไม่มี PCM ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงขึ้นลงของกรุงเทพมหานครในแต่ละวันของเดือนเมษายน โดยใช้ตัวอย่างข้อมูลสภาพภูมิอากาศจากโปรแกรม Weather Maker ซึ่งเป็นข้อมูลอากาศและความเข้มแสงอาทิตย์ของวันทั่ว (typical day data) ไปในเดือนเมษายนในกรุงเทพมหานคร โดยที่กำแพงถูกกำหนดให้มีเงื่อนไขต่างๆเช่นเดิมดังที่ระบุในภาพประกอบ 13 และ PCM ที่เลือกใช้ในการคำนวณกำหนดให้มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะอยู่ที่ 36.7°C หรือเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยรวมตลอดความหนาของกำแพงบนพื้นฐานของการคำนวณแบบ quasi-steady ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา การคำนวณเริ่มจาก 0:00 น ของวันที่ 1 ไปที่ละชั้นเวลาละ 2 นาที จนถึงสิ้นสุดที่ 24:00 น ของวันที่ 30

ผลการคำนวณสำหรับแต่ละชั่วโมงของวันตลอด 30 วันของเดือนเมษายนแสดงไว้ในภาพประกอบ 21 เปรียบเทียบอุณหภูมิของผิวกำแพงผนังด้านในอาคารแบบที่มีและไม่มี PCM ผสมอยู่ ซึ่งตอบสนองต่ออุณหภูมิอากาศภายนอกและความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบและเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน ตารางด้านล่างของกราฟแสดงข้อมูลการคำนวณสรุปการถ่ายเทความร้อนของกำแพง

ข้อมูลที่น่าสนใจก็คือผลค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงแบบมี PCM ผสมอยู่มีค่าประมาณเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงที่ใช้การคำนวณแบบ quasi-steady (36.7°C) ดังแสดงในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าหากเลือกใช้ข้อมูลค่าสภาพแวดล้อมเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของช่วงเวลาที่พิจารณา โดยที่ค่าเฉลี่ยนั้นครอบคลุมช่วงเวลาที่นอนเพียงพอ การคำนวณแบบ quasi-steady สามารถให้ผลแสดงพฤติกรรมทางความร้อนเฉลี่ยของผนังที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลตลอดเดือนดังที่ทำในหัวข้อนี้

ผลการคำนวณดังที่รายงานไว้ในภาพประกอบ 21 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผนังมีการตอบสนองต่อความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ โดยที่ผนังซึ่งมี PCM ผสมอยู่ (20% โดยน้ำหนัก) มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิผิวภายในอาคารในแต่ละวันน้อยกว่ากำแพงที่ไม่มี PCM อย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวันเฉลี่ยลดลงประมาณเกือบ 10°C และลดการเกิดขึ้นออกไปในช่วงเวลาเย็นเฉลี่ยประมาณ 3-4 ชั่วโมง จากค่าในตารางแถวสุดท้ายในภาพประกอบ 21 ระบุว่าอุณหภูมิผิวในแต่ละชั่วโมงของแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของกำแพงตลอดทั้งเดือน (ที่ประมาณ 32°C) โดยมีค่าขึ้น-ลงเฉลี่ย ลดลงจาก 6.72°C สำหรับกำแพงที่ไม่มี PCM เป็นเหลือประมาณ 3.09°C เมื่อใช้ PCM



รายการ	ไม่มี PCM	มี PCM ผสม	หน่วย
ความจุความร้อนแฝงสูงสุดของผนัง	0	4,307.69	[kJ/m ²]
พลังงานความร้อนที่ผนังดูดซับเฉลี่ยใน 1 วัน	4,713.88	6,670.31	[kJ/m ²]
พลังงานความร้อนสุทธิถ่ายเทสู่ภายในอาคาร ใน 1 วัน	6,761.46	5,564.41	[kJ/m ²]
พลังงานความร้อนถ่ายเทสู่ภายในอาคารเฉลี่ย ระหว่าง กลางวัน 8:00-20:00 น. ของแต่ละวัน	5,961.57	3,431.9	[kJ/m ²]
พลังงานความร้อนถ่ายเทสู่ภายในอาคารเฉลี่ย ระหว่าง กลางคืน 20:00-8:00 น. ของแต่ละวัน	799.91	2,132.5	[kJ/m ²]
อุณหภูมิเฉลี่ยผนัง			
ผิวนอก	40.95	42.25	°C
ตรงกลาง	36.6	36.63	°C
ผิวใน	32.25	31.06	°C
ค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเฉลี่ย (standard deviation) ของ อุณหภูมิผิวผนังภายใน	6.72	3.09	°C

ภาพประกอบ 21 อุณหภูมิและพฤติกรรมทางความร้อนของผนังตลอดช่วงเดือนเมษายนของ
กรุงเทพมหานคร

การเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิผิวภายในอาคารในแต่ละวันมีค่าน้อยลงกว่ากำแพงที่ไม่มี PCM เป็นผลเนื่องมาจากค่าความจุความร้อน (หรือมวลความร้อนของผนัง) ในรูปแบบของความจุความร้อนแฝงที่เพิ่มขึ้น จาก $4,713.88 \text{ kJ/m}^2$ เป็น $6,670.31 \text{ kJ/m}^2$ เมื่อผนังมี PCM ผสมอยู่หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 42% โดยที่ค่าความจุความร้อนที่เพิ่มขึ้น $1,956 \text{ kJ/m}^2$ นี้เป็นสัดส่วนเพียงประมาณ 45% ของค่าความจุความร้อนแฝงของ PCM ทั้งหมดที่ถูกผสมอยู่ในผนัง ซึ่งหมายความว่าหากปรับปรุงวิธีการผนวก PCM เข้าไปในโครงสร้างให้เหมาะสมยิ่งขึ้น จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ PCM ให้สูงขึ้นได้

มวลความร้อนที่เพิ่มขึ้นของกำแพงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของ PCM ส่งผลให้พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากผิวกำแพงสู่พื้นที่ภายในอาคารเปลี่ยนไป ด้วยเหตุผลที่ PCM สามารถดูดซับประมาณความร้อนจากสภาพแวดล้อมในช่วงกลางวัน ขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้อุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM ในระหว่างช่วงเวลากลางวันส่วนใหญ่ (ในที่นี่คือระหว่างเวลา 08:00-20:00 น.) มีค่าต่ำกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM แต่ในทางตรงข้าม ความร้อนที่ถูกเก็บไว้ในช่วงกลางวันจะถูกคายออกในเวลากลางคืนสู่ทั้งสภาพแวดล้อมภายนอกและภายในเท่ากับปริมาณที่ดูดซับไว้ ทำให้อุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM มีค่าสูงกว่าผนังที่ไม่มี PCM ตลอดช่วงเวลาส่วนใหญ่ระหว่างเวลากลางคืน (ระหว่างเวลา 20:00-08:00 น.) พฤติกรรมดังกล่าวส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวผนังสู่พื้นที่ภายในเฉลี่ยในหนึ่งวันมีค่าลดลงในช่วงกลางวันจาก $5,961.57 \text{ kJ/m}^2$ เป็นเหลือเพียง $3,431.9 \text{ kJ/m}^2$ หรือลดลงกว่า 42% ($2,529.67 \text{ kJ/m}^2$) แต่ในขณะเดียวกันปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในมีค่าเพิ่มมากขึ้น จาก 799.91 kJ/m^2 เป็น $2,132.50 \text{ kJ/m}^2$ (เพิ่มขึ้น $1,332.59 \text{ kJ/m}^2$) อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนสุทธิสู่พื้นที่ภายในอาคารเฉลี่ยต่อหนึ่งวันมีค่าลดลงประมาณ 17% ($1,197.05 \text{ kJ/m}^2$)

ผลการคำนวณดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการใช้ PCM จะสามารถช่วยลดภาระการทำความเย็นรวม 24 ชั่วโมงของอาคารได้ และที่สำคัญสามารถจัดการย้ายภาระความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์และสภาพอากาศในช่วงเวลากลางวันไปสู่ช่วงเวลากลางคืน เมื่ออาคารไม่ได้ใช้งาน หรือเมื่ออัตราค่าไฟฟ้าในการทำความเย็นมีค่าลดลง ทำให้ลดการใช้พลังงานสำหรับทำความเย็นและขนาดระบบเครื่องทำความเย็นลงได้

การศึกษาข้อมูลจากการคำนวณในขั้นนี้สามารถระบุได้ว่า การวิเคราะห์ระบบกำแพงที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะ quasi-steady ในรอบทำงาน 24 ชม. สามารถใช้คำนวณพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของกำแพงได้ หากข้อมูลสภาพแวดล้อมเฉลี่ยในรอบ 24 ชั่วโมงครอบคลุมช่วงเวลาที่จะพิจารณานานเพียงพอ (เช่น 1 เดือน ฤดูกาล หรือ 1 ปี)

ในการทำงานของกำแพงในรอบ 1 วันนั้น เนื้อวัสดุกำแพงในแต่ละตำแหน่งจะมีการดูดซับความร้อน (พลังงานภายในและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มมากขึ้น) และ จะมีการถ่ายเทความร้อน (พลังงานภายในและอุณหภูมิมูลค่าลดลง) ในปริมาณที่เกือบเท่ากันในแต่ละรอบวันการทำงาน ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในสุทธิเท่ากับศูนย์ และ อุณหภูมิของเนื้อวัสดุกลับไปที่ค่าเดิมเมื่อครบรอบวัฏจักร 24 ชั่วโมง ซึ่งเท่ากับค่าอุณหภูมิเฉลี่ย quasi-steady ของเนื้อวัสดุที่ตำแหน่งนั้นๆ ดังนั้นเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงาน (และคายพลังงาน) เกิดขึ้นในปริมาณที่มากที่สุดในแต่ละตำแหน่งในผนัง ควรเลือกใช้ PCM ที่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิที่เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างการดูดซับและการคายพลังงานความร้อนที่ตำแหน่งนั้น ซึ่งก็คือควรมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเท่ากับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเนื้อวัสดุที่ตำแหน่งนั้นๆ

ดังนั้นแนวทางการผนวกสาร PCM เข้าไปในโครงสร้างผนังจึงควรที่จะจัดทำให้เป็นชั้นผนังบางที่มี PCM ผสมอยู่ และเลือกติดตั้งเข้าไปในชั้นโครงสร้างผนังในลักษณะ composite wall ณ ตำแหน่งที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง เท่ากับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้

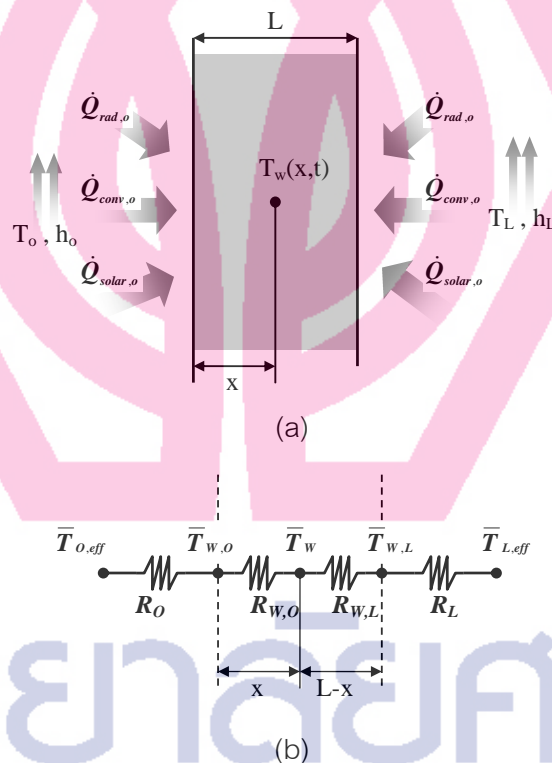
4.4 การประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าสารเปลี่ยนสถานะมีการทำงาน หรือ มีการใช้ ความจุความร้อนแฝงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเท่ากับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพง ณ ตำแหน่งที่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมอยู่ ดังนั้นหากสามารถระบุค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังจากข้อมูลของสภาพภูมิอากาศ ที่ใช้สำหรับการออกแบบภาระการทำคามเย็นทั่วไป ได้ โดยไม่ต้องทำการคำนวณเชิงตัวเลขโดยละเอียดดังที่ได้ทำในที่นี้ ก็จะสามารถกำหนดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในโครงสร้างผนังได้ล่วงหน้า

การถ่ายเทความร้อนของกำแพงอาคารสามารถประมาณให้มีลักษณะที่เป็นเป็นวัฏจักร รอบ 24 ชั่วโมง ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงที่เกิดขึ้น สภาพแวดล้อมในแต่ละรอบวันมีความแตกต่างกันไป แต่เมื่อพิจารณาสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง (อุณหภูมิอากาศ ค่าแสงอาทิตย์ตกกระทบ และการใช้งานภายในอาคาร) ครอบคลุมช่วงเวลาหลายๆวันที่น่าพอใจ คืออาจครอบคลุมเป็นในรอบเดือน ฤดูกาล หรือ ปี ทำให้สามารถประมาณค่าเฉลี่ยของข้อมูลสภาพแวดล้อมเป็นตัวแทนของช่วงเวลาที่พิจารณาได้ เช่นเดียวกับการเลือกใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมเฉลี่ยสำหรับการคำนวณภาระทำความเย็นในการออกแบบระบบปรับอากาศทั่วไป ดังนั้นการใช้ข้อมูลเฉลี่ยรอบวันเพื่อเป็นตัวแทนของช่วงเวลาที่กำหนด สามารถประเมินพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของผนัง

สำหรับช่วงเวลานั้นๆ ในลักษณะแบบ quasi-steady รอบ 24 ชั่วโมง ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมา

ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อประเมินอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพงสำหรับกำหนดค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสถานะที่เหมาะสมของสารเปลี่ยนสถานะ อยู่บนพื้นฐานของข้อมูลสภาพแวดล้อมเฉลี่ยในรอบ 24 ชั่วโมง โดยกำหนดระบบการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ และประมาณให้มีพฤติกรรมแบบ quasi-steady ซึ่งแบบของผนังและทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมที่ใช้พิจารณาในหัวข้อนี้ ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 22a และวงจรเทียบเท่าความต้านทานความร้อนมีลักษณะเป็นไปตามภาพประกอบ 22b



ภาพประกอบ 22 รูปแบบจำลองผนังและวงจรความต้านทานความร้อนสำหรับการประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยของกำแพง

จากภาพประกอบ 22a การสมดุลพลังงานรอบผิวผนังสามารถอธิบายได้ดังนี้

$$(\dot{Q}_{conv,O} + \dot{Q}_{rad,O} + \dot{Q}_{solar,O}) + (\dot{Q}_{conv,L} + \dot{Q}_{rad,L} + \dot{Q}_{solar,L}) = \frac{dU}{dt} \quad (4.3)$$

เมื่อแทนสมการการถ่ายเทความร้อนของแต่ละรูปแบบ (การพา การแผ่รังสี และ พลังงาน แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ) และทำการเฉลี่ยเวลา (time average) คลอบคลุมช่วงเวลาที่ยาวพอ (>> 24 ชั่วโมง) ทำให้สามารถประเมินค่าเฉลี่ยของสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงที่มีลักษณะที่เป็น quasi-steady และสมการพลังงานเฉลี่ยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \left[h_o (\bar{T}_o - \bar{T}_{w,o}) + \overline{\varepsilon \sigma (T_{sur,o}^4 - T_{w,o}^4)} + \bar{Q}_{solar,o} \right] \\ & + \left[h_L (\bar{T}_L - \bar{T}_{w,L}) + \overline{\varepsilon \sigma (T_{sur,L}^4 - T_{w,L}^4)} + \bar{Q}_{solar,L} \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

รวมค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการพาและการแผ่รังสีเข้าด้วยกัน โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน effective heat transfer coefficient บนผนังทั้ง 2 ด้านให้มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{o,eff} = h_o + \frac{\overline{\varepsilon \sigma (T_{sur,o}^4 - T_{w,o}^4)}}{(\bar{T}_o - \bar{T}_{w,o})} = h_o \left[1 + \frac{\bar{Q}_{rad,o}}{\bar{Q}_{conv,o}} \right] \quad (4.5)$$

$$h_{L,eff} = h_L + \frac{\overline{\varepsilon \sigma (T_{sur,L}^4 - T_{w,L}^4)}}{(\bar{T}_L - \bar{T}_{w,L})} = h_L \left[1 + \frac{\bar{Q}_{rad,L}}{\bar{Q}_{conv,L}} \right] \quad (4.6)$$

โดยที่ค่า effective heat transfer coefficient ในสมการที่ (4.5) และ (4.6) สำหรับผิวผนังอาคาร หลากหลายรูปแบบ ได้ถูกประเมินไว้ในตารางข้อมูลสำหรับคำนวณภาวะความร้อน ในคู่มือการ ออกแบบระบบปรับอากาศทั่วไป

แทนค่า effective heat transfer coefficient ในสมการ (4.4) ได้

$$\left[h_{o,eff} (\bar{T}_o - \bar{T}_{w,o}) + \bar{Q}_{sol,o} \right] + \left[h_{L,eff} (\bar{T}_L - \bar{T}_{w,L}) + \bar{Q}_{sol,L} \right] = 0 \quad (4.7)$$

ในสมการที่ (4.7) หากตั้งค่า effective heat transfer coefficient ออกนอกวงเล็บ และ กำหนดให้ ค่า effective environment temperature สำหรับผนังด้าน $x = 0$ และสำหรับผนังด้าน $x = L$ คือ

$$\bar{T}_{O,eff} = \bar{T}_O + \frac{\bar{Q}_{sol,O}}{h_{O,eff}} \quad (4.8)$$

$$\bar{T}_{L,eff} = \bar{T}_L + \frac{\bar{Q}_{sol,L}}{h_{L,eff}} \quad (4.9)$$

ดังนั้นสมการ (4.7) สามารถจัดรูปใหม่ได้

$$h_{O,eff} (\bar{T}_{O,eff} - \bar{T}_{w,o}) = h_{L,eff} (\bar{T}_{w,L} - \bar{T}_{L,eff}) \quad (4.10)$$

ค่า effective environment temperature ซึ่งรวมอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นเทียบเท่าเนื่องจากความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า *Sol-Air Temperature* ซึ่งเป็นค่าที่มีการประเมินสำหรับสภาพภูมิอากาศในท้องถิ่นต่างๆ และมีอยู่ในตารางคู่มือการออกแบบระบบปรับอากาศทั่วไป

จากสมการที่ (4.10) พบว่าทุกเทอมในสมการเป็นค่าเฉลี่ยในรอบวันของข้อมูลสภาพแวดล้อมและเป็นค่าคงที่ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง เฉลี่ย จึงเป็นค่าคงที่ด้วย และมีลักษณะการกระจายอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดความหนาของผนังเป็นเส้นตรงเหมือนกับการถ่ายเทความร้อนคงตัวแบบการนำ (steady-state conduction heat transfer)

ดังนั้นสามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของผนังในเทอมของอุณหภูมิผนังเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆ โดยใช้วงจรความต้านทานความร้อนดังแสดงในภาพประกอบ 22b ได้ดังนี้

$$\frac{\bar{T}_{O,eff} - \bar{T}_w}{R_O + R_{w,o}} = \frac{\bar{T}_w - \bar{T}_{L,eff}}{R_{w,L} + R_L}$$

จัดรูปใหม่ได้ อุณหภูมิผนังเฉลี่ย ณ ตำแหน่งใดๆ

$$\bar{T}_w = \frac{(R_{w,L} + R_L)\bar{T}_{O,eff} + (R_O + R_{o,w})\bar{T}_{L,eff}}{R_O + R_{w,o} + R_{w,L} + R_L} \quad (4.11)$$

โดยที่

$$R_o = 1/h_{o,eff} \quad ; \quad R_L = 1/h_{L,eff}$$

$$R_{w,o} = x/k \quad ; \quad R_{w,L} = (L-x)/k$$

หากกำหนดข้อมูลสภาพแวดล้อมเฉลี่ย (อุณหภูมิอากาศ แสงอาทิตย์ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน) และคุณสมบัติโครงสร้างผนัง สมการที่ (4.11) สามารถถูกนำมาใช้เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังที่ตำแหน่งต่างๆตลอดความหนาผนังได้โดยง่าย ซึ่งดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ และ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย สำหรับผนังอาคารและท้องถิ่นต่างๆ ได้ถูกระบุไว้ในคู่มือการออกแบบอาคารทั่วไป

ดังนั้นการออกแบบเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมในผนัง สามารถกำหนดได้โดยการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของผนังจากสมการที่ (4.11) และเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะเท่ากับหรือใกล้เคียงอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง ณ ตำแหน่งที่ประสงค์จะผนวก PCM เข้าไปในโครงสร้าง โดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ดังที่ทำในงานวิจัยชิ้นนี้แต่อย่างใด

ดังนั้นสามารถเทียบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมของ PCM กับอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง จากสมการที่ (4.12) ที่จัดรูปใหม่ให้มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\bar{T}_{m,opt}(x) = \bar{T}_w(x) = ax + b \quad (4.12)$$

โดยที่
$$a = \frac{(\bar{T}_{L,eff} - \bar{T}_{O,eff})}{k \cdot R_{tot}}$$

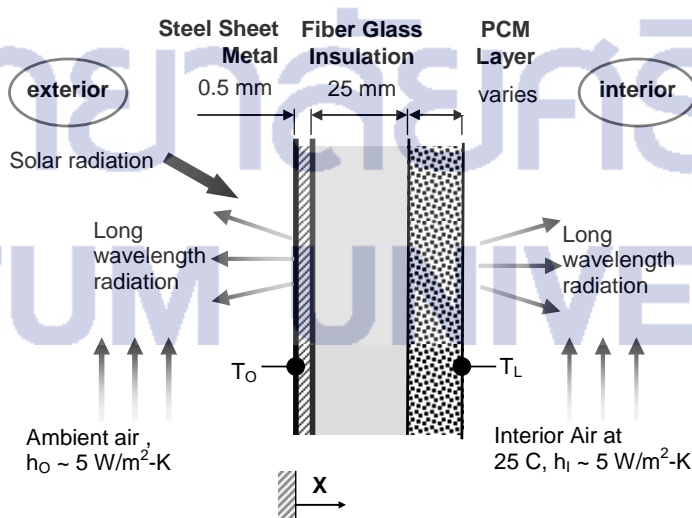
$$b = \frac{1}{R_{tot}} \left[\left(\frac{L}{k} + \frac{1}{h_{L,eff}} \right) \bar{T}_{O,eff} + \left(\frac{1}{h_{O,eff}} \right) \bar{T}_{L,eff} \right] \text{ และ}$$

$$R_{tot} = R_o + R_{w,o} + R_{w,L} + R_L$$

4.5 การใช้ PCM ในผนังเบา

เปลือกโครงสร้างอาคารที่มีลักษณะเป็นผนังเบา ประกอบด้วยแผ่นเหล็ก (ชุบเคลือบด้วยสังกะสี หรือ สีส) และมีฉนวนกันความร้อนด้านภายใน เป็นที่นิยมสำหรับผนังโรงงาน อุตสาหกรรม หลังคาอาคารห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่ และยังรวมถึงโครงสร้างเปลือกสำหรับการใช้งานอื่นๆ เช่น ตู้รถบรรทุก container ห้องติดตั้งชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์กลางแจ้ง ฯลฯ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถก่อสร้างได้เร็ว ดังนั้นโครงสร้างปกติของผนังเบาจึงมีมวลความร้อนที่น้อยมากเทียบกับผนังอิฐที่ใช้ในอาคารทั่วไป ทำให้อุณหภูมิของผิวภายในผนังมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้พื้นที่ภายในผนังเบาไม่มีการสะสมความร้อนเนื่องจากแสงอาทิตย์ที่สูงมากในช่วงเวลากลางวัน ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะวิเคราะห์ถึงศักยภาพของการใช้สารเปลี่ยนสถานะต่อการเพิ่มมวลความร้อนและพฤติกรรมทางความร้อนของผนังเบา

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์ในเบื้องต้น โดยไม่ได้เฉพาะเจาะจงสำหรับการใช้งานของผนังเบาในอาคารเพื่อวัตถุประสงค์ประเภทใดประเภทหนึ่ง แต่ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางและข้อมูลพื้นฐานสำหรับการขยายผลการศึกษาต่อไปในอนาคตสำหรับการใช้ PCM ในโครงสร้างเบาเพื่อจุดประสงค์เฉพาะอย่างอื่น ๆ สำหรับในที่นี่โครงสร้างผนังเบาได้ถูกกำหนดให้เป็นผนัง composite wall ดังภาพประกอบ 23 ด้านล่าง ซึ่งประกอบด้วย steel sheet metal หนา 0.5 mm และ ฉนวนใยแก้วหนา 25 mm สารเปลี่ยนสถานะถูกผนวกเข้าไปในโครงสร้างโดยการประกบชั้นที่มีเพียงสารเปลี่ยนสถานะที่มีความหนาเปลี่ยนแปลงเพื่อการเปรียบเทียบตั้งแต่ 0 mm ถึง 25 mm



ภาพประกอบ 23 รูปส่วนประกอบผนังเบา และ สภาพแวดล้อม

ตาราง 3 คุณสมบัติทางความร้อนของส่วนประกอบผนังเบาสำหรับการคำนวณ

คุณสมบัติ	Sheet Metal	ฉนวนใยแก้ว	PCM
Density [kg/m ³]	7,830	24	800
Heat Capacity [kJ/kg-K]	0.450	0.835	0.2
Thermal Conductivity [W/m-K]	60	0.035	0.2
Heat of Fusion [kJ/kg]	-	-	140
ความหนา [mm]	0.5	25	0-25

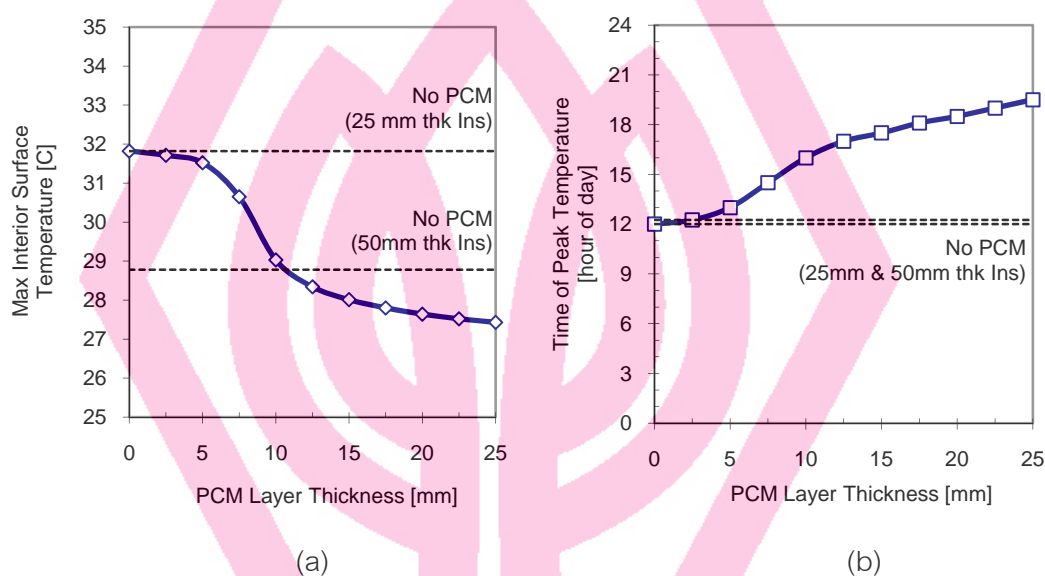
การคำนวณได้ใช้สภาพภูมิอากาศเฉลี่ยรอบ 1 วัน ของกรุงเทพมหานครในเดือนเมษายน โดยผนังถูกกำหนดให้จัดวางในแนวนอน เสมือนเห็นการใช้งานสำหรับหลังคาอาคาร และได้ดำเนินวิธีการคำนวณเป็นแบบ quasi-steady

การศึกษาเริ่มจากการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีเพียง sheet metal และ ฉนวนใยแก้ว (fiber glass) เป็นข้อมูลอ้างอิงพื้นฐาน เพื่อเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่เปลี่ยนไปเมื่อมีชั้นของสารเปลี่ยนสถานะติดตั้งเพิ่มเข้าไปอีกชั้นหนึ่ง โดยที่การศึกษาได้คำนวณเปรียบเทียบระหว่างช่วงความหนาของชั้นสารเปลี่ยนสถานะที่เพิ่มทีละชั้นชั้นละ 2.5 mm จนกระทั่งความหนาของชั้น PCM สูงสุดที่ 25 mm ในแต่ละชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้น PCM เพื่อให้เกิดการใช้ความจุความร้อนแฝงของ PCM อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด นอกจากนั้นได้คำนวณเงื่อนไขที่ใช้การติดตั้งฉนวนใยแก้วขนาดความหนา 25 mm เพิ่มอีกชั้นหนึ่ง (ความหนาใยแก้วรวมเป็น 50 mm) แทนการใช้ชั้นสารเปลี่ยนสถานะ เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในรอบวัน ของผิวผนังด้านในอาคารและเวลาที่เกิดขึ้น ได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 24a และ 24b โดยที่สามารถระบุได้ว่า อุณหภูมิผิวผนังพื้นฐานด้านภายใน เมื่อไม่มีชั้น PCM มีอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันที่ 32 °C เกิดขึ้นในเวลาประมาณเที่ยงวัน ซึ่งตรงกับเวลาแสงแดดส่องกระทบสูงสุด ซึ่งก็เนื่องมาจากที่มวลความร้อนของผนังเบาที่มีค่าค่อนข้างน้อยทำให้ผนังภายในมีอุณหภูมิตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมอย่างรวดเร็ว

เมื่อเพิ่มชั้น PCM เข้าไปบนผนังด้านฉนวนใยแก้ว อุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังด้านในมีค่าลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งความหนาของ PCM เท่ากับ 5 mm อุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังลดลงอย่างรวดเร็วตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น และอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ตอบสนองต่อ

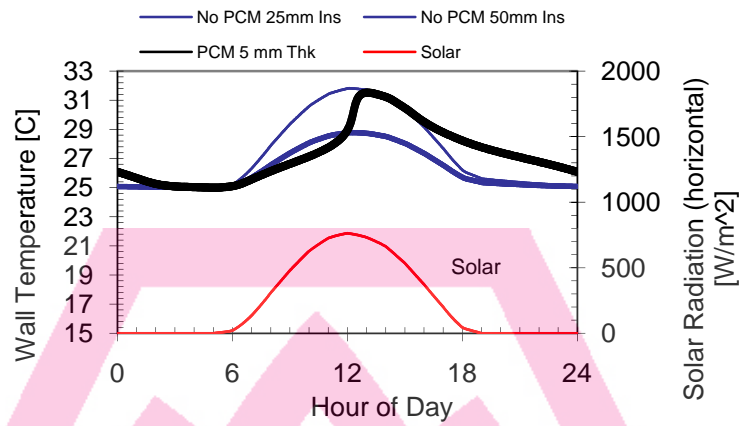
ความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น ชลottedวลงอีกครั้งเมื่อความหนาชั้น PCM ที่ประมาณมากกว่า 10 mm การเพิ่มขึ้นความหนา PCM มากขึ้นกว่านี้ แทบไม่ได้ช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของผนังลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของชั้น PCM ทำให้มวลความร้อนรวมของผนังสูงขึ้น ส่งผลให้การเกิดขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันช้าลง จากประมาณเวลา 12:00 น. สำหรับผนังที่ไม่มี PCM เป็น ประมาณ 19:30 น. เมื่อใช้ชั้น PCM มีความหนา 25 mm ดังแสดงในภาพประกอบ 24b



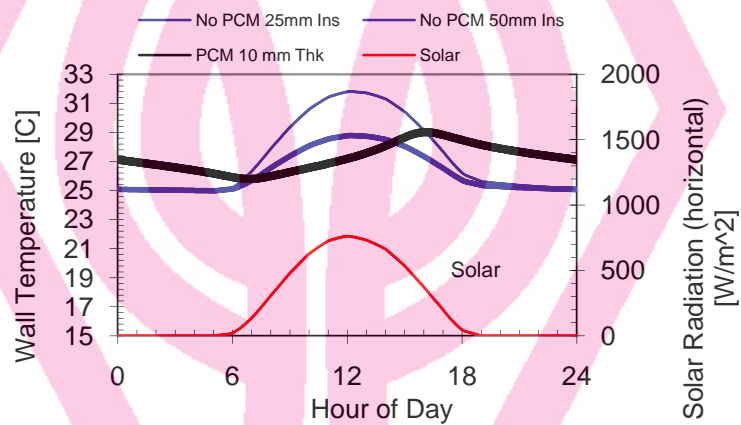
ภาพประกอบ 24 อุณหภูมิผนังภายในสูงสุดและเวลาที่เกิดขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฉนวนใยแก้วที่มีความหนา 25 mm เพิ่มเข้าไปแทนการใช้ชั้น PCM พบว่าฉนวนที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุดลงประมาณ 3 °C (จาก 32 °C เป็น 29 °C) ดังที่แสดงเป็นเส้นประไขปปลาในภาพประกอบ 24a ซึ่งเทียบเท่ากับการใช้ชั้น PCM ที่ความหนาประมาณ 10 mm อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาฉนวนใยแก้วไม่ได้เพิ่มมวลความร้อนให้แก่ผนัง ทำให้อุณหภูมิผิวผนังสูงสุดยังคงเกิดขึ้นที่ประมาณเวลา 12:00 น. ไม่ต่างจากสภาพผนังเดิม

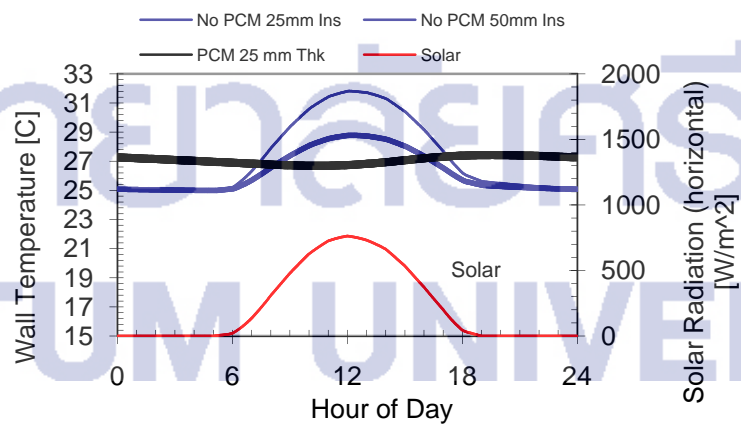
ภาพประกอบ 25a, b, และ c แสดงผลของอุณหภูมิผิวผนังภายในเมื่อมีชั้น PCM หนา 5 mm, 10 mm, และ 25 mm เปรียบเทียบกับ อุณหภูมิผิวผนังพื้นฐาน (ไม่มี PCM และใช้ฉนวนใยแก้วหนา 25 mm) และ ผนังที่ไม่มี PCM แต่เพิ่มความหนาฉนวนเป็น 50 mm โดยได้แสดงเทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นราบของกรุงเทพมหานครในเดือนเมษายน



(a) ชั้น PCM หน้า 5 mm



(b) ชั้น PCM หน้า 10 mm



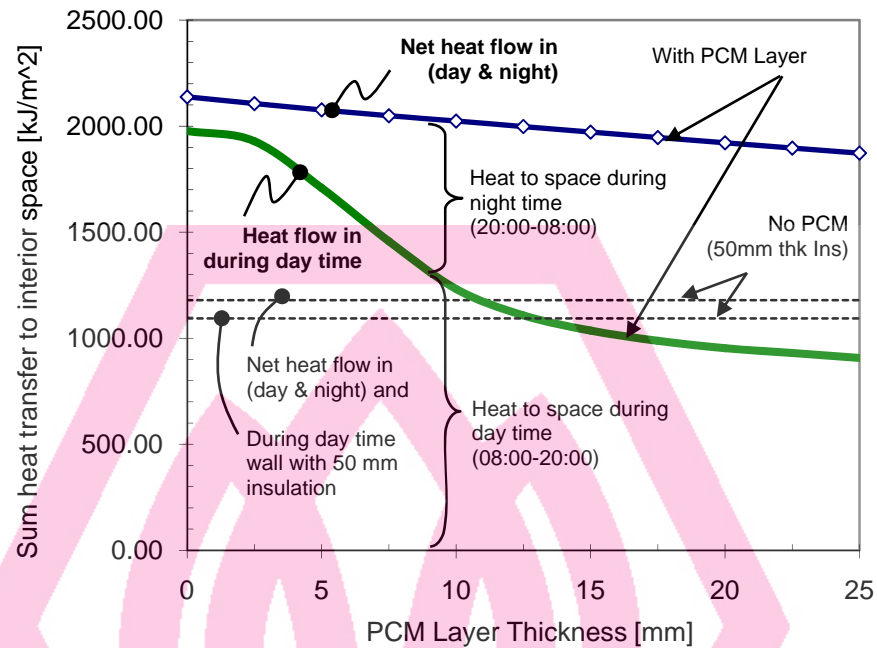
(c) ชั้น PCM หน้า 25 mm

ภาพประกอบ 25 อุณหภูมิผิวผนังภายในของผนังเบาที่ใส่ฉนวนชนิดต่างๆที่เทียบกับความเข้มแสงอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นราบของกรุงเทพมหานครในเดือนเมษายน

ผลการคำนวณในภาพประกอบ 25 ซึ่งให้เห็นว่าการใช้ชั้น PCM สามารถเปลี่ยนการตอบสนองของอุณหภูมิผิวผนังต่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดในเวลาเพียงวันได้หาก PCM ที่ใช้มีปริมาณเพียงพอ (ที่ชั้นความหนา 10 mm และ 25 mm) โดยที่ให้อุณหภูมิผิวผนังมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลง โดยที่ชลดการเกิดอุณหภูมิสูงสุดขึ้นในช่วงเย็นของวัน แทนที่จะเกิดขึ้นในเวลาประมาณเที่ยงวันเหมือนกับผนังที่ไม่มี PCM ทั้งแบบที่ใช้ความหนาจนวนเท่ากับ 25 mm และ 50 mm แต่สำหรับที่ชั้นความหนา PCM 5 mm มีปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะที่น้อยเกินไป ทำให้มีปริมาณความจุความร้อนแฝงไม่เพียงพอที่จะดูดซับพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผนังได้ตลอดช่วงเวลากลางวัน ส่งผลให้อุณหภูมิของชั้น PCM และผิวผนังด้านในมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อการดูดซับแบบความร้อนแฝงหมดไปเปลี่ยนเป็นการดูดซับความร้อนแบบสัมผัส ทำให้อุณหภูมิผิวผนังกลับไปมีลักษณะเหมือนกับผนังเมื่อไม่มีชั้น PCM

การถ่ายเทพลังงานความร้อนถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในมีการเปลี่ยนแปลงที่น่าสนใจเมื่อใช้ชั้น PCM ในโครงสร้างผนังเบาดังที่แสดงผลคำนวณไว้ในภาพประกอบ 26 จากสภาพโครงสร้างผนังเบาเดิม (ความหนาชั้น PCM = 0 mm) ปริมาณพลังงานความร้อนถ่ายเทเข้าสู่พื้นที่ภายในทั้งวัน (net heat flow in) มีค่าสุทธิประมาณ $2,138 \text{ kJ/m}^2$ ดังแสดงในกราฟเส้นบนในภาพประกอบ 26 ซึ่งในปริมาณนี้แบ่งเป็นส่วนที่เกิดขึ้นในช่วงกลางวันระหว่างเวลา 08:00 – 20:00 น. (day time heat flow) เท่ากับ $1,977 \text{ kJ/m}^2$ หรือ 92.5% ของปริมาณความร้อนถ่ายเททั้งหมด

เมื่อมีชั้นของ PCM ประกอบบนผิวด้านในของกำแพง ปริมาณความร้อนสุทธิรวมที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในอาคารมีค่าลดลงในลักษณะเป็นเส้นตรงตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น ในอัตราการลดลงที่ไม่มากนัก ซึ่งการลดลงของปริมาณความร้อนสู่อากาศภายในเป็นผลเนื่องมาจากค่าความเป็นฉนวนของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้นตามความหนา ไม่ได้เกี่ยวข้องกับความจุความร้อนแฝงของ PCM เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะแต่ประการใด



ภาพประกอบ 26 ปริมาณพลังงานความร้อนถ่ายเทจากผนังเบาสู่พื้นที่ภายใน

หากพิจารณาแยกการถ่ายเทความร้อนระหว่างช่วงกลางวัน (8:00-20:00 น.) และ กลางคืน (20:00-08:00 น.) โดยที่ผลรวมปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างทั้งสองช่วงเวลา (day time heat flow และ night time heat flow) รวมกันมีค่าเท่ากับความร้อนถ่ายเทสุทธิสู่พื้นที่ภายใน (net heat flow) พบว่าปริมาณความร้อนรวมที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายใน ในช่วงเวลากลางวันมีค่าลดลง เป็นอย่างมากตามความหนาของชั้น PCM ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความหนา อยู่ระหว่าง 2.5-10 mm เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะ PCM จากของแข็งเป็นของเหลวส่งผลให้ผนังมีมวลความร้อน สูงขึ้นและลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผิวผนังภายใน ปริมาณความร้อนที่ลดลงในช่วงเวลา กลางวันถูกสะสมไว้ในชั้น PCM และคายออกสู่พื้นที่ภายในในเวลากลางคืน เมื่อ PCM เปลี่ยน สถานะจากของเหลวกลับสู่สภาพของแข็งอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายใน ระหว่างช่วงกลางวันที่มีความหนาของชั้น PCM เท่ากับ 10 mm คิดเป็น 60.9% ของการถ่ายเท ความร้อนรวมทั้งวัน ลดลงจาก 92.5% เมื่อไม่มีชั้น PCM อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของชั้น PCM มากกว่า 10 mm ไม่ได้ช่วยลดสัดส่วนของการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาเมื่อไม่ใช้ชั้น PCM แต่เพิ่มความหนา ของชั้นฉนวนให้หนาขึ้นเป็นความหนารวมที่ 50 mm ดังแสดงเป็นเส้นประไขว้ปลาในภาพประกอบ

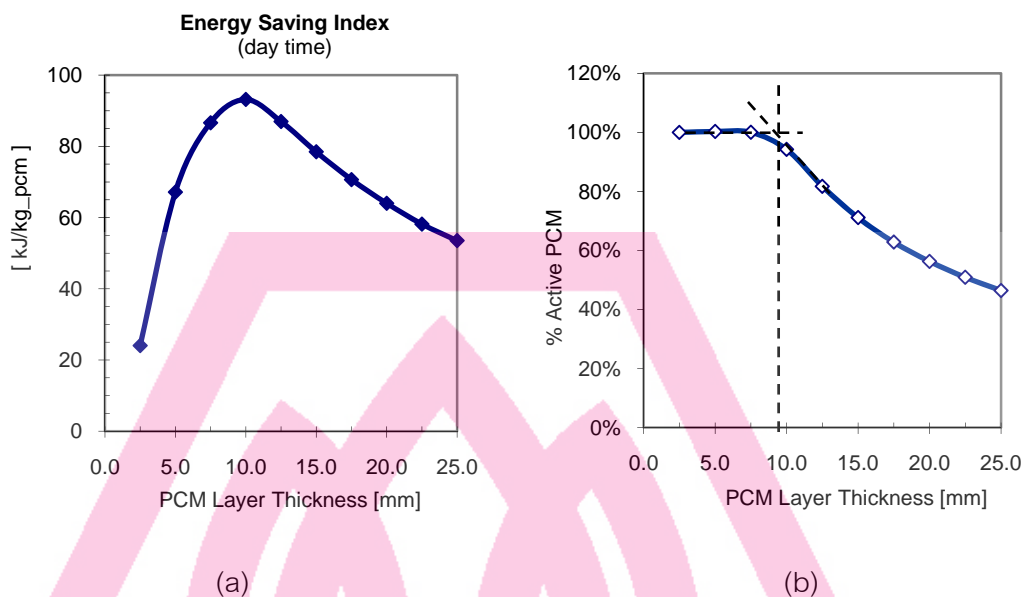
26 พบว่า ถึงแม้การถ่ายเทความร้อนรวมจะลดลงเป็นอย่างมาก แต่ปริมาณความร้อนถ่ายเทเกือบทั้งหมดยังคงเกิดขึ้นในช่วงกลางวัน

จากผลการคำนวณข้างต้นเป็นที่สังเกตได้ว่า ผงที่มีชั้น PCM มีการอัตราการลดลงของอุณหภูมิผิวสูงสุดและการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ภายในที่ไม่เหมือนกันตลอดช่วงความหนาของชั้น PCM ที่พิจารณา ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่จะคำนวณหาค่าความหนาของชั้น PCM ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองในที่นี้

การคำนวณได้ใช้ค่ากำหนดเรียกว่า Energy Saving Index ซึ่งคือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในในช่วงกลางวันที่ลดลงเป็น [kJ] ต่อ ปริมาณน้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะเป็น [kg] ที่ใช้ในชั้น PCM ที่ความหนาที่กำหนด โดยค่า Energy Saving Index ที่ความหนาของชั้น PCM ตลอดช่วงที่พิจารณาได้แสดงไว้ในภาพประกอบ 27a ซึ่งสามารถระบุได้ว่า ค่า Energy Saving Index มีค่าสูงที่สุด (หรือสารเปลี่ยนสถานะถูกใช้อย่างคุ้มค่าที่สุด) เมื่อความหนาของชั้น PCM ประมาณเท่ากับ 10 mm

ที่ความหนาประมาณ 10 mm สารเปลี่ยนสถานะมีปริมาณที่พอเหมาะต่อการใช้งานของผนังเบาบนพื้นฐานของสภาพแวดล้อมที่กำหนด นั่นคือปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะมีไม่มากเกินไปจนทำให้ความจุความร้อนแฝงไม่ถูกใช้อย่างเต็มที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าค่าประสิทธิภาพการใช้สารเปลี่ยนสถานะ (% Active PCM) มีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้น PCM มากกว่า 10 mm ดังแสดงในภาพประกอบ 27b

ในทางตรงข้ามหากปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะในชั้น PCM น้อยเกินไป (ในที่นี้คือที่ความหนาชั้น PCM น้อยกว่า 7.5 mm) ทำให้ความจุความร้อนแฝงอันเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว มีค่าไม่มากพอที่จะดูดซับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทสู่ชั้น PCM ได้ทั้งหมดระหว่างช่วงกลางวัน และสารเปลี่ยนสถานะมีสภาพเป็นของเหลวทั้งหมดก่อนที่พลังงานจากแสงอาทิตย์จะหมดไป ทำให้แรงขับเคลื่อนการถ่ายเทความร้อนอันเนื่องมาจากความเข้มแสงอาทิตย์ และจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ที่ยังคงมีค่าสูงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนในปริมาณที่มากสู่ PCM ในรูปของความร้อนสัมผัส เป็นผลให้อุณหภูมิผิวผนังภายในมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าอุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังมีค่าแทบไม่แตกต่างมากนักจากผิวผนังพื้นฐานที่ไม่มีชั้น PCM ดังที่แสดงในภาพประกอบ 25a (เมื่อชั้น PCM หนา 5 mm) ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของ PCM จะมีค่า 100% ดังภาพประกอบ 27b ก็ตาม



ภาพประกอบ 27 ปริมาณความร้อนถ่ายเทสู่พื้นที่ผิวภายในที่ลดลงในช่วงกลางวัน และ ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะในชั้น PCM

ดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะเพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดในโครงสร้าง นอกเหนือที่จะต้องเลือกใช้สารที่มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมเท่ากับ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิผนัง ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะแล้ว สารเปลี่ยนสถานะควรมีปริมาณที่พอเหมาะแก่การใช้งาน คือในปริมาณที่ไม่มากเกินไปจนเกินความจำเป็น แต่ในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ (% Active PCM) เท่ากับ 100% พอดี

บทที่ 5 สรุปรงานวิจัย

งานวิจัยได้ศึกษาถึงการใส่สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material หรือ PCM) เพื่อเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างผนังเปลือกของอาคาร ภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร เพื่อเป็นการเพิ่มมวลความร้อนให้แก่โครงสร้างผนังในรูปของความร้อนแฝงขณะที่มีผลต่อมวลโครงสร้างเพียงเล็กน้อย โดยมีจุดประสงค์ของงานวิจัยเพื่อประเมินศักยภาพเบื้องต้นของการใช้ PCM ต่อการจัดการพฤติกรรมทางความร้อนของผนังอาคารในการลดอุณหภูมิสูงสุดของผนัง และบรรเทาภาระความร้อนที่อาคารได้รับในช่วงกลางวันเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวผนังภายนอกมีค่าสูงที่สุด โดยที่ผลสรุปรงานวิจัยในขั้นนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางการศึกษาสำหรับการออกแบบการใส่สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อการจัดการการถ่ายเทความร้อนของโครงสร้างของผนังอาคารในรูปแบบเฉพาะต่างๆ รวมถึงโอกาสในการใช้ PCM สำหรับงานทางวิศวกรรมอื่นๆ

การดำเนินงานวิจัยอยู่บนพื้นฐานของการคำนวณ จากการจำลองพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคาร ทางคอมพิวเตอร์โดยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) แบบ finite differences ที่ใช้ algorithm ในรูปแบบ Crank-Nicolson implicit method เพื่อคำนวณการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิวัสดุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบ 1 มิติ (1-D transient heat transfer) อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และ อุณหภูมิบรรยากาศของกรุงเทพมหานคร ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั่วโมงของแต่ละวัน ซึ่งการคำนวณในแบบจำลองสามารถปรับมุมมองตกกระทบของข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง (direct radiation) เพื่อให้สอดคล้องตามตำแหน่งและการจัดวางทิศทางของผนัง ตามวันและเวลาที่พิจารณา

ประเภทสารเปลี่ยนสถานะที่นำมาพิจารณาสำหรับการศึกษาเป็นสารอินทรีย์ประเภท paraffin wax (เช่น octacosane, dodecane, ฯลฯ) ซึ่งพฤติกรรมเปลี่ยนสถานะและความสามารถในการดูดซับความร้อน ถูกจำลองโดยใช้ค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ ในช่วงของการเปลี่ยนสถานะ โดยที่การจำลองสมการเพื่อการคำนวณอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลจากการวัดค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะโดยใช้เครื่อง differential scan calorimeter (DSC)

การศึกษาได้วิเคราะห์เปรียบเทียบพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อน และ อุณหภูมิของผนังอาคารแบบอิฐก่อและแบบผนังเบาเมื่อมี PCM และ ไม่มี PCM ผสมอยู่ในโครงสร้าง โดยใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยของกรุงเทพมหานครในเดือนเมษายน ซึ่งเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิอากาศ

และความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด นอกจากนี้ได้กำหนดวิธีการประเมินค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม จากข้อมูลสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยที่มีอยู่ทั่วไปในคู่มือการออกแบบระบบปรับอากาศ เพื่อความสะดวกสำหรับผู้ออกแบบที่จะพิจารณานำสารเปลี่ยนสถานะไปใช้

ผลการวิเคราะห์พบว่าการใช้สารเปลี่ยนสถานะ ในโครงสร้างผนังเปลือกอาคารภายใต้สภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังในแต่ละรอบวันได้ ทำให้สามารถลดค่าอุณหภูมิผิวผนังสูงสุดที่เกิดขึ้นและชลดเวลาของการเกิดขึ้นให้ช้าลงได้ เป็นผลให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสู่ภายในอาคารในช่วงเวลากลางวันมีค่าลดลงเป็นอย่างมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ ปริมาณ และลักษณะการผนวกเข้าภายในโครงสร้างผนังต่อสภาพแวดล้อมที่พิจารณา

การประเมินอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม พบว่าการถ่ายเทความร้อนของผนังในแต่ละรอบวัน สามารถประมาณให้เนื้อวัสดุกำแพงในแต่ละตำแหน่งจะมีการดูดซับและการถ่ายเทความร้อนในปริมาณเฉลี่ยที่เท่ากัน ส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในมีค่าสุทธิเท่ากับศูนย์ และ การขึ้น-ลงของอุณหภูมิเนื้อวัสดุผนังมีค่ากลับมาประมาณเท่าเดิม ณ เวลาเดิมของวัน ถัดไป หรือมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ quasi-steady ดังนั้นเพื่อให้เกิดการดูดซับพลังงาน (และคายพลังงาน) เกิดขึ้นในปริมาณที่มากที่สุดโดยที่มีการใช้ความจุความร้อนแฝงของ PCM อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ควรเลือกใช้ PCM ที่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิที่เป็นจุดกึ่งกลางระหว่างการดูดซับและการคายพลังงานความร้อนของมวลวัสดุผนังที่ตำแหน่งใดๆ ซึ่งก็คืออุณหภูมิเฉลี่ยในรอบวันของเนื้อวัสดุที่ตำแหน่งนั้นๆ

การผนวกสาร PCM ชนิดเดียวกัน (มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเดียวกัน) เข้าไปในโครงสร้างผนังอย่างทั่วถึงตลอดความหนา ทำให้ปริมาณความร้อนแฝงของ PCM ไม่ถูกใช้อย่างเท่าเทียมกันตลอดความหนาของกำแพง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานของ PCM โดยรวมไม่ดีเท่าที่ควร ถึงแม้ว่าจะเลือกใช้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะเท่ากับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรวมของผนังก็ตาม ดังนั้นการผนวก PCM เข้าไปในโครงสร้างผนัง จึงควรที่จะจัดทำให้เป็นชั้น PCM ที่ไม่หนาจนเกินไป และเลือกติดตั้งเข้าไปในชั้นโครงสร้างผนังในลักษณะ composite wall ในตำแหน่งที่มีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของผนัง ณ ตำแหน่งนั้นเท่ากับค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของ PCM ที่เลือกใช้

ปริมาณการใช้ PCM ในชั้นโครงสร้างผนังควรมีปริมาณที่พอเหมาะแก่การใช้งาน คือหากปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะของชั้น PCM มีปริมาณที่น้อยเกินไป ทำให้ความจุความร้อนแฝงมีค่าไม่เพียงพอสำหรับปริมาณความร้อนที่ผนังได้รับในแต่ละรอบวัน สำหรับกรณีนี้ถึงแม้ว่า

ประสิทธิภาพการใช้ความจุความร้อนแฝงของสารเปลี่ยนสถานะจะเท่ากับ 100% ในช่วงเวลา กลางวันขณะที่ผนังดูดซับความร้อนจากสภาพแวดล้อมจนกระทั่ง PCM เปลี่ยนสถานะจาก ของแข็งเป็นของเหลวจนหมด ทำให้การดูดซับความร้อนของ PCM จากถ่ายเทความร้อนสู่ผนังที่ ยังคงมีค่าแรงขับที่สูงในรูปของความร้อนสัมผัส ทำให้อุณหภูมิผนังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจน อาจมีค่าแทบไม่แตกต่างไปจากผนังที่ไม่มี PCM ผสมอยู่ในโครงสร้าง ในทางตรงข้ามหากปริมาณ PCM มีมากเกินไปจนทำให้ความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะไม่ได้ถูกใช้ทั้งหมด และ ประสิทธิภาพการทำงานของ PCM มีค่าน้อยกว่า 100% ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นปริมาณสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมที่สุด คือปริมาณน้อยที่สุดที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการ ทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ (% Active PCM) เท่ากับ 100% พอดี

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้ระบุถึงศักยภาพของการใช้สารเปลี่ยนสถานะในผนังเปลือกอาคารเพื่อการ จัดการการถ่ายเทพลังงานความร้อนสู่พื้นที่ภายในอาคารในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร โดยได้ระบุแนวทางเบื้องต้นของการประเมินคุณสมบัติการเปลี่ยนสถานะ ปริมาณของสารเปลี่ยน สถานะ และลักษณะการผนวกเข้าสู่โครงสร้างของผนัง เพื่อการใช้ความจุความร้อนแฝงอย่างมี ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาคำถามการใช้สารเปลี่ยนสถานะที่ น่าสนใจต่อไปดังนี้

- การวิจัยทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณถึงอิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะต่อ พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารภายใต้สภาพการใช้งานต่างๆ
- วิธีการติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะเข้าไปในโครงสร้างผนังที่เหมาะสมสำหรับรูปแบบผนัง แบบต่างๆที่มีใช้ในอาคารในประเทศไทย
- การศึกษาถึงศักยภาพการใช้สารเปลี่ยนสถานะภายในวัสดุโครงสร้างภายในอาคารเพื่อ เพิ่มมวลความร้อน และวิเคราะห์ถึงผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของพื้นที่
- การใช้สารเปลี่ยนสถานะในงานวิศวกรรมอื่นๆเพื่อการจัดการพลังงานความร้อน
- การผลิตสารเปลี่ยนสถานะที่มีอยู่ในท้องถิ่น
- การประเมินศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้สารเปลี่ยนสถานะในอาคาร
- การควบคุมอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะ

บรรณานุกรม

- Athienitis, A.K. and others. "Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage," **Building and Environment**. 32(5) : 405-410, 1997.
- Banu, D. and others. "Evaluation of Thermal Storage as Latent Heat in Phase Change Material Wallboard by Differential Scanning Calorimetry and Large Scale Thermal Testing," **Thermochimica Acta**. 317 : 39-45, 1998.
- Balcomb, J.D. **Passive Solar Buildings**. Cambridge : MIT Press, 1992.
- Benard, C. "Use of a Variable Parameter Test-Cell for the Study of Latent-Heat Solar Walls," **Solar Energy**. 29(2):101-109, 1982.
- Christensen, C. and Benson, D. "Advanced Phase-Change Storage: Analysis of Material and Configurations," **Solar Energy Research Institute, Internal Report Number SERI/TP-255-2018, Task No. 1462.53, WPA No. 420**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1983.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1991.
- Eiamworawutthikul, C. **Internal Report: Enhancement of Thermal Loop Performance Using Microencapsulated Octacosane Slurry**. Raleigh : Triangle Research and Development Corporation, 2001.
- Feldman, D. and others. "Development and Application of Organic Phase Change Mixtures in Thermal Storage Gypsum Wallboard," **Solar Energy Materials and Solar Cells**. 36 : 147-157, 1995.
- Hawes, D.W., and others. "Latent Heat Storage in Concrete," **Solar Energy Materials**. 19 : 335-348, 1989.
- Hawes, D.W. and others. "The stability of Phase Change Materials in Concrete," **Solar Energy Materials and Solar Cells**. 27 : 103-118, 1989.
- Hawes, D.W. and others. "Latent Heat Storage in Building Materials," **Energy and Building**. 20:77-86, 1993.

- Ismail, K.A.R. and Castro, J.N.C. "PCM Thermal Insulation in Building," **Interational Journal of Energy Research**. 21 : 1281-1296, 1997.
- Lee, T. and others. "Control Aspects of Latent Heat Storage and Recovery in Concrete," **Solar Energy Materials and Solar Cells**. 62 : 217-237, 2000.
- Neeper, D.A. "Thermal Dynamics of Wallboard with Latent Heat Storage," **Solar Energy**. 68(5): 393-403, 2000.
- Rudd, A. "Phase-Change Material Wallboard for Distributed Thermal Storage in Buildings," **ASHRAE Transactions: Research Paper # 3724**. 99(2), 1993.
- Stovall, T.K. and Tomlinson, J.J. "What are the Potential Benefits of Including Latent Storage in Common Wallboard?," **Journal of Solar Energy Engineering**. 117, 1995.
- Tannehill, J.C., Anderson, D.A. and Pletcher, R.H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 2nd ed. Philadelphia : Hemisphere, 1997.
- U.S. Department of Energy. "Phase Change Dry Wall" **Consumer Energy Information: EREC Reference Brief**. Washington, DC : Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2001. Available: <http://www.eren.doe.gov/consumerinfo/refbriefs/db3.html> [Accessed May, 2001]
- U.S. Department of Energy. **Recommended Future Directions for Building Envelope Research**. Washington, DC : Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2001. Available: http://www.eren.doe.gov/buildings/envelope_future.html [Accessed November 5, 2001]
- U.S. National Renewable Energy Laboratory **Weather Maker Software, version 1.01**. A Weather Data Utility for Energy-10, 2002.
- ชลธิศ เตียมวรวิฑูกร. **รายการคำนวณความเข้มแสงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิวของกรุงเทพมหานคร**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยศรีปทุม, 2550.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. **รายงานการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเครื่อง Differential Scan Calorimeter (DSC): MTEC No.0731/51**. กรุงเทพฯ : ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ, 2551.

อุตุนิยมวิทยา, กรม. **ข้อมูลสภาพภูมิอากาศกรุงเทพมหานคร 2544-2546**. กรุงเทพมหานคร :
อุตุนิยมวิทยา, 2547.



มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายชั่วโมงบนพื้นผิวในกรุงเทพมหานคร

แสดงผลการคำนวณความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายชั่วโมงบนพื้นผิวใน
กรุงเทพมหานคร

- สำหรับข้อมูล Design-Day ของแต่ละเดือน
- สำหรับข้อมูล Monthly Average ของแต่ละเดือน

หมายเหตุ ใช้ข้อมูลความเข้มแสงบนพื้นราบจากจาก กรมอุตุนิยมวิทยา (2547) และ โปรแกรม
Weather Maker (U.S. National Renewable Energy Laboratory 2002)

ตาราง ก-1 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของ กรุงเทพมหานคร สำหรับพื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(Horz = horizontal, N = North, NE = Northeast, E = East, SE = Southeast, S = South, SW = Southwest, W = West, NW = Northwest)

Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7	18.86	6.31	49.30	110.51	110.63	49.59	6.31	6.31	6.31
1	8	294.51	44.16	254.48	668.33	716.17	369.97	44.16	44.16	44.16
1	9	542.51	53.63	190.63	693.99	821.76	499.05	53.63	53.63	53.63
1	10	735.17	56.78	56.78	560.06	778.08	572.99	65.04	56.78	56.78
1	11	864.02	59.94	59.94	352.59	661.86	617.97	246.64	59.94	59.94
1	12	918.04	59.94	59.94	106.53	500.31	635.61	433.11	59.94	59.94
1	13	895.29	59.94	59.94	59.94	317.18	628.94	606.83	263.79	59.94
1	14	800.92	59.94	59.94	59.94	133.33	600.35	750.28	495.24	59.94
1	15	637.50	56.78	56.78	56.78	56.78	544.71	837.99	673.09	146.68
1	16	419.68	50.47	50.47	50.47	50.47	457.77	838.60	757.26	261.44
1	17	171.27	37.86	37.86	37.86	37.86	310.57	659.57	644.05	273.11
1	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	7	44.15	12.62	125.23	224.70	199.83	65.20	12.62	12.62	12.62
2	8	340.62	47.32	365.69	727.82	690.92	276.60	47.32	47.32	47.32
2	9	598.53	56.78	310.26	737.14	764.97	377.43	56.78	56.78	56.78
2	10	800.13	59.94	167.38	595.05	708.74	441.81	59.94	59.94	59.94
2	11	932.38	59.94	59.94	375.81	580.60	479.83	132.58	59.94	59.94
2	12	995.21	63.09	63.09	123.59	415.23	500.10	328.43	63.09	63.09
2	13	977.21	63.09	63.09	63.09	225.79	495.71	511.67	264.32	63.09
2	14	877.70	59.94	59.94	59.94	59.94	465.85	661.36	503.99	86.00
2	15	715.31	59.94	59.94	59.94	59.94	419.84	766.79	699.12	256.50
2	16	490.97	53.63	53.63	53.63	53.63	346.25	789.65	801.40	374.62

2	17	232.79	44.16	44.16	44.16	44.16	240.87	670.80	733.30	391.74
2	18	7.15	6.31	6.31	6.31	6.31	23.19	75.01	86.56	51.06
2	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	7	131.48	31.55	322.25	464.37	352.72	52.75	31.55	31.55	31.55
3	8	428.31	56.78	496.74	764.88	617.78	141.66	56.78	56.78	56.78
3	9	681.25	66.25	437.75	736.29	641.79	209.66	66.25	66.25	66.25
3	10	873.92	69.40	295.32	579.43	564.25	258.67	69.40	69.40	69.40
3	11	998.50	69.40	115.44	355.15	427.01	288.87	69.40	69.40	69.40
3	12	1,051.28	72.56	72.56	101.57	257.09	304.06	214.96	72.56	72.56
3	13	1,025.45	72.56	72.56	72.56	72.56	297.76	395.44	303.48	75.79
3	14	918.07	69.40	69.40	69.40	69.40	269.31	542.89	538.58	258.91
3	15	748.67	69.40	69.40	69.40	69.40	228.22	646.93	726.82	421.06
3	16	519.87	63.09	63.09	63.09	63.09	168.13	674.67	822.51	524.99
3	17	254.67	50.47	50.47	50.47	50.47	95.08	575.75	748.40	511.83
3	18	13.69	9.46	9.46	9.46	9.46	9.48	109.84	151.35	109.68
3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
4	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	7	216.68	130.48	466.76	562.08	359.27	53.63	53.63	53.63	53.63
4	8	489.25	142.98	586.79	732.50	493.02	75.71	75.71	75.71	75.71
4	9	719.93	118.53	531.73	684.43	485.59	85.17	85.17	85.17	85.17
4	10	892.42	89.49	401.47	530.70	400.30	88.33	88.33	88.33	88.33
4	11	1,002.50	91.48	239.76	321.92	268.66	111.19	91.48	91.48	91.48
4	12	1,037.43	91.48	91.48	91.48	105.15	118.35	115.45	98.15	91.48

4	13	1,001.90	91.48	91.48	91.48	91.48	110.36	278.53	336.71	250.79
4	14	896.93	93.20	91.48	91.48	91.48	91.48	414.21	550.77	417.78
4	15	724.24	120.00	85.17	85.17	85.17	85.17	499.50	707.12	549.90
4	16	505.19	150.79	78.86	78.86	78.86	78.86	522.47	779.22	625.23
4	17	252.86	157.77	63.09	63.09	63.09	63.09	436.87	687.16	571.54
4	18	18.39	40.92	12.62	12.62	12.62	12.62	88.49	148.36	128.65
4	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
5	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	6	0.91	3.20	8.52	8.86	4.01	0.00	0.00	0.00	0.00
5	7	248.14	220.33	524.22	560.82	307.41	66.25	66.25	66.25	66.25
5	8	502.35	261.28	635.79	692.57	396.83	91.48	91.48	91.48	91.48
5	9	716.15	252.45	592.90	646.10	379.48	100.95	100.95	100.95	100.95
5	10	877.03	235.49	480.17	506.97	299.16	107.26	107.26	107.26	107.26
5	11	975.22	219.14	331.49	312.59	172.99	107.26	107.26	107.26	107.26
5	12	1,009.36	216.70	176.51	110.41	110.41	110.41	110.41	122.62	194.46
5	13	975.05	223.69	110.41	110.41	110.41	110.41	192.58	340.93	353.82
5	14	873.25	238.78	107.26	107.26	107.26	107.26	314.39	532.84	501.52
5	15	714.48	261.07	104.10	104.10	104.10	104.10	397.02	676.45	620.13
5	16	506.09	275.24	94.64	94.64	94.64	94.64	418.73	734.61	675.16
5	17	268.17	255.44	75.71	75.71	75.71	75.71	353.29	648.77	608.24
5	18	35.36	88.03	22.08	22.08	22.08	22.08	102.75	202.32	196.22
5	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
6	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	6	0.54	2.46	5.82	5.79	2.36	0.00	0.00	0.00	0.00
6	7	232.59	240.68	512.83	526.13	271.61	69.40	69.40	69.40	69.40
6	8	481.27	299.24	645.53	672.02	361.74	97.79	97.79	97.79	97.79

8	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	7	195.06	124.65	427.13	515.45	336.68	59.94	59.94	59.94	59.94
8	8	460.36	145.09	566.14	708.50	487.17	88.33	88.33	88.33	88.33
8	9	687.10	125.01	525.48	678.32	492.47	100.95	100.95	100.95	100.95
8	10	861.00	107.26	409.17	542.51	420.42	114.46	107.26	107.26	107.26
8	11	973.76	110.41	256.88	347.37	298.62	139.22	110.41	110.41	110.41
8	12	1,014.94	110.41	110.41	120.40	143.83	147.34	128.86	110.41	110.41
8	13	985.14	110.41	110.41	110.41	110.41	140.72	286.45	328.66	242.60
8	14	884.73	107.26	107.26	107.26	107.26	117.04	415.13	532.45	400.21
8	15	724.15	124.14	104.10	104.10	104.10	104.10	501.52	687.29	530.95
8	16	511.17	150.39	94.64	94.64	94.64	94.64	520.88	754.20	600.71
8	17	267.35	155.96	75.71	75.71	75.71	75.71	439.54	671.25	553.76
8	18	36.49	61.91	25.24	25.24	25.24	25.24	134.75	216.99	186.81
8	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
9	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	7	204.69	50.47	391.68	575.47	451.43	92.28	50.47	50.47	50.47
9	8	479.52	72.56	474.19	746.91	624.15	177.88	72.56	72.56	72.56
9	9	709.51	82.02	395.84	686.81	623.00	241.81	82.02	82.02	82.02
9	10	883.93	85.17	251.68	523.77	538.44	287.09	85.17	85.17	85.17
9	11	988.14	88.33	88.33	302.80	400.62	315.04	96.21	88.33	88.33
9	12	1,020.69	88.33	88.33	88.33	230.90	323.05	277.25	120.36	88.33
9	13	974.74	88.33	88.33	88.33	88.33	311.79	443.32	366.41	126.15
9	14	855.62	85.17	85.17	85.17	85.17	280.22	573.72	580.54	296.67
9	15	674.28	82.02	82.02	82.02	82.02	233.30	652.06	736.43	436.94
9	16	445.72	75.71	75.71	75.71	75.71	172.16	651.99	793.85	514.57
9	17	188.93	56.78	56.78	56.78	56.78	93.66	502.40	649.85	449.58
9	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.23	3.15	2.23
9	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW

11	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
12	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	7	55.68	15.77	105.12	269.81	285.56	143.13	15.77	15.77	15.77
12	8	323.13	44.16	208.72	669.03	762.92	435.35	44.16	44.16	44.16
12	9	555.86	53.63	121.95	656.52	837.46	558.71	53.63	53.63	53.63
12	10	731.36	56.78	56.78	508.86	781.09	628.45	140.44	56.78	56.78
12	11	840.83	56.78	56.78	295.12	657.05	666.78	318.63	56.78	56.78
12	12	881.66	59.94	59.94	59.94	497.60	683.00	502.84	62.73	59.94
12	13	846.97	59.94	59.94	59.94	318.03	673.25	668.64	306.89	59.94
12	14	736.41	56.78	56.78	56.78	136.47	634.86	794.11	520.86	56.78
12	15	564.69	53.63	53.63	53.63	53.63	571.21	861.28	677.69	128.06
12	16	344.55	47.32	47.32	47.32	47.32	470.10	827.73	727.74	228.76
12	17	104.99	31.55	31.55	31.55	31.55	276.96	553.41	523.90	205.73
12	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตาราง ก-2 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของ กรุงเทพมหานคร สำหรับพื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(Horz = horizontal, N = North, NE = Northeast, E = East, SE = Southeast, S = South, SW = Southwest, W = West, NW = Northwest)

Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	7	40.37	27.76	70.95	132.45	132.57	71.24	27.76	27.76	27.76
1	8	184.98	96.06	170.76	317.76	334.76	211.79	96.06	96.06	96.06
1	9	349.62	169.30	219.83	405.48	452.61	333.58	169.30	169.30	169.30
1	10	496.54	234.54	234.54	428.91	513.11	433.90	237.73	234.54	234.54
1	11	594.18	286.65	286.65	398.58	516.86	500.07	358.05	286.65	286.65
1	12	661.48	308.73	308.73	327.88	489.76	545.38	462.13	308.73	308.73
1	13	669.97	307.73	307.73	307.73	419.28	554.47	544.88	396.13	307.73
1	14	596.16	286.38	286.38	286.38	317.07	512.31	574.99	468.37	286.38
1	15	465.69	240.96	240.96	240.96	240.96	429.78	543.28	479.46	275.75
1	16	311.67	171.87	171.87	171.87	171.87	326.09	470.29	439.49	251.75
1	17	144.36	91.17	91.17	91.17	91.17	199.90	339.04	332.85	184.96
1	18	25.97	25.97	25.97	25.97	25.97	61.70	119.94	123.09	69.31
1	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	7	46.38	29.29	90.34	144.26	130.78	57.79	29.29	29.29	29.29
2	8	212.61	92.17	222.90	371.61	356.45	186.32	92.17	92.17	92.17
2	9	399.07	158.94	271.30	460.51	472.85	301.07	158.94	158.94	158.94
2	10	554.72	215.93	265.11	460.85	512.89	390.71	215.93	215.93	215.93
2	11	652.83	256.94	256.94	400.28	493.20	447.47	289.91	256.94	256.94
2	12	685.09	293.43	293.43	318.85	441.39	477.05	404.92	293.43	293.43
2	13	677.73	308.36	308.36	308.36	374.11	483.17	489.62	389.67	308.36
2	14	603.02	280.02	280.02	280.02	280.02	440.35	517.57	455.42	290.32
2	15	484.96	234.86	234.86	234.86	234.86	372.21	504.61	478.79	309.87

2	16	338.91	179.18	179.18	179.18	179.18	286.06	448.00	452.29	296.42
2	17	177.99	106.89	106.89	106.89	106.89	181.04	343.10	366.66	237.91
2	18	35.82	34.54	34.54	34.54	34.54	60.11	138.61	156.10	102.33
2	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
3	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	6	3.05	3.09	5.12	5.94	5.07	3.05	3.05	3.05	3.05
3	7	79.74	44.43	147.14	197.35	157.90	51.92	44.43	44.43	44.43
3	8	285.44	119.98	315.92	435.34	369.82	157.78	119.98	119.98	119.98
3	9	477.01	190.96	363.76	502.61	458.66	257.66	190.96	190.96	190.96
3	10	644.57	253.37	363.22	501.37	493.99	345.40	253.37	253.37	253.37
3	11	759.10	293.43	316.51	436.65	472.67	403.43	293.43	293.43	293.43
3	12	795.97	304.00	304.00	318.58	396.75	420.37	375.58	304.00	304.00
3	13	769.75	307.84	307.84	307.84	307.84	417.00	464.35	419.78	309.40
3	14	694.12	299.74	299.74	299.74	299.74	392.64	519.77	517.77	387.80
3	15	578.77	257.94	257.94	257.94	257.94	332.95	530.72	568.45	424.03
3	16	411.71	196.58	196.58	196.58	196.58	246.05	484.61	554.24	414.12
3	17	216.01	121.45	121.45	121.45	121.45	142.11	364.68	444.63	335.09
3	18	43.59	39.48	39.33	39.33	39.33	39.35	140.60	182.48	140.44
3	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
4	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	6	20.77	29.86	69.90	79.05	51.93	17.19	17.19	17.19	17.19
4	7	135.51	103.42	227.23	262.19	187.81	75.71	75.71	75.71	75.71
4	8	308.35	184.81	342.98	394.72	309.69	161.52	161.52	161.52	161.52
4	9	478.84	260.53	410.70	465.99	393.99	249.00	249.00	249.00	249.00
4	10	627.07	322.62	441.17	490.11	440.73	322.61	322.61	322.61	322.61
4	11	725.73	371.66	429.29	461.22	440.52	379.32	371.66	371.66	371.66

4	12	762.93	385.07	385.07	385.07	390.53	395.80	394.64	387.73	385.07
4	13	731.74	363.46	363.46	363.46	363.46	371.10	439.13	462.66	427.90
4	14	662.91	337.61	336.44	336.44	336.44	336.44	467.25	522.60	468.69
4	15	535.62	311.34	297.79	297.79	297.79	297.79	451.98	529.25	470.74
4	16	373.11	246.58	220.14	220.14	220.14	220.14	379.31	471.43	416.18
4	17	200.99	164.02	125.97	125.97	125.97	125.97	273.72	372.67	326.96
4	18	45.52	64.82	40.64	40.64	40.64	40.64	104.67	155.20	138.57
4	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
5	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	6	30.10	48.63	92.23	95.05	55.43	22.66	22.66	22.66	22.66
5	7	149.16	139.63	239.65	251.65	168.59	89.54	89.54	89.54	89.54
5	8	301.11	226.20	342.31	359.85	268.53	174.24	174.24	174.24	174.24
5	9	457.41	300.77	415.90	433.81	344.02	250.21	250.21	250.21	250.21
5	10	582.75	353.93	441.43	450.97	376.96	308.62	308.62	308.62	308.62
5	11	679.42	388.23	431.67	424.40	370.67	345.38	345.38	345.38	345.38
5	12	723.38	403.11	386.86	360.15	360.15	360.15	360.15	365.08	394.11
5	13	690.45	397.58	353.16	353.16	353.16	353.16	385.21	443.08	448.11
5	14	605.48	372.45	323.66	323.66	323.66	323.66	399.87	480.24	468.72
5	15	478.74	325.41	271.66	271.66	271.66	271.66	371.04	465.84	446.73
5	16	339.17	261.02	198.90	198.90	198.90	198.90	309.39	417.08	396.81
5	17	189.54	185.39	118.67	118.67	118.67	118.67	220.88	329.70	314.77
5	18	50.07	78.11	43.06	43.06	43.06	43.06	85.64	138.20	134.98
5	19	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
5	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
6	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	6	27.27	48.10	85.16	84.78	47.18	21.29	21.29	21.29	21.29
6	7	132.15	134.25	216.71	220.73	143.93	82.91	82.91	82.91	82.91

11	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Month	Hour	Horz	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
12	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	7	57.24	34.23	85.74	180.69	189.77	107.66	34.23	34.23	34.23
12	8	240.90	100.53	183.33	414.96	462.20	297.37	100.53	100.53	100.53
12	9	427.81	156.31	193.25	482.23	580.05	429.36	156.31	156.31	156.31
12	10	578.57	202.42	202.42	454.51	606.31	521.19	249.07	202.42	202.42
12	11	684.96	227.39	227.39	366.49	577.70	583.38	380.20	227.39	227.39
12	12	735.13	235.86	235.86	235.86	501.78	614.43	504.96	237.56	235.86
12	13	689.68	241.33	241.33	241.33	388.36	590.72	588.09	382.01	241.33
12	14	585.82	224.13	224.13	224.13	266.54	531.78	616.53	471.11	224.13
12	15	443.70	181.49	181.49	181.49	181.49	447.04	595.86	501.67	219.68
12	16	273.18	123.98	123.98	123.98	123.98	336.20	515.72	465.53	215.05
12	17	97.59	61.72	61.72	61.72	61.72	181.57	316.58	302.17	146.79
12	18	15.56	15.56	15.56	15.56	15.56	43.87	83.20	82.88	43.10
12	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



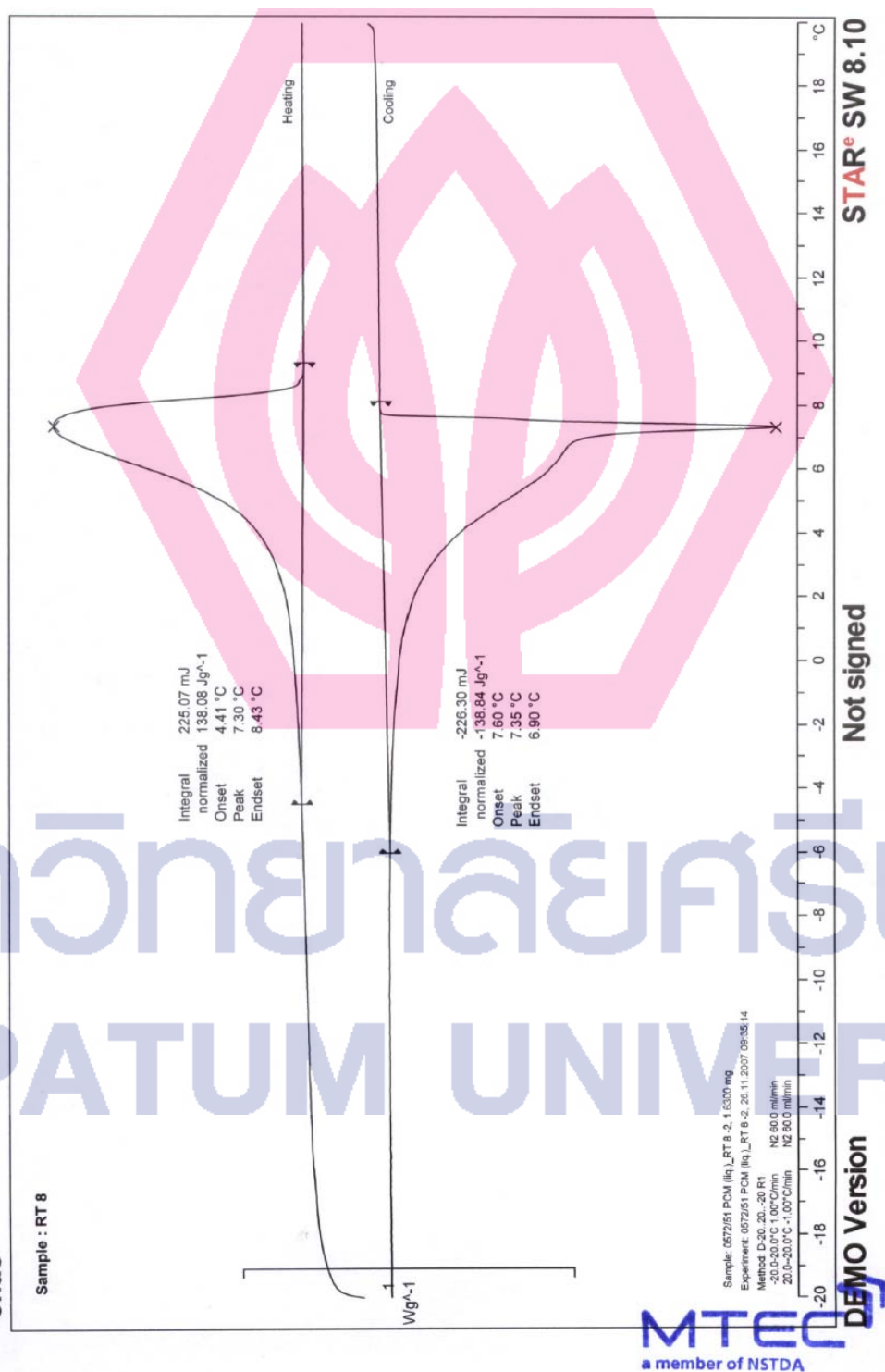
ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวัดค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะตัวอย่างโดยเครื่อง differential scan calorimeter (DSC)

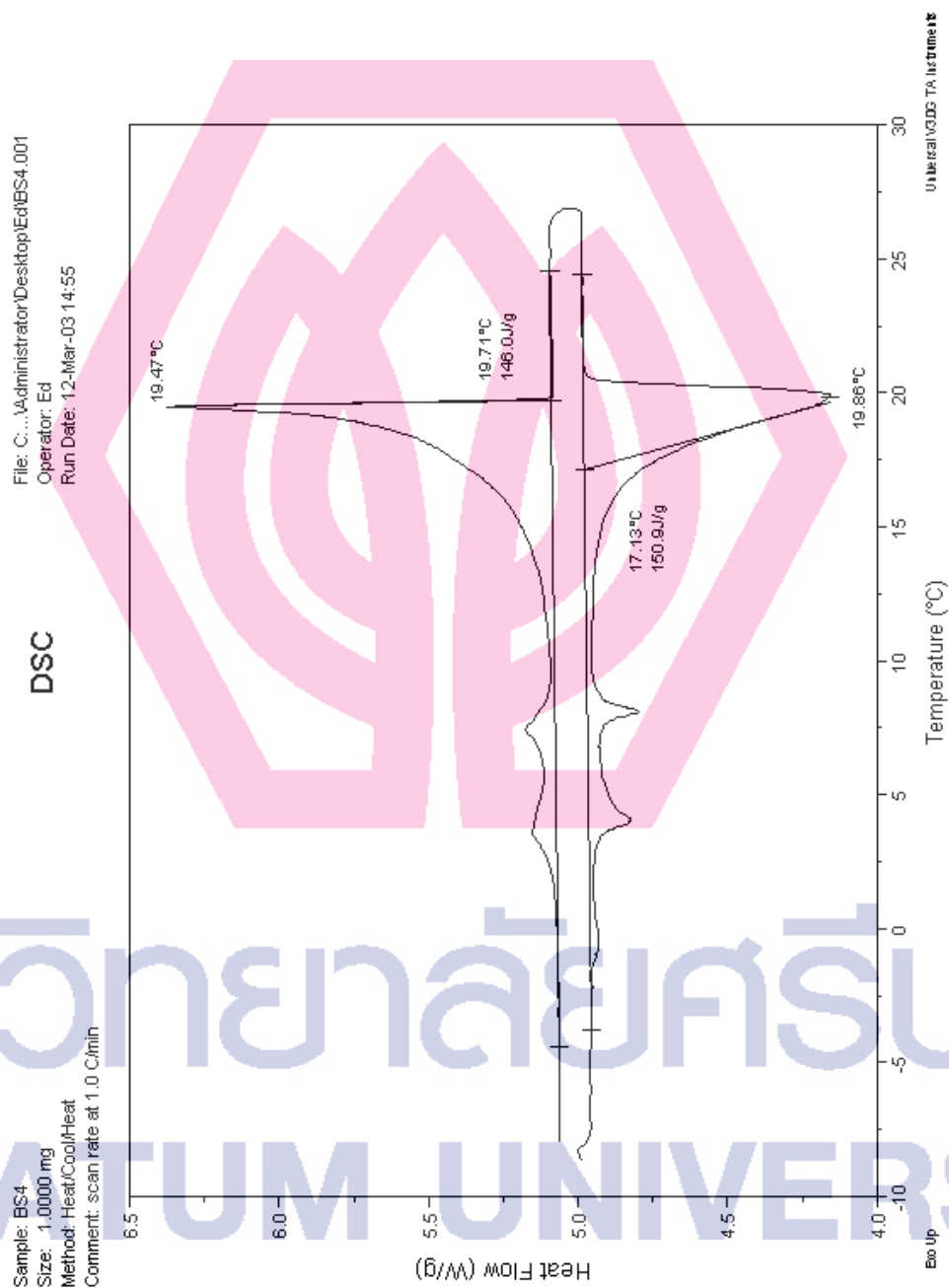
หมายเหตุ ข้อมูลจากผลการทดสอบโดย MTEC (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2551)

มหาวิทยาลัยศรีปทุม
SRIPATUM UNIVERSITY

ภาพประกอบ ข-1 กราฟแสดงค่าการวัดค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะประเภท พาราฟิน (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 2551) สำหรับสารตัวอย่าง RT8 จากผู้ผลิต Rubitherm



รูปที่ ข-2 กราฟแสดงค่าการวัดค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะประเภทกรดไขมัน
สำหรับสารตัวอย่าง butyl-stearate (Eiamworawutthikul 2001)



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นาย ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล
วัน เดือน ปี เกิด	วันที่ 17 มิถุนายน 2512
สถานที่เกิด	จังหวัดยะลา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 375/322 ถนนสาธุประดิษฐ์ ตำบลทุ่งวัดดอน เขตยานนาวา จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ตำแหน่งงานในปัจจุบัน	อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ประวัติการศึกษา	ปริญญาเอก (Ph.D.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, North Carolina State University, ประเทศสหรัฐอเมริกา, 2544

ปริญญาโท (M.S.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, Southern Illinois
University at Carbondale, ประเทศสหรัฐอเมริกา, 2540

ปริญญาตรี (วศบ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2534