



การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทของผนังเบาที่มี
สารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน

โดย

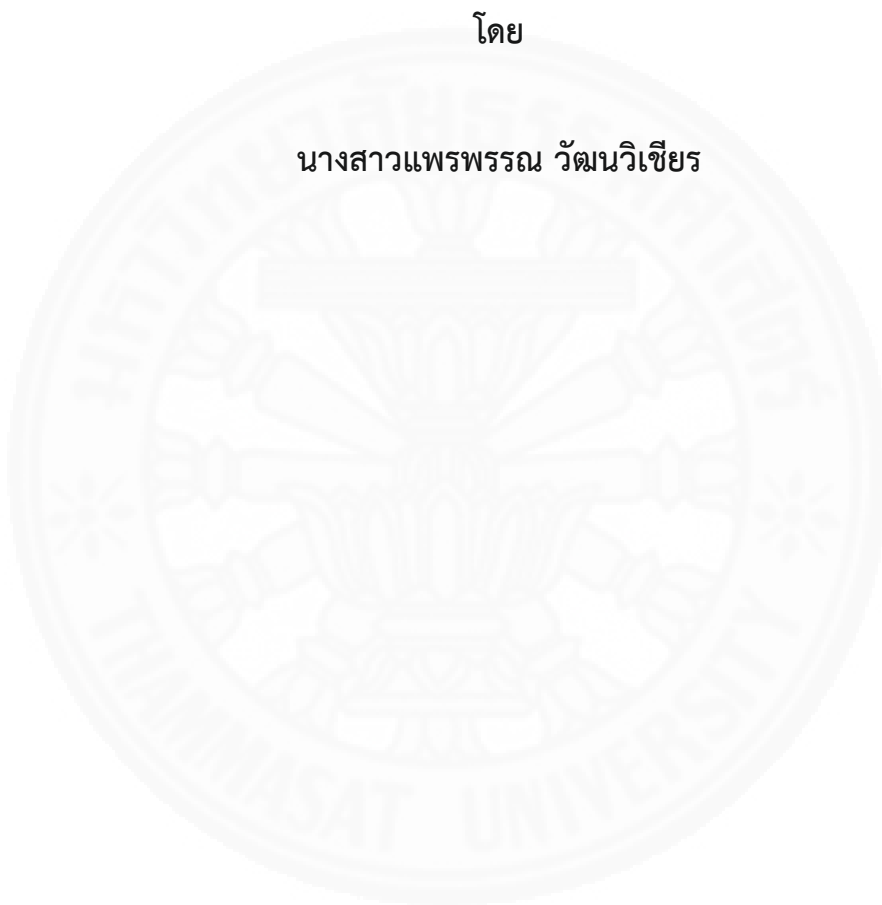
นางสาวแพรพรรณ วัฒนวิเชียร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทของผนังเบาที่มี
สารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน

โดย

นางสาวแพรพรรณ วัฒนวิเชียร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศา
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



THE EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL BEHAVIOR WITH PHASE
CHANGE MATERIAL THERMAL SHIELD (PCMTS) INSIDE
LIGHTWEIGHT WALL DURING THE DAYTIME

BY

MISS PEARPRAN WATTANAVICHIEEN



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF ARCHITECTURE
ARCHITECTURE
FACULTY OF ARCHITECTURE AND PLANNING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวแพพรพรรณ วัฒนวิเชียร

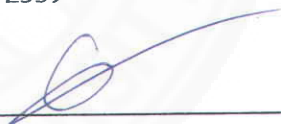
เรื่อง

การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบ
แมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2559

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดาภรณ์ สูดประเสริฐ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร. วรสันต์ บุรณากาญจน์)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ เฉลิมวัฒน์ ต้นตสวัสดิ์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน
ชื่อผู้เขียน	นางสาวแพรวพรรณ วัฒนวิเชียร
ชื่อปริญญา	สถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สถาปัตยกรรม สถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุตาภรณ์ สุตประเสริฐ
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การป้องกันความร้อนโดยใช้สมบัติของสารเปลี่ยนสถานะเป็นการดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน โดยเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิคงที่ทำให้ช่วยลดความร้อนเข้าสู่อาคาร ในขณะที่เดียวกันในเวลากลางคืนเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ สารเปลี่ยนสถานะจะคายความร้อนเพื่อคืนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งเพื่อให้เกิดการทำงานในวัฏจักรต่อไป งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน ซึ่งศึกษาสารเปลี่ยนสถานะ 3 ชนิด ได้แก่ SP26E SP29Eu และ SP31 ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวเท่ากับ 26 29 และ 31 องศาเซลเซียสตามลำดับ การศึกษานี้ใช้วิธีการทดลองในห้องปรับอากาศใช้ดวงโคมฮาโลเจนจำลองแหล่งความร้อนจากดวงอาทิตย์

ผลการทดลองกับห้องที่มีการปรับอากาศเวลา 8.00 – 20.00 น. พบว่าสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานในอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวในเวลากลางวัน และเปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งในเวลากลางคืนได้ดีกว่าสารชนิดอื่น ส่งผลให้ผนังด้านในอาคารมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในเวลากลางวัน โดยสามารถลดอุณหภูมิผิวผนังภายในได้ 6-9 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ผลการทดลองกับห้องที่มีการปรับอากาศเวลา 19.00 – 7.00 น. พบว่าการเปิดเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืนนั้น ผิวผนังภายในภายในของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิภายในต่ำกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 5 -6 องศาเซลเซียส

ในเวลากลางวัน และอุณหภูมิผิวหนังภายในของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะสูงกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 2 – 3 องศาเซลเซียส ในเวลากลางคืนซึ่งเป็นช่วงที่มีการปรับอากาศ เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการคายพลังงานสู่สิ่งแวดล้อมในเวลากลางคืน นอกจากนี้ผลการทดลองในห้องที่มีการปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมงพบว่าผิวหนังภายในของ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 8 -9 องศาเซลเซียสในเวลา กลางวัน และในเวลากลางคืนมีอุณหภูมิสูงกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 1 – 2 องศาเซลเซียส เนื่องจากการคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อม และภายในห้องปรับอากาศ

ดังนั้นการใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอาคารควรมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกับอุณหภูมิสภาพแวดล้อมในเวลากลางคืนเพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะสามารถคายความร้อนคืนสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ และควรใช้งานในอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน หรือตลอดวันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ

คำสำคัญ: สารเปลี่ยนสถานะ, การเก็บพลังงานความร้อน, พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

Thesis Title	THE EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL BEHAVIOR WITH PHASE CHANGE MATERIAL THERMAL SHIELD (PCMTS) INSIDE LIGHTWEIGHT WALL DURING THE DAYTIME
Author	Miss Pearpran Wattanavichien
Degree	Master of Architecture
Major Field/Faculty/University	Architecture Architecture and Planning Thammasat University
Thesis Advisor	Assist. Prof. Sudaporn Sudprasert, Ph.D.
Academic Years	2015

ABSTRACT

Thermal protection by using Phase Change Materials is an approach to absorb solar heat in the daytime. The transformation from solid to liquid at a constant temperature help reduce heat entering the building. During the night time, the ambient temperature is lower than that of the phase change material. The material changes from liquid phase in to solid phase to work in the next cycles. This research studies heat transfer of the light-weight wall containing a phase change material in the daytime. Three types of phase change materials are SP26E, SP29Eu and SP31 with a melting temperature of 26, 29 and 31 °C, respectively. All experiments were carried out in a set-up air conditioning room using halogen lamps as solar heat source.

The first results, with an air conditioned operate between 8.00 a.m. – 20.00 p.m., showed that SP31 is an appropriate PCM to be used in the lightweight wall under daytime air conditioned room. This is because it maintains constant interior wall temperature during the daytime by absorbing solar heat gain into PCMTS and completely return to solid at night. Thus, the temperature of the interior wall temperature were found to reduce by 6 – 9 °C compared with a non-PCM lightweight wall.

The second results of the night time airconditioned room, operated between 18.00 p.m. – 7.00 a.m., showed that temperature of interior wall containing PCM were 5 – 6 °C lower than without PCM during daytime. However, the wall with PCM shows 2-7 °C higher during the night time compared with non-PCM lightweight wall since the PCM releases the heat to surrounding.

The third results of the 24 hours, air conditioned room showed that interior wall temperature of the PCM lightweight wall were 8 - 9 °C lower than that without PCM during the daytime. During night time, the wall with PCM were 1 – 2 °C higher compared with non-PCM wall due to the PCM release the storage heat to environment and to the air conditioned room.

Therefore, the appropriated PCM that could be used in the lightweight wall should has higher melting point than the environment temperature in the night time. In order to completely release stored heat to turn into solid phase, the PCM lightweight wall should be applied to either daytime air conditioned room or all day air conditioned room.

Keywords: Phase change material (PCM), Thermal energy Storage, Heat transfer

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความกรุณาอย่างยิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดาภรณ์ สุตประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่คอยสนับสนุนที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านวิชาการ ด้านวิทยานิพนธ์ ด้านคำปรึกษา อีกทั้งการอนุเคราะห์เครื่องมือสำหรับการทดลอง และให้ความเอาใจใส่เสมอมาทำวิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนกรุณาให้ ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ และให้คำปรึกษาตลอดการวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยฉบับนี้จนสามารถประสบความสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรสันต์ บุรณากาญจน์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนกรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนตรวจความถูกต้อง และรูปแบบการเขียนวิทยานิพนธ์ และแนะแนวทางแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ตลอดการทำวิจัยเพื่อเป็นแนวทางให้การทำวิจัยฉบับนี้จนประสบความสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาเขตสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลอง สิ่งอำนวยความสะดวก และอุปกรณ์ในการทำวิจัยตลอดการวิจัย งานวิจัยประสบความสำเร็จลุล่วง ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์วิชา AR 641 Building Technology Design Research ที่ให้คำให้คำแนะนำ สอบถามความคืบหน้าของวิทยานิพนธ์ และสนับสนุนในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของคณะที่คอยให้ข้อมูล และช่วยเหลือในการดำเนินงานเป็นอย่างดี ขอขอบคุณกัลยาณมิตรที่คอยให้ความปรึกษา และให้กำลังใจ

ขอขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ที่คอยให้การสนับสนุนค่าใช้จ่าย และค่าการศึกษา ช่วยรับฟังปัญหา ให้คำแนะนำ เป็นเพื่อนและเป็นพ่อแม่ที่ดี ตลอดจนเป็นกำลังใจสำคัญเสมอมาจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณต่อตนเองที่ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรค ในการลองผิดลอง ถูกที่จะเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ ยอมรับข้อผิดพลาด และแก้ไขความผิดพลาด ตลอดจนคิดบวก เชื่อมมัน และเคารพต่องานวิจัยของตนเองตั้งแต่เริ่มต้น จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงในที่สุด ผู้วิจัยหวังว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวงการสถาปัตยกรรมไม่มากนักน้อย

นางสาวแพรวพรรณ วัฒนวิเชียร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ระเบียบการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 กรอบการวิจัย	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	5
2.1.1 การนำความร้อน	5
2.1.2 การแพร่กระจายความร้อน	7
2.1.3 การพาความร้อน	8

2.1.3.1 การพาความร้อนแบบอิสระ	8
2.1.3.2 การพาความร้อนแบบบังคับ	9
2.1.4 การแผ่รังสี	9
2.1.5 การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น	10
2.1.5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบอนุกรม	11
2.1.5.2 การถ่ายเทความร้อนแบบขนาน	12
2.2 ทฤษฎีสารเปลี่ยนสถานะ	13
2.2.1 ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ	14
2.2.1.1 สารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์	14
2.2.1.2 สารเปลี่ยนสถานะประเภทอินทรีย์	14
2.2.2 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ	15
2.2.2.1 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับแมคโครแคปซูลเล็ต	16
2.2.2.2 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับไมโครแคปซูลเล็ต	16
2.2.3 การนำสารเปลี่ยนสถานะประยุกต์ใช้ในการใช้งาน	17
2.2.3.1 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในสถาปัตยกรรม	17
2.2.3.2 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการขนส่งและบรรจุภัณฑ์	18
2.2.3.3 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการทำความเย็น	18
2.2.3.4 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการผลิตน้ำร้อน	18
2.2.3.2 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในเครื่องนึ่งนม	18
2.2.4 การคำนวณเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมของสารเปลี่ยนสถานะ	19
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
2.3.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังแบบแมคโครแคปซูลเล็ต	21
2.3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังแบบไมโครแคปซูลเล็ต	24
2.3.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังในพื้นที่	25
2.3.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังในหลังคา	26
บทที่ 3 ระเบียบการวิจัย	35
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	35
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย	37
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	38

3.4	ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	41
3.4.1	การทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	41
3.4.1.1	การทดสอบความน่าเชื่อถือของหัตถ์วัดอุณหภูมิ	41
3.4.1.2	การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	41
3.4.2	การตรวจสอบคุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการวิจัย	41
3.4.3	การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ	45
3.4.4	อาคารทดลอง และผนังทดลองที่ใช้ในการทดสอบวัสดุผนัง	47
3.4.4.1	สถานที่ทดลอง	47
3.4.4.2	ผนังทดลอง	47
3.4.4.2	ห้องทดลอง	48
3.5	ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	51
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	54
4.1	การทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูล	54
4.1.1	การทดสอบความน่าเชื่อถือของหัตถ์วัดอุณหภูมิ	54
4.1.2	การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลองรังสีดวงอาทิตย์	54
4.2	การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	56
4.3	การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E โดยมีจุดหลอมเหลว 25 – 27 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศเวลาในกลางวัน	59
4.4	การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu โดยมีจุดหลอมเหลว 29 – 30 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	65
4.5	การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 โดยมีจุดหลอมเหลว 30 – 33 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	71

4.6 การเปรียบเทียบผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ	77
ณ อุณหภูมิจุดหลอมเหลวต่าง ๆ ในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศ	79
ในเวลากลางคืน	
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศ	85
24 ชั่วโมง	
บทที่ 7 เปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้อง	91
ที่มีการปรับอากาศแบบต่าง ๆ	
บทที่ 8 การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของผนัง	92
8.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะ	94
ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ	
ในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	
8.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะ	95
SP31 และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในกรณีที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน ปรับ	
อากาศในเวลากลางคืน และปรับอากาศตลอดทั้งวัน	
บทที่ 9 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	96
9.1 บทสรุป	96
9.1.1 พฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะต่อการถ่ายเทความร้อนของผิวผนังภายใน	96
9.1.2 อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่ออุณหภูมิของผิว	96
ผนังภายใน	
9.1.3 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลา	97
กลางวัน	
9.1.4 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลา	97
กลางคืน	

	(10)
9.1.5 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศตลอด ทั้งวัน	97
9.2 ข้อเสนอแนะ	98
9.3 แนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม	99
รายการอ้างอิง	101
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	112
ภาคผนวก ข	114
ภาคผนวก ค	130
ประวัติผู้เขียน	132



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการแพร่กระจายความร้อนของสารบางชนิด	8
2.2 การพิจารณาสารเปลี่ยนสถานะโดยพิจารณาจากสารเปลี่ยนสถานะ จุดหลอมเหลวของ สารเปลี่ยนสถานะ และค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ	15
2.3 สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	29
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย	37
3.2 คุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลอง	43
3.3 น้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะในผนังทดลอง	46
3.4 การวิจัยช่วงที่ 3 การวิจัยเพื่อการประยุกต์	52
ก.1 การตรวจความเที่ยงตรงของห้วงวัดอุณหภูมิ	112
ข.1 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รวมรายชั่วโมงเฉลี่ย design day ของกรุงเทพมหานคร	115
ข.2 ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รวมรายชั่วโมงเฉลี่ย monthly average ของกรุงเทพ มหานคร	122

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 สัดส่วนความร้อนจากกรอบอาคาร (ซ้าย) และสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าในอาคารแยกตาม เครื่องใช้ไฟฟ้า (ขวา)	1
1.2 การเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละปี (บน) ความต้องการใช้ไฟฟ้าในเวลากลางวัน (ล่าง)	2
1.3 กรอบการวิจัย	4
2.1 กลไกการนำความร้อนในสารที่ต่างสถานะกัน	7
2.2 การถ่ายเทความร้อนแบบอนุกรม	11
2.3 การถ่ายเทความร้อนแบบขนาน	12
2.4 การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ	13
2.5 การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะในแคปซูล	15
2.6 การบรรจุสารแบบแมโครแคปซูลเลต	16
2.7 การบรรจุสารแบบไมโครแคปซูลเลต	17
2.8 ผลผลิตของสารเปลี่ยนสถานะในระบบฝ้า	17
2.9 อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืน และเวลากลางวัน	20
2.10 พฤติกรรมของการรับพลังงานในช่วงหลอมละลาย และพฤติกรรมการคายพลังงานใน ช่วงแข็งตัว	20
2.11 ตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะในผนัง 3 แบบ โดยมีความสูงที่แตกต่างกัน	21
2.12 แผ่น PCM thermal shield (PCMTS) และรูปแบบการวางสารเปลี่ยนสถานะ	22
2.13 ตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะ ณ ตำแหน่งต่างๆ โดย (a) คือผนังที่ไม่มีสาร เปลี่ยนสถานะ (b) คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะติดกับผนังด้านในกล่องทดลอง (c) คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะตรงกลางผนัง และ (d) คือผนังที่มีสารเปลี่ยน สถานะติดกับด้านนอก	23
2.14 สรุปการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมโครแคปซูลเลตที่ใช้ในการวิจัยส่วนใหญ่	24
2.15 การทดลองผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะในระบบปิด	25
2.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตกลาง	26
2.17 หลังคาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ	26
2.18 หลังคาคอนกรีตที่มีสารเปลี่ยนสถานะโดยบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในลักษณะเป็นหลุม	27

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 แผนผังการวิจัย	36
3.2 ดวงโคมจำลองแหล่งพลังงานของแสงอาทิตย์ ขนาด 18.5 x 19 x 14.5 เซนติเมตร กำลังไฟ 500 วัตต์ รุ่น QVF 135 Hallolite ยี่ห้อ Phillips	38
3.3 เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์	38
3.4 สารเปลี่ยนสถานะ	38
3.5 ถุงพลาสติกบรรจุสารเปลี่ยนสถานะขนาด 10.8 x 5 เซนติเมตร	39
3.6 เครื่องบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ รุ่น VM 300 TE/A ยี่ห้อ Packing Machine	39
3.7 เครื่องผลิตบรรจุภัณฑ์ รุ่น PFS-300 ยี่ห้อ Champ, AMCI Product	39
3.8 โครงแม่แบบบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ	39
3.9 โครงคร่ำผนังทดลอง และโครงผนังทดลอง	40
3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น FG-60 KAL	40
3.11 สารเปลี่ยนสถานะ SP26Eu (ซ้าย) SP29E (กลาง) และ SP31 (ขวา)	43
3.12 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบไม่มีสุญญากาศ (ซ้าย) และการบรรจุสารเปลี่ยน สถานะแบบสุญญากาศ (ขวา)	45
3.13 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในแม่แบบ	45
3.14 การทำบรรจุภัณฑ์ให้เป็นสุญญากาศ	45
3.15 การชั่งน้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะหลังจากการบรรจุแบบสุญญากาศ	46
3.16 สารเปลี่ยนสถานะหลังจากบรรจุสุญญากาศในช่องแช่แข็งอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส	46
3.17 ศูนย์เชื้อเพลิงพลังงานจากชีวมวล	47
3.18 การประกอบผนังทดลอง	47
3.19 ส่วนประกอบของผนังทดลอง	48
3.20 ห้องทดลองก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง	48
3.21 ห้องทดลอง	49
3.22 การตั้งกล้องบันทึกภาพ	49
3.23 ภาพห้องทดลองภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง ด้านนอก (ซ้าย) และด้านใน (ขวา)	50
3.24 รูปด้านผนังทดลอง รูปตัดผนังทดลอง (บน) และรูปผังห้องทดลอง (ล่าง)	50
3.25 จุดวัดอุณหภูมิของการทดลองผนังทดลอง	53
3.26 การบันทึกภาพวิถีทัศนในการทดลอง	53

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.1 ตำแหน่งวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กับผนังจำลอง	55
4.2 วิธีการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กับผนังทดลอง	55
4.3 การจัดระยะดวงโคมไม่ให้แสงจากดวงโคมรบกวนกัน	55
4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีช่องว่างอากาศ 5 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 6.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	57
4.5 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีช่องว่างอากาศ 5 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 6.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	58
4.6 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูล เมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. – 16 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 6.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	60
4.7 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E วันที่ 14 – 15 กุมภาพันธ์ 2559	61
4.8 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E วันที่ 15 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	62
4.9 จุดวัดอุณหภูมิที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	63
4.10 จุดวัดอุณหภูมิที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	63
4.11 จุดวัดอุณหภูมิที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	64
4.12 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ที่บรรจุในผนังเบา ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 เมื่อพิจารณาวันที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	64
4.13 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูล เมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. – 16 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 6.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	66

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.14 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu วันที่ 14 – 15 กุมภาพันธ์ 2559	67
4.15 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu วันที่ 15 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	68
4.16 จุดวัดอุณหภูมิที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	69
4.17 จุดวัดอุณหภูมิที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	69
4.18 จุดวัดอุณหภูมิที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	70
4.19 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ที่บรรจุในผนังเบา ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 เมื่อพิจารณาวันที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 – 16 กุมภาพันธ์ 2559	70
4.20 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูล เมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 6.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์	72
4.21 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 วันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	73
4.22 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 วันที่ 12 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	74
4.23 จุดวัดอุณหภูมิที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	75
4.24 จุดวัดอุณหภูมิที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	75
4.25 จุดวัดอุณหภูมิที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	76

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.26 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ที่บรรจุในผนังเบา ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 เมื่อพิจารณาวันที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 – 13 กุมภาพันธ์ 2559	76
4.27 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E SP29Eu และ SP31 เปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ	77
5.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 26 -28 มีนาคม 2559	80
5.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 26 -27 มีนาคม 2559	81
5.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 27 -28 มีนาคม 2559	82
5.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 26 -28 มีนาคม 2559	83
5.5 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 3 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 26 -28 มีนาคม 2559	83
5.6 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 26 -28 มีนาคม 2559	84
5.7 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 3 และ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 – 7.00 น. วันที่ 27 -28 มีนาคม 2559	84
6.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559	86
6.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 19 มีนาคม 2559	87
6.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 19 - 20 มีนาคม 2559	88
6.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559	89

สารบัญญภาพ

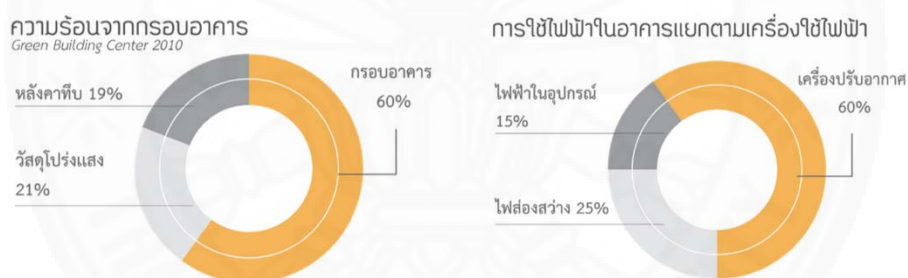
ภาพที่	หน้า
6.5 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 3 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559	89
6.6 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559	90
6.7 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 3 และ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 19 - 20 มีนาคม 2559	90
7.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องปรับอากาศรูปแบบต่าง ๆ กับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ	91
8.1 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26 SP29Eu และ SP31 กับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน	94
8.2 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 กับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบในห้องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวัน ปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางคืน และปรับอากาศ 24 ชั่วโมง	95
9.1 รูปแบบแนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในเวลากลางวัน	100
9.2 รูปแบบแนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม และพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในเวลากลางคืน	100
ค.1 ตำแหน่งจุดวัดค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของผนังทดลอง	130
ค.2 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 500 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่าง 66 เซนติเมตร	131
ค.3 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 750 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่าง 56 เซนติเมตร	131
ค.4 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 1,000 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่าง 35 เซนติเมตร	131

บทที่ 1

บทนำ

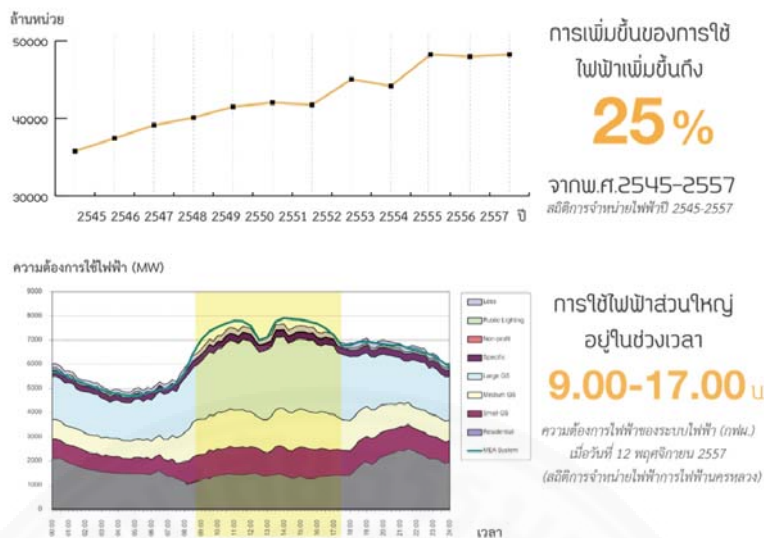
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ผนังอาคารมีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นในอาคาร โดยผนังอาคารดูดซับพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งไว้ในลักษณะของความร้อนสัมผัส (sensible heat) ทำให้วัสดุผนังมีอุณหภูมิสูงขึ้น และถ่ายเทความร้อนไปยังอากาศภายในอาคารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เกิดเป็นภาระการทำความเย็นของอาคารที่มีปริมาณขึ้นลงตามปริมาณกำลังแสงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละวัน (ชลทิศ เอี่ยมวรอุตม์กุล, 2550) เนื่องจากสัดส่วนของพลังงานความร้อนเข้าสู่กรอบอาคารพบว่า ผนังทึบของอาคารมีส่วนในการส่งผ่านเข้ามาของความร้อนในอาคารมากที่สุดร้อยละ 60 รองลงมา คือ กระจกโปร่งแสงร้อยละ 21 และหลังคาร้อยละ 19 (กระทรวงพลังงาน, 2553) ดังนั้นผนังอาคารมีผลต่อภาระการทำความเย็นในระบบปรับอากาศ ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 สัดส่วนความร้อนจากกรอบอาคาร (ซ้าย) และสัดส่วนการใช้ไฟฟ้าในอาคารแยกตามเครื่องใช้ไฟฟ้า (ขวา), โดย กระทรวงพลังงาน, 2553. (ดัดแปลง)

จากสถิติการจำหน่ายไฟฟ้ารวมของการไฟฟ้านครหลวงพบว่า มีการเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าตั้งแต่ปี 2545 – 2557 ถึงร้อยละ 25 โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าทุกปี ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีการใช้งานมากที่สุดคือระบบปรับอากาศมีการใช้งานร้อยละ 60 ของการใช้งานในอาคาร รองลงมาคือ ไฟฟ้าส่องสว่างร้อยละ 20 และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าร้อยละ 15 โดยสถิติการใช้ไฟฟ้าของผู้ใช้งาน ส่วนใหญ่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุดช่วงเช้าถึงบ่ายตั้งแต่เวลา 9.00 – 16.00 น. (การใช้ไฟฟ้านครหลวง, 2558) ดังภาพที่ 1.2 ดังนั้นหากมีการลดการใช้พลังงานการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังจะสามารถลดการใช้พลังงานในอาคารในเวลากลางวันได้



ภาพที่ 1.2 การเพิ่มขึ้นของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละปี (บน) และความต้องการในการใช้ไฟฟ้าในแต่ละวัน (ล่าง), โดย กระทรวงพลังงาน, 2553. (ดัดแปลง)

ปัจจุบันการลดความร้อนเข้าสู่ผนังโดยการใช้โครงสร้างมีหลายรูปแบบ ได้แก่ การใช้ผนังที่มีมวลอุณหภูมิมาก (thermal mass) การใช้ช่องอากาศในผนัง (air gap) การใช้ฉนวนกันความร้อน (insulation) และ การใช้สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material) โดยการศึกษาการลดความร้อนเข้าสู่อาคารในเวลากลางวันพบว่า การใช้ และศึกษาสารเปลี่ยนสถานะในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งมีภูมิอากาศแบบร้อนชื้นยังไม่แพร่หลาย แต่พบว่ามีการศึกษา และวิจัยในภูมิภาคต่าง ๆ เช่น ภูมิภาคอากาศแห้งแล้ง ภูมิภาคอากาศอบอุ่น ภูมิภาคอากาศหนาวเย็น เป็นต้น โดยข้อดีของการใช้สารเปลี่ยนสถานะ คือ เพื่อเพิ่มมวลอุณหภูมิกักเก็บวัสดุที่มีมวลอุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถลดความร้อนเข้าสู่ผนัง เพราะความร้อนบางส่วนถูกใช้ในสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้ความร้อนผ่านกรอบอาคารมีน้อยลง (สิริรัช อัสวโกสิย์, 2551) ส่งผลให้ภาระการทำความเย็นในอาคารน้อยลง

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจการศึกษาค่าการใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอาคาร เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ และพัฒนาอาคารที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบ และการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในอาคารภายใต้ภูมิอากาศแบบร้อนชื้นในเวลากลางวัน

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษา และวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบ
- 1.2.2 ศึกษา และวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point) ของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่ออุณหภูมิของผนังภายใน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในผนังอาคารสามารถช่วยลดอุณหภูมิผนังอาคารในช่วงเวลากลางวัน โดยเพิ่มมวลอุณหภาพให้กับวัสดุที่มีมวลอุณหภาพน้อย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะโดยการทดลองในห้องควบคุมในเวลากลางวัน

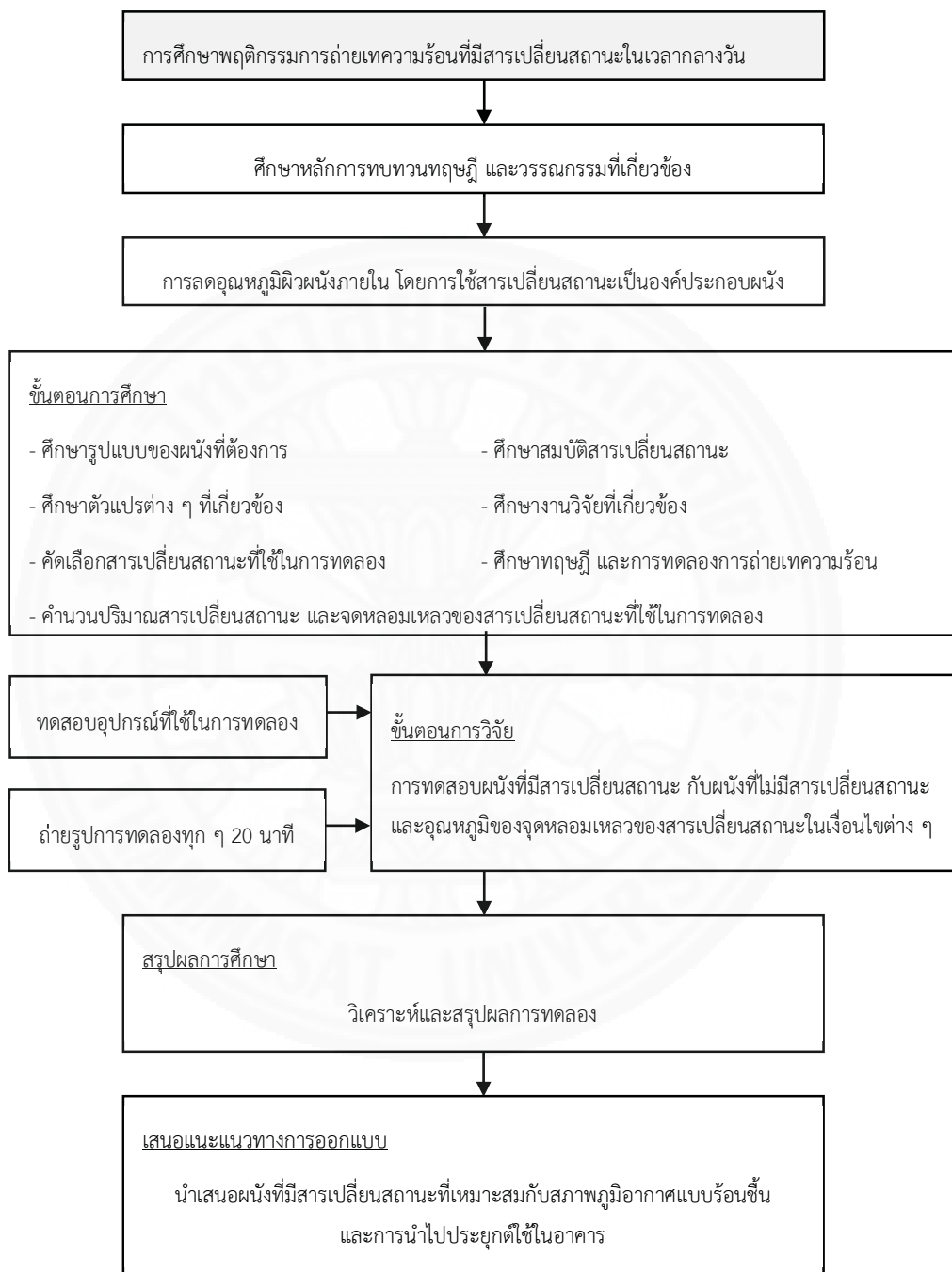
1.5 ระเบียบการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง ในการวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบชนิดต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนสถานะ การบรรจุสาร และองค์ประกอบของผนัง จากการทบทวนวรรณกรรม และทำการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละรูปแบบ เพื่อนำไปศึกษาต่อในเชิงลึกเพื่อให้ได้มาซึ่งตัวแปร และปัจจัยที่มีผลต่อการพัฒนาผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น จากนั้นจึงจัดสร้างผนังทดสอบเพื่อทำการทดลองในห้องโดยทำการจำลองค่าพลังงานจากดวงอาทิตย์ด้วยดวงโคมฮาโลเจน โดยการวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (1) ช่วงการทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (2) การทดลองผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ได้แก่ SP26E SP29Eu และ SP31 โดยผนังทดลองเป็นแบบระบบปิด และทดลองในห้องปรับอากาศเวลา 8.00-20.00 น. และ (3) การทดลองเพื่อการประยุกต์ใช้ โดยแบ่งการทดลองเป็นห้องปรับอากาศที่มีการปรับอากาศที่แตกต่างกัน ได้แก่ การปรับอากาศตั้งแต่ เวลา 8.00 – 20.00 น. การปรับอากาศตั้งแต่เวลา 18.00 น. – 7.00 น. และการปรับอากาศ 24 ชั่วโมง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ทราบถึงอุณหภูมิผิวผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมในการใช้สารเปลี่ยนสถานะ
- 1.6.2 ทราบถึงความสามารถในการลดอุณหภูมิผนังภายในเมื่อใช้สารเปลี่ยนสถานะในการใช้งานในอาคารช่วงเวลากลางวันภายใต้สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น
- 1.6.3 ทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังที่ใช้สารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมกับห้องปรับอากาศเมื่อมีการปรับอากาศในเวลาที่แตกต่างกัน
- 1.6.4 เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะกับการใช้งานในอาคารช่วงเวลากลางวันภายใต้สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น

1.7 กรอบวิจัย



ภาพที่ 1.3: กรอบวิจัย, จัดทำโดย ผู้วิจัย เมื่อ 25 พฤษภาคม 2558.

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบไปด้วย

2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (heat transfer)

การถ่ายเทความร้อน คือ การเคลื่อนที่ของพลังงาน หรือการส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือเกรเดียนต์อุณหภูมิ (temperature gradient) ดังนั้นเมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในตัวกลาง หรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดขึ้นได้ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลางที่อยู่นิ่งเกิดขึ้นได้ในรูปแบบต่าง ๆ อาทิ การนำความร้อน (conduction) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อน (convection) จะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว และของไหลที่เคลื่อนที่เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) จะเป็นการที่ทุกพื้นที่ผิวที่มีอุณหภูมิหนึ่งจะปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ดังนั้นในสภาวะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้น เนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้

นอกจากนี้การส่งผ่านพลังงานความร้อนก็อาจเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากแบบต่าง ๆ ข้างต้นรวมกันก็ได้ การถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Q) มีหน่วยเป็น Watt/m^2 นอกจากนี้ชนิดของการถ่ายเทความร้อน โดยการยึดเวลาเป็นสำคัญแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- สถานะคงตัว (steady state)
คือ สมบัติของระบบไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อุณหภูมิของระบบจะคงที่ แม้ว่าเวลาจะเปลี่ยนแปลงไปแต่อาจแตกต่างกันเมื่อตำแหน่งเปลี่ยนแปลง
- สถานะไม่คงตัว (unsteady-state)
คือสมบัติของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป

2.1.1 การนำความร้อน (heat conduction)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทพลังงานระดับโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลได้รับพลังงานความร้อนโมเลกุลจะเกิดการสั่น พลังงานจากการสั่นนี้จะส่งผ่านจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งโดยไม่ต้องมีการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งมักเกิดในของแข็งหรือของเหลวที่มี

ความชันหนืดมาก ๆ เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิสามารถเกิดได้ทั้งในของแข็ง ของเหลว และแก๊ส เนื่องจากมีการไหลหมุนเวียนเกิดขึ้นในของเหลวและแก๊ส แต่สำหรับในของแข็งทึบแสงจะไม่มีไหลเวียน ภายใต้วงศ์จะมีแต่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำเพียงอย่างเดียว สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบมิตติเดียวจะเป็นไปตามกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier's law) คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นสัดส่วนกับค่าเกรเดียนท์อุณหภูมิ หรือความลาดชันของอุณหภูมิ (temperature gradient) dT/dx คูณกับพื้นที่ (A) ที่ความร้อนไหลผ่าน ดังสมการ (1) และ (2)

$$\text{rate of conduction} \propto \frac{(\text{area})(dT)}{\text{Thickness}} \quad (1)$$

$$q_{\text{conduction}} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

ความสามารถในการนำความร้อนของสาร วัดด้วยปริมาณที่เรียกว่า ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) หรือใช้ตัวอักษรย่อว่า k ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่มีความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน อัตราการนำความร้อนแบบมิตติเดียวสำหรับสารตัวกลางที่มีเนื้อเดียวกัน (homogeneous isotropic) จึงมีค่าดังสมการ (3)

$$q_{\text{conduction}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

เมื่อ q_{cond} = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน
ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ตามทิศทางในแนวแกน x (Watt, W)

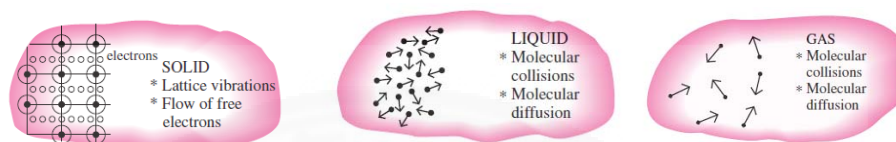
A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)

T = อุณหภูมิ (K) และ dT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

X = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อนคือระยะทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m) และ

dx = ระยะทางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน (m)

เครื่องหมายลบที่อยู่ทางขวามือของสมการเป็นผลเนื่องจากกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิจะต้องลดลงเมื่อระยะทาง X เพิ่มมากขึ้นกลไกในการนำความร้อนของสารจะแตกต่างกันตามสถานะของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กลไกการนำความร้อนในสารที่ต่างสถานะกัน, โดย Yunus A. Cengel, 2011.

2.1.2 การแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity, α)

การแพร่กระจายความร้อน คือ ผลคูณระหว่างค่าความจุความร้อน (C_p , heat capacity) ของวัสดุ ซึ่งทั้งค่าความร้อนจำเพาะ (C_p , specific heat) และค่าความจุความร้อนต่างหมายถึงความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนของวัสดุ โดยค่าความร้อนของวัสดุ คือ ค่าความจุความร้อนต่อหน่วยมวล ขณะที่ค่าความจุความร้อนจำเพาะ คือ ค่าความจุความร้อนต่อหน่วยปริมาตร

การแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity) เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาพิจารณาในกรณีของการนำความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (transient heat conduction) ค่าการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusivity) เป็นคุณสมบัติที่แสดงให้เห็นว่าความร้อนจะแพร่กระจายสะสมได้ทั่วเนื้อของวัสดุช้า หรือเร็วอย่างไรซึ่งกำหนดให้ ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\text{thermal diffusivity, } \alpha = \frac{\text{heat conducted}}{\text{heat store}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad m^2/s \quad (4)$$

หากวัสดุมีการแพร่กระจายความร้อนมาก แสดงว่าความร้อนจะกระจายไปสะสมในส่วนต่างๆของเนื้อวัสดุได้เร็ว เช่น คอนกรีตมีการแพร่กระจายความร้อนสูงกว่าน้ำ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

ค่าการแพร่กระจายความร้อนของสารบางชนิด

Material	α , m ² /s*
Silver	149×10^{-6}
Gold	127×10^{-6}
Copper	113×10^{-6}
Aluminum	97.5×10^{-6}
Iron	22.8×10^{-6}
Mercury (l)	4.7×10^{-6}
Marble	1.2×10^{-6}
Ice	1.2×10^{-6}
Concrete	0.75×10^{-6}
Brick	0.52×10^{-6}
Heavy soil (dry)	0.52×10^{-6}
Glass	0.34×10^{-6}
Glass wool	0.23×10^{-6}
Water (l)	0.14×10^{-6}
Beef	0.14×10^{-6}
Wood (oak)	0.13×10^{-6}

*Multiply by 10.76 to convert to ft²/s.

หมายเหตุ. จาก Yunus A. Cengel, 2011.

2.1.3. การพาความร้อน (heat convection)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล (liquid or gas) ผ่านผิววัตถุของแข็ง โดยในระบบมีเกรเดียนท์อุณหภูมิเกิดขึ้น เช่น การแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อ โดยการถ่ายเทความร้อนโดยการพา แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.1.3.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection)

การพาความร้อนแบบอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใด ๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่ได้จากแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

2.1.3.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection)

การพาความร้อนแบบบังคับ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็ง และของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็งโดยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน โดยการพาความร้อนนั้นต้องพิจารณาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหล เป็นต้น โดยสมการสำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$q = h (T_h - T_c) \quad (5)$$

โดยที่

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient)

มีหน่วยเป็น $W/m^2 K$ ในระบบ SI

q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล

T_h คือ อุณหภูมิที่ร้อนกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)

และ T_c คือ อุณหภูมิที่เย็นกว่า (ของของไหล หรือพื้นผิวของของแข็ง)

2.1.4. การแผ่รังสี (radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน ซึ่งวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส พลังงานของสนามการแผ่รังสีมีการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือโฟตอน (photons) ในขณะที่การถ่ายเทพลังงาน การนำ หรือการพาความร้อนจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทการถ่ายเท ซึ่งการแผ่รังสีไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ และจะเกิดการถ่ายเทความร้อน ได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ การแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุโดยทั่ว ๆ ไปที่มีอุณหภูมิ (T) และพื้นที่ (A) จะเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$Q_r = \delta \varepsilon A T^4 \quad (6)$$

โดยที่ δ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (stefan-boltzmann constant) มีค่าคือ
($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

ε = ค่าการแผ่รังสี (emissivity) คือ คุณสมบัติทางการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ

นอกจากนี้การคำนวณหาอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแผ่รังสีระหว่างวัสดุสองชิ้นที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างวัตถุเล็กที่มีพื้นที่ผิว (A) และค่าการแผ่รังสีความร้อนกับวัตถุใหญ่ ซึ่งครอบคลุมวัตถุเล็กอยู่ โดยที่วัตถุเล็กมีอุณหภูมิ (T_h) และวัตถุใหญ่มีอุณหภูมิ (T_c) สามารถเขียนอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิของวัตถุทั้งสองได้ ดังสมการที่ (7)

$$Q_r = \delta \varepsilon A (T_h^4 - T_c^4) \quad (7)$$

โดยความร้อนที่ภาวะคงตัวในผนังราบ (steady heat conduction in plane walls) จากสมการสมดุลพลังงานทั่วไป เขียนได้ดังสมการที่ (8)

$$q_{in} - q_{out} + q_{gen} = dE_{wall} / dt \quad (8)$$

- สถานะคงตัว: $dE_{wall} / dt = 0$
- ทรานเซียน แต่ไม่มีปฏิกิริยาความร้อน $q_{gen} = 0$
- สถานะคงตัว และไม่มีการส่งผ่านความร้อน $q_{in} = q_{out} = q_{cond}$

2.1.5. การนำความร้อนผ่านผนังราบหลายชั้น (heat transfer through composite walls)

การถ่ายเทความร้อนทั้งแบบการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนรวมกันสามารถพิจารณาจากสภาวะการถ่ายเทความร้อน ซึ่งต้องทราบอุณหภูมิทั้งสองด้านของผนัง และต้องทราบสภาวะของการไหลของอากาศทั้งสองด้าน

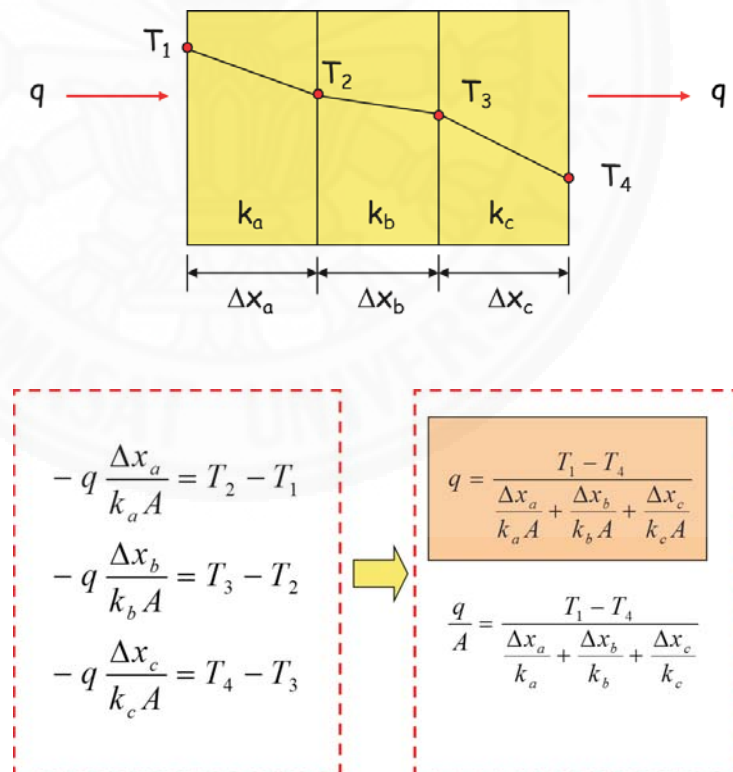
ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ได้แก่

- ความหนา และวัสดุที่ใช้ในการทำผนัง
- พื้นที่ทั้งหมดในการถ่ายเทความร้อน
- ความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศทั้งสองด้านของผนัง
- ปริมาณการเคลื่อนที่ของอากาศใกล้ ๆ กับพื้นผิวของผนัง

แบ่งการพิจารณาออกได้ตามกรณีเช่น

2.1.5.1 การถ่ายเทความร้อนแบบอนุกรม

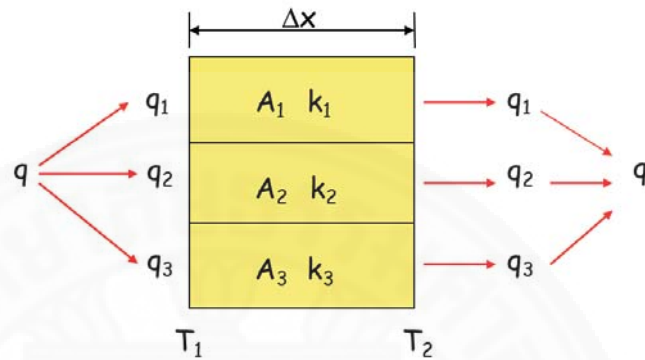
คือ ความร้อนไหลผ่านผนังที่ซ้อนอนุกรมกันหลายชั้น โดยการนำความร้อน ดังภาพที่ 2.2 เช่น ผนังของอาคารบ้านเรือนในกรณีที่มีสภาวะต่าง ๆ คงที่อัตราการความร้อนที่ผ่านแต่ละชั้นของผนังที่มีค่าเท่า ๆ กัน โดยที่ค่าความลาดชันของอุณหภูมิในผนังแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน ในกรณีนั้นอัตราการความร้อนที่ไหลผ่านผนังที่ซ้อนกันแบบอนุกรมในแต่ละชั้น



ภาพที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนแบบอนุกรม, โดย อรุมา วงศางาม (2553).

2.1.5.2 การถ่ายเทความร้อนแบบขนาน

คือ การนำความร้อนแบบมิติเดียวผ่านผนังราบหลายชั้นต่อแบบขนานความร้อนไหลผ่านวัตถุทั้งสองพร้อม ๆ กันในกรณีอัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง เป็นดังภาพที่ 2.3



$$q_1 = \frac{-k_1 A_1 (T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

$$q_2 = \frac{-k_2 A_2 (T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

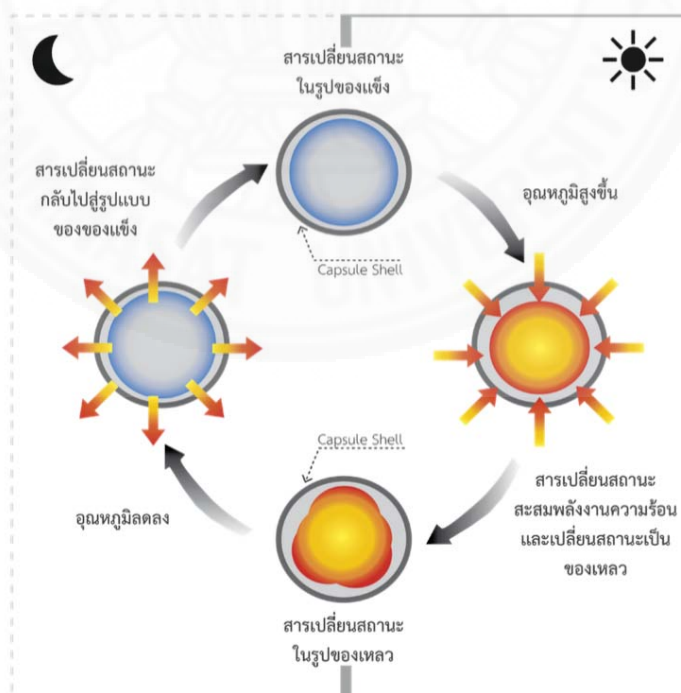
$$q_3 = \frac{-k_3 A_3 (T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

ภาพที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนแบบขนาน, โดย อรุมา วงศาางาม (2553).

2.2 สารเปลี่ยนสถานะ (phase change material)

สารเปลี่ยนสถานะ คือ วัสดุที่มีค่าความร้อนแฝงที่จุดหลอมเหลว (heat of fusion) และช่วงอุณหภูมิจุดหลอมเหลว (melting point temperature) ที่คงที่ ทำให้สามารถกักเก็บพลังงานหรือปลดปล่อยพลังงานได้ในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ การเปลี่ยนสถานะจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสะสมหรือปลดปล่อยพลังงานความร้อน เช่น การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (solid to liquid PCM) หรือเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ (liquid to gaseous PCM) ซึ่งจะใช้การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวมากกว่า เพราะเมื่อเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยกว่าการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซ

เนื่องจากสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะในด้านกักเก็บพลังงาน หรือปลดปล่อยพลังงานได้ในปริมาณมากในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ ทำให้มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะในโครงสร้างอาคาร ซึ่งทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในตอนกลางวัน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวทำให้ช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังภายในอาคารและลดภาระการทำความเย็นของอาคาร ในขณะเดียวกันในเวลากลางคืนอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกต่ำกว่าอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ ทำให้สารเปลี่ยนสถานะปลดปล่อยพลังงานความร้อน และกลับสู่สถานะของแข็งได้ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

2.2.1 ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ (classification of phase change material)

ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ สารเปลี่ยนสถานะประเภทอินทรีย์ (organic phase change material) และสารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ (inorganic material) โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.1.1 สารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ (inorganic phase change material)

สารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ คือ สารเปลี่ยนสถานะที่ไม่ได้มีสิ่งมีชีวิตเป็นองค์ประกอบ เช่น เกลือไฮเดรต (salt Hydrate) เกลือ (salt) โลหะ (metal) และโลหะผสม (alloy) ข้อดีของสารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ คือ มีค่าความร้อนแฝงสูงทำให้สามารถกักเก็บความร้อนได้มาก

ข้อเสีย คือ การคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะไม่ดีทำให้เกิดสภาวะแข็งตัวเร็ว (supercooling) และสภาวะแข็งตัวช้า (undercooling) จึงต้องเติมสารประเภทนิวเคลียส-อิก (nucleic) ผสมในสารเปลี่ยนสถานะประเภทอนินทรีย์ เพื่อช่วยให้เกิดการแข็งตัวดีขึ้น

2.2.1.2 สารเปลี่ยนสถานะประเภทอินทรีย์ (organic phase change material)

สารเปลี่ยนสถานะประเภทอินทรีย์ คือ สารเปลี่ยนสถานะที่มีสิ่งมีชีวิต เช่น พืช หรือ สัตว์ เป็นองค์ประกอบ เช่น ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) กรดไขมัน (fatty acid) พาราฟินผสมแกรไฟต์ (paraffin graphite) และโพลีแอลกอฮอล์ (polyalcohol) ข้อดีของสารประเภทอินทรีย์ คือ ไม่เกิดปัญหาในเรื่องของการคายความร้อน ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อนวัสดุหรือโครงสร้าง (non-corrosive) และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสีย คือ เกิดการติดไฟได้จึงต้องมีการทาวัดกันไฟ (infammability) และมีการนำความร้อนที่ต่ำ (low thermal conductivity) นอกจากนี้การพิจารณาในการเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเปลี่ยนสถานะจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ และค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ดังแสดงในตาราง ที่ 2.2

ตาราง 2.2

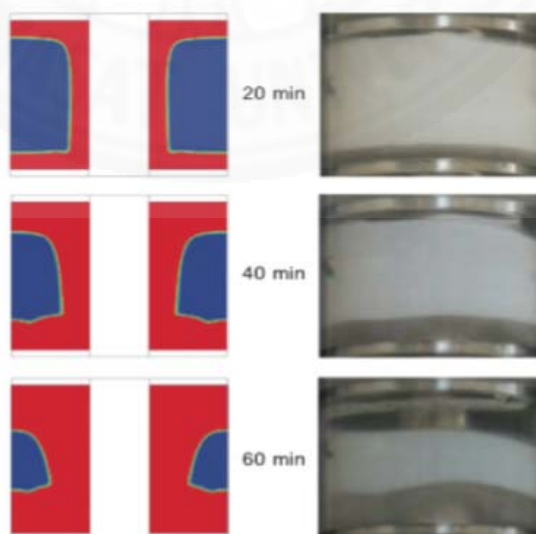
การพิจารณาสารเปลี่ยนสถานะบางชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ จุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ และค่าความจุความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ

Name	Type	Melting temperature	Heat of fusion (kJ/kg)	Density
RT20	Paraffin	20–22	172	0.87 (0.75)
RT26	Paraffin	24–28	131	0.88 (0.76)
RT27	Paraffin	26–28	179	0.87 (0.75)
ClimSel C 23	Salt hydrate	23	148	1.48
ClimSel C 24	Salt hydrate	24	216	1.48
Climsel C 32	Salt hydrate	32	212	–
STL 27	Salt hydrate	27	213	–
S27	Salt hydrate	27	207	–
E17	Salt hydrate	17	143	1.49
E19	Salt hydrate	19	146	1.48
E21	Salt hydrate	21	150	1.48
E30	Salt hydrate	30	201	1.3

หมายเหตุ. จาก V.A.A. Raj, 2010.

2.2.2 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ (capsule types)

สารเปลี่ยนสถานะจำเป็นต้องมีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ เมื่อมีการใช้งานเพื่อป้องกันการไหลหรือรั่วของสารเปลี่ยนสถานะเมื่อเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ดังภาพที่ 2.5 เพื่อป้องกันการกระแทกหรือทำปฏิกิริยากับวัสดุก่อสร้างซึ่งเรียกดัวยุทธว่าแคปซูล (capsule)

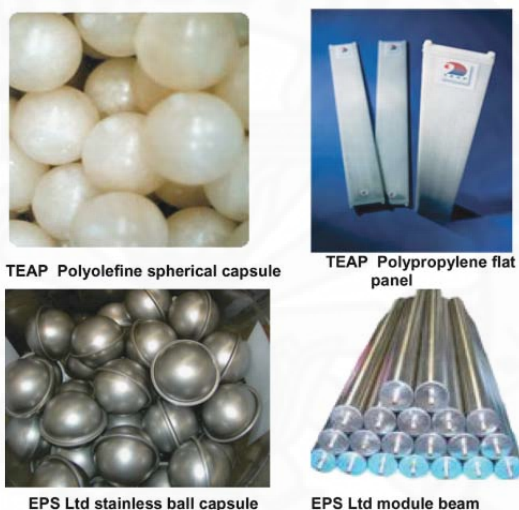


ภาพที่ 2.5 การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะในแคปซูล, โดย Joanne M. Bailey, 2010.

โดยการแบ่งประเภทของการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะประกอบด้วย 2 ประเภท โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.2.1 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับแมโครแคปซูลเลต (macrocapsulated)

วิธีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับแมโครแคปซูลเลต คือ การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ เช่น เหล็ก โฟม อลูมิเนียม ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 1 เซนติเมตรขึ้นไป ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การบรรจุสารแบบแมโครแคปซูลเลต, โดย Kenisarin, et.al, 2006.

ข้อดีของการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับแมโครแคปซูลเลต คือ การที่สามารถใส่สารเปลี่ยนสถานะได้ในปริมาณตามที่ต้องการใช้งาน สามารถสัมผัสแหล่งความร้อนได้โดยตรง สามารถใช้งาน และติดตั้งได้ง่าย ข้อเสีย คือ เมื่อเวลาเกิดการเปลี่ยนสถานะมีโอกาสยืดขยายหรือหดตัว ดังนั้นการบรรจุสารในระดับแมโครแคปซูลเลต จึงต้องมีการรองรับการยืด หรือหดตัวของสารเปลี่ยนสถานะ

2.2.2.2 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับไมโครแคปซูลเลต (microcapsulated)

วิธีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในระดับไมโครแคปซูลเลต คือ การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ในตัวบรรจุสารเปลี่ยนสถานะที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร หรือ 100 มิลลิเมตร ขึ้นไป สามารถทำได้โดยการฝังแคปซูล (encapsulated) การผสมโดยตรง (direct incorporation) และการจุ่มแช่ (immersion) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การบรรจุสารแบบไมโครแคปซูลเลต, โดย H. Mehling, et. al., 2009.

ข้อดี คือ สามารถผลิตเป็นชิ้นสำเร็จรูปเมื่อผสมกับวัสดุหล่อได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีตัวห่อหุ้ม เนื่องจากแทรกอยู่ในเนื้อวัสดุ ข้อเสีย คือ มีข้อจำกัดในเรื่องของภาระถ่ายเททางความร้อนตามที่ออกแบบไว้ ไม่มีความคล่องตัวในการใช้งาน ต้องอาศัยความชำนาญในการคำนวณและผสมมากกว่าแบบแรก และการผสมในวัสดุแต่ละประเภททำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง

2.2.3. การนำสารเปลี่ยนสถานะมาประยุกต์ใช้ในการใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานสารเปลี่ยนสถานะได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายด้านเนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนทำให้อุณหภูมิมีอุณหภูมิที่คงที่ โดยตัวอย่างการนำสารเปลี่ยนสถานะนำไปใช้งานชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในสถาปัตยกรรม

ในปัจจุบันได้มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะนำไปใช้ในอาคาร ได้แก่ ผนัง พื้น ฝ้า หลังคา ระบบ การผลิตน้ำร้อน และระบบการทำความเย็นในอาคาร ดังภาพที่ 2.8 ตัวอย่างอาคารที่ใช้สารเปลี่ยนสถานะในอาคาร เช่น อาคารศูนย์วิจัยพลังงานมาเลเซีย (Malaysian energy centre) ประเทศมาเลเซีย ได้ใช้สารเปลี่ยนสถานะในอาคารในส่วนของระบบปรับอากาศ โดยการเก็บความร้อนไว้ในสารเปลี่ยนสถานะในเวลากลางวันและระบายความร้อนในเวลากลางคืน



ภาพที่ 2.8 ผลิตภัณฑ์สารเปลี่ยนสถานะในระบบฝ้า, โดย H. Mehling, et. al., 2009.

นอกจากนี้ได้มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะในการสร้างบ้านของเดวิด อัลตันในรัฐยูทาห์ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทเกลือกลูเบอร์ (glauber) ที่มีจุดหลอมเหลวที่ 32.40 องศาเซลเซียส และมีค่าความร้อน 83 แคลลอรี่ต่อกรัม ถูกบรรจุในท่อเพื่อกันเก็บความร้อนในตอนกลางวันในตอนกลางคืน เมื่อเกลือเริ่มปล่อยความร้อนออกมากลับเป็นของแข็งจะปล่อยความร้อนออกมาเพื่อให้ความอบอุ่นในบ้านในฤดูหนาว

2.2.3.2 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการขนส่งและบรรจุภัณฑ์ (temperature controlled packaging and transport)

สารเปลี่ยนสถานะได้ถูกนำไปประยุกต์ในการขนส่งและบรรจุภัณฑ์ ได้แก่ การใช้สารเปลี่ยนสถานะในระบบขนส่งอาหาร ยารักษาโรค หรือในการขนส่งสินค้าเพื่อรักษาอุณหภูมิของวัตถุให้สม่ำเสมอ เช่น กล่อง บรรจุภัณฑ์ ที่มีสารเปลี่ยนสถานะอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 5 องศาเซลเซียส เพื่อการเก็บรักษาอาหารแช่แข็งชนิดต่างๆ โดยสามารถรักษาอุณหภูมิที่ 2-8 องศาเซลเซียส โดยสามารถเก็บรักษาอุณหภูมิได้นาน 2 วัน หรือ 48 ชั่วโมง

2.2.3.3 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการทำความเย็น (passive cooling)

สารเปลี่ยนสถานะได้ถูกนำไปประยุกต์ในการทำความเย็น โดยได้นำไปใช้ในการระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การใช้สารเปลี่ยนสถานะในการรักษาอุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในระบบโทรคมนาคม การนำไปใช้ลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ เพื่อให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพขึ้น (electronic cooling) การนำไปใช้ในที่พักเพื่อควบคุมอุณหภูมิในเขตอากาศร้อน (shelter passive cooling) และ การนำสารเปลี่ยนสถานะเพื่อนำไปลดอุณหภูมิในระบบแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (electronic back-up cooling) เป็นต้น

2.2.3.4 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในการผลิตน้ำร้อน (solar heating and heat recovery)

2.2.3.5 การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะในเครื่องนุ่งห่ม (cooling vest)

สารเปลี่ยนสถานะได้ถูกนำไปประยุกต์ในเครื่องนุ่งห่ม ในการทำความเย็นให้กับผู้สวมใส่ เช่น เสื้อทำความเย็นของบริษัทกุลเวส และบริษัทเคมี เทค โดยเสื้อทำความเย็นได้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะด้านในเพื่อทำหน้าที่ดูดซับความร้อน และให้ความเย็นกับผู้ใช้งานซึ่งมีการจัดจำหน่ายในหลาย ๆ ช่วงอุณหภูมิรวมถึงระยะเวลาที่ใช้งานอีกด้วย

2.2.4. การคำนวณเลือกอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ

การคำนวณเลือกอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะให้เหมาะกับสภาพแวดล้อม โดยสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิของภายในห้องในเวลากลางวันและกลางคืน ดังภาพที่ 2.9 และพลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์ที่สะสมในแต่ละวัน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการนำเสนอโดย Peippo (Beatens, et. al., 2010) ดังสมการที่ 9 และ 10 ดังต่อไปนี้

$$T_{pcm, opt} = T_i + (Q_{store} / t_{store} h) \quad (9)$$

$$\text{เมื่อ } T_i = (t_d T_{i,d} + T_n T_{i,n}) / (T_d + T_n) \quad (10)$$

โดย

$T_{pcm, opt}$ คือ อุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม

$T_{i,d}$ คือ อุณหภูมิในเวลากลางวัน

$T_{i,n}$ คือ อุณหภูมิในเวลากลางคืน

Q_{store} คือ พลังงานความร้อนที่สะสมต่อหน่วยพื้นที่

t_{store} คือ ระยะเวลาที่ความร้อนที่สะสม

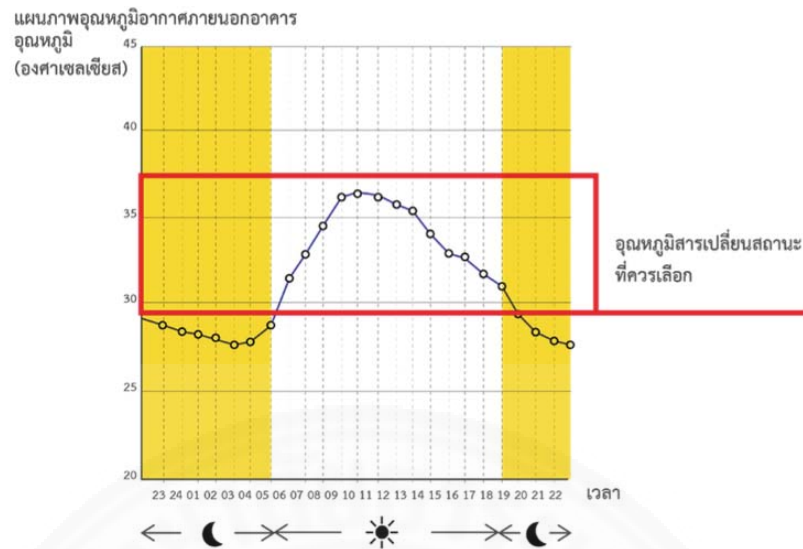
Q_{store} คือ พลังงานความร้อนที่สะสมต่อหน่วยพื้นที่

T_i คือ อุณหภูมิห้อง

t_d คือ ระยะเวลากลางวัน

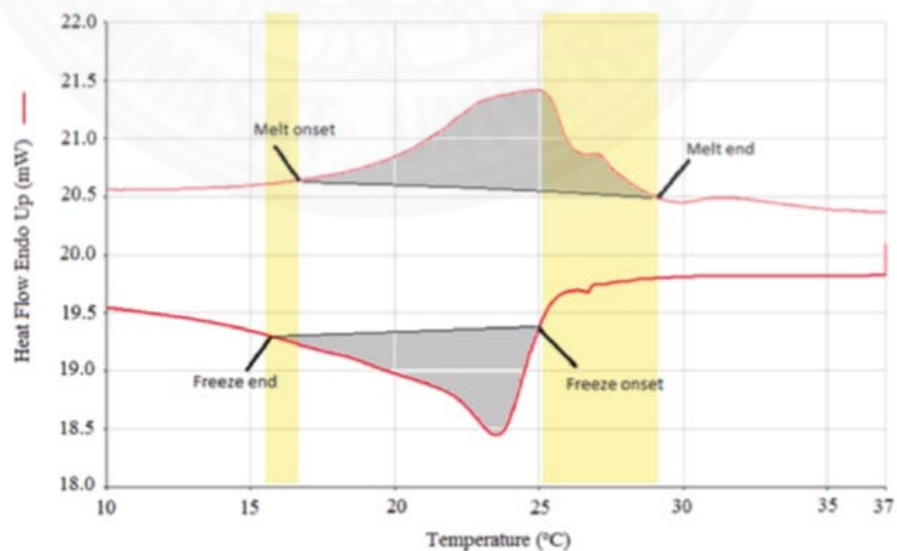
t_n คือ ระยะเวลากลางคืน

h คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนระหว่างผนังกับอากาศในห้อง



ภาพที่ 2.9 อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืนและเวลากลางวัน, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

นอกจากนี้สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกสารเปลี่ยนสถานะ คือ พฤติกรรมของการรับพลังงานในช่วงหลอมละลาย และพฤติกรรมการคายพลังงานในช่วงแข็งตัวควรมีระยะห่างที่น้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.10 เพื่อทำให้เกิดสถานะฮิสเทซิส (hysteresis) ที่ต่ำ ซึ่งการทำให้สารเปลี่ยนสถานะกลับสู่จุดแข็งตัวได้เร็วขึ้นเมื่อมีการใช้งานสามารถพิจารณาจากค่า DSC ของสารเปลี่ยนสถานะ โดยถ้าช่วงกราฟระหว่างอุณหภูมิจุดหลอมเหลว และจุดเยือกแข็งน้อย การเปลี่ยนสถานะกลับเป็นของแข็งในการใช้งานจริงมีประสิทธิภาพดีขึ้น (Groulx, et. al., 2009)



ภาพที่ 2.10 พฤติกรรมของการรับพลังงานในช่วงหลอมละลาย และพฤติกรรมการคายพลังงานในช่วงแข็งตัว, โดย Joanne M. Bailey, 2010. (ดัดแปลง)

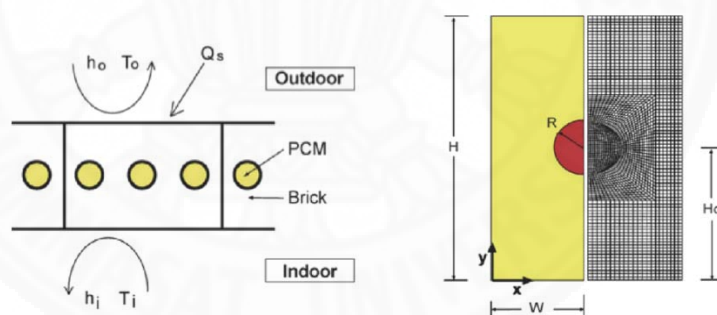
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature reviews)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย

2.3.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังแบบแมโครแคปซูลเลต (macroencapsulated)

ในปี 2007 ได้มีการศึกษาทดลองการหาตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะในผนังอิฐ โดยการบรรจุระหว่างรูของก้อนอิฐเพื่อลดค่าความร้อนของผนังในตอนกลางวัน โดยในงานวิจัยได้สนใจตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะในผนัง 3 แบบ โดยมีความสูงที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.11 คือ (1) การวางสารเปลี่ยนสถานะในตำแหน่งความสูง จากผนัง $1/3$ ของความสูงของผนัง (2) การวางสารเปลี่ยนสถานะในตำแหน่งความสูงจากผนัง $1/2$ ของผนัง และ (3) การวางสารเปลี่ยนสถานะในตำแหน่งความสูงจากผนัง $2H/3$ ของผนัง ดังรูปภาพที่ 2.11 พบว่าการวางสารเปลี่ยนสถานะด้วยความสูงที่แตกต่างกันในผนังทำให้เกิดพฤติกรรมความร้อนที่แตกต่างกันในผนัง

ผลการทดลองพบว่าการวางสารเปลี่ยนสถานะที่ระดับความสูง $1/2$ ของผนังมีความสามารถในการลดความร้อนมากที่สุด รองลงมาคือการวางสารเปลี่ยนสถานะที่ตำแหน่งความสูง $H/3$ และ $2H/3$ ตามลำดับ (Alwadhi, E.M., 2008)



ภาพที่ 2.11 ตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะในผนัง 3 แบบ โดยมีความสูงที่แตกต่างกัน, โดย Alwadhi, E.M., 2008.

ในปี 2013 ได้มีการศึกษาการวางตำแหน่งของสารเปลี่ยนสถานะในผนังอาคารได้ศึกษาวิจัยการวางสารเปลี่ยนสถานะ 3 ตำแหน่ง คือ (1) ตำแหน่งด้านนอกของผนัง (2) ตำแหน่งตรงกลางระหว่างผนัง และ (3) ตำแหน่งด้านในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการวิจัยเป็นสารประเภทพาราฟิน โดยบรรจุในรูปแบบของกล่องแอสตันเลสแบบแมโครแคปซูลเลต จากการทดลองพบว่า ตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะติดกับด้านในของอาคารมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีความสามารถลดอุณหภูมิ และความชื้นได้ 10% (Shi, et. al., 2013)

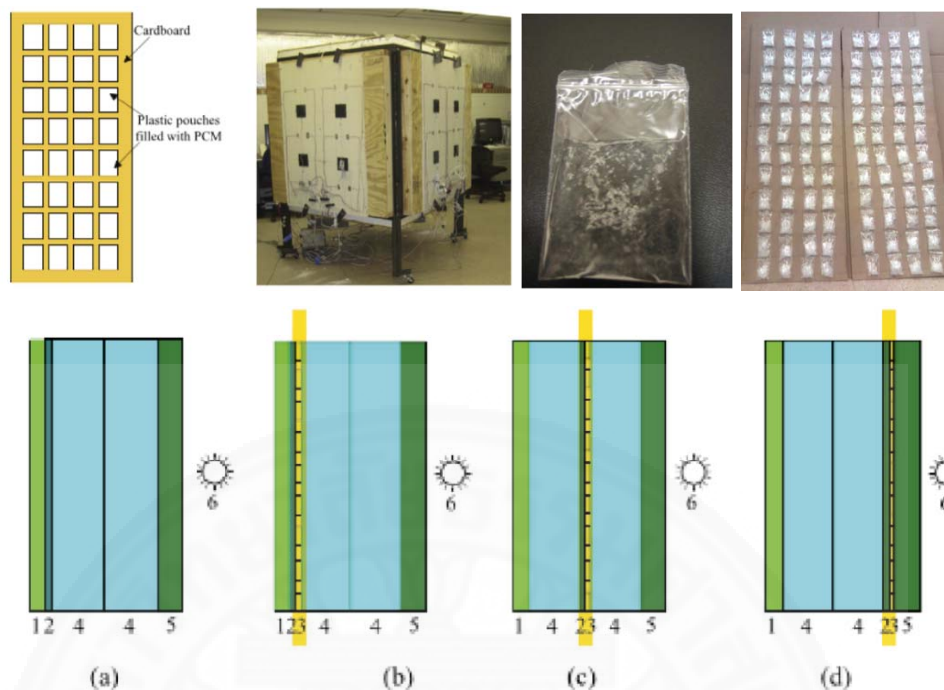
นอกจากนี้ในปี 2014 ได้มีการศึกษาทดลองการหาตำแหน่งการวางสารเปลี่ยนสถานะ โดยบรรจุสารเปลี่ยนสถานะประเภท hydrate salt ในแผ่นอนุกรมเนียนพอยล์ (phase change material thermal shield, PCMTS) บรรจุอยู่ระหว่างแผ่นโฟมฉนวนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของผิวผนังในอาคาร ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผ่น PCM thermal shield (PCMTS) และรูปแบบการวางสารเปลี่ยนสถานะ, โดย Lee, et. al., 2015.

จากการวิจัยพบว่า การวางสารเปลี่ยนสถานะชิดกับอาคารในด้านทิศตะวันตก และทิศใต้ในตำแหน่งตรงกลางสามารถลดอุณหภูมิผิวผนังได้ 27.1% มากกว่าการวางสารเปลี่ยนสถานะชิดกับด้านนอกอาคาร ซึ่งลดอุณหภูมิผิวผนังภายในได้เพียง 3.6% นอกจากนี้ผู้วิจัยได้มีการนำผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเปรียบเทียบกับค่าไฟฟ้าของห้องพักในอาคารชุดพบว่าผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีความสามารถลดค่าไฟฟ้าคือ 750 ดอลลาร์ฮ่องกงต่อปี (Lee, et. al., 2015)

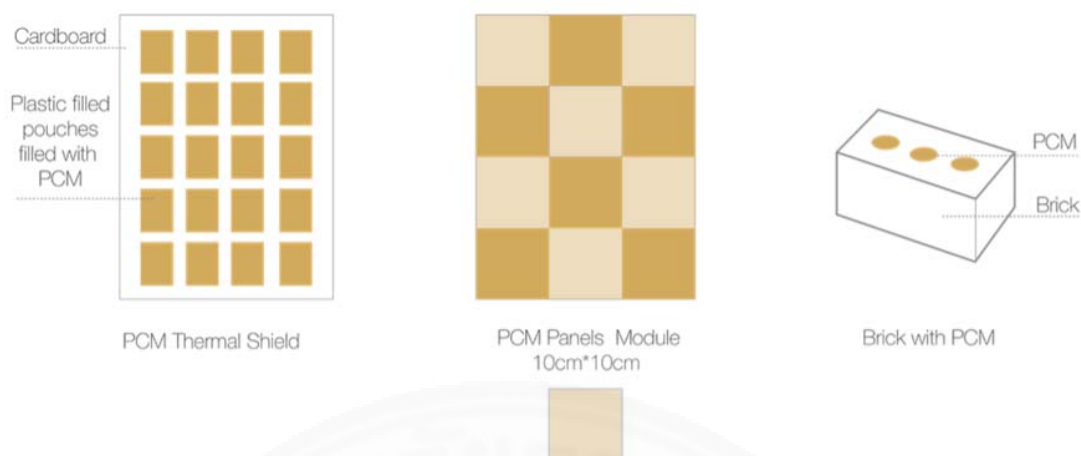
ในขณะเดียวกันในปี 2014 ได้มีการวิจัยการวางตำแหน่งของสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินออกเตด (N - Octadecane) ในถุงพลาสติกโดยบรรจุแบบแมโครแคปซูล (macroencapsulated PCMTS) โดยใช้คาร์บอนเป็นวัสดุยึดถุงพลาสติก และได้แบ่งชั้นผนังทดลองเป็น 5 ชั้น ได้แก่ (1) ผนังยิปซัมบอร์ด (2) คาร์บอนบอร์ด (3) สารเปลี่ยนสถานะ (4) ฉนวนกันความร้อน และ (5) ไม้โอเอสบี ซึ่งการทดลองได้ทดลองในกล่องทดลอง โดยติดไฟในกล่องทดลองแทนดวงอาทิตย์ และทำการทดลองแบบระบบปิดดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ตำแหน่งของการวางสารเปลี่ยนสถานะ ณ ตำแหน่งต่างๆ โดย (a) คือ ผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ (b) คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะติดกับผนังด้านในกล่องทดลอง (c) คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะตรงกลางผนัง และ (d) คือผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะติดกับด้านนอก, โดย Jin, et. al., 2014.

จากการวิจัยพบว่าเมื่อสารเปลี่ยนสถานะ เมื่อมีตำแหน่งวางใกล้กับผนังด้านในยิ่งมีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิผิวผนังมากที่สุด รองลงมาคือวางระหว่างชั้นผนัง และด้านนอกตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิผิวผนัง คือ 11 % (Jin, et. al., 2014)

จากการศึกษารวบรวมงานวิจัยพบว่า การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังแบบแมคโครแคปซูลเลตสามารถจำแนกการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตในผนัง 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะบนแผ่นความร้อน (phase change material thermal sheild, PCMTS) คือ การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในถุงย่อย ๆ โดยยึดบนการ์ดบอร์ด หรือแทนวางถุงบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ (2) การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในกล่องอลูมิเนียมขนาด 10 x 10 x 1 เซนติเมตร และเรียงต่อกันเป็นผนัง และ 3) การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะระหว่างรูของช่องอิฐ ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 สรุปการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเล็ตที่ใช้ในการวิจัยส่วนใหญ่, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

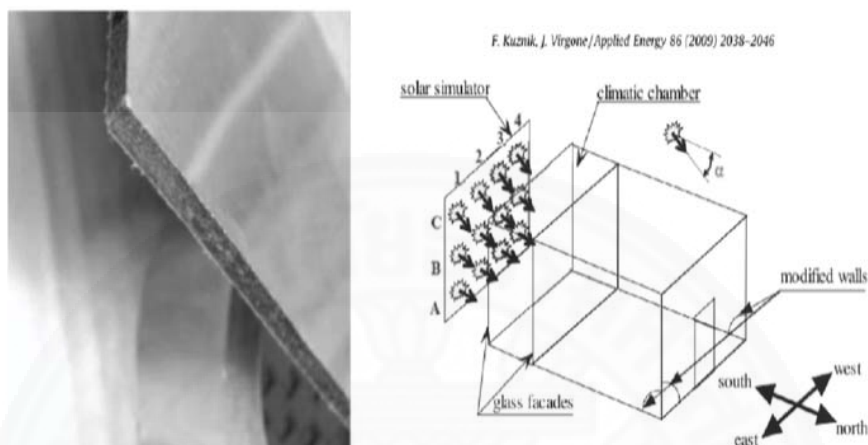
2.3.2.งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในผนังแบบไมโครแคปซูลเล็ต (microcapsulated)

ในปี 2550 ชลทิศ เอี่ยมวรอุฎติกุล ได้วิเคราะห์อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อสภาพแวดล้อมของเดือนเมษายนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะของสารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิ 25, 44 และ 55 องศาเซลเซียส โดยพบว่าการเลือกใช้สารเปลี่ยนสถานะในผนังควรมีค่า ตั้งแต่ 35 - 40 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้การศึกษาความหนาต่าง ๆ ที่มีความเหมาะสมของยิปซัมบอร์ดที่มีสารเปลี่ยนสถานะผสม ได้แก่ ความหนาขนาด 5, 10 และ 25 มิลลิเมตร จากการวิจัยพบว่าที่ความหนา 10 - 25 มิลลิเมตร ผนังยิปซัมบอร์ดที่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมมีความเหมาะสมต่อการใช้งานในผนังเบา คือ มีความหนาไม่มากเกินไปจนทำให้ค่าความจุความร้อนแฝงถูกใช้งานได้เต็มที่ สำหรับผนังที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ที่มีปริมาณของสารเปลี่ยนสถานะน้อยเกินไป ทำให้ค่าความจุความร้อนไม่พอที่จะดูดซับพลังงานความร้อนในเวลากลางวัน ส่งผลให้อุณหภูมิข้างในผนังห้องเพิ่มอย่างรวดเร็ว (ชลทิศ เอี่ยมวรอุฎติกุล และคณะ, 2550)

ในปี 2008 Frederic Kuznik และคณะ ได้ทำการวิจัยผนังยิปซัมบอร์ดที่มีสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินผสม โดยสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 104 จูต่อ กิโลกรัม องศาเซลเซียสทดลองวัดอุณหภูมิของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในทิศตะวันตก ทิศเหนือ และทิศตะวันออกในระบบปิด โดยใช้ดวงโคมแทนแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 2.15

ผนังยิปซัมบอร์ดที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิ ผิวผนัง ภายในที่ 18.9 – 35.7 องศาเซลเซียส ในขณะที่ผนังยิปซัมบอร์ดที่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมมีอุณหภูมิผิวผนังภายในที่ 19.8 – 32.7 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะอยู่ 0.8 – 3.9 องศาเซลเซียส (Kuznik, et. al., 2008)



ภาพที่ 2.15 การทดลองผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะในระบบปิด, โดย Kuznik, et. al., 2008.

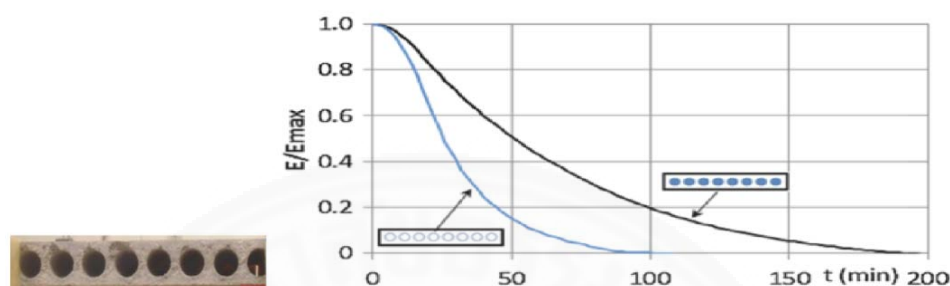
ในปี 2013 Xiang Fei และคณะได้ทำการทดลองในระบบปิดกับผนังยิปซัมบอร์ดที่มีสารเปลี่ยนสถานะผสมประเภทลิวติลสเตเรต (liquid butyl sterate) ที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่ 16 – 20 องศาเซลเซียส และมีค่าความจุความร้อน 1,260 จูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส โดยมีความหนาที่ 13 มิลลิเมตร พบว่า สามารถลดอุณหภูมิของผิวผนังภายในได้ดีกว่าผนังยิปซัมบอร์ดทั่วไป 6 องศาเซลเซียส (X. Kong, et. al., 2013)

2.3.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะกับพื้น

ในปี 2011 Isabel Ceron และคณะได้ทำการวิจัยพื้นกระเบื้องที่มีสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินบรรจุตรงกลางระหว่างชั้นกระเบื้อง โดยออกแบบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในลักษณะของรังผึ้ง เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของแผ่นพื้นกระเบื้องที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะและมีสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน พบว่าพื้นกระเบื้องที่มีสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินมีอุณหภูมิของพื้นผิวกระเบื้องน้อยกว่าพื้นกระเบื้องที่ไม่มีสาร เปลี่ยนสถานะ 1.5 – 2 องศาเซลเซียส (I. Ceron, et. al., 2011)

ในขณะเดียวกันในปี 2011 Roberta Ansuini และคณะได้ทำการวิจัยเปรียบเทียบพื้น Radiant Floor ที่มีสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ พบว่าพื้น Radiant Floor ที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิของผิวพื้นที่น้อยกว่าพื้น Radiant Floor ที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ โดยสามารถลดอุณหภูมิของพื้นได้ 3.5 องศาเซลเซียส (Asuini, et. al., 2011)

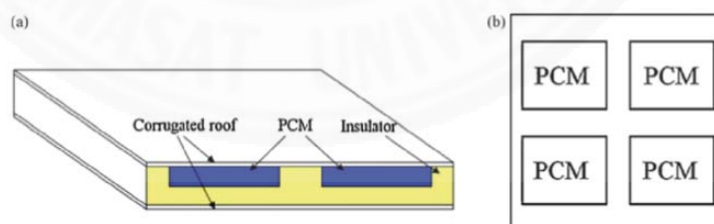
นอกจากนี้ในปี 2012 Laurent Royon และคณะได้ทำการวิจัยเปรียบเทียบพื้นคอนกรีตกลวง (hollow concrete) ที่มีสารเปลี่ยนสถานะและมีสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน พบว่า พื้นที่มีสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิของผิวพื้นที้น้อยกว่าพื้นที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ โดยสามารถลดอุณหภูมิของพื้นได้ 1 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 2.16 (Royon, et. al., 2012)



ภาพที่ 2.16 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตกลวง, โดย Royon, et. al., 2012.

2.2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะกับหลังคา

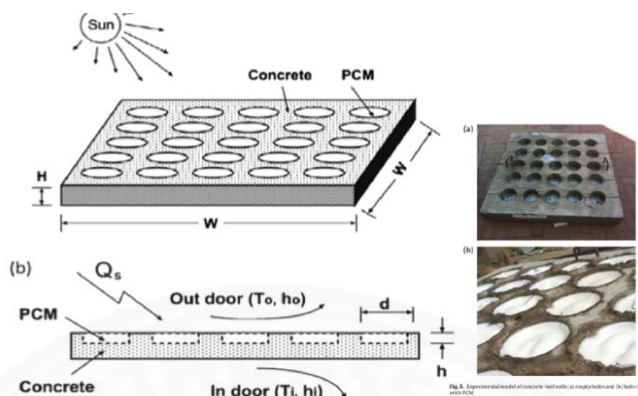
ในปี 2013 Huan Ming Chou และคณะ ได้ทำการวิจัยและออกแบบกระเบื้องหลังคาที่มี สารเปลี่ยนสถานะ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับกระเบื้องทั่วไปที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ โดยในการออกแบบได้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะในถุ่ โดยเรียงข้างใต้แผ่นกระเบื้องหลังคา และมีฉนวนรองด้านใต้สารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพที่ 2.17 จากการวิจัยพบว่ากระเบื้องหลังคาที่มีสารเปลี่ยนสถานะสามารถลดอุณหภูมิมากกว่ากระเบื้องหลังคาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 3 องศาเซลเซียส (Chou, et. al., 2013)



ภาพที่ 2.17 หลังคาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ, โดย Chou, et. al., 2013.

ในขณะเดียวกันปี 2013 Hashem J. และคณะได้ทำการวิจัยหลังคาคอนกรีตที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ โดยได้ออกแบบหลังคาคอนกรีตที่มีความหนา 15 เซนติเมตร โดยออกแบบให้ หลังคามีลักษณะเป็นหลุมเหมือนถาดใส่ไข่ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางในแต่ละหลุม 14 เซนติเมตร และบรรจุสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟินที่มีจุดหลอมเหลว 32 องศาเซลเซียส

ดั่งภาพที่ 2.18 จากการวิจัยพบว่าหลังคา ที่มีสารเปลี่ยนสถานะสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารได้มากกว่าหลังคาปกติ 40% (Haahem J., et. al., 2013)



ภาพที่ 2.18 หลังคาคอนกรีตที่มีสารเปลี่ยนสถานะโดยบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในลักษณะเป็นหลุม, โดย Hashem J., et. al., 2013.

นอกจากนี้ในปี.ศ. 2013 ณัฐพล เตชพิชิตโชค ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบหลังคา 2 ชนิดระหว่างลอนกระเบื้องและ หลังคาแบบเมทัลชีทที่มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทวาสลิน โดย พบว่าหลังคาลอนกระเบื้องที่มีสารเปลี่ยนสถานะสามารถลดอุณหภูมิได้ 3.9 องศาเซลเซียส และ กระเบื้องเมทัลชีทที่มีสารเปลี่ยน สถานะสามารถลดอุณหภูมิได้ 2.5 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ (ณัฐพล เตชพิชิตโชค, 2556)

จากการศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยพบว่า การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลต และแบบไมโครแคปซูลเลต โดยในสิ่งทีงานวิจัยชิ้นนี้สนใจในการศึกษา คือ การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตที่ส่งผลต่อพฤติกรรมความร้อนในผนังอาคาร เนื่องจากการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตมีความสามารถใส่สารเปลี่ยนสถานะในปริมาณที่ต้องการ มีความยืดหยุ่นในการใช้งานมากกว่าแบบไมโครแคปซูลเลต และไม่ทำลายคุณสมบัติของส่วนประกอบของวัสดุอื่นในผนังอาคาร

นอกจากนี้จากการค้นคว้าการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้ในงานวิจัยนี้ได้สนใจในการศึกษาการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะบนแผ่นความร้อน (phase change material thermal shield) เนื่องจากเมื่อเทียบการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตแบบอื่น ๆ พบว่า มีน้ำหนักเบาทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านโครงสร้าง และในปัจจุบันเริ่มมีการให้ความสนใจการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะบนแผ่นความร้อนในการพัฒนารูปแบบในส่วน of ผลิตภัณฑ์ และมีการนำไปใช้จริงในภูมิภาคอื่น แต่ยังไม่มีการพัฒนาให้ใช้ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ตารางที่ 2.3

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ชื่อบทความ	ปี ค.ศ.	วัตถุประสงค์		วิธีการวิจัย			ขนาดพื้นที่ศึกษา				
		พฤติกรรม	พฤติกรรม	วัดจาก	วัดจากผล	วัดจากผล	บ้านเดี่ยว	บ้าน	ห้องพัก	ทดลอง	ผนัง
		การเปลี่ยนแปลงสถานะ	การถ่ายเทความร้อน	สถานที่	การจำลองการคำนวณ	การจำลองเชิงตัวเลข	จำนวนชั้น	จำนวนชั้น	ขนาด	จำนวน	จำนวน
1. Thermal Analysis of Building Brick Containing PCM											
Esam M Alwachi	2007	✓		✓					✓		
2. Experimental Assessment of position of macrocapsulated PCM in concrete wall on indoor temperature and humidity level											
Xian Shi	2013	✓	✓	✓					✓		
3. Assessing the integration of thin PCM later in residential building wall for heat transfer reduction and management											
Kyong Ok Lee	2014	✓		✓					✓		
4. On the placement of PCM thermal shield with the cavity of building wall for heat transfer rate reduction											
Xing Jing	2013	✓		✓							✓
5. Experimental research on the use of PCM in perforated brick room for cooling storage											
Xingfei Kong	2013	✓		✓					✓		
6. อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน											
ชลทิศ เตียมวรุฒิกุล	2007	✓	✓	✓					✓	MATLAB: finite different numeric method	✓
7. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคารผสมสารเปลี่ยนสถานะในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร											
เอกพล เตย์ชัว	2007	✓	✓						✓	MATLAB: finite different numeric method	✓
8. การศึกษารูปแบบผนังเบา เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารพักอาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย กรณีศึกษาโครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ											
อภิรักษ์ เกาส์รัตน์	2010	✓							✓		

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ช่วงเวลาการศึกษา	ปัจจัยภายนอก		ปัจจัยภายใน		ปัจจัยด้านกรอบอาคาร									
	ทิศทาง วางอาคาร	เครื่องปรับอากาศ	เครื่องปรับอากาศ	อากาศ	หลังคา	ผนังที่บดบัง		ผนังที่โปร่งแสง		ผนังที่บดบัง				
24 ชั่วโมง	ทิศทาง วางอาคาร	เครื่องปรับอากาศ	เครื่องปรับอากาศ	อากาศ	วัสดุ	ตำแหน่ง	จำนวน	วัสดุ	จำนวน	Air Gap	ตำแหน่ง PCM	นอก	กลาง	ใน
1. Thermal Analysis of Building Brick Containing PCM														
✓			✓	✓				1	ใต้ในช่องว่างของฉนวน		✓	✓	✓	✓
2. Experimental Assessment of position of macroencapsulated PCM in concrete wall on indoor temperature and humidity level														
✓		✓	✓	✓	✓	ไม่		1			✓	✓	✓	✓
3. Assessing the integration of thin PCM later in residential building wall for heat transfer reduction and management														
✓		✓	✓						2	5	✓	✓	✓	✓
4. On the placement of PCM thermal shield with the cavity of building wall for heat transfer rate reduction														
✓		✓	✓						2	2	✓	✓	✓	✓
5. Experimental research on the use of PCM in perforated brick room for cooling storage														
✓		✓	✓	✓				1			✓	✓	✓	✓
6. อิทธิพลของการเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน														
✓			✓					1	ผสม PCM 20%					✓
7. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคารผสมสารเปลี่ยนสถานะในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร														
✓			✓						ผสม PCM 20%					✓
8. การศึกษารูปแบบผนังเบา เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารพักอาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย กรณีศึกษาโครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ														
✓			✓						✓		✓			

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยด้านสารเปลี่ยนสถานะ					ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์		สิ่งที่นำมาใช้ในงานวิจัย
สมบัติสาร	อุณหภูมิ MP, FP opt Trial	ขนาด ปริมาณ	ชนิด	ต้นทุน ราคาก่อสร้าง	การประหยัด พลังงานไฟฟ้า		
1. Thermal Analysis of Building Brick Containing PCM							
			✓			รูปแบบการจัดวางผนังที่มี PCM	
2. Experimental Assessment of position of macroencapsulated PCM in concrete wall on indoor temperature and humidity level							
	✓	✓	✓			รูปแบบการจัดวางผนังที่มี PCM	
3. Assessing the integration of thin PCM later in residential building wall for heat transfer reduction and management							
	✓		✓		✓	รูปแบบการจัดวางผนังที่มี PCM	
4. On the placement of PCM thermal shield within the cavity of building wall for heat transfer rate reduction							
	✓		✓			รูปแบบการจัดวางผนังที่มี PCM	
5. Experimental research on the use of PCM in perforated brick room for cooling storage							
	✓	✓	✓			รูปแบบการจัดวางผนังที่มี PCM	
6. อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน							
	✓	✓	✓			พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผนังภายในที่มี PCM	
7. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคารผสมสารเปลี่ยนสถานะในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร							
		✓	✓			พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผนังภายในที่มี PCM	
8. การศึกษารูปแบบผนังเบา เพื่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารพักอาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย กรณีศึกษาโครงการบ้านเอื้ออาทร การเคหะแห่งชาติ							
					✓	วัสดุผนังเบาที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน	

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ชื่อบทความ	ปี ค.ศ.	วัตถุประสงค์			วิธีการวิจัย				ขนาดพื้นที่ศึกษา				
		พฤติกรรม สารเปลี่ยนสถานะ	พฤติกรรม การถ่ายเท ความร้อน	พฤติกรรม การลด ความชื้น	วัดจาก เครื่อง DSC	วัดจาก สถาน การณ์จริง	วัดจาก การจำลอง Computer	วัดจากผล การคำนวณ	บ้าน จำลอง 1 ชั้น	ห้องพัก ขนาด เล็ก	กล่อง จำลอง	ผนัง จำลอง	
9. Phase Change Materials for Building Application: A state of art review													
Ruben Baetens	2010	✓			✓			✓					✓
10.A Study of Optimal Transition Temperature of PCM Wallboard for Solar Energy Storage													
J.B. Drake	1987	✓			✓			✓					✓
11.A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating													
K. Peippo	1990	✓			✓			✓					✓
12.Review on free cooling of building using phase change materials													
V. Antony Aroul Raj	2010	✓			✓								
13.Latent Heat Storage in Building: storing heat and cold in a compact and demand oriented manner													
Harol Mehling	2014	✓			✓			✓					✓
14.อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของช่องใต้หลังคา													
เนรุพล เตชพิริตโต	2013		✓		✓								✓
15.A simplified dynamic model of building structure integrated with shaped-stabilized phase change material													
Na Zhu	2010		✓					✓				MATLAB: finite different numeric method	✓
16.Heat and Mass Transfer, fundamental and mass transfer													
Yunus A Cengel	2011		✓									✓	

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ช่วงเวลาการศึกษา	ปัจจัยภายนอก	ปัจจัยภายใน		ปัจจัยด้านกรอบอาคาร										
		ทิศทาง วางอาคาร	เครื่องปรับอากาศ	ไม่ปรับอากาศ	หลังคา	ผนังที่บดบังแสง		Air Gap		ตำแหน่ง PCM				
24 ชั่วโมง	บางเวลา	ทิศทาง วางอาคาร	เครื่องปรับอากาศ	ไม่ปรับอากาศ	วัสดุ	ตำแหน่ง	จำนวน	วัสดุ	จำนวน	วัสดุ	เป่า	นอก	กลาง	ใน
9.Phase Change Materials for Building Application: A state of art review														
✓			✓	✓										
10.A Study of Optimal Transition Temperature of PCM Wallboard for Solar Energy Storage														
✓			✓	✓										
11.A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating														
✓			✓	✓										
12.Review on free cooling of building using phase change materials														
			✓	✓										
13.Latent Heat Storage in Building: storing heat and cold in a compact and demand oriented manner														
✓			✓	✓								4 gypsum board	30% PCM	✓
14.อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของช่องใต้หลังคา														
✓				✓				2	✓					✓
15.A simplified dynamic model of building structure integrated with shaped-stabilized phase change material														
✓			✓	✓						1				✓
16.Heat and Mass Transfer, fundamental and mass transfer														

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

สรุปงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยด้านสารเปลี่ยนสถานะ				ปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์		สิ่งที่นำมาใช้ในงานวิจัย
สมบัติสาร	อุณหภูมิ MP, FP opt	ขนาด ปริมาณ	ชนิด	ต้นทุน	การประหยัดพลังงานไฟฟ้า	
✓	✓		✓		การคำนวณ Topt ของ PCM ที่ใช้ในผนัง	
9.Phase Change Materials for Building Application: A state of art review						
10.A Study of Optimal Transition Temperature of PCM Wallboard for Solar Energy Storage						
✓	✓		✓		การคำนวณ Topt ของ PCM ที่ใช้ในผนัง	
11.A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating						
✓	✓		✓		การคำนวณ Topt ของ PCM ที่ใช้ในผนัง	
12.Review on free cooling of building using phase change materials						
✓			✓		การตรวจสอบเปลี่ยนสถานะ, สมบัติสารเปลี่ยนสถานะ	
13.Latent Heat Storage in Building: storing heat and cold in a compact and demand oriented manner						
✓	✓	✓	✓		การตรวจสอบเปลี่ยนสถานะ, สมบัติสารเปลี่ยนสถานะ	
14.อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของช่องใต้หลังคา						
✓	✓	✓	✓		สมบัติสารเปลี่ยนสถานะ	
15.A simplified dynamic model of building structure integrated with shaped-stabilized phase change material						
	✓		✓		การคำนวณพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	
16.Heat and Mass Transfer, fundamental and mass transfer						
					การคำนวณพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน	

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2558.

บทที่ 3

ระเบียบการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

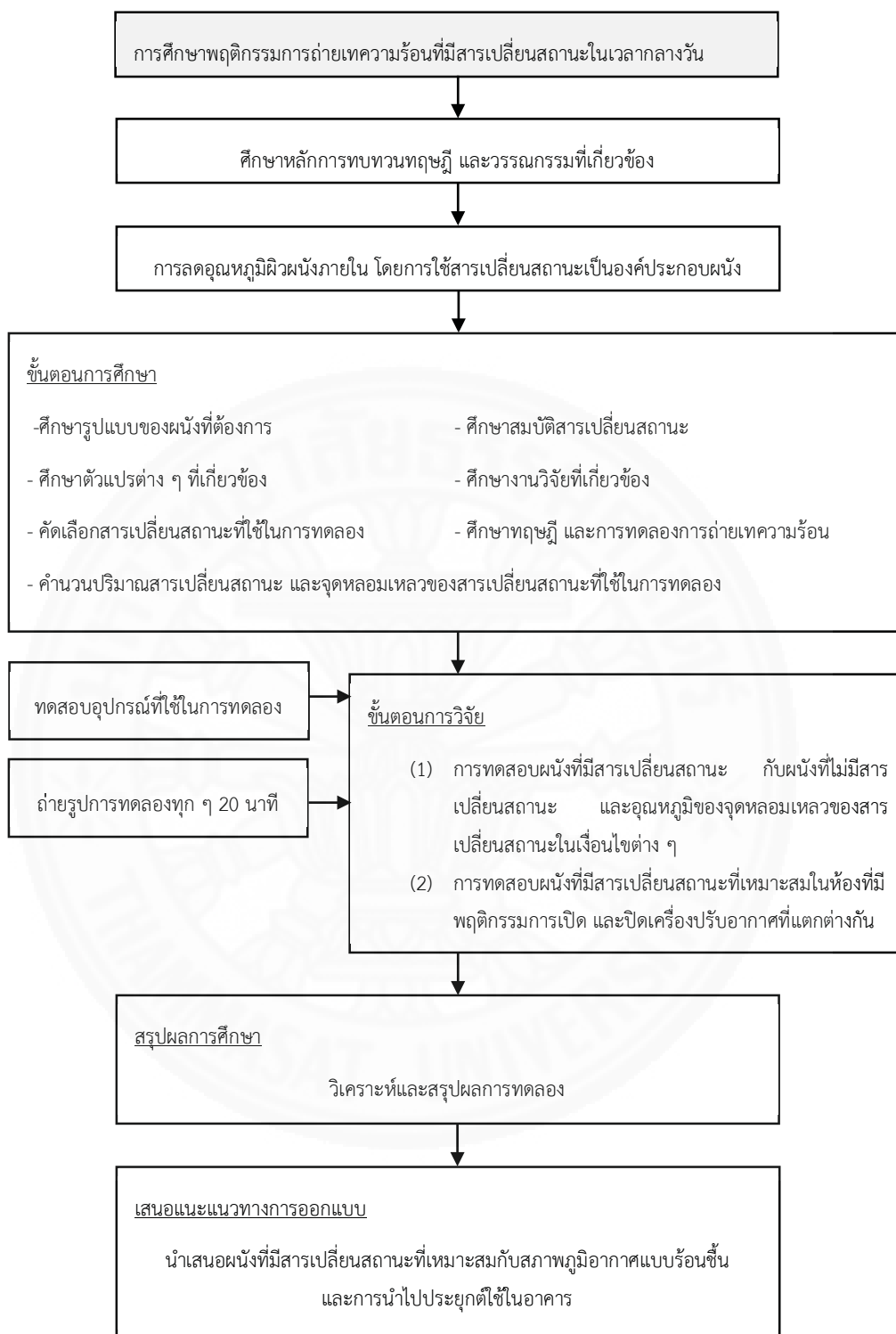
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารในเวลากลางวันโดยการทดลอง แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่1 การศึกษาเปรียบเทียบของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารด้วยการของผนังที่มีสารมีสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะภายใต้สภาวะอากาศร้อนขึ้นในเวลากลางวัน

ส่วนที่2 การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมต่อสภาวะอากาศร้อนขึ้นในเวลากลางวัน

ส่วนที่3 การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะต่อการเปิด และปิดเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน

ขั้นตอนการวิจัยแสดงดังภาพที่ 3.1 ผลการทดลองต่างๆดังกล่าวจะนำไปสู่เกณฑ์การออกแบบ และการเลือกอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะเพื่อลดความร้อนเข้าสู่ผนังอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวันโดยการใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมต่ออาคารที่อยู่ในภูมิอากาศเขตร้อนชื้น



ภาพที่ 3.1 แผนผังการวิจัย, จัดทำโดย ผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2559.

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กำหนดตัวแปรในการวิจัยเชิงทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1

ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

การศึกษาเชิงตัวเลขของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในเวลากลางวันภายใต้สภาวะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น	
ช่วงที่ 1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (verification)	ช่วงที่ 2 การวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ (application)
<p>1. หัววัดอุณหภูมิ</p> <p>2. การวัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลอง แสงอาทิตย์</p>	<p>ตัวแปรต้น</p> <p>1. ผนังยิปซั่มนอก - ช่องอากาศ - ผนังยิปซั่มใน</p> <p>2. ผนังยิปซั่มนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซั่มใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 25-27 องศาเซลเซียส</p> <p>2. ผนังยิปซั่มนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซั่มใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 29-30 องศาเซลเซียส</p> <p>2. ผนังยิปซั่มนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซั่มใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP31E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 30-33 องศาเซลเซียส</p>
ตัวแปรตาม	1. อุณหภูมิผิวผนังด้าน 2. พฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะ
ตัวแปรควบคุม	
1. ความหนาผนังรวม 0.1 เมตร 2. ปริมาณสารเปลี่ยนสถานะ 3. เวลาปิดเปิดเครื่องปรับอากาศ 4. ห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 5. ความเข้มแสงรังสีดวงอาทิตย์ของดวงโคม	

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2559.

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีทั้งสิ้น 29 ชิ้น ดังต่อไปนี้

1. คอมพิวเตอร์ 3 เครื่อง
2. เครื่องวัดอุณหภูมิจำนวน 37 เครื่อง (data logger)
3. สายเทอร์โมคัปเปิล จำนวน 54 สาย (thermocouple)
4. โคมไฟสปอตไลท์แทนแหล่งกำเนิดแสง และความร้อน จำนวน 4 ดวงโคม ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ดวงโคมจำลองแหล่งพลังงานของแสงอาทิตย์ ขนาด 18.5 x 19 x 14.5 เซนติเมตร กำลังไฟ 500 วัตต์ รุ่น QVF135 hallolite ยี่ห้อ Philips, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

5. หลอดไฟฮาโลเจน 500 วัตต์ จำนวน 4 หลอด
6. เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์ (solar power meter) ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

7. สารเปลี่ยนสถานะ SP26E SP29E และ SP31E ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 สารเปลี่ยนสถานะ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

8. ถังบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ
9. ถ้วยตวง
10. ช้อนตวง

11. ถุงบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ถุงพลาสติกบรรจุสารเปลี่ยนสถานะขนาด 10.8 x 5 เซนติเมตร, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

12. เครื่องบรรจุบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ (vacuum packager) ดังแสดงในภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่องบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ รุ่น VM 300 TE/A ยี่ห้อ packing machine, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

13. เครื่องผลิตบรรจุภัณฑ์ 12 นิ้ว (impulse sealer, 12") ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องผลิตบรรจุภัณฑ์ รุ่น PFS-300 ยี่ห้อ Champ, AMCI product, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

14. โครงแม่แบบสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 โครงแม่แบบสำหรับบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

15. กล้องบันทึกภาพ 1 ตัว
16. กล้องวีดีทัศน์ 2 ตัว
17. สาย LAN
18. โครงคร่ามนั่งทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 โครงคร่ามนั่งทดลอง และโครงผนังทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

19. โครงผนังทดลอง
20. โฟมหนา 4 นิ้ว
21. โฟมหนา 5 นิ้ว
22. ยิปซัมบอร์ด
23. กระจกใสหนา 1/2 นิ้ว
24. กระจาดาชลิ่ง
25. ตู้อื่น
26. เครื่องชั่งน้ำหนัก ค่าความละเอียด 10 กรัม ขนาดวัดสูงสุด 60 กิโลกรัม ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น FG-60 KAL, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

27. ขาดตั้งกล้องถ่ายรูป
28. ขาดตั้งกล้องบันทึกภาพ
29. ขาดตั้งดวงโคม

3.4 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (verification)

เนื่องจากการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ต้องมีจุดวัดอุณหภูมิเป็นจำนวนมาก จึงต้องทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือก่อนที่จะนำไปใช้วัดเพื่อเก็บข้อมูลก่อน

3.4.1.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของหัววัดอุณหภูมิ

ทดสอบหัววัดอุณหภูมิ 32 หัวเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล โดยนำสายมารวมกัน และไม่ให้เห็นเซอร์ของหัววัดอุณหภูมิสัมผัสกัน เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน และลดความคลาดเคลื่อน ซึ่งการวัดความคลาดเคลื่อนจะเทียบโดยการใช้น้ำในการเทียบ โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำซ้ำ ๆ เพื่อให้หัววัดอุณหภูมิตอบสนองทัน นอกจากนี้วัดความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายในห้อง และอุณหภูมิของช่องแช่แข็งซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนจะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส

3.4.1.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์

ทดสอบดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ โดยการวัดรังสีแสงจากดวงโคมเทียบกับรังสีแสงอาทิตย์ที่กระทบกับผนัง โดยอ้างอิงจากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยบนพื้นผิวในกรุงเทพมหานคร จากกรมอุตุนิยมวิทยา ฯ ซึ่งแบ่งค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เป็น 3 ค่า คือ 500 วัตต์ 750 วัตต์ และ 1000 วัตต์

3.4.2 การตรวจสอบคุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้สนใจคุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะโดยกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งพิจารณาจากการคำนวณเลือกอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม โดยคำนวณจากอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องในเวลากลางวันและกลางคืน และพลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์ที่สะสมอยู่ในแต่ละวัน (Beatens, et. al., 2010) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการนำเสนอโดย Peippo ดังต่อไปนี้

$$T_{pcm, opt} = T_i + (Q_{store} / t_{store} h)$$

เมื่อ $T_i = (t_d T_{i,d} + T_n T_{i,n}) / (T_d + T_n)$

โดย	$T_{pcm,opt}$	คือ	อุณหภูมิสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสม
	Q_{store}	คือ	พลังงานความร้อนที่สะสมต่อหน่วยพื้นที่
	t_{store}	คือ	ระยะเวลาที่พลังงานความร้อนสะสม
	t_i	คือ	อุณหภูมิห้อง
	$T_{i,d}$	คือ	อุณหภูมิในเวลากลางวัน
	$T_{i,n}$	คือ	อุณหภูมิในเวลากลางคืน
	t_d	คือ	ระยะเวลากลางวัน
	t_n	คือ	ระยะเวลากลางคืน
	h	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนระหว่างผนังกับอากาศในห้อง
			กำหนดในงานวิจัย คือ $h = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

ซึ่งในงานวิจัยกำหนดอุณหภูมิในห้องเวลากลางวันเป็นระบบปิดในห้องปรับอากาศ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องเวลากลางคืนเฉลี่ย 29 องศาเซลเซียส และพลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์สะสมแต่ละวัน อ้างอิงจากสภาพภูมิอากาศกรุงเทพมหานคร (ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูรกิจ, 2550)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad T_i &= (t_d T_{i,d} + T_n T_{i,n}) / (T_d + T_n) \\ T_i &= (12 \times 25) + (12 \times 29) / (12 \times 12) \\ T_i &= 27 \quad \text{องศาเซลเซียส} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad T_{pcm,opt} &= T_{i,d} + (Q_{store} / t_{store} h) \\ T_{pcm,opt} &= (27 + 0.89) \\ T_{pcm,opt} &= 27.89 \quad \text{องศาเซลเซียส} \end{aligned}$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมของสารเปลี่ยนสถานะในระบบปิดในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น คือ 27.89 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการกำหนดการทดลอง เพราะฉะนั้นจึงนำไปสู่การเลือกสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลองแบ่งโดยอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ 3 ชนิด ได้แก่ SP31E, SP29E และ SP21E ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.11 สารเปลี่ยนสถานะ SP26Eu (ซ้าย) SP29E (กลาง) และ SP31 (ขวา), จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2559.

ตารางที่ 3.2

คุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสารเปลี่ยนสถานะ	SP26E	SP29Eu	SP31E
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	25-27 องศาเซลเซียส	29-30 องศาเซลเซียส	31-33 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่เกิดการแข็งตัว	24-25 องศาเซลเซียส	28-27 องศาเซลเซียส	28-30 องศาเซลเซียส
ความจุความร้อน +7.5% หรือ -7.5%	190 kJ/kg 52 Wh/kg เกิดจากความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอุณหภูมิ 17-32 องศาเซลเซียส	160 kJ/kg 44 Wh/kg เกิดจากความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอุณหภูมิ 22-37 องศาเซลเซียส	220 kJ/kg 61 Wh/kg เกิดจากความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของอุณหภูมิ 23-38 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ	2 kJ/kgK	2 kJ/kgK	2 kJ/kgK
ความหนาแน่นเมื่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในสถานะของแข็ง	1.50 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	1.55 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	1.30 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นเมื่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในสถานะของเหลว	1.40 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	1.50 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	1.10 kg/l เมื่ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2559.

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

คุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการทดลอง

ประเภทสารเปลี่ยนสถานะ	SP26E	SP29Eu	SP31E
การขยายตัวของสารเปลี่ยนสถานะ	3-4%	3-4%	3-4%
ค่าความจุความร้อนเมื่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในสถานะแข็งตัว	0.60 W/(mK)	0.60 W/(mK)	0.60 W/(mK)
ค่าความจุความร้อนเมื่อสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในสถานะของเหลว	1.12 W/(mK)	1.12 W/(mK)	1.12 W/(mK)
อุณหภูมิใช้งานสูงสุด	45 องศาเซลเซียส	55 องศาเซลเซียส	50 องศาเซลเซียส
การติดไฟ	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ	ไม่ติดไฟ
การกัดกร่อน	มีการกัดกร่อนในเหล็ก	มีการกัดกร่อนในเหล็ก	มีการกัดกร่อนในเหล็ก

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2559.

- สารเปลี่ยนสถานะสามารถดูดความชื้นได้ ถ้ามีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ หรือการเก็บที่ไม่ดีมีความชื้นสูงอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ
- การพาความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะเมื่ออยู่ในสถานะผสมระหว่างของแข็ง และของเหลวจะขึ้นอยู่กับขนาดปริมาตร ค่าผลต่างอุณหภูมิ ณ ขณะนั้น และรูปทรงของสารเปลี่ยนสถานะ
- ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของสารผสมระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งมีทั้งการนำและการพาความร้อนปนกันอาจพบว่าการนำความร้อนของของเหลวอาจมีค่าสูงกว่า ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการพาความร้อนของของเหลว

3.4.3 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ

การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในการทดลองได้บรรจุสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้วิธีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบสุญญากาศ เนื่องจากเพื่อป้องกันความชื้น และอากาศอยู่ในบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากความชื้นมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน และคุณสมบัติของสารเปลี่ยนสถานะ นอกจากนี้ฟองอากาศเป็นฉนวนความร้อนส่งผลให้การทำงานของสารเปลี่ยนสถานะมีประสิทธิภาพลดลง ดังภาพที่ 3.12 ซึ่งวิธีการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในการทดลองครั้งนี้คือการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบสุญญากาศ ซึ่งมีกระบวนการในการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพที่ 3.13 – 3.15



ภาพที่ 3.12 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบไม่มีสุญญากาศ (ซ้าย) และการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบสุญญากาศ (ขวา), จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 21 มกราคม 2559.



ภาพที่ 3.13 การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะในแม่แบบ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559.



ภาพที่ 3.14 การทำบรรจุภัณฑ์ให้เป็นสุญญากาศ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559.

นอกจากนี้ในการทดลองครั้งนี้ได้มีการชั่งน้ำหนักสารเปลี่ยนสถานะทั้งหมดที่บรรจุในผนังก่อนการทดลองเพื่อเป็นข้อมูลในการทดลอง โดยตั้งค่าตาชั่งให้เป็น 0.00 กิโลกรัมก่อนการใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 3.15 และตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.15 การชั่งน้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะหลังจากการบรรจุแบบสุญญากาศ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2559.

ตารางที่ 3.3

น้ำหนักของสารเปลี่ยนสถานะในผนังทดลอง

ชนิดของสารเปลี่ยนสถานะ	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
1. SP 26 E	4.27 กิโลกรัม
2. SP 29 Eu	4.65 กิโลกรัม
3. SP 31	4.57 กิโลกรัม

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2559

นำบรรจุภัณฑ์ออกจากแม่แบบและนำไปแช่ในช่องแช่แข็ง ณ อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมงก่อนการนำไปใช้งานในผนังทดลอง และนำบรรจุภัณฑ์ออกจากช่องแช่แข็งในอุณหภูมิห้อง 5 ชั่วโมงก่อน นำไปใช้งานจริงเพื่อให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะอยู่ในอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมก่อนบรรจุผนังทดลอง ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 สารเปลี่ยนสถานะหลังจากบรรจุสุญญากาศในช่องแช่แข็งอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2559.

3.4.4 อาคารทดลองและผนังทดลองที่ใช้ในการทดสอบวัสดุผนัง

3.4.4.1 สถานที่ทดลอง

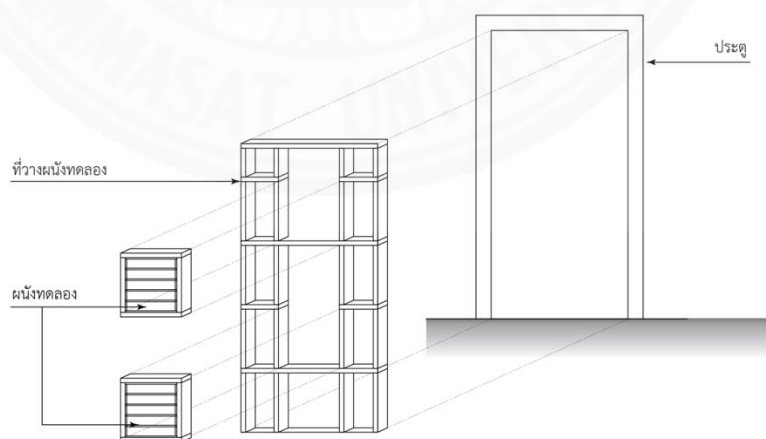
สถานที่ทดลองของการศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลต คือ ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล อาคาร I-SCI ห้อง 104 ศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 3.17 ศูนย์เชื้อเพลิงพลังงานจากชีวมวล, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

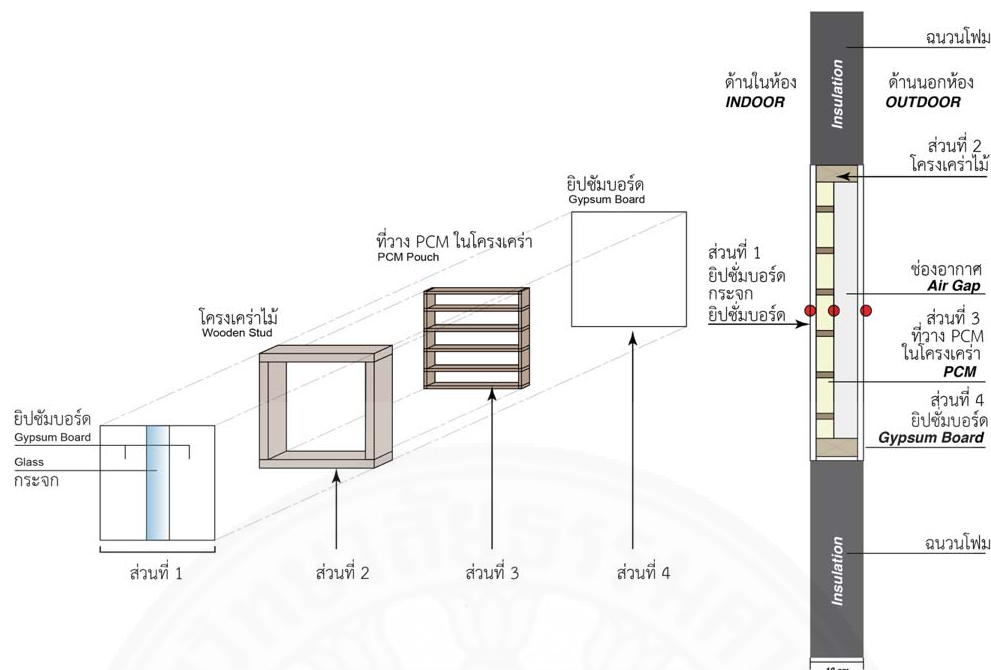
3.4.4.2 ผนังทดลอง

ผนังทดลองที่ใช้ในการทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ที่วางผนังทดลองเป็นโครงคร่าวประกอบเข้ากับระหว่งวงกบประตูได้พอดี โดยผนังทดลองสามารถถอดเข้าออกได้เพื่อใส่สารเปลี่ยนสถานะระหว่างการทดลอง และสามารถวางผนังทดลองได้ 2 ชุดเพื่อใช้ทดลองเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพที่ 3.18 และภาพที่ 3.19



เมื่อประกอบแล้ว สามารถใส่เข้าไประหว่างประตูได้ และผนังทดลองสามารถวางบนที่วางผนังทดลองได้พอดี

ภาพที่ 3.18 การประกอบผนังทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2558



ภาพที่ 3.19 ส่วนประกอบของผนังทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2558.

3.4.4.3 ห้องทดลอง

ห้องทดลองจำลองขึ้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของห้องทดลองให้คงที่ โดยการทดลองแบ่งเป็นอุณหภูมิแบบปรับอากาศ และไม่ปรับอากาศ และเพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนที่ผ่านวัสดุเข้ามาในห้องทดลอง ลักษณะของห้องอยู่ในอาคารโรงประลองหลังคาสูง 8 เมตร ซึ่งปราศจากผลกระทบจากแสงอาทิตย์ภายนอกเข้ามากระทบกับแสงของดวงโคมจำลองแหล่งพลังงานของแสงอาทิตย์ ภายในเป็นห้องประชุม ประตูบานกระจก 2 ด้าน ขนาดห้อง 26.65 ตารางเมตร ดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ห้องทดลองก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.

โดยการติดตั้งห้องทดลอง มีการออกแบบโครงคร่าวผนังให้มีขนาดที่สามารถใส่เข้าไประหว่างประตูได้เพื่อแทนพื้นที่ผนัง นอกจากนี้ออกแบบให้ระยะห่างของ ผนังทดลองที่ 1 และผนังทดลองที่ 2 มีระยะห่างที่ เหมาะสมเพื่อไม่ให้แสงของดวง โคมจำลองพลังงานความร้อน จากดวงอาทิตย์รบกวนซึ่งกันและกัน นอกจากนี้ได้มีการติดกระดาษลึ่งที่ประตูกระจกอีกบานหนึ่งเพื่อไม่ให้แสงจากดวงโคมรบกวนในห้องทดลองด้านใน ดังภาพที่ 3.21 และทำการวัดระยะตั้งกล้อง บันทึกภาพการทดลอง และตั้งจุดวางกล้องให้มีระยะห่างจากผนังทดลองที่สนใจแล้วจึงนำผนังทดลองไปติดตั้งภายในกรอบประตูอีกด้านที่ทำหน้าที่เป็น ผนังทดลอง ดังภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.21 ห้องทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2559.



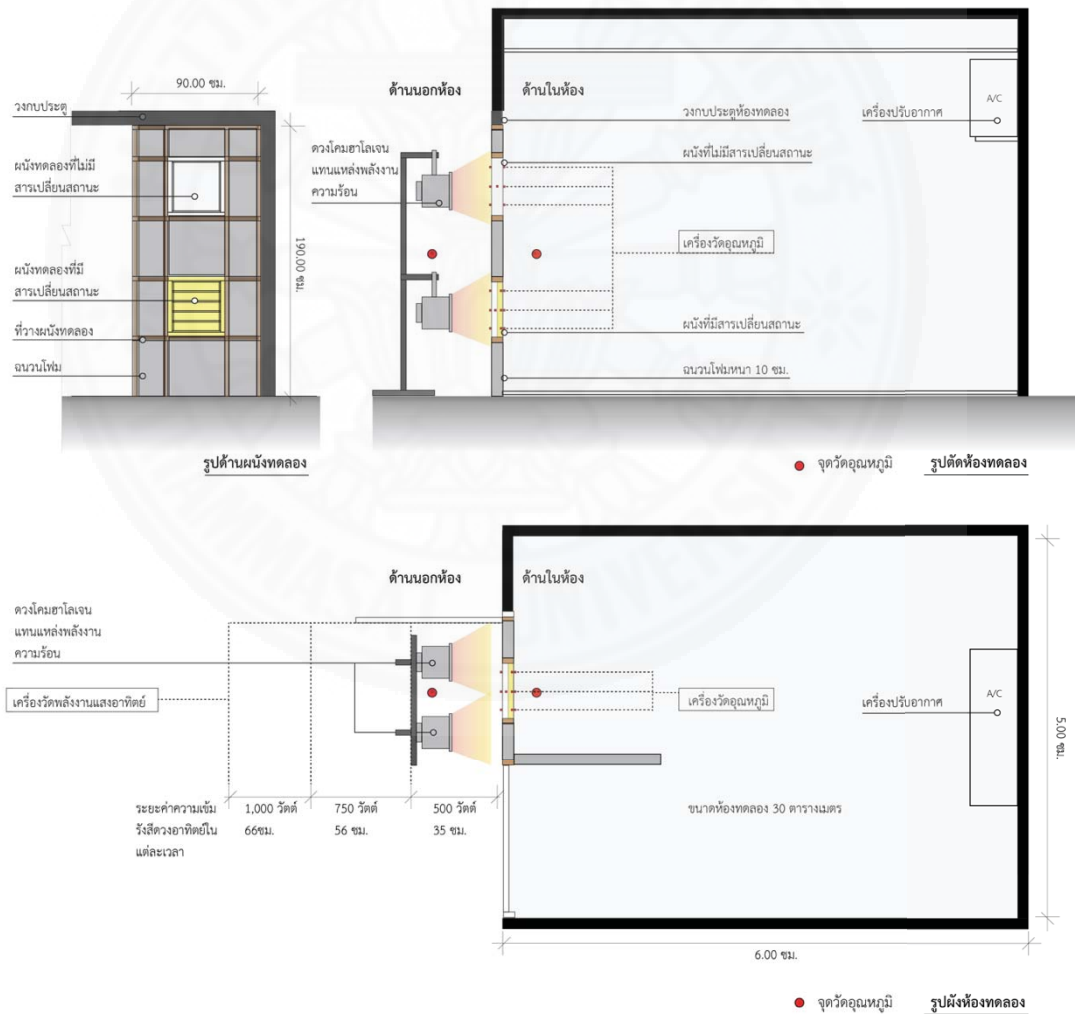
ภาพที่ 3.22 การตั้งกล้องบันทึกภาพ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2559.

จากนั้นจึงทำการนำโคมหนา 4 นิ้วใส่ระหว่างโครงคร่าวของผนังเพื่อไม่ให้พลังงานความร้อนจากดวงโคมเข้ามาสู่ในห้อง และรบกวนผนังทดลองบนและล่างก่อนติดตั้งผนังยิปซัมบอร์ด และกระจกใสเพื่อดูพฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะ และจึงทำการวัดระยะห่างของดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ เพื่อกำหนดระยะความเข้มแสงอาทิตย์ที่กระทบตผนังในแต่ละเวลา ดังภาพที่ 3.23 และทำการติดตั้งกำแพงโคมหนา 5 นิ้ว กว้าง 1 เมตร ระหว่างบานประตู และ ผนังทดลองเพื่อ

ป้องกันการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอกกับผนังทดลองสุดท้ายจึงทำการใส่สารเปลี่ยนสถานะ และติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.24



ภาพที่ 3.23 ภาพห้องทดลองภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง ด้านนอก (ซ้าย) และด้านใน (ขวา), จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2559.



ภาพที่ 3.24 รูปด้านผนังทดลอง รูปตัดผนังทดลอง (บน) และรูปผังห้องทดลอง (ล่าง), จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม 2559.

3.5 ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

ช่วงที่ 1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย (verification)

ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือก่อนที่จะนำมาวัดค่าข้อมูล โดยวัดความถูกต้องของเทอร์โมคัปเปิลก่อนการทดลอง นอกจากนี้วัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ โดยเทียบกับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนัง

ช่วงที่ 2 การวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ช่วงที่ 1 (application)

เมื่อเครื่องมือมีการวัดความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัยจึงทดลองการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารด้วยผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะโดยการบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตโดยได้มีการกำหนดเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

- การทดลองใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ โดยอ้างอิงรังสีแสงอาทิตย์จากกรมอุตุนิยมวิทยา
- การทดสอบนี้เป็นการจำลองสภาวะอากาศภายนอกห้องทดสอบเป็นสภาวะอากาศนิ่ง ไม่มีอิทธิพล จากการพาความร้อนจากลม (wind shield)
- อากาศภายในห้องทดสอบปรับอากาศถูกควบคุมด้วยอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 8.00 – 20.00 ซึ่งเป็นการจำลองการใช้งานในอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน เช่น สำนักงาน อาคารพาณิชย์ สถานศึกษา เป็นต้น
- ผนังที่จำลองมีช่องอากาศแบบระบบปิด (closed system)
- การทดลองต่อ 1 กรณี ตั้งแต่เวลา 6.00 น. ถึง 6.00 น. จนครบ 48 ชั่วโมง

โดยแบ่งการทดลองดังตารางที่ 3.4

ช่วงที่ 3 การวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ช่วงที่ 2 (application)

เมื่อทราบสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ในการวิจัยเพื่อการประยุกต์ช่วงที่ 1 จึงทำการวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ช่วงที่ 2 โดยพิจารณาการเปิดปิดของเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน โดยมีเงื่อนไขเหมือนช่วงที่ 1 แต่ ในการทดลองสนใจการเปิดปิดของเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกับช่วงที่ 1 คือ การเปิดเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน ตั้งแต่ 18.00 – 7.00 น. เพื่อจำลองการใช้งานอาคารที่มีการใช้งานของเครื่องปรับอากาศในเวลา กลางคืน เช่น ที่อยู่อาศัย เป็นต้น และการเปิดเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมงแทนอาคารที่มีการใช้งานของเครื่องปรับอากาศ 24 ชั่วโมง ได้แก่ โรงพยาบาล โรงแรม และสนามบิน เป็นต้น

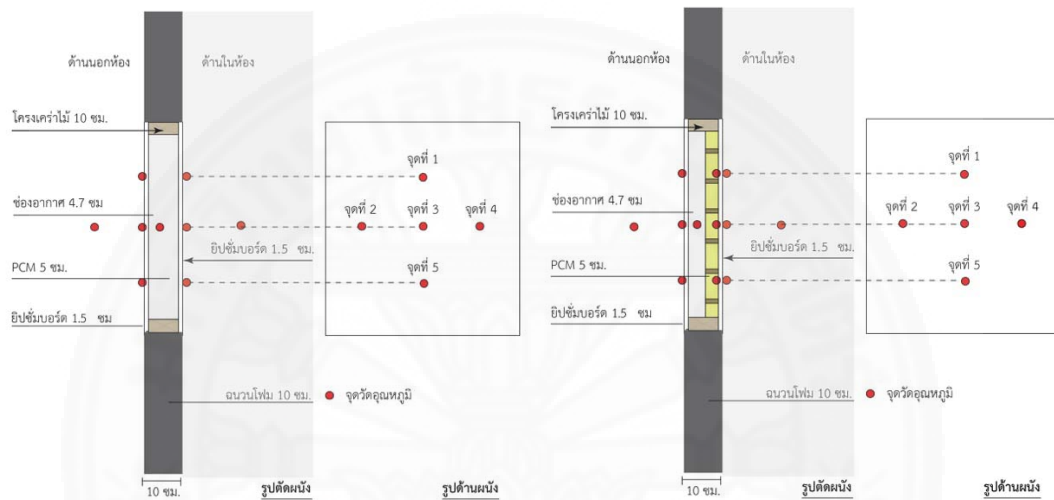
ตาราง 3.4

การวิจัยช่วงที่ 3 การวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้

ช่วงที่ 2 การวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้ (application)	
<p><u>ตัวแปรต้น</u> : อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะในผนังทดลอง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ผนังยิปซัมนอก - ช่องอากาศ - ผนังยิปซัมนใน 2. ผนังยิปซัมนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซัมนใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 25-27 องศาเซลเซียส 3. ผนังยิปซัมนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซัมนใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 29-30 องศาเซลเซียส 4. ผนังยิปซัมนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยน สถานะ - ผนังยิปซัมนใน โดยมีสารเปลี่ยนสถานะ SP31E ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 30-33 องศาเซลเซียส 	
<p><u>ตัวแปรตาม</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. อุณหภูมิผิวผนังด้านใน 2. พฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะ 	
<p><u>ตัวแปรควบคุม</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ความหนาผนังรวม 0.1 เมตร 2. ปริมาณสารเปลี่ยนสถานะ 3. เวลาปิดเปิดเครื่องปรับอากาศ 4. ห้องปรับอากาศที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 5. ความเข้มแสงรังสีดวงอาทิตย์ของดวงโคม 	
รวมทั้งสิ้น	4 กรณีศึกษา

หมายเหตุ. จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 20 ธันวาคม 2558.

การบันทึกผลการทดลองของงานวิจัย คือ การเก็บอุณหภูมิของชั้นผนังภายนอก อุณหภูมิภายในชั้น ช่องว่างอากาศ และอุณหภูมิของชั้นผนังภายใน โดยแต่ละชั้นจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล 5 จุด อุณหภูมิชั้นช่องว่างอากาศ 1 จุด อุณหภูมิภายในห้อง 1 จุด และอุณหภูมิภายนอกห้อง 1 จุด เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จแล้วจึงแปลงข้อมูลเป็นกราฟ เพื่อนำไปวิเคราะห์ และสรุปผลพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ จุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 2.25 นอกจากนี้ มีการบันทึกผลการทดลองของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะแบบวิดิทัศน์ และภาพถ่ายทุก ๆ 20 นาที ดังภาพที่ 2.26



ภาพที่ 3.25 จุดวัดอุณหภูมิของการทดลองผนังทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม 2559.



ภาพที่ 3.26 การบันทึกภาพวิดิทัศน์ในการทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 12 กุมภาพันธ์ 2559.

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้เก็บข้อมูล

4.1.1 การทดสอบความน่าเชื่อถือของหัววัดของอุณหภูมิ

ทดสอบเทอร์โมคัปเปิลต่อกับเครื่องวัดอุณหภูมิ (data logger) 32 สายวัด โดยนำสายมารวมกัน เพื่อไม่ให้เทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกันเพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน และลดความคลาดเคลื่อน ซึ่งการวัดความคลาดเคลื่อนจะใช้น้ำเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำซ้ำ ๆ เพื่อให้เทอร์โมคัปเปิลมีการตอบสนองที่น้ำร้อน น้ำปกติ และน้ำเย็น โดยพบว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส

4.1.2 การทดสอบความน่าเชื่อถือการวัดพลังงานแสงอาทิตย์จากดวงโคมจำลอง

แสงอาทิตย์

การติดตั้งดวงโคมเพื่อจำลองแหล่งพลังงานของแสงอาทิตย์ จากการวัดความเข้มรังสีของดวงโคมที่ส่องกระทบกับผนัง โดยอ้างอิงจากความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยบนพื้นผิวในกรุงเทพมหานคร จากกรมอุตุนิยมวิทยา ฯ ในการทดลองแบ่งจุดวัดรังสีดวงอาทิตย์จำลองออกเป็น แกน x และ y ห่างกัน 5 เซนติเมตรตามขนาดของผนังทดลอง และด้านมุมของผนัง 4 ด้าน และนำมาเฉลี่ยวัดที่กระทบผนังของช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งแบ่งความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็น 3 ค่า คือ 500 วัตต์ 750 วัตต์ และ 1000 วัตต์ ดังภาพที่ 4.1 และ 4.2 โดยการวัดระยะดวงโคมกับจุดต่าง ๆ ในผนังด้วยเครื่องวัดพลังงานแสงอาทิตย์โดยให้ ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่าค่าเฉลี่ยของผนังที่กำหนดพร้อมจัดระยะห่างของดวงโคมไม่ให้แสงจากดวงโคมรบกวนกัน ดังรูป 4.3 มีค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ 3 ค่า ดังต่อไปนี้

- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่	500	วัตต์
มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม	66	เซนติเมตร
ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา	07.00 - 10.00 น. และ 17.00-18.00	
- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่	750	วัตต์
มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม	56	เซนติเมตร
ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา	10.00 - 13.00 น. และ 16.00-17.00	

- | | | |
|--------------------------------------|------------------|-----------|
| - ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่ | 1000 | วัตต์ |
| มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม | 35 | เซนติเมตร |
| ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา | 13.00 - 16.00 น. | |



ภาพที่ 4.1 ตำแหน่งวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กับผนังจำลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 29 มกราคม 2559 (ซ้าย) และ 1 กุมภาพันธ์ 2559 (ขวา).



ภาพที่ 4.2 วิธีการวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์กับผนังทดลอง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2559.



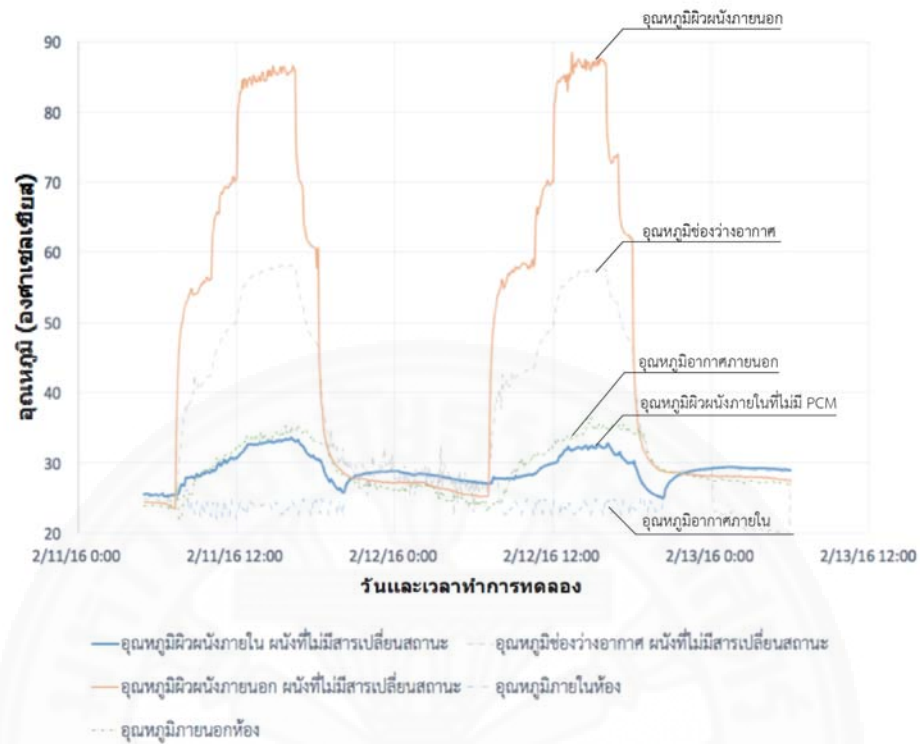
ภาพที่ 4.3 การจัดระยะดวงโคมไม่ให้แสงจากดวงโคมรบกวนกัน, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 7 กุมภาพันธ์ 2559.

4.2 การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน

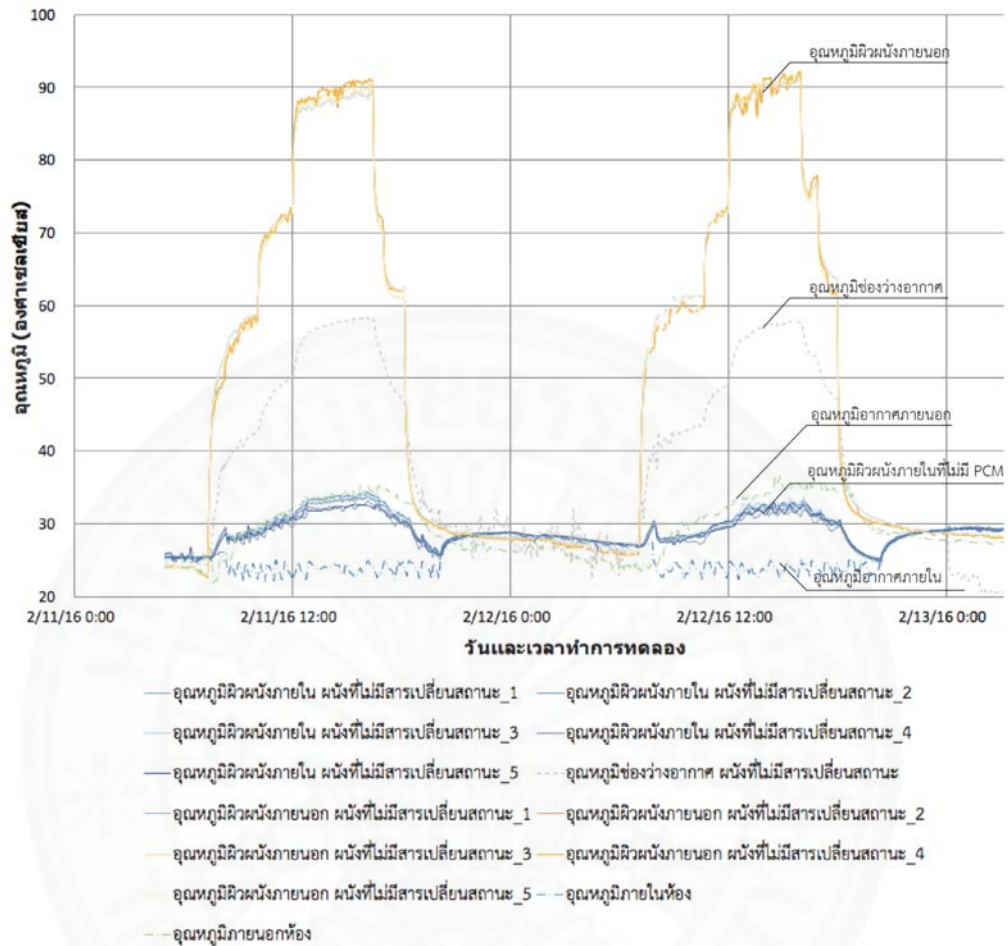
ผลการทดสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ คือ ผนัง ยิปซัมผิวนอก - ช่องอากาศ- ผนังยิปซัมผิวใน ณ ห้องปรับอากาศที่มีการปรับอากาศตั้งแต่วันที่ 8.00 – 20.00 น. พบว่าในระหว่างการเก็บข้อมูล (11 กุมภาพันธ์ - 13 กุมภาพันธ์) มีอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด	36 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 14.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 06.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	90 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 13.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในสูงสุด	58 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 15.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 21.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุด	35 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 15.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 21.00 น. – 07.00 น.

ผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะมีอุณหภูมิผิวผนังภายในสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามอุณหภูมิอากาศภายนอกที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ในเวลากลางวัน ขณะกลางวันคืนผิวผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงจนตามอุณหภูมิของอากาศภายนอก ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.4 และ อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีช่องว่างอากาศ 5 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.



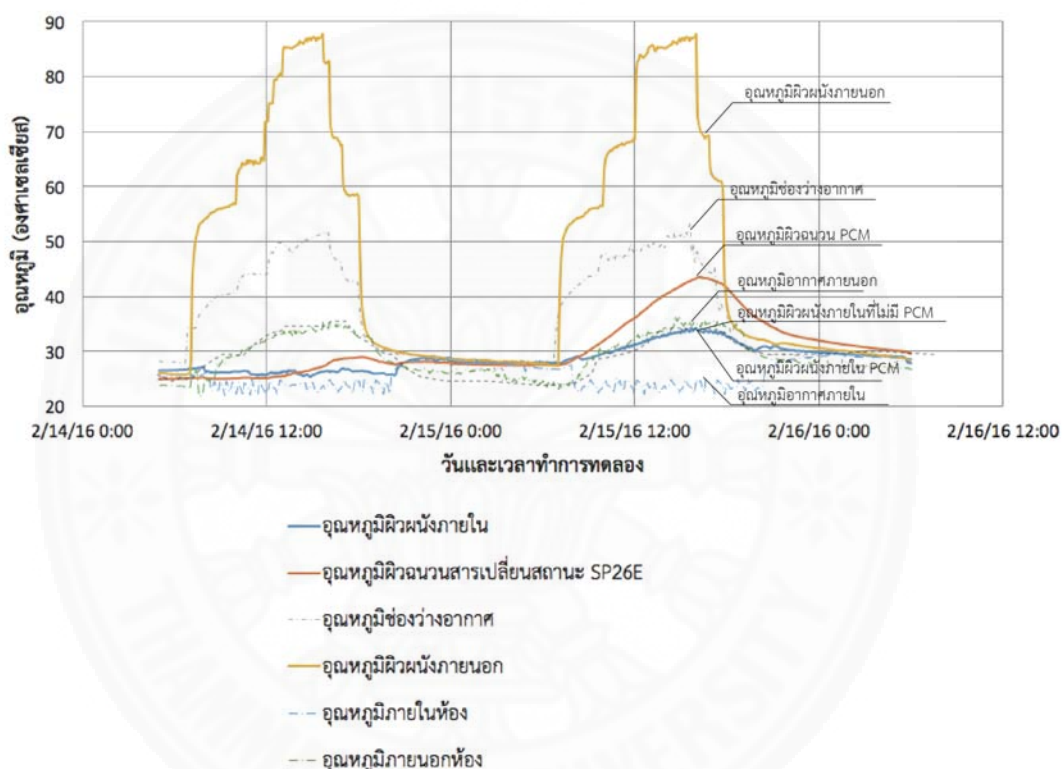
ภาพที่ 4.5 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ มีช่องว่างอากาศ 5 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.

4.3 การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E โดยมีจุดหลอมเหลวที่ 25-27 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศเวลากลางวัน

ผลการทดสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ คือ ผนัง ยิปซัมผิวนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยนสถานะ- ผนังยิปซัมผิวใน ณ ห้องทดลองปรับอากาศ เวลา 8.00 – 20.00 น. พบว่าในระหว่างการเก็บข้อมูล (14 กุมภาพันธ์ - 16 กุมภาพันธ์) มีอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

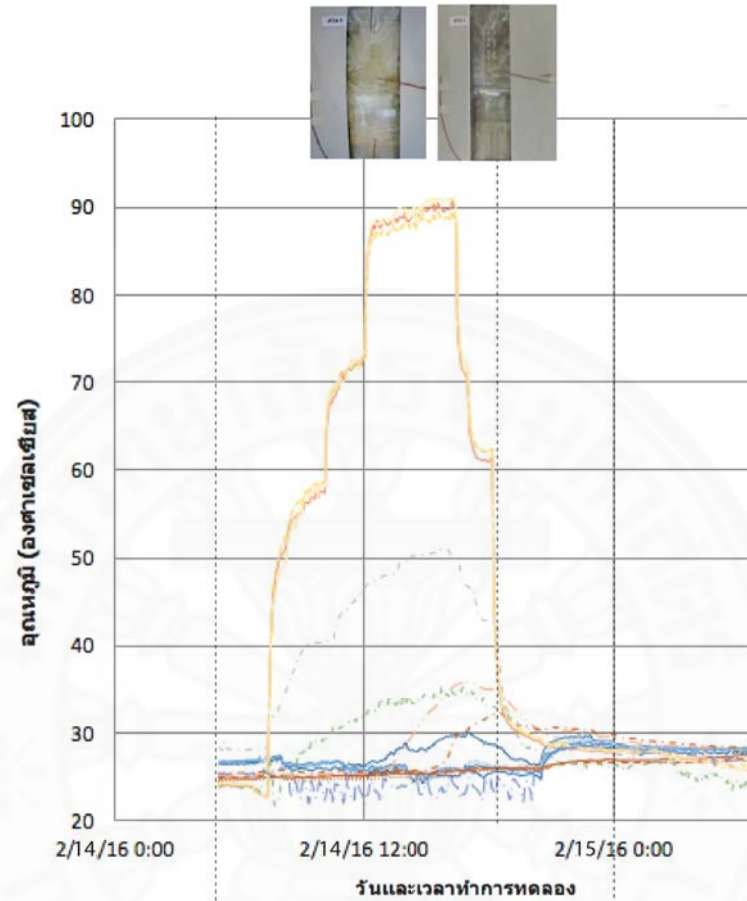
- อุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด 36 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 14.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำสุด 27 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 18.00 น. – 06.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด 90 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 13.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด 27 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในสูงสุด 55 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 16.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในต่ำสุด 27 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 02.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตต่ำสุด
- 26 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 6.00 น. – 15.00 น.
(ในการทดลองวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559)
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตสูงสุด 43 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 15.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด 26 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 09.00 น. – 12.00 น.
(ในการทดลองวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559)
- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด 27 องศาเซลเซียส
ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.

ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 26 พบว่าวันแรกของการทดลองผิวผนังภายในมีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งวัน และสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อนตั้งแต่เวลา 16.00 น. ทำให้อุณหภูมิของผิวผนังภายใน และอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะสูงขึ้นจนถึงวันที่สองของการทดลอง ส่งผลให้ในเวลากลางวันของการทดลองวันที่สองอุณหภูมิของผิวผนังภายในมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิอากาศภายนอก เพราะสารเปลี่ยนสถานะไม่สามารถคายตัวกลับเป็นของเหลวเพื่อใช้งานในวันถัดไปได้ ทำให้สารเปลี่ยนสถานะไม่สามารถกักเก็บความร้อนในรูปแบบของความร้อนแฝงอีกต่อไป ดังรูปที่ 4.6



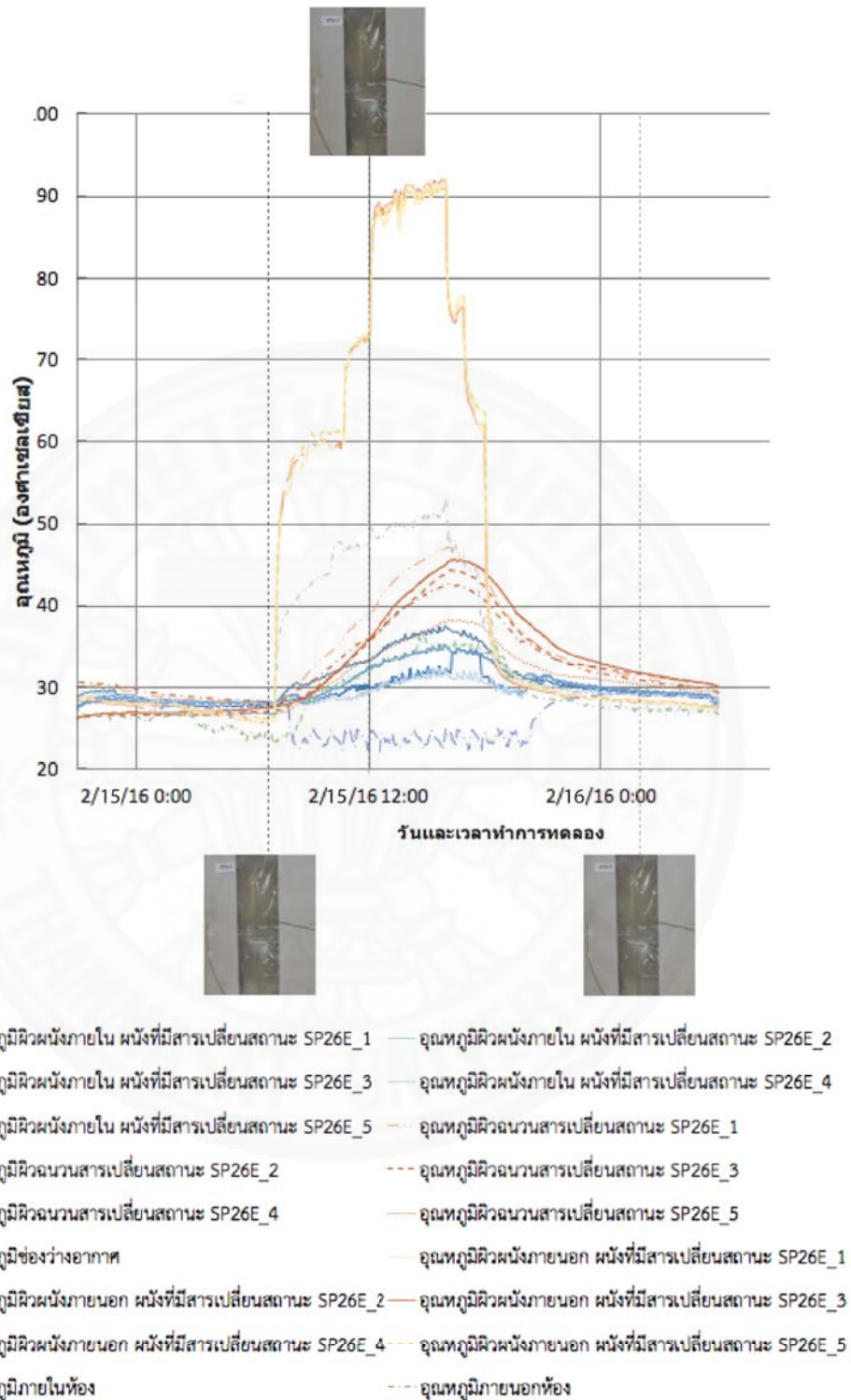
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 26 E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น – 16 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะในวันที่สองของการทดลอง พบว่า สารเปลี่ยนสถานะจะเริ่มหลอมเหลวตั้งแต่เวลา 12.00 น. เป็นต้นไป โดยสารเปลี่ยนสถานะจะเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลว และไม่กลับสภาพจากของเหลวเป็นของแข็งแม้มีการคายความร้อนในสารเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมของอากาศภายนอกในเวลากลางวันมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้สารเปลี่ยนสถานะไม่สามารถคืนตัวจากของแข็งเป็นของเหลวได้ ดังรูปที่ 4.7 – 4.11 ทำให้อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะเมื่อพิจารณาในวันที่สองมีอัตราการหลอมละลาย 100 % ตลอดทั้งวัน ดังรูปที่ 4.12

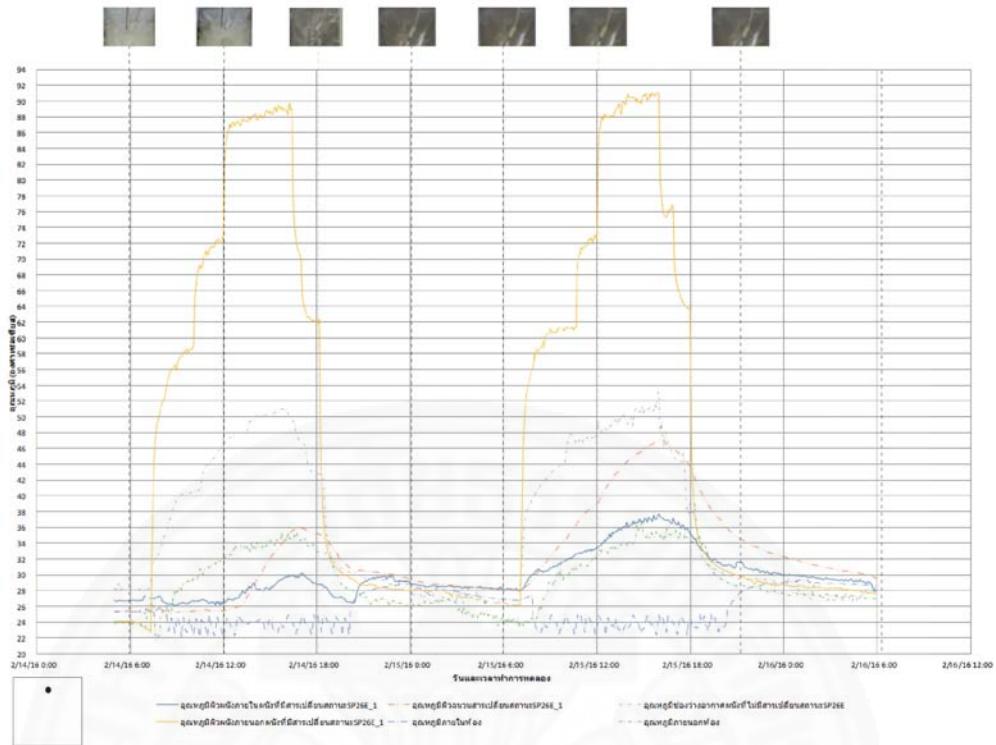


- อุณหภูมิผิวหนังภายใน หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_1
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_3
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_5
- อุณหภูมิผิวหนังนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_2
- อุณหภูมิผิวหนังนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_4
- อุณหภูมิช่องว่างอากาศ
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_2
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_4
- อุณหภูมิภายในห้อง
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_2
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_4
- อุณหภูมิผิวหนังนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_1
- อุณหภูมิผิวหนังนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_3
- อุณหภูมิผิวหนังนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_5
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_1
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_3
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก หน้าที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E_5
- อุณหภูมิภายนอกห้อง

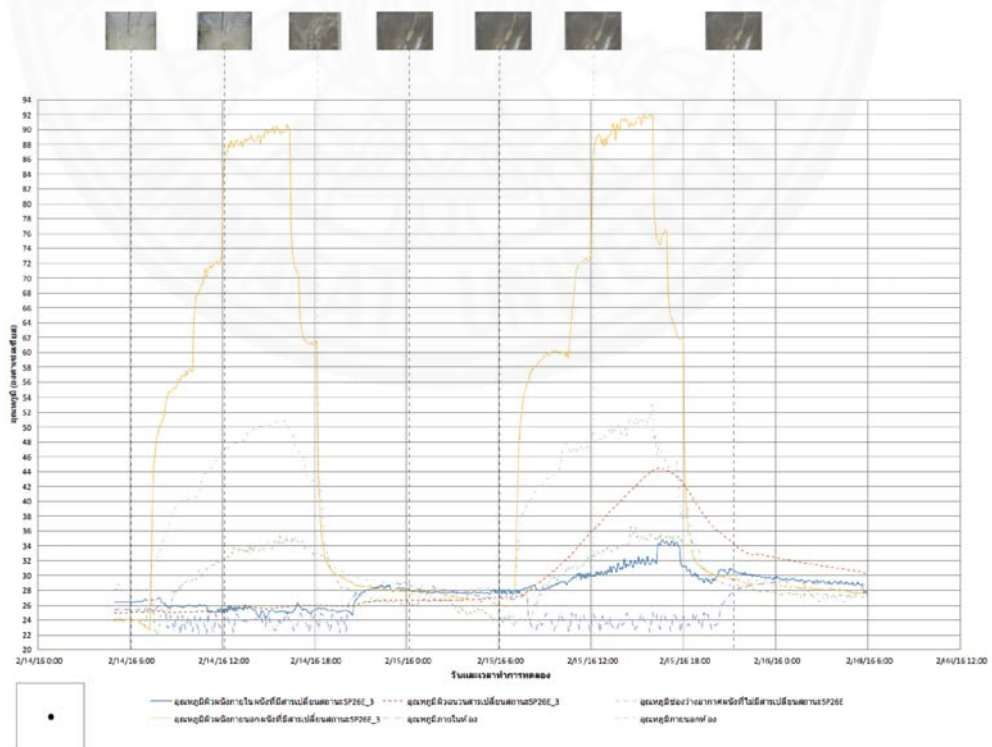
ภาพที่ 4.7 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในหน้าที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 26 E วันที่ 14 - 15 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดย ผู้วิจัย เมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559.



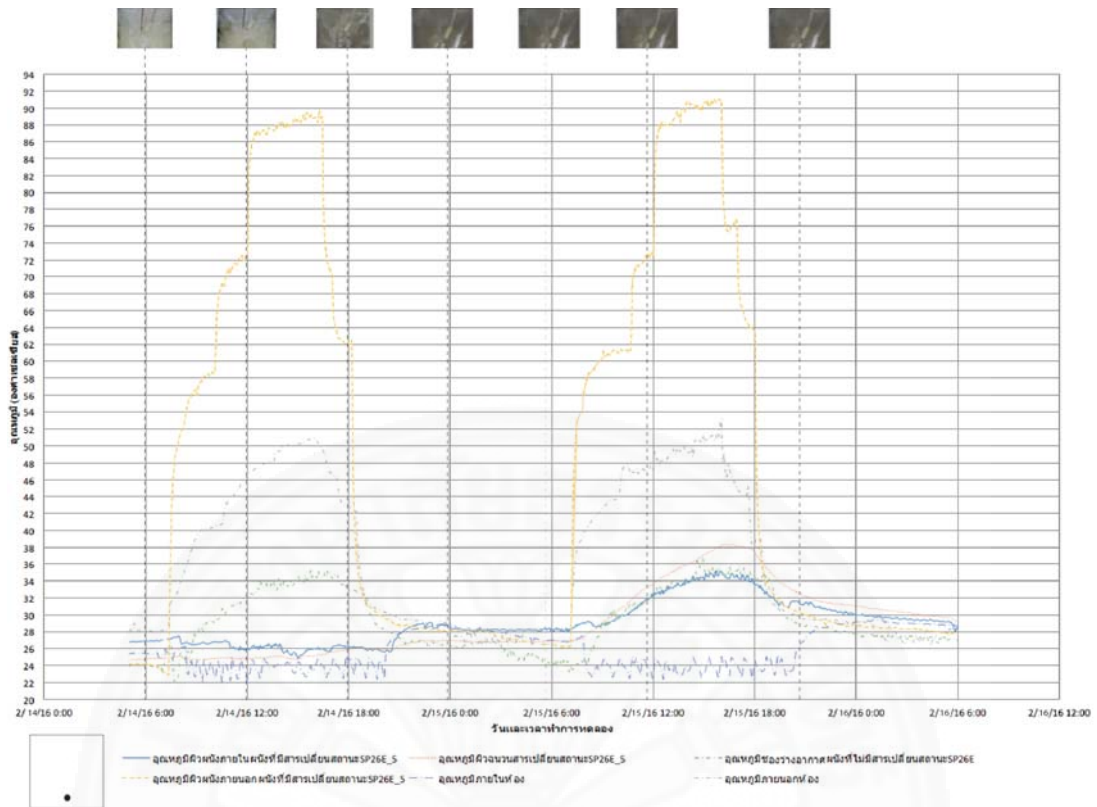
ภาพที่ 4.8 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในหนังสือที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 26 E วันที่ 15 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559.



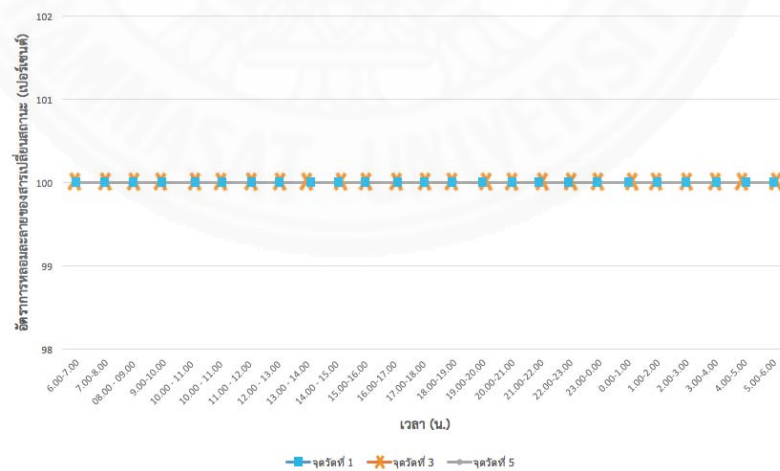
ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิจุดวัดที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิจุดวัดที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.11 อุณหภูมิจุดวัดที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.12 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP26E ที่บรรจุในผนังเบา ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 เมื่อพิจารณา วันที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.

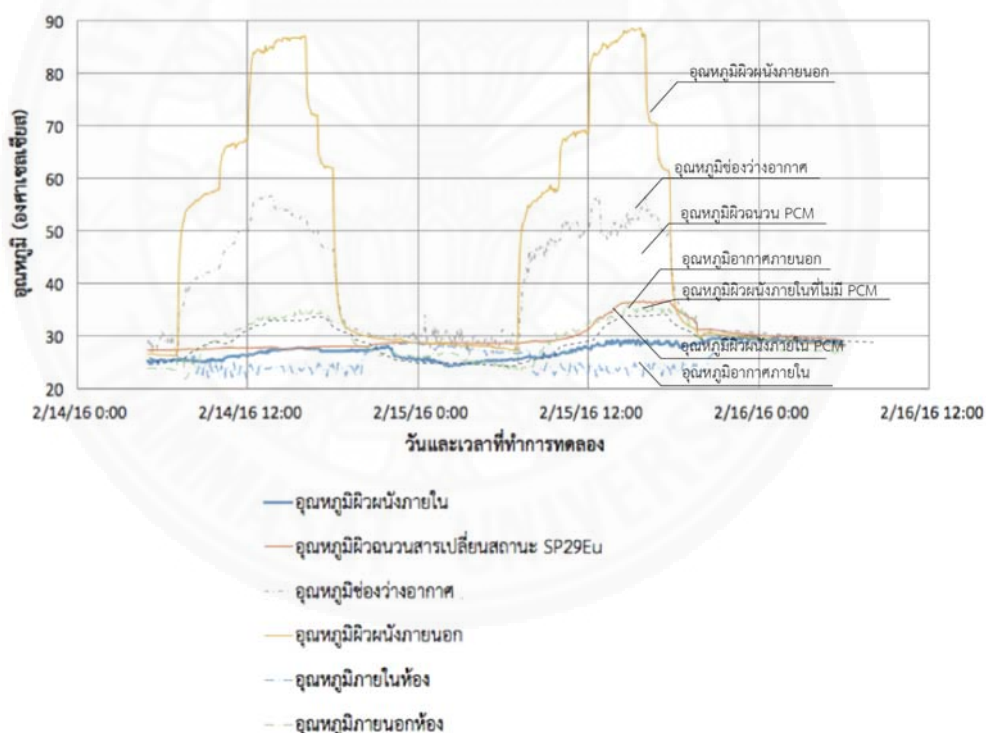
4.4 การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu โดยมีจุดหลอมเหลวที่ 29-30 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศเวลากลางวัน

ผลการทดสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ คือ ผนัง ยิปซัมผิวนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยนสถานะ- ผนังยิปซัมผิวใน ณ ห้องทดลองที่มีการปรับอากาศ ตั้งแต่เวลา 8.00 – 20.00 น. พบว่าในระหว่างการเก็บข้อมูล (11 กุมภาพันธ์ - 13 กุมภาพันธ์) มีอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด	36 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 14.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 06.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	91 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 13.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในสูงสุด	51 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 16.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 04.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุด	40 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 15.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตสูงสุด	
	35 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 7.00 น. – 18.00 น.
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตสูงสุด	
	29 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 12.00 น. – 21.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด	26 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 00.00 น. – 10.00 น.
	(ในการทดลองวันที่ 14-15 กุมภาพันธ์ 2559)

- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด 27 องศาเซลเซียส
 ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.

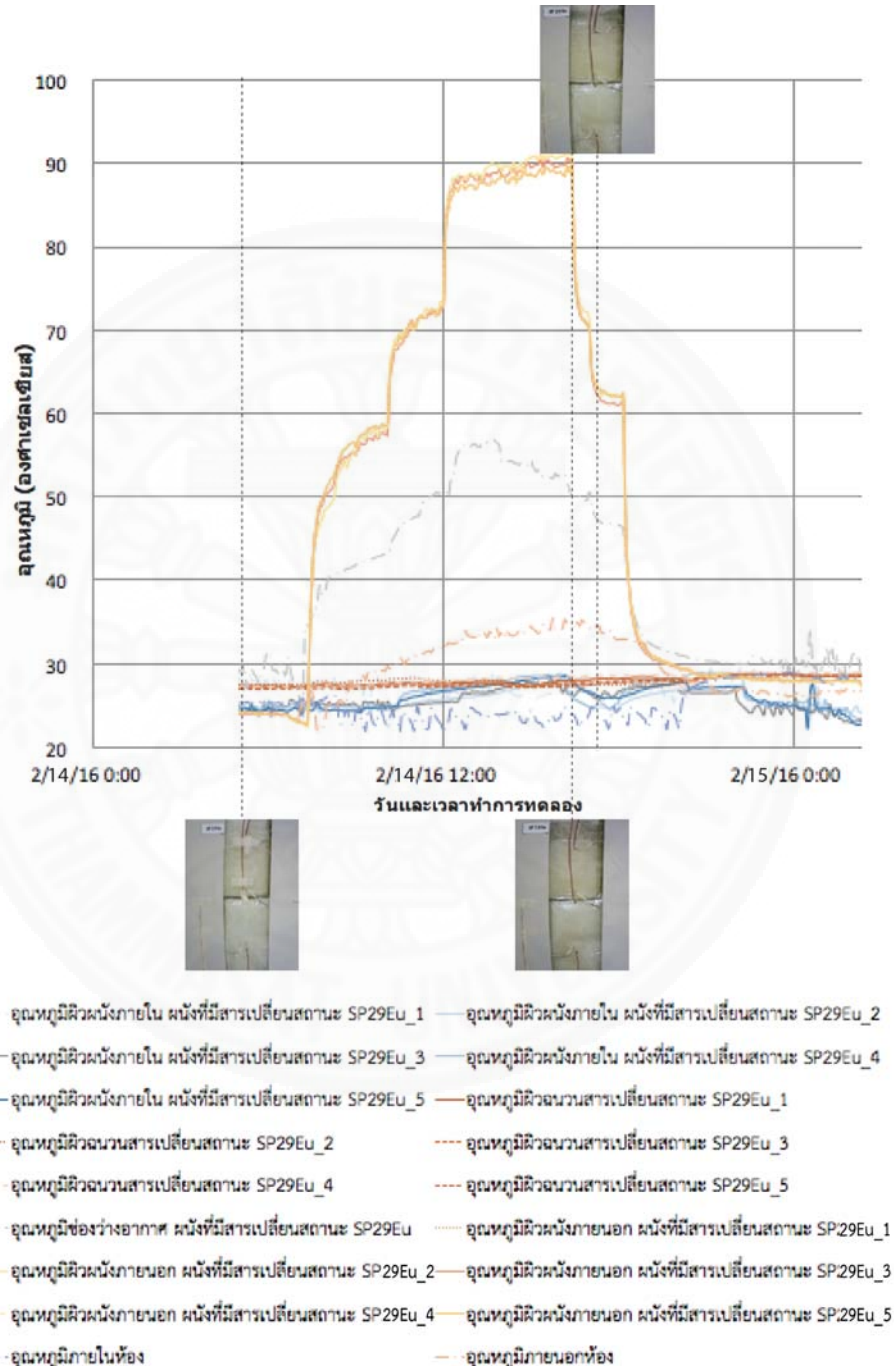
ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu พบว่าวันแรกของการทดลองอุณหภูมิผิวผนังภายในเวลา กลางวันมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิห้องปรับอากาศถึงเวลา 13.00 น. เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ หลังจากเวลา 13.00 น. พบว่าอุณหภูมิผิวผนังภายในสูงขึ้น เนื่องจากมีการคายตัวของสารเปลี่ยนสถานะจนถึงเวลา 20.00 น. อุณหภูมิผิวผนังภายในมีอุณหภูมิต่ำ ค่อย ๆ ลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิภายนอกห้อง และสารเปลี่ยนสถานะมีสภาพกลับเป็นของแข็งเพื่อพร้อมใช้งานในวันที่สอง โดยในวันที่สองอุณหภูมิของผิวผนังภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้น และคงที่ในเวลา 13.00 น. เช่นเดียวกับการทดลองวันแรก และอุณหภูมิของผิวผนังภายในสารเปลี่ยนสถานะมากขึ้น เนื่องจากการคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจนอุณหภูมิต่ำ ค่อย ๆ ลดลงเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายนอก ดังรูปที่ 4.13



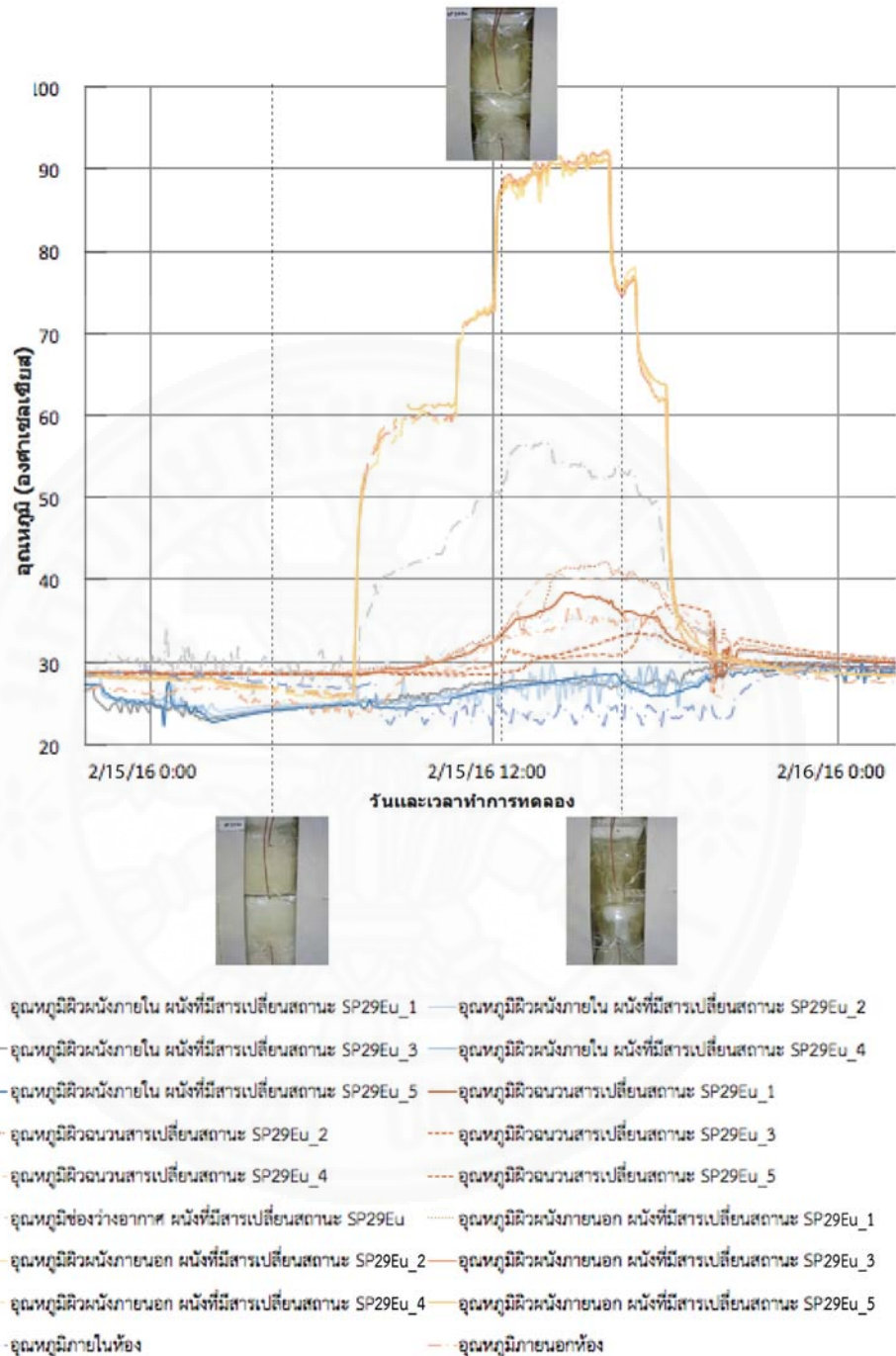
ภาพที่ 4.13 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 29 Eu ทำการเก็บข้อมูล เมื่อวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น – 16 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.

นอกจากนี้การหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะเมื่อพิจารณาในวันที่สองของการทดลองพบว่าสารเปลี่ยนสถานะจะมีการหลอมละลายในจุดวัดที่ 1 และ 3 เท่ากัน และมีการหลอมละลายในจุดวัดที่ 5 น้อยที่สุด เพราะความร้อนลอยสู่ด้านบนสูงขึ้นสูงเนื่องจากช่องว่างอากาศระหว่างสาร

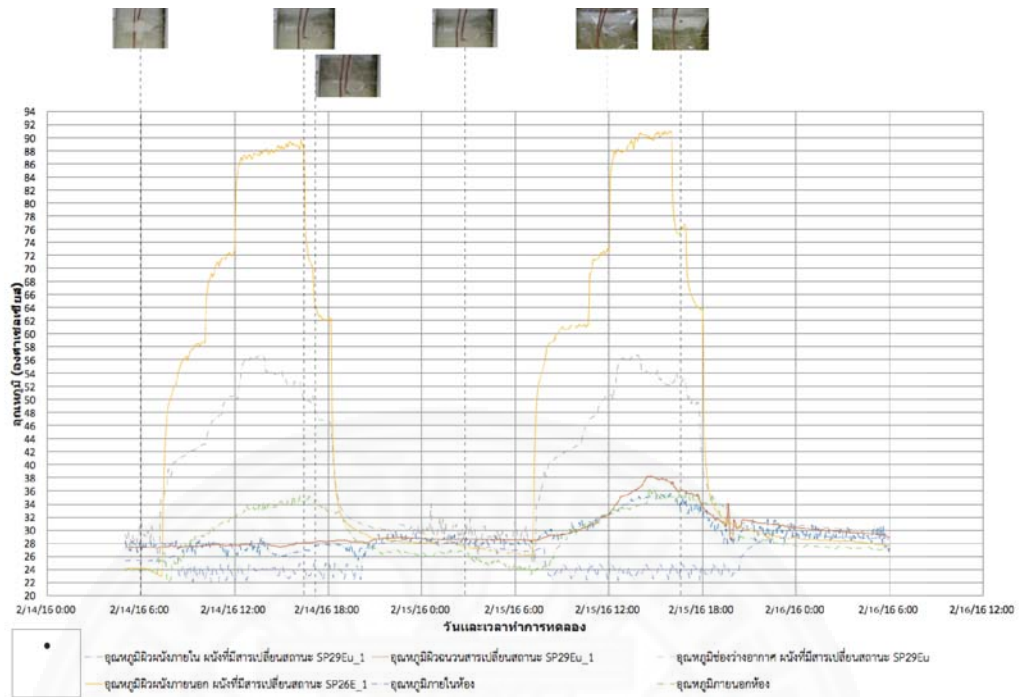
เปลี่ยนสถานะ ดังรูปที่ 4.14 – 4.19 นอกจากนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในเวลากลางคืนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดหลอมเหลวเล็กน้อย ทำให้เมื่อคายความร้อนในวันที่สองสารเปลี่ยนสถานะสามารถคายตัวเปลี่ยนเป็นของแข็งได้เพียงครั้งเดียว และมีอัตราการหลอมละลาย 50% ดังรูปที่ 4.19



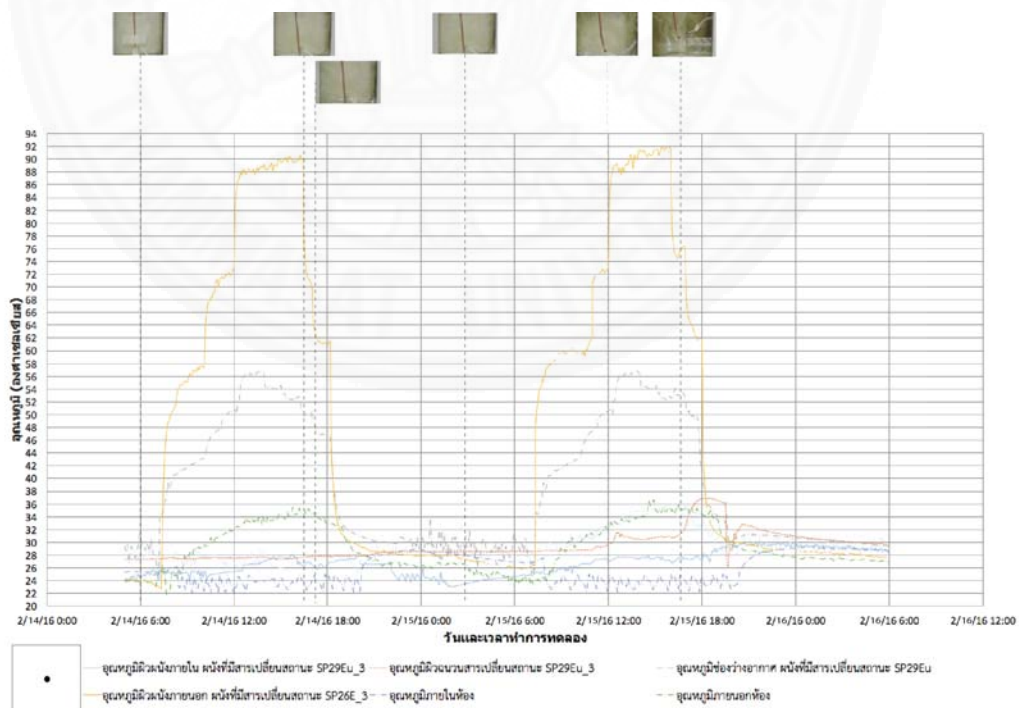
ภาพที่ 4.14 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 29 Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 – 15 กุมภาพันธ์ 2559 , จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.



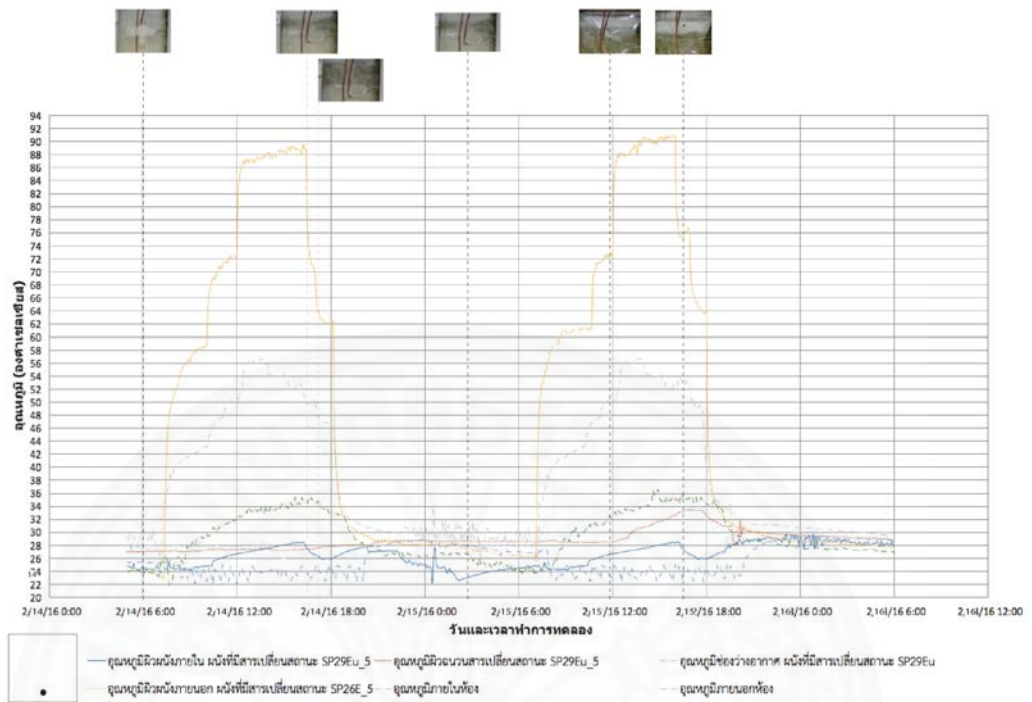
ภาพที่ 4.15 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 29 Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.



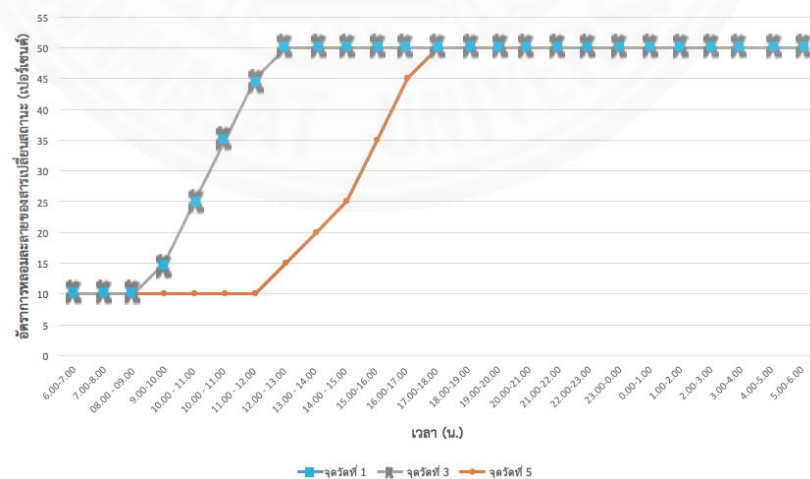
ภาพที่ 4.16 อุณหภูมิจุดวัดที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำ โดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.17 อุณหภูมิจุดวัดที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำ โดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.18 อุณหภูมิจุดวัดที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 14 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



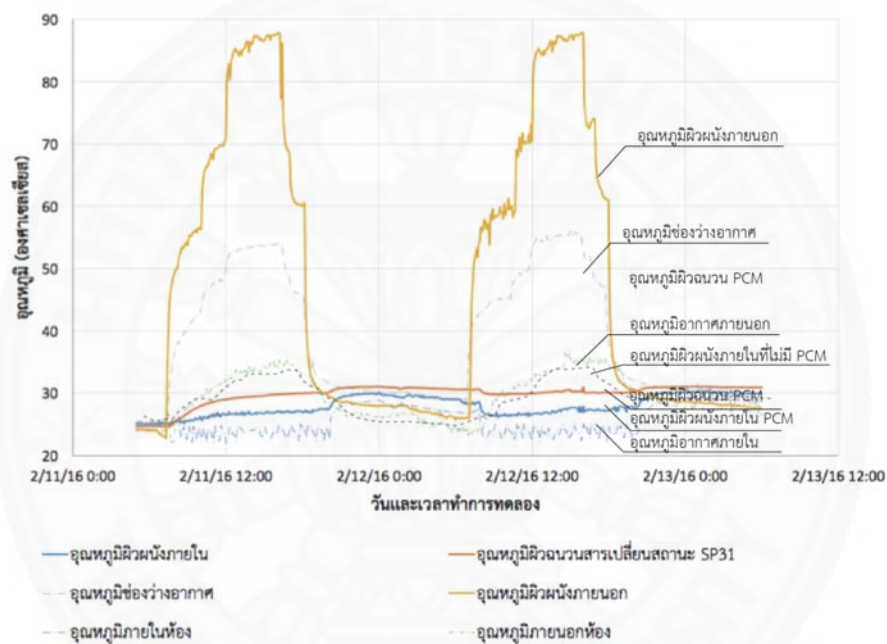
ภาพที่ 4.19 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ที่บรรจุในผนังเบา ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 เมื่อพิจารณาวันที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 15 - 16 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.

4.5 การทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP30 โดยมีจุดหลอมเหลวที่ 30-33 องศาเซลเซียส ในห้องปรับอากาศเวลากลางวัน

ผลการทดสอบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ คือ ผนัง ยิปซัมผิวนอก - ช่องอากาศ - สารเปลี่ยนสถานะ- ผนังยิปซัมผิวใน ณ ห้องปรับอากาศตั้งแต่เวลา 8.00 – 20.00 น. พบว่าในระหว่างการเก็บข้อมูล (11 กุมภาพันธ์ - 13 กุมภาพันธ์) มีอุณหภูมิต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

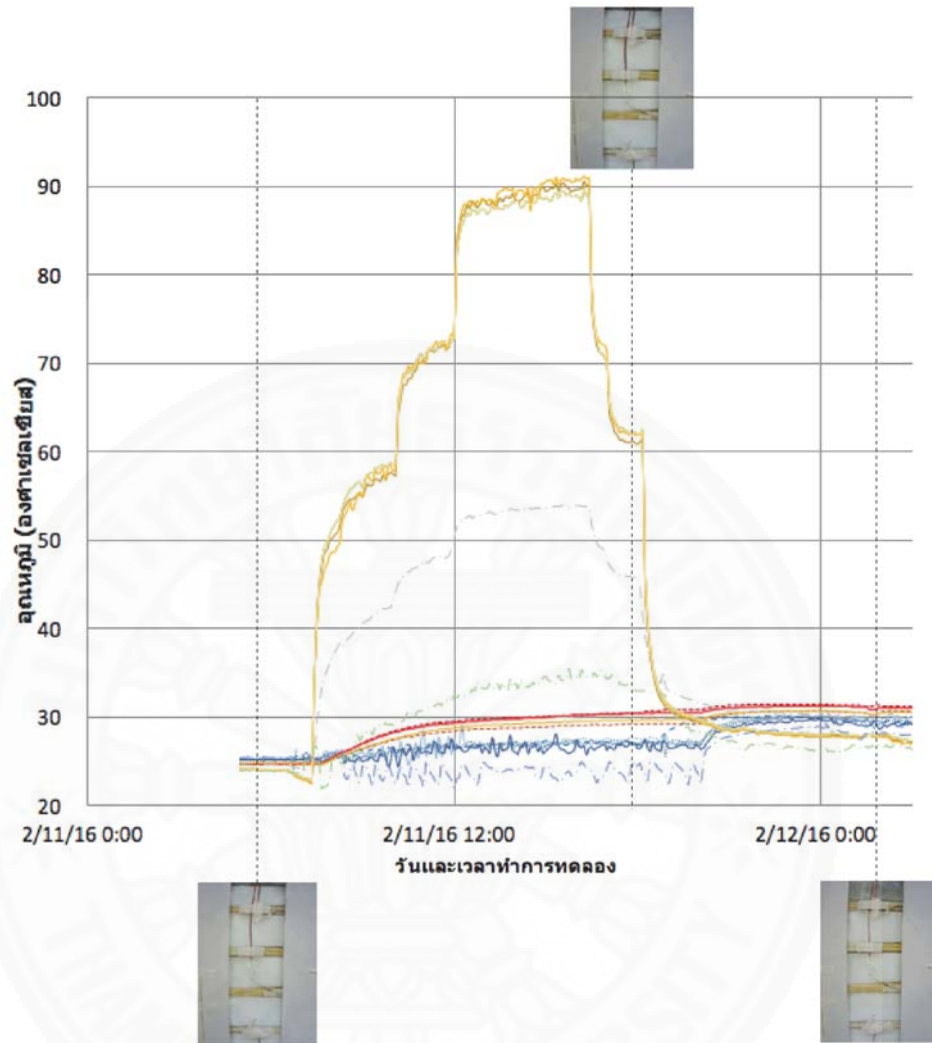
- อุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด	36 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 14.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 06.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	91 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 13.00 น. – 16.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 20.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในสูงสุด	55 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 16.00 น. – 17.00 น.
- อุณหภูมิช่องอากาศภายในต่ำสุด	27 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตสูงสุด	
-	33 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 7.00 น. – 18.00 น.
- อุณหภูมิผิวสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมคโครแคปซูลเลตสูงสุด	
-	29 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 07.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในสูงสุด	33 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 18.00 น. – 19.00 น.
- อุณหภูมิผิวผนังภายในต่ำสุด	26 องศาเซลเซียส
	ในช่วงเวลา 07.00 น. – 18.00 น.

ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 พบว่าอุณหภูมิของผนังภายใน และอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งวันจนถึงเวลา 18.00 น. อุณหภูมิของผิวผนังภายในสูงขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะเพิ่มขึ้น เพราะสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก เพื่อเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว และมีอุณหภูมิต่ำ ๆ ลดลงจนถึงเวลา 6.00 น. ในวันที่สองอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ และอุณหภูมิผิวผนังภายในมีอุณหภูมิคงที่จนถึงเวลา 18.00 น. เหมือนการทดลองวันแรก และมีการคายความร้อนตั้งแต่เวลา 18.00 น. เช่นเดียวกันจนอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะค่อย ๆ ลดลงเท่ากับสิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 4.20



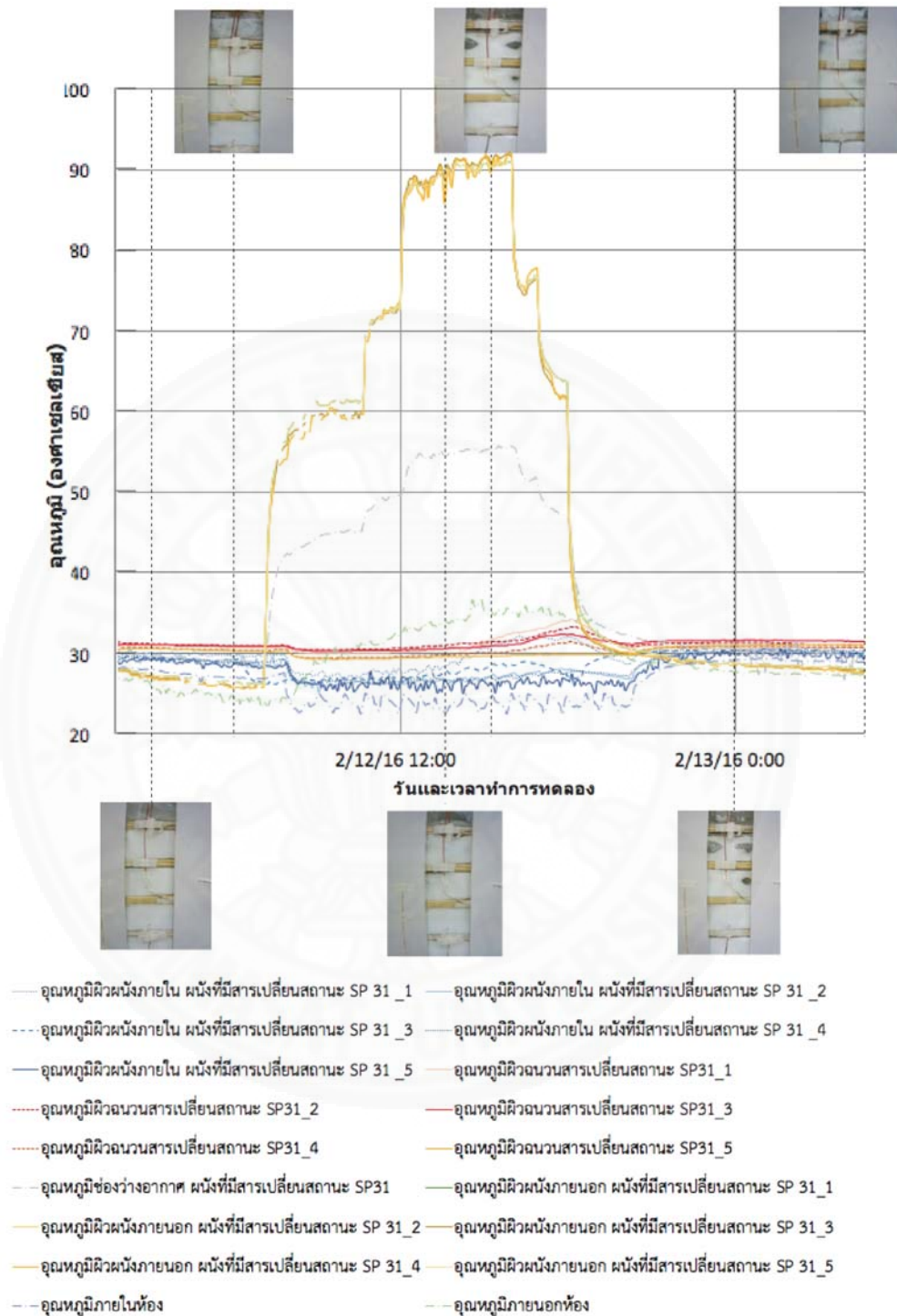
ภาพที่ 4.20 อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนต่าง ๆ ในผนังที่เบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น – 13 กุมภาพันธ์ 2559 เวลา 06.00 น. เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยใช้ดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.

นอกจากนี้การหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะเมื่อพิจารณาในวันที่สองของการทดลอง พบว่าสารเปลี่ยนสถานะจะมีการหลอมละลายในจุดวัดที่ 1 มากที่สุด รองลงมาคือจุดวัดที่ 3 และ 5 ตามลำดับ เพราะความร้อนลอยสู่ด้านล่างขึ้นสู่ที่สูงเนื่องจากช่องว่างอากาศระหว่างสารเปลี่ยนสถานะ ดังรูปที่ 4.21 – 4.25 นอกจากนี้เนื่องจากอุณหภูมิอากาศในเวลากลางคืนมีอุณหภูมิแตกต่างกับอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะทำให้การหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะสามารถกลับเป็น 0 % เมื่อเวลา 6.00 น. เพื่อพร้อมทำงานในวันถัดไป ดังรูปที่ 4.26

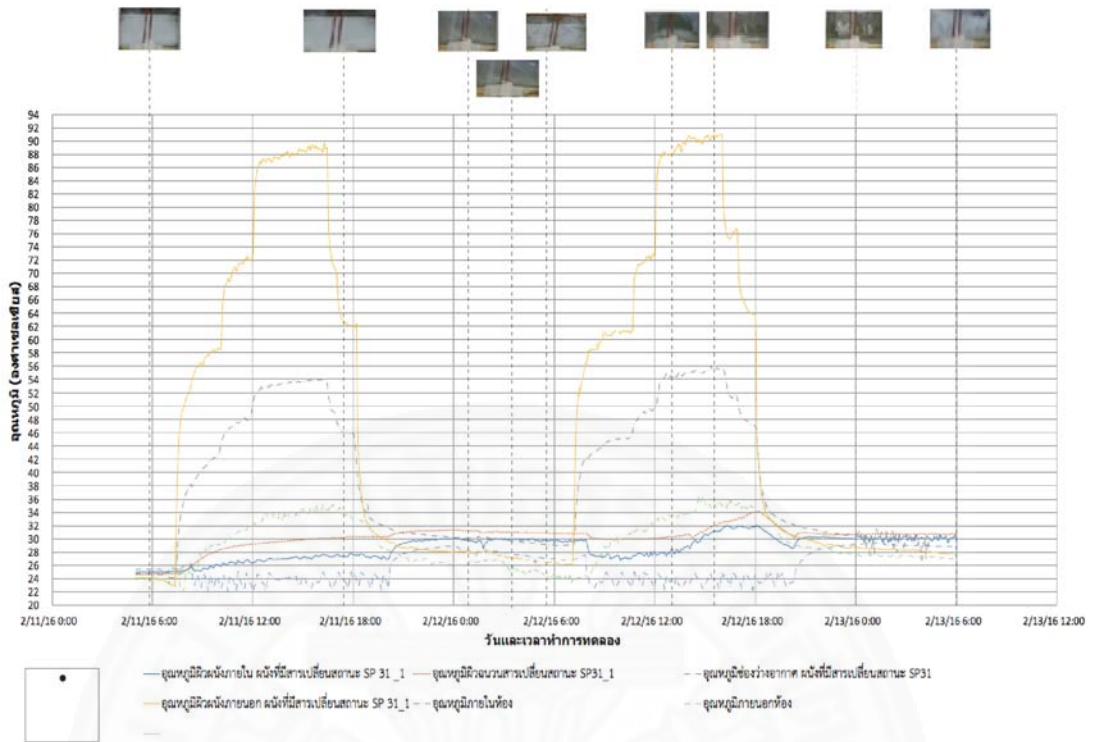


- อุณหภูมิผิวหนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5
- อุณหภูมิผิวหนังฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_2
- อุณหภูมิผิวหนังฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_4
- อุณหภูมิช่องว่างอากาศ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4
- อุณหภูมิภายในห้อง
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2
- อุณหภูมิผิวหนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4
- อุณหภูมิผิวหนังฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_1
- อุณหภูมิผิวหนังฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_3
- อุณหภูมิผิวหนังฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_5
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3
- อุณหภูมิผิวหนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5
- อุณหภูมิภายนอกห้อง

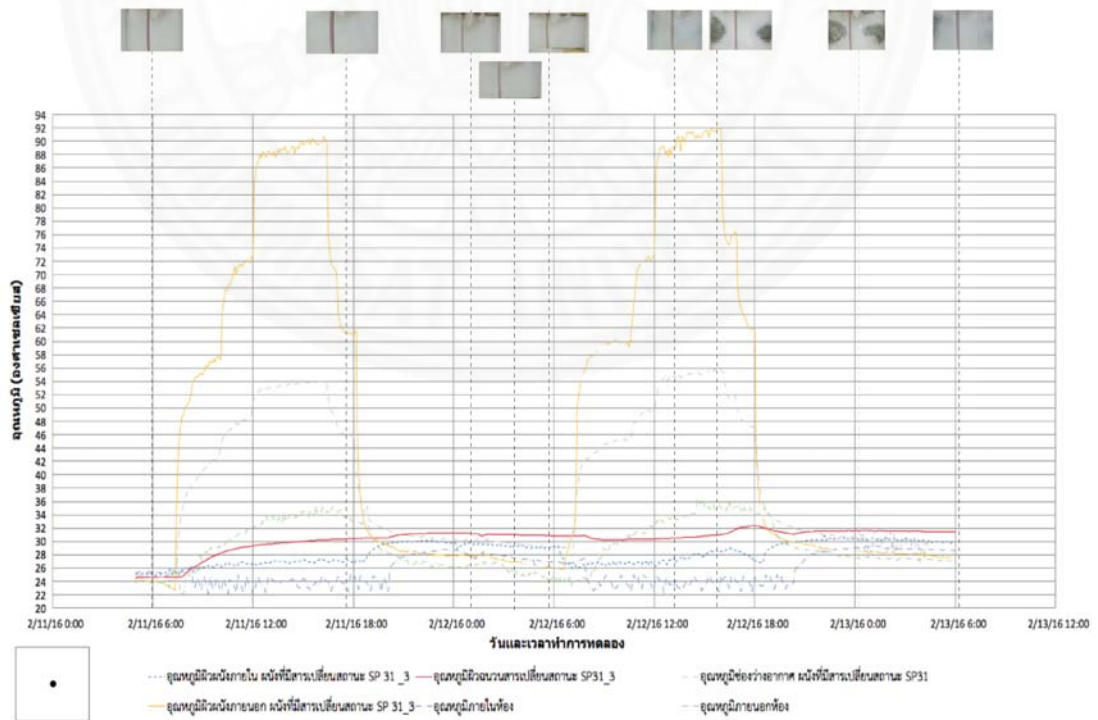
ภาพที่ 4.21 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31 โดยมีจุด หลอมเหลว 30-33 องศาเซลเซียส ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 - 12 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.



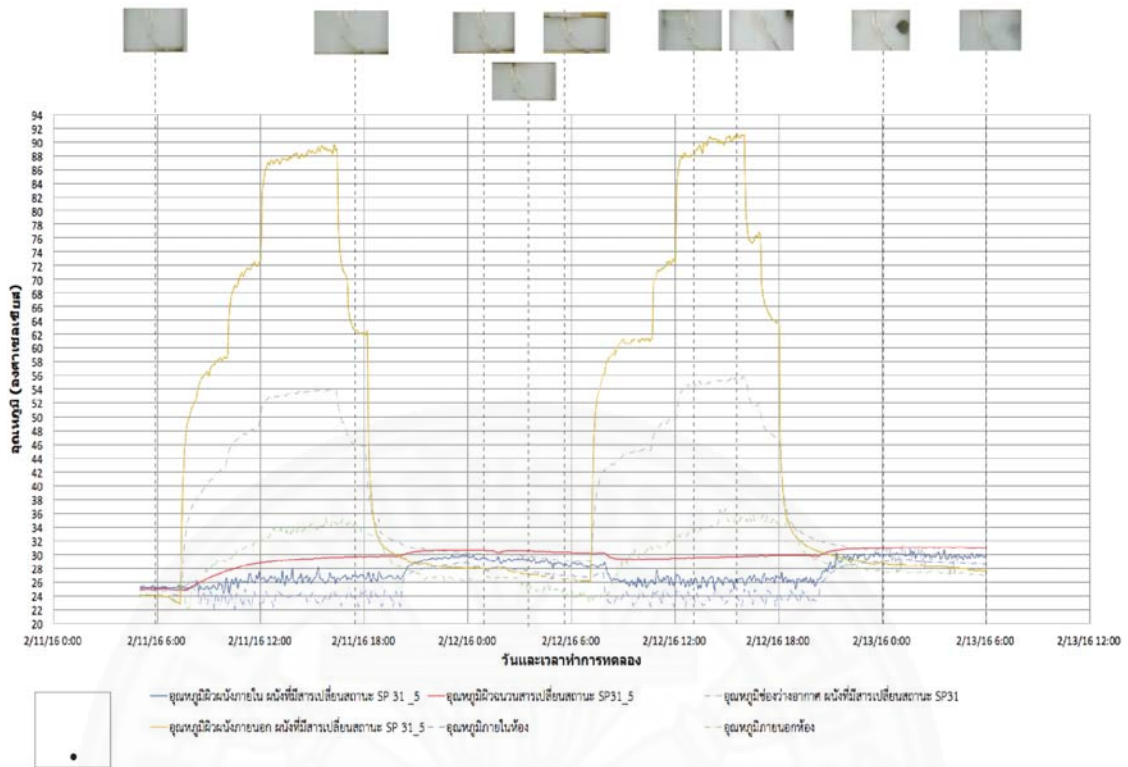
ภาพที่ 4.22 พฤติกรรมทางความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31 โดยมีจุด หลอมเหลว 30-33 องศาเซลเซียส ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 12 - 13 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2559.



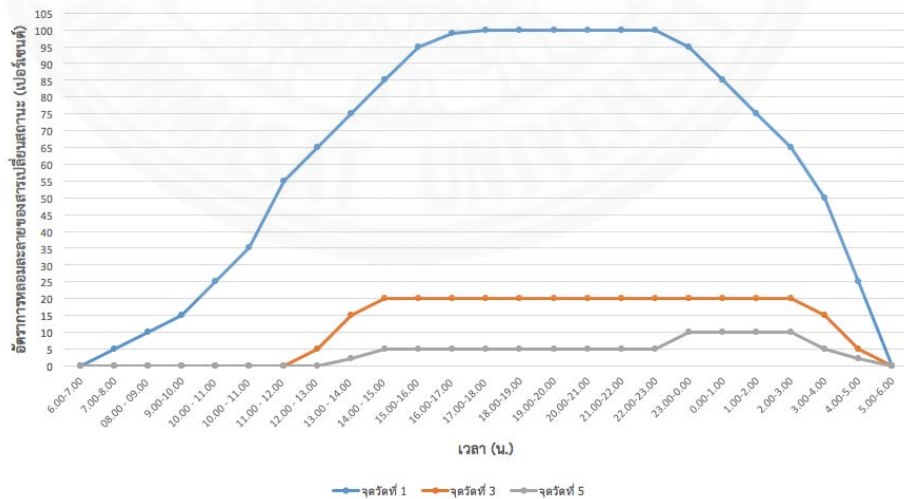
ภาพที่ 4.23 อุณหภูมิจุดวัดที่ 1 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 - 13 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.24 อุณหภูมิจุดวัดที่ 3 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 - 13 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



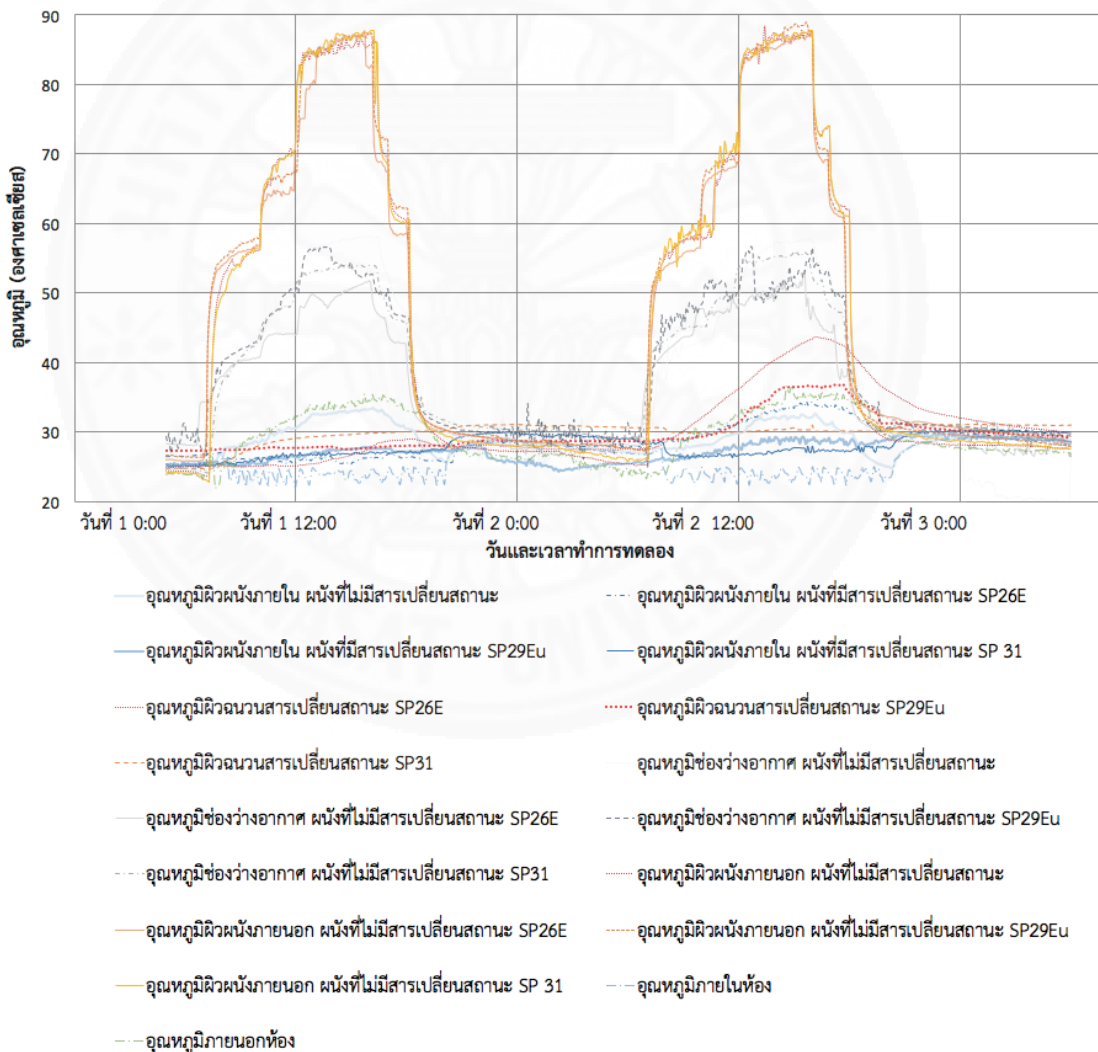
ภาพที่ 4.25 อุณหภูมิจุดวัดที่ 5 และพฤติกรรมสารเปลี่ยนสถานะในผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ทำการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 11 - 13 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.



ภาพที่ 4.26 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ที่บรรจุในผนังของเบ้า ณ จุดวัดที่ 1 3 และ 5 ทำการเก็บข้อมูล เมื่อวันที่ 11 - 13 กุมภาพันธ์ 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.

4.6 การเปรียบเทียบผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะและผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ อุณหภูมิจุดหลอมเหลว ต่าง ๆ ในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน

จากการทดลอง ณ ห้องทดลองที่มีการปรับอากาศตั้งแต่เวลา 8.00 – 20.00 น. พบว่าเมื่อเปรียบเทียบจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะพบว่า สารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวนต่ำ มีศักยภาพในการดูดความร้อนเข้าทุกทิศทางมากกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้อุณหภูมิของผิวผนังภายในวันที่เริ่มต้นมีอุณหภูมิที่ต่ำแต่เมื่อภายหลังปิด เครื่องปรับอากาศพบว่าการคายตัวกลับสู่สถานะของแข็งที่ช้ากว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูง เพราะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมทำให้การคายตัวกลับเป็นของแข็งยากกว่า สารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิสูง ดังภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.27 อุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E SP29Eu และ SP31 เปรียบเทียบกับผนังไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2559.

ในขณะที่เดียวกันสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวสูงสุดจะเกิดการคายตัวเป็นของแข็งได้เร็วกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีอุณหภูมิที่ผิวผนังไม่เกินอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของตนเอง คือ ไม่เกิน 30 – 33 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิผิวผนังภายในที่สูงขึ้นจะเกิดขึ้นตั้งแต่เวลา 19.00 น. และค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงเรื่อย ๆ จนเท่ากับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยในเวลา 7.00 – 19.00 น. มีอุณหภูมิผิวผนัง ภายในเฉลี่ยที่ 27 องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกับอุณหภูมิผิวผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในช่วงที่อุณหภูมิสูงสุด 8 องศาเซลเซียส

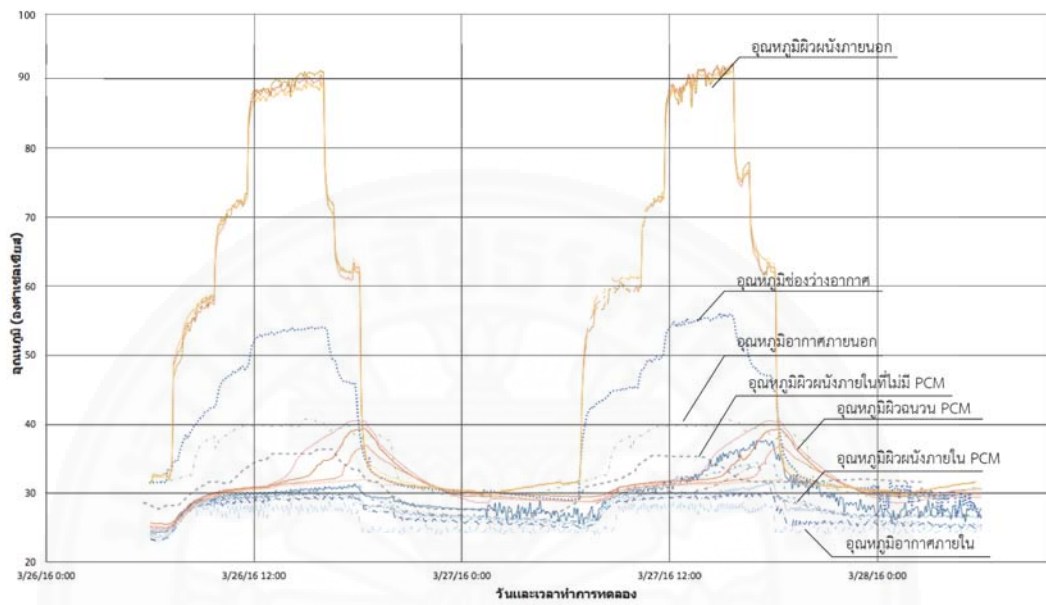
นอกจากนี้เนื่องจากผนังทดลองที่จำลองมีช่องว่างอากาศในผนังทดลอง จึงเกิดปรากฏการณ์การลอยตัวของอากาศร้อน (stratification effect) ทำให้ความร้อนลอยตัวสู่ที่ต่ำไปสู่ที่สูงทำให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ด้านบนมีค่าสูงมากกว่าสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ด้านล่าง และส่งผลให้พฤติกรรมการหลอมละลายจากของสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ด้านบนมากกว่าด้านล่าง

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในห้องปรับอากาศเวลากลางคืน

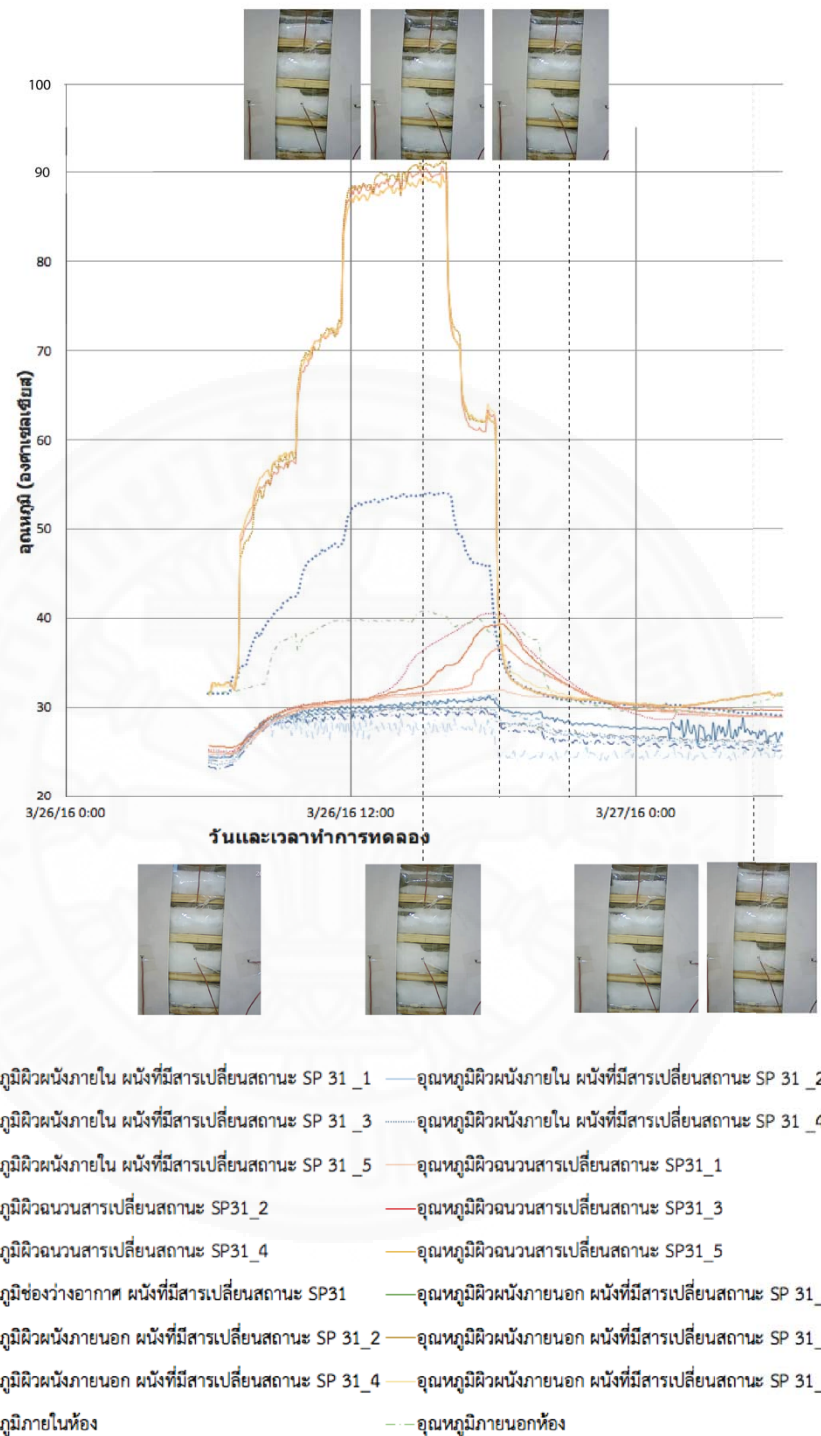
จากการทดลองผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองที่มีการปรับอากาศตั้งแต่เวลา 18.00 น. – 07.00 น. พบว่าผิวผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศเวลากลางคืนมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 5 – 6 องศาเซลเซียส ในขณะที่เวลากลางคืนเมื่อมีการเปิดเครื่องปรับอากาศจะมีอุณหภูมิผิวผนังภายในที่มากกว่าผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 2 – 3 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อม ดังภาพที่ 5.1 จากภาพที่ 5.2– 5.3 ซึ่งเป็นภาพขยายของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะพบว่าในช่วงเวลาไม่ปรับอากาศในเวลากลางวันสารเปลี่ยนสถานะจะมีการเปลี่ยนสภาพจากของแข็งเป็นของเหลวรวดเร็วกว่ากรณีห้องที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน 2 – 3 ชั่วโมง เพราะมีการดูดความร้อนเข้ามาในสารเปลี่ยนสถานะมากกว่ากรณีที่ปรับอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการดูดความร้อนทั้งในห้องทดลอง และนอกห้องทดลอง ในขณะที่เดียวกันในเวลากลางคืนการคืนสภาพของสารเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งจะช้ากว่ากรณีห้องที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน และห้องที่มีการปรับอากาศ 24 ชั่วโมง 3 – 4 ชั่วโมง เนื่องจากมีการดูดพลังงานความร้อนสะสมในตัวสารเปลี่ยนสถานะที่มากกว่าห้องที่ปรับอากาศในเวลากลางวัน และห้องที่มีการปรับอากาศ 24 ชั่วโมง

นอกจากนี้การหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะพบว่า การหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 1 มากกว่าจุดที่ 3 และ 5 ตามลำดับ เนื่องจากผนังทดลองที่จำลองมีช่องว่างอากาศทำให้เกิดการลอยตัวของความร้อนจากที่ต่ำไปที่สูง ส่งผลให้อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ชั้นบนมากกว่าชั้นล่างเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะในช่วงเวลากลางวัน ดังภาพที่ 5.4 – 5.7

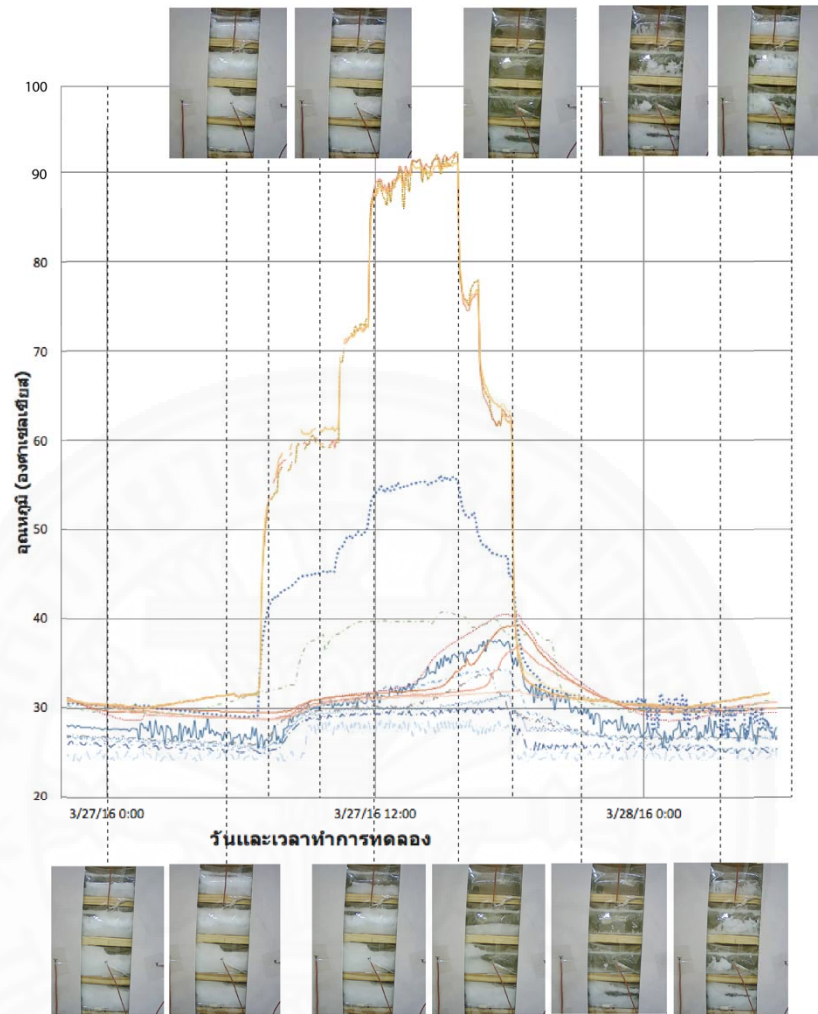


- | | |
|---|--|
| — อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1 | — อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2 |
| - - - อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3 | — อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4 |
| — อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5 | — อุณหภูมิผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_1 |
| · · · · · อุณหภูมิผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_2 | — อุณหภูมิผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_3 |
| · · · · · อุณหภูมิผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_4 | — อุณหภูมิผิวฉนวนสารเปลี่ยนสถานะ SP31_5 |
| - - - อุณหภูมิช่องว่างอากาศ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 | — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1 |
| — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2 | — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3 |
| — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4 | — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5 |
| - - - อุณหภูมิภายในห้อง | — อุณหภูมิภายนอกห้อง |

ภาพที่ 5.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลอง ปรับอากาศ ณ เวลา 18.00-7.00 น. เมื่อวันที่ 26 – 28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.

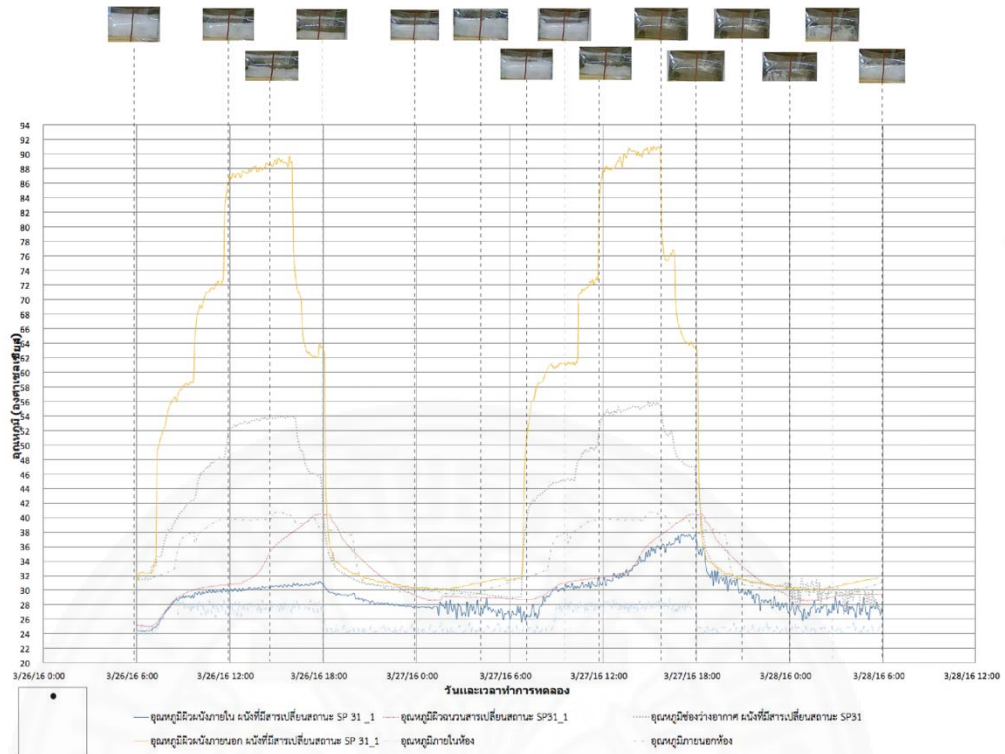


ภาพที่ 5.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 น. วันที่ 26-27 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.

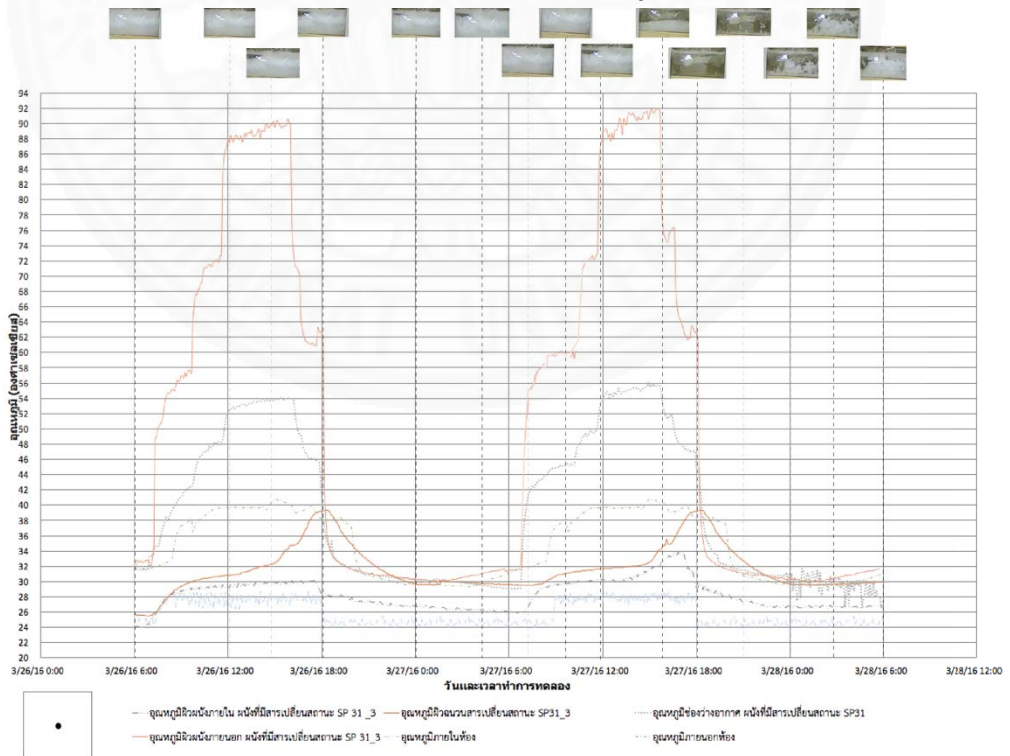


- อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1 — อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2
- อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3 --- อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4
- อุณหภูมิผิวผนังภายใน ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5 — อุณหภูมิผิวนวสารเปลี่ยนสถานะ SP31_1
- อุณหภูมิผิวนวสารเปลี่ยนสถานะ SP31_2 --- อุณหภูมิผิวนวสารเปลี่ยนสถานะ SP31_3
- อุณหภูมิผิวนวสารเปลี่ยนสถานะ SP31_4 --- อุณหภูมิผิวนวสารเปลี่ยนสถานะ SP31_5
- อุณหภูมิช่องว่างอากาศ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 --- อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_1
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_2 — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_3
- อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_4 — อุณหภูมิผิวผนังภายนอก ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP 31_5
- อุณหภูมิภายในห้อง --- อุณหภูมิภายนอกห้อง

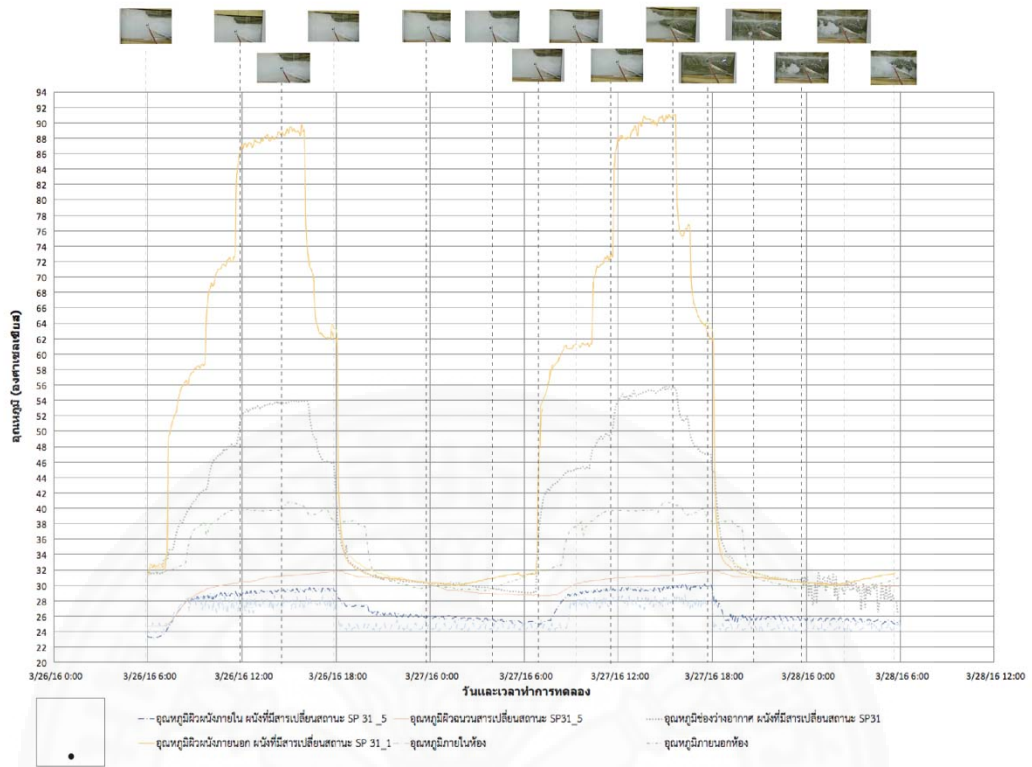
ภาพที่ 5.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 นวันที่ 27-28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



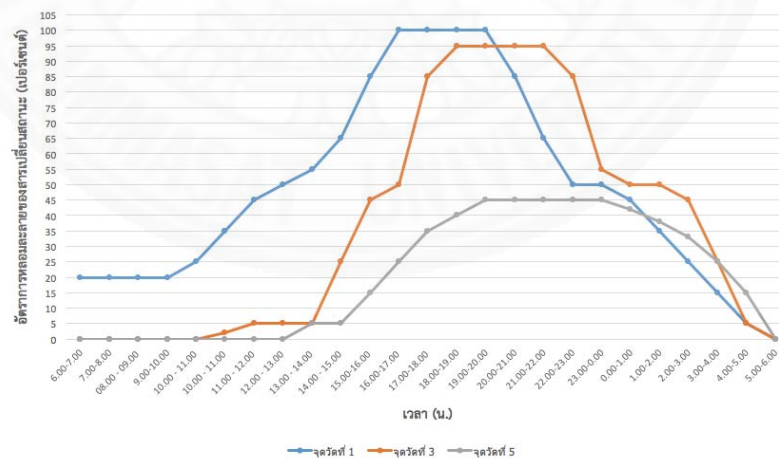
ภาพที่ 5.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 นวันที่ 26-28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



ภาพที่ 5.5 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 3 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 นวันที่ 26-28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



ภาพที่ 5.6 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 นวันที่ 26-28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



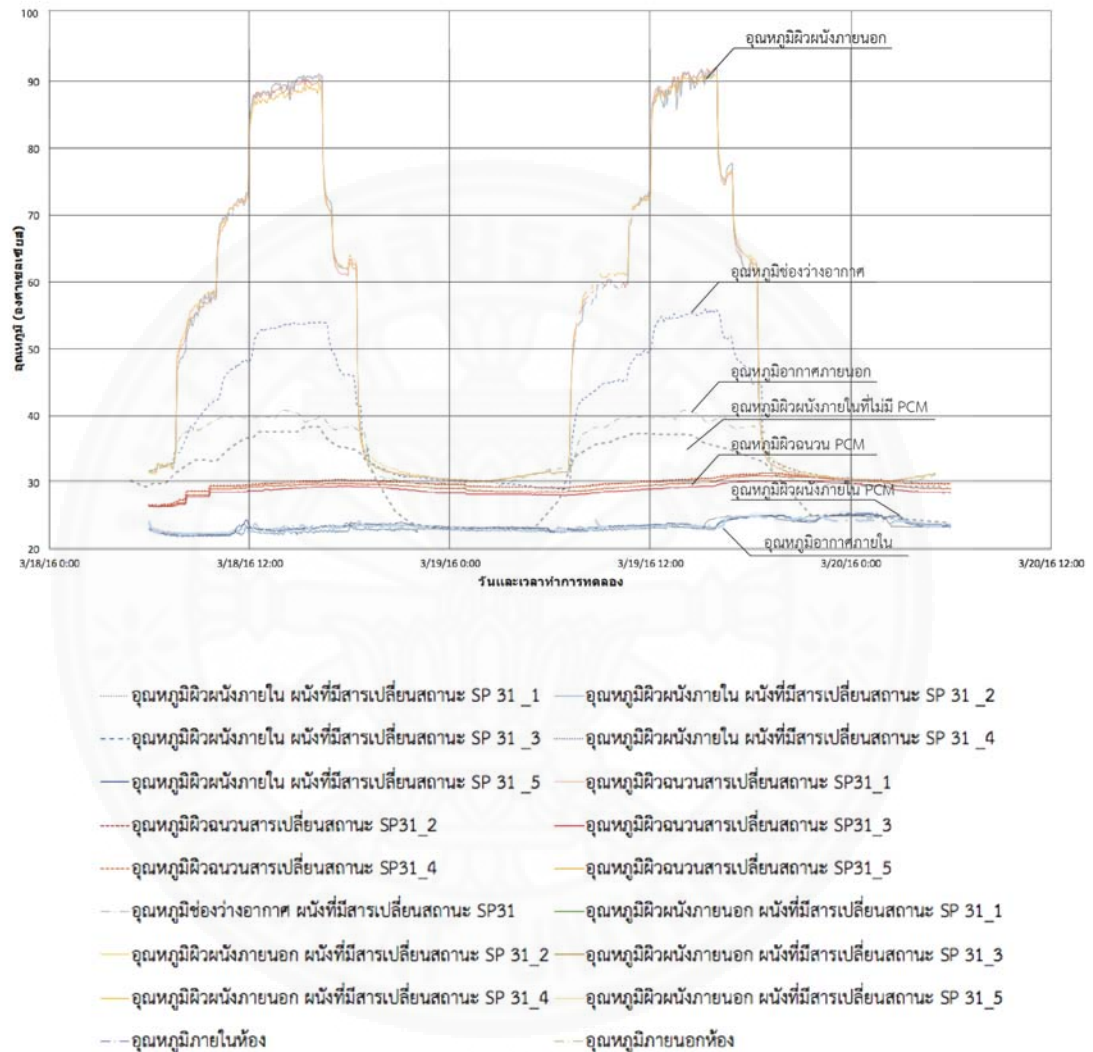
ภาพที่ 5.7 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 3 และ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ ณ เวลา 18.00 - 7.00 นวันที่ 27-28 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.

บทที่ 6

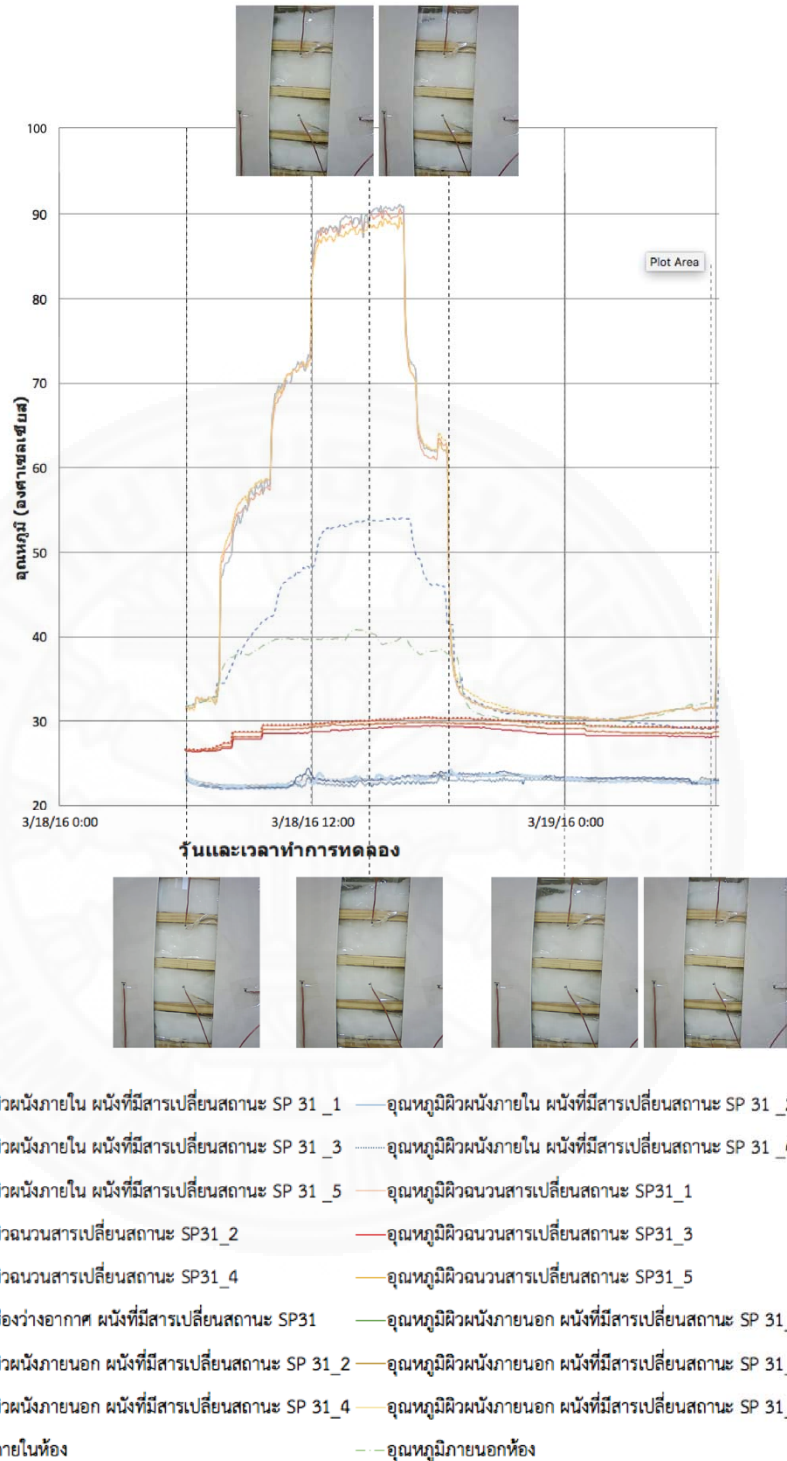
การประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะใน ห้องที่มีการปรับอากาศ 24 ชั่วโมง

จากการทดลองผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองที่มีการปรับอากาศ 24 ชั่วโมง พบว่าผิวผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง มีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 8 – 9 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะดูดความร้อนเข้าไปสะสมในสารเปลี่ยนสถานะในเวลา กลางวัน และในเวลากลางคืนมีการคายความร้อนได้ดีกว่าห้องทดลองที่ไม่ปรับอากาศในเวลากลางคืน เพราะสารเปลี่ยนสถานะมีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่แตกต่างจากอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมมากทำให้เกิดการคายความร้อนคืนรูปเป็นของแข็งได้รวดเร็วขึ้น ดังภาพที่ 6.1 และภาพที่ 6.2– 6.3 ซึ่งเป็นภาพขยายของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะพบว่าในกรณีห้องปรับอากาศ 24 ชั่วโมง ในเวลากลางวันมีการเปลี่ยนสภาพของสารเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวมากกว่ากรณีที่ ไม่มีการปรับอากาศ 2 – 3 ชั่วโมง และปรับอากาศในเวลากลางวัน 1 – 2 ชั่วโมง เพราะในเวลากลางคืนมีการเปลี่ยนสภาพกลับเป็นของแข็งได้ดีกว่ากรณีปรับอากาศในเวลากลางคืน นอกจากนี้ ในขณะเวลากลางวันมีการเปลี่ยนสถานะกลับจากของแข็งเป็นของเหลวได้เร็วกว่ากรณีที่ปรับอากาศในเวลากลางวัน และปรับอากาศในเวลากลางคืน 2 -3 ชั่วโมง โดยมีสภาพการเป็นของแข็งได้ดีกว่ากรณีที่ปรับอากาศในเวลากลางวัน

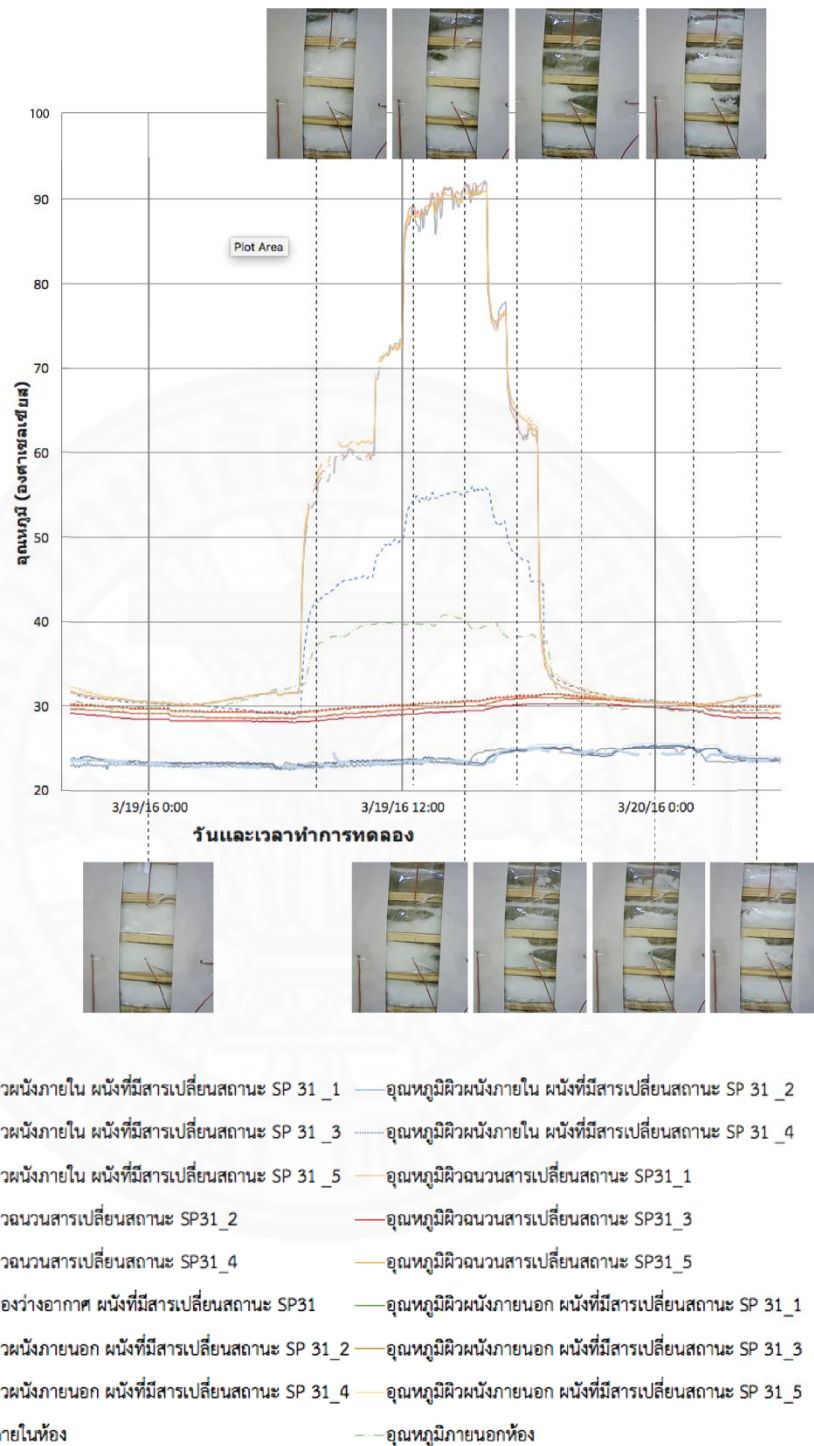
นอกจากนี้การหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะพบว่า การหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะจุดที่ 1 มากกว่าจุดที่ 3 และ 5 ตามลำดับ เนื่องจากผนังทดลองที่จำลองมีช่องว่างอากาศทำให้เกิดการลอยตัวของความร้อนจากที่ต่ำไปที่สูง ส่งผลให้อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ชั้นบนมากกว่าชั้นล่างเมื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะในช่วงเวลากลางวัน ดังภาพที่ 6.4 – 6.7



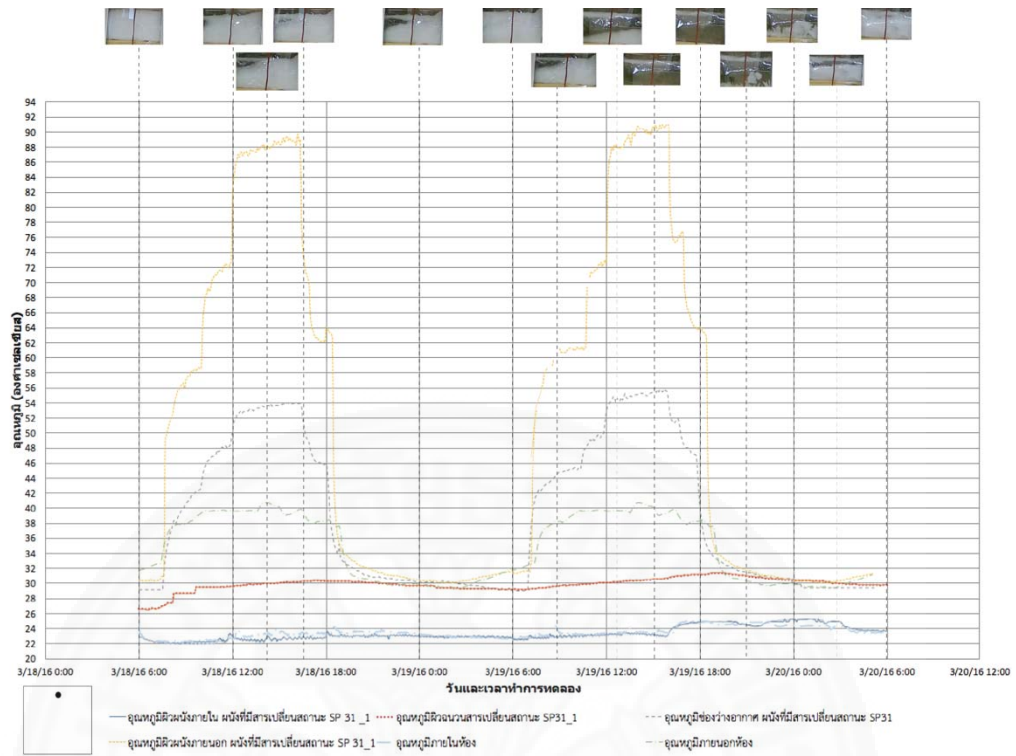
ภาพที่ 6.1 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง เมื่อวันที่ 18 – 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัยเมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



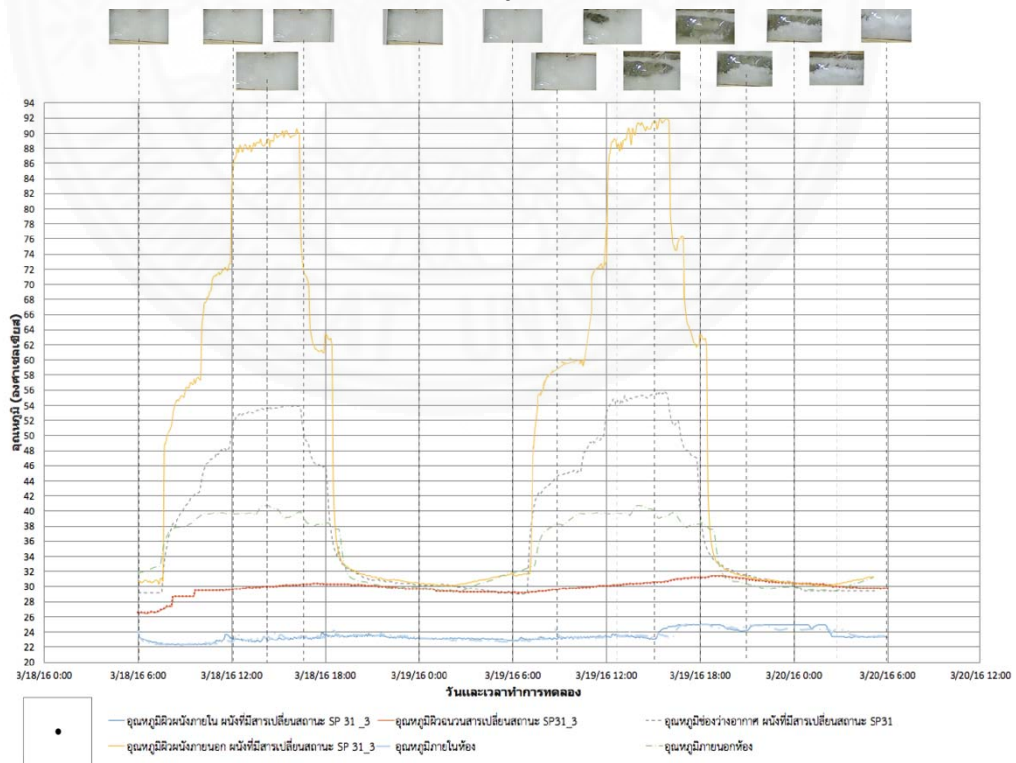
ภาพที่ 6.2 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 – 19 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



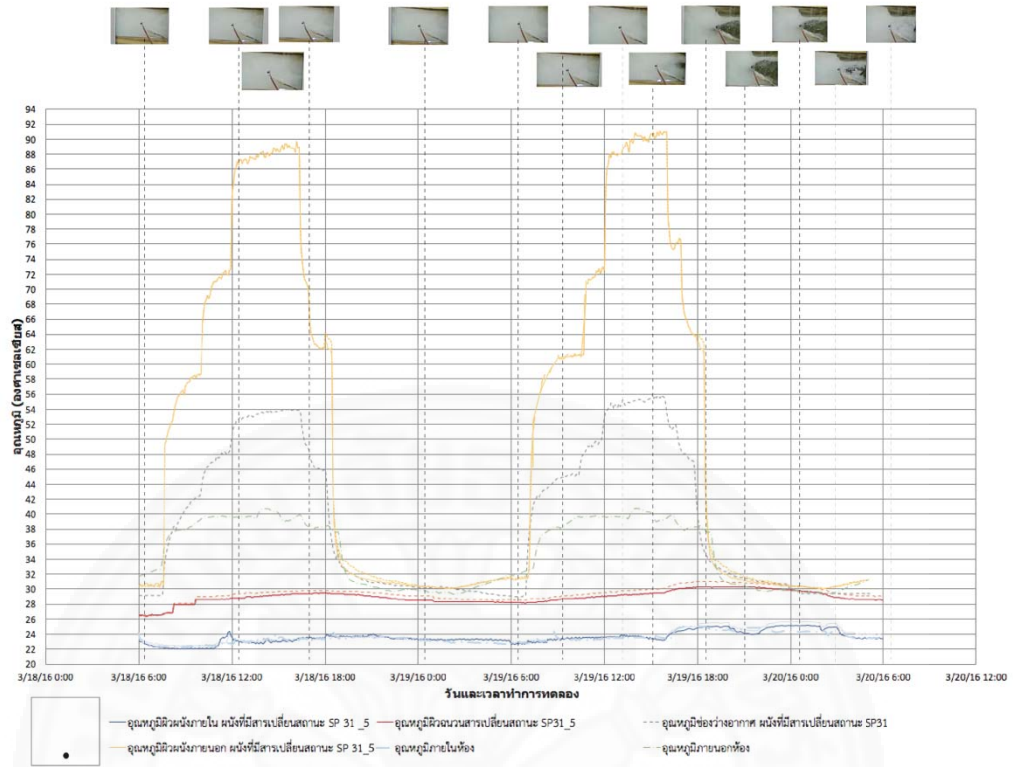
ภาพที่ 6.3 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 19 – 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



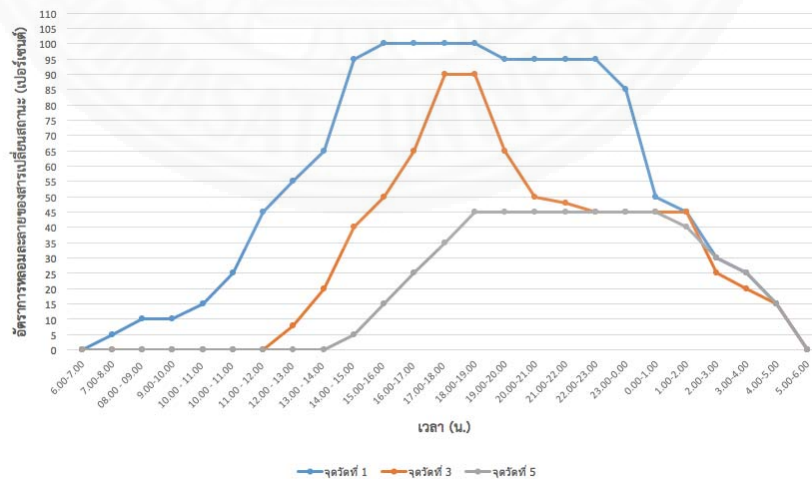
ภาพที่ 6.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



ภาพที่ 6.5 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 3 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 - 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



ภาพที่ 6.6 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 18 – 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.



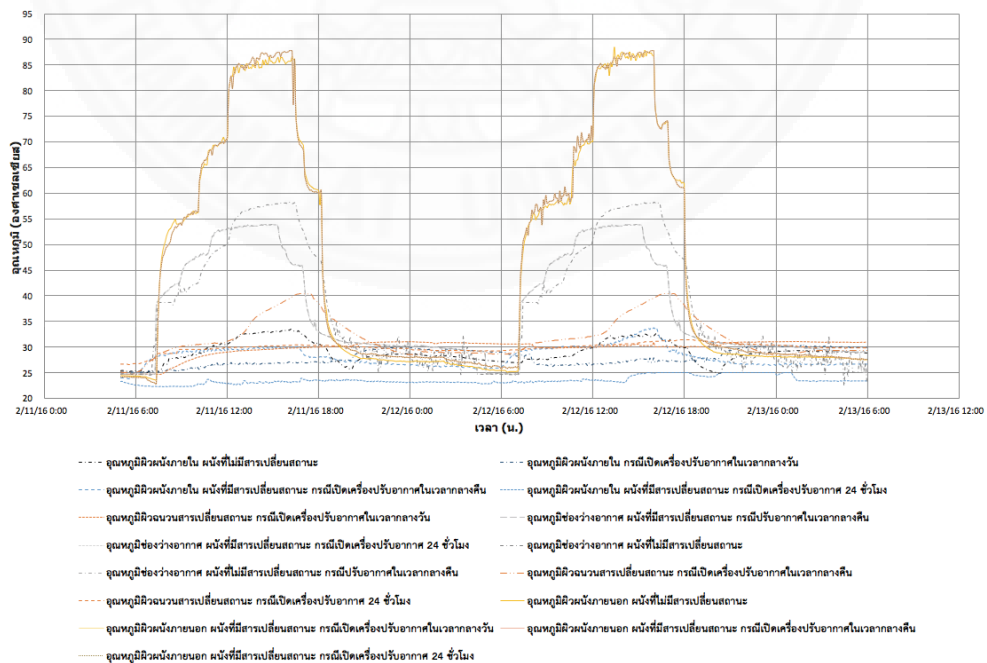
ภาพที่ 6.7 อัตราการหลอมละลายของสารเปลี่ยนสถานะจุดวัดที่ 1 3 และ 5 ณ ห้องทดลองปรับอากาศ 24 ชั่วโมง วันที่ 19 - 20 มีนาคม 2559, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 31 มีนาคม 2559.

บทที่ 7

เปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในห้องทดลองปรับอากาศแบบต่าง ๆ

จากการทดลองผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เวลากลางคืน และ 24 ชั่วโมง พบว่า ผิวผนังภายในของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ในเวลากลางวันที่มีการปรับอากาศ 24 ชั่วโมงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะมากที่สุด 8 – 9 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 ที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 8.00 – 18.00 น. มีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 6 – 9 องศาเซลเซียส และผิวผนังภายในที่มีการปรับอากาศเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00 – 7.00 น. มีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 5 – 6 องศาเซลเซียส เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการดูดซับพลังงานในเวลากลางวัน

ในขณะที่เวลากลางคืนผิวผนังภายในของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องทดลองปรับอากาศ 3 รูปแบบจะมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 1 -3 องศาเซลเซียส และค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงจนเท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และผนัง ดังภาพที่ 7.1



ภาพที่ 7.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนต่าง ๆ ของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องปรับอากาศรูปแบบต่าง ๆ, จัดทำโดยผู้วิจัยเมื่อวันที่ 1 มิถุนายน 2559.

บทที่ 8

การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง

หลักการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) เพื่อแสดงให้เห็นว่าการใช้สารเปลี่ยนสถานะช่วยเพิ่มมวลอุณหภาพให้กับวัสดุที่มีมวลอุณหภาพน้อยทำให้สามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคาร ซึ่งการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

เมื่อ	Q	= อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ตามทิศทางในแนวแกน x (Watt, W)
	U	= ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
	A	= พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)
	T	= อุณหภูมิ (K) และ dT คือความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังจากการคำนวณได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน และการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะและไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในกรณีที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน ปรับอากาศในเวลากลางคืน และปรับอากาศตลอดทั้งวัน

ซึ่งการคำนวณนั้นสามารถหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของแต่ละเวลาได้โดยหาจากตัวแปรที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนก่อน คือ ผนังเบาที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ เนื่องจากกำหนดให้ค่ารังสีความเข้ม ของดวงอาทิตย์เท่ากันในการทดลองของแต่ละกรณี เมื่อได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยชั่วโมงต่าง ๆ จึงนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกรณีของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะในแต่ละช่วงเวลาได้ เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารจากของแข็งเป็นของเหลวที่ไม่เท่ากัน ณ เวลาต่าง ๆ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ณ เวลาต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน

ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในแต่ละช่วงเวลา เช่น ณ เวลา 10.00 – 11.00 น. มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังเฉลี่ย 0.35 วัตต์ พื้นที่ของผนังทดลอง มีพื้นที่ 0.16 ตารางเมตร ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวภายนอก และภายในเฉลี่ย ณ เวลา 10.00 – 11.00 น. มีอุณหภูมิของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะชนิด SP29Eu คือ 31.63 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการ (1)

$$Q = U A \Delta T \quad (1)$$

แทนค่าข้อมูลที่ทราบลงไปในสมการ

$$0.35 = U (0.16) \times (31.63)$$

$$U = 0.35 / (0.16) \times (31.63)$$

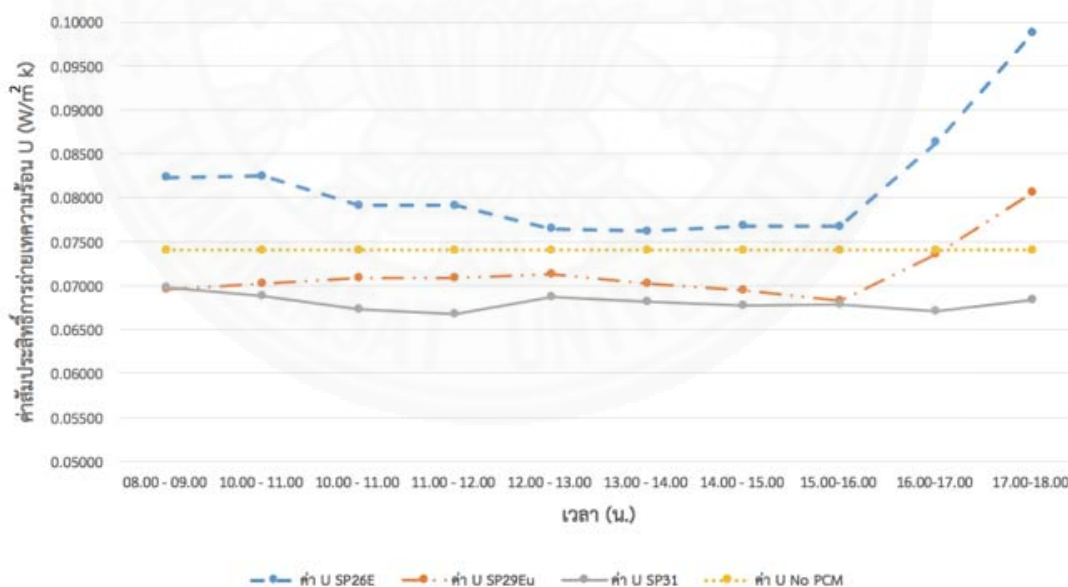
$$U = 0.07 \quad \text{W/m}^2\text{k}$$

เพราะฉะนั้น ณ เวลา 10.00 – 11.00 น. ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะชนิด SP29Eu มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน คือ 0.07 W/m²k

8.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะที่มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีค่าต่ำสุดเทียบเท่ากับผนังที่มีความเป็นฉนวนมากที่สุด รองลงมา คือ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu ผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ และผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ 26E

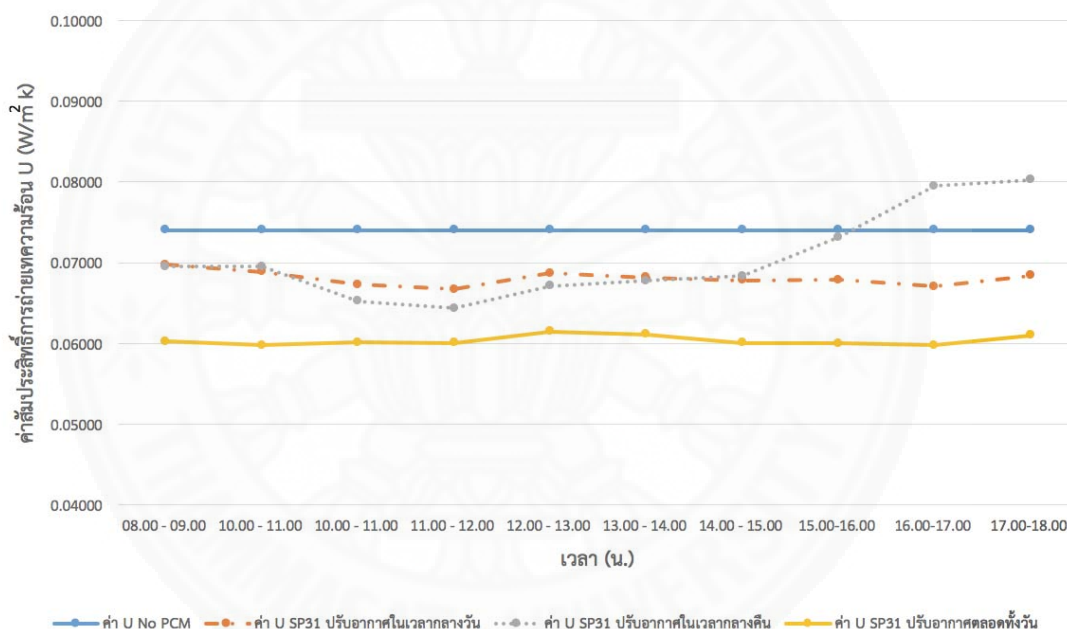
โดยเมื่อสารเปลี่ยนสถานะมีการรับพลังงานความร้อนที่เข้ามาทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้หลังจากสารเปลี่ยนสถานะเกิดการหลอมละลายในสัดส่วนที่มากจะรับความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัสทำให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังของสารเปลี่ยนสถานะเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวสูงขึ้นตั้งแต่วันที่ 15.00 น. ดังภาพที่ 8.1



ภาพที่ 8.1 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP26E SP29Eu และ SP31 กับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบในห้องปรับอากาศในเวลากลางวัน, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2559.

8.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของสารเปลี่ยนสถานะ SP31 และไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ในกรณีที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน ปรับอากาศในเวลา กลางคืน และปรับอากาศตลอดทั้งวัน

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน พบว่าหลังจากเวลา 15.00 น. ในกรณีของ ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวันจะมีค่าสูงกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยน สถานะ ดังนั้นจึงมีการถ่ายเทความร้อนของอาคารมากกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะทำให้ความ เป็นฉนวนน้อยกว่ากรณีของผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะส่งผลให้ความร้อนที่สะสมในสารเปลี่ยน สถานะถ่ายเทกลับสู่ผิวผนังภายในมากกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ ดังภาพที่ 8.2



ภาพที่ 8.2 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะ SP31 กับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะเป็นองค์ประกอบในห้องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวัน ปรับ อากาศเฉพาะในเวลากลางคืน และปรับอากาศ 24 ชั่วโมง, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 1 พฤษภาคม 2559.

ในส่วนของกรณีของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะที่มีการปรับอากาศตลอดทั้งวันจะมีค่าสัมประ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุดเนื่องจากสามารถคายความร้อนในช่วงเวลากลางวันได้ดีกว่ากรณี ที่ไม่ปรับอากาศในเวลากลางคืน เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการคายความร้อนในเวลากลางคืนได้ดี กว่าเพราะมีความแตกต่างของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าทำให้คืนสภาพเป็นของ แข็งได้ดีและมากกว่ากรณีอื่น ๆ

บทที่ 9

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

9.1 บทสรุป

จากการศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมโครแคปซูลเลต ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

9.1.1 พฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะต่อการถ่ายเทความร้อนของผิวผนังภายใน

จากการวิจัยพบว่าสารเปลี่ยนสถานะดูดความร้อนเมื่อมีความร้อนเข้าสู่ผนังทำให้อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะมีการเปลี่ยนแปลงจนถึงจุดหลอมเหลว และรับความร้อนต่อไปเพื่อเกิดการเปลี่ยนสถานะ อุณหภูมิขณะเปลี่ยนสถานะคงที่อุณหภูมิของผิวผนังภายในไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งถ้าปริมาณสารเปลี่ยนสถานะมีมากพอจะเพียงพอที่จะรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ โดยที่อุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่เวลากลางคืนเมื่อไม่มีความร้อนจากดวงอาทิตย์พลังงานความร้อนที่สะสมจะคายออกเพื่อให้สารเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง และอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะจะลดลง เท่ากับอุณหภูมಿಸิ่งแวดล้อมเพื่อพร้อมที่จะเริ่มทำงานในวัฏจักรเช่นเดียวกันในวันต่อไป

9.1.2 อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่ออุณหภูมิของผิวผนังภายใน

ในด้านอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะที่เหมาะสมควรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลากลางคืน โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจะต้องทำให้เกิดการคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในปริมาณที่เพียงพอที่จะทำให้สารเปลี่ยนสถานะเกิดการคืนตัวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับไปเป็นของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการวิจัยพบว่าสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เหมาะสมต่อการใช้งานกับ ผนังมากที่สุด รองลงมาคือสารเปลี่ยนสถานะ SP29Eu และ SP26E เนื่องจากอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิที่แตกต่างกับสภาพแวดล้อมในเวลากลางคืนมากกว่าสารเปลี่ยนสถานะอื่น ๆ ส่งผลให้เกิดการคายความร้อนคืนตัวจากสถานะของแข็งเป็นของเหลวได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

9.1.3 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน

การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศ และใช้งานในเวลากลางวัน พบว่าการที่มีสารเปลี่ยนสถานะรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ สะสมไว้ในรูปแบบของความร้อนแฝงโดยที่อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่ซึ่งต่ำกว่ากรณีของผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะจะช่วยลดการนำความร้อนสู่ผิวผนังภายในอาคารเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิของผนังภายในและอุณหภูมิห้องมีค่าต่ำกว่า

ผลการทดลองพบว่าสารเปลี่ยนสถานะ SP31 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานในผนังเบาที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการดูดซับพลังงานความร้อนโดยการเปลี่ยนสภาพจากของแข็ง เป็นของเหลวในเวลากลางวัน และคายความร้อนโดย การเปลี่ยนสภาพของเหลวเป็นของแข็งในเวลากลางคืนดีกว่าสารชนิดอื่นส่งผลให้ผนังอาคารมีอุณหภูมิที่สม่ำเสมอในเวลากลางวัน และสามารถลดอุณหภูมิผิวของผนังด้านในได้ 6 – 9 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ

9.1.4 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางคืน

การใช้งานของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางคืน พบว่าผิวผนังภายในที่มีสารเปลี่ยนสถานะ ณ ห้องทดลองที่ไม่ปรับอากาศในเวลากลางวันมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวผนังภายในที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 5 – 6 องศาเซลเซียส แต่ในเวลากลางคืนขณะที่มีการเปิดเครื่องปรับอากาศจะมีอุณหภูมิผิวผนังภายในที่มากกว่าผิวผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 2 – 3 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการคายความร้อนที่สะสมในเวลากลางวันสู่สิ่งแวดล้อมรวมทั้งผนังด้านในของอาคารด้วย

9.1.5 การใช้ผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศตลอดทั้งวัน

การใช้งานของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับอาคารที่มีการปรับอากาศตลอดทั้งวัน พบว่าการที่มีสารเปลี่ยนสถานะรับความร้อนจากดวงอาทิตย์สะสมไว้ในรูปแบบของความร้อนแฝงโดยที่อุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่จะทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านในซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะระหว่าง 8 – 9 องศาเซลเซียส จะช่วยลดการนำความร้อนเข้าสู่ผิวผนังภายในได้ ในขณะที่เดียวกันในตอนกลางคืนอุณหภูมิของผิวผนังภายในของผนังที่มีสารเปลี่ยนสถานะจะมากกว่าผนังที่ไม่มีสารเปลี่ยนสถานะ 1 – 3 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีการคายความร้อนที่สะสมในเวลากลางวันสู่สิ่งแวดล้อม

ดังนั้นการนำสารเปลี่ยนสถานะประยุกต์ใช้กับสถาปัตยกรรมในเวลากลางวัน จึงเป็นวิธีการช่วยลดภาระความร้อนเข้าสู่อาคารได้วิธีหนึ่งที่เหมาะสม ในการการประยุกต์ใช้ ร่วมกับผนังในอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางวัน เช่น อาคารพาณิชย์ สถานศึกษา และอาคารสำนักงาน เป็นต้น และการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอาคารที่มีการปรับอากาศตลอดทั้งวัน เช่น โรงพยาบาล โรงแรม เป็นต้น โดยหากต้องการลดความร้อนเข้าสู่อาคารในระดับเดียวกับผนังอาคารที่มีสารเปลี่ยนสถานะจะสามารถทำให้ผนังมีน้ำหนักลดลงต่ำกว่าการใช้ผนังมวลมาก (thermal mass) หรือสามารถใช้ผนังได้บางกว่าการใช้ฉนวนความร้อนได้

9.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตต์ร่วมกับการใช้งานในผนังในเวลากลางวัน โดยได้ศึกษาถึงรูปแบบพฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะในกรณีของจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะ และรูปแบบพฤติกรรมการปรับอากาศที่แตกต่างกัน โดยได้ระบุถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวที่เหมาะสม รูปแบบของอาคารที่เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในสถาปัตยกรรม และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาในเวลากลางวัน ซึ่งสามารถเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาสารเปลี่ยนสถานะที่น่าสนใจในประเด็นต่อ ๆ ไปได้

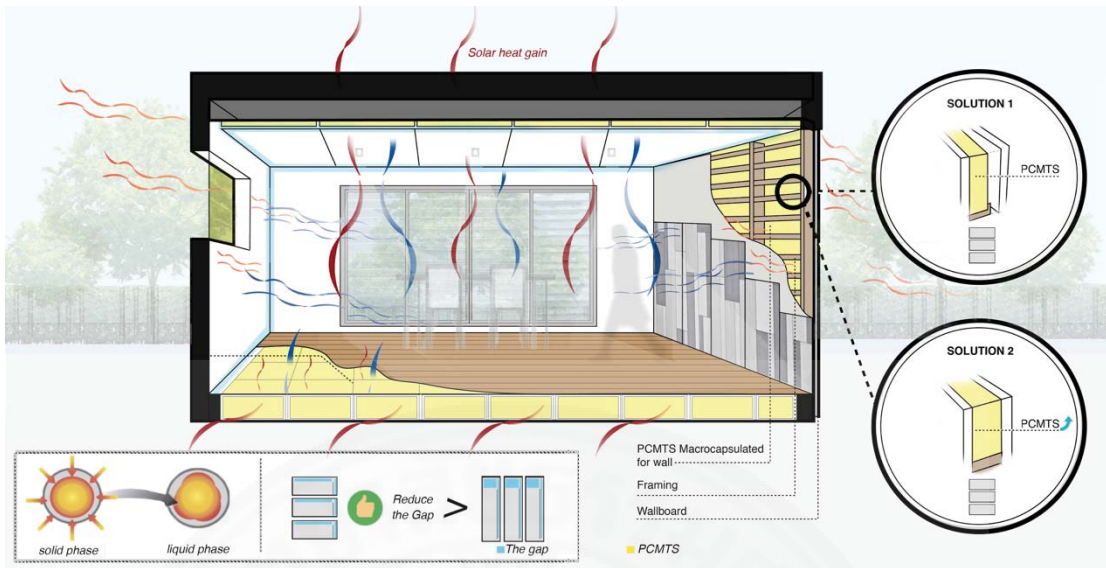
- การวิจัยทดลองเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตต์และไมโครแคปซูลเลตต์ร่วมกับผนังอาคาร และองค์ประกอบทางโครงสร้างอื่น ๆ
- การวิจัยทดลองการบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตต์รูปแบบต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อ ผนังอาคาร และองค์ประกอบทางโครงสร้างอื่น ๆ
- การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับโครงสร้างอื่น ๆ ในอาคาร เช่น ฝ้าเพดาน หลังคา ฝ้าในกระจก เป็นต้น
- การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับฉนวนรูปแบบต่าง ๆ
- การติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะในโครงสร้างสถาปัตยกรรมในโครงสร้างอาคารรูปแบบต่าง ๆ
- การประเมินศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ และจุดคุ้มทุนต่อในการใช้สารเปลี่ยนสถานะในอาคาร
- การวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบของผนังเบา ได้แก่ ชนิดของผนัง ช่องอากาศ และอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของสารเปลี่ยนสถานะเพื่อนำไปสู่การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวผนังภายในอาคารในเวลากลางวัน

9.3 แนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม

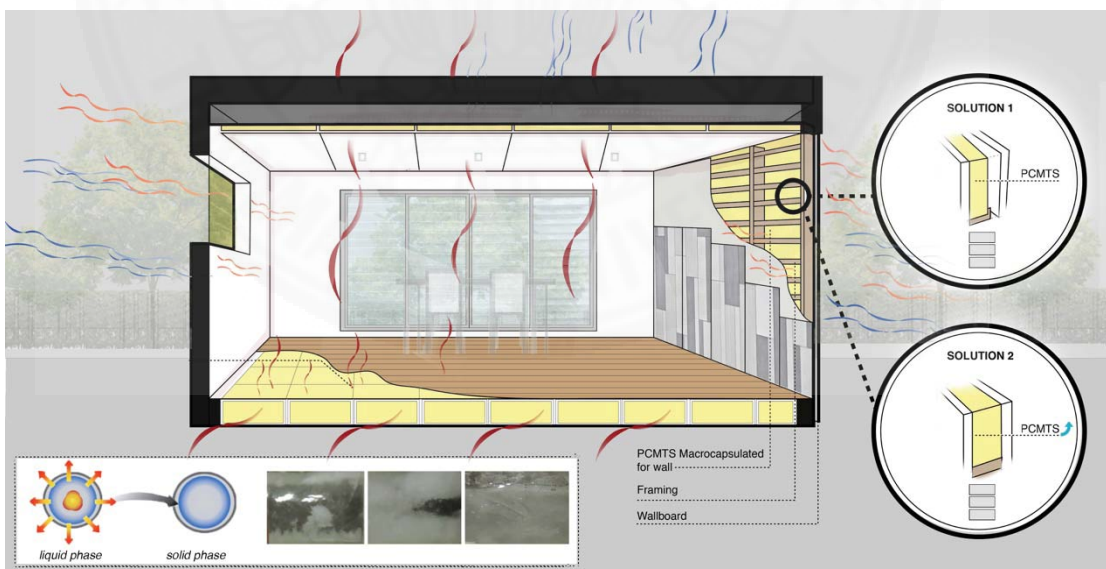
การประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรมสามารถประยุกต์ใช้กับสถาปัตยกรรมที่ใช้งานในเวลากลางวันเพื่อชะลอความร้อนเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้ผิวผนังภายในอาคารมีอุณหภูมิคงที่ เนื่องจากสารเปลี่ยนสถานะมีการดูดความร้อนเข้าสู่ตนเองทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ดังรูปที่ 9.1 ในขณะเดียวกันในเวลากลางคืนสารเปลี่ยนสถานะจะเกิดการคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอกทำให้อุณหภูมิผิวผนังภายในอาคารสูงขึ้น ดังรูปที่ 9.2

โดยการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ได้แก่ ผนังอาคาร กระจก พื้น ฝ้าเพดาน และหลังคา เป็นต้น ซึ่งการบรรจุสถานะควรบรรจุในแนวนอนมากกว่าในแนวตั้งเพื่อลดการเกิดช่องว่างอากาศในสารเปลี่ยนสถานะ ส่งผลให้สารเปลี่ยนสถานะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังภาพที่ 9.1

นอกจากนี้การบรรจุสารเปลี่ยนสถานะแบบแมคโครแคปซูลเลตมีข้อดี คือ สามารถปรับการใช้สารเปลี่ยนสถานะได้ตามต้องการถ้าสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไปในอนาคต หรือสารเปลี่ยนสถานะมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากวัฏจักรชีวิตของสารเปลี่ยนสถานะ ผู้ใช้งานสามารถเพิ่มสารเปลี่ยนสถานะในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร โดยเมื่อเพิ่มสารเปลี่ยนสถานะมาก ส่งผลให้มีการชะลอความร้อนเข้าสู่อาคารมากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของผิวผนังภายในอาคารคงที่ และเพิ่มอายุการใช้งานของสารเปลี่ยนสถานะในอาคาร



ภาพที่ 9.1 รูปแบบแนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม และพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในเวลากลางวัน, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2559.



ภาพที่ 9.2 รูปแบบแนวทางการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะร่วมกับสถาปัตยกรรม และพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะในเวลากลางคืน, จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2559.

รายการอ้างอิง

หนังสือ

กระทรวงพลังงาน (2553). *คู่มือรับผิดชอบการใช้พลังงาน*. ระบบกรอบอาคาร. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.

ชลทิศ เอี่ยมวรฤทธิกุล (2550). *อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน*, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

Drake J.B. (1987). A study of optimum temperature of PCM wallboard of solar energy storage, Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-10210. National Technical Information Servicem Springfield, VA, United States.

H. Mehling, P. Schossig, & D. Kalz. (2009). Latent heat storage in building: storing heat and cold in a compact and demand-oriented manner, Bonn: Bine informationsdienst, Germany.

Yunus A Cengel & Afshin J. Ghajar. (2011). Heat and mass trasfer (SI Unit), McGraw-Hill Education, United States.

บทความวารสาร

Alam, M., Jamil, H., Sanjayan, J., & Wilson, J. (2014). Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities. *Energy and Buildings*, 78, 192–201. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.027

Alawadhi, E. M. (2008). Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*, 40(3), 351357. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.001

Alawadhi, E. M. (2012). Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain. *Energy and Buildings*, 47, 421429. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.009

- Alqallaf, H. J., & Alawadhi, E. M. (2013). Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings*, *61*, 7380. doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.041
- Ansuini, R., Larghetti, R., Giretti, A., & Lemma, M. (2011). Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control. *Energy and Buildings*, *43*(11), 3019–3026. doi:10.1016/j.enbuild.2011.07.018
- Arkar, C., & Medved, S. (2007). Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, *81*(9), 1078–1087. doi:10.1016/j.solener.2007.01.010
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2014). Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, *113*, 990–1007. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.045
- Atul Sharma, A. Shukla, C.R. Chen, & S. Dwivedi. (2013). Development of phase change materials for building applications. *Energy and Buildings*, *64*, 403–407. doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.029
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, *42*(9), 1361–1368. doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.026
- Berroug, F., Lakhal, E. K., El Omari, M., Faraji, M., & El Qarnia, H. (2011). Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall. *Energy and Buildings*, *43*(11), 3027–3035. doi:10.1016/j.enbuild.2011.07.020
- Borderon, J., Virgone, J., & Cantin, R. (2015). Modeling and simulation of a phase change material system for improving summer comfort in domestic residence. *Applied Energy*, *140*, 288–296. doi:10.1016/j.apenergy.2014.11.062Build_13

- Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, *39*(2), 113–119. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.030
- Cerón, I., Neila, J., & Khayet, M. (2011). Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*, *43*(8), 1869–1874. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.031
- Chou, H.-M., Chen, C.-R., & Nguyen, V.-L. (2013). A new design of metal-sheet cool roof using PCM. *Energy and Buildings*, *57*, 42–50. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.030DRL001176-2
- D. Feldman, M.A. Khan, & D. Banu. (1989). Energy storage composite with an organic PCM. *Solar Energy Materials*, *18*(6), 333-341. doi:10.1016/0165-1633(89)90058-0
- D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, & C.J. Fuks. (1989) Fatty acid and their mixtures as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials*, *18*(3-4), 201-216. doi:10.1016/0165-1633(89)90054-3
- D. Feldman, M.M. Shapiro, & D. Banu. (1989) Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials*, *13*(1), 1-10. doi:10.1016/0165-1633(86)90023-7
- Edwin R-U., Letzai R-V., Sergio V., & Javier N. (2012). Application of phase change material in high energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, *50*, 49-62. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.018
- Fiorito, F. (2012). Trombe Walls for Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring the Use of Phase-change Materials for Performances Improvement. *Energy Procedia*, *30*, 1110–1119. doi:10.1016/j.egypro.2012.11.124
- Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2011). Investigation of solar potential of housing units in different neighborhood designs. *Energy and Buildings*, *43*(9), 2262–2273. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.008

- Huann-Ming C., Chang-Ren C., & Vu-Lan N. (2013). A new design of metal sheet cold roof using PCM. *Energy and Buildings*, 57, 42-50. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.030.
- Hashem J., Alquallaf., & Esam M. Alwadhi. (2013). Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy and Buildings*, 61, 73-80. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.01.041
- I Cerón, J. Neila, & M. Khayet (2011). Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*. 43(8), 1869-1874. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.031
- Indartono, Y. S., Suwono, A., & Pratama, F. Y. (2014). Improving photovoltaics performance by using yellow petroleum jelly as phase change material. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. doi:10.1093/ijlct/ctu033
- Jin, X., Medina, M. A., & Zhang, X. (2014). On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction. *Energy*, 73, 780–786. doi:10.1016/j.energy.2014.06.079
- K. Peippo, P. Kauranen, P.D. Lund. (1991). A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, *Energy and Buildings*, 17, 259–270. doi: 10.1016/0378-7788(91)90009-R
- Kamali, S. (2014). Review of free cooling system using phase change material for building. *Energy and Buildings*, 80, 131–136. doi: 10.1016/j.enbuild. 2014.05.021
- Kara, Y. A., & Kurnuç, A. (2012). Performance of coupled novel triple glass unit and pcm wall. *Applied Thermal Engineering*, 35, 243–246. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.033
- Kenisarin, M. & Mahkamov, K. (2006). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainability Energy Reviews*, 11(2007), 1913 – 1965. doi:10.1016/j.rser.2006.05.005

- Koschenz, M., & Lehmann, B. (2004). Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and Buildings*, *36*(6), 567–578. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.029
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J.-J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 379–391. doi:10.1016/j.rser.2010.08.019
- Kuznik, F., & Virgone, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*, *86*(10), 2038–2046. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.01.004
- Kuznik, F., & Virgone, J. (2009). Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling. *Energy and Buildings*, *41*(5), 561–570. doi:10.1016/j.enbuild.2008.11.022
- Kuznik, F., Virgone, J., & Johannes, K. (2010). Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings*, *42*(7), 1004–1009. doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.012
- Kuznik, F., Virgone, J., & Roux, J.-J. (2008). Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. *Energy and Buildings*, *40*(2), 148–156. doi:10.1016/j.enbuild.2007.01.022
- Lee, K. O., Medina, M. A., Raith, E., & Sun, X. (2015). Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management. *Applied Energy*, *137*, 699–706. doi:10.1016/j.apenergy.2014.09.003
- Lee, K. O., Medina, M. A., & Sun, X. (2015). On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: Evaluation of a thin phase change material (PCM) layer. *Energy and Buildings*, *86*, 86–92. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.020

- Long, L., Liu, D., Hu, J., Gu, S., Zhuge, Q., & Sha, E. H.-M. (2014). A space allocation and reuse strategy for PCM-based embedded systems. *Journal of Systems Architecture*, *60*(8), 655–667. doi:10.1016/j.sysarc.2014.07.002
- M. Alam, H. Jamil, J. Sanjayan, & J. Wilson. (2014). Energy saving of phase change materials in major Australian cities. *Energy and Buildings*, *38*, 192-201. doi:10.1016/j.building.2014.04.027.
- Mirzaei, P. A., & Haghightat, F. (2012). Modeling of phase change materials for applications in whole building simulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(7), 5355–5362. doi:10.1016/j.rser.2012.04.053
- Markus K., & Beat L. (2004). Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and Buildings*, *36*(6), 567-578. doi:10.1016/j.building.2004.01.029
- Pomianowski, M., Heiselberg, P., & Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*, *67*, 56–69. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.006
- Principi, P., & Fioretti, R. (2012). Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks. *Energy and Buildings*, *51*, 131–142. doi:10.1016/j.enbuild.2012.04.022
- Raj, V. A. A., & Velraj, R. (2010). Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(9), 2819–2829. doi:10.1016/j.rser.2010.07.004
- Rodriguez-Ubinas, E., Ruiz-Valero, L., Vega, S., & Neila, J. (2012). Applications of Phase Change Material in highly energy-efficient houses. *Energy and Buildings*, *50*, 49–62. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.03.018

- Royon, L., Karim, L., & Bontemps, A. (2013). Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings. *Energy and Buildings*, *63*, 29–35. doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.042
- Sage-Lauck, J. S., & Sailor, D. J. (2014). Evaluation of phase change materials for improving thermal comfort in a super-insulated residential building. *Energy and Buildings*, *79*, 32–40. doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.028
- Sharma, A., Shukla, A., Chen, C. R., & Dwivedi, S. (2013). Development of phase change materials for building applications. *Energy and Buildings*, *64*, 403–407. doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.029
- Shi, X., Memon, S. A., Tang, W., Cui, H., & Xing, F. (2014). Experimental assessment of position of macroencapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels. *Energy and Buildings*, *71*, 80–87. doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.001
- X. Kong, S. Lu, J. Huang, Z. Cai, & S. Wei. (2013). Experimental research on the use of phase change material in perforated brick rooms for cooling design. *Energy and Buildings*, *62*, 597-604 doi:10.1016/j.enbuild.2013.03.048
- Wang, X., Chen, D., & Ren, Z. (2010). Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Building and Environment*, *45*(7), 1663–1682. doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.022
- Yinping Z., Guobing Z., Kunping L, Qunli Z., & Hongfa D. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Energy and Environments*, *42*(6), 2197-2209 doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.023
- Zhang, C., Chen, Y., Wu, L., & Shi, M. (2011). Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures. *Energy and Buildings*, *43*(12), 3514–3520. doi:10.1016/j.enbuild.2011.09.028

- Zhang, M., Medina, M. A., & King, J. B. (2005). Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings. *International Journal of Energy Research*, 29(9), 795–809. doi:10.1002/er.1082
- Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., & Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42(6), 2197–2209. doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.023
- Zhu, N., Ma, Z., & Wang, S. (2009). Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review. *Energy Conversion and Management*, 50(12), 3169–3181. doi:10.1016/j.enconman.2009.08.019
- Zhu, N., Wang, S., Xu, X., & Ma, Z. (2010). A simplified dynamic model of building structures integrated with shaped-stabilized phase change materials. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1722–1731. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2010.03.02

วิทยานิพนธ์

- ณัฐกานต์ เกษประทุม (2543). *พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสารมวลมาก*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาเทคโนโลยีอาคาร.
- ณัฐพล เตชพิชิตโชค (2556). *อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของช่องใต้หลังคา*, (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง, สาขาเทคโนโลยีอาคาร.
- สรญา ประวัติดรางกุล (2543). *อิทธิพลของมวลสารผนังภายนอกที่มีต่อสภาวะนำสบายและการปรับอากาศในการออกแบบอาคาร*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาเทคโนโลยีอาคาร.
- สิริรัช อัสวโกสัย (2551). *การเปรียบเทียบคุณสมบัติฉนวนการผลิตรังสีความร้อนโดยวิธีรูปร่างคงตัวเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน*. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมเคมี.

- เอกพล เตี้ยซั่ว (2554). พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคารผสมสารเปลี่ยนสถานะในสภาพภูมิอากาศกรุงเทพมหานครฯ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีปทุม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล.
- อัญชญา สังฆะกุล (2553). อิทธิพลของมวลสารผนังภายนอกและทิศทางที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานและสภาวะน่าสบายของอาคารพักอาศัยในภูมิอากาศร้อนชื้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาเทคโนโลยีอาคาร.
- อนุสรณ์ วรสิงห์ และคณะ (2557). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาผนังหลายชั้นที่มีส่วนประกอบของวัสดุสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับคอนกรีตมวลเบา. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร
- อภิรักษ์ เกาสุรัตน์ (2010). การศึกษารูปแบบผนังเบาเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารพักอาศัยสำหรับผู้มีรายได้น้อย กรณีศึกษาโครงการบ้านเอื้ออาทรการเคหะแห่งชาติ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยศิลปากร, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, สาขาเทคโนโลยีอาคาร.
- Joanne M. Bailey (2010). Modeling phase change material thermal storage system. (Master's thesis). McMaster University, Faculty of Engineering.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- การไฟฟ้านครหลวง (2558). สถิติการใช้ไฟฟ้านครหลวง. สืบค้นเมื่อ 1 ธันวาคม 2558, จาก <http://www.mea.or.th>
- อรอุมา วงศางาม (2553). การถ่ายเทความร้อน. สืบค้นเมื่อ 21 พฤศจิกายน 2558, จาก <http://lms.mju.ac.th/courses/418/locker/วค360> วิศวกรรมอาหาร1/บทที่ 6 การถ่ายเทความร้อน.onuma.new.nn.ppt
- Cabeza, L. F., & de Gracia, A. (2015). Thermal energy storage (TES) systems for cooling in residential buildings. In *Advances in Thermal Energy Storage Systems* (pp. 549–572). Elsevier. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781782420880500237>
- Catherina Ticsay. (2015). Get that “just right” feel: Incorporating phase change material into textile. Retrieved from <http://illumin.usc.edu/printer/2/get-that-34just-right34-feel-incorporating-phasechange-materials-into-textiles/>

- Groulx, D., & Ogoh, W. (2009). Solid-liquid phase change simulation applied to a cylindrical latent heat energy storage system. In *COMSOL Conference 2009*. Retrieved from <https://www.comsol.ru/paper/download/101067/Groulx.pdf>
- Reshmeen, S. (2009). *Determining the optimum placement of a Phase Change Materials (PCM) thermal shield inside frame walls using a dynamic wall simulator*. University of Kansas. Retrieved from <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/5659>.





ภาคผนวก ก
การวัดความนำเชื่อถือของเทอร์โมมิเตอร์

การวัดค่าความนำเชื่อถือของเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำร้อน ปกติ และเย็น ในการวิจัยใช้หัววัดทำการ ทดสอบช่วงอุณหภูมิ 0-71 องศาเซลเซียส โดยทำการเก็บอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที และใช้การเปรียบเทียบ 3 จุด ได้แก่ 0 25 และ 71 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเทียบอุณหภูมิของจุดวัดอุณหภูมิพบว่า ค่าความคาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียส

ตาราง ก - 1

การตรวจความเที่ยงตรงของหัววัดอุณหภูมิ

หัววัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส
หัววัดที่ 1	0.00	25.05	71.91
หัววัดที่ 2	0.00	24.96	71.61
หัววัดที่ 3	0.00	25.04	71.84
หัววัดที่ 4	0.00	25.02	71.45
หัววัดที่ 5	0.00	25.05	71.45
หัววัดที่ 6	0.00	24.85	71.76
หัววัดที่ 7	0.00	24.89	71.76
หัววัดที่ 8	0.00	24.99	71.76
หัววัดที่ 9	0.00	25.05	71.76
หัววัดที่ 10	0.00	25.03	71.84
หัววัดที่ 11	0.00	25.02	71.84
หัววัดที่ 12	0.00	25.02	71.84
หัววัดที่ 13	0.00	24.91	71.67
หัววัดที่ 14	0.00	24.95	71.76
หัววัดที่ 15	0.00	24.98	71.84

หมายเหตุ, จัดทำโดยผู้วิจัย ณ วันที่ 1 มีนาคม 2559.

ตาราง ก - 1 (ต่อ)

การตรวจความเที่ยงตรงของหัววัดอุณหภูมิ

หัววัดอุณหภูมิ	อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส
หัววัดที่ 16	0.00	25.03	71.84
หัววัดที่ 17	0.00	25.01	71.84
หัววัดที่ 18	0.00	24.99	71.67
หัววัดที่ 19	0.00	24.99	71.84
หัววัดที่ 20	0.00	24.95	71.84
หัววัดที่ 21	0.00	25.01	71.67
หัววัดที่ 22	0.00	25.07	71.91
หัววัดที่ 23	0.00	25.05	71.61
หัววัดที่ 24	0.00	25.03	71.84
หัววัดที่ 25	0.00	25.02	71.45
หัววัดที่ 26	0.00	25.02	71.45
หัววัดที่ 27	0.00	24.91	71.76
หัววัดที่ 28	0.00	25.05	71.76
หัววัดที่ 29	0.00	25.01	71.76
หัววัดที่ 30	0.00	25.07	71.76
หัววัดที่ 31	0.00	25.05	71.76
หัววัดที่ 32	0.00	25.05	71.76

หมายเหตุ, จัดทำโดยผู้วิจัย ณ วันที่ 1 มีนาคม 2559.

ภาคผนวก ข

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายชั่วโมงบนพื้นผิวในกรุงเทพมหานคร

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายชั่วโมงบนพื้นผิวในกรุงเทพมหานครสำหรับข้อมูล Design Dayของแต่ละเดือนและข้อมูล Monthly Average ของแต่ละเดือนอ้างอิงจากข้อมูลความเข้มแสงบนพื้นราบจากกรมอุตุนิยมวิทยา ฯ (ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550)



ตาราง ข-1

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูรกิจ, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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	436.67	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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
6	9	687.95	296.50	613.95	635.47	347.13	107.26	107.26	107.26	107.26
6	10	848.06	283.04	513.18	509.78	273.84	113.57	113.57	113.57	113.57
6	11	949.70	270.87	376.76	330.44	158.52	116.72	116.72	116.72	116.72
6	12	990.46	268.43	229.73	126.33	119.87	119.87	119.87	119.87	219.97
6	13	959.18	270.61	116.72	116.72	116.72	116.72	150.01	318.68	368.65
6	14	868.66	286.10	116.72	116.72	116.72	116.72	272.22	507.10	512.85
6	15	718.20	302.01	110.41	110.41	110.41	110.41	352.81	645.92	624.88
6	16	522.90	314.79	104.10	104.10	104.10	104.10	382.91	710.11	681.89
6	17	294.67	291.65	85.17	85.17	85.17	85.17	333.08	643.02	625.85
6	18	61.93	137.59	34.70	34.70	34.70	34.70	135.71	280.72	281.50
6	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	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
7	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	7	201.45	197.17	462.99	495.42	274.35	63.09	63.09	63.09	63.09
7	8	455.31	254.79	616.21	673.20	390.88	94.64	94.64	94.64	94.64
7	9	672.37	251.86	593.88	651.80	390.28	107.26	107.26	107.26	107.26
7	10	839.27	235.38	493.35	529.45	321.48	113.57	113.57	113.57	113.57
7	11	952.00	224.31	358.60	353.23	210.75	119.87	119.87	119.87	119.87
7	12	994.26	217.03	204.87	142.62	119.87	119.87	119.87	119.87	172.04
7	13	969.68	221.67	119.87	119.87	119.87	119.87	181.78	310.19	326.71
7	14	880.85	234.80	116.72	116.72	116.72	116.72	305.16	502.38	473.23
7	15	731.11	255.11	113.57	113.57	113.57	113.57	381.06	648.64	592.32
7	16	534.71	270.16	104.10	104.10	104.10	104.10	421.23	719.66	657.07
7	17	306.23	259.69	88.33	88.33	88.33	88.33	372.11	661.81	615.24
7	18	72.31	136.81	41.01	41.01	41.01	41.01	167.81	316.45	303.60
7	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	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
8	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรภูฒิกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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	706.50	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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรฤทธิกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
10	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	7	189.40	41.01	302.66	571.81	529.73	201.10	41.01	41.01	41.01
10	8	461.67	59.94	341.52	737.61	736.28	338.31	59.94	59.94	59.94
10	9	689.64	69.40	241.69	666.36	740.85	421.48	69.40	69.40	69.40
10	10	855.85	72.56	83.26	490.29	652.14	473.92	72.56	72.56	72.56
10	11	952.22	72.56	72.56	258.36	508.10	502.19	244.09	72.56	72.56
10	12	970.31	72.56	72.56	72.56	331.84	507.28	427.54	139.36	72.56
10	13	915.63	72.56	72.56	72.56	145.87	492.58	592.76	387.66	72.56
10	14	786.29	69.40	69.40	69.40	69.40	453.89	716.63	599.67	171.58
10	15	596.35	66.25	66.25	66.25	66.25	394.98	780.87	747.63	314.74
10	16	360.71	59.94	59.94	59.94	59.94	310.28	746.66	780.34	391.59
10	17	106.71	37.86	37.86	37.86	37.86	167.65	485.11	540.34	300.98
10	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	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	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	7	131.53	31.55	198.76	471.79	486.69	234.74	31.55	31.55	31.55
11	8	398.62	53.63	240.59	702.74	784.23	437.29	53.63	53.63	53.63
11	9	621.84	59.94	136.58	647.10	813.20	537.50	59.94	59.94	59.94
11	10	787.81	63.09	63.09	480.61	737.37	598.58	145.60	63.09	63.09
11	11	883.31	63.09	63.09	255.22	600.09	629.84	327.04	63.09	63.09
11	12	906.20	63.09	63.09	63.09	430.15	637.70	508.08	117.29	63.09
11	13	855.77	63.09	63.09	63.09	247.49	623.13	670.16	361.01	63.09
11	14	733.62	63.09	63.09	63.09	71.00	584.23	791.70	571.78	63.09
11	15	550.33	59.94	59.94	59.94	59.94	518.92	849.36	716.83	199.02
11	16	317.13	50.47	50.47	50.47	50.47	411.62	791.18	736.42	279.43
11	17	75.10	28.39	28.39	28.39	28.39	207.20	455.61	453.54	202.22
11	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-1 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Design Day ของกรุงเทพมหานคร ฯ สำหรับ
พื้นผิวจัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรอุตติกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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	80.11	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
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
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูกร, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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	80.11	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
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	198.58	198.58	198.58	198.58	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
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูกร, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
4	12	762.93	385.07	385.07	385.07	390.53	395.00	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	248.58	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	228.20	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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
6	8	261.52	214.78	303.36	310.11	231.07	163.83	163.83	163.83	163.83
6	9	385.99	283.09	366.60	372.24	296.70	233.86	233.86	233.86	233.86
6	10	497.38	345.64	407.61	406.70	343.44	300.47	300.47	300.47	300.47
6	11	584.02	394.27	424.00	411.06	363.04	351.37	351.37	351.37	351.37
6	12	641.16	422.22	410.49	379.14	377.18	377.18	377.18	377.18	407.53
6	13	646.92	417.82	366.41	366.41	366.41	366.41	377.49	433.65	450.29
6	14	576.45	379.27	321.51	321.51	321.51	321.51	374.23	453.86	455.81
6	15	452.90	331.07	274.40	274.40	274.40	274.40	345.59	431.67	425.49
6	16	319.96	267.92	214.46	214.46	214.46	214.46	284.70	367.13	360.02
6	17	189.62	189.18	132.81	132.81	132.81	132.81	200.03	284.08	279.42
6	18	81.49	89.70	51.42	51.42	51.42	51.42	88.77	142.40	142.69
6	19	8.41	14.79	8.41	8.41	8.41	8.41	12.97	21.21	21.95
6	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	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
7	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	6	22.98	38.86	70.49	72.44	43.58	19.87	19.87	19.87	19.87
7	7	116.33	114.85	188.13	197.04	136.34	78.34	78.34	78.34	78.34
7	8	245.78	199.56	282.60	295.64	231.04	163.25	163.25	163.25	163.25
7	9	398.84	292.79	379.11	393.67	327.93	256.78	256.78	256.78	256.78
7	10	522.22	355.78	427.04	436.98	379.76	322.56	322.56	322.56	322.56
7	11	594.86	388.29	426.55	425.02	384.61	358.83	358.83	358.83	358.83
7	12	651.56	414.10	410.41	391.39	384.44	384.44	384.44	384.44	400.38
7	13	622.84	403.37	373.35	373.35	373.35	373.35	391.52	429.22	434.07
7	14	544.94	373.32	341.64	341.64	341.64	341.64	391.78	444.25	436.50
7	15	443.60	328.91	294.36	294.36	294.36	294.36	361.43	423.67	410.06
7	16	318.09	256.59	217.40	217.40	217.40	217.40	291.55	361.33	346.70
7	17	189.77	177.50	130.44	130.44	130.44	130.44	207.71	286.59	273.91
7	18	65.96	91.19	53.84	53.84	53.84	53.84	102.92	160.46	155.49
7	19	10.88	23.37	10.88	10.88	10.88	10.88	22.94	40.38	40.53
7	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	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
8	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรอุฒิกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
8	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	6	15.43	22.24	49.63	56.10	37.85	13.93	13.93	13.93	13.93
8	7	102.66	84.74	160.78	182.90	138.13	68.82	68.82	68.82	68.82
8	8	242.30	172.96	265.45	296.60	248.17	160.88	160.88	160.88	160.88
8	9	373.18	252.12	338.46	371.29	331.37	247.27	247.27	247.27	247.27
8	10	476.35	302.53	372.15	402.90	374.75	304.19	302.53	302.53	302.53
8	11	559.78	349.32	385.02	407.08	395.20	356.34	349.32	349.32	349.32
8	12	624.03	396.16	396.16	396.68	404.58	405.47	400.81	396.16	396.16
8	13	634.18	398.32	398.32	398.32	398.32	406.49	445.79	457.17	433.96
8	14	559.02	359.31	359.31	359.31	359.31	361.82	438.40	468.53	434.56
8	15	430.86	301.70	297.06	297.06	297.06	297.06	382.62	422.91	389.17
8	16	291.84	219.78	208.26	208.26	208.26	208.26	293.79	340.61	309.81
8	17	165.86	140.71	121.98	121.98	121.98	121.98	205.32	258.41	231.49
8	18	50.11	59.91	45.85	45.85	45.85	45.85	87.30	118.42	107.00
8	19	4.15	4.76	4.15	4.15	4.15	4.15	5.35	6.45	6.20
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	14.12	13.09	36.34	46.51	37.09	13.60	13.09	13.09	13.09
9	7	92.21	64.51	125.79	158.80	136.52	72.02	64.51	64.51	64.51
9	8	212.55	144.69	211.66	257.13	236.66	162.25	144.69	144.69	144.69
9	9	343.01	232.44	287.74	339.01	327.77	260.60	232.44	232.44	232.44
9	10	478.75	315.35	349.42	405.07	408.07	356.66	315.35	315.35	315.35
9	11	581.49	356.00	356.00	409.74	434.26	412.81	357.97	356.00	356.00
9	12	608.53	370.24	370.24	370.24	406.68	430.23	418.53	378.43	370.24
9	13	564.58	361.99	361.99	361.99	361.99	413.06	443.12	425.54	370.63
9	14	490.17	311.78	311.78	311.78	311.78	356.94	424.90	426.47	360.75
9	15	378.35	253.26	253.26	253.26	253.26	285.21	373.66	391.48	328.22
9	16	255.20	185.33	185.33	185.33	185.33	203.54	294.15	320.93	268.20
9	17	129.74	99.53	99.53	99.53	99.53	107.96	201.43	235.14	189.35
9	18	27.23	27.39	27.23	27.23	27.23	27.23	74.50	94.12	74.54
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิฑูฏกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
10	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	6	13.27	12.57	36.98	57.18	51.23	22.61	12.57	12.57	12.57
10	7	100.90	67.46	126.42	187.08	177.60	103.53	67.46	67.46	67.46
10	8	236.87	152.16	211.54	295.06	294.78	210.86	152.16	152.16	152.16
10	9	381.56	216.41	262.28	375.36	395.19	310.15	216.41	216.41	216.41
10	10	501.27	271.56	274.70	394.06	441.52	389.26	271.56	271.56	271.56
10	11	557.75	313.15	313.15	384.81	434.25	432.61	360.84	313.15	313.15
10	12	585.84	321.51	321.51	321.51	397.79	449.41	425.95	341.16	321.51
10	13	562.56	322.98	322.98	322.98	343.81	442.34	470.81	412.52	322.98
10	14	489.76	308.15	306.15	306.15	306.15	404.63	471.92	441.96	332.32
10	15	374.95	247.79	247.79	247.79	247.79	326.65	419.21	411.24	307.40
10	16	233.00	164.30	164.30	164.30	164.30	221.48	321.15	328.84	240.05
10	17	95.55	78.71	78.71	78.71	78.71	110.47	188.14	201.66	143.09
10	18	18.24	18.24	18.24	18.24	18.24	27.30	57.98	65.37	45.13
10	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	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	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	6	8.31	8.31	14.11	21.53	21.19	13.30	8.31	8.31	8.31
11	7	85.87	56.41	105.67	186.10	190.50	116.27	56.41	56.41	56.41
11	8	252.14	133.12	197.62	357.06	385.18	265.49	133.12	133.12	133.12
11	9	403.48	204.47	231.62	412.43	471.26	373.61	204.47	204.47	204.47
11	10	537.40	260.94	260.94	420.21	518.16	465.22	292.41	260.94	260.94
11	11	624.82	297.37	297.37	374.08	511.75	523.63	402.75	297.37	297.37
11	12	644.69	311.04	311.04	311.04	456.30	538.43	487.14	332.49	311.04
11	13	598.67	291.69	291.69	291.69	363.11	508.58	526.79	407.07	291.69
11	14	507.80	253.79	253.79	253.79	256.78	451.20	529.80	446.49	253.79
11	15	376.18	205.36	205.36	205.36	205.36	365.24	480.34	434.17	253.81
11	16	228.57	136.44	136.44	136.44	136.44	261.22	392.36	373.44	215.54
11	17	78.43	60.41	60.41	60.41	60.41	129.40	225.24	224.45	127.48
11	18	12.09	12.09	12.09	12.09	12.09	26.09	50.22	52.00	30.39
11	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรวิมลกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ตาราง ข-2 (ต่อ)

ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์รวม [W/m^2] รายชั่วโมงเฉลี่ย Monthly Average ของกรุงเทพมหานคร ฯ
สำหรับพื้นผิว จัดวางในทิศทางต่างๆ

(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
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

หมายเหตุ. โดย ชลทิศ เอี่ยมวรอุฎติกุล, 2550, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีปทุม.

ภาคผนวก ค

ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์

ในการทดลองแบ่งจุดวัดรังสีดวงอาทิตย์จำลองออกเป็น แกน x และ y ห่างกัน 5 เซนติเมตรตามขนาดของผนังทดลอง และด้านมุมของผนัง 4 ด้าน และนำมาเฉลี่ย วัดต์/ชั่วโมง ของ ช่วงเวลาต่างๆ โดยแบ่งความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็น 3 ค่า คือ 500 วัดต์ 750 วัดต์ และ 1000 วัดต์ ดังภาพที่ ค.1

-15, -10, -5	A3 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	A2 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	A1 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	A0 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	B1 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	B2 ,0	5, 10, 15
-15, -10, -5	B3, 0	5, 10, 15

ภาพที่ ค.1 ตำแหน่งจุดวัดค่ารังสีดวงอาทิตย์ของผนังทดลอง จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559.

ซึ่งในการวัดได้วัดแต่ละจุดบนผนัง แล้วนำค่าแต่ละแถวมาเฉลี่ย ได้แก่ แถว A0 A1 A2 A3 B1 B2 และ B3 เพื่อหาค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยในแต่ละช่วงเวลาของผนังทดลองเพื่อหาระยะห่างที่เหมาะสมของดวงโคมจำลองแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลา ดังภาพที่ ค.2 - ค. 4 และเพื่อเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลอง โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่ 500 วัดต์
 - ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังจากการวัดจริง 502 วัดต์
 - มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม 66 เซนติเมตร
- ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา 07.00 - 10.00 น. และ 17.00-18.00

ตำแหน่งวัด	A0	A1	A2	A3	B1	B2	B3
-15	445	470	477	462	457	435	420
-10	495	520	524	508	501	485	460
-5	533	561	565	542	539	520	494
0	551	560	562	530	542	526	508
5	558	588	580	565	565	536	510
10	543	575	570	560	548	525	510
15	541	572	563	525	547	523	510

ภาพที่ ค.2 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 500 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่างจากผนัง 66 เซนติเมตร จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559.

- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่ 750 วัตต์
 - ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังจากการวัดจริง 776 วัตต์
 - มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม 56 เซนติเมตร
- ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา 10.00 - 13.00 น. และ 16.00-17.00 น.

ตำแหน่งวัด	A0	A1	A2	A3	B1	B2	B3
-15	820	790	705	620	820	784	710
-10	860	830	760	685	860	825	740
-5	875	860	780	700	890	845	750
0	920	870	810	700	900	860	760
5	860	833	784	670	860	820	740
10	829	790	720	650	840	810	720
15	780	744	630	610	790	726	700

ภาพที่ ค.3 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 750 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่างจากผนัง 56 เซนติเมตร จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559.

- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังที่ 1,000 วัตต์
- ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยของผนังจากการวัดจริง 1,002 วัตต์
- มีระยะห่างระหว่างผนังกับดวงโคม 35 เซนติเมตร
- ระยะเวลาเปิดดวงโคมเวลา 13.00 - 16.00

ตำแหน่งวัด	A0	A1	A2	A3	B1	B2	B3
-15	1118	1200	930	816	850	825	815
-10	1140	1138	955	825	956	935	819
-5	1165	1124	984	838	1063	1016	853
0	1265	1135	1006	859	1121	1060	860
5	1155	1124	1016	870	1130	1061	820
10	1145	1178	1015	871	1089	1021	815
15	1120	1260	1002	862	1020	945	803

ภาพที่ ค.4 ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ย 1,000 วัตต์ บนผนังทดลอง ณ ระยะห่างจากผนัง 35 เซนติเมตร จัดทำโดยผู้วิจัย เมื่อวันที่ 25 มกราคม 2559.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวแพพรพรรณ วัฒนวิเชียร
วันเดือนปีเกิด	19 สิงหาคม พ.ศ. 2535
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (สถาปัตยกรรม) เกียรตินิยมอันดับ 1 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานทางวิชาการ	<ul style="list-style-type: none"> - บทความเรื่อง “การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมโครแคปซูลเลตในอาคารปรับอากาศตลอดทั้งวัน” นำเสนอต่อที่การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 (E-NETT) วันที่ 8 – 10 มิถุนายน 2559 จัดทำโดยเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย - บทความเรื่อง “การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเบาที่มีสารเปลี่ยนสถานะบรรจุแบบแมโครแคปซูลเลตในเวลากลางวัน” นำเสนอต่อที่ประชุมวิชาการปี 2559 “Built Environment Research Associates Conference, BERAC 7, 2016” วันที่ 15 กรกฎาคม 2559 จัดทำโดยคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผลงานนิทรรศการ	- บ้านประหยัดพลังงาน นำเสนอต่อที่ Thai Green Building Expo and Conference 2016 วันที่ 4 กรกฎาคม 2559 จัดทำโดย สถาบันอาคารเขียวไทย
รางวัล	<ul style="list-style-type: none"> - รางวัลเรียนดี ประจำปีการศึกษา 2554 – 2555 คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ และการผังเมือง ที่มีผลการเรียนดีมีคะแนนเฉลี่ยสะสมสูงสุดของชั้นปีที่ 2 และชั้นปีที่ 3 จัดทำโดยมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ - รางวัลบทความประเภทชมเชยการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 วันที่ 8 – 10 มิถุนายน 2559 จัดทำโดยเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย