

อภิธานการ



สำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจของอิฐมวลเบาสำหรับพื้นที่เขตอากาศร้อนชื้น  
Eco-Design of Light Weight Concrete for humid tropical climate

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วันลงทะเบียน.....1.2.ต.ย. 2558..

เลขทะเบียน.....16993965

เลขเรียกหนังสือ.....

โดย

ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก และคณะ

TP

841

8451

2556

กันยายน 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจของอิฐมวลเบาสำหรับพื้นที่เขตอากาศร้อนชื้น  
Eco-Design of Light Weight Concrete for humid tropical climate

1 6993965

คณะผู้วิจัย

ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก

ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ดร.โยธิน อึ้งกุล

บริษัท อินทรีย์ ซุปเปอร์บล็อก จำกัด

ผศ.ดร.สมชาย มณีวรรณ

ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

นางสาวยุภาภาณี ยางจ้าน

ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยนเรศวร

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2555 ที่สนับสนุนงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท อินทรีย์ซูเปอร์บล็อก จำกัด ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การผลิต และบุคลากร ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะผู้ร่วมวิจัยทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนด้านเครื่องมืออุปกรณ์การทดลอง และการเก็บข้อมูล งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย



เรื่อง	หน้า
<b>อภิธานศัพท์</b>	
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1 – 1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1 – 1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1 – 2
1.3 ขอบเขต.....	1 – 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1 – 2
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>2 – 1</b>
2.1 ภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort).....	2 – 4
1. เขตความสบาย (Comfort zone).....	2 – 5
2. การควบคุมภาวะความสบายในอาคาร.....	2 – 5
2.2 การป้องกันความร้อนให้กับเปลือกอาคาร.....	2 – 6
1. การป้องกันความร้อนทางหลังคา.....	2 – 6
2. การป้องกันความร้อนให้กับผนังอาคาร.....	2 – 7
2.3 สารเปลี่ยนสถานะ.....	2 – 7
2.4 ทฤษฎีแรงอัด (Compressive Strength).....	2 – 9
2.5 ทฤษฎีแรงดัด (Flexural Strength).....	2 – 10
2.6 การดูดกลืนน้ำ.....	2 – 11
2.7 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร.....	2 – 11
2.8 ความพรุน.....	2 – 11
2.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	2 – 12
2.10 การเปลี่ยนสถานะของสสาร.....	2 – 16
2.11 อิฐมวลเบา.....	2 – 17
1. อิฐมวลเบา.....	2 – 17
2. ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบา.....	2 – 18
2.12 การออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจ (Eco design).....	2 – 22
2.12.1 วิธีการทำ Eco Design.....	2 – 22
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2 – 26

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
2.14 แนวทางสำหรับประยุกต์ใช้ในประเทศไทย.....	2 – 27
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>3 – 1</b>
3.1 การศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อน ของสารเปลี่ยนสถานะโดยเครื่อง DSC.....	3 – 3
3.2 การพัฒนาสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอิฐมวลเบา.....	3 – 4
3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM.....	3 – 8
3.4 การทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM.....	3 – 9
3.4.1 บ้านทดสอบ.....	3 – 10
3.4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	3 – 11
3.4.3 การออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจ.....	3 – 13
3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์.....	3 – 15
3.5.1 กระบวนการผลิต.....	3 – 17
3.6 การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม.....	3 – 18
3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3 – 20
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย.....</b>	<b>4 – 1</b>
4.1 ผลการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อน ของสารเปลี่ยนสถานะโดยเครื่อง DSC.....	4 – 1
4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบา ที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1505-2541.....	4 – 3
4.3 ผลทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM.....	4 – 7
4.4 ผลการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง.....	4 – 12
4.5 ผลการออกแบบเชิงนิเวศวิทยา.....	4 – 24
4.6 การประเมินผลการปรับปรุงผลิตภัณฑ์.....	4 – 28
4.7 ผลการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม.....	4 – 29
<b>บทที่ 5 บทสรุป.....</b>	<b>5 – 1</b>
5.1 สมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM.....	5 – 1

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
5.2 สภาวะใช้งานจริงในฤดูร้อนและจำลองสภาวะภูมิอากาศในฤดูฝน.....	5 – 2
5.3 การออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจ.....	5 – 3
5.4 การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม.....	5 – 3
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	5 – 4

บรรณานุกรม



## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพ 2.1	สัดส่วนการใช้พลังงานในภาคที่อยู่อาศัย..... 2 – 3
ภาพ 2.2	การป้องกันและลดความร้อนเข้าสู่อาคาร..... 2 – 4
ภาพ 2.3	ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาเพื่อให้เกิดสภาวะความสบายแก่อาคาร..... 2 – 4
ภาพ 2.4	ระดับความเป็นฉนวนกับค่าความต้านทานความร้อน..... 2 – 6
ภาพ 2.5	หลักการทางานของสารเปลี่ยนสถานะ..... 2 – 8
ภาพ 2.6	ลักษณะแรงต้านต่อการแตกด้านข้าง..... 2 – 9
ภาพ 2.7	การทดสอบแรงดัด..... 2 – 10
ภาพ 2.8	ความพรุนของอิฐมวลเบาในรูปแบบต่างๆ..... 2 – 12
ภาพ 2.9	เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์..... 2 – 12
ภาพ 2.10	ประเภทของธาตุใส่สารที่ทำการทดลองในเครื่อง DSC..... 2 – 13
ภาพ 2.11	ส่วนประกอบภายในของเครื่อง DSC..... 2 – 14
ภาพ 2.12	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC..... 2 – 15
ภาพ 2.13	การเปลี่ยนสถานะ (ก) Heating curve (ข) Cooling curve..... 2 – 16
ภาพ 2.14	คอนกรีตมวลเบาและลักษณะการใช้งาน..... 2 – 18
ภาพ 2.15	แม่พิมพ์อิฐมวลเบา..... 2 – 20
ภาพ 2.16	การบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาของฟองอากาศในอิฐมวลเบา..... 2 – 20
ภาพ 2.17	การตัดตามขนาดอิฐมวลเบา..... 2 – 21
ภาพ 2.18	การอบอิฐมวลเบาด้วยไอน้ำ..... 2 – 21
ภาพ 2.19	ขั้นตอนในการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ..... 2 – 23
ภาพ 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 3 – 2
ภาพ 3.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC..... 3 – 3
ภาพ 3.3	ตำแหน่งการติดตั้ง PCM ในการทดสอบ..... 3 – 4
ภาพ 3.4	รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (3-7 PCM อยู่ผนังด้านนอก)..... 3 – 5
ภาพ 3.5	รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (5-5 PCM อยู่ผนังด้านนอก)..... 3 – 6
ภาพ 3.6	รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (7-3 PCM อยู่ผนังด้านนอก)..... 3 – 7
ภาพ 3.7	ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกายภาพ..... 3 – 9
ภาพ 3.8	ตำแหน่งทดสอบการหน่วงความร้อน..... 3 – 9
ภาพ 3.9	แบบบ้านทดสอบ..... 3 – 10

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพ 3.10 ตำแหน่งการตรวจวัดที่บ้านทดสอบ.....	3 – 12
ภาพ 3.11 อีฐมวลเบา.....	3 – 13
ภาพ 3.12 กระบวนการผลิตของอีฐมวลเบา.....	3 – 17
ภาพ 3.13 ขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอีฐมวลเบา.....	3 – 18
ภาพ 3.14 ขอบเขตการศึกษา.....	3 – 19
ภาพ 3.15 สายเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบเค.....	3 – 20
ภาพ 3.16 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ.....	3 – 20
ภาพ 3.17 เครื่องวัดความเร็วลม.....	3 – 21
ภาพ 3.18 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน.....	3 – 21
ภาพ 3.19 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม.....	3 – 21
ภาพ 3.20 ไพรานอมิเตอร์.....	3 – 22
ภาพ 3.21 เครื่องที่ใช้ในการตัดขนาดของอีฐมวลเบาที่ใช้ในการทดสอบต่างๆ.....	3 – 22
ภาพ 3.22 การวัดโดยเวอร์เนียร์.....	3 – 22
ภาพ 3.23 ตู้อบความร้อนใช้ในการอบอีฐมวลเบาตัวอย่างที่ทดสอบ.....	3 – 23
ภาพ 3.24 การชั่งน้ำหนักของอีฐมวลเบา.....	3 – 23
ภาพ 3.25 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงอัด.....	3 – 23
ภาพ 3.26 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงดัด.....	3 – 24
ภาพ 4.1 ผลการทดสอบ DSC ของ PCM ชนิด S32.....	4 – 2
ภาพ 4.2 ผลการทดสอบ DSC ของ PCM ชนิด S44.....	4 – 2
ภาพ 4.3 ค่าต้านทานแรงอัดของ S32 แบบผ่านการอบ.....	4 – 5
ภาพ 4.4 ค่าต้านทานแรงอัดของ S44 แบบผ่านการอบ.....	4 – 5
ภาพ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในของ S32.....	4 – 8
ภาพ 4.6 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องของ S32.....	4 – 8
ภาพ 4.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในของ S44.....	4 – 9
ภาพ 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องของ S44.....	4 – 9
ภาพ 4.9 การห้วงความร้อนอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิดS32 ปรับความร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของ size 3-7.....	4 – 10
ภาพ 4.10 การห้วงความร้อนอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิดS32	



## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ปรับความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของ size 3-7	4 – 11
ภาพ 4.11 การห้วงความร้อนอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิดS32	
ปรับความร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของ size 3-7	4 – 11
ภาพ 4.12 สภาวะอากาศแวดล้อม	4 – 12
ภาพ 4.13 สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบ	4 – 13
ภาพ 4.14 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM	4 – 14
ภาพ 4.15 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบา	4 – 15
ภาพ 4.16 อุณหภูมิของบ้านอิฐมอญ	4 – 16
ภาพ 4.17 อุณหภูมิของบ้านอิฐบล็อก	4 – 17
ภาพ 4.18 สภาวะอากาศแวดล้อมภายนอก	4 – 18
ภาพ 4.19 สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบ	4 – 19
ภาพ 4.20 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM	4 – 20
ภาพ 4.21 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบา	4 – 21
ภาพ 4.22 อุณหภูมิของบ้านอิฐมอญ	4 – 22
ภาพ 4.23 อุณหภูมิของบ้านอิฐบล็อก	4 – 23
ภาพ 4.24 ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศภายในบ้านและอากาศแวดล้อม	4 – 24
ภาพ 4.25 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization)	4 – 29
ภาพ 4.26 คะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) ของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง	4 – 32

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตาราง 2.1 การใช้ไฟฟ้ารายสาขา ปี 2550-2553.....	2 – 2
ตาราง 2.2 ความต้องการไฟฟ้าและค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า.....	2 – 2
ตาราง 2.3 การจำหน่ายไฟฟ้าแยกตามประเภทผู้ใช้.....	2 – 3
ตาราง 2.4 ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบาตาม มอก.1505-2541.....	2 – 19
ตาราง 2.5 วิธีการ ของการทำEco Design Task โดย Wimmer et al (2004).....	2 – 24
ตาราง 3.1 แสดงปริมาตรของผนัง PCM ใน 1 ก้อน ขนาด 60 x 20 x 10 เซนติเมตร.....	3 – 8
ตาราง 3.2 แสดงสัดส่วนการผสม PCM และปูนก่อ ของอิฐมวลเบาขนาด 60 x 20 x 10 เซนติเมตร ฉาบได้จำนวน 5 ก้อน.....	3 – 8
ตาราง 3.3 ตำแหน่งการตรวจวัดที่บ้านทดสอบ.....	3 – 12
ตาราง 3.4 Pugh Selection Charts.....	3 – 14
ตาราง 3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์.....	3 – 16
ตาราง 4.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (แห้ง).....	4 – 3
ตาราง 4.2 ค่าต้านทานแรงดัด.....	4 – 6
ตาราง 4.3 อัตราการดูดกลืนน้ำ.....	4 – 7
ตาราง 4.4 Weighting of Environmental Stakeholder Requirements.....	4 – 25
ตาราง 4.5 EQFD -Translation of VOC and VOE into Environmental Parameters.....	4 – 27
ตาราง 4.6 Eco design strategies, measures and tasks.....	4 – 28
ตาราง 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านใน.....	4 – 28
ตาราง 4.9 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้อง.....	4 – 29
ตาราง 4.10 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization).....	4 – 30
ตาราง 4.11 ค่าคะแนนเชิงเดี่ยวของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Single score).....	4 – 33
ตาราง 4.12 ค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) แบบแยกประเภทของผลกระทบของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง.....	4 – 34

## บทนำ

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งทำให้มีการพัฒนาโครงสร้างอาคาร ทั้งกรอบอาคาร หลังคา กระจก และกรอบอาคารส่วนอื่นๆ เพื่อลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร และประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศเพื่อให้เกิดความสบายในการอยู่อาศัย และมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นของตลาดสิ่งก่อสร้างขยายตัวตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้สถานการณ์อุตสาหกรรมในกลุ่มของสิ่งก่อสร้างเพื่อประหยัดพลังงานมีบทบาทเพิ่มขึ้น ทั้งในด้านเศรษฐกิจโดยตรง และผลกระทบต่อด้านอื่นๆ ที่ตามมา โดยเฉพาะในด้านของการรับผิดชอบต่อผู้บริโภคผู้ประกอบการต่อผลกระทบต่อพลังงานและสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตด้วยเช่นกัน ซึ่งเนื่องจากในปัจจุบันทัศนคติของผู้ใช้งานหรือผู้บริโภคไม่เพียงแต่คำนึงถึงปลายทางของการใช้งานเท่านั้น ยังมีแนวทางที่สำคัญไม่แพ้กันนั่นคือ การพิจารณาถึงที่มาของผลิตภัณฑ์ด้วย

## 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีมาตรการหรือกฎหมายบังคับสำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างชัดเจน แต่จากสภาวะโลกร้อนและมาตรการทางการค้าระหว่างประเทศที่เข้มงวดจึงเป็นตัวกระตุ้นและส่งเสริมให้ผู้ประกอบการหันมาใส่ใจกับแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น การแสดงความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อมสามารถทำได้หลายแนวทาง เช่น การนำเทคโนโลยีสะอาด (Cleaner Technology; CT) เข้ามาใช้เพื่อลดมลพิษจากแหล่งกำเนิดและการนำผลิตภัณฑ์มาใช้ใหม่ซึ่งรวมถึงการใช้เทคโนโลยีหมุนเวียน [1] การประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment; LCA) เพื่อเป็นการประเมินเชิงปริมาณของการใช้ทรัพยากร ปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้น และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อโลกและระบบนิเวศโดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์และบริการ [2] เป็นต้น

สำหรับแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพควรเริ่มต้นจากกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีต้นทุนการออกแบบผลิตภัณฑ์ทางตรงจะมีเพียง 5 - 13% ของต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม แต่เนื่องจากการออกแบบผลิตภัณฑ์เป็นตัวกำหนดโครงสร้างต้นทุนมากถึง 60-80% [3] ส่งผลให้การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ หรือ EcoDesign (Economic & Ecological Design) เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการผลิตสินค้า โดยเป็นกระบวนการที่ผนวกแนวคิดด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมเข้าไปในขั้นตอนการออกแบบ โดยทำการประยุกต์ใช้หลักการของ 4Rs ในทุกช่วงของวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้แก่ การลด (Reduce) การใช้ซ้ำ (Reuse) การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) และการซ่อมบำรุง (Repair) [4] เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Products)

ดังนั้นนักวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจจากอิฐมวลเบา G4 สำหรับพื้นที่เขตอากาศร้อนชื้น โดยทำการศึกษากระบวนการผลิตอิฐมวลเบา G4 และเก็บข้อมูลการใช้พลังงานวัตถุดิบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาปรับปรุงการผลิตโดยประยุกต์ใช้หลักการ EcoDesign โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำมาใช้ศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และจัดทำข้อกำหนดมาตรฐานต่างๆ เพื่อรองรับมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมและทำให้เกิดการพัฒนาด้านสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืนต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจของอิฐมวลเบา G4 สำหรับพื้นที่เขตอากาศร้อนชื้น
- 2) ศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบทางด้านเทคนิคเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมในขั้นตอนการออกแบบ เพื่อพัฒนาอิฐมวลเบา G4 ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- 3) เพื่อทำการสร้างและทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบา G4 ออกแบบใหม่เปรียบเทียบกับอิฐมวลเบา G4 เชียงพาณิชย์

## 1.3 ขอบเขต

- 1) อิฐที่ทำการออกแบบใหม่ต้องมีสมบัติทางกายภาพไม่น้อยกว่าอิฐมวลเบา G4
- 2) ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพดังรายละเอียดต่อไปนี้
  - ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Compressive Density : ASTM C642-97)
  - ค่าต้านทานแรงอัด (Compressive strength : ASTM C1555-03a)
  - ค่าต้านทานแรงดัด (Flexural strength : ASTM C1555-03a)
  - ค่าการดูดกลืนน้ำ (Absorption water : ASTM C642-97)
- 3) อิฐมวลเบา G4 ที่ออกแบบใหม่ทำการผลิตโดยใช้กระบวนการอบไอน้ำ
- 4) ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบวงจรชีวิตระหว่างอิฐมวลเบาที่ออกแบบใหม่กับอิฐเชิงพาณิชย์

## 1.4 ประโยชน์ที่คิดว่าจะได้รับ

- 1) ได้อิฐมวลเบา G4 ที่เป็นมิตรและช่วยลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม รวมถึงเป็นแนวทางในการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development)
- 2) สามารถลดต้นทุนการผลิตอิฐมวลเบา G4 จากการลดปริมาณวัตถุดิบและการใช้พลังงานในการผลิต
- 3) สามารถนำวัสดุหรือชิ้นส่วนกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการปรับปรุงอิฐมวลเบา G4 ในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศเพื่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตและความเป็นอยู่ของประชากรให้มีความสุขสบายมากขึ้นพบว่า ปริมาณการใช้ไฟฟ้าในสาขาที่อยู่อาศัยมีปริมาณการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่ออำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวัน ได้แก่ เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น ระบบไฟฟ้าแสงสว่าง ระบบปรับอากาศ เป็นต้น และอีกส่วนหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ คือวัสดุครอบอาคารที่ห่อหุ้มเปลือกอาคารโดยรอบ ซึ่งได้แก่ ผนังและหลังคา (สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ก)

โดยภาพรวมแล้วการใช้พลังงานในประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งพบว่า การใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นสุดท้าย ในปี 2553 อยู่ที่ระดับ 1,191 เทียบเท่าพันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน ขยายตัวเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนร้อยละ 5.1 โดยการใช้ น้ำมันสำเร็จรูปเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.4 เนื่องจากเศรษฐกิจไทยเริ่มฟื้นตัวตามเศรษฐกิจโลกจึงส่งผลให้เศรษฐกิจในภาคอุตสาหกรรมปรับตัวดีขึ้น การใช้ถ่านหินนำเข้าขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.4 การใช้ไฟฟ้าขยายตัวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 10.4 โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม รองลงมาคือภาคธุรกิจและภาคครัวเรือน และ การใช้ก๊าซธรรมชาติเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.8 ในขณะที่การใช้ลิแกนด์ลดลงร้อยละ 2.6 สัดส่วนการใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นสุดท้ายในปี 2553 การใช้ น้ำมันสำเร็จรูปมีสัดส่วนมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 55 รองลงมาเป็นไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 22 ลิแกนด์/ถ่านหินนำเข้าคิดเป็นร้อยละ 13 และก๊าซธรรมชาติคิดเป็นร้อยละ 10 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554)

ปริมาณการใช้ไฟฟ้า ในปี 2553 มีการใช้ไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 148,709 กิกะวัตต์ชั่วโมง โดยการใช้ไฟฟ้ารายสาขาเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนทุกประเภท ผู้ใช้ไฟโดยเฉพาะในสาขาหลักที่มีการใช้ไฟฟ้าระดับสูง ได้แก่ ภาคอุตสาหกรรม สัดส่วนการใช้ร้อยละ 44 ของผู้ใช้ไฟฟ้าทั้งหมด มีการใช้ไฟเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.0 ภาคธุรกิจและภาคครัวเรือนที่มีสัดส่วนการใช้รองลงมามีการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.3 และร้อยละ 9.8 ตามลำดับ (ตาราง 2.1)

ตาราง 2.1 การใช้ไฟฟ้ารายสาขา ปี 2550-2553

GWh	ครัวเรือน	ธุรกิจ	อุตสาหกรรม	เกษตรกรรม	อื่น ๆ	ลูกค้านำตรง	รวม
2550	27,960	32,839	59,436	268	9,288	2,702	132,492
2551	28,692	33,116	60,057	288	9,387	2,873	134,412
2552	30,258	32,634	59,402	316	9,289	2,894	134,793
2553	33,214	35,980	65,957	335	10,309	2,914	148,709
(%) จากช่วงเดียวกันกับปีก่อน	9.8	10.3	11.0	6.1	11.0	1.5	10.3
สัดส่วน (%)	22	24	44	0.2	7	2	100

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554

ตาราง 2.2 ความต้องการไฟฟ้าและค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า

ปี	ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (เมกะวัตต์)	ค่าตัวประกอบการใช้ไฟฟ้า (ร้อยละ)
2542	13,712	76.1
2543	14,918	75.2
2544	16,126	73.5
2545	16,681	76.1
2546	18,121	73.9
2547	19,326	71.6
2548	20,538	74.9
2549	21,064	76.9
2550	22,586	74.3
2551	22,568	74.8
2552	22,596	73.4
2553	24,630	75.9

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554

การใช้ไฟฟ้าในเขตนครหลวง เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนถึงร้อยละ 8.0 อยู่ที่ระดับ 45,061 กิกะวัตต์ชั่วโมง โดยเฉพาะการลงทุนในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.5 และการใช้ในบ้านและที่อยู่อาศัยมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.6

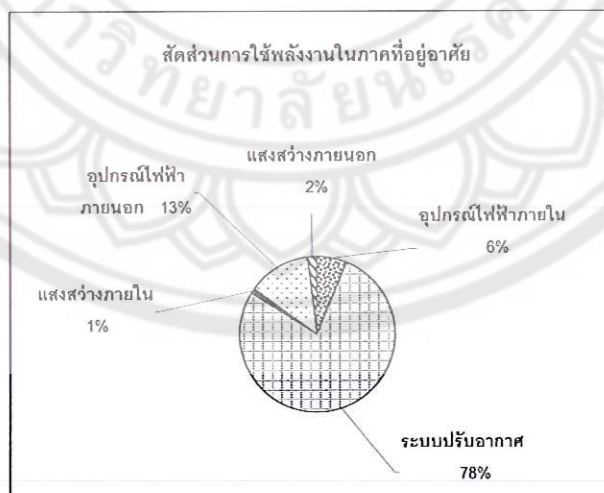
การใช้ไฟฟ้าในเขตภูมิภาค เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อนถึงร้อยละ 11.7 อยู่ที่ระดับ 100,734 กิกะวัตต์ชั่วโมง เนื่องจากภาวะเศรษฐกิจไทยที่ขยายตัวเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในสาขาอุตสาหกรรมและธุรกิจมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.3 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีที่แล้ว ส่วนการใช้ไฟฟ้าประเภทบ้านและที่อยู่อาศัยมีการขยายตัว เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.9 และการใช้ไฟฟ้าในภาคเกษตรกรรมเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.1 ส่วนค่าเอฟทีในช่วงเดือนกันยายน-ธันวาคม 2553 ยังคงมีการตรึงค่าเอฟทีในอัตรา 92.55 สตางค์ต่อหน่วย

ตาราง 2.3 การจำหน่ายไฟฟ้าแยกตามประเภทผู้ใช้

ประเภทผู้ใช้	ปริมาณ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)		เปลี่ยนแปลง (%)
	2552	2553	
การใช้ไฟฟ้าในเขตนครหลวง	41,733	45,061	8.0
บ้านและที่อยู่อาศัย	9,779	10,716	9.6
ธุรกิจ	13,920	14,962	7.5
อุตสาหกรรม	15,768	16,948	7.5
อื่นๆ	2,266	2,435	7.5
การใช้ไฟฟ้าในเขตภูมิภาค	90,165	100,734	11.7
บ้านและที่อยู่อาศัย	20,479	22,498	9.9
ธุรกิจ	18,713	21,018	12.3
อุตสาหกรรม	43,634	49,009	12.3
เกษตรกรรม	316	335	6.1
อื่นๆ	7,023	7,874	12.1
ลูกค้าตรง กฟผ.	2,894	2,914	0.7
รวมทั้งสิ้น	134,793	148,709	10.3

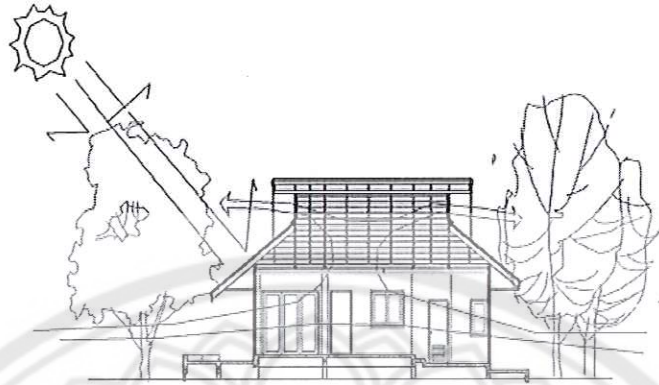
ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554

การใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงเป็นเรื่องสำคัญที่ควรพิจารณาอย่างเร่งด่วน เนื่องจากการใช้พลังงานในสาขาบ้านอยู่อาศัย มีการใช้สำหรับระบบปรับอากาศในสัดส่วนร้อยละ 78 และในสัดส่วนอื่นๆ ร้อยละ 12 (สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ข) ดังนั้นหากมีการใช้งานในระบบปรับอากาศลดลงจะช่วยให้มีการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศเพิ่มมากขึ้น



ภาพ 2.1 สัดส่วนการใช้พลังงานในภาคที่อยู่อาศัย

แนวทางหนึ่งในการลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศคือ การป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร เช่น การสร้างความเย็นให้กับสภาพแวดล้อม การป้องกันความร้อนให้กับเปลือกอาคาร การเลือกใช้การระบายอากาศภายในอาคาร (สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ก)



ภาพ 2.2 การป้องกันและลดความร้อนเข้าสู่อาคาร

### 2.1 ภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)

ภาวะความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารนั้นเป็นหัวใจในการออกแบบสร้างอาคารต่างๆ จึงได้มีการศึกษาภาวะความสบายอยู่เสมอ เนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของผู้อยู่อาศัย อีกทั้งยังส่งผลต่อเรื่องของการใช้พลังงานเพื่อปรับสภาวะอากาศให้รู้สึกสบาย (สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ค) โดยปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะความสบาย (Comfort) แก่อาคาร ได้แก่

- ก. อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)
- ข. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)
- ค. ความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity)
- ง. การไหลเวียนของอากาศ (Air Movement)

ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณา เพื่อให้เกิดสภาวะน่าสบายแก่อาคาร



ภาพ 2.3 ปัจจัยพื้นฐานในการพิจารณาเพื่อให้เกิดสภาวะความสบายแก่อาคาร

ที่มา : สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ค



ปัจจัยดังกล่าวนี้เป็นปัจจัยหลักที่จะใช้ในการสร้างแนวทางในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยจากการศึกษาการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารจะพิจารณากรอบอาคาร 2 ส่วนด้วยกัน คือ หลังคา และผนังอาคาร โดยเมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นกรอบอาคารนี้ พบว่าคุณสมบัติวัสดุผสมที่มีความน่าจะเป็นตัวแทนวัสดุสำหรับเปลือกอาคารที่ดี คือ วัสดุที่มีการใช้งานร่วมกันระหว่างฉนวนประเภทปิดและมวลสาร โดยผิวภายนอกของอาคารจะเป็นการป้องกันการแพร่ผ่านของความร้อนและความชื้นเข้าสู่ภายในอาคาร ส่วนภายในของอาคารจะเป็นการสร้างเสถียรภาพทางอุณหภูมิให้กับอาคาร

## 1. เขตความสบาย (Comfort zone)

เขตความสบาย คือ การหาช่วงของอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมที่เหมาะสมที่ทำให้มนุษย์เรารู้สึกว่าอยู่ในสภาวะที่น่าสบาย เนื่องจากไม่สามารถกำหนดค่าภาวะความสบายออกมาเป็นตัวเลขได้จึงต้องพูดเป็นเขตหรือเป็นช่วง ทำให้ทราบว่าคนเราสามารถมีความสบายหรืออยู่ในสภาวะน่าสบายในจุดที่ต่างกันได้ แต่จุดของความแตกต่างกันไม่ควรมีความห่างกันมาก เมื่อความสบายของคนต่างชาติต่างผิวพรรณซึ่งอยู่ต่างสภาพภูมิอากาศมีความแตกต่างกัน เขตความสบายของคนที่อยู่ในสภาพภูมิอากาศต่างกันย่อมมีความแตกต่างกันด้วย

## 2. การควบคุมภาวะความสบายในอาคาร

การควบคุมสภาวะน่าสบายในอาคารและประหยัดพลังงานไปด้วย ซึ่งอาจแยกเป็นแนวทางของการออกแบบเพื่อการประหยัดพลังงานได้ 2 แนวทาง คือ

### 2.1 แบบพึ่งพาธรรมชาติ

การออกแบบอาคารโดยวิธีการพึ่งพาธรรมชาติ หมายถึง การออกแบบอาคารที่พยายามดึงเอาประโยชน์จากพลังงานจากธรรมชาติที่ไม่หมดไปเข้ามาใช้ในอาคาร เพื่อให้อาคารเข้าสู่สภาวะน่าสบาย โดยการเจาะช่องเปิดรับลมประจำถิ่นให้เข้ามาช่วยถ่ายเทระบายความร้อนในอาคาร หรือการเจาะช่องแสงเพื่อใช้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติในช่วงเวลาที่สามารถทำได้ทดแทนการใช้แสงประดิษฐ์

### 2.2 แบบพึ่งพาเครื่องกล

หากอาคารที่ออกแบบมีหลายปัจจัย ที่ทำให้ไม่สามารถจะนำประโยชน์จากการใช้พลังงานจากธรรมชาติที่ไม่หมดไปเข้ามาทำให้เกิดสภาวะน่าสบายได้อย่างในแนวทางแรก การออกแบบในแนวทางที่สองซึ่งต้องพึ่งพาเครื่องกลจึงเข้ามาเป็นทางเลือก เช่น ใช้เครื่องปรับอากาศในการช่วยถ่ายเทความร้อน ปรับอุณหภูมิภายในอาคารเพื่อสร้างภาวะความสบายขึ้นตลอดจนการเลือกใช้ เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือหลอดไฟที่ออกแบบพิเศษเพื่อช่วยประหยัดพลังงาน และนอกจากการออกแบบที่ดีจะสามารถช่วยประหยัดพลังงานแล้ว ยังต้องมาจากผู้ใช้งานอาคาร ที่ควรรู้จักใช้อุปกรณ์อาคาร และเครื่องอำนวยความสะดวกภายในอาคาร อย่างถูกต้อง ประหยัด และรู้คุณค่าประกอบกันไปอีกด้วย

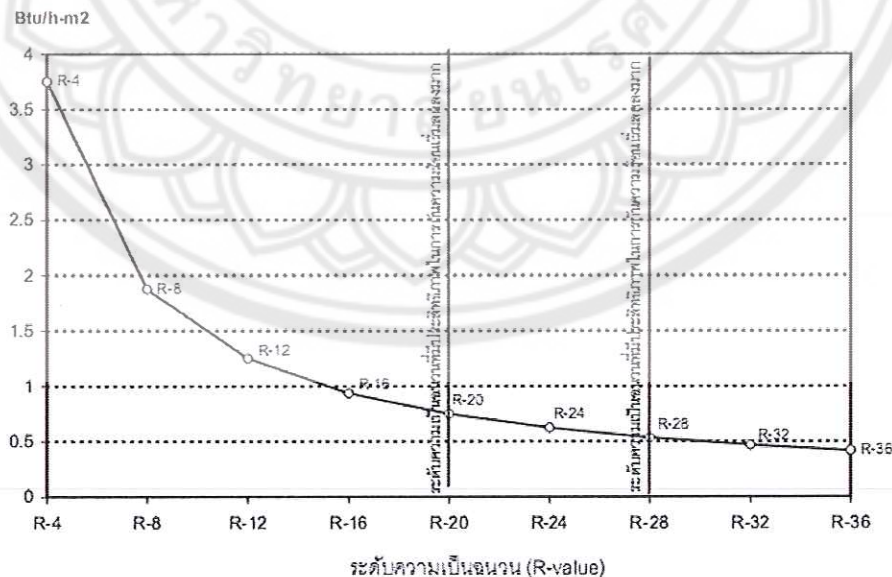
## 2.2 การป้องกันความร้อนให้กับเปลือกอาคาร

### 1. การป้องกันความร้อนทางหลังคา

หลังคาเป็นพื้นที่ที่มีระดับใกล้เคียงแนวนอนจึงมีผลให้มีปริมาณการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์สูงกว่าพื้นที่ในแนวระนาบตั้ง เช่น ผนังอาคาร นอกจากนี้หลังคายังเป็นส่วนบนสุดของอาคารซึ่งทำหน้าที่ป้องกันแสงอาทิตย์ให้กับอาคารทั้งหลัง หลังคาจึงเป็นส่วนที่มีความร้อนสูงสุดในองค์ประกอบทั้งหมดของอาคาร หลังคาที่มีสีเข้ม เช่น สีน้ำตาลแดงหรือสีน้ำเงินเข้ม อาจมีอุณหภูมิผิวภายนอกสูงถึง 60 องศาเซลเซียสในช่วงที่มีแดดจัด (สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน, 2553ก)

การป้องกันความร้อนจากหลังคาจึงเป็นจุดวิกฤตในการป้องกันความร้อนที่จะแพร่ผ่านเข้าสู่ภายในอาคารเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายนอก การป้องกันความร้อนจากหลังคาที่เหมาะสมอาจทำได้โดย

1.1 การตัดแบ่งพื้นที่ใต้หลังคาและส่วนภายในอาคารด้วยฉนวนกันความร้อน การตัดแบ่งพื้นที่ระหว่างพื้นที่ใต้หลังคาที่มีความร้อนสูง และส่วนภายในอาคารที่ต้องการให้มีความร้อนแพร่ผ่านเข้ามาให้น้อยที่สุด จำเป็นจะต้องใช้วัสดุฉนวนที่มีความสามารถในการกันความร้อนสูงมากสำหรับประเทศไทย และต้องมีการเลือกใช้ระบบฝ้าเพดานที่มีรอยรั่วน้อยที่สุด เพื่อป้องกันการรั่วซึมจากอากาศร้อนในส่วนพื้นที่ใต้หลังคาที่อาจรั่วซึมเข้ามาภายในอาคาร ฉนวนจะทำหน้าที่ลดความร้อนจากพื้นที่ใต้หลังคาให้แพร่เข้าสู่ภายในอาคารน้อยที่สุด ถ้าประมาณว่าขอบเขตสูงสุดของเขตสบายอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียสตามแผนภูมิไบโอไคลเมติก ส่วนอุณหภูมิของพื้นที่ใต้ฝ้าเพดานอาจอยู่ที่ประมาณ 40-45 องศาเซลเซียสในช่วงที่มีความร้อนสูง (ค่าอุณหภูมิใต้ฝ้านี้เป็นค่าประมาณกับหลังคาประเภทมวลสาร เช่น หงคากกระเบื้องต่างๆ ค่านี้อาจสูงมากขึ้นถ้าเป็นหลังคาที่มีมวลสารน้อยและบาง เช่น หลังคาเหล็ก หลังคาสังกะสี ฯลฯ) จะพบว่าค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในที่ต้องการและค่าอุณหภูมิใต้ฝ้าเพดานมีความแตกต่างประมาณ 13-18 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับฉนวนที่มีค่า R-value แตกต่างกันจะมีการถ่ายเทความร้อน ดังนี้



ภาพ 2.4 ระดับความเป็นฉนวนกับค่าความต้านทานความร้อน

จากการศึกษาจะพบว่าความมีประสิทธิภาพจะตกลงอย่างมากตั้งแต่ช่วง R-20 ถึง R-28 และหลังจากนี้จะเป็นส่วนที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนไม่คุ้มค่ากับระดับการเพิ่มฉนวน ดังนั้นการใช้ฉนวนสำหรับหลังคาตามสมมุติฐานนี้อาจใช้ได้ตั้งแต่ระดับความเป็นฉนวนที่ R-20 ไปจนถึง R-28 สำหรับการตัดแบ่งพื้นที่ใต้หลังคาออกจากพื้นที่ภายในอาคาร

1.2 การระบายอากาศร้อนภายใต้หลังคา การระบายอากาศร้อนที่สะสมใต้หลังคาออกไปเป็นอีกทางเลือกที่จะช่วยลดความร้อนออกจากพื้นที่ใต้หลังคาได้อย่างไรก็ดี วิธีการดังกล่าวยังมีข้อติดขัดอยู่ที่ความสามารถในการระบายความร้อนออกจากพื้นที่ด้วยการไหลเวียนอากาศตามธรรมชาติ เนื่องจากค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ต้องการให้ภายในอาคารและค่าอุณหภูมิอากาศใต้หลังคาที่มีความร้อนสูงมีค่าความแตกต่างกันมาก ความเร็วลมที่จะระบายความร้อนออกไปจะมีค่าสูงมากกว่าที่จะมีอยู่ตามสภาพแวดล้อมในธรรมชาติ การระบายอากาศร้อนเพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอในการป้องกันความร้อนจากหลังคา และจำเป็นจะต้องใช้ฉนวนเข้ามาป้องกันความร้อนจากพื้นที่ใต้หลังคาเพิ่มเติม

## 2. การป้องกันความร้อนให้กับผนังอาคาร

การใช้ความเย็นจากดินกับส่วนพื้นของอาคาร พื้นอาคารที่สร้างจากวัสดุที่นำความร้อนได้ดี เช่น พื้นคอนกรีตในบ้านพักอาศัยทั่วไป ถ้าสามารถทำให้ผิวด้านล่างสัมผัสกับพื้นดินโดยมีการกันความชื้นแทรกซึมอย่างถูกต้อง จะพบว่าห้องภายในจะสามารถใช้ประโยชน์จากระดับอุณหภูมิที่ต่ำและมีความคงที่สูงจากดินข้างใต้อาคารได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากดินเป็นวัสดุที่มีมวลสารมากจึงมีค่าความจุความร้อนสูง ดินที่ระดับความลึกมากพอสมควรจึงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตลอดวันมากนัก นอกจากนี้ดินข้างใต้อาคารเป็นส่วนที่จะไม่ได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์และสภาพแวดล้อมภายนอกตลอดวัน ดินข้างใต้อาคารจึงมักมีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อมภายนอก อาคารที่ได้รับการออกแบบให้มีส่วนพื้นสัมผัสกับพื้นดินข้างใต้จะสามารถใช้ประโยชน์ในการสร้างพื้นที่มีอุณหภูมิผิวต่ำตลอดวันได้

อย่างไรก็ตามการออกแบบให้ส่วนพื้นสัมผัสกับดินอาจไม่เหมาะสมกับอาคารปรับอากาศปรับอากาศ เพราะจะเป็นการเพิ่มมวลสารที่เครื่องปรับอากาศต้องขจัดความร้อนออกจากวัสดุเพิ่มขึ้น

## 2.3 สารเปลี่ยนสถานะ

สารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material หรือ PCM) หมายถึง สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เช่น พาราฟิน กรดไขมัน เกลือไฮเดรท โลหะผสม และสารอื่นๆ ที่ทำหน้าที่ดูดซับ (absorb) พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ทำให้สามารถป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารที่พักอาศัยได้ (Vineet Veer Tyagi and Buddhi, 2007, pp 1146-1166)

### 1. คุณสมบัติของ PCM ดังต่อไปนี้

#### 1.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Thermophysical properties)

(ก) อุณหภูมิการหลอมเหลวมีความเหมาะสมกับการใช้งาน

(ข) ความร้อนแฝงของความร้อนต่อหน่วยปริมาตรมีค่าสูง ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวต่อหน่วยปริมาตรสูง ดังนั้นความต้องการปริมาณภาชนะที่ใช้สะสมจำนวนพลังงานมีค่าน้อย

(ค) มีค่าความร้อนจำเพาะสูงที่ให้ค่าเพิ่มจากการจัดเก็บความร้อนแบบสัมผัส

(ง) มีค่าการนำความร้อนสูงในสถานะของแข็งและของเหลวซึ่งช่วยในการเก็บและการปล่อยพลังงานของระบบสะสมความร้อน

(จ) ในการเปลี่ยนสถานะนั้นปริมาตรมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากและที่อุณหภูมิการทำงานมีความดันไอน้อยช่วยลดปัญหา Containment

(ข) การหลอมเหลวสอดคล้องกันของ PCM สำหรับความจุของการจัดเก็บคงที่ของวัสดุในระหว่างวัฏจักรการแข็งตัวและการหลอมเหลว

### 1.2 คุณสมบัติทางจลน์ (Kinetic properties)

(ก) อัตราการเกิด nucleation สูง ช่วยหลีกเลี่ยงการเกิด super cooling ในการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว

(ข) อัตราการเกิดผลึกสูง ดังนั้นระบบจะตอบสนองความต้องการของการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่จากระบบการจัดเก็บ

### 1.3 คุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties)

(ก) การเปลี่ยนรอบการแข็งตัวและการหลอมเหลวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

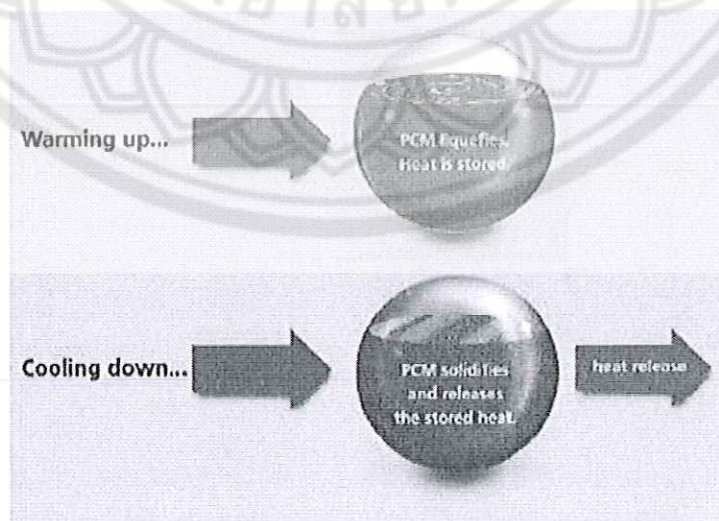
(ข) ไม่มีการเสื่อมสภาพหลังจากรอบของแข็งและของเหลว

(ค) ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosiveness) ในวัสดุโครงสร้าง

(ง) ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และไม่ระเบิด

## 2. หลักการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ

หลักการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ เกิดขึ้นจากความสามารถในการดูดซับความร้อน (absorb) ในช่วงกลางวันที่มีอุณหภูมิสูง และปลดปล่อยความร้อน (release) ออกมาในช่วงเวลากลางคืนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำลง หลังจากนั้นจะสามารถดูดซับความร้อนในตอนกลางวันได้อีกครั้ง โดยความร้อนที่ดูดซับจะถูกเก็บไว้ในรูปความร้อนแฝง (Latent heat) และไม่มีผลกระทบต่อมวลโครงสร้างรวม



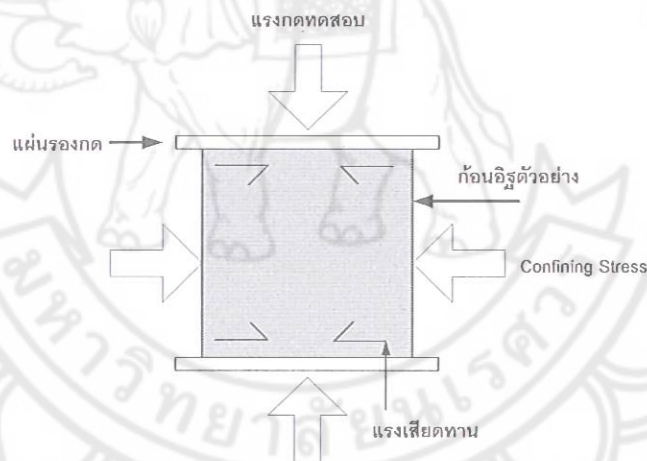
ภาพ 2.5 หลักการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะ

## 2.4 ทฤษฎีแรงอัด (Compressive Strength)

เพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา ให้เป็นไปตามมาตรฐานคอนกรีต โดยทำการตัดก้อนตัวอย่างขนาด 100 x 100 x 100 มิลลิเมตร ทำการทดสอบเมื่อก้อนตัวอย่างผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 ±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีวิธีทดสอบ ดังนี้

1. เปิดเครื่องทดสอบค่าการรับแรงอัดก่อนทำการกดก้อนตัวอย่างทดสอบประมาณ 10 นาที เพื่อเพิ่มแรงในการทดสอบ
2. ให้ทำการกดก้อนตัวอย่างในแนวที่ตั้งฉากกับด้านยาวของก้อนตัวอย่าง
3. จดบันทึกค่าที่รับแรงอัดสูงสุดเมื่อก้อนตัวอย่างที่เกิดการแตกเสียหายโดยค่าที่ได้ให้จดเป็นหน่วยตัน เพื่อใช้ในการคำนวณค่ารับแรงอัดของอิฐมวลเบา

โดยขณะที่กดก้อนตัวอย่าง ก้อนตัวอย่างจะแตกออกด้านข้าง ทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างผิวของก้อนตัวอย่างกับแผ่นรองกด แรงเสียดทานดังกล่าว จะก่อให้เกิดแรงต้านทานต่อการแตกด้านข้างของก้อนตัวอย่างที่เรียกว่า Confining Stress ดังภาพที่ 3 โดยค่า Confining Stress นี้จะมีค่ามากถ้าผิวสัมผัสของก้อนตัวอย่างกับเครื่องกดมีค่ามาก ดังนั้นผลการทดสอบกำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ จึงมีค่า Confining Stress (ASTM International, 2003)



ภาพ 2.6 ลักษณะแรงต้านต่อการแตกด้านข้าง

การคำนวณผลการทดสอบดังสมการ 13 เพื่อหาพื้นที่รับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างอิฐมวลเบาทดสอบตามมาตรฐาน

$$\frac{\text{ค่ารับแรงอัดสูงสุด (ton)} \times \text{ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องทดสอบ} \times 10 \text{ กิโลกรัม}}{\text{พื้นที่ผิว (mm}^2\text{)}}$$

พื้นที่ผิว (mm<sup>2</sup>)

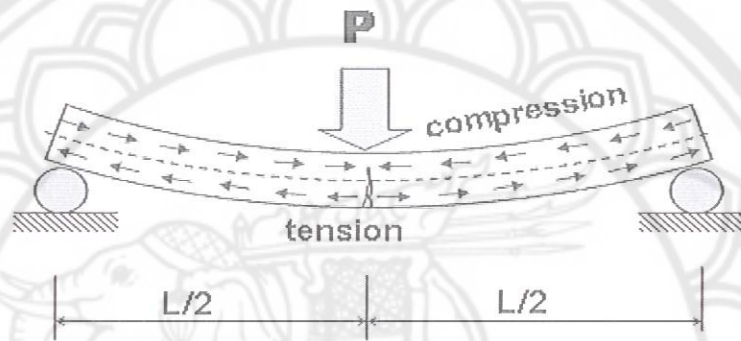
(1)

## 2.5 ทฤษฎีแรงดัด (Flexural Strength)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ มีดังนี้

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงดัดของคอนกรีต โดยทดสอบกับคานคอนกรีต ที่วางบน Simple Support (Simple Beam) Center-Point Loading ผลของค่ากำลังต้านทานแรงดัดจะอยู่ในรูปของโมดูลัสการแตกร้าว (Modulus of Rupture) โดยเป็นค่าหน่วยแรงดึงสูงสุด ณ จุดที่แตกร้าวในคานที่ทำการทดสอบ (ASTM International, 2003) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$f_b = \frac{Mc}{I} \quad (2)$$



ภาพ 2.7 การทดสอบแรงดัด

คำนวณค่ากำลังรับแรงดัด (Modulus of Rupture)

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

เมื่อ	R	=	โมดูลัสการแตกร้าว (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
	P	=	น้ำหนักสูงสุด (Maximum Load) (กิโลกรัม)
	L	=	ความยาวคาน (Span Length) (เมตร)
	b	=	ความกว้างเฉลี่ยของคาน (เมตร)
	d	=	ความลึกเฉลี่ยของคาน (เมตร)

## 2.6 การดูดกลืนน้ำ

เพื่อทดสอบการกลืนน้ำซึมน้ำของอิฐมวลเบา การหาการดูดซึมน้ำคิดจากค่าเฉลี่ยน้ำหนักของอิฐแห้งและน้ำหนักของอิฐที่ดูดซึมน้ำเป็นกรัม (ASTM International, 2003) ดังสูตร การคำนวณอัตราการดูดกลืนน้ำโดยหาจากสมการดังนี้

$$\text{น้ำหนักน้ำที่ดูดกลืน (กรัม)} = \text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ 24 ชม. (กรัม)} - \text{น้ำหนักก่อนแช่น้ำ (กรัม)} \quad (4)$$

$$\text{อัตราการดูดกลืนน้ำโดยปริมาตร} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (5)$$

เมื่อ  $W_1$  = ปริมาตรหลังอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$W_2$  = น้ำหนักน้ำที่ดูดกลืน (กรัม)

## 2.7 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร

การทดสอบเพื่อหาความหนาแน่นของอิฐมวลเบาตามมาตรฐานการทดสอบ ดังสมการ ต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นเชิงปริมาตรในสภาพแห้ง} = \frac{\text{มวลของชิ้นทดสอบหลังอบ 105 องศาเซลเซียส}}{\text{ปริมาตรของชิ้นทดสอบ}} \quad (6)$$

## 2.8 ความพรุน

ความพรุน (Porosity) หมายถึง อัตราส่วนปริมาตรจำนวนช่องว่างต่อปริมาตรภายนอกของตัวอย่างคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ โดยที่

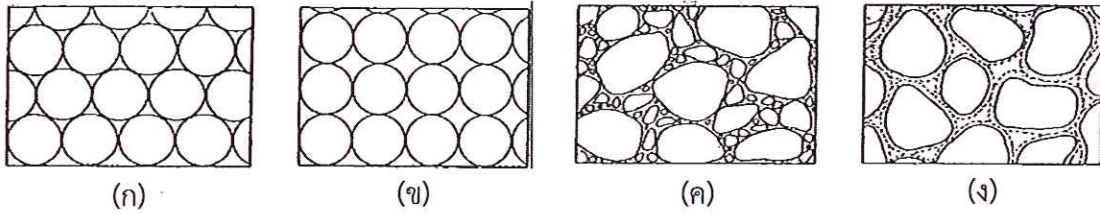
$$Po = \frac{V_v}{V_t} \quad (7)$$

โดยที่  $Po$  = ค่าความพรุน (Porosity) (เปอร์เซ็นต์)

$V_v$  = ปริมาตรช่องว่าง (ลูกบาศก์เมตร)

$V_t$  = ปริมาตรของตัวอย่างทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร)

เม็ดตะกอนกลมที่มีการปรับเรียงตัวแบบ การจับตัวแน่น (Close packing) มีค่าความพรุน 27% (รูป ก.) ส่วนเม็ดตะกอนกลมที่มีการปรับเรียงตัวหลวมแบบ การจับตัวหลวม (open packing) มีค่าความพรุน 47% (รูป ข.) ความเชื่อมแน่นของวัตถุเชื่อมประสานทำให้ค่าความพรุนลดน้อยลง การละลายของแร่บางชนิดออกจากหินกับรอยแตกของหิน ก็มีผลทำให้ความพรุนของหินมีค่ามากขึ้น



ภาพ 2.8 ความพรุนของอิฐมวลเบาในรูปแบบต่างๆ

(ก) ทรงกลมมีความพรุน 27%

(ข) ทรงกลมจัดเรียงตัวหลวมมีความพรุน 47%

(ค) คัดขนาดไม่ดีมีความพรุนต่ำ

(ง) คัดขนาดดีมีความพรุนสูง

## 2.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Thermal Transition) โดยวัดการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (การดูดหรือคายพลังงาน) ของสารตัวอย่าง เมื่อถูกเพิ่มหรือลดอุณหภูมิในบรรยากาศที่ถูกควบคุม โดยนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์และสำหรับงานวิจัย (เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา, 2553) ตัวอย่างของข้อมูลที่สามารถวัดได้จากการใช้เครื่อง DSC เช่น Melting Point (จุดหลอมเหลว) Glass Transition Temperature ( $T_g$ , อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว) Oxidation Stability (ความเสถียรต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน) Reaction Kinetics (จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา) หรือ Purity (ความบริสุทธิ์)



ภาพ 2.9 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



## 1. ชนิดของเครื่อง DSC

เครื่อง DSC ที่ใช้งานในปัจจุบันมี 3 ชนิดดังนี้

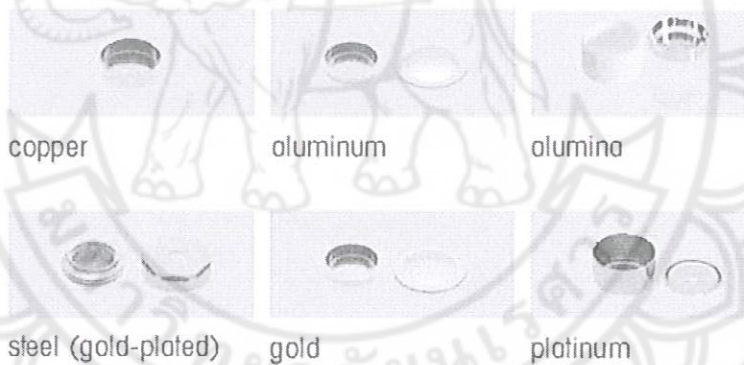
1.1 Heat Flux DSC นิยมใช้กันมากที่สุดเพราะมีข้อดีคือมีความสม่ำเสมอของเส้น baseline (baseline stability) และ cell ที่คงทน

1.2 Power compensation DSC ให้ความละเอียดของ DSC curve (resolution) ที่ดีและมีอัตราการเพิ่มความร้อนและการเย็นตัวที่รวดเร็ว

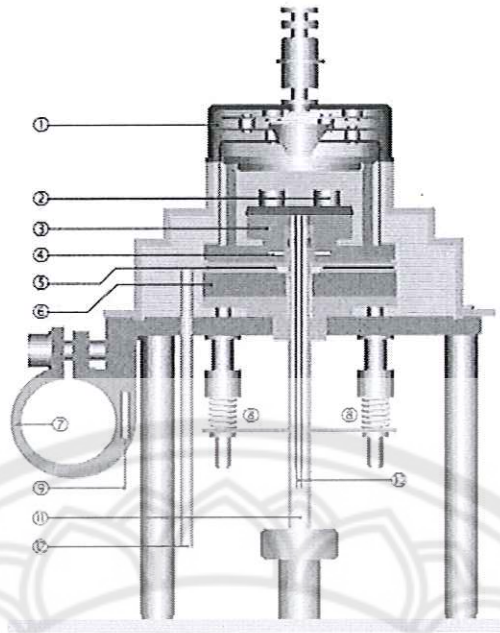
1.3 DSC ที่ใช้ Tzero technology ซึ่งเป็นเทคโนโลยีล่าสุดด้วยการรวมเอาข้อดีหรือลักษณะที่ดีที่สุดจากเทคโนโลยีของ Heat Flux DSC และ Power Compensation DSC เข้าด้วยกัน

## 2. หลักการพื้นฐานของ DSC

นำถาด 2 ถาด ถาดแรกเป็นถาดที่บรรจุสารตัวอย่าง (Sample Pan) ถาดที่สองเป็นถาดอ้างอิง (Reference Pan) ซึ่งเป็นถาดเปล่า ใ้วางอยู่บนอุปกรณ์ให้ความร้อน (Furnace) ชนิดเดียวกันซึ่งวางอยู่ข้างๆ กัน เมื่อเริ่มการทดลอง Furnace จะเริ่มให้ความร้อนแก่ถาดทั้งสอง โดยเครื่อง DSC จะควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิให้คงที่ (เช่น 5 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที) แต่ที่สำคัญที่สุดก็คือ เครื่อง DSC จะควบคุมให้ Furnace ทั้งสอง (Sample Pan และ Reference Pan) เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราที่เท่ากันตลอดการทดลอง



ภาพ 2.10 ประเภทของถาดใส่สารที่ทำการทดลองในเครื่อง DSC



1. Furnace lid	7. Cooling flange
2. Crucibles on the DSC sensor	8. Compression spring construction
3. Silver furnace	9. Cooling flange PT100
4. PT100 of furnace	10. DSC raw signal for amplifier
5. Flat heater between two insulating disks	11. Dry gas inlet
6. Thermal resistance for cooler	12. Purge gas inlet

ภาพ 2.11 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง DSC

ที่มา : Mettler-Toledo International Inc. (2553)

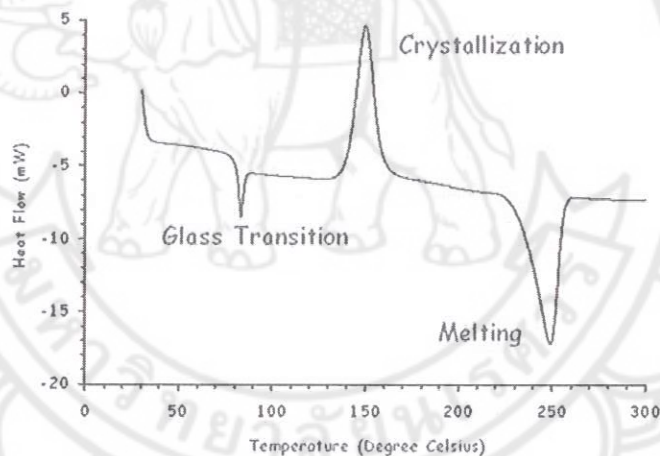
สาเหตุที่ความร้อนของธาตุทั้งสองเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากธาตุทั้งสองมีความแตกต่างกัน คือ Sample Pan มีสารตัวอย่างอยู่ข้างใน แต่ Reference Pan ไม่มีสารตัวอย่าง การมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในทำให้ Sample Pan มีสารในปริมาณที่มากกว่า Reference Pan ซึ่งหมายความว่า Furnace ต้องให้ความร้อนแก่ Sample Pan มากกว่าที่ให้ Reference Pan เพื่อให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิมีค่าเท่ากัน ดังนั้น Furnace ที่อยู่ใต้ Sample Pan จะต้องทำงานหนักกว่า Furnace ที่อยู่ใต้ Reference Pan คือต้องให้ความร้อนมากกว่า และการวัดความแตกต่างของปริมาณความร้อนจาก Furnace ทั้งสองนี้ก็คือหน้าที่หลักของเครื่อง DSC และเพื่อให้เห็นภาพได้ง่าย เราจะสร้างกราฟ โดยมีแกน X เป็นค่าของอุณหภูมิ และแกน Y เป็นค่าของความแตกต่างของปริมาณความร้อนของ Furnace ทั้งสอง ณ อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง

โดยปกติแล้ว การทดสอบสารตัวอย่างทำโดยการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่คงที่ (เช่น 5 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที โดยเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส และสิ้นสุดการทดลองที่ 300 องศาเซลเซียส) หรือการรักษาอุณหภูมิสารตัวอย่างไว้คงที่ (Isothermal) เป็นระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง) และสำหรับการทดลองส่วนใหญ่แล้ว บรรยากาศก็มีบทบาท

สำคัญต่อผลการทดลองเช่นเดียวกับอุณหภูมิและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ โดยส่วนใหญ่แล้วบรรยากาศที่ใช้ในการทดลองมีสองแบบคือ บรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere เช่น แก๊สไนโตรเจน) และบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจน (Oxidizing Atmosphere เช่น แก๊สออกซิเจน หรืออากาศ)

ความร้อนที่ไหลสารตัวอย่าง (Heat Flow) มีค่าสอดคล้องกับพลังงานที่ไหลสารตัวอย่าง และถูกวัดในหน่วยมิลลิวัตต์ (milliwatts, mW) เมื่อนำค่าพลังงานมาคูณด้วยเวลา ผลลัพธ์ที่ได้คือปริมาณพลังงานที่ถูกแสดงในหน่วย มิลลิวัตต์วินาที (mW.s) หรือ มิลลิจูลล์ (mJ) พลังงานที่ไหลสารตัวอย่างมีค่าสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy) ของสารตัวอย่าง เมื่อสารตัวอย่างดูดพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Endothermic และเมื่อสารตัวอย่างคายพลังงาน เราเรียกว่า Enthalpy มีการเปลี่ยนแปลงแบบ Exothermic

เมื่อสารตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การหลอมเหลว (Melting) Furnace ต้องให้ความร้อน Sample Pan มากกว่าที่ให้ Reference Pan เพื่อที่จะคุมอุณหภูมิของ Sample Pan และ Reference Pan ให้เท่ากัน ความร้อนจะถูกส่งผ่านไปยัง Sample Pan มากกว่าหรือน้อยกว่าที่ถูกส่งผ่านไปยัง Reference Pan นั้น ขึ้นอยู่กับว่าความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบ Exothermic หรือแบบ Endothermic

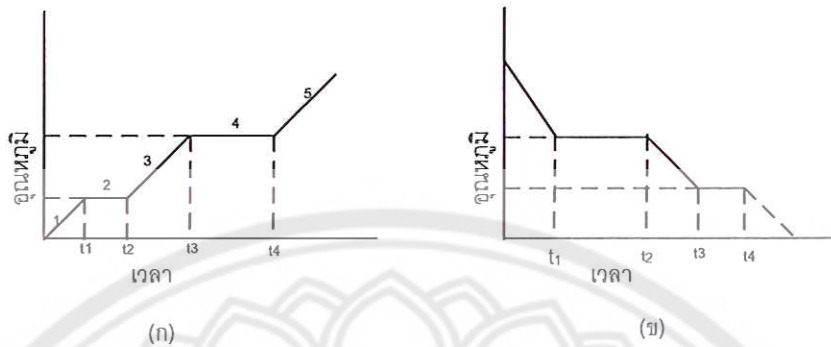


ภาพ 2.12 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง DSC

จากภาพจะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 3 ลักษณะ โดยที่ Glass Transition และ Melting เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบดูดพลังงาน (Endothermic) ในขณะที่ Crystallization เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบคายพลังงาน (Exothermic)

## 2.10 การเปลี่ยนสถานะของสสาร

สสารสามารถเปลี่ยนสถานะไปมาได้ระหว่างของแข็ง ของเหลวและแก๊ส ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ, 2548)



ภาพ 2.13 การเปลี่ยนสถานะ (ก) Heating curve (ข) Cooling curve

รูป (ก) แสดงให้เห็นว่า ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นในอัตราที่สม่ำเสมอ (ดูกราฟช่วงที่ 1) อนุภาคของแข็งจะมีพลังงานจลน์มากขึ้นทุกขณะ ทำให้อนุภาคมีการสั่นแรงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง (เวลาผ่านไป  $t_1$ ) อนุภาคจะมีพลังงานจลน์มากพอที่จะชนะแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคได้บ้าง ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมแต่ยังอยู่ชิดกัน ตอนนี่ของแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว อุณหภูมิขณะที่ของแข็งเริ่มเปลี่ยนเป็นของเหลวและยังมีทั้งของแข็งและของเหลวปนกัน อยู่ในสภาวะสมดุลนั้น เรียกว่า จุดหลอมเหลว

จากการทดลองพบว่า เมื่อของแข็งหลอมเหลวแล้ว อุณหภูมิจะคงที่อยู่ชั่วระยะเวลาหนึ่ง (กราฟช่วงที่ 2) ทั้งๆ ที่ยังให้ความร้อนในอัตราคงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะในขณะนี้ความร้อนที่อนุภาคได้รับนั้นไม่ได้เพิ่มพลังงานจลน์แต่เพิ่มพลังงานศักย์ (potential energy) ที่สะสมอยู่ในแต่ละอนุภาคเพื่อนำไปใช้ในการทำงานต่อต้านแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค เมื่อเวลาผ่านไป  $t_2$  ความร้อนที่อนุภาคได้รับจะเพิ่มพลังงานจลน์ต่อไป (กราฟช่วงที่ 3) ตอนนี้อุณหภูมิจะเคลื่อนที่เร็วและมีพลังงานจลน์สูงขึ้นจนสามารถชนะแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค เราถือว่าขณะนั้นอนุภาคของของเหลวกำลังเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊ส อุณหภูมิขณะที่อนุภาคของเหลวเริ่มเปลี่ยนเป็นแก๊ส เรียกว่า จุดเดือด เมื่ออุณหภูมิถึงจุดนี้จะคงที่ตลอดไปจนกว่าของเหลวจะหมด (กราฟช่วงที่ 4) ความร้อนที่อนุภาคได้รับเข้าไปในช่วงนี้จะนำไปใช้เป็นการเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่ยังเป็นของเหลวอยู่

ถ้าทำการทดลองในภาชนะปิดอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นอีก (กราฟช่วงที่ 5) ตอนนี่ความร้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สะสมอยู่ในแต่ละอนุภาค เป็นเหตุให้อิทธิพลของสสารนั้นมีความดันสูง เช่น ถ้าต้มน้ำก็จะได้ไอน้ำที่มีความร้อนสูง และมีความดันสูงกว่าปกติ ซึ่งมีประโยชน์คือนำไปใช้ผลักดันเครื่องจักรกลให้ทำงาน หรือใช้ประโยชน์อย่างอื่นตามโรงงานอุตสาหกรรม

กราฟที่ได้จากการทดลองตามรูป (ก) นั้นเรียกว่า heating curve แต่ถ้าทดลองกลับกันโดยนำ แก๊สมาลดอุณหภูมิจนถึงจุดหนึ่งแก๊สจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว อุณหภูมิขณะที่เปลี่ยนสถานะนั้น เรียกว่า จุดควบแน่น (condensation point) ซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุดเดือดนั่นเอง และถ้าลดอุณหภูมิต่อไป ถึงอีกจุดหนึ่งของเหลวจะกลายเป็นของแข็ง อุณหภูมิจุดนี้เรียกว่า จุดเยือกแข็ง ซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุด หลอมเหลว ผลการทดลองนี้สามารถเขียนกราฟได้เช่นกัน ดังภาพ (ข) เรียกว่า cooling curve

## 2.11 อิฐมวลเบา

### 1. อิฐมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา (Autoclaved Aerated Concrete : AAC) ผลิตจากส่วนผสมของปูน ปอร์ตแลนด์ Type 1 ทราย ปูนขาว ยิบซั่ม และผงอลูมิเนียมที่ใช้เพิ่มฟองอากาศโดยการผสมสูตรที่เหมาะสม และผ่านการอบด้วยไอน้ำแรงดันสูงทำให้มีฟองอากาศมากถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตร จึงทำให้วัสดุคอนกรีตมวลเบา เบากว่าน้ำ(ลอยน้ำ) โดยมีน้ำหนักระหว่าง 600 – 700 กก./ลบ.ม. เทียบกับ คอนกรีตทั่วไปที่ 2,400 กก./ลบ.ม. และอิฐมวลอยู่ที่ 1350 กก./ลบ.ม. ความเบาของวัสดุทำให้อาคารเบาลง ประหยัดค่าก่อสร้างโครงสร้างเสาคานและฐานราก (สภาวิศวกร, 2553) ความเบาที่มาจากฟองอากาศถึง 75 % ทำให้อาคารมีคุณสมบัติเด่นเพิ่มเติม คือ

(ก) เป็นฉนวนกันความร้อน ผืนที่ก่อด้วย คอนกรีตมวลเบาสามารถกันความร้อนได้ดีกว่า ผืนที่ก่อด้วยอิฐมวลถึง 2.5 เท่าจึงไม่สะสมความร้อนในตอนกลางวัน

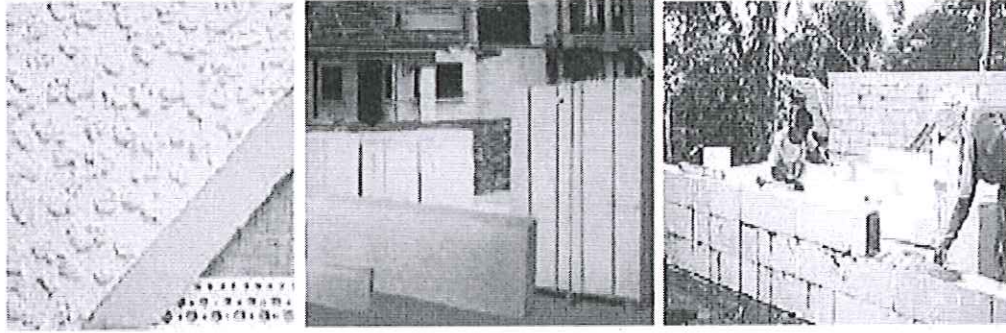
(ข) ไม่ติดไฟและสามารถทนไฟที่ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นาน 4 ชั่วโมงสำหรับผนังหนา 7.5 ซม. (รวมฉาบปูน 2 ด้าน 10 เซนติเมตร) ในขณะที่ผนังอิฐมวลทนไฟได้ 2 ซม. ที่ความหนา 18 ซม. รวม ฉาบปูน 2 ด้าน

(ค) สามารถดูดซับเสียงได้ดีและป้องกันการส่งผ่านเสียงได้ดีกว่าวัสดุมวลเบาทั่วไป

(ง) ผนังหนา 10 ซม. สามารถกันเสียงได้ถึง 40 เดซิเบล ในประเภทวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันทั่วไป ผืนเป็นส่วนสำคัญของอาคารที่มีน้ำหนักมากที่สุด แต่ใช้ประโยชน์ในการรับแรงน้อยที่สุดในอาคารที่พักอาศัยที่มีการกันห้องมากน้ำหนักผืนอาจสูงถึง 40 % ของน้ำหนักอาคาร ดังนั้นผู้ออกแบบอาคารจึง ต้องการหาวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเพื่อนำมาใช้งานให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการกันผืน

(จ) แข็งแรงเพียงพอที่จะกันภายในกับภายนอก

(ฉ) ไม่เป็นพิษภัยต่อผู้อาศัย และคงทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ



ภาพ 2.14 คอนกรีตมวลเบาและลักษณะการใช้งาน

อิฐมวลเบา มีกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ระบบ ดังนี้

1.1 ระบบที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Non - Autoclaved System)

ซึ่งจะแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 ใช้วัสดุเบากว่ามาทดแทน เช่น ขี้เลื่อย ชานอ้อย หรือเม็ดโฟมทำให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้น แต่จะมีอายุการใช้งานที่สั้นเสื่อมสภาพได้เร็ว และหากเกิดไฟไหม้สารเหล่านี้ อาจเป็นพิษต่อผู้อยู่อาศัย

ประเภทที่ 2 ใช้สารเคมี (Circular Lightweight Concrete) เพื่อให้เนื้อคอนกรีตฟูและทิ้งให้แข็งแต่คอนกรีตประเภทนี้จะมีการหดตัวมากกว่า ทำให้ปูนฉาบแตกร้าวได้ง่าย ไม่ค่อยแข็งแรง คอนกรีตที่ไม่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงนี้ส่วนใหญ่เนื้อผลิตภัณฑ์มักจะมีสีเป็นสีปูนซีเมนต์ต่างจากคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการอบไอน้ำภายใต้ความดันสูงซึ่งจะมีเนื้อผลิตภัณฑ์เป็นผลิตภัณฑ์สีขาว

1.2 ระบบอบไอน้ำภายใต้ความดันสูง (Autoclaved System) ซึ่งแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้เป็น 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 Lime Base ใช้ปูนขาว มาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

ประเภทที่ 2 Cement Base ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1 เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

## 2. ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาแบ่งตามความต้านทานแรงอัดออกเป็น 4 ชั้นคุณภาพ และแบ่งตามความหนาแน่นเชิงปริมาตรออกเป็น 7 ชนิด โดยชั้นคุณภาพและชนิดของคอนกรีตมีความสัมพันธ์ดังตารางที่ 2.3 ซึ่งปัจจุบันมีผู้ผลิตอิฐมวลเบาที่มีสองรายคือ บริษัทซูปเปอร์บล็อกจำกัด (มหาชน) และ บริษัทคิวคอน จำกัด (มหาชน) ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก.1505-2541 บริษัทซูปเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน) ใช้เทคโนโลยีนำเข้าจากประเทศเยอรมันมาผลิตในประเทศไทย ซึ่งผลิตอิฐมวลเบาตั้งแต่ชั้นคุณภาพ G4 และ G6 และบริษัทคิวคอน จำกัด (มหาชน) มีผลิตอิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ G2 และ G4 ตามลำดับ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541)

ตาราง 2.4 ชั้นคุณภาพของอิฐมวลเบาตาม มอก.1505-2541

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัด (N/mm <sup>2</sup> )		ชนิด	ความหนาแน่นเชิงปริมาตรเฉลี่ย kg/dm <sup>2</sup>
	ค่าเฉลี่ย	ค่าต่ำสุด		
G2	2.5	2	0.4	0.31-0.40
			0.5	0.41-0.50
			0.6	0.51-0.60
G4	5	4	0.7	0.61-0.70
			0.8	0.71-0.80
G6	7.5	6	0.7	0.61-0.70
			0.8	0.71-0.80
G8	10	8	0.8	0.71-0.80
			0.9	0.81-0.90
			1	0.91-1.00

### 3. กระบวนการผลิตอิฐมวลเบา

กระบวนการผลิตอิฐมวลเบา ในปัจจุบันใช้เทคโนโลยีในการผลิตสมัยใหม่ สามารถผลิตได้เป็นจำนวนมากและมีการทำให้เกิดฟองอากาศหรือรูพรุน ภายในเนื้ออิฐมวลเบา การผลิตอิฐมวลเบาของไทยโดยทั่วไป มีวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตดังนี้คือ

ซีเมนต์	สัดส่วน	30	%
ทราย	สัดส่วน	50	%
ยิปซั่ม	สัดส่วน	9	%
ปูนขาว	สัดส่วน	9	%
ผงอลูมิเนียม	สัดส่วน	2	%

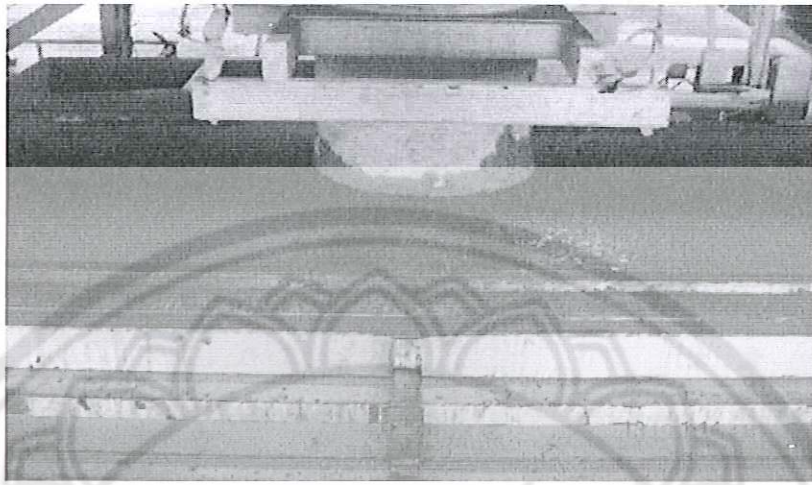
ขั้นตอนการผลิตอิฐมวลเบา มีดังนี้

3.1 วัตถุดิบหลักคือทรายมาบดด้วยเครื่องบด Crushing trinning machines (M102) บดผสมกับน้ำ

3.2 นำวัตถุดิบที่ใช้ในกรรมวิธีทำอิฐมวลรวมเบา (ปูนขาว ผงอลูมิเนียม ทราย ซีเมนต์ ยิปซั่ม) ผสมเข้ากันตามอัตราส่วน โดยส่วนผสมหลักคือ ทรายและซีเมนต์ ตามลำดับ ด้วยเครื่องผสม Mixing

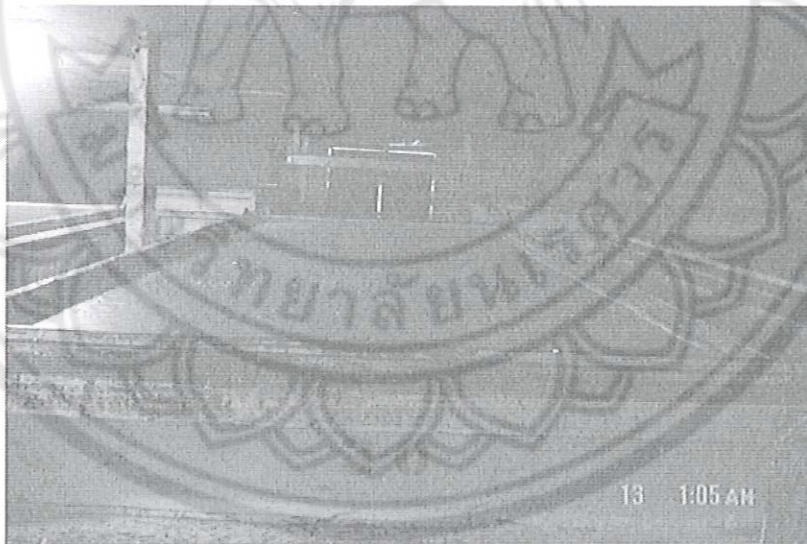
machines (M101) การผสมโดยนำทรายและซีเมนต์มาผสมกันก่อนในขณะเดียวกันใส่ยิปซั่มกับปูนขาวตามลำดับ จากนั้นจึงผสมกับอะลูมิเนียมในขั้นตอนสุดท้าย

### 3.3 เทเข้าแม่พิมพ์ที่ทำการเตรียมไว้



ภาพ 2.15 แม่พิมพ์อิฐมวลเบา

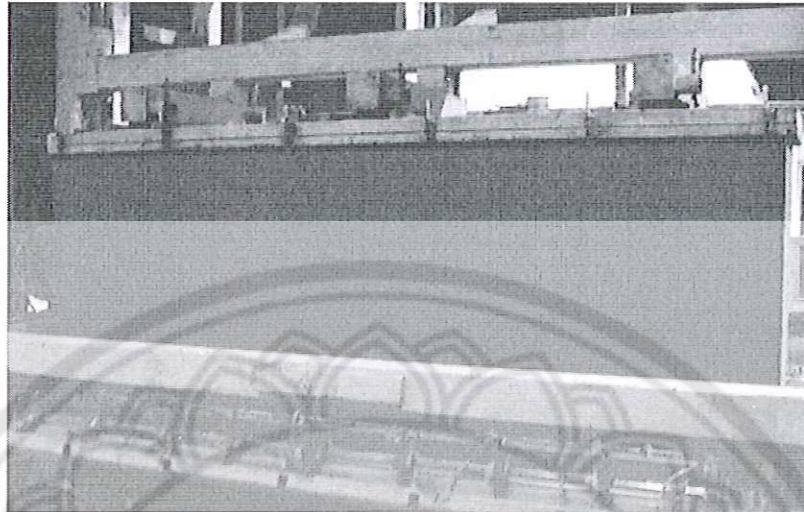
### 3.4 นำเข้าห้องบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาและการเกิดเป็นฟองอากาศภายในอิฐมวลเบา



ภาพ 2.16 การบ่มเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาของฟองอากาศในอิฐมวลเบา

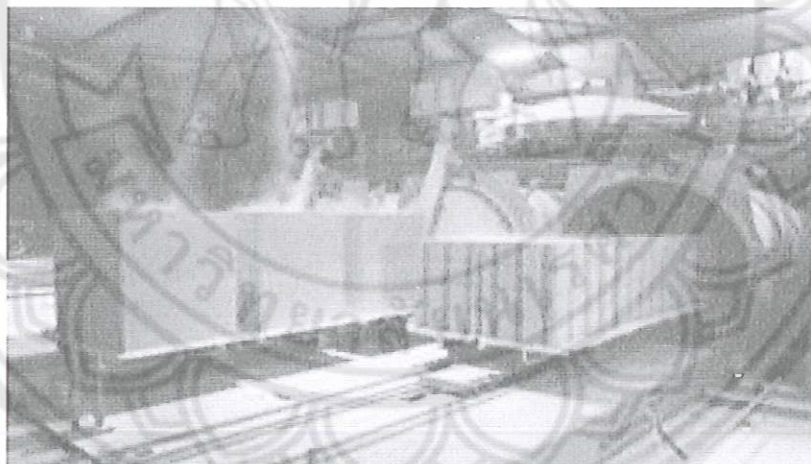


3.5 นำเข้าเครื่องตัด เพื่อตัดขนาดตามความต้องการของลูกค้า โดยใช้สวดในการตัด Cutting machines



ภาพ 2.17 การตัดตามขนาดอิฐมวลเบา

3.6 นำผ่านเข้าเครื่องอบไอน้ำความดันสูง ภายใต้แรงดันประมาณ 8-12 บาร์



ภาพ 2.18 การอบอิฐมวลเบาด้วยไอน้ำ

3.7 ตรวจสอบคุณภาพ (QC)

3.8 บรรจุ packing รอส่งลูกค้า

## 2.12 การออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจ (Eco design)

การจัดการปัญหาสิ่งแวดล้อมในอดีตที่ผ่านมาเป็นการมุ่งเน้นไปที่การตรวจจับและสั่งการโดยเจ้าหน้าที่ที่ดูแลกฎหมาย เป็นการจัดการปัญหาที่ปลายเหตุซึ่งวิธีการนี้แสดงให้เห็นแล้วว่าไม่มีประสิทธิภาพในการจัดการปัญหา ดังนั้นแนวคิดในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงปรับเปลี่ยนสู่แนวทางที่มุ่งไปที่ต้นเหตุมากขึ้น ด้วยการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างยั่งยืนและการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ (Sustainable Product Design and Eco Product Design) ที่เป็นการออกแบบ ที่ตระหนักถึงผลกระทบด้านต่างๆ ที่จะเกิดขึ้นอย่างละเอียดรอบคอบ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสมบูรณ์แบบในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นเชิงเศรษฐศาสตร์ วิศวกรรม และสิ่งแวดล้อม ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Thinking) ตั้งแต่ช่วงต้นของการออกแบบจนถึงช่วงสุดท้ายที่ผลิตภัณฑ์หมดอายุการใช้งาน หรือเรียกว่าเป็นการพิจารณาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เกิดจนตาย (Cradle to Grave)

ISO/TR 14062 ได้นิยามคำว่า Eco Design ไว้ว่า คือการประสานหลักเกณฑ์ทางด้านสิ่งแวดล้อมไปในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยคำว่า Eco Design มาจากสองคำรวมกัน คือ Economic และ Ecological ซึ่งเมื่อรวมกับการ Design จึงเรียกว่า Eco Design โดย Eco Design เป็นกระบวนการที่ผนวกแนวคิดด้านเศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อมเข้าไปในขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ โดยเป้าหมายหลักของการออกแบบเพื่อให้การบริโภคทรัพยากรธรรมชาติพลังงาน และผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมต่ำที่สุด โดยพิจารณาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Product Life Cycle) ตั้งแต่ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นจนถึงถูกกำจัดหลังจากหมดอายุการใช้งานและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งแนวคิดนี้จะต้องอาศัยกลยุทธ์ในการพิจารณาการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สามารถจำหน่ายได้ และลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมไปพร้อมๆ กัน ทำให้ส่งผลดีต่อทั้งด้านธุรกิจ สังคมและสิ่งแวดล้อม ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจนี้ได้ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ โดยมีการสนับสนุนจากภาครัฐในการออกกฎต่างๆ เข้ามาบังคับใช้สนับสนุนเพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างรวดเร็ว เช่น การออกฉลาก Eco Label เป็นต้น

จากนิยามและแนวคิดของการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจที่กล่าวมา หากมองกันจริงๆ แล้วการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจไม่ใช่เรื่องใหม่กับอุตสาหกรรมไทยแต่อย่างใด เนื่องจากการออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจนี้ก็คือแนวคิดการออกแบบที่แฝงอยู่ในแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมไทยอยู่แล้ว เพราะอุตสาหกรรมส่วนมากก็อาศัยการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์บนพื้นฐานหลักการ 3R เป็นพื้นฐานการออกแบบอยู่แล้ว โดยที่ 3R ที่กล่าวถึงนี้คือ Reduce Reuse Recycle นั่นเอง หรือที่เรามักมองเห็นได้ทั่วไปในการออกแบบผลิตภัณฑ์ในยุคนี้ นั่นคือ การทำให้ผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็ก บางเบา และสามารถนำมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

### 2.12.1 วิธีการทำ Eco Design

การออกแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมแบ่งออกเป็นสามด้านหลักๆ คือการออกแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมทางด้านการผลิต การออกแบบด้านสิ่งแวดล้อมทางการหีบห่อ และการออกแบบสิ่งแวดล้อมทางการกำจัดทิ้งและการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในแต่ละมุมมองจะประกอบด้วยแนวคิดการออกแบบย่อยอีกหลายด้าน

เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถนำไปใช้พิจารณาการออกแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมได้ง่ายขึ้น มุมมองย่อยที่กล่าวถึงนี้ได้แก่



สำนักหอสมุด

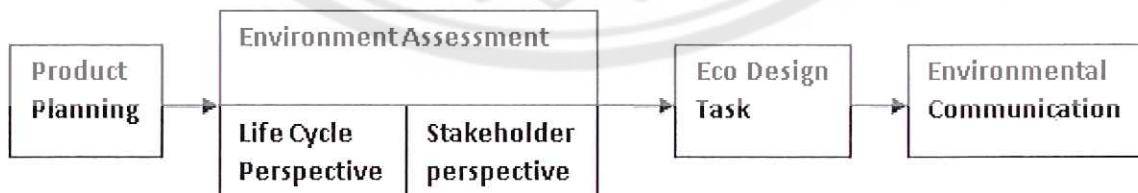
12 มี.ย 2558

16993965

จ TP  
8/1  
1451  
1551

1. การออกแบบเพื่อสิ่งแวดล้อมทางการผลิต
  - กระบวนการผลิตปลอดภัย
  - ใช้พลังงานในการผลิตน้อยที่สุด
  - การแพร่กระจายน้อยที่สุด
  - ของเสียและเศษในการผลิตน้อยที่สุด
2. การออกแบบด้านสิ่งแวดล้อมทางด้านหีบห่อ
  - ใช้หีบห่อน้อยที่สุด
  - สามารถนำอุปกรณ์ในการขนถ่ายกลับมาใช้ได้ใหม่
  - วัสดุหีบห่อสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่
  - ลดการใช้วัสดุธรรมชาติที่หายากในการหีบห่อ
3. การออกแบบด้านสิ่งแวดล้อมทางการกำจัดทิ้งและการนำกลับมาใช้ใหม่
  - อุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆ สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก
  - เลือกใช้วัสดุที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ได้
  - หลีกเลี่ยงการใช้ Fiber Glass และ Graphite
  - จำนวนของชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบน้อยที่สุด
  - ออกแบบให้สามารถถอดวัสดุที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายที่สุด
  - หลีกเลี่ยงการใช้สารเชื่อมติดกัน
  - พยายามใช้วัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด
  - ออกแบบให้มีการกำจัดทิ้งน้อยที่สุด

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจนั้นจะมีขั้นตอนหลักเช่นเดียวกับการออกแบบผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย การวางแผนผลิตภัณฑ์ การประเมินความต้องการทางด้านสิ่งแวดล้อมจาก เสียงเรียกร้องของลูกค้าและผู้ที่เกี่ยวข้อง การออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะด้านสิ่งแวดล้อม และการสื่อสารด้านสิ่งแวดล้อมกับผู้บริโภค



ภาพ 2.19 ขั้นตอนในการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

ในขั้นตอนการวางแผนผลิตภัณฑ์รวมถึง การระบุถึงส่วนประกอบ ชิ้นส่วน และวัตถุดิบที่ใช้ในผลิตภัณฑ์, การเก็บข้อมูลวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์, คุณลักษณะด้านการตลาด และการเลือกผลิตภัณฑ์ที่จะพัฒนา และสุดท้ายคือการจัดตั้งทีมงานและกำหนดเป้าหมายของโครงการพัฒนา การจัดสรรงบประมาณและบุคลากรก็รวมอยู่ในขั้นตอนนี้ด้วย

ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการวางแผนผลิตภัณฑ์คือ ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ ระบบของผลิตภัณฑ์ และข้อมูลวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้น คุณลักษณะด้านเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ก็จะได้รับการระบุออกมาด้วย

แง่มุมด้านสิ่งแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ถูกประเมินจากสองมุมมองที่แตกต่างกัน คือมุมมองในแง่วัฏจักรชีวิต และมุมมองของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ในแง่ของวัฏจักรชีวิตนั้นประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมบนพื้นฐานของผลกระทบที่เกิดต่อสิ่งแวดล้อมจากระบบของผลิตภัณฑ์ เครื่องมือที่ใช้ก็คือวิธีการที่เรียกว่า Life Cycle Assessment (LCA) ส่วนมุมมองของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องประเมินผลด้านสิ่งแวดล้อมบนพื้นฐานของมุมมองของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น กฎหมายหรือข้อกำหนด, ความต้องการของตลาด, ผลิตภัณฑ์ของคู่แข่ง เครื่องมือที่ใช้สำหรับการประเมินนี้ก็คือ Quality Function Deployment(QFD) และ Environmental Benchmarking

ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการประเมินทางด้านสิ่งแวดล้อมก็คือ ปัจจัยหรือตัวแปรด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะนำไปใช้ในขั้นตอนของ Eco Design Task วิธีการของ 12 ขั้นตอนของการทำ Eco Design Task โดย Wimmer et al (2004) แสดงได้ดังตาราง

ตาราง 2.5 วิธีการ ของการทำEco Design Task โดย Wimmer et al (2004)

ขั้นตอน	คำถามนำ	สิ่งที่ต้องดำเนินการ
1	ผลิตภัณฑ์อะไรที่ต้องการปรับปรุง?	อธิบายรายละเอียดและค่าพารามิเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อม
2	ความคาดหวังอะไรบ้างจากผลิตภัณฑ์?	EQFD
3	จุดแข็งจุดอ่อนผลิตภัณฑ์ เทียบกับคู่แข่ง	Environmental Benchmarking
4	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญตลอดอายุผลิตภัณฑ์คืออะไร ช่วงใด?	LCA ,Eco Design Pilot
5	สามารถนำความต้องการด้านสิ่งแวดล้อมจากผู้มีส่วนได้เสียในธุรกิจมาเป็นกลยุทธ์ในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ได้หรือไม่?	Eco Design Strategies
6	สามารถนำแนวทาง Eco Design Guideline มาใช้ได้หรือไม่?	Eco Design Pilot Checklist
7	อะไรคือรายละเอียดทางด้านสิ่งแวดล้อมที่จะเริ่มดำเนินการ?	เริ่มทำการปรับปรุงผลิตภัณฑ์
8	สามารถทำการปรับปรุงหน้าที่เหล่านั้นได้อย่างไร?	เพิ่มเติม หรือปรับปรุงหน้าที่ผลิตภัณฑ์ใหม่

ขั้นตอน	คำถามนำ	สิ่งที่ต้องดำเนินการ
9	สามารถสร้างแนวคิดในการปรับปรุงได้อย่างไร?	สร้างแนวคิด และทำการสืบค้นสิทธิบัตรต่างๆที่เกี่ยวข้อง
10	สามารถทำการเลือกแนวคิดที่ดีที่สุดได้อย่างไร?	ทำการรวบรวมแนวคิด เลือกรูปแบบการปรับปรุงผลิตภัณฑ์
11	ผลิตภัณฑ์ที่ทำการปรับปรุงแล้วเป็นอย่างไรบ้าง?	ทำการออกแบบต้นแบบ และทดสอบ
12	สามารถนำจุดที่ทำการปรับปรุงมานำเสนอแก่ตลาดอย่างไรบ้าง?	ทำการประกาศ โฆษณา ปักจ้ยและพารามิเตอร์ทางด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้ปรับปรุง

ขั้นตอนต่อไปนี้อธิบายวิธีการที่ละขั้นตอนของการทำให้ Eco Design Task บรรลุผล โดยใช้เครื่องมือที่ระบุไว้ในวงเล็บ (Wimmer et al 2004)

- เชื่อมโยงตัวแปรหรือปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เข้ากับกลยุทธ์ทางด้านสิ่งแวดล้อม (กลยุทธ์ทางด้านสิ่งแวดล้อม)
- ระบุมาตรการที่จะปรับปรุงตัวแปรหรือปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ (Checklists ที่จะประเมินมาตรการต่างๆ)
- พัฒนาการออกแบบใหม่สำหรับมาตรการที่เลือกมา
- พัฒนาข้อกำหนดหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
- ระบุฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์อ้างอิง และทำการเพิ่มหรือปรับปรุงฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่บนพื้นฐานข้อกำหนดหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (Function Analysis)
- ระดมความคิดเพื่อหาวิธี realize ฟังก์ชันใหม่ที่เพิ่มขึ้นมา (TRIZ, brain-writing, brainstorming, patent search, etc.)
- พัฒนาคอนเซปต์ของผลิตภัณฑ์ใหม่โดยการเพิ่มเติมหรือปรับปรุงฟังก์ชันใหม่ๆ ฟังก์ชันใหม่ต้องถูกประเมินกับหลักเกณฑ์ด้าน เศรษฐศาสตร์ เทคนิค สังคมและสิ่งแวดล้อมด้วย
- การออกแบบในรายละเอียด การพัฒนาต้นแบบและการทดสอบทางเทคนิคและทดสอบตลาด

หลังจากเสร็จสิ้นการปรับปรุงผลิตภัณฑ์เพื่อให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้นแล้ว งานถัดไปก็คือการที่จะต้องสื่อสารคุณลักษณะด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้พัฒนาขึ้นในผลิตภัณฑ์ของเราให้กับตลาดได้รับทราบ เพื่อหวังว่าจะเพิ่มส่วนแบ่งตลาดหรืออย่างน้อยก็เป็นภาพลักษณ์ที่ดีของผลิตภัณฑ์หรือบริษัท

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูกร และเอกพล เตี้ยซั่ว (2549). ได้ทำการศึกษาอิทธิพลการใช้สารเปลี่ยนสถานะสำหรับการจัดการพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคารแบบคอนกรีต ในสภาพภูมิอากาศของกรุงเทพมหานครตลอดช่วงเดือนเมษายน ใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (finite-difference numerical method) แบบ Crank-Nicolson implicit algorithm โดยมีช่วงขั้นเวลาการคำนวณ (time step) ที่ 2 นาที ผลการคำนวณพบว่าผนังที่มี PCM ผสมอยู่ (20% โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิผิวภายในอาคารในแต่ละวันน้อยกว่ากำแพงที่ไม่มี PCM อย่างเห็นได้ชัด โดยที่อุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวันเฉลี่ยลดลงประมาณเกือบ 10 องศาเซลเซียส และยังสามารถชะลอการเกิดขึ้นของอุณหภูมิสูงสุด ออกไปเฉลี่ยประมาณ 3-4 ชั่วโมง

ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูกร และวิทยา ยงเจริญ (2550). ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้และไม่ใช้ PCM ในผนังคอนกรีต โดยให้ปริมาณส่วนผสมของ PCM อยู่ที่ 20% ของมวลรวม และมีการผสมอย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ PCM ที่เลือกใช้เป็น paraffin wax เมื่อเลือกใช้ PCM ที่ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวกำแพงตลอดช่วง 24 ชั่วโมง แทบไม่มีความแตกต่างกัน ระหว่างกำแพงที่มีและไม่มี PCM ผสมอยู่ เมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของ PCM เป็นที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ประมาณกึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของกำแพง อุณหภูมิของผนังที่มี PCM ผสมอยู่มีค่าการเปลี่ยนแปลงในรอบวันที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะที่ผิวผนังด้านในอาคาร ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิผนังที่เกิดขึ้นในช่วงบ่าย (10:00-19:00) ต่ำกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 42 องศาเซลเซียส ที่ 16:00-17:00น. เมื่อเลือก PCM ที่ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิของผนังตลอดเวลาส่วนใหญ่ ของการทำงานในรอบ 24 ชั่วโมง ดังนั้น PCM ที่ผสมอยู่ในเนื้อวัสดุกำแพง จึงไม่ได้ถูกใช้ความร้อนแฝงอย่างเต็มที่ส่งผลให้อุณหภูมิของผนังมีค่าไม่แตกต่างจากผนังที่ไม่มี PCM ผสมมากนัก

Kuznik and Virgone (2009). ได้ทำการศึกษาการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะเพื่อปรับปรุงผนังหลายชั้นในแบบจำลอง MINIBAT โดยสร้างผนังหลายชั้นที่เรียกว่า test cell สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้คือ พาราฟิน มีจุดหลอมเหลว 13.6 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบใน 3 ช่วง คือ ช่วงฤดูร้อน ฤดูหนาว และ กลางฤดู ผลการทดลองพบว่า ในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิของผนังด้านทิศตะวันออกและตะวันตกมีค่าลดลง 3.5 องศาเซลเซียส และด้านทิศเหนือลดลง 2.8 องศาเซลเซียส ในช่วงฤดูหนาวและกลางฤดูอุณหภูมิของผนังทั้ง 3 ด้านมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

Castell, et al., (2010). ได้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงผนังอาคารหลายชั้นที่สร้างจากอิฐร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะ 2 ชนิด คือ ใช้อิฐดั้งเดิม Hollow brick ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน คือ RT-27 มีจุดหลอมเหลว 28 องศาเซลเซียส และ อิฐรูปแบบใหม่ Alveolar brick ร่วมกับสารเปลี่ยนสถานะประเภท salt hydrate คือ SP-25 A8 มีจุดหลอมเหลว 26 องศาเซลเซียส ทำการทดลองใน 2 สภาวะคือ สภาวะควบคุมและไม่ควบคุมอุณหภูมิ พบว่า ในสภาวะไม่ควบคุมอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิมีค่าลดลงประมาณ 1 องศาเซลเซียส และในสภาวะควบคุมอุณหภูมิมักมีการใช้พลังงานลดลง ดังนี้ บ้านทดสอบที่สร้างจากอิฐดั้งเดิมร่วมกับ RT-27 และโพลียูรีเทน มีการใช้พลังงานน้อยที่สุด รองลงมา

จะเป็น อิฐรูปแบบใหม่ร่วมกับ SP-25 A8, อิฐดั้งเดิมร่วมกับโพลียูรีเทน, อิฐรูปแบบใหม่, และอิฐดั้งเดิม ตามลำดับ ส่วนความแตกต่างของการใช้และการประหยัดพลังงานในบ้านทดสอบพบว่า บ้านทดสอบที่สร้างจากอิฐดั้งเดิมและอิฐรูปแบบใหม่มีการปรับปรุง 15 และ 17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Meng Zhang, et al., (2005). ได้ทำการศึกษาการทำงานสารเปลี่ยนสถานะในผนังโครงสร้างสารเปลี่ยนสถานะที่ใช้คือ พาราฟิน มีจุดหลอมเหลวระหว่าง 20-30 องศาเซลเซียส ใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่า ภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ความเข้มข้น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเป็น 31 และ 38 เปอร์เซ็นต์ และความชื้นสัมพัทธ์ในบ้านทดสอบที่มีการใช้สารเปลี่ยนสถานะ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับไม่ใช้สารเปลี่ยนสถานะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นสารเปลี่ยนสถานะจึงไม่มีผลต่อภาวะความสบายเชิงความร้อน

Esam M. Alawadhi (2008). ได้ทำการศึกษาการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะในอิฐ โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะประเภทพาราฟิน คือ n-Octadecane, n-Eicosane และ P116 มีจุดหลอมเหลว 27, 37 และ 47 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า สารเปลี่ยนสถานะที่มีประสิทธิภาพ คือ n-Eicosane เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนฟลักซ์ความร้อนมีค่าลดลงระหว่างช่วงเวลา 10.00-17.00 และฟลักซ์ความร้อนสูงสุดลดลง 24.2 เปอร์เซ็นต์ การเปรียบเทียบตำแหน่งการติดตั้งสารเปลี่ยนสถานะ 3 จุดคือ บริเวณด้านบน นอก ด้านในและตรงกลางของอิฐรูปทรงกระบอกพบว่า ฟลักซ์ความร้อนมีค่าลดลงคือ 17.49, 10.16 และ 17.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

de Gracia, A., L. Rincón, et al. (2010). ได้ทำการศึกษาการประเมินวัฏจักรชีวิตของอาคารที่มีส่วนประกอบ PCM ด้วยวิธี EcoIndicator 99 ผลที่ได้พบว่า การใช้ PCM ประเภท salt hydrate ช่วยลดผลกระทบด้านการผลิตและการกำจัดดีกว่า PCM ประเภท paraffins และการใช้งานในสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้งปีช่วยส่งผลให้การใช้งาน PCM เกิดประโยชน์สูงสุด การออกแบบอาคารเพื่อใช้งานในระยะยาว จากการวิเคราะห์อายุการใช้งาน พบว่าระยะเวลาการคืนทุนของ salt hydrate และ paraffins คือ 25 และ 61 ปี ตามลำดับ เมื่อกำหนดเงื่อนไขการใช้งานช่วงฤดูร้อนในช่วง 100 ปี พบว่าช่วยลดผลกระทบต่อโลกได้มากถึง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ PU

## 2.14 แนวทางสำหรับประยุกต์ใช้ในประเทศไทย

การพัฒนาผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM จำเป็นต้องเลือกชนิดของ PCM ที่เหมาะสมเนื่องจาก PCM มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแตกต่างกันออกไปและการนำ PCM มาใช้งาน ลักษณะหนึ่งอาจไม่สามารถนำไปใช้กับงานอีกลักษณะหนึ่งได้ทั่วไป ดังนั้นเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพจากการนำ PCM มาใช้งานจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาการทำงานของ PCM ที่ตอบสนองต่อลักษณะของสภาพภูมิอากาศแต่ละพื้นที่ เพราะจะช่วยลดภาระการทำความเย็นให้กับระบบปรับอากาศและเป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้

วิธีดำเนินงานวิจัย

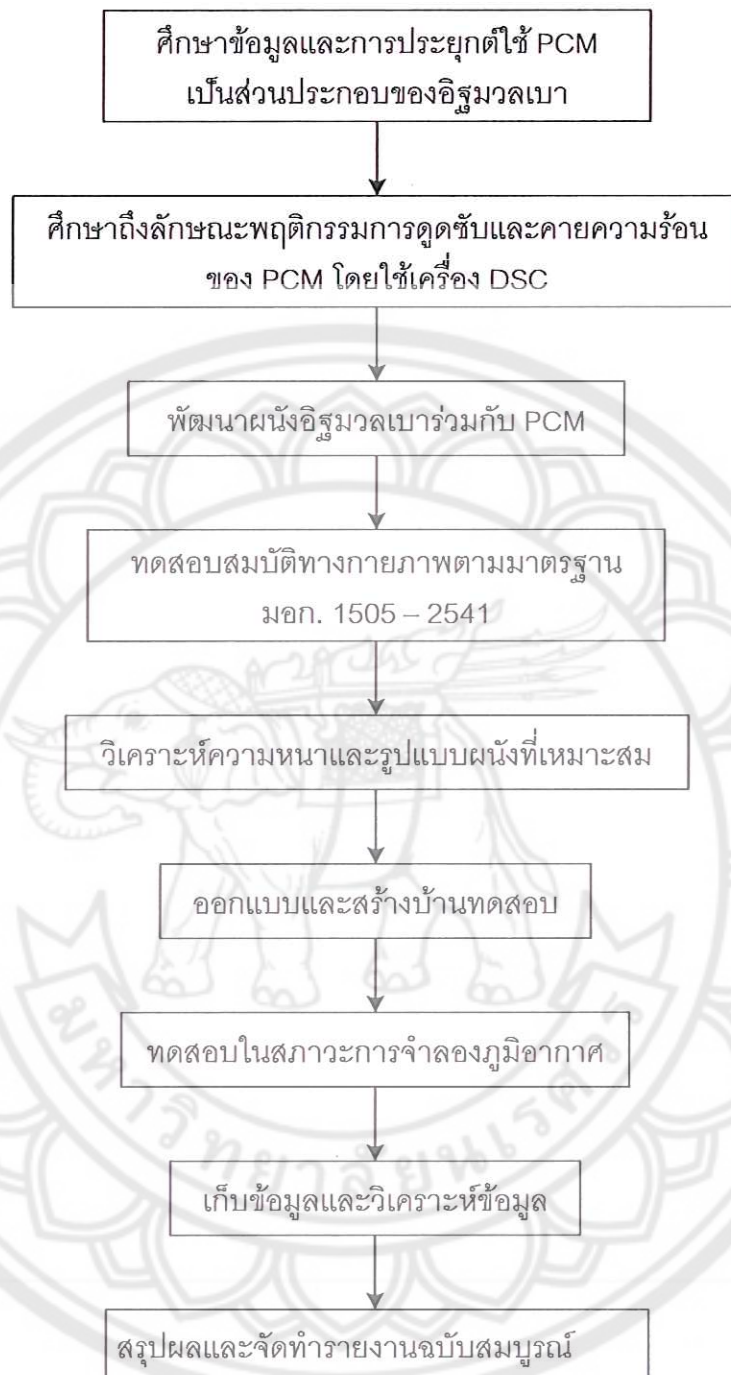
การวิจัยเพื่อพัฒนาอิฐมวลเบาและปรับปรุงผนังอาคารโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะให้มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศและความชื้นของประเทศไทย เป็นแนวทางหนึ่งในการป้องกันความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร และช่วยลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศลงได้ ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศ

งานวิจัยดังกล่าวแบ่งการศึกษาออกเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลและการประยุกต์ใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบของอิฐมวลเบา
2. ศึกษาถึงลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของ PCM โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)
3. พัฒนามวลอิฐมวลเบาโดยใช้สารเปลี่ยนสถานะเป็นส่วนประกอบเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมโดยการสร้างผนัง 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้
  - 3.1 size 3-7 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมกับปูนก่อในสัดส่วน 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 3.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 7.0 เซนติเมตร ตามลำดับ
  - 3.2 size 5-5 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมกับปูนก่อในสัดส่วน 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 5.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 5.0 เซนติเมตร ตามลำดับ
  - 3.3 size 7-3 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมกับปูนก่อในสัดส่วน 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 7.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 3.0 เซนติเมตร ตามลำดับ
4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก.1505 – 2541
  - 4.1 ความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Compressive Density)
  - 4.2 ค่าต้านทานแรงอัด (Compressive strength)
  - 4.3 ค่าต้านทานแรงดัด (Flexural strength)
  - 4.4 ค่าการดูดกลืนน้ำ (Absorption water)
5. นำรูปแบบผนังที่มีความเหมาะสมมาทำการออกแบบและสร้างบ้านทดสอบ
6. ทำการทดสอบในสภาวะการจำลองภูมิอากาศ
7. ออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจของอิฐมวลเบาที่ออกแบบขึ้น
8. เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล



## 9. สรุปผลและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์



ภาพ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 การศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะโดยเครื่อง DSC

การศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ โดยใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต และค่าความจุความร้อนจากการวัดโดยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC1 ยี่ห้อ Mettler Toledo สภาวะควบคุมในการวิเคราะห์ คือ อัตราการเพิ่มความร้อน (Heating rate) มีค่า 5 °C/min และ Flow N<sub>2</sub>(g) 50 ml/min สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นประเภท salt hydrate คือ S32 และ S44 มีจุดหลอมเหลว 32 และ 44 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

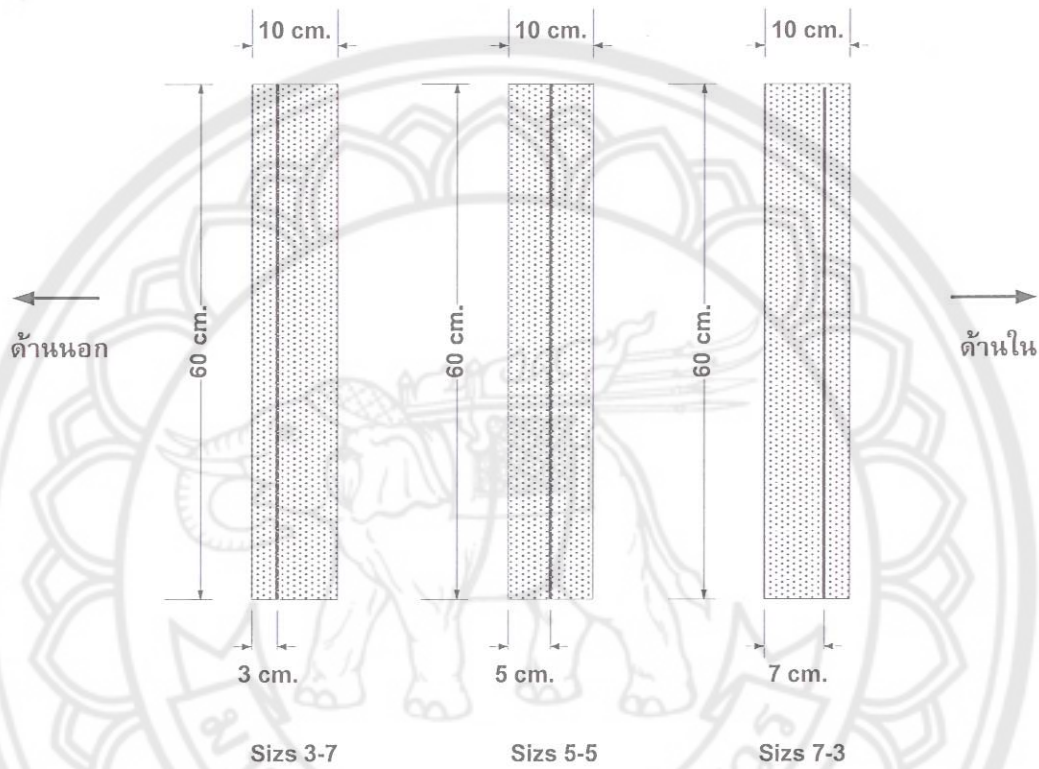
1. นำสารตัวอย่างมาบดให้ละเอียดใช้ประมาณ 10-15 mg ต่อ 1 ตัวอย่าง
2. นำไปบรรจุแพนอลูมิเนียม (Aluminium Pan) ก่อนเข้าเครื่อง DSC
3. ทำการทดสอบตามลำดับขั้นตอนของเครื่อง DSC
4. วิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะ



ภาพ 3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

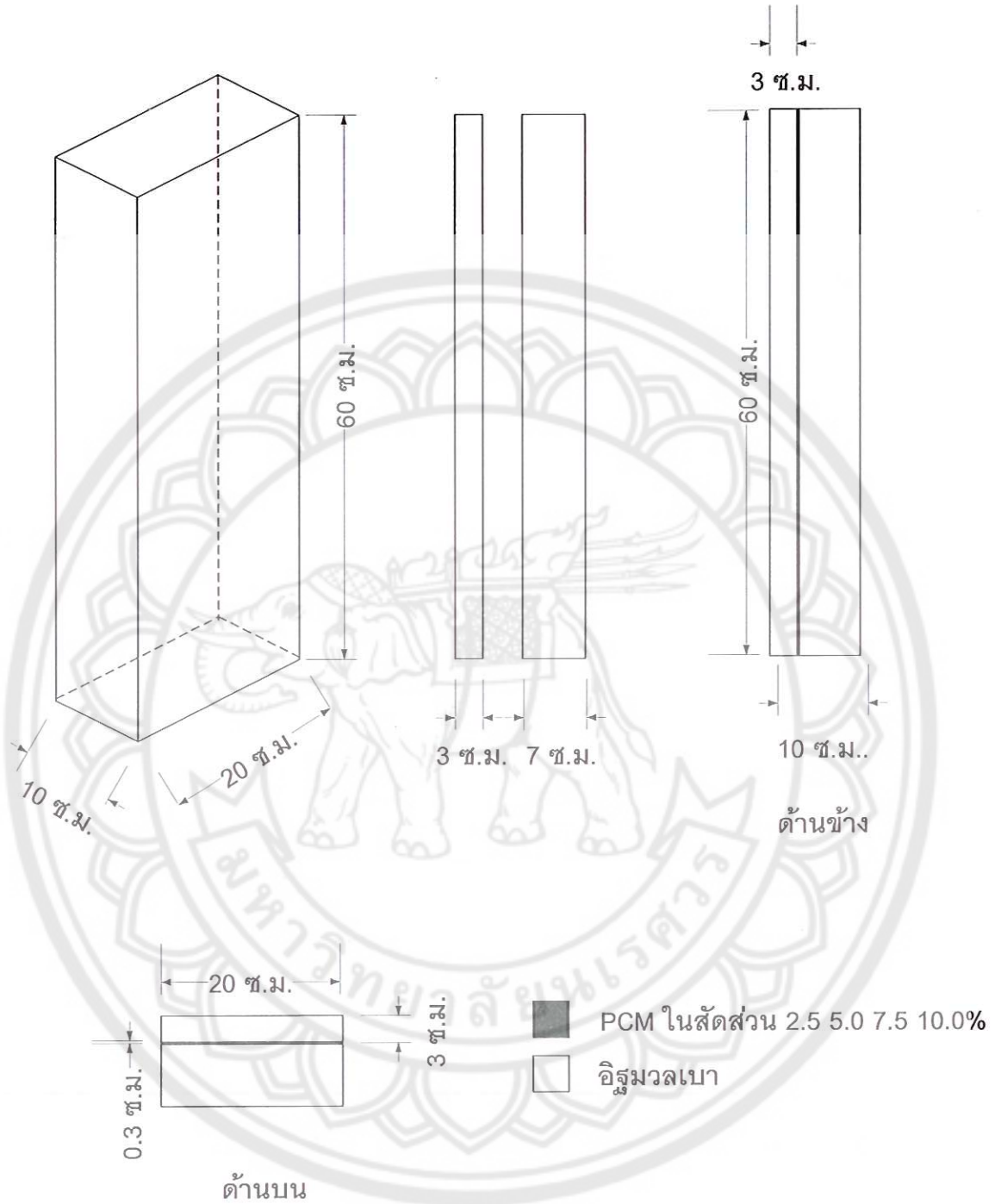
### 3.2 การพัฒนาสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอิฐมวลเบา

การพัฒนาสารเปลี่ยนสถานะร่วมกับผนังอิฐมวลเบาเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากสมบัติทางกายภาพเป็นหลัก โดยทำการผสม PCM กับปูนก่อในสัดส่วน 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) PCM ผสมปูนก่อหนา 3 มิลลิเมตร (บริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน), 2553) เนื่องจากปูนก่อเปรียบเสมือนกาวที่ทำให้อิฐมวลเบา 2 ส่วนประกอบกันได้ตามรูปแบบที่ต้องการ แบ่งรูปแบบอิฐมวลเบาออกเป็น 3 แบบ ดังต่อไปนี้



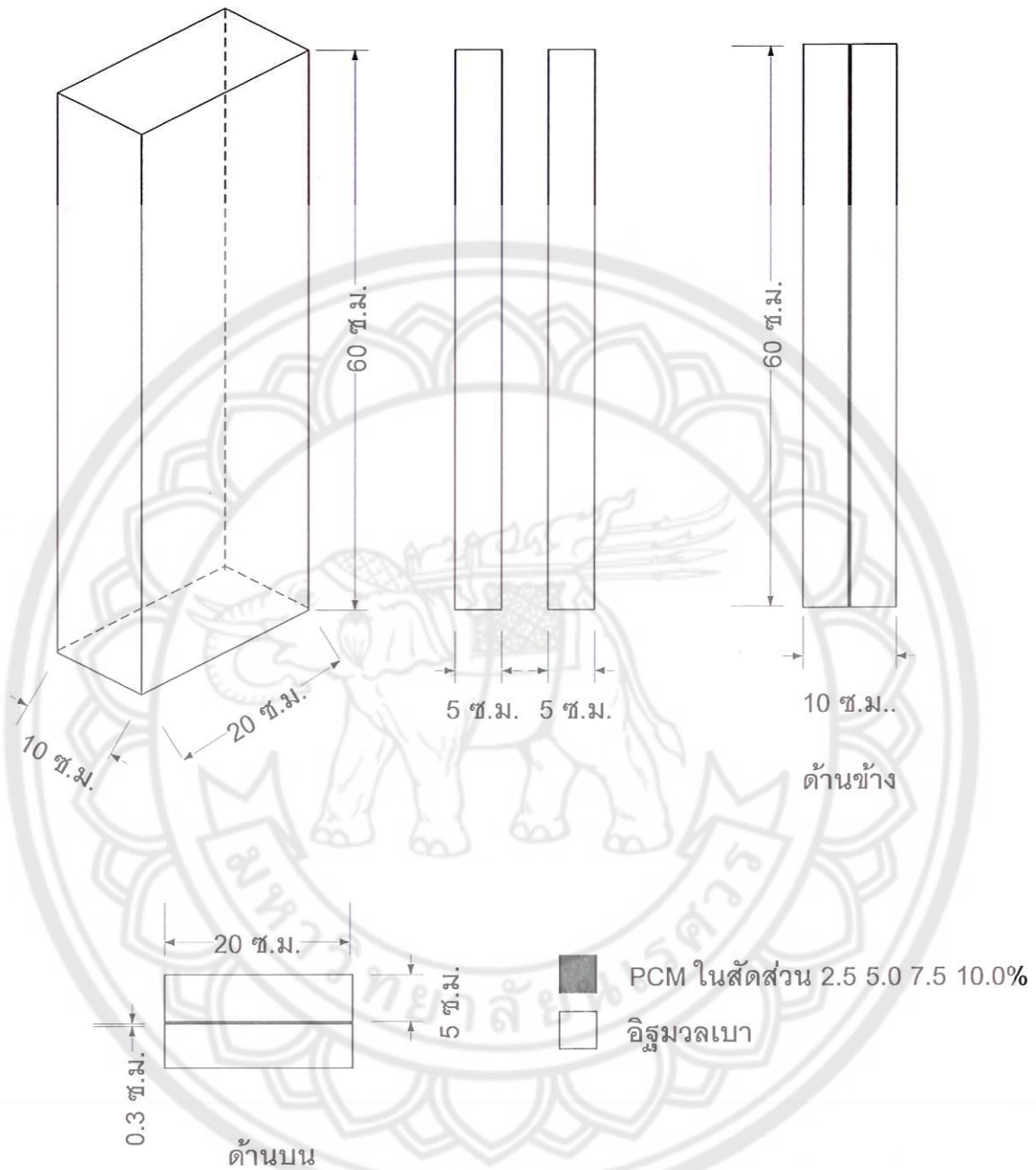
ภาพ 3.3 ตำแหน่งการติดตั้ง PCM ในการทดสอบ

1. size 3-7 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมปูนก่อ ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 3.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 7.0 เซนติเมตร ตามลำดับ



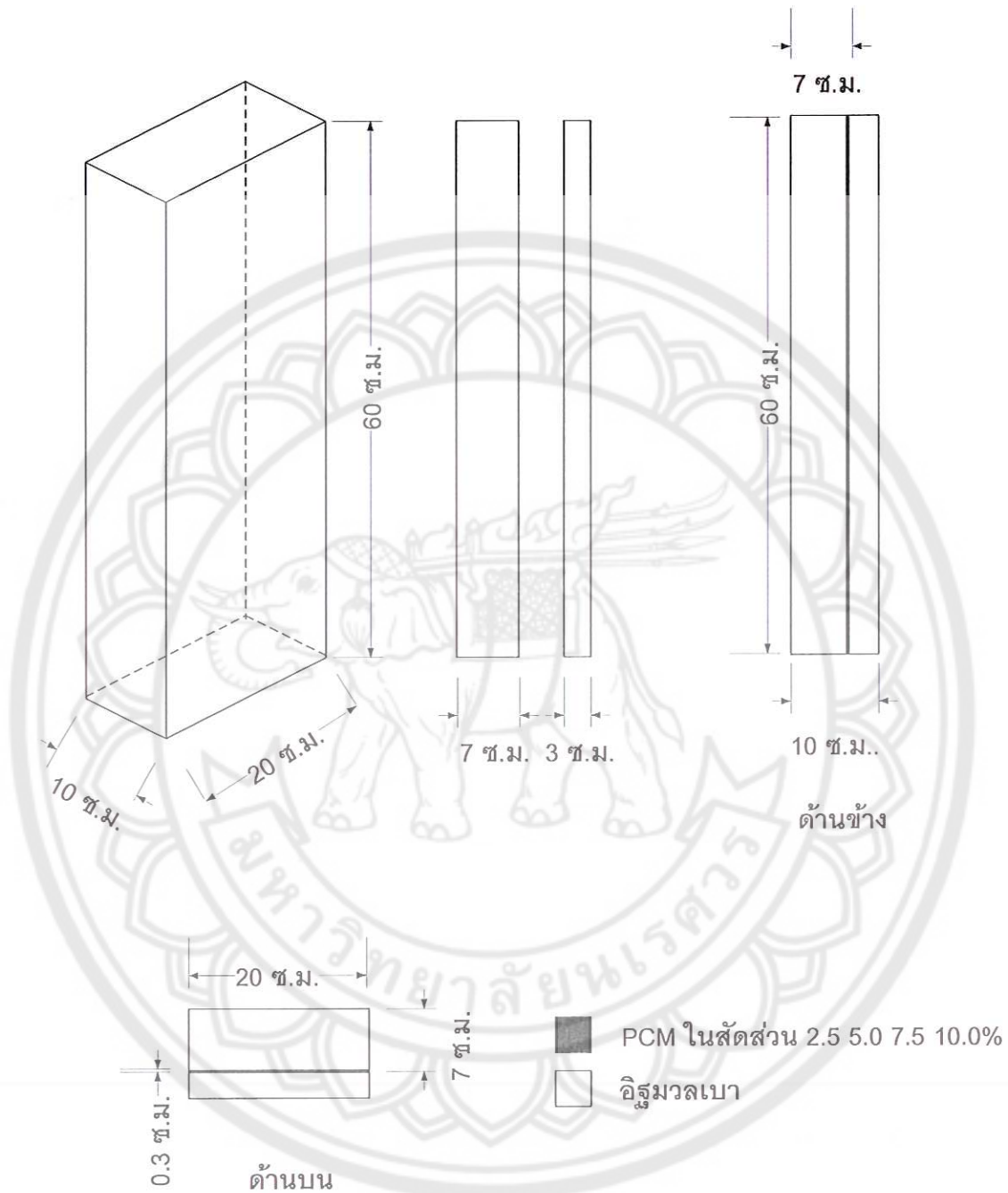
ภาพ 3.4 รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (3-7 PCM อยู่ผนังด้านนอก)

2. size 5-5 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมปูนก่อ ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 5.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 5.0 เซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพ 3.5 รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (5-5 PCM อยู่ผนังด้านนอก)

3. size 7-3 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ผสมปูนก่อ ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 7.0 เซนติเมตร และผนังด้านใน 3.0 เซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพ 3.6 รูปแบบผนังอิฐมวลเบา (7-3 PCM อยู่ผนังด้านนอก)

ตาราง 3.1 แสดงปริมาตรของผนัง PCM ใน 1 ก้อน ขนาด 60 x 20 x 10 เซนติเมตร

อิฐมวลเบา (ซ.ม. <sup>3</sup> )	PCM (ซ.ม. <sup>3</sup> )	รวม (ซ.ม. <sup>3</sup> )	ปูนก่อ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	PCM (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
11,640	360	12,000	97.5	2.5
11,640	360	12,000	95.0	5.0
11,640	360	12,000	92.5	7.5
11,640	360	12,000	90.0	10.0

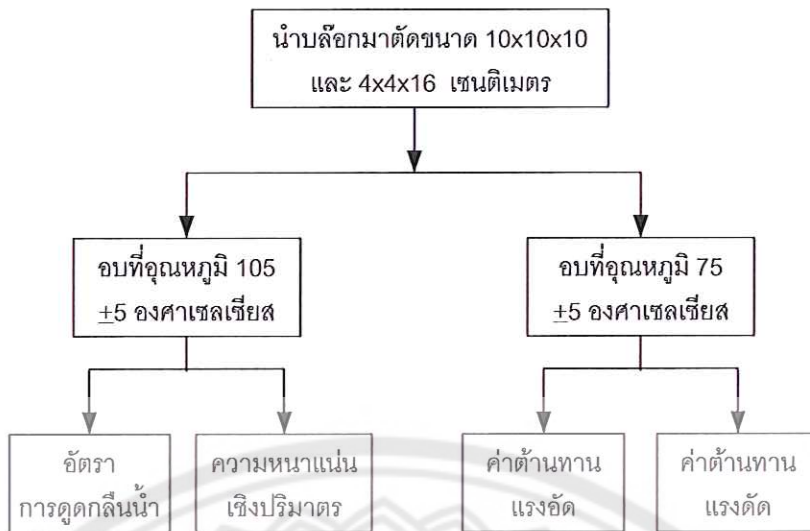
ตาราง 3.2 แสดงสัดส่วนการผสม PCM และปูนก่อ ของอิฐมวลเบาขนาด 60 x 20 x 10 เซนติเมตร ภาย  
ได้จำนวน 5 ก้อน

สัดส่วน (%)	ปูนก่อ (kg)	PCM (kg)	น้ำหนักรวม (kg)
2.50	2.925	0.075	3.0
5.00	2.850	0.150	3.0
7.50	2.775	0.225	3.0
10.00	2.700	0.300	3.0

### 3.3 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ได้แก่ ความหนาแน่น  
แห้งเชิงปริมาตร ค่าต้านทานแรงอัด ค่าต้านทานแรงดึง และอัตราการดูดกลืนน้ำ เพื่อหาสัดส่วนที่  
เหมาะสมของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ที่ส่งผลให้อิฐมวลเบาที่มีสมบัติที่ดีตามมาตรฐานของ  
อุตสาหกรรม มอก.1505-2541 โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

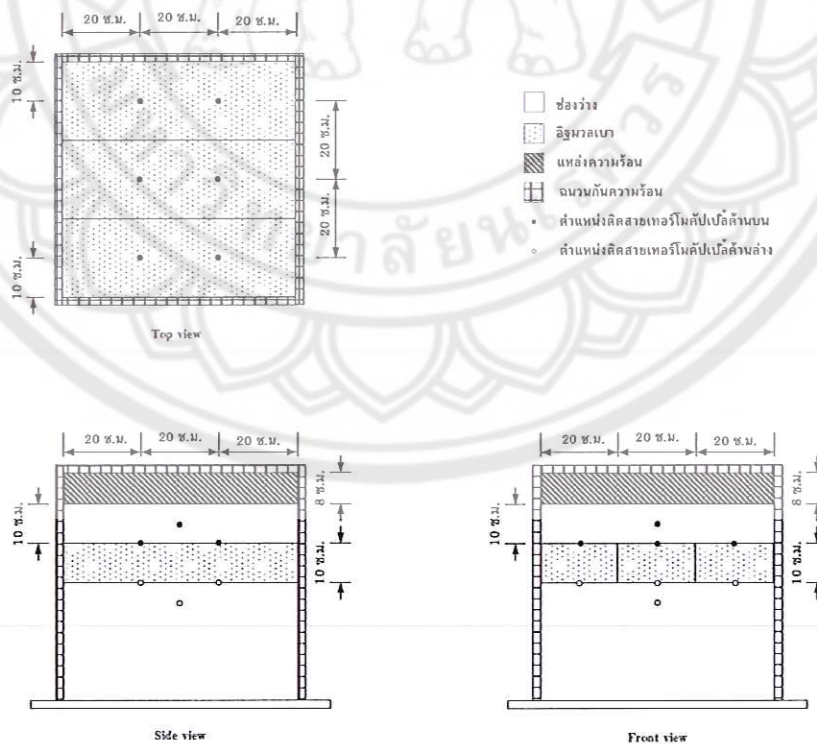
1. นำบล็อกมาตัดเพื่อนำไปทดสอบ โดยตัดขนาด 10x10x10 และ 4x4x16 เซนติเมตร
2. ทำการวัดมิติบล็อกทุกก้อนด้วยเวอร์เนียและทำการบันทึกผลลงในแผ่นบันทึกผล
3. ทำการทดสอบการดูดกลืนน้ำและความหนาแน่นแห้งเชิงปริมาตรก้อนตัวอย่างขนาด  
10x10x10 เซนติเมตร ทำการอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนัก  
เพื่อหาความหนาแน่นแห้ง และนำบล็อกแช่น้ำ 24 ชั่วโมงเพื่อหาอัตราการดูดกลืนน้ำ
4. ทำการทดสอบแรงอัดก้อนตัวอย่างขนาด 10x10x10 เซนติเมตร ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75  
±5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทำการทดสอบแรงดึงก้อนตัวอย่างขนาด 4x4x16 เซนติเมตร ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 75 ±5  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

### 3.4 การทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

ทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM โดยใช้แหล่งทำความร้อน (heater) ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งในการเลือกช่วงอุณหภูมิในการทดสอบ 40-60 องศาเซลเซียส นั้นผู้วิจัยได้ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับอุณหภูมิผนังอาคารพบว่า ผนังอาคารจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงดังกล่าว (เอกชัย บุญสุวรรณ, 2549; สุพิชชา ลอยขจร, 2554; อรไท แจ่มจรัส, 2554) โดยทำการทดสอบดังภาพ 3.8



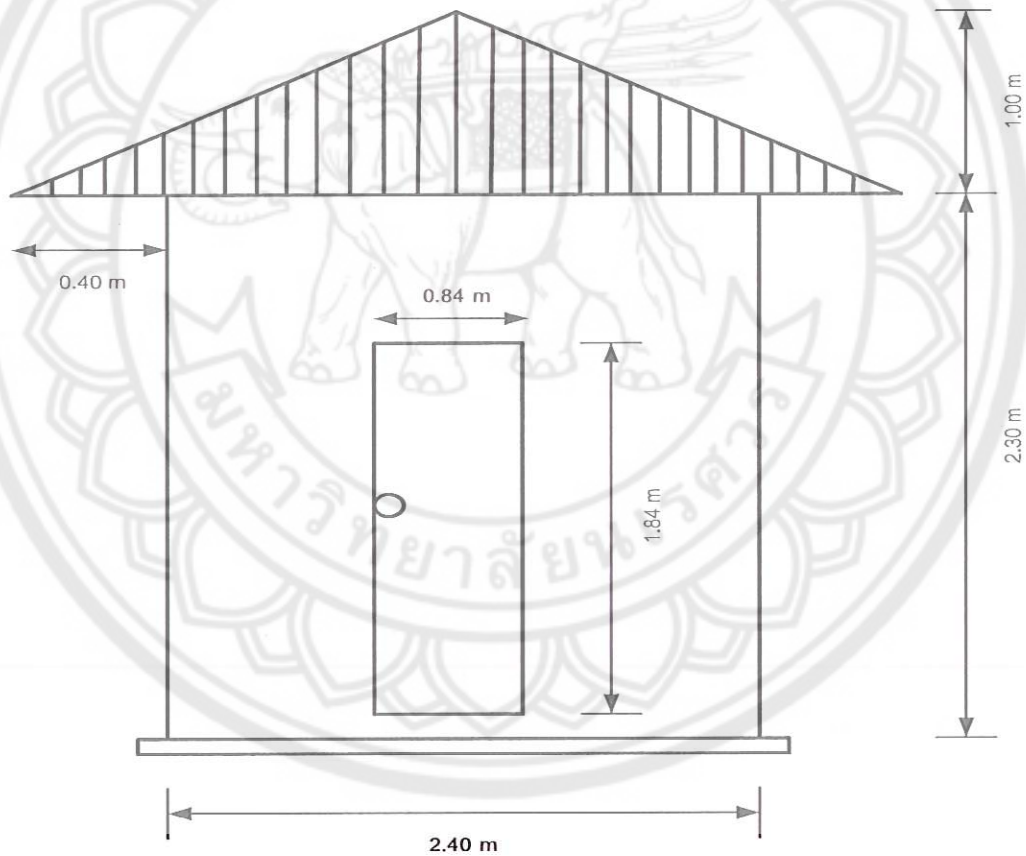
ภาพ 3.8 ตำแหน่งทดสอบการหน่วงความร้อน



### 3.4.1 บ้านทดสอบ

ทำการออกแบบบ้านทดสอบโดยจำลองมาจากบ้านจริง 4 หลัง สร้างด้วยผนังอิฐมวลเบา ผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ผนังอิฐมวลเบา และผนังอิฐบล็อก บ้านที่สร้างประกอบด้วย หลังคาปูกระเบื้องซีแพ็คสีเทา ทำมุงเอียง 30 องศา และบุด้วยแผ่นอะลูมิเนียมพอยด์สะท้อนความร้อน ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดมีความหนา 1 เซนติเมตร ขนาดของบ้านทดสอบ ดังต่อไปนี้

- กว้าง 2.4 เมตร
- ยาว 2.4 เมตร
- สูง 2.3 เมตร
- หลังคาบ้านสูง 1.0 เมตร
- ชายคาบ้าน 0.4 เมตร
- ประตูบ้านยาว 1.84 เมตร
- ประตูบ้านกว้าง 0.84 เมตร



ภาพ 3.9 แบบบ้านทดสอบ

### 3.4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการทดสอบในเวลากลางวันและกลางคืนเพื่อศึกษาค่าการนำความร้อนของผนังบ้านทดสอบ ทั้ง 4 หลัง รวมถึงการดูดซับและคายความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

#### 1. วิธีการทดสอบ

1.1 สร้างบ้านทดสอบทั้งหมด 4 หลัง คือ ผนังอิฐมวลเบา ผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ผนังอิฐมวลฉนวน และผนังอิฐบล็อก

1.2 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ เค ด้านในและด้านนอกบ้านทดสอบ

1.3 ติดตั้งไพรานอมิเตอร์ในบริเวณโล่งแจ้ง

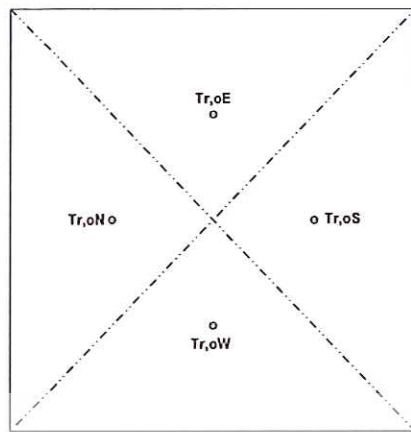
1.4 ติดตั้งเครื่องทดสอบความชื้นภายในบ้านทั้งสี่หลัง และภายนอก

1.5 ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 06.00 จนถึง 06.00 ของวันถัดไป

1.6 เก็บข้อมูลการทดสอบทุก 1 นาที

#### 2. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ

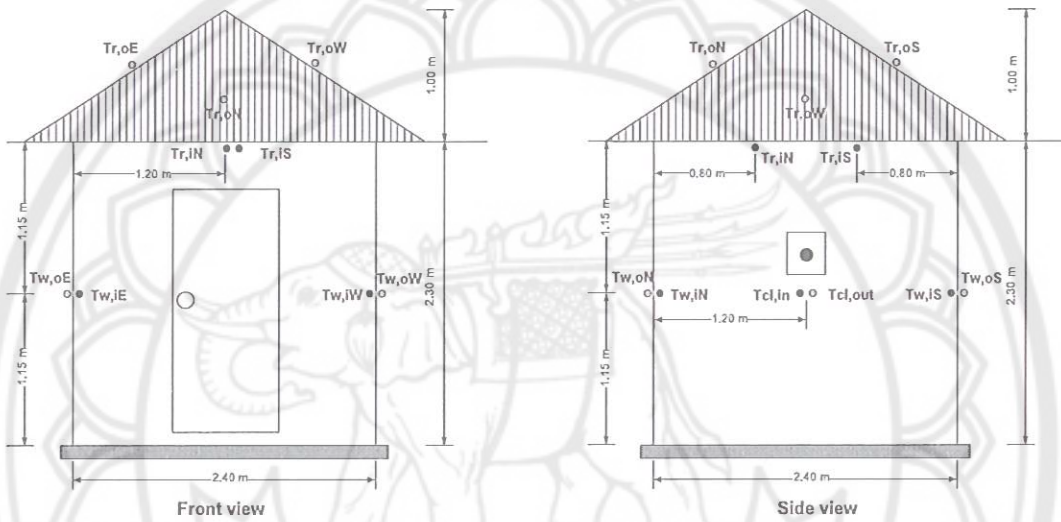
ทำการติดตั้งสายสายเทอร์โมคัปเปิลแบบ เค ด้านในและด้านนอก ณ จุดต่างๆ เพื่อวัดอุณหภูมิ พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศ แวดล้อม รวมถึงเครื่องตรวจวัดปริมาณน้ำฝน (จำลองฤดูฝน)



Top view



- ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ด้านใน
- ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ด้านนอก
- ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้านใน
- ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ด้านนอก
- ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจวัดปริมาณน้ำฝน
- ◡ ตำแหน่งติดตั้งเครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์



ภาพ 3.10 ตำแหน่งการตรวจวัดที่บ้านทดสอบ

ตาราง 3.3 ตำแหน่งการตรวจวัดที่บ้านทดสอบ

สัญลักษณ์	ความหมาย
Tw,Ni	อุณหภูมิผนังด้านใน ทิศเหนือ
Tw,Ei	อุณหภูมิผนังด้านใน ทิศตะวันออก
Tw,Si	อุณหภูมิผนังด้านใน ทิศใต้
Tw,Wi	อุณหภูมิผนังด้านใน ทิศตะวันตก
Tw,No	อุณหภูมิผนังด้านนอก ทิศเหนือ
Tw,Eo	อุณหภูมิผนังด้านนอก ทิศตะวันออก
Tw,So	อุณหภูมิผนังด้านนอก ทิศใต้
Tw,Wo	อุณหภูมิผนังด้านนอก ทิศตะวันตก
Tr,Ni	อุณหภูมิหลังคาภายใน ทิศเหนือ

สัญลักษณ์	ความหมาย
Tr,Si	อุณหภูมิหลังคาด้านใน ทิศใต้
Tr,No	อุณหภูมิหลังคาด้านนอก ทิศเหนือ
Tr,Eo	อุณหภูมิหลังคาด้านนอก ทิศตะวันออก
Tr,So	อุณหภูมิหลังคาด้านนอก ทิศใต้
Tr,Wo	อุณหภูมิหลังคาด้านนอก ทิศตะวันตก
Ta,in	อุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายในบ้าน
Ta,out	อุณหภูมิอากาศแวดล้อมภายนอกบ้าน

### 3.4.3 การออกแบบเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจ

#### การเลือกแนวคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม

การเลือกแนวคิดการออกแบบ (Concept Selection) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบผลิตภัณฑ์ เพราะเป็นขั้นตอนที่เปรียบดังการเดินทางของทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์มาถึงทางแยกแห่งความสำเร็จและล้มเหลว นั่นคือทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้องทำการเลือกแนวคิดผลิตภัณฑ์หนึ่งจากแนวคิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายแบบจากทางเลือก (Alternatives) ที่ทำการออกแบบไว้ทั้งหมด ซึ่งแนวทางในการเลือกแนวความคิดนี้ไม่มีวิธีที่ชัดเจนตายตัว ขึ้นกับพื้นฐานความต้องการใช้งานของทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์เป็นหลักยิ่งกับการออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจที่มีประเด็นเพิ่มเติมการพิจารณาประเด็นสิ่งแวดล้อม (Environmental Direction) ยิ่งทำให้การพิจารณาต้องดำเนินการให้ครอบคลุมมากกว่าการพิจารณาผลิตภัณฑ์โดยทั่วไป ดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจถึงกระบวนการเลือกแนวความคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์แบบพื้นฐานที่ได้รับความนิยมของ Pugh (1990) ก่อนที่จะกล่าวถึงกระบวนการเลือกแนวคิดการออกแบบเชิงประยุกต์เฉพาะทางด้าน Eco Design ต่อไป

#### กระบวนการในการเลือกแนวคิด (Concept Selection Process)

การเลือกแนวคิดเป็นการตัดสินใจที่อยู่บนพื้นฐานของทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งสามารถทำได้โดยการประชุมกลุ่มระดมสมองภายในกลุ่มผู้เกี่ยวข้องในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นั้นๆ ซึ่งกระบวนการเลือกแนวคิดมีทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. จัดรวบรวมสรุปเกณฑ์หรือบรรทัดฐานในการตัดสินใจ
2. จัดรวบรวมสรุปทางเลือกต่างๆในการออกแบบ
3. ทำการจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก
4. ทำการประเมินทางเลือก
5. หาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไขปัญหา

## พื้นฐานการเลือกแนวคิดในการออกแบบด้วยวิธีการ Pugh Method

วิธีการพื้นฐานของ Pugh (1990) เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในวงการออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์ว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้ เนื่องจากความง่ายในการคำนวณและเวลาที่ใช้ในการพิจารณา จากการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Pugh Selection Charts โดย Chart นี้จะช่วยในการประเมินผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เลือกด้วยการพิจารณาเสถียรสามระดับ (-, S, +) จากการพิจารณาของทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์เดิมค่าลงในตารางเมตริกการประเมินผลิตภัณฑ์ ดังแสดงในตาราง

ตาราง 3.4 Pugh Selection Charts

		Concepts						
		Sketch of Datum	Sketch of B	Sketch of C	Sketch of D	Sketch of E	Sketch of F	Sketch of C
Criteria	Criteria 1	0						
	Criteria 2	0						
	Criteria 3	0						
	Criteria 4	0						
	Criteria 5	0						
	Criteria 6	0						
	Criteria 7	0						
	$\Sigma + (P_i)$	0+						
	$\Sigma + (N_i)$	0-						
	$\Sigma$	0						

การจัดลำดับทางเลือก (Alternative Ranking Ordering)

Average Overall Summation Score ( $S_i$ )

$$S_i = \sum_{j \text{ Criteria}} R_{ij}$$

$$P_i = \sum_{j \text{ Criteria}}^+ R_{ij}$$

$$N_i = \sum_{j \text{ Criteria}}^- R_{ij}$$

$P_i$  = ค่าผลรวมสเกล (R) บวก (+) ของทางเลือก i เกณฑ์ j

$N_i$  = ค่าผลรวมสเกล (R) ลบ (-) ของทางเลือก i เกณฑ์ j

ค่าในการจัดลำดับของ Pugh Selection Charts จะประกอบด้วยค่าคะแนนหลักสามค่า ได้แก่

- = Worse (แย่กว่ารูปแบบที่ใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบ)

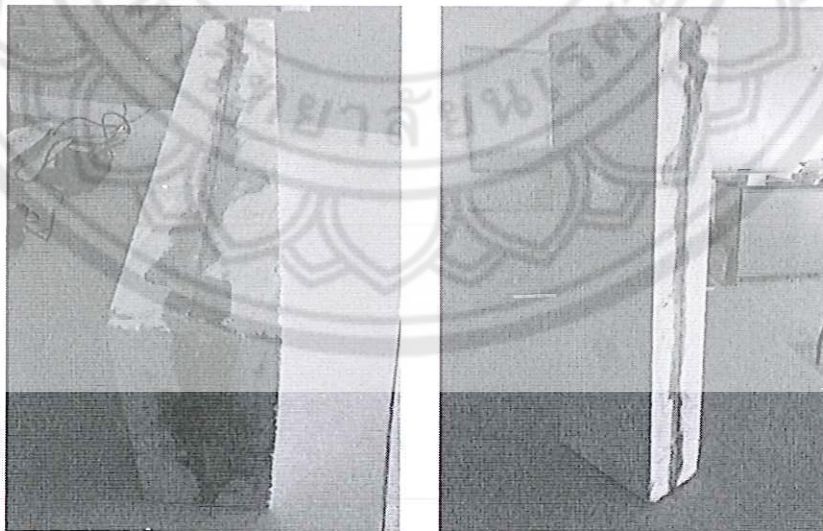
S = Same or "0" (ฐานการเปรียบเทียบหรือคะแนนเทียบเท่าฐานเปรียบเทียบ)

+ = Better (ดีกว่ารูปแบบที่ใช้เป็นฐานเปรียบเทียบ)

โดยหลักเกณฑ์การเปรียบเทียบนั้นจะใช้การเปรียบเทียบรูปแบบผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ทีมงานเลือกกับฐานหลักในการเปรียบเทียบ (Datum) ตามเกณฑ์ (Criteria) ที่ต้องการพิจารณา โดย Pugh (1990) ได้แนะนำว่าการเลือกฐานการเปรียบเทียบให้ทำการเลือกจากทางเลือกที่คิดว่าดีที่สุดด้วย Vote ของทีมพัฒนาผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การพิจารณาทางเลือกอื่นๆ ที่มีค่าด้อยหรือแย่กว่ายอมรับผลการเปรียบเทียบกับความเห็นชอบของส่วนรวม และเพื่อให้เป็นที่ชัดเจนว่าในการนำไปเปรียบเทียบอีกครั้งหลังการปรับปรุงรอบที่ 2 (Second Round) ว่าผลิตภัณฑ์ที่ส่วนรวมเห็นว่าดีที่สุดนี้มีการปรับปรุงที่ดีขึ้นมากน้อยเท่าใดอีกด้วย

### 3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาจะคือ อิฐมวลเบา ประเภท G4 ของ บริษัท ซุปเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน) มีขนาด 20x60x10 ซม. หนัก 6.3 กิโลกรัม ต่อก้อน มีส่วนประกอบหลักได้แก่ ปูนขาว 19.2 % ปูนซีเมนต์ 20.17% ททราย 58% แร่แอนไฮไดรต์ 2.4% อลูมิเนียม 0.084% ลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปคือ ใช้ในการก่อเป็นผนังของอาคาร



ภาพ 3.11 อิฐมวลเบา

ตาราง 3.5 ข้อมูลเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์

Product Modeling	
Environmental parameters	Information
General Information	
Name of the product	อิฐมวลเบา G4
Weight	6.3 กก.
Volume	20 x 60 x 10 ซม.
Lifetime	ก/า
Functionality	ใช้ในการก่อสร้างผนังอาคาร
Use of raw material	
	ปูนขาว 1.212 กก. (101 กก./ลบ.ม.)
Material used	ปูนซีเมนต์ 1.272 กก. (106 กก./ลบ.ม.)
	ทราย 3.66 กก. (350 กก./ลบ.ม.)
	แร่แอนไฮไดรต์ 0.156 กก. (13 กก./ลบ.ม.)
	อลูมิเนียม 0.00528 กก. (0.44 กก./ลบ.ม.)
Problematic materials	None
Manufacture	
	การผสมวัตถุดิบ
Production Technology	การขึ้นรูป
	การอบไอน้ำ
Production waste	None
Distribution	
Packaging	None
	รถบรรทุก 10 ล้อ (ขนส่งทราย) 2 กม.
Transportation	รถเต่า/แคปซูล 18 ล้อ(ปูนขาว) 150 กม.
	รถเต่า/แคปซูล 18 ล้อ(ปูนซีเมนต์) 100 กม.
	รถเต่า/แคปซูล 18 ล้อ(แร่) 185 กม.
Product use	
Useability	
Energy consumption	None

### 3.5.1 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตของอิฐมวลเบา แสดงได้ดังรูปภาพข้างล่าง

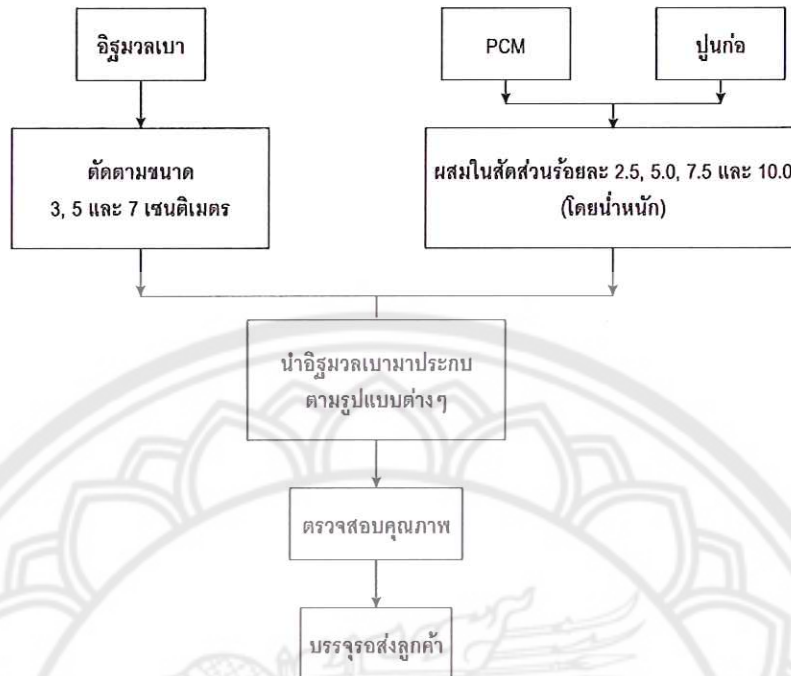
#### ขั้นตอนการผลิตอิฐมวลเบา



ภาพ 3.12 กระบวนการผลิตของอิฐมวลเบา



### ขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอิฐมวลเบา



ภาพ 3.13 ขั้นตอนการพัฒนาผลิตภัณฑ์ของอิฐมวลเบา

### 3.6 การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อมูลที่น่ามาศึกษาแบ่งออกเป็น ข้อมูลในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยซึ่งพิจารณาในส่วนของผนังอิฐบล็อก อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ซึ่งมีพื้นที่ผนัง 400 ตารางเมตร และการใช้งานบ้านพักอาศัย ข้อมูลการใช้พลังงานเป็นข้อมูลจากการคำนวณการใช้งานในบ้านพักอาศัยที่สำหรับในขั้นตอนการขนส่งจะไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากการขนส่งในแต่ละครั้งมีปริมาณการขนส่งของชิ้นส่วนที่น่ามาศึกษาที่ไม่แน่นอน

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของบ้านที่ก่อสร้างจากผนังอิฐบล็อก อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ใช้วิธีการ Eco Indicator 95 ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับ และประเมินถึงกลุ่มเป้าหมายที่ได้รับผลกระทบทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการลดลงของทรัพยากร โดยผลการประเมินแสดงออกเป็นลักษณะดังนี้

1. การกำหนดบทบาท (Characterization) ผลจากการกำหนดบทบาทจะทำให้ทราบได้ว่า กระบวนการผลิตหรือวัตถุดิบที่กำลังสนใจนั้นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมประเภทใดบ้าง ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ ในกรณีที่ต้องการลดผลกระทบประเภทใดประเภทหนึ่ง ซึ่งกลุ่มเป้าหมายทั้ง 3 กลุ่มจะแสดงเป็นหน่วยต่างๆ ดังนี้

1.1 สุขภาพมนุษย์ (Human health) จะแสดงหน่วยเป็น DALYs (Disability Adjusted Life Years) ซึ่งจะหมายถึง การสูญเสียการมีสุขภาพที่ดี (ปีที่สูญเสียไปเพราะตายก่อนถึงวัยอันควร + ปีที่

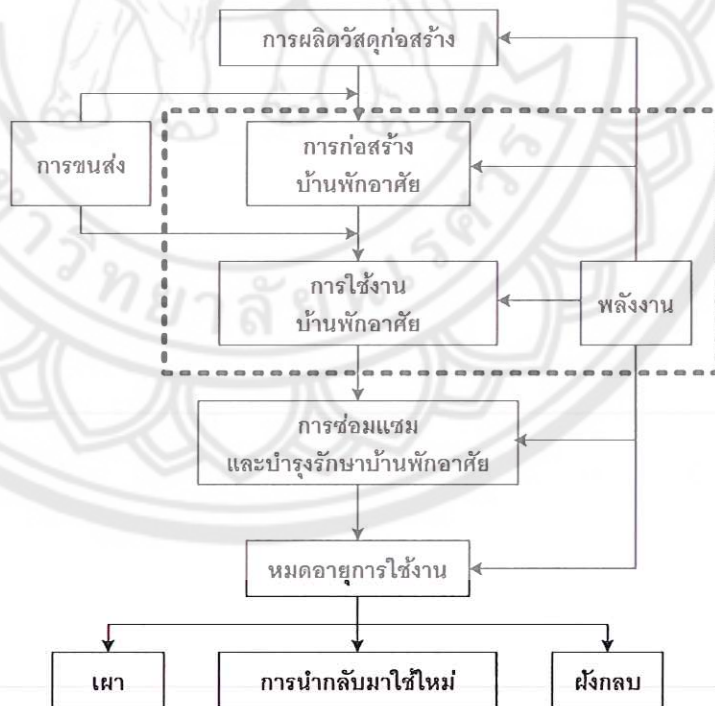
สูญเสียไปเพราะเจ็บป่วยหรือพิการ) ซึ่งหนึ่งหน่วยจะเท่ากับการสูญเสียช่วงอายุของการมีสุขภาพที่ดีไปจำนวน 1 ปี

1.2 ระบบนิเวศวิทยา (Ecosystem quality) จะแสดงหน่วยเป็น PDF (Potentially Disappeared Fraction) หมายถึง สัดส่วนการสูญหายของความหลากหลายของสิ่งมีชีวิตต่อพื้นที่

1.3 การลดลงของทรัพยากร (Resource depletion) จะแสดงหน่วยเป็น MJ surplus energy หมายถึง การลดลงของทรัพยากรหรือปริมาณที่เหลืออยู่ทั้งในรูปของสินแร่และเชื้อเพลิง (MJ เท่ากับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสกัดแร่หรือเชื้อเพลิง)

2. คะแนนเชิงเดี่ยว (Single Score) เป็นการแสดงค่าคะแนนเชิงเดี่ยวของแต่ละกระบวนการหรือวัตถุดิบ เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการใดหรือวัตถุดิบใดมีค่าคะแนนเชิงเดี่ยวทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ทั้งผลกระทบแบบกลุ่มเป้าหมายหรือแสดงผลกระทบแบบแยกประเภท ซึ่งค่าคะแนนเชิงเดี่ยวจะแสดงเป็นหน่วย Pt (Person for target year) ซึ่งหน่วย Pt เกิดจากกระบวนการหาขนาดของผลกระทบที่ต้องการจะรวมค่าในกลุ่มผลกระทบต่างๆ ที่มีหน่วยต่างกัน โดยการหาด้วยค่ากลาง ดังนั้นหน่วย Pt จะหมายถึงการแสดงความเท่าของค่ากลาง โดยที่จะสามารถรู้ค่าที่มีค่ามากหรือน้อยจะต้องทำการเปรียบเทียบกับค่ากลางหรือใช้ในการเปรียบเทียบกับค่า Pt ด้วยกัน

สำหรับการประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบผนังอิฐมวล อีฐบล็อก อีฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM เพื่อให้ทราบว่าส่วนประกอบใดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ มากที่สุด โดยพิจารณาค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score)



หมายถึง ขอบเขตของระบบที่ทำการศึกษา

ภาพ 3.14 ขอบเขตการศึกษา

### 3.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ เค (thermocouple type K) วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -200 ถึง 1,370 องศาเซลเซียส ต่อเข้ากับช่องสัญญาณของเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)



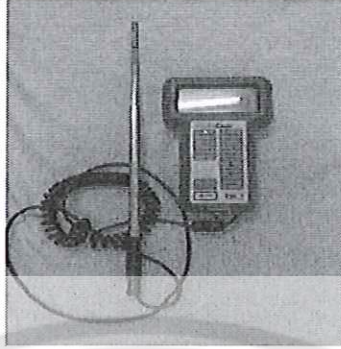
ภาพ 3.15 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบเค

2. เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger) ยี่ห้อ HIOKI รุ่น 8422-51 เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ มีช่องสัญญาณจำนวน 32 ช่องสัญญาณ ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า



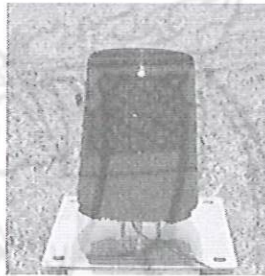
ภาพ 3.16 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

3. เครื่องวัดความเร็วลม ใช้สำหรับวัดความเร็วลมภายนอกบ้านทดสอบ



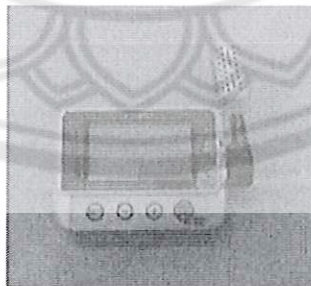
ภาพ 3.17 เครื่องวัดความเร็วลม

4. เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน ใช้ในกรณีทำการทดสอบสภาพแวดล้อมจากการจำลองฤดูฝนในบริเวณบ้านทดสอบ



ภาพ 3.18 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน

5. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม ยี่ห้อ HIOKI รุ่น LR5001 เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม



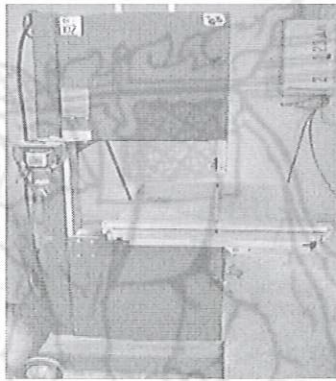
ภาพ 3.19 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นอากาศแวดล้อม

6. ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ติดตั้งในที่โล่งแจ้ง ใช้สำหรับวัดความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ในแต่ละวันที่ทำการทดสอบ



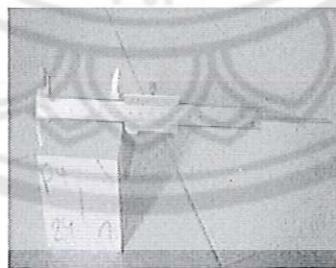
ภาพ 3.20 ไพรานอมิเตอร์

7. เครื่องสำหรับตัดขนาดความกว้างของบล็อกทดลองให้มีขนาดต่างๆ เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพ



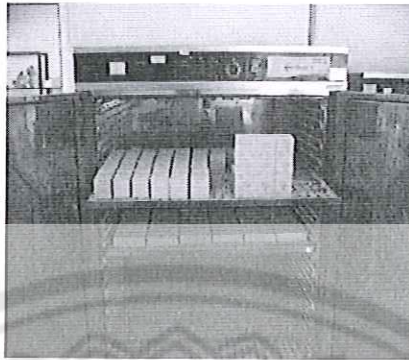
ภาพ 3.21 เครื่องที่ใช้ในการตัดขนาดของอิฐมวลเบาที่ใช้ในการทดสอบต่างๆ

8. เวอร์เนีย ใช้สำหรับวัดขนาดของก้อนอิฐมวลเบาเพื่อใช้ในการคำนวณพื้นที่และผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพ โดยมีความละเอียดที่ 0.1 มิลลิเมตร



ภาพ 3.22 การวัดโดยเวอร์เนีย

9. ตู้อบความร้อน อบความร้อนที่ 75 และ 105 องศาเซลเซียส ใช้ในการไล่ความชื้นและการยึดหดตัวของอิฐตัวอย่าง เพื่อใช้ในการทดสอบตัวอย่างตามมาตรฐานอุตสาหกรรม



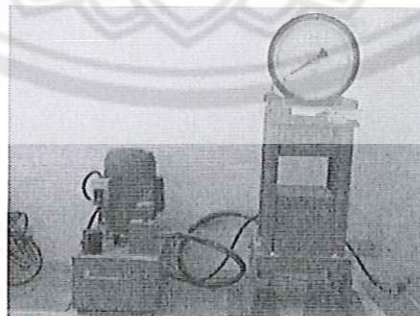
ภาพ 3.23 ตู้อบความร้อนใช้ในการอบอิฐมวลเบาตัวอย่างที่ทดสอบ

10. เครื่องชั่งน้ำหนัก ใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของอิฐมวลเบาก่อนอบ หลังอบและหลังจากแช่น้ำ 24 ชั่วโมง



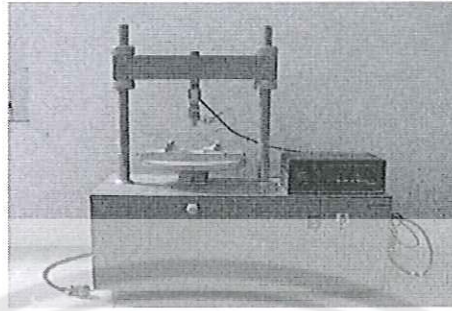
ภาพ 3.24 การชั่งน้ำหนักของอิฐมวลเบา

11. เครื่องทดสอบแรงอัด ใช้ทดสอบแรงอัดของบล็อกตัวอย่างที่มีขนาด 10 x 10 x 10 เซนติเมตร โดยเครื่องสามารถรับแรงอัดได้สูงสุดที่ 10 ตัน



ภาพ 3.25 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงอัด

12. เครื่องทดสอบแรงดัด ใช้ทดสอบแรงดัดของบล็อกตัวอย่างที่มีขนาด  $4 \times 4 \times 160$  เซนติเมตร โดยเครื่องสามารถรับแรงดัดได้สูงสุดที่ 500 กิโลกรัม



ภาพ 3.26 เครื่องที่ใช้ในการทดสอบแรงดัด



## ผลการวิจัย

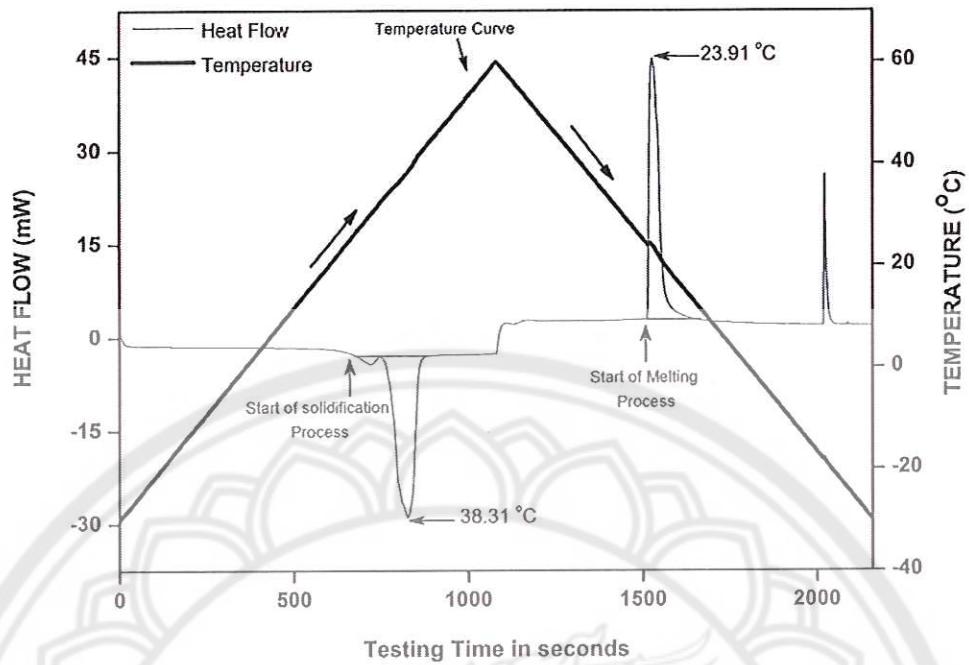
ผลการวิจัยสำหรับพัฒนาผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM เพื่อป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวบ้าน โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 6 ส่วน ประกอบด้วย

1. ผลการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของ PCM โดยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) (วิธีดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพ 3.1 บทที่ 3)
2. ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1505-2541 โดยทำการทดสอบสมบัติหลักๆ คือ ความหนาแน่นแห้งเชิงปริมาตร ค่าต้านทานแรงอัด ค่าต้านทานแรงดัด และอัตราการดูดกลืนน้ำ
3. ผลการทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM
4. ผลการทดสอบบ้านจำลองใช้งานจริงในฤดูร้อนและจำลองสภาวะภูมิอากาศในฤดูฝน
5. ผลการออกแบบเชิงนิเวศวิทยา
6. ผลการวิเคราะห์ด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

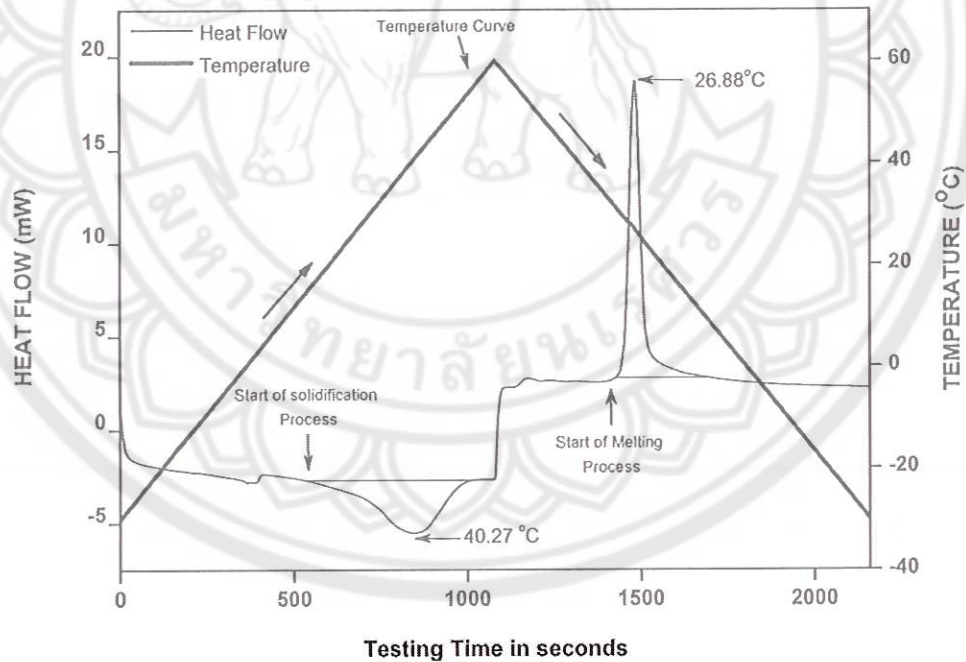
4.1 ผลการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะโดยเครื่อง DSC การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของ PCM พิจารณาข้อมูลจากผู้ผลิต และค่าความจุความร้อนจากการวัดโดยเครื่อง DSC สภาวะควบคุมในการวิเคราะห์ คือ อัตราการเพิ่มความร้อน (Heating rate) มีค่า  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  และ Flow  $\text{N}_2(\text{g})$   $50\text{ ml}/\text{min}$  สารเปลี่ยนสถานะที่ใช้เป็นประเภท salt hydrate คือ S32 และ S44 มีจุดหลอมเหลว 32 และ 44 องศาเซลเซียส

จากการทดลอง พบว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ PCM ระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว (heating) ของ S32 มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 34-42 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด 38 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.1) และ S44 มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 26-51 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุด 40.27 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.2) และการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (cooling) ของ S32 มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-24 องศาเซลเซียส และ S44 มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 24-29 องศาเซลเซียส ส่วนในช่วงที่ไม่มีมีการเปลี่ยนสถานะนั้นค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่สารตัวอย่างมีค่าคงที่ ผลที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนของ PCM มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดได้จากเครื่อง DSC ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Meng Zhang, et al., 2005, pp 795–809; Kuznik and Virgone, 2009, pp 2038–2046; Castell, et al., 2010, pp 534–540)





ภาพ 4.1 ผลการทดสอบ DSC ของ PCM ชนิด S32



ภาพ 4.2 ผลการทดสอบ DSC ของ PCM ชนิด S44

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากการวัดโดยเครื่อง DSC และข้อมูลจากผู้ผลิต โดยนำมาพิจารณาการเลือกใช้ PCM ที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ คือ S32 เนื่องจากมีค่าการเปลี่ยนสถานะระหว่าง 34-42 องศา

เซลเซียส ในขณะที่ S44 มีการเปลี่ยนสถานะระหว่าง 26-51 องศาเซลเซียส นอกจากนี้แล้ว ชลธิศ เอี่ยมวร วุฒิกุล และวิทยา ยงเจริญ (2550) อธิบายว่า การเลือกใช้ PCM ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ ประมาณกึ่งกลางระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของกำแพง อุณหภูมิของผนังที่มี PCM ผสมอยู่มีค่าการ เปลี่ยนแปลงในรอบวันที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อเลือก PCM ที่ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าที่สูง กว่าอุณหภูมิของผนังตลอดเวลาส่วนใหญ่ ของการทำงานในรอบ 24 ชั่วโมง ดังนั้น PCM ที่ผสมอยู่ในเนื้อ วัสดุกำแพง จึงไม่ได้ถูกใช้ความร้อนแฝงอย่างเต็มที่ส่งผลให้อุณหภูมิของผนังมีค่าไม่แตกต่างจากผนังที่ไม่มี PCM ผสมมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยดังกล่าวนี้จึงเลือก PCM S32 ในการผลิตจริง เพื่อใช้ในการสร้าง บ้านทดสอบ

#### 4.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามมาตรฐาน อุตสาหกรรม มอก.1505-2541

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ได้แก่ ความหนาแน่น แห้งเชิงปริมาตร ค่าต้านทานแรงอัด ค่าต้านทานแรงดัด และอัตราการดูดกลืนน้ำ เพื่อหาสัดส่วนที่ เหมาะสมของ PCM ที่ส่งผลให้อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีสมบัติที่ดีตามมาตรฐานของ อุตสาหกรรม มอก.1505-2541 ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

##### 1. ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (Density)

ผลการทดสอบความหนาแน่นเชิงปริมาตร พบว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM (LWC+PCM) มีค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.61-0.64 kg/dm<sup>2</sup> ดังตาราง 4.1 เมื่อ เปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตรมีค่าอยู่ ระหว่าง 0.61-0.70 kg/dm<sup>2</sup> (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541) ดังนั้น ค่าความหนาแน่นเชิง ปริมาตรของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ทุกสัดส่วนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ตาราง 4.1 ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร (แห้ง)

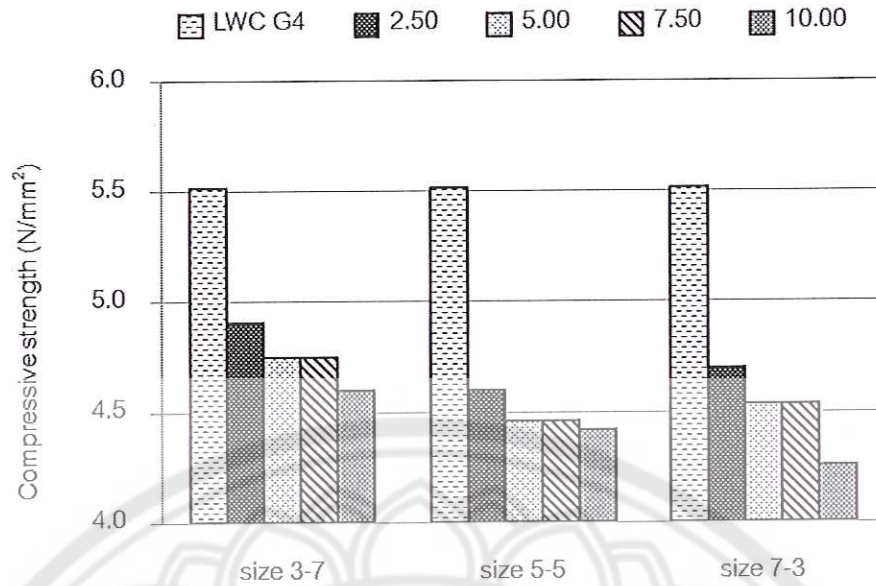
PCM	ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร(แห้ง)				มาตรฐาน 0.61-0.70 kg/dm <sup>2</sup>
	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	size 3-7	size 5-5	size 7-3	
S32	2.5	0.62	0.62	0.62	✓
	5.0	0.62	0.64	0.64	✓
	7.5	0.63	0.63	0.62	✓
	10.0	0.64	0.63	0.63	✓
S44	2.5	0.62	0.62	0.63	✓
	5.0	0.65	0.61	0.62	✓

PCM	ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร(แห้ง)			มาตรฐาน 0.61-0.70 kg/dm <sup>2</sup>	
	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	size 3-7	size 5-5		size 7-3
	7.5	0.65	0.63	0.64	✓
	10.0	0.63	0.62	0.64	✓

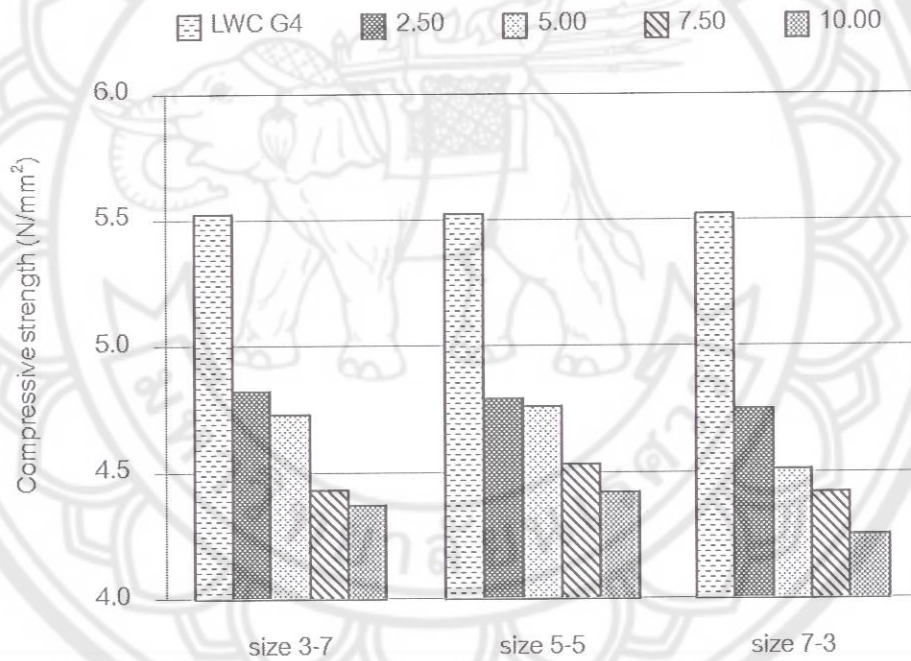
## 2. ค่าต้านทานแรงอัด (Compressive strength)

ผลการทดสอบค่าต้านทานแรงอัดของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM (LWC+PCM) พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 2.5 เปอร์เซ็นต์ กรณีใช้ S32 (ภาพ 4.3) มีค่ารับแรงอัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 4.91 N/mm<sup>2</sup> size 5-5 มีค่า 4.60 N/mm<sup>2</sup> และ size 7-3 มีค่า 4.70 N/mm<sup>2</sup> กรณีใช้ S44 (ภาพ 4.4) มีค่ารับแรงอัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 4.82 N/mm<sup>2</sup> size 5-5 มีค่า 4.79 N/mm<sup>2</sup> และ size 7-3 มีค่า 4.75 N/mm<sup>2</sup> เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมค่ารับแรงอัดตามมาตรฐานต่ำสุดอยู่ที่ 4 N/mm<sup>2</sup> ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5 N/mm<sup>2</sup> (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541) พบว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในขณะที่อิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 (LWC G4) ที่ผลิตได้มีค่าต้านทานแรงอัดเฉลี่ย 5.52 N/mm<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าสูงกว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM เนื่องจากอิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 มีผลึกคริสตัลของแคลเซียมซิลิเกตที่เรียกว่า tobermerite จากเดิมมีโมเลกุลขนาด 65-90 ไมโครเมตร หลังจากผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิสูง 180 องศาเซลเซียส แรงดัน 12 บาร์ ทำให้มีโมเลกุลเล็กลงอยู่ในช่วง 0.95-1.1 นาโนเมตร (โยธิน อึ้งกุล, 2554)

ดังนั้น อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ PCM มีแนวโน้มทำให้ค่าต้านทานแรงอัดมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของกำลังการรับแรงอัดและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาอบไอน้ำ (โยธิน อึ้งกุล, 2554)



ภาพ 4.3 ค่าต้านทานแรงอัดของ S32 แบบผ่านการอบ



ภาพ 4.4 ค่าต้านทานแรงอัดของ S44 แบบผ่านการอบ

### 3. ค่าต้านทานแรงดัด (Flexural strength)

ผลการทดสอบค่าต้านทานแรงดัดของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่าสัดส่วนที่มีค่าต้านทานแรงดัดสูงสุดคือ 10.0 เปอร์เซ็นต์ กรณีใช้ S32 เป็นสารเปลี่ยนสถานะมีค่ารับแรงดัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 24.12 kg/cm<sup>2</sup> size 5-5 มีค่า 24.30 kg/cm<sup>2</sup> และ size 7-3 มีค่า 24.99 kg/cm<sup>2</sup> กรณีใช้ S44 เป็นสารเปลี่ยนสถานะมีค่ารับแรงดัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 24.40 kg/cm<sup>2</sup> size 5-5 มีค่า 24.56 kg/cm<sup>2</sup> และ size 7-3 มีค่า 25.90 kg/cm<sup>2</sup> ดังตาราง 4.2 ในขณะที่อิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 มี

ค่ารับแรงดัดที่ 21.23 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งสอดคล้องกับค่าการรับแรงอัด เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิตอิฐมวลเบาค่ารับแรงดัดตามมาตรฐานมีค่าเป็น 0.3-0.4 เท่าของค่าการรับแรงอัด หรือมีค่า 30-40 % ของค่าการรับแรงอัด พบว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ทุกสัดส่วนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เนื่องจากมีค่ารับแรงดัดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 20.14 - 25.90 kg/cm<sup>2</sup> (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541)

ตาราง 4.2 ค่าต้านทานแรงดัด

PCM	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	ค่าการรับแรงดัด "ผ่านการอบ"			มาตรฐาน 30-40 % ของ ค่าการรับแรงอัด
		size 3-7	size 5-5	size 7-3	
S32	2.5	22.62	20.52	20.04	✓
	5.0	20.80	20.14	20.21	✓
	7.5	21.71	21.34	22.41	✓
	10.0	24.12	24.30	24.99	✓
S44	2.5	24.05	21.43	22.77	✓
	5.0	23.26	27.53	20.39	✓
	7.5	22.78	24.71	22.54	✓
	10.0	24.40	24.56	25.90	✓

#### 4. อัตราการดูดกลืนน้ำ (Water absorption)

ผลการทดสอบอัตราการดูดกลืนน้ำจากการนำอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM แขน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ในกรณีของ S32 และ S44 ที่สัดส่วน 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีอัตราการดูดกลืนน้ำ เฉลี่ยที่ 0.39 g/cm<sup>3</sup> ซึ่งมีการดูดกลืนน้ำไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมซึ่งต้องมีค่าไม่เกิน 0.50 g/cm<sup>3</sup> พบว่าผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม ดังตาราง 4.3

ดังนั้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ที่สัดส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก.1505-2541 เนื่องจากมีความหนาแน่นเชิงปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.62-0.63 kg/dm<sup>2</sup> ค่ารับแรงดัดและอัตราการดูดกลืนน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนค่าการรับแรงอัดมีค่าสูงกว่าสัดส่วน 5.0 7.5 และ 10.0 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4.3 อัตราการดูดกลืนน้ำ

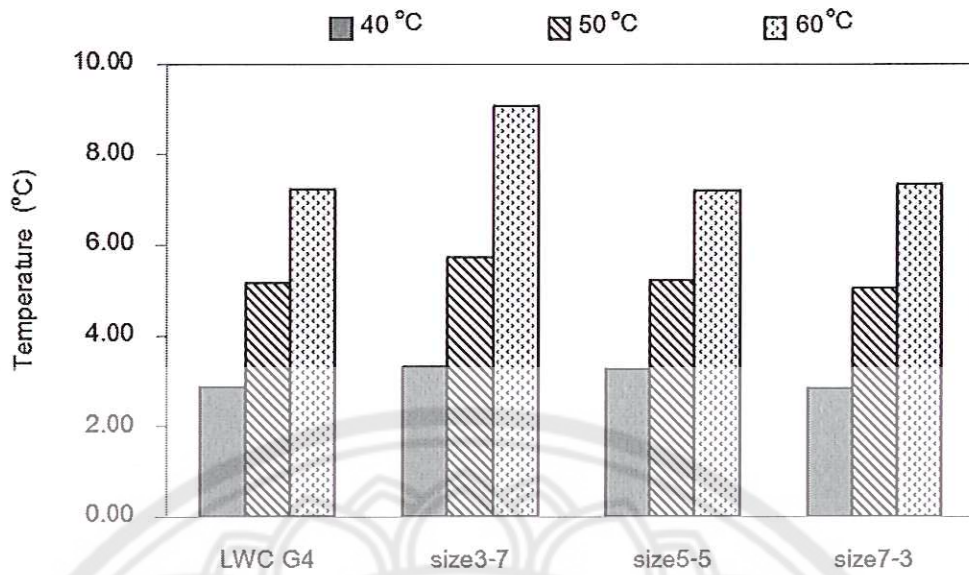
PCM	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%)	อัตราการดูดกลืนน้ำ			มาตรฐาน
		size 3-7	size 5-5	size 7-3	ไม่เกิน 0.50
S32	2.5	0.39	0.40	0.39	✓
	5.0	0.39	0.36	0.39	✓
	7.5	0.37	0.40	0.41	✓
	10.0	0.39	0.39	0.39	✓
S44	2.5	0.39	0.40	0.39	✓
	5.0	0.39	0.39	0.39	✓
	7.5	0.35	0.42	0.38	✓
	10.0	0.38	0.40	0.37	✓

#### 4.3 ผลทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

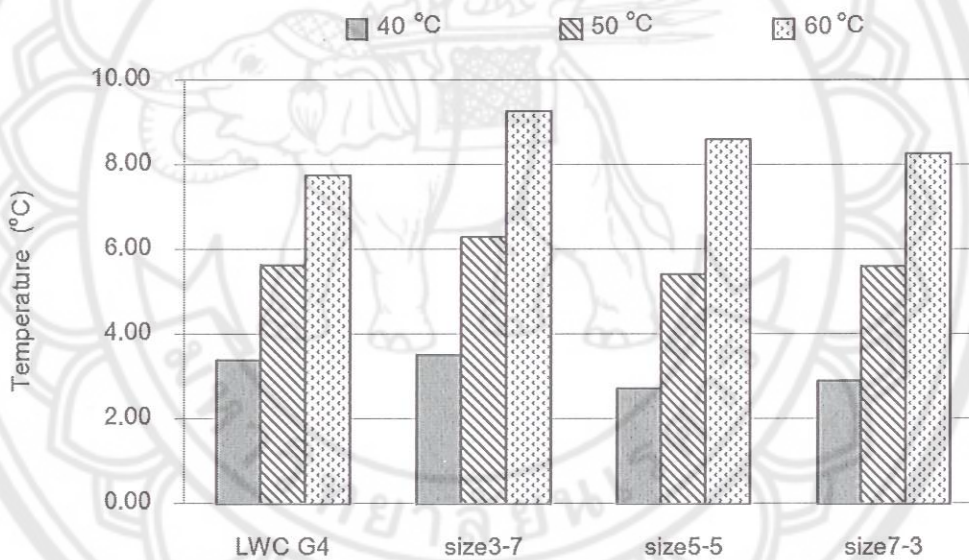
การทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM โดยใช้สารเปลี่ยนสถานะ 2 ชนิดคือ S32 และ S442 ในสัดส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) จำนวน 3 รูปแบบ คือ size 3-7 size 5-5 และ size 7-3 โดยทำการปรับความร้อนของชุดให้ความร้อนที่ผนังด้านนอกของอิฐที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาค่าการหน่วงความร้อนและหาตำแหน่งของ PCM ที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งานจริง ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

##### 1. ค่าความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิด S32

ผลการทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของสารเปลี่ยนสถานะชนิด S32 พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในสูงสุดคือ size 3-7 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่า 3.30 5.71 และ 9.06 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพ 4.5)



ภาพ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในของ S32



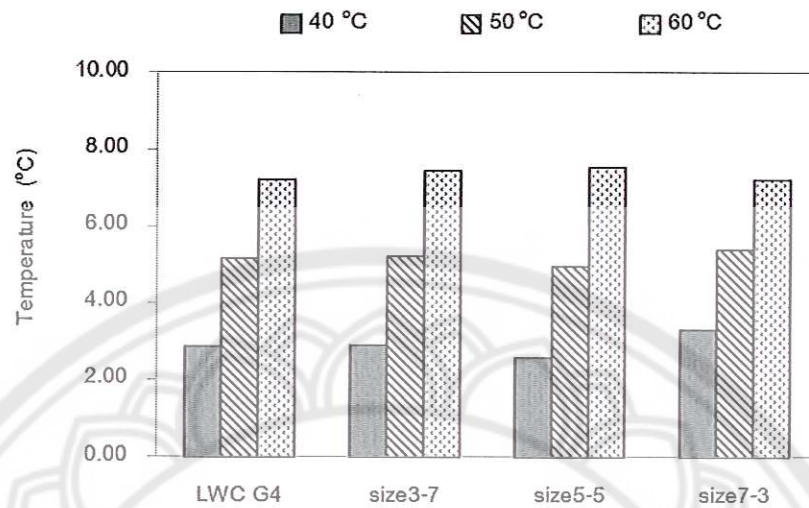
ภาพ 4.6 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องของ S32

จากภาพ 4.6 พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องสูงสุดคือ size 3-7 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่า 3.51 6.31 และ 9.28 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

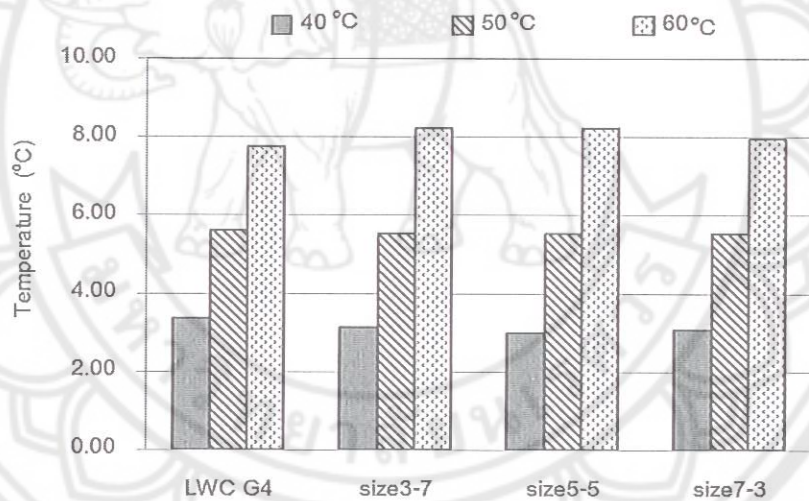
## 2. ค่าความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิด S44

ผลการทดสอบความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิด S44 พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในสูงสุดคือ size 7-3 ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส มีค่า 3.30 5.38 และ 7.23 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพ 4.7) ในขณะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิผนัง

ด้านนอกและภายในห้องสูงสุดคือ size 3-7 มีค่า 3.15 5.55 และ 8.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ภาพ 4.8)



ภาพ 4.7 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในของ S44

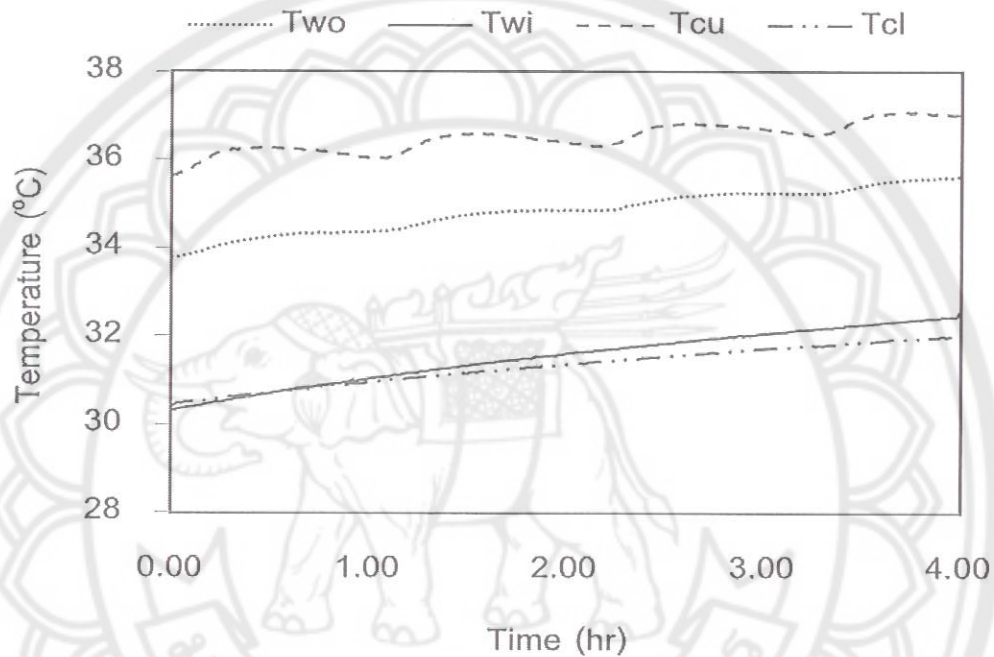


ภาพ 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องของ S44

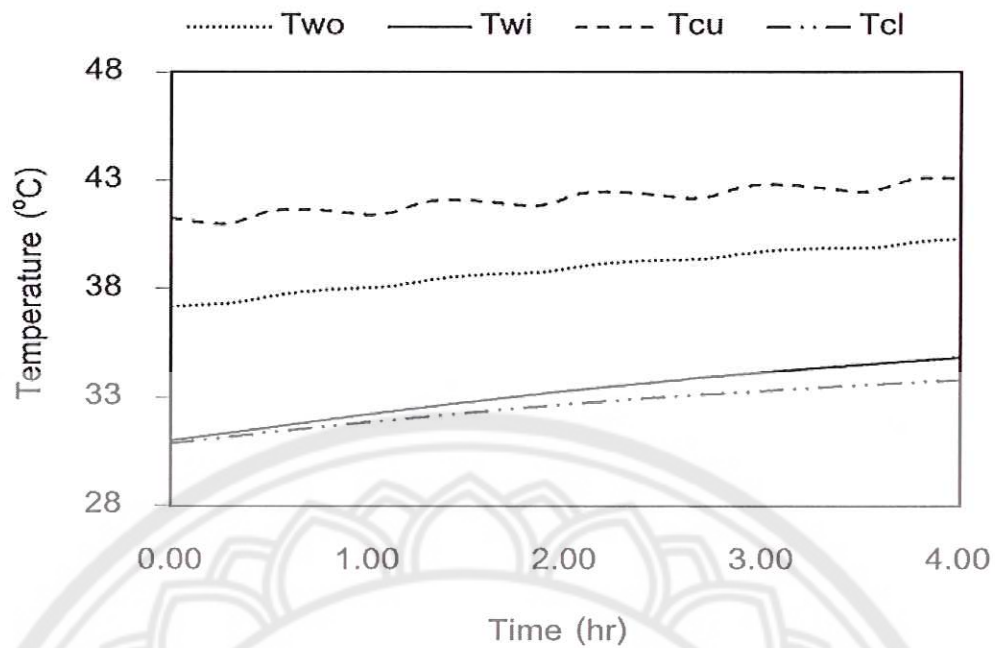
กล่าวโดยสรุปแล้ว การทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่า กรณี S32 size3-7 มีความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านใน และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องมากกว่า size 5-5 size 7-3 และมีค่ามากกว่า S44 ที่ขนาด size 3-7 size 5-5 และ size 7-3 ตามลำดับ เนื่องจากชั้นของปูนก่อผสมกับ PCM มีความหนาแน่นสูงกว่าชั้นของอิฐมวลเบา และอยู่ใกล้แหล่งความร้อนมากกว่าจึงทำหน้าที่ดูดซับความร้อนไว้ส่วนหนึ่ง และความร้อนส่วนที่เหลือถูกถ่ายเทเข้ามาในชั้นของอิฐมวลเบาที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านในเท่ากับ 7.0 เซนติเมตร ซึ่งช่วย



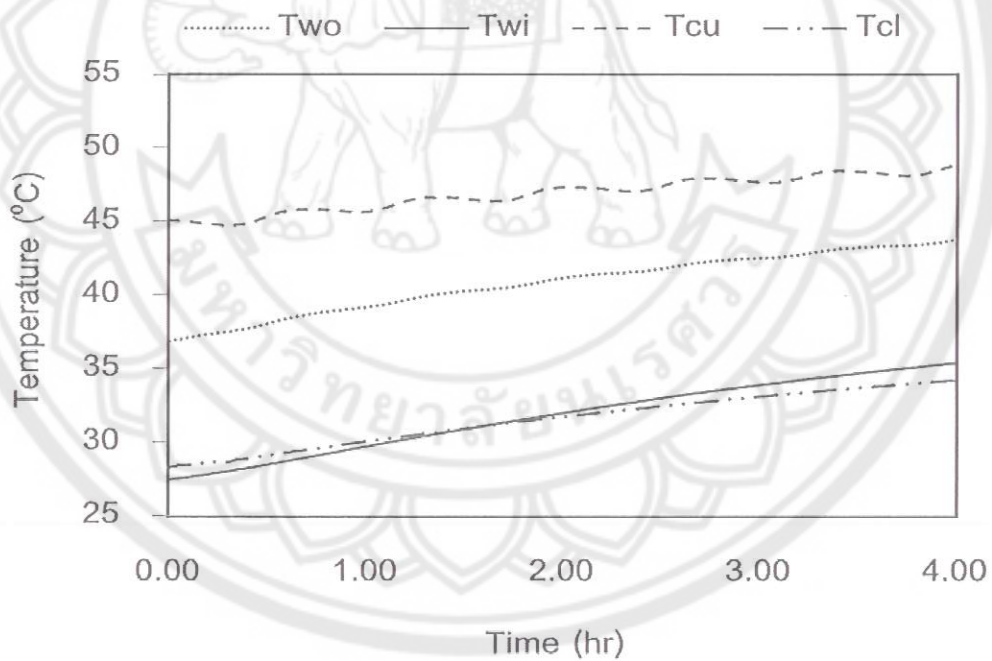
ป้องกันความร้อนได้มากกว่าตำแหน่งห่างจากผนังด้านใน 5.0 และ 3.0 เซนติเมตร (ภาพ 4.9 – 4.11) นอกจากนี้แล้ว เอกชัย บุญสุวรรณ (2549) อธิบายไว้ว่า การศึกษาการกระจายและการหน่วงความร้อนอิฐมวลเบาที่มีความหนา 10 เซนติเมตร และสร้างเป็นผนัง 3 ชั้นที่มีความหนาแน่นต่างๆ กัน พบว่า ค่าความหนาแน่นของอิฐมวลเบาแปรผันกับการหน่วงความร้อนที่เกิดขึ้น และการวางตำแหน่งความหนาแน่นของอิฐมวลเบา มีผลกับการหน่วงความร้อนที่เกิดขึ้น โดยอิฐมวลเบาความหนาแน่นสูงอยู่ตำแหน่งใกล้แหล่งความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในห้องทดลองต่ำกว่าห้องที่มีอิฐมวลเบาความหนาแน่นต่ำอยู่ตำแหน่งใกล้แหล่งความร้อน



ภาพ 4.9 การหน่วงความร้อนอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิด S32 ปรับความร้อนอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ของ size 3-7



ภาพ 4.10 การหน่วงความร้อนอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิดS32  
ปรับความร้อนอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ของ size 3-7



ภาพ 4.11 การหน่วงความร้อนอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ชนิดS32  
ปรับความร้อนอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ของ size 3-7

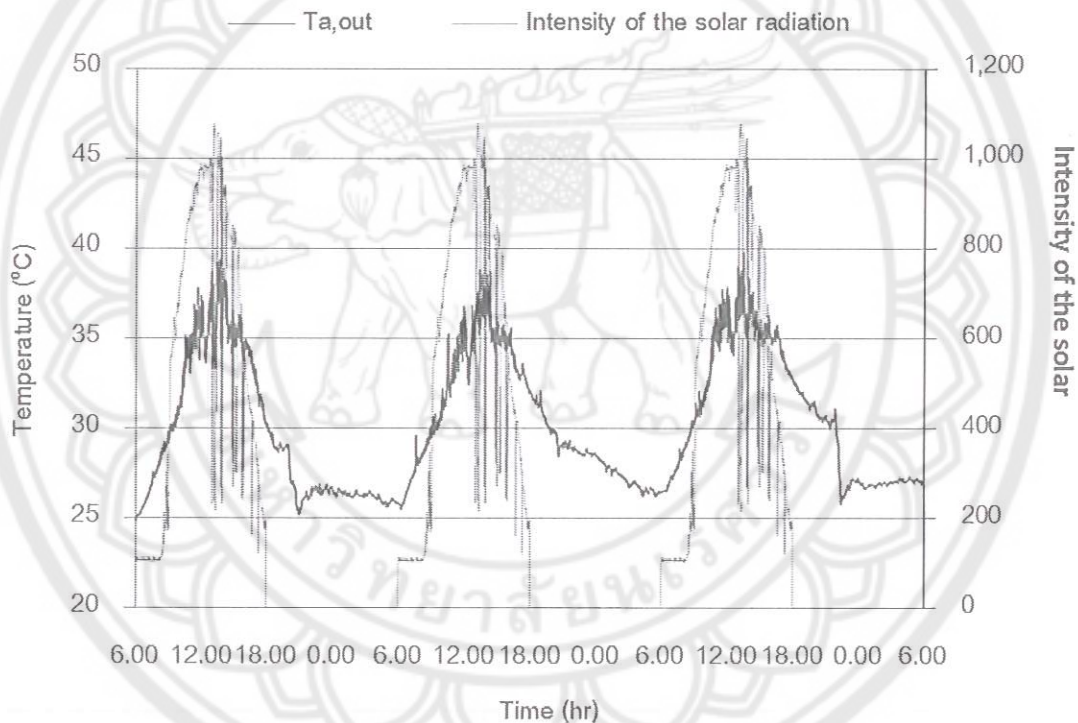
#### 4.4 ผลการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง

การทดสอบสภาวะการใช้งานจริงในบ้านทดสอบทั้งหมด 4 หลัง โดยผนังบ้านทดสอบสร้างด้วยอิฐมอญ (Brick) อิฐบล็อก (Cement block) อิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 (LWC G4) และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM (LWC+PCM) การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ฤดูร้อนและฤดูฝน (จำลองสเปรย์น้ำตอนกลางวัน 12 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 6.00–18.00 น.) ทำการทดสอบและเริ่มเก็บข้อมูล ตั้งแต่เวลา 6.00-6.00 น. ของวันถัดไป บันทึกข้อมูลทุกๆ 1 นาที ผลการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

##### 1. ผลการทดสอบฤดูร้อน

###### 1.1 สภาวะอากาศแวดล้อม

วันที่ทำการทดสอบคือ วันที่ 21-23 พ.ค. 2554 พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยตอนกลางวัน 1.08 เมตรต่อวินาที ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยตอนกลางวัน 537.89 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 30.26 องศาเซลเซียส



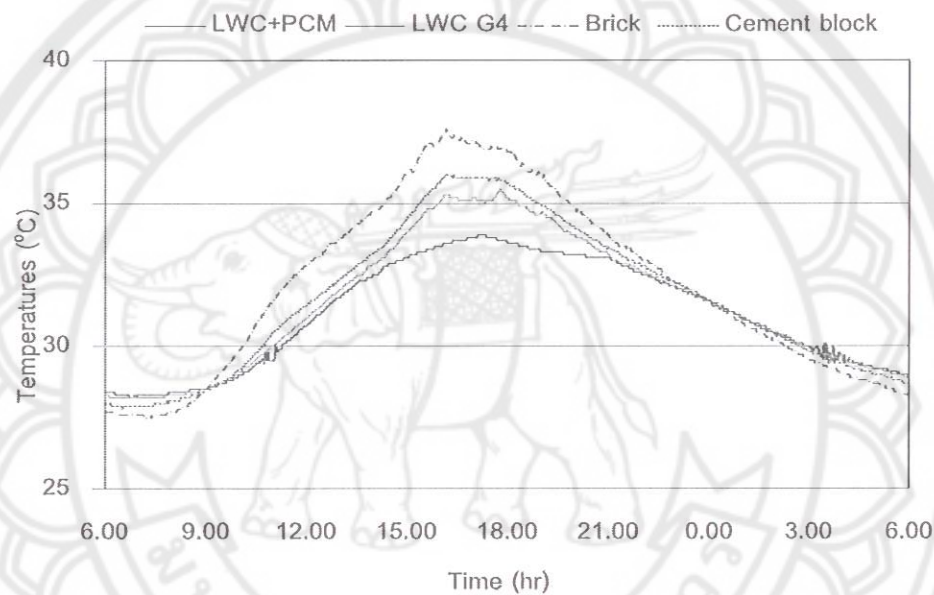
ภาพ 4.12 สภาวะอากาศแวดล้อม

สภาวะอากาศแวดล้อมในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. พบว่า เวลา 6.00 น. อุณหภูมิเริ่มต้น 25-26 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป เวลา 10.30 น.อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 34 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 10.30-16.00 น. อุณหภูมิจะมีค่าผันแปรขึ้นลงระหว่าง 34-40 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันอยู่ระหว่าง 38-40 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 16.00 น. อุณหภูมิมีค่าลดลง ส่วนสภาวะอากาศแวดล้อมในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ระหว่าง 25-27 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.12)

จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าผันแปรกับความเข้มแสงอาทิตย์ กล่าวคือช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงแล้วอุณหภูมิจึงแวดล้อมมีค่าลดลงตามไปด้วย

## 1.2 สภาวะอากาศภายในบ้าน

สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบช่วงกลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. พบว่า เวลา 6.00 น. อุณหภูมิเริ่มต้น 26-28 องศาเซลเซียส โดยบ้านทดสอบที่สร้างจากอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ ช่วงเวลา 9.30-17.30 น. สภาวะอากาศภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าเพิ่มขึ้น

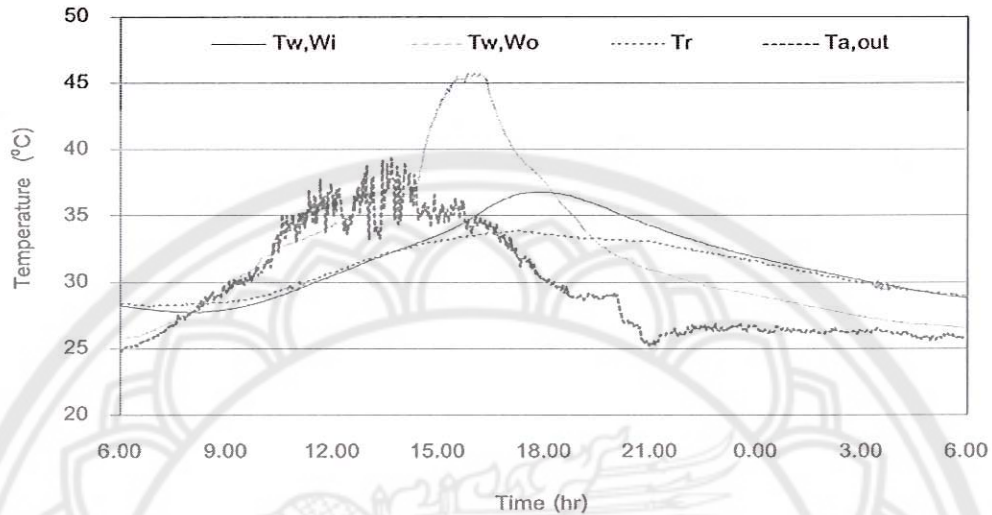


ภาพ 4.13 สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบ

จากการทดลอง พบว่า อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการดูดซับความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวบ้านทำให้อุณหภูมิสูงสุดในรอบวัน 33.5 ซึ่งต่ำกว่า อิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ คือ 35.5 36.0 และ 37.6 ตามลำดับ และในช่วงเวลา 17.30-6.00 น. สภาวะอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าลดลง ทำให้อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการคายความร้อนที่สะสมในตอนกลางวันออกในเวลากลางคืนสู่ทั้งสภาวะอากาศภายนอกและภายในเท่ากับปริมาณที่ดูดซับไว้ ส่งผลให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีค่าสูงกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ (ภาพ 4.13)

### 1.3 การสะสมและคายความร้อนของผนัง

การสะสมและคายความร้อนของผนังพิจารณาอุณหภูมิผนังด้านใน อุณหภูมิผนังด้านนอก และอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM อิฐมวลเบา อิฐบล็อก และ อิฐมอญ ดังนี้



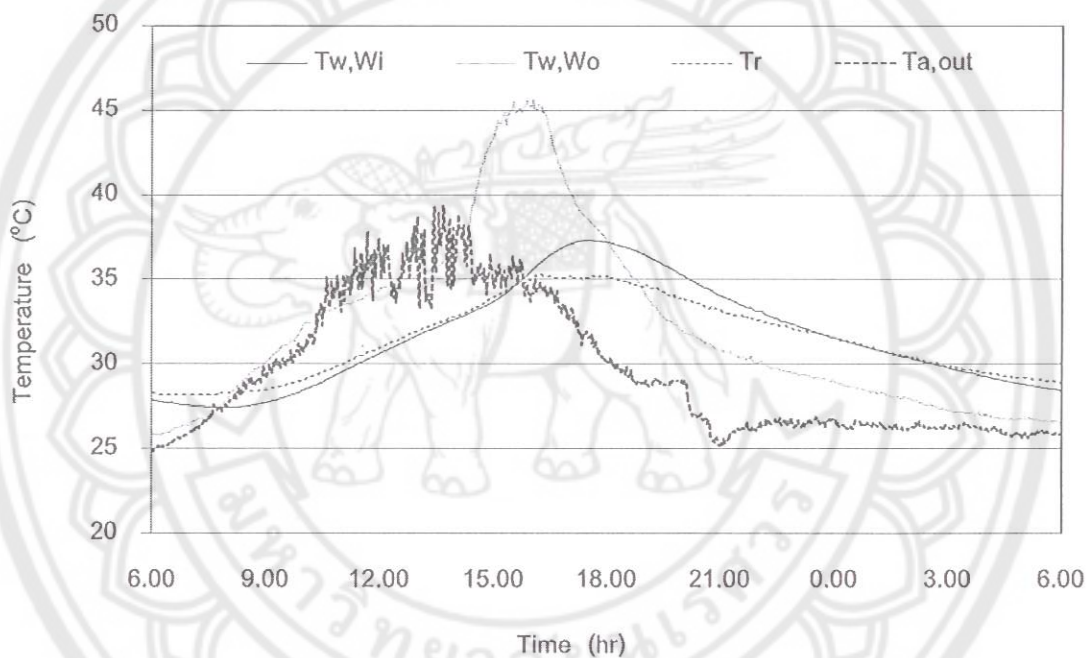
ภาพ 4.14 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

บ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่าในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 30.86 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 33.90 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.14 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 34.68 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.44 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 28.20 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.14)

จากการทดลอง พบว่า อิฐมอญมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ประมาณ 4-5 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการเก็บความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุอิฐที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลักเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี เป็นผลให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ซึ่งมีฟองอากาศที่เป็นโครงสร้างแบบปิด (closed cell) ในลักษณะของ Micro Pore ทำให้มีคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนได้ช้าและไม่เก็บความร้อน และมีการเพิ่มขึ้นของ PCM เข้าไป ทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปได้น้อยกว่าอิฐมอญ จากภาพ 4.13 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านใน หลังจากนั้นแล้วเวลา 14.00-24.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน เนื่องจากในช่วงเช้าอากาศภายนอกเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น PCM เริ่มมีการดูดซับความร้อนไว้ทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าลดลง และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมี

ค่าลดลงทำให้ PCM เริ่มมีการคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิภายในมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและผนังด้านนอก

ชลธิศ เอี่ยมวรวิมลกุล และวิทยา ยงเจริญ (2550) อธิบายว่า การดูดซับความร้อนของ PCM ขณะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ที่ผิวผนังด้านในอาคารให้ค่าอุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM ผสมอยู่ต่ำกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่ 08.00-19.00 น. และชะลอการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของผิวผนังภายในออกไปในช่วงบ่ายเป็นเวลาประมาณ 16.00 ถึง 19.00 และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส (ลดลงจาก 43 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มี PCM ผสม) อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวผนังที่มี PCM ผสมอยู่ มีค่าสูงกว่าผิวผนังที่ไม่มี PCM ตลอดช่วงเวลากลางคืน (19.00-9.00 น.) เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ PCM ดูดซับไว้ในช่วงกลางวันถูกคายออกขณะที่ PCM เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลับมาอยู่ในสภาพของแข็ง



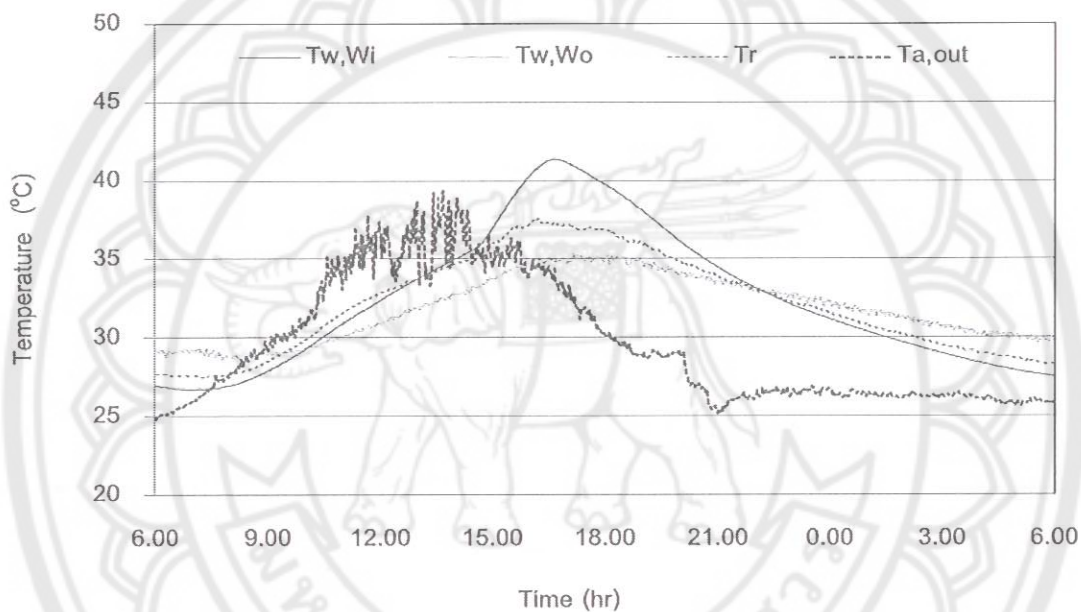
ภาพ 4.15 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบา

บ้านอิฐมวลเบา พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.31 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 35.50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.23 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 34.79 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.66 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 28.20 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.15)

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า อิฐมอญมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐมวลเบา ประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการเก็บความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุอิฐที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลักเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี เป็นผลให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐมวลเบา ที่มีฟองอากาศเป็นฉนวน

กันความร้อนทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปได้น้อยกว่าอิฐมวลเบา จากภาพ 4.14 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 8.00-16.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านใน หลังจากนั้นแล้วเวลา 16.00-22.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน เนื่องจากมีฟองอากาศเป็นฉนวนกันความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าลดลง และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลง และอุณหภูมิภายในและภายนอกมีค่าสูงกว่าภายนอก

กานต์ สุขสงญาติ และคณะ. (2550). อธิบายว่า อิฐมวลเบามีคุณสมบัติในการสะสมความร้อนและนำความร้อนหรือคายความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารได้ดีกว่าคอนกรีตมวลเบา และป้องกันความร้อนที่ไหลผ่านไหลผ่านผนังเข้าสู่ภายในบ้านจำลองมากกว่าผนังอิฐมวลเบาประมาณร้อยละ 52.2 และอุณหภูมิของอากาศภายในบ้านของผนังอิฐมวลเบาจะต่ำกว่าผนังอิฐมวลเบาในช่วงกลางวัน

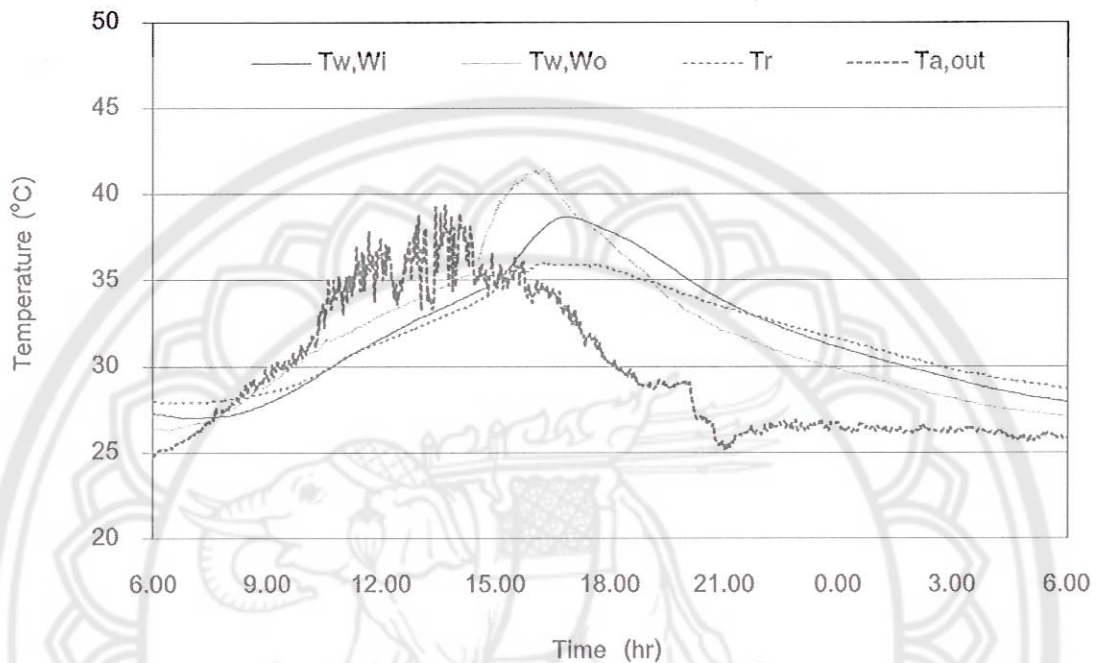


ภาพ 4.16 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบา

บ้านอิฐมวลเบา พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 32.43 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 37.60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 32.90 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.46 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.85 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 27.50 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.16)

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า อิฐมวลเบามีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบาประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการเก็บความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุอิฐที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลักเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี เป็นผลให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐมวลเบา ที่มีฟองอากาศเป็นฉนวนกันความร้อนทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปได้น้อยกว่าอิฐมวลเบา จากภาพ 4.16 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 6.00-

15.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านนอกเกือบเป็นเส้นเดียวกันและสูงกว่าอุณหภูมิผนังด้านนอก เนื่องจากอิฐมอญนำความร้อนได้ดีความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ภายในบ้านได้ดี หลังจากนั้นแล้วเวลา 15.00-22.00 น. อุณหภูมิผนังด้านนอกต่ำกว่าอุณหภูมิภายในบ้านและผนังด้านใน เนื่องจากความร้อนที่สะสมไว้ในช่วงเช้าถึงบ่ายที่มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้มีอุณหภูมิภายในเพิ่มสูงขึ้น และในช่วงเย็นอุณหภูมิภายนอกสูงกว่าภายในบ้านทดสอบและอุณหภูมิภายใน



ภาพ 4.17 อุณหภูมิของบ้านอิฐบล็อก

บ้านอิฐบล็อก พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.59 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 36.00 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.95 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 33.20 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.74 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 27.80 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.17)

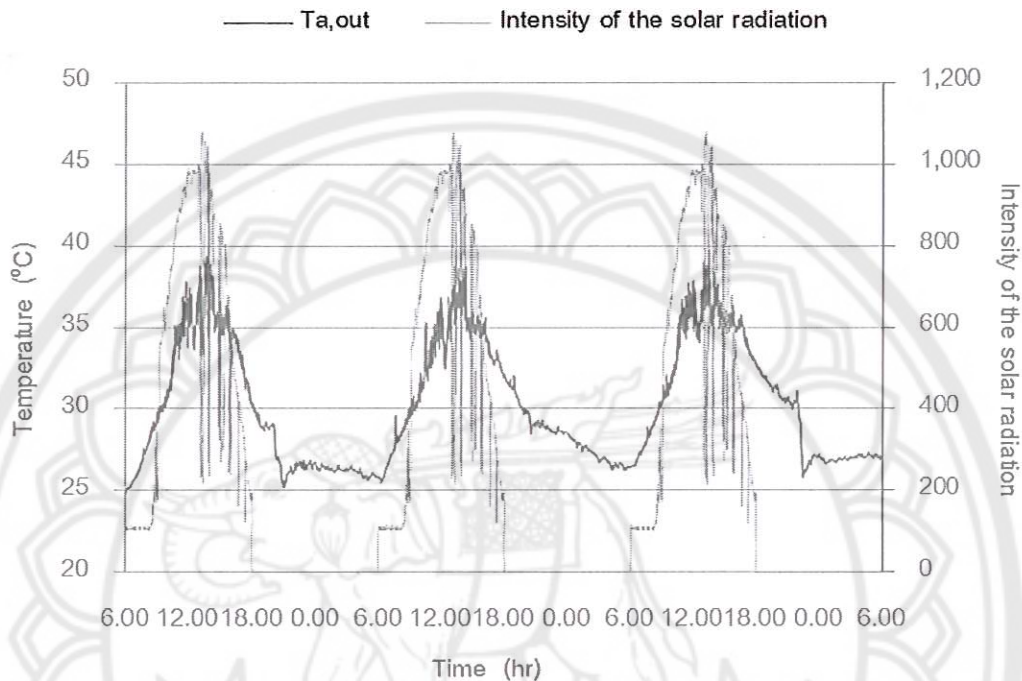
จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบพบว่า อิฐมอญมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐบล็อกประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากการเก็บความร้อนสะสมในเนื้อวัสดุอิฐที่มีดินเป็นองค์ประกอบหลักเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี เป็นผลให้ค่าการนำความร้อนสูงกว่าอิฐบล็อก จากภาพ 4.17 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 8.00-15.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านในเกือบเป็นเส้นเดียวกัน หลังจากนั้นแล้วเวลา 15.00-20.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน เนื่องจากอิฐบล็อกมีช่องว่างอากาศเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดีกว่าอิฐมอญ และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลง ช่องว่างอากาศของอิฐบล็อกเป็นฉนวนกันความเย็นทำให้อุณหภูมิภายในมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและสูงกว่าผนังด้านนอก ตามลำดับ



## 2. ผลการทดสอบฤดูฝน

### 2.1 สภาวะอากาศแวดล้อม

วันที่ทำการทดสอบคือ วันที่ 26-27-28 พ.ค.2554 พบว่า ความเร็วลมเฉลี่ยตอนกลางวัน 1.06 เมตรต่อวินาที ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยตอนกลางวัน 459.79 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 27.07 องศาเซลเซียส



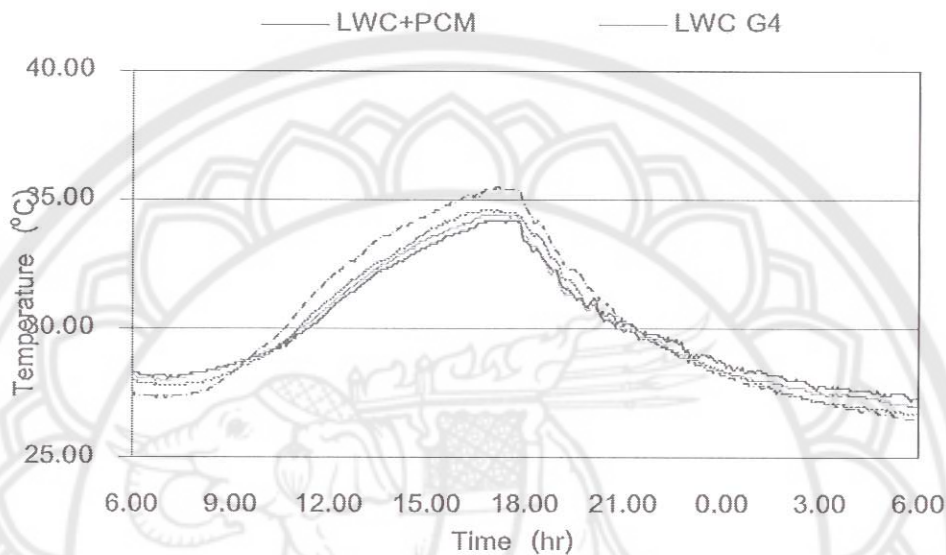
ภาพ 4.18 สภาวะอากาศแวดล้อมภายนอก

สภาวะอากาศสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. พบว่า เวลา 6.00 น. อุณหภูมิเริ่มต้น 24-26 องศาเซลเซียส ช่วงเวลา 8.00-15.00 น. อุณหภูมิมีค่าผันแปรขึ้นลงระหว่าง 34-37 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิสูงสุดในรอบวันประมาณ 37 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 15.00 น. อุณหภูมิมีค่าลดลง ส่วนสภาวะอากาศสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลากลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิมีค่าลดลง โดยอุณหภูมิต่ำสุดอยู่ระหว่าง 25-27 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.18)

จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมมีความผันแปรกับความเข้มแสงอาทิตย์ กล่าวคือช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. ความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์ลดลงแล้วอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าลดลงตามไปด้วย

## 2.2 สภาวะอากาศภายในบ้าน

สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบช่วงกลางวันตั้งแต่เวลา 6.00-18.00 น. พบว่า เวลา 6.00 น. อุณหภูมิเริ่มต้น 26-28 องศาเซลเซียส โดยบ้านทดสอบที่สร้างจากอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีอุณหภูมิต่ำกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ โดยสภาวะอากาศภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้ อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าเพิ่มขึ้น และในช่วงเวลา 20.00 น. บ้านทดสอบที่สร้างจากอิฐมวลเบาที่มี ส่วนประกอบของ PCM มีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ

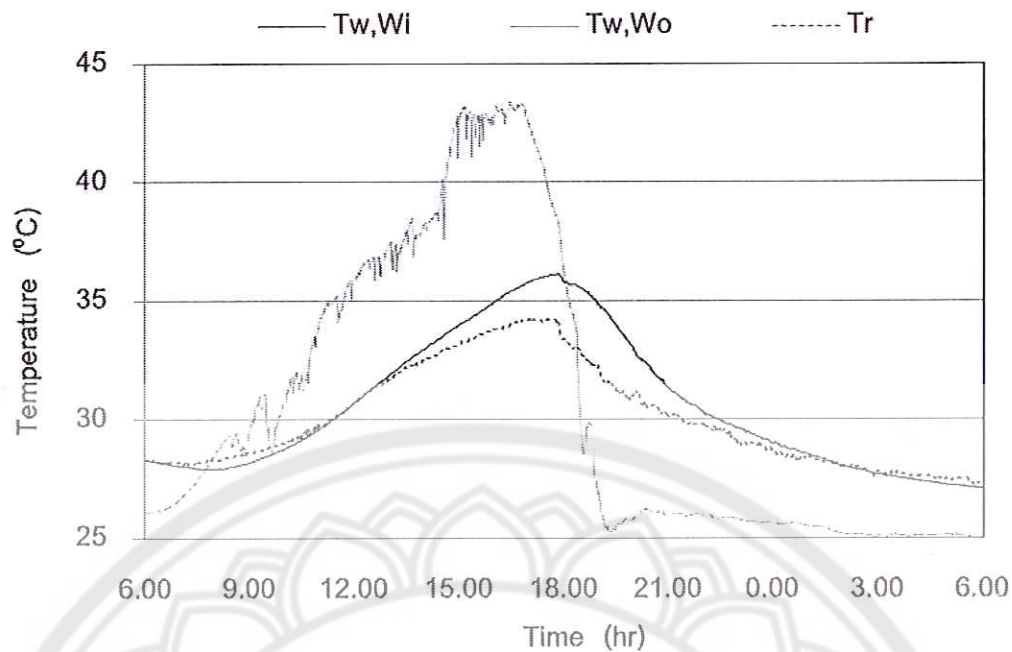


ภาพ 4.19 สภาวะอากาศภายในบ้านทดสอบ

จากการทดลอง พบว่า อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีอุณหภูมิต่ำกว่า อิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ และในช่วงเวลา 18.00-6.00 น. สภาวะอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้ อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าลดลง ทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีค่าใกล้เคียงกับอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ (ภาพ 4.19)

## 2.3 การสะสมและคายความร้อนของผนัง

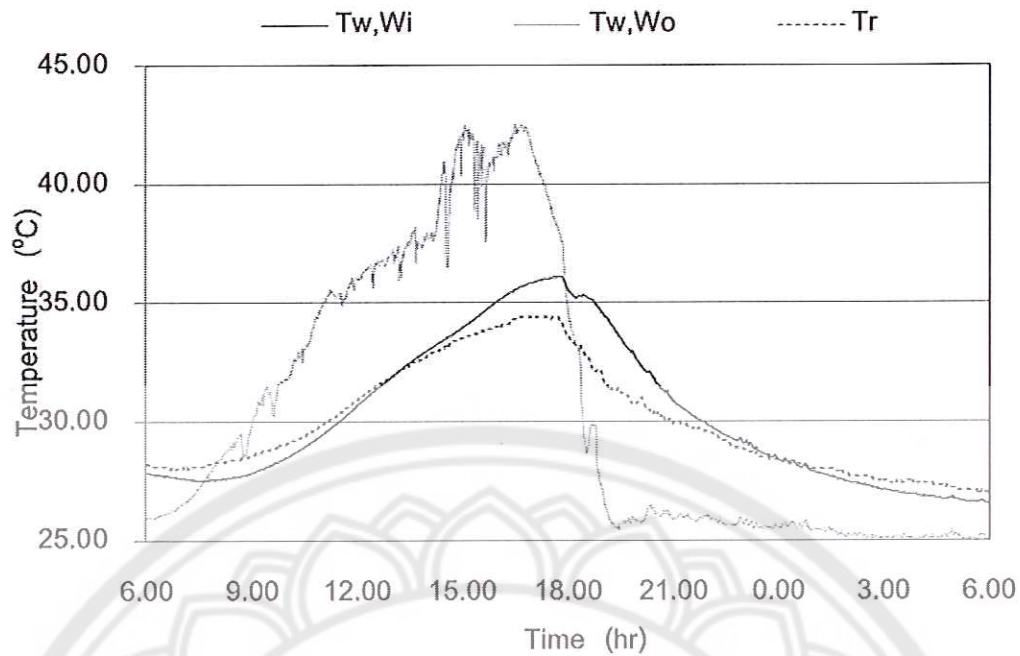
การสะสมและคายความร้อนของผนังพิจารณาอุณหภูมิผนังด้านใน อุณหภูมิผนังด้านนอก และอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM อิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ดังนี้



ภาพ 4.20 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

บ้านอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่าในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 30.92 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 34.20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.24 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 34.94 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 29.18 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 27.20 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.20)

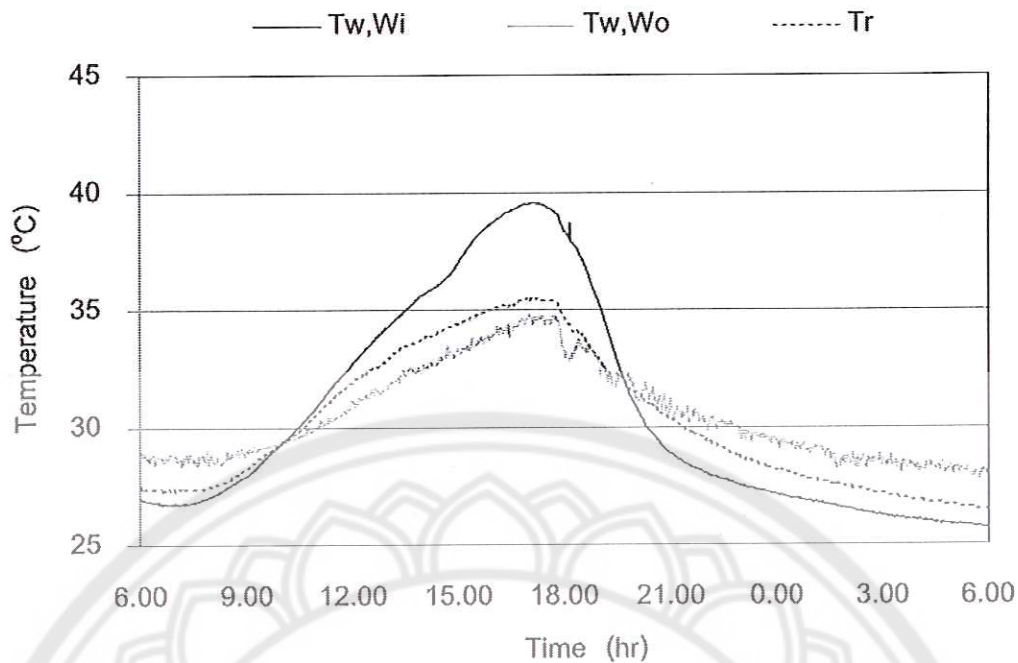
จากการทดลอง พบว่า อิฐมวลเบามีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส จากภาพ 4.20 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 6.00-14.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านในเกือบเป็นเส้นเดียวกันและต่ำกว่าอุณหภูมิผนังด้านนอก หลังจากนั้นแล้วเวลา 14.00-24.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและสูงกว่าผนังด้านนอก ความชื้นในบ้านทดสอบมีค่า 70.84 % และภายนอกมีค่า 73.58% แสดงให้เห็นว่าความชื้นอากาศแวดล้อมไม่มีผลต่อความชื้นภายในบ้านทดสอบ



ภาพ 4.21 อุณหภูมิของบ้านอิฐมวลเบา

บ้านอิฐมวลเบา พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.04 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 34.40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.10 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 34.77 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.04 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 27.00 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.21)

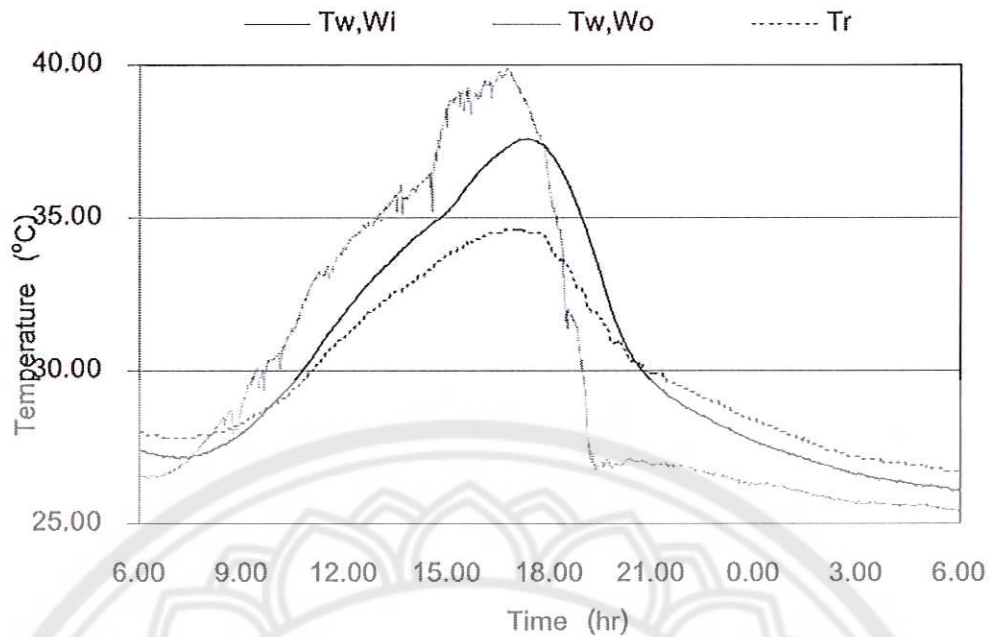
จากการทดลอง พบว่า อิฐมวลอณูมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบา ประมาณ 1 องศาเซลเซียส จากภาพ 4.21 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 6.00-14.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านในเกือบเป็นเส้นเดียวกันและต่ำกว่าอุณหภูมิผนังด้านนอก หลังจากนั้นแล้ว เวลา 14.00-24.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและสูงกว่าผนังด้านนอก ความชื้นในบ้านทดสอบมีค่า 72.57% และภายนอกมีค่า 73.58% แสดงให้เห็นว่าความชื้นอากาศแวดล้อมไม่มีผลต่อความชื้นภายในบ้านทดสอบ



ภาพ 4.22 อุณหภูมิของบ้านอิฐมอญ

บ้านอิฐมอญ พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.49 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 35.50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 32.74 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.19 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 28.98 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 26.50 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.22)

จากการทดลอง พบว่า อิฐมอญมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำกว่าอิฐมวลเบา ประมาณ 1 องศาเซลเซียส จากภาพ 4.22 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 6.00-10.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังด้านในเกือบเป็นเส้นเดียวกันและต่ำกว่าอุณหภูมิผนังด้านนอก หลังจากนั้นแล้ว เวลา 10.00-20.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและสูงกว่าผนังด้านนอก เนื่องจากอิฐมอญเนื้อภายในถูกอัดแน่นจากลักษณะเนื้อวัสดุดังกล่าว จึงจะสามารถนำความร้อนได้ดีและสะสมความร้อนหรือคายความร้อนเข้าสู่ตัวอาคาร ซึ่งมีผลทำให้ช่วงกลางวันมีอุณหภูมิภายในสูงกว่าภายนอกอาคาร ส่วนความชื้นภายในบ้านทดสอบมีค่า 67.39 % และภายนอกมีค่า 73.58%



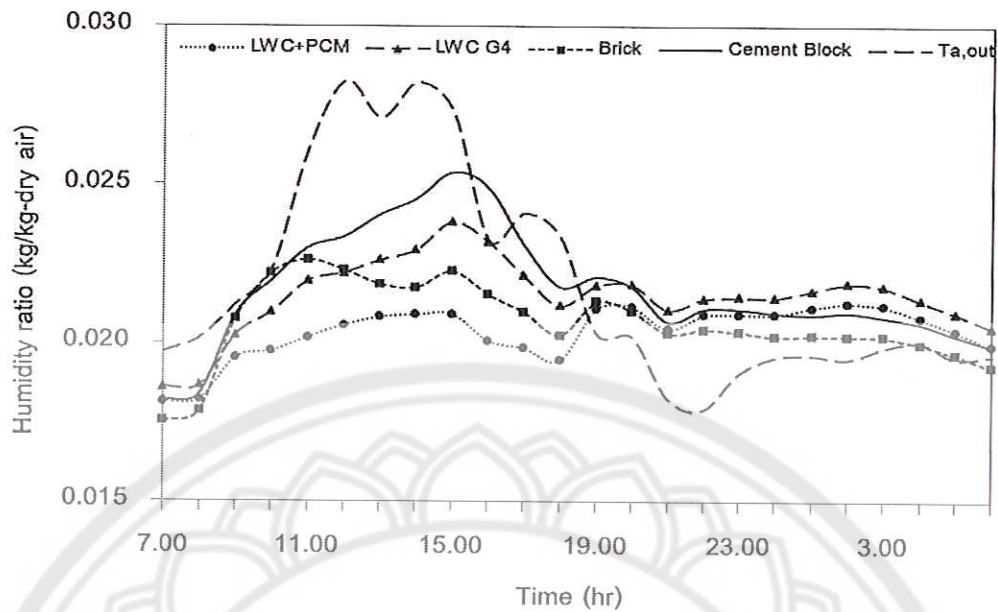
ภาพ 4.23 อุณหภูมิของบ้านอิฐบล็อก

บ้านอิฐบล็อก พบว่า ในช่วงเวลากลางวันตั้งแต่เวลา 06.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 31.08 องศาเซลเซียส สูงสุดคือ 34.60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผิวผนังด้านในทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 31.91 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวผนังด้านนอกทิศตะวันตกมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 33.34 องศาเซลเซียส ส่วนตอนกลางคืนตั้งแต่เวลา 18.00-06.00 น. พบว่าอุณหภูมิภายในบ้านทดสอบเฉลี่ยที่ 28.88 องศาเซลเซียส ต่ำสุดคือ 26.70 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.23)

จากการทดลอง พบว่า อิฐมวลเบาที่มีการนำความร้อนที่สูงกว่าอิฐมวลเบา ประมาณ 1 องศาเซลเซียส จากภาพ 4.23 จะเห็นว่าในช่วงเวลา 6.00-18.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบต่ำกว่าอุณหภูมิผนังด้านในและอุณหภูมิผนังด้านนอก หลังจากนั้นแล้วเวลา 10.00-20.00 น. อุณหภูมิภายในบ้านมีค่าต่ำกว่าผนังด้านใน และในช่วงเย็นอากาศภายนอกมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผนังด้านในและสูงกว่าผนังด้านนอก ความชื้นในบ้านทดสอบมีค่า 71.85 % และภายนอกมีค่า 73.58% แสดงให้เห็นว่าความชื้นอากาศแวดล้อมไม่มีผลต่อความชื้นภายในบ้านทดสอบ

#### 2.4 ความชื้นภายในบ้านทดสอบ

ในช่วงกลางวันพบว่าความชื้นสัมบูรณ์ภายในบ้านผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีค่าต่ำกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอากาศแวดล้อม ตามลำดับ ส่งผลให้บ้านผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศน้อยลงไปด้วย เนื่องจากความชื้นสะสมเป็นภาระทางความเย็นตัวหนึ่งของเครื่องปรับอากาศ ถ้าสามารถลดความชื้นในห้องพักอาศัยลงได้จะสามารถช่วยลดพลังงานของเครื่องปรับอากาศในการดึงความร้อนแฝงออกจากห้องพักอาศัยที่เกิดขึ้น เนื่องจากการสะสมความชื้นในอากาศ (พงศกร เกิดช่าง, 2549) ส่วนในช่วงเวลากลางคืนความชื้นสัมบูรณ์ของบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง และอากาศแวดล้อมมีค่าใกล้เคียงกัน (ภาพ 4.24)



ภาพ 4.24 ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศภายในบ้านและอากาศแวดล้อม

#### 4.5 ผลการออกแบบเชิงนิเวศวิทยา

เพื่อให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ครั้งนี้เป็นการปรับปรุงเชิงนิเวศน์เศรษฐกิจที่สมบูรณ์ ทั้งประเด็นสิ่งแวดล้อม เศรษฐศาสตร์ และวิศวกรรม การพัฒนาผลิตภัณฑ์จะต้องพัฒนาแบบสมดุล กล่าวคือทั้งสามประเด็นที่กล่าวมานั้นจะต้องถูกพิจารณาไปพร้อมๆกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาออกมาใหม่ ควรตอบสนองความต้องการในการพัฒนาทั้งสามด้าน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ การพัฒนาผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค QFDE ดังต่อไปนี้

1. สามารถลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมได้มากกว่าเดิม และอยู่ในระดับที่สามารถนำไปแข่งขันหรือนำเสนอเป็นประเด็นทางการตลาดเพิ่มเติมได้

2. การใช้งานผลิตภัณฑ์นั้นต้องสามารถทำหน้าที่หลัก (Main Function) ของตัวมันเองได้อย่างเต็มประสิทธิภาพวิศวกรรม

3. ผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องสามารถนำไปผลิต จำหน่าย สร้างผลกำไรให้องค์กรได้คุ้มค่าการลงทุน เพื่อให้สามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้ามากที่สุด การศึกษานี้จะมีการประยุกต์ใช้เทคนิค Quality Function Deployment for Environmental (QFDE) เพื่อค้นหาส่วนประกอบสำคัญในการปรับปรุงเชิงนิเวศเศรษฐกิจที่จะสามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งทางด้าน สิ่งแวดล้อมและหน้าที่การทำงานของผลิตภัณฑ์ โดยที่การสำรวจความต้องการของลูกค้า (Voice of Customer) ที่มีผลต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบา ประเภท G4 มีดังต่อไปนี้

1. ช่วยในการประหยัดพลังงาน (Energy saving)
2. ง่ายในการขนส่ง (Easy to transport)
3. ใช้งานได้สะดวกขึ้น (Easy construction)

4. ใช้วัตถุดิบในการผลิตน้อยลง (Less material use)
5. ความแข็งแรงทนทานสูง (High durability)
6. การใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (Environmentally safe)
7. ไม่ใช้สารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม (Free of hazardous substances)

3.1 การเปลี่ยนเสียงเรียกร้องของลูกค้า (VOC) และเสียงเรียกร้องทางด้านสิ่งแวดล้อม ให้เป็นคุณลักษณะทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Parameters)

ขั้นที่ 1 รวบรวมข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าและเสียงเรียกร้องทางด้านสิ่งแวดล้อม

ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าที่มีต่อผลิตภัณฑ์โดยฝ่ายการตลาด ทั้งข้อมูลที่เป็นความต้องการและข้อเสนอแนะ หรือความคิดที่มีต่อผลิตภัณฑ์ สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบา ส่วนนี้ได้แก่ ช่วยในการประหยัดพลังงาน ง่ายในการขนส่ง ใช้งานได้สะดวกขึ้น ใช้งานได้สะดวกขึ้น เป็นต้น ส่วนข้อมูลเสียงเรียกร้องด้านสิ่งแวดล้อมนั้นเป็นข้อมูลความต้องการที่จะให้ผลิตภัณฑ์มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยลง เช่น ใช้วัตถุดิบในการผลิตน้อยลง การใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด และ ไม่ใช้สารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ขั้นที่ 2 การกำหนดให้คะแนนความสำคัญของข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าและเสียงเรียกร้องด้านสิ่งแวดล้อม

ส่วนนี้เป็นการระบุความสำคัญสัมพัทธ์ของข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมขั้นต้น โดยการกำหนดคะแนนความสำคัญของข้อมูลเสียงเรียกร้องของลูกค้าและเสียงเรียกร้องทางด้านสิ่งแวดล้อมในแต่ละเรื่อง

ตาราง 4.4 Weighting of Environmental Stakeholder Requirements

Stakeholder's environmental requirements	Product (อิฐมวลเบา)	
	Weight	Justification for the product's weight
Environmentally safe	2	No Emission during use and manufacturing expected
Free of hazardous substance	1	Important
Less material usage	4	Important - due to resource depletion and energy consumption
Easy construction	5	Very Important - save construction cost
High durability	3	Important - Long life construction material
Easy to transportation	6	Very Important - Save transportation cost
Energy saving	7	Very Important - Save electricity cost for home owner



### ขั้นที่ 3 ระบุข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิค (Technical characteristics)

ขั้นตอนนี้เป็นการรวบรวมคุณลักษณะทางเทคนิคของผลิตภัณฑ์ โดยคุณลักษณะทางเทคนิคที่สนใจได้แก่ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (Density) คุณสมบัติการนำพาความร้อน (Thermal conductivity) อายุการใช้งาน (Life Time) วัสดุที่ใช้ (Material used) ความยืดหยุ่นตัวของผลิตภัณฑ์ (Flexibility) เป็นต้น

### ขั้นที่ 4 กำหนดระดับความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเสียงของลูกค้าและคุณลักษณะด้านเทคนิค

ในขั้นตอนนี้เป็นการให้คะแนนระดับความสัมพันธ์ระหว่าง เสียงของลูกค้าและคุณลักษณะด้านเทคนิคที่ได้ระบุในขั้นตอนที่ 1 และ 2 สำหรับการให้คะแนนนั้นจะมีตั้งแต่หนึ่งถึงมาก (1-10) หากไม่มีความสัมพันธ์จะให้คะแนนเท่ากับ 0 หรือเว้นว่างเอาไว้

### ขั้นที่ 5 คำนวณคะแนนความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทางเทคนิค

ขั้นตอนนี้เริ่มโดยการคำนวณหาคะแนนรวมของคุณลักษณะทางเทคนิคแต่ละอย่างซึ่งเท่ากับ ผลรวมของผลคูณระหว่าง คุณลักษณะทางเทคนิคที่สนใจกับข้อมูลเสียงของลูกค้า เช่น คะแนนรวมคุณลักษณะทางเทคนิคเรื่อง วัสดุที่ใช้ (Material used) เท่ากับ  $(1 \times 7) + (2 \times 7) + (3 \times 5) + (4 \times 6) + (7 \times 7) = 109$  เป็นต้น จากนั้นจึงคำนวณค่าคะแนนรวมของคุณลักษณะทางเทคนิคทั้งหมด เพื่อนำมาหารเป็นอัตราส่วนความสำคัญสัมพันธ์สัมพันธ์ของคุณลักษณะทางเทคนิคที่สนใจแต่ละปัจจัยต่อไป

ตาราง 4.5 EQFD -Translation of VOC and VOE into Environmental Parameters

Technical characteristics →	Customer Importance	Density	Thermal Conductivity	Lifetime	Material used	Flexibility	Total
VOC and VOE ↓							
Environmentally safe	2				7		
Free of hazardous substance	1				7		
Less material usage	4				6		
Easy construction	5					6	
High durability	3			7	5		
Easy to transportation	6						
Energy saving	7	7	7		7		
Total		49	49	21	109	30	258
Relative importance (%)		18.992	18.992	8.140	42.248	11.628	

หลังการพิจารณาด้วย QFDE แล้วพบว่าประเด็นของ การช่วยให้อาคารที่ก่อสร้างด้วยอิฐมวลเบา ประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับอากาศ เป็นประเด็นที่สำคัญที่สุด รองลงมาเป็นเรื่องการลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งอิฐ ความง่ายเมื่อใช้ในการก่อสร้าง การใช้วัตถุดิบในการผลิตน้อยลง มีความทนทานสูง การใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด และไม่ใช้สารอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาคะแนน Technical characteristics แล้วพบว่า ประเด็นวัตถุดิบที่นำมาใช้เป็น ส่วนผสมในการผลิตควรมีการปรับปรุงมากที่สุด

Method	Identified environmental parameters	Matching Eco Design improvement strategies
Environmental Quality Function Deployment (EQFD)	Material Used	Selecting right materials to reduce energy consumption at use stage

จากการระดมสมองเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์จาก QFDE พบว่า แนวทางในการปรับปรุงผลิตภัณฑ์อิฐมวลเบาให้สามารถตอบสนองเสียงเรียกร้องของลูกค้า แนวทางหนึ่งก็คือ การเพิ่มชั้นสาร Phase Change Material (PCM) เข้าไปในอิฐ ซึ่งชั้นสาร PCM นี้จะมีคุณสมบัติเปลี่ยนสถานะได้เมื่ออุณหภูมิมีการ

เปลี่ยนแปลงจึงสามารถหน่วงความร้อนที่จะผ่านผนังอิฐเข้าไปในอาคารซึ่งมีผลให้ลดความร้อนจากภายนอกที่จะเข้าสู่อาคารจึงช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศได้

ตาราง 4.6 Eco design strategies, measures and tasks

Improvement strategies	Eco design measures	Eco design tasks
การปรับปรุงวัตถุดิบในการผลิต	ปรับปรุงหรือเพิ่มวัสดุที่ช่วยลดความร้อนเข้าสู่อาคาร	เพิ่มชั้นสาร Phase Change Material (PCM) เข้าไปในอิฐ
	ปรับปรุงหรือเพิ่มวัสดุที่ช่วยเพิ่ม Flexibility	
	เลือกวัสดุที่ปราศจากสารที่เป็นพิษ	

ตาราง 4.7 Function analysis

Eco design Tasks	Additional function needed	Existing function to improve
เพิ่มชั้นสาร Phase Change Material (PCM) เข้าไปในอิฐ		คุณสมบัติการหน่วงความร้อน

#### 4.6 การประเมินผลการปรับปรุงผลิตภัณฑ์

หลังจากที่พัฒนาผลิตภัณฑ์แล้วได้ทำการปรับปรุงอิฐมวลเบา โดยการเพิ่มชั้นสาร Phase Change Material (PCM) เข้าไปในอิฐ และนำมาทดสอบคุณสมบัติการลดความร้อน โดยการนำไปสร้างเป็นแบบต้นแบบ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลการลดอุณหภูมิจากภายนอก ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่ามีค่าลดลง ดังนี้ ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านในพบว่า การลดลงของอุณหภูมิมีค่า 15.16, 10.95 และ 25.37 % ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ดังแสดงในตาราง 4.8 และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้อง พบว่า การลดลงของอุณหภูมิมีค่า 3.60, 5.20 และ 19.53 % ที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60°C ดังแสดงในตาราง 4.9

ตาราง 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านใน

อุณหภูมิ (°C)	ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านใน (°C)		การลดลงของอุณหภูมิ <sup>1</sup> (°C)		การลดลงของอุณหภูมิ <sup>1</sup> (%)	
	อิฐมวลเบา	อิฐมวลเบา+PCM	อิฐมวลเบา	อิฐมวลเบา+PCM	อิฐมวลเบา	อิฐมวลเบา+PCM
40	2.87	3.30	0	0.43	-	15.16
50	5.15	5.71	0	0.56	-	10.95
60	7.23	9.06	0	1.83	-	25.37

<sup>1</sup>อ้างอิงจากอิฐมวลเบาที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C

ตาราง 4.9 ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้อง

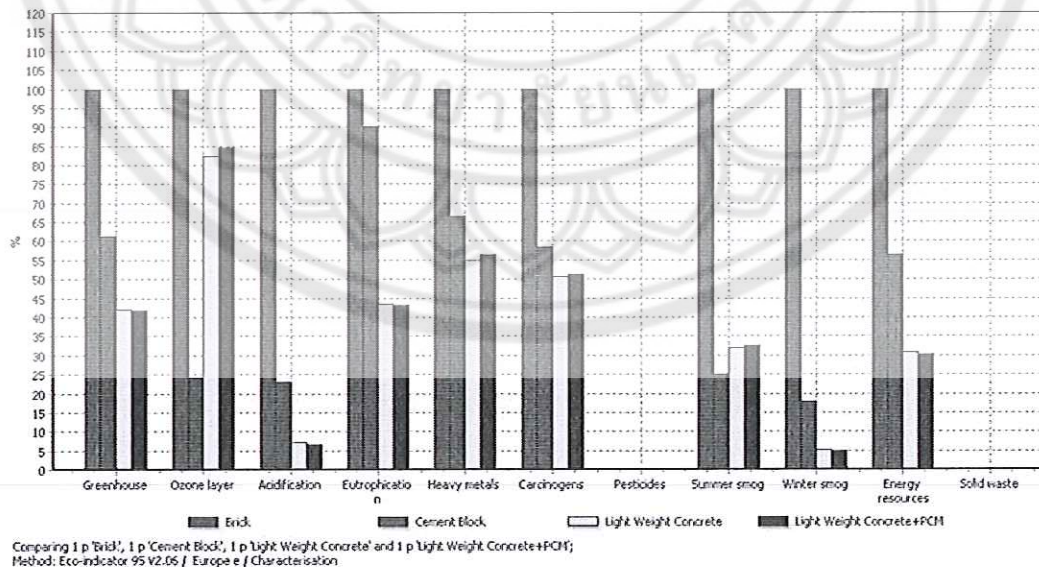
อุณหภูมิ (°C)	ความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและ ภายในห้อง (°C)		การลดลงของอุณหภูมิ <sup>1</sup> (°C)		การลดลงของอุณหภูมิ <sup>1</sup> (%)	
	อิฐมวลเบา	อิฐมวลเบา+PCM	อิฐมวล เบา	อิฐมวลเบา+ PCM	อิฐมวล เบา	อิฐมวลเบา+ PCM
40	3.39	3.51	0	0.12	-	3.60
50	6.00	6.31	0	0.31	-	5.20
60	7.76	9.28	0	1.52	-	19.53

<sup>1</sup>อ้างอิงจากอิฐมวลเบาที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 °C

#### 4.7 ผลการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของบ้านที่ก่อสร้างจากผนังอิฐบล็อก อิฐมอยู อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM นำข้อมูลที่ได้มาประเมินผลกระทบต่อตัวจักรชีวิตด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.2 ด้วยวิธี Eco-indicator 95 ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับ และประเมินถึงกลุ่มเป้าหมายที่ได้รับผลกระทบทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการลดลงของทรัพยากร โดยผลการประเมินแสดงออกเป็นลักษณะดังนี้

การประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของงานวิจัยฉบับนี้ในขั้นตอนแรกจะทำการจำแนกผลกระทบของการก่อสร้างบ้านพักอาศัยโดยพิจารณาเฉพาะผนังอิฐบล็อก อิฐมอยู อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ซึ่งมีพื้นที่ผนัง 400 ตารางเมตรและการใช้งานในบ้านพักอาศัย



ภาพ 4.25 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization)

ภาพ 4.25 พบว่า ผนังบ้านทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ มากที่สุดเกือบทุกด้าน ได้แก่ อิฐมอญ (Brick) รองลงมาคือ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือ การก่อให้เกิดภาวะฝนกรด และการเกิดหมอกควันฤดูหนาว ส่วนการใช้พลังงานที่ส่งผลกระทบมากที่สุด ได้แก่ อิฐมอญ รองลงมาคือ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM ตามลำดับ โดยตาราง 4.10 แสดงค่าผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization)

ตาราง 4.10 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization)

Impact category	Unit	LWC+PCM	LWC G4	Cement Block	Brick
Greenhouse	kg	18,826.4445	18,966.8822	27,737.9888	45,211.6875
Ozone layer	kg	0.0009	0.0009	0.0003	0.0011
Acidification	kg	61.2034	65.2871	208.2235	909.5416
Eutrophication	kg	5.1017	5.1562	10.6770	11.8529
Heavy metals	kg	0.0865	0.0839	0.1019	0.1530
Carcinogens	kg	0.0005	0.0005	0.0006	0.0011
Pesticides	kg	0	0	0	0
Summer smog	kg	2.1241	2.0874	1.6293	6.5084
Winter smog	kg	40.6069	43.9523	151.3696	850.2729
Energy resources	MJ	178,922.3097	183,049.9525	334,430.9891	591,790.9058
Solid waste	kg	0	0	0	0

จากตาราง 4.10 แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Characterization) ซึ่งค่าของผลกระทบในแต่ละประเภทสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse) พบว่า อิฐมอญมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด รองลงมาคือ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM ตามลำดับ
2. การทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศ (Ozone layer) พบว่า อิฐมอญมีการทำลายชั้นโอโซนในบรรยากาศมากที่สุด รองลงมาคือ อิฐมวลเบา อิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM และอิฐบล็อก ตามลำดับ
3. การก่อให้เกิดภาวะฝนกรด (Acidification) พบว่า อิฐมอญมีการก่อให้เกิดภาวะฝนกรดมากที่สุด รองลงมาคือ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM ตามลำดับ

4. การก่อให้เกิดภาวะพิษน้ำเติบโตผิดปกติ (Eutrophication) พบว่า อีฐมอญมีการก่อให้เกิดภาวะพิษน้ำเติบโตผิดปกติมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐบล็อก อีฐมวลเบา และอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามลำดับ

5. การปนเปื้อนของโลหะหนัก (Heavy metals) พบว่า อีฐมอญมีการปนเปื้อนของโลหะหนักมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐบล็อก อีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM และอีฐมวลเบา ตามลำดับ

6. การเกิดสารก่อมะเร็ง (Carcinogens) พบว่า อีฐมอญมีการเกิดสารก่อมะเร็งมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐบล็อก อีฐมวลเบา และอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามลำดับ

7. การปล่อยสารกำจัดศัตรูพืช (Pesticides) พบว่า ไม่มีการปล่อยสารกำจัดศัตรูพืช

8. การเกิดหมอกควันฤดูหนาว (Winter smog) พบว่า อีฐมอญมีการเกิดหมอกควันฤดูหนาวมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐบล็อก อีฐมวลเบา และอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามลำดับ

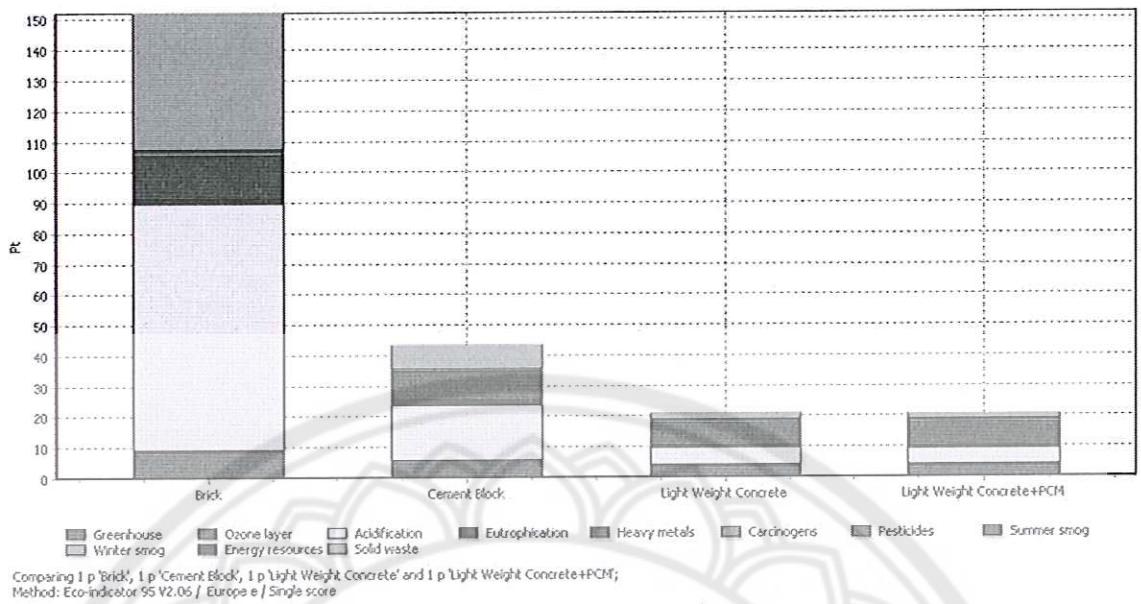
9. การปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Summer smog) พบว่า อีฐมอญมีการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM อีฐมวลเบา และอีฐบล็อก ตามลำดับ

10. การใช้พลังงาน (Energy resources) พบว่า อีฐมอญมีการใช้พลังงานมากที่สุด รองลงมาคือ อีฐบล็อก อีฐมวลเบา และอีฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ตามลำดับ

11. การเกิดกากของเสีย (Solid waste) พบว่า ไม่มีการเกิดกากของเสีย

จากขั้นตอนการจำแนกกลุ่มผลกระทบและการกำหนดบทบาท (Characterization) ลำดับต่อมา จะทำการให้ค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) เพื่อทำการแบ่งลำดับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของ ชี้นงานของบ้านทดสอบทั้ง 4 หลังเพื่อที่จะสามารถทำให้เห็นถึงระดับของผลกระทบในบ้านแต่ละหลังได้

คะแนนเชิงเดี่ยว (Single Score) เป็นการแสดงค่าคะแนนเชิงเดี่ยวของแต่ละกระบวนการหรือ วัตถุประสงค์ เพื่อพิจารณาว่ากระบวนการใดหรือวัตถุประสงค์ใดมีค่าคะแนนเชิงเดี่ยวทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ทั้งผลกระทบแบบกลุ่มเป้าหมายหรือแสดงผลกระทบแบบแยกประเภท ซึ่งค่าคะแนนเชิงเดี่ยวจะแสดงเป็นหน่วย Pt (Person for target year) ซึ่งหน่วย Pt เกิดจากกระบวนการหาขนาดของผลกระทบที่ต้องการจะรวมค่าในกลุ่มผลกระทบต่างๆ ที่มีหน่วยต่างกัน โดยการหาด้วยค่ากลาง ดังนั้น หน่วย Pt จะหมายถึงการแสดงจำนวนเท่าของค่ากลาง โดยที่จะสามารถรู้ว่ามีค่ามากหรือน้อยจะต้องทำการเปรียบเทียบกับค่ากลางหรือใช้ในการเปรียบเทียบกับค่า Pt ด้วยกัน



ภาพ 4.26 คะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) ของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง

ภาพ 4.26 เมื่อพิจารณาค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) พบว่า อิฐมอญก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ 152.12311 Pt โดยก่อให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อม (Ecosystem Quality) มากที่สุดคือ 63.37% และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (Human Health) 36.63% รองลงมาคือ อิฐบล็อก 43.42592 Pt ก่อให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อม 67.40% และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ 32.60% อิฐมวลเบา 21.03892 Pt ก่อให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อม 67.46% และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ 32.54% และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM 20.71922 Pt ก่อให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อม 67.88% และผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ 32.12% ตามลำดับ สำหรับตาราง 4.11 เป็นการแสดงค่าคะแนนเชิงเดี่ยวของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง

ตาราง 4.11 ค่าคะแนนเชิงเดียวของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง (Single score)

Damage category	Unit	LWC+PCM		LWC G4		Cement Block		Brick	
		Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
Total	Pt	20.71922	100	21.03892	100	43.42592	100	152.1231	100
Human Health	Pt	6.65413	32.12	6.84545	32.54	14.15844	32.6	55.72252	36.63
Ecosystem Quality	Pt	14.06509	67.88	14.19348	67.46	29.26748	67.4	96.40058	63.37
Resources	Pt	0	0	0	0	0	0	0	0



ตาราง 4.12 ค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) แบบแยกประเภทของผังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง

Impact category	Unit	LWC+PCM	LWC G4	Cement Block	Brick
Total	Pt	20.71922004	21.03892162	43.42592114	152.1231063
Greenhouse	Pt	3.600557512	3.627416221	5.304890355	8.646735225
Ozone layer	Pt	0.100470313	0.09777978	0.028699588	0.118668646
Acidification	Pt	5.434862921	5.797494131	18.49025081	80.76729101
Eutrophication	Pt	0.668320479	0.675461641	1.398684812	1.55273415
Heavy metals	Pt	7.961902814	7.720519356	9.378547833	14.08055977
Carcinogens	Pt	0.504632793	0.499578885	0.574972438	0.984730246
Pesticides	Pt	0	0	0	0
Summer smog	Pt	0.296309161	0.291197557	0.227285355	0.907922657
Winter smog	Pt	2.152164043	2.329474051	8.022589948	45.06446456
Energy resources	Pt	0	0	0	0
Solid waste	Pt	0	0	0	0

กล่าวโดยสรุป เมื่อพิจารณาค่าคะแนนเชิงเดี่ยวของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง พบว่าอิฐมอญ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ 152.1231063 Pt โดยก่อให้เกิดภาวะฝนกรดมากถึง 80.76729101 Pt รองลงมาคือ การเกิดหมอกควันฤดูหนาว 45.06446456 Pt และการปนเปื้อนของโลหะหนัก 14.08055977 Pt

อิฐบล็อกส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม 43.42592114 Pt โดยก่อให้เกิดภาวะฝนกรดมากถึง 80.76729101 Pt รองลงมาคือ การปนเปื้อนของโลหะหนัก 9.378547833 Pt และการเกิดหมอกควันฤดูหนาว 8.022589948 Pt

อิฐมวลเบาส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม 21.03892162 Pt โดยก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก 7.720519356 Pt รองลงมาคือ การเกิดภาวะฝนกรด 5.797494131 Pt และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3.627416221 Pt

และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม 20.71922004 Pt โดยก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก 7.961902814 Pt รองลงมาคือภาวะฝนกรดมากถึง 5.434862921 Pt และการปล่อยก๊าซเรือนกระจก 3.600557512 Pt



## บทสรุป

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนาอิฐมวลเบาเพื่อลดความร้อนเข้าสู่ตัวบ้าน โดยการนำ PCM มาเป็นส่วนประกอบ ซึ่ง PCM จะทำหน้าที่สะสมความร้อน/หน่วงความร้อนในเวลากลางวัน และคายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมในเวลากลางคืน โดยแบ่งรูปแบบอิฐมวลเบาที่ขนาดความหนา 10 เซนติเมตร ออกเป็น 3 แบบ คือ size 3-7 size 5-5 และ size 7-3 ประกอบด้วย อิฐมวลเบา 2 ชั้น ตรงกลางใส่ PCM ที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านนอก 3.0 5.0 และ 7.0 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยทำการผสม PCM เข้ากับปูนก่อในสัดส่วนร้อยละ 2.5 5.0 7.5 และ 10.0 (ร้อยละโดยน้ำหนัก) ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก. 1505 - 2541 เพื่อคัดเลือกสัดส่วนที่เหมาะสม หลังจากนั้นทำการผลิตอิฐมวลเบาที่มีส่วนผสมของ PCM ในกระบวนการผลิตจริง และนำอิฐดังกล่าวมาสร้างบ้านจำลอง เพื่อทำการทดสอบในสภาวะภูมิอากาศจริงของประเทศไทย ตั้งแต่เวลา 6.00-6.00 น. ของวันถัดไป ซึ่งในฤดูร้อนทำการทดสอบที่ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย 537.89 วัตต์ต่อตารางเมตร ความเร็วลมเฉลี่ย 1.08 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย 30.26 องศาเซลเซียส ในฤดูฝนทำการจำลองโดยสเปรย์น้ำตั้งแต่วันที่ 6.00-18.00 น. ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30-35 มิลลิเมตร ความเร็วลมเฉลี่ย 1.06 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย 27.07 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบอุณหภูมิและความชื้นในบ้านทดสอบเพื่อให้ได้วัสดุประกอบอาคารที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย รวมถึงการพิจารณาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และประเมินค่าผลกระทบของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมเปรียบเทียบกับอิฐเชิงพาณิชย์

### 5.1 สมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM

การผลิตอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ได้ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและคายความร้อนของ PCM ผลที่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุความร้อนของ PCM มีค่าแปรผันตรงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดได้จากเครื่อง DSC ส่วนขั้นตอนการผลิตได้ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่า ค่าด้านทานแรงอัดและค่าด้านทานแรงดัดแปรผกผันกับปริมาณ PCM ที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่ออัตราส่วนผสมของ PCM เพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าด้านทานแรงอัดและค่าด้านทานแรงดัดมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมชิ้นส่วนคอนกรีตมวลเบาแบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ มอก.1505-2541 พบว่า สัดส่วนที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คือ 2.5 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) โดยมีค่าด้านทานแรงอัด กรณีใช้ S32 มีค่ารับแรงอัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 4.91 N/mm<sup>2</sup> size 5-5 มีค่า 4.60 N/mm<sup>2</sup> และ size 7-3 มีค่า 4.70 N/mm<sup>2</sup> กรณีใช้ S44 มีค่ารับแรงอัดสูงสุด คือ size 3-7 มีค่า 4.82 N/mm<sup>2</sup>

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบการหน่วงความร้อนของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM พบว่า S32 ขนาด size 3-7 มีความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและด้านใน และความแตกต่างของอุณหภูมิผนังด้านนอกและภายในห้องมากกว่า size 5-5 และ size 7-3 ตามลำดับ เนื่องจากชั้นของปูนก่อผสมกับ PCM มีความหนาแน่นสูงกว่าชั้นของอิฐมวลเบา และอยู่ใกล้แหล่งความร้อนมากกว่าจึงทำหน้าที่ดูดซับความร้อนไว้ส่วนหนึ่ง และความร้อนส่วนที่เหลือถูกถ่ายเทเข้ามาในชั้นของอิฐมวลเบาที่ตำแหน่งห่างจากผนังด้านในเท่ากับ 7.0 เซนติเมตร ซึ่งช่วยป้องกันความร้อนได้มากกว่าตำแหน่งห่างจากผนังด้านใน 5.0 และ 3.0 เซนติเมตร

## 5.2 สภาวะใช้งานจริงในฤดูร้อนและจำลองสภาวะภูมิอากาศในฤดูฝน

การทดสอบในสภาวะการใช้งานจริงในบ้านทดสอบทั้งหมด 4 หลัง ประกอบด้วย อิฐมอญ อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ฤดูร้อนและฤดูฝน (จำลองสเปรย์น้ำโดยใช้ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 30-35 มิลลิเมตร ในช่วงกลางวันตั้งแต่เวลา 6.00 – 18.00 น. รวม 12 ชั่วโมง) โดยทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 6.00-6.00 น. ของวันถัดไป

การทดสอบฤดูร้อน ระหว่างวันที่ 21-23 พฤษภาคม 2554 ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย 537.89 วัตต์ต่อตารางเมตร และอุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 30.26 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลากลางวันสภาวะอากาศสิ่งแวดล้อมอุณหภูมิจะมีค่าผันแปรขึ้นลงระหว่าง 34-40 องศาเซลเซียส อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวบ้านได้ดี ส่งผลให้อุณหภูมิภายในบ้านทดสอบต่ำกว่าอิฐมอญ อิฐบล็อก และอิฐมวลเบาประมาณ 4-5, 2-3 และ 1-2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังภายในและภายนอกพบว่า อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีความแตกต่าง 8-9 องศาเซลเซียส อิฐมวลเบาที่มีความแตกต่าง 7-8 องศาเซลเซียส อิฐบล็อกมีความแตกต่าง 2-3 องศาเซลเซียส และอิฐมอญมีความแตกต่าง 6-7 องศาเซลเซียส การหน่วงความร้อน (time lag) ของผนังอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM คือ 2 ชั่วโมง 34 นาที ในระหว่างเวลา 15.30 - 18.04 น. อิฐมวลเบาที่มีการหน่วงความร้อน 2 ชั่วโมง 8 นาที ในระหว่างเวลา 15.37 - 17.45 น. อิฐบล็อกมีการหน่วงความร้อน 59 นาที ในระหว่างเวลา 16.01 - 17.00 น. ในขณะที่อิฐมอญไม่เกิดการหน่วงความร้อน ดังนั้นอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการหน่วงความร้อนที่มากกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ ส่วนในช่วงกลางคืนสภาวะอากาศสิ่งแวดล้อมมีค่าลดลง โดยอุณหภูมิต่ำสุดในรอบวันอยู่ระหว่าง 25-27 องศาเซลเซียส ทำให้ อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการคายความร้อนที่สะสมในตอนกลางวันออกในเวลากลางคืนสู่ทั้งสภาวะอากาศภายนอกและภายในเท่ากับปริมาณที่ดูดซับไว้ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีค่าสูงกว่าอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ ตามลำดับ

การทดสอบฤดูฝน (จำลอง) ระหว่างวันที่ 26-28 พ.ค. 2554 อุณหภูมิอากาศสิ่งแวดล้อมเฉลี่ยตลอดทั้งวัน 27.07 องศาเซลเซียส ช่วงกลางวันสภาวะอากาศภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในบ้านอิฐมอญมีค่าสูงกว่าอิฐบล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM จากการ

เปรียบเทียบอุณหภูมิผนังภายในและภายนอกพบว่า อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีความแตกต่าง 7-8 องศาเซลเซียส อิฐมวลเบาที่มีความแตกต่าง 6-7 องศาเซลเซียส อิฐ บล็อกมีความแตกต่าง 2-3 องศาเซลเซียส และอิฐมอญมีความแตกต่าง 4-5 องศาเซลเซียส และในช่วงกลางคืนสภาวะอากาศสิ่งแวดล้อมมีค่าลดลงทำให้อุณหภูมิภายในบ้านลดลงโดยอุณหภูมิภายในของอิฐมอญต่ำกว่าอิฐ บล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ในส่วนของความชื้นสัมบูรณ์ภายในบ้านทดสอบอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีค่าต่ำกว่าอิฐมอญ อิฐมวลเบา อิฐ บล็อก และอากาศแวดล้อม ส่งผลให้บ้านทดสอบอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศน้อยลงไปด้วย ส่วนในช่วงเวลากลางคืนความชื้นสัมบูรณ์ของบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง และอากาศแวดล้อมมีค่าใกล้เคียงกัน

### 5.3 การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจ

การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจด้วยเทคนิค QFDE จนสามารถปรับปรุงผลิตภัณฑ์ให้เป็นผลิตภัณฑ์เชิงนิเวศเศรษฐกิจที่ดีขึ้นตามความต้องการของลูกค้าและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ด้วยการปรับปรุงการเพิ่มชั้นสาร Phase Change Material (PCM) เข้าไปในอิฐมวลเบา ส่งผลให้อิฐมีคุณสมบัติการป้องกันความร้อนจากภายนอกที่จะเข้ามาในอาคารได้ดีขึ้น ทำให้ลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในอาคารลงได้ โดยผลการทดสอบจากบ้านตัวอย่างที่สร้างขึ้นพบว่าสามารถลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารได้ประมาณ 3.60 – 19.53 % แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในครั้งนี้ส่งผลดีต่อประเด็นทางด้านวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐศาสตร์ ตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ได้อย่างครอบคลุม

### 5.4 การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

การประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณาในส่วนของผนังอิฐ บล็อก อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM มีพื้นที่ผนัง 400 ตารางเมตรและนำข้อมูลการใช้พลังงานที่ได้จากการคำนวณการใช้งานในบ้านพักอาศัย สำหรับในขั้นตอนการผลิตและการขนส่งจะไม่นำมาพิจารณาโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SimaPro 7.2 ด้วยวิธี Eco-indicator 95 และประเมินผลกระทบทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ สุขภาพมนุษย์ ระบบนิเวศ และการลดลงของทรัพยากร โดยผลการประเมินแสดงออกเป็นลักษณะดังนี้

การจำแนกกลุ่มผลกระทบและการกำหนดบทบาท (Characterization) ที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของผนังบ้านทดสอบทั้ง 4 หลัง พบว่า ผนังบ้านทดสอบที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านต่างๆ มากที่สุดเกือบทุกด้าน ได้แก่ อิฐมอญ รองลงมาคือ อิฐ บล็อก อิฐมวลเบา และอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM โดยส่งผลกระทบต่อมลพิษทางอากาศมากที่สุด รองลงมาคือก่อให้เกิดภาวะฝนกรดและการเกิดหมอกควันฤดูหนาว ตามลำดับ

จากนั้นจะทำการให้ค่าคะแนนเชิงเดี่ยว (Single score) เพื่อทำการแบ่งลำดับผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของชิ้นงานของบ้านทดสอบทั้ง 4 หลังเพื่อที่จะสามารถทำให้เห็นถึงระดับของผลกระทบในบ้านแต่ละหลังได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าคะแนนเชิงเดี่ยว พบว่า อิฐมอญก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมาก

ที่สุดคือ 152.12311 รองลงมาคือ อิฐ บล็อก 43.42592 Pt อิฐมวลเบา 21.03892 Pt และอิฐมวลเบาที่มี ส่วนประกอบของ PCM 20.71922 Pt โดยส่งผลให้เกิดภาระทางสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาคือ ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เป็นต้น

#### 5.5 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ทำการผสม PCM เข้ากับปูนก่อในสัดส่วนต่างๆ ดังนั้นหากมีการนำส่วนผสมอื่นๆ มาผสมเพิ่มหรือใช้แทนปูนก่อจะช่วยเพิ่มค่าต้านทานแรงอัดมากขึ้น
2. งานวิจัยนี้ใช้อิฐมวลเบา G4 มาผลิตเป็นอิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM ทำให้มีต้นทุนสูง ดังนั้นหากมีการนำเอา บล็อกฮาร์ดแคบซึ่งเป็น บล็อกที่อยู่ในชั้นฐานของการรองรับ บล็อกชั้นแรกหลังผ่านการตัดขนาดมาใช้ในการผลิตจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้
3. ควรมีการศึกษาและติดตามการใช้งานในสภาพแบบร้อนชื้นของประเทศไทยอย่างต่อเนื่องในรอบ 1 ปี เพื่อดูความเหมาะสมของการนำมาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ





## อภิธานศัพท์

AAC	: คอนกรีตมวลเบา (Autoclaved Aerated Concrete)
$A_0$	: เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ (บาท)
$A_s$	: ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐมอญ (บาท)
b	: ความกว้างเฉลี่ยของคาน (เมตร)
Brick	: อิฐมอญ
Cement block	: อิฐบล็อก
d	: ความลึกเฉลี่ยของคาน (เมตร)
DSC	: เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter)
i	: อัตราดอกเบี้ย
IRR	: อัตราผลตอบแทนภายใน (%)
L	: ความยาวคาน (Span Length) (เมตร)
LCA	: การประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment)
LWC G4	: อิฐมวลเบาชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7
LWC+PCM	: อิฐมวลเบาที่มีส่วนประกอบของ PCM
n	: อายุการใช้งาน (ปี)
NPV	: ผลการตอบแทนสุทธิ (บาท)
P	: น้ำหนักสูงสุด (Maximum Load) (กิโลกรัม)
PBP	: ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
PCM	: สารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material)
$P_o$	: ค่าความพรุน (Porosity) (เปอร์เซ็นต์)
Pt	: การแสดงจำนวนเท่าของค่ากลาง (Person for target year)
R	: โมดูลัสการแตกร้าว (กิโลกรัมต่อตารางเมตร)
$V_t$	: ปริมาตรของตัวอย่างทั้งหมด (ลูกบาศก์เมตร)
$V_v$	: ปริมาตรช่องว่าง (ลูกบาศก์เมตร)
$W_1$	: ปริมาตรหลังอบ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
$W_2$	: น้ำหนักน้ำที่ดูดกลืน (กรัม)





บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชบุรี

## บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน. (2548) เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2553, จาก [http://www.stasolar.org/SUNTECH/sun\\_tech.htm](http://www.stasolar.org/SUNTECH/sun_tech.htm)
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2554). สภาพอากาศของประเทศไทย พ.ศ. 2553. วารสารอุตุนิยมวิทยา. (1), 18
- กานต์ สุขสงญาติ และคณะ. (2550). การศึกษาเปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์ระหว่างบ้านที่ใช้ผนังอิฐมวลเบา กับผนังมวลเบาด้านการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติทางความร้อน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 17(2), ไม่ระบุหน้า
- เกศินี เหมวิเชียร และ พิริยาธร สุวรรณมาลา กลุ่มวิจัยและพัฒนาชีวเคมีฯ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2553) เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์. สืบค้นเมื่อ 14 สิงหาคม 2553, จาก <http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5102/nkc5102t.html>
- ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูกร และ วิทยา ยงเจริญ. (2550). อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะในวัสดุโครงสร้างต่อพฤติกรรมกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังเปลือกอาคาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21 วันที่ 17-19 ตุลาคม 2550 จังหวัดชลบุรี.
- ชลธิศ เอี่ยมวรวิฑูกร และ เอกพล เตี้ยขี้. (2549). พฤติกรรมทางความร้อนของผนังเปลือกอาคารผสมสารเปลี่ยนสถานะในสภาพอากาศของกรุงเทพมหานคร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 วันที่ 15-17 ตุลาคม 2551 ณ สถาบันพัฒนาวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- บริษัท ซูเปอร์บล็อก จำกัด (มหาชน). (2553) การติดตั้ง ก่อ ฉาบ. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2553, จาก <http://www.superblockthailand.com/th>
- ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ. (2548). เคมีทั่วไป เล่ม 1. (9). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2541). แผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็ก แบบมีฟองอากาศ-อบไอน้ำ, มอก.1510-2541
- โยธิน อึ้งกุล. (2554). การศึกษาคอนกรีตนาโนของแผ่นคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กแบบมีฟองอากาศอบไอน้ำ. วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์. 10(1), 95-105.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2551) การประเมินวัฏจักรชีวิต. สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2553, จาก <http://www.mtec.or.th/ecodesign2010>
- สภาวิศวกร. (2553) ความรู้เกี่ยวกับอิฐมวลเบา. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2553, จาก [http://www.coe.or.th/e\\_engineers/knc\\_detail.php?id=98](http://www.coe.or.th/e_engineers/knc_detail.php?id=98)
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). สถานการณ์พลังงานไทยในปี 2553. วารสารนโยบายพลังงาน. (91), 20-39.

- สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553ก) แนวทางการเลือกใช้วัสดุก่อสร้าง และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2553, จาก [http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select\\_electrical.pdf](http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select_electrical.pdf)
- สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553ข) โครงการจัดทำแผนปฏิบัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในบ้านที่อยู่อาศัย. สืบค้นเมื่อ 16 สิงหาคม 2553, จาก <http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/actionplan.htm>
- สำนักส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (สสอ.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2553ค) การปรับปรุงประสิทธิภาพ "บ้านเอื้ออาทร" โครงการระยะที่ 2 การปรับปรุงโดยปรับเปลี่ยนรูปแบบทางสถาปัตยกรรม. สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2553, จาก [http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select\\_electrical.pdf](http://www2.dede.go.th/new-homesafe/webban/select_electrical.pdf)
- สุพิชชา ลอยขจร. (2554). การเปรียบเทียบทางเทคนิคของการส่งผ่านความร้อนของฉนวนเชิงพาณิชย์. การศึกษาปัญหาพิเศษสำหรับฟิสิกส์ประยุกต์ 1.
- อรไท แจ่มจำรัส. (2554). การศึกษาอิทธิพลของช่องเปิดห้องใต้หลังคาที่มีต่อการส่งผ่านความร้อน. การศึกษาปัญหาพิเศษสำหรับฟิสิกส์ประยุกต์ 1.
- เอกชัย บุญสุวรรณ. (2549). การศึกษาการกระจายและการหน่วงความร้อนของผนังอิฐมวลเบาแบบหลายชั้นที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน. การศึกษาปัญหาพิเศษสำหรับฟิสิกส์ประยุกต์ 1.
- ASTM International. (2003). Standard practice for Autoclaved Aerated Concrete, Masonry C 1555-03a
- Blank, T.L., et. al.,(1998). Engineering economy. (4). McGraw-Hill. London.
- Castell, A., et al. (2010). Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*. (42), 534-540.
- de Gracia, A., L. Rincón, et al. (2010). Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings. *Energy and Buildings*. 42(9), 1517-1523.
- E-learning courses from the IITs & IISc. (2553) Lesson 27 Psychrometry. สืบค้นเมื่อ 20 พฤศจิกายน 2553, จาก <http://nptel.iitm.ac.in/courses/>
- Esam M. Alawadhi. (2008). Thermal analysis of a building brick containing phase change material. *Energy and Buildings*. (40), 351-357.
- Kuznik, F. & J. Virgone. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*. (88), 2038-2046.

Meng Zhang, et al. (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), 795-809.

Mettler-Toledo International Inc. (2553) *Differential Scanning Calorimetry for all Requirements*. สืบค้นเมื่อ 15 กรกฎาคม 2553, จาก [http://th.mt.com/global/th/home/supportive\\_content/product\\_documentation/product\\_brochures/DSC\\_1\\_Product\\_Brochure.rHqAwXLLnPBMDSzq-.MediaFileComponent.html/51724556\\_DSC1\\_Brosch\\_E.pdf](http://th.mt.com/global/th/home/supportive_content/product_documentation/product_brochures/DSC_1_Product_Brochure.rHqAwXLLnPBMDSzq-.MediaFileComponent.html/51724556_DSC1_Brosch_E.pdf)

Ungkoon, Y., et al. (2005). A Field Study of Hygrothermal Performance of AutoClaved Aerated Concrete Blocks under Hot Humid Climate of Thailand. *International Conference on Recent Advances in Mechanical and Materials Engineering*. (ICRAMME 2005), May 30-31, Kuala Lumpur, Malaysia.

Vineet Veer Tyagi. & D. Buddhi. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (11), 1146-1166.



# Techno-Economic of AAC-Lightweight Concrete Wall Composed of Phase change Material

Chantana Punlek\*, Somchai Maneewan, Yupamane Yangjan and Yothin Ungkoon  
Department of Physics, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, 65000  
Thailand

Superblock Public Company Limited, Bangna, Bangkok, 10260 Thailand  
E-mail address: chantanap@nu.ac.th (C. Punlek)

## Abstract

This work studied the possibility to use PCM with Autoclaved Aerated Concrete (AAC) for reducing the heat transfer from the outer wall to the inner wall. AAC was designed the double-layer wall with different PCM locations. AAC was divided into three types of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3. The various contents of PCM were also varied in the ratio of 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10.0% by weight at each PCM-layered position. It was found that the AAC3-7 sample with S32 type PCM content of 2.5% by weight showed the optimum compressive strength which was around  $4.91 \text{ N/mm}^2$  and also exhibited the more effective heat transfer characteristics. Compressive strength, flexural strength, density and water absorption of this condition were claimed in quality class of 4, which is also based on the Thai Industrial Standard 1505-1998.

**Keywords:** Autoclaved Aerated Concrete, Phase Change Material, Heat Transfer

## Introduction

City buildings and offices and residential housing are the largest electricity consumers in modern cities, and building owners and occupiers pay a high price for their power consumption. A decrease in energy dependence of buildings is one of the keys to reducing the amount and cost of energy consumption, and is now required and being demanded in the development of new and sophisticated building designs. New materials and construction systems must therefore contribute to meet power reduction requirements and thereby promote both energy conservation in construction and economic sustainability in energy generation.

One of the approaches to reducing energy consumption in buildings and enhancing the indoor thermal environment is the integration of phase change material (PCM) into a building or

2

building services system, which was first used for thermal storage in buildings in 1980<sup>1</sup>, to increase thermal storage effectiveness. Then, experiments have been reported that used PCMs in trombe walls<sup>2,3</sup>, wall boards<sup>4-6</sup>, shutters or window<sup>7</sup>, ceiling boards<sup>8,9</sup> and roof<sup>10-12</sup>.

In Thailand, around 28,000,000 m<sup>2</sup> Autoclaved Aerated Concrete (AAC) was used in 2012. Its popularity was due to it being the only type of wall material which exhibits the ability to meet building energy saving requests of about 50% without adding other affiliated thermal insulation materials<sup>13</sup>. Of further importance, it is lightweight and has a highly porous structure (Approximately 80% of the volume of the hardened material is made up of pores, 50% being air pores and 30% being micropores), a lower thermal conductivity, a higher heat resistance, a lower shrinkage, and an easier and faster construction process than traditional concrete<sup>14-19</sup>.

To enhance sufficiently the thermal properties of AAC, the integration of phase change material (PCM) into AAC wall material was considered to reduce the heat transfer from the outer wall to the inner wall, leading to the achievement of energy conservation goals in buildings. This current investigation is therefore focused on testing the further mechanical and physical properties, and thermal effectiveness of the AAC-lightweight concrete, by the application of PCM at different locations, to determine the PCM position supplying the best thermal performance. Additionally, thermal performances of three different wall structures under optimal PCM conditions are also investigated and compared.

## **Experimental and Methodology**

### **AAC-Light Weight Concrete**

In AAC production, the starting materials are commercially and readily available: Lime (CaO), Portland cement, Aluminum (Al), Anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), fine sand (less than 90 μm in size) as well as the sugar sediment. The mixture composition of AAC is Lime (17.17 % by weight), Portland cement (17.876 % by weight), Aluminum (0.094 % by weight), Anhydrite (2.352 % by weight) and fine sand (62.517 % by weight). This composition of autoclaved aerated concrete was fabricated at the temperature of 180-190 °C and the pressure of 12 bars from a manufacturer.

## Density, water absorption, compressive strength, flexural strength and heat transfer measurement

Phase Change Material (PCM) was applied as a double-layer AAC at different locations. AAC wall was designed three patterns: PCM-layered location is placed at the thickness of 3 cm from external surface (AAC3-7), PCM-layered location is placed at middle position of AAC (AAC5-5) or the thickness of 5 cm from external surface, and PCM-layered location is placed at the thickness of 7 cm from external surface (AAC7-3) as exhibited in Figure 1. The content of PCM at each location was also varied in the ratio of 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10.0% by weight.

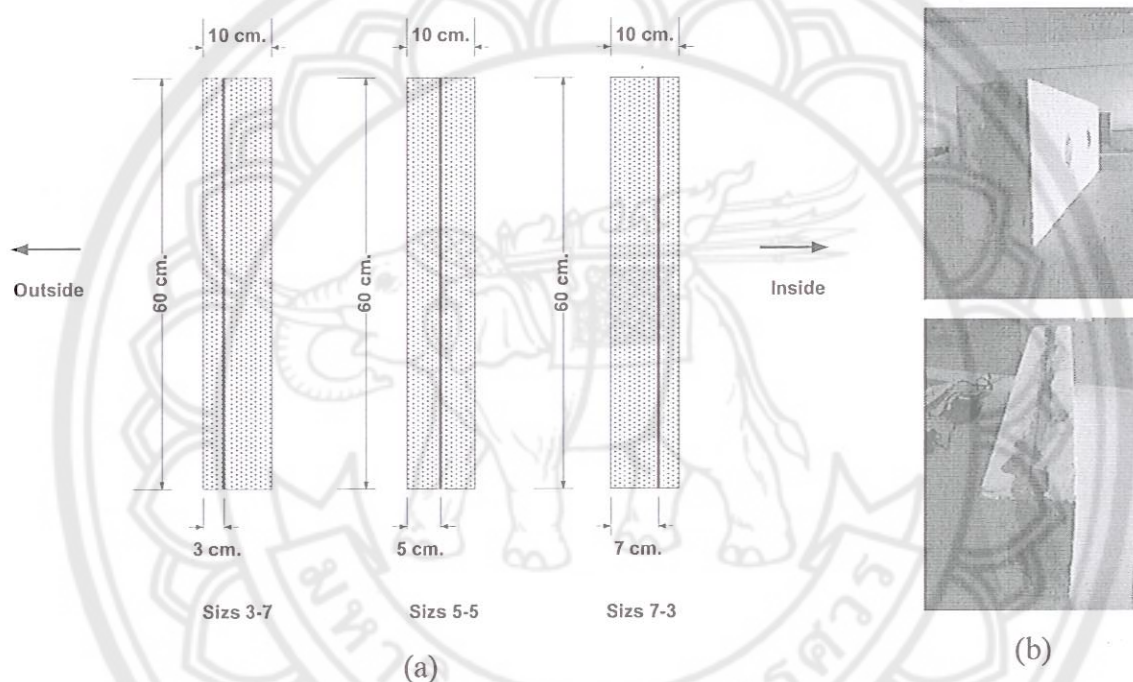


Figure 1 (a) PCM-layered position (b) AAC-PCM.

Following the double-layer AAC preparation with different PCM-layered locations, the autoclaved aerated concretes from the original AAC, AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 were cut to obtain a uniform size of  $0.10 \times 0.10 \times 0.10$  m and then tested for compressive strength. Other samples were dried at  $105^\circ\text{C}$  for 24 h and then examined for density and water absorption. For testing the flexural strength, all the sample blocks were cut to obtain a uniform size of  $0.04 \times 0.04 \times 0.16$  m. The samples were then dried at  $75^\circ\text{C}$  for 24 h. Nine samples were tested in this way. The samples were tested and compared as following Thailand Industrial Standard (TIS) 1505-1998 and Din 4165-1986.

Heat transfer of AAC with different conditions was also investigated and the samples of original AAC and AAC with different PCM locations (AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3) were set up as shown in Figure 2 and 3. The thermal source (heater) was controlled at the temperatures of 40 °C, 50 °C and 60 °C to test the temperature at different positions of samples.

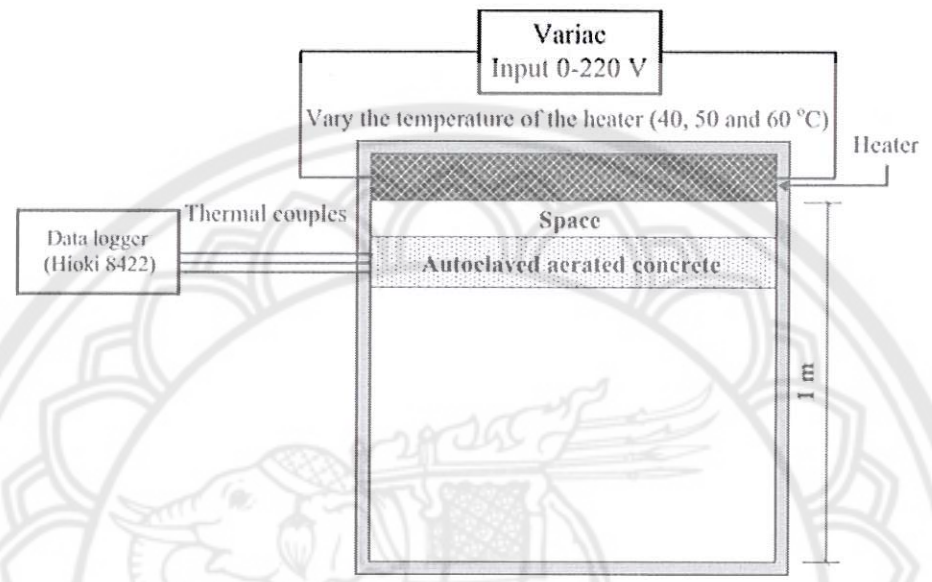


Figure 2. Schematic diagram of the experimental set up.

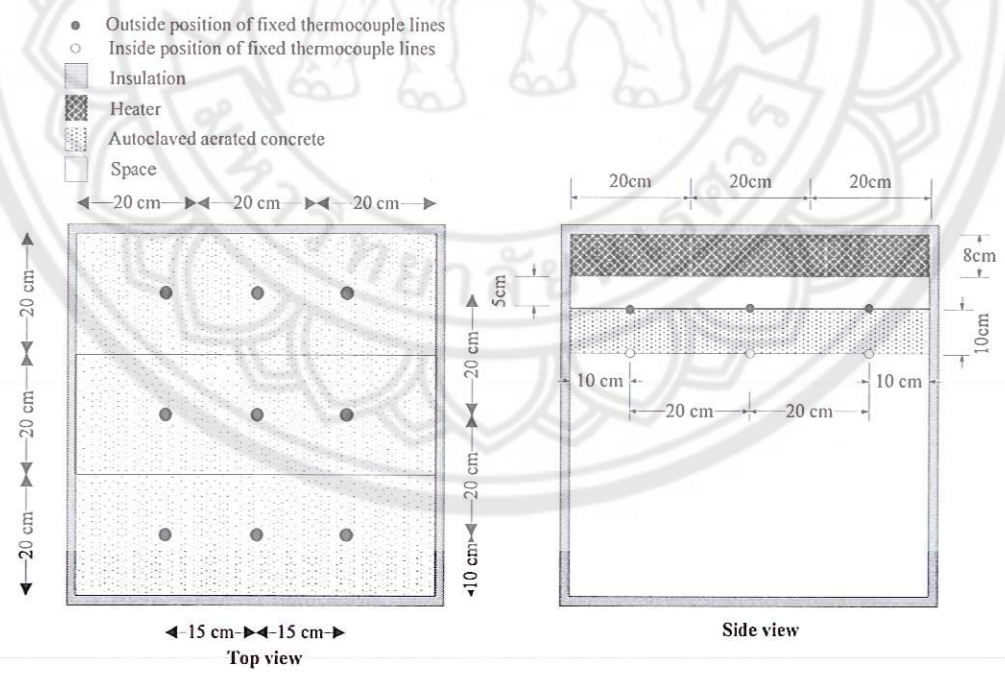


Figure 3. Location of thermal couples for testing the heat transfer.



## Phase transition behavior and application of PCM

The phase change material in this work was concentrated on the kind of salt hydrate with the type of S32 and S44, which have a melting point of 32°C and 44°C, respectively. This melting point of these phase change materials was reported by a PCM production company. To confirm this result, the endothermic behavior of the salt hydrated phase change materials was investigated by the differential scanning calorimeter (DSC). The obtained result was also compared with the data from the company data. The procedure for transition behavior investigation of salt hydrated phase change materials is described: 1) The salt hydrated phase change materials (S32 and S44) about 10-15 mg were finely grinded. 2) Both samples of S32 and S44 were taken into each aluminum pan before analysis by DSC. 3) The samples (S32 and S44) were tested by DSC. and 4) The endothermic behavior of the salt hydrated phase change materials was analyzed.

## Result and Discussion

### Density and water absorption

To investigate the physical and mechanical properties of PCM-composed AAC, the salt hydrate PCM types of S32 and S44 were applied to different double-layer AAC locations (AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3) with various PCM contents. The density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 with a difference of the PCM contents is shown in Table 1. In the variation of S32 type PCM, the density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was quite the same level when the content of S32 type PCM increased. The density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was between 620 and 640 kg/m<sup>3</sup> when the content of PCM was between 0 and 10 % by weight as shown in Table 1. In the variation of PCM type of S44, the density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was quite the same level when the content of S44 type PCM increased. The density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was between 610 and 650 kg/m<sup>3</sup> when the content of PCM was between 0 and 10 % by weight as shown in Table 1. All density values of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 at different PCM contents of both types were claimed in quality class of 4 (610-700 kg/m<sup>3</sup>), which is based on the Thai Industrial Standard 1505-1998. Water absorption of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 with a variation of the PCM contents is shown in Table 2. When there was an increase of PCM content in types of S32 and S44, the water absorption of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was quite the same level. The water absorption of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 was between 350 and 420 kg/m<sup>3</sup> with an increase of the PCM content in types of S32 and S44 between 0 and 10 % by weight as shown in Table 2. All water absorption values of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 at different

PCM contents of both PCM types were claimed in quality class of 4 ( $\leq 500 \text{ kg/m}^3$ ), which is based on the Thai Industrial Standard 1505-1998.

**Table 1** The density of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 with various PCM contents.

PCM	Density ( $\text{kg/m}^3$ )			Standard 610-700 $\text{kg/m}^3$	
	% by weight	AAC3-7	AAC5-5		AAC7-3
S32	2.5	620	620	620	✓
	5.0	620	640	640	✓
	7.5	630	630	620	✓
	10.0	640	630	630	✓
S44	2.5	620	620	630	✓
	5.0	650	610	620	✓
	7.5	650	630	640	✓
	10.0	630	620	640	✓

**Table 2** The water absorption of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 with different PCM contents.

PCM	Water absorption			Standard $\leq 500 \text{ kg/m}^3$	
	% by weight	size 3-7	size 5-5		size 7-3
S32	2.5	390	400	390	✓
	5.0	390	360	390	✓
	7.5	370	400	410	✓
	10.0	390	390	390	✓
S44	2.5	390	400	390	✓
	5.0	390	390	390	✓
	7.5	350	420	380	✓
	10.0	380	400	370	✓

### Compressive strength and flexural strength

The compressive strength of different double-layer AAC patterns with a variation of PCM contents is shown in Figure 4. For AAC3-7 with different PCM contents of S32 and S44, the compressive strength of both PCM types decreased when there was an increase of PCM content from 0% to 10% by weight is exhibited in Figure 4. For AAC5-5 and AAC7-3 with different PCM contents in types of S32 and S44, the compressive strength trend of both

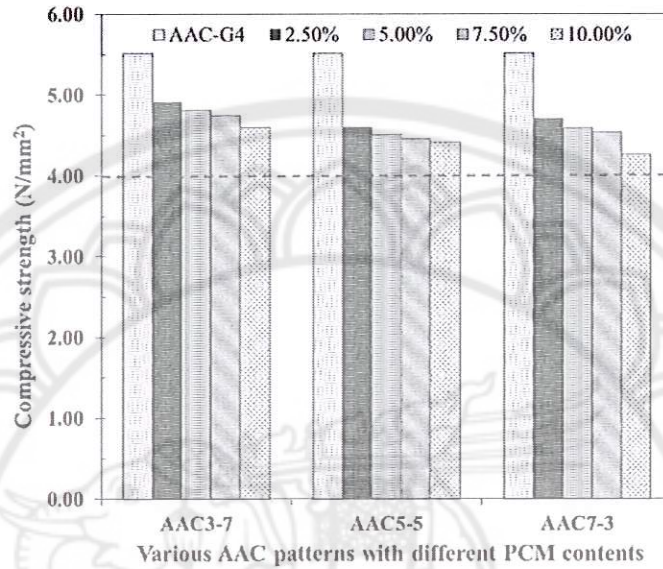
patterns was similar to that of AAC3-7 is illustrated in Figure 4. It was found that the optimum compressive strength of PCM-layered AAC was around  $4.91 \text{ N/mm}^2$  obtained from the AAC3-7 sample with PCM content of 2.5% by weight, which was the highest value in all PCM-layered patterns. When compared with the Thai Industrial Standard 1505-1998, minimum compressive strength of AAC was  $\geq 4.0 \text{ N/mm}^2$ . Therefore, these compressive strength values (except the compressive strength of AAC3-7 and AAC7-3 with S44 type PCM content of 7.5% and 10% by weight, and AAC5-5 with S44 type PCM content of 10% by weight) were claimed in quality class of 4 ( $\geq 4.0 \text{ N/mm}^2$ ), which is based on the Thai Industrial Standard 1505-1998.

**Table 3** The flexural strength of different double-layer AAC patterns with different PCM contents.

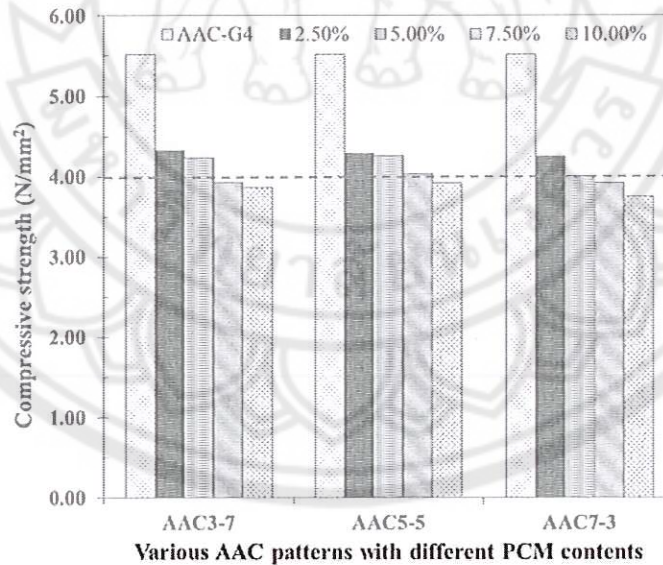
PCM type	Flexural strength ( $\text{N/mm}^2$ )			Standard $\geq 30\%$ of compressive strength	
	% by weight	size 3-7	size 5-5		size 7-3
S32	2.5	2.26	2.05	2.01	✓
	5.0	2.08	2.01	2.02	✓
	7.5	2.17	2.13	2.24	✓
	10.0	2.41	2.43	2.50	✓
S44	2.5	2.41	2.14	2.28	✓
	5.0	2.33	2.45	2.04	✓
	7.5	2.28	2.47	2.25	✓
	10.0	2.44	2.75	2.59	✓

The flexural strength of different double-layer AAC patterns with various PCM contents is shown in Table 3. It was found that the flexural strength of PCM-layered AAC in each pattern increased when there was an increase of PCM content in types of S32 and S44. For PCM type of S32, the maximum flexural strength of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 samples was found at the PCM content of 10% by weight which showed the value of about 2.41, 2.43 and  $2.50 \text{ N/mm}^2$ , respectively. For PCM type of S44, the maximum flexural strength of AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3 samples was also found at the PCM content of 10% by weight which showed the value of about 2.44, 2.75 and  $2.59 \text{ N/mm}^2$ , respectively. These values were claimed in quality class of 4 ( $\geq 30\%$  of the compressive strength), which also based on the Thai Industrial Standard 1505-1998.

Furthermore, this was observed that the increase of S32 and S44 PCM contents at each PCM-layered location affected to a decreasing of compressive strength and an increase of flexural strength. The optimum PCM content with optimum PCM-layer location in this investigation, resulting in a maximum compressive strength, conforms to the Thai Industrial Standard 1505-1998.



(a) S32



(b) S44

**Figure 4.** The compressive strength of different double-layer AAC patterns with different PCM contents.

### **Analysis result of phase change material (PCM)**

The temperature range of the melting point in Phase Change Material (PCM) types of S32 and S44 was investigated using DSC measurement, as shown in Figure 5 (a) and (b). The PCM type of S32 obviously exhibited 2 endothermic peaks as shown in Figure 5 (a). The first small endothermic peak was observed at  $\sim 30$  °C as a result of the starting point of the PCM (S32) melting with a related enthalpy of 6.05 J/g. Next, the effect of an increase in temperature to 60 °C resulted in the appearance of a second broadening endothermic peak at  $\sim 38$  °C. This peak was due to the process of the molten PCM (S32) and continued with the first endothermic peak that was the result of the heat absorption of PCM (S32) with a related enthalpy of 137.67 J/g. For the PCM type of S44, it only illustrated an endothermic peak as shown in Figure 5 (b). The broadening endothermic peak was observed at  $\sim 40.5$  °C. This peak was due to the process of the molten phase change material that was the result of the heat absorption with a related enthalpy of 58.98 J/g. These results indicated that the temperature range of melting point and the capacity of thermal storage of salt hydrated phase change material type of S32 were more efficient than that of S44. So, the salt hydrated phase change material type of S32 was further investigated for the integration of phase change material (PCM) into AAC wall material.

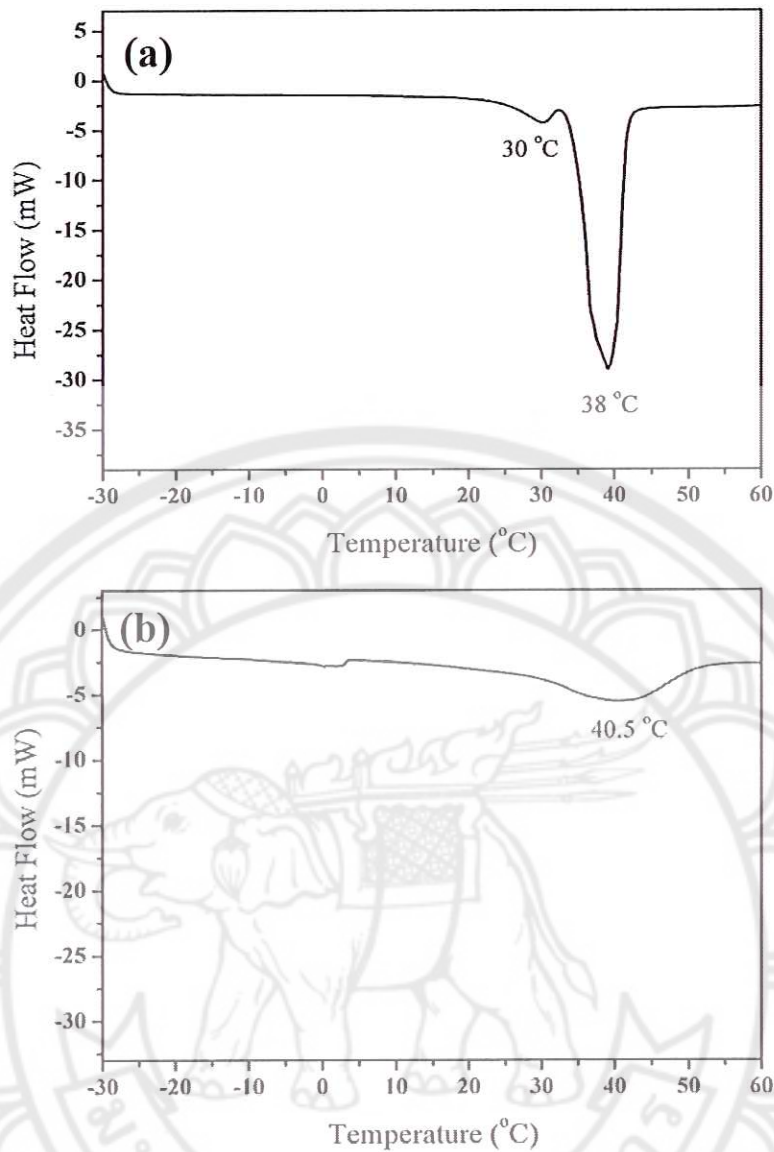


Figure 5. DSC plots showing the melting point of PCM: (a) S32 and (b) S44.

### Heat transfer

PCM content (Type of S32) of 2.5% by weight was further considered for the double-layer AAC fabrication to investigate the heat transfer from the outer wall to the inner wall. The difference between the exterior and interior wall surface temperature and the difference between the exterior surface temperature and room temperature of various double-layer patterns (AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3) are shown in Table 4. It was found that the highest difference between the exterior and interior wall surface temperature and the highest difference between the exterior wall surface temperature and room temperature were obtained from the sample of AAC3-7. The highest difference between the exterior and interior wall surface temperature was at approximately 3.3, 5.7 and 9.1 °C and the highest difference

between the exterior surface temperature was at around 3.5, 7.8 and 9.3 °C when the thermal source was controlled at temperatures of 40, 50 and 60 °C, respectively. With comparing the temperature difference among the original AAC, AAC3-7, AAC5-5 and AAC7-3, the difference between the exterior and interior surface temperature and the difference between the exterior surface temperature and room temperature of AAC3-7 were higher than those of Original AAC, AAC5-5 and AAC-7-3. This demonstrates that PCM-layered location was near the thermal source can absorb the thermal energy at exterior wall surface, reduce sufficiently the heat transfer through the building envelop and lead to an improvement in the insulative efficiency of buildings.

**Table 4** Difference between the exterior and interior surface temperature, and difference between the exterior surface temperature and room temperature.

Temperature (°C)	Difference between the exterior and interior wall surface temperature (°C)				Difference between the exterior surface temperature and room temperature (°C)			
	Original AAC	AAC 3-7	AAC5 -5	AAC 7-3	Original AAC	AAC 3-7	AAC 5-5	AAC 7-3
40	2.8	3.3	3.1	2.9	3.1	3.5	2.5	2.9
50	5.2	5.7	5.4	5.1	6.3	7.8	5.8	5.7
60	6.9	9.1	7.3	7.4	8.2	9.3	8.5	8.4

### Conclusions

The optimum PCM content and type were significantly influenced to a double-layer AAC fabrication. There were a decreasing of compressive strength and an increase of flexural strength as a result of the increase of S32-type and S44-type PCM contents in each PCM-layered location. The optimum compressive strength of the double-layer AAC was around 4.91 N/mm<sup>2</sup> obtained from the AAC3-7 sample with PCM content of 2.5% by weight. The samples in this condition also exhibited the decrease of heat transfer characteristics of wall. The double-layer AAC with PCM-layered pattern can be suitably considered to be an alternative application to concrete and masonry in the future.

### References

1. Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009; 13: 318–345.

2. Swet J. Phase change storage in passive solar architecture, in: Proceedings of the 5th National Passive Solar Conference, Amhearst, Massachusetts, 1980, pp. 282–286.
3. Ghoneim AA, Klein SA, Duffie JA. Analysis of collector-storage building walls using phase change materials. *Solar Energy* 1991; 47(1): 237–242.
4. Schossig P, Henning HM, Gschwander S, Haussmann T. Micro-encapsulated phase change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Mater Solar Cells* 2005; 89: 297–306.
5. Kisssock JK, Hamming JM, Whitney TI, Drake ML. Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings, in: Proceedings of International Solar Energy Conference, 1998, pp. 45–52.
6. Kalousck M, Hirs J. Simulation of the summer indoor thermal comfort by using wallboard with phase change material, Eurosun, BOLOGNA, 2002.
7. Mehling H. Strategic project “Innovative PCM-technology”-results and future perspectives, in: 8th Expert Meeting and Work Shop, Kizkalesi, Turkey, April 18–20, 2004.
8. Frank B. Phase change material for space heating and cooling, Sustainable Energy Center, University of South Australia, 2002.
9. Benard C, Gobin D, Gutierrez M. Experimental results of a latent heat solar roof used for breeding chickens. *Solar Energy* 1981; 6(4): 347–354.
10. Chou HM, Chen CR, Nguyen VL. A new design of metal-sheet cool roof using PCM. *Energy and Buildings* 2013; 57: 42–50.
11. Ong KS. Temperature reduction in attic and ceiling via insulation of several passive roof designs, *Energy Convers Manage* 2011; 52: 2405–2411.
12. Alawadhi EM, Alqallaf HJ. Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. *Energy Convers Manage* 2011; 52: 2958–2964.
13. Tao HS. Research for developing aerated concrete by using fly ash with high calcium of Gehua power plant in Hongshan, Wuhan University of Technology, WuHan, 2004.
14. Alduaij J, Alshaleh K, Haque MN, Ellaithy K. Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cem Concr Comp* 1999; 21: 453-458.
15. Cabrillac R, Florio B, Beaucour AL, et al. Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. *Constr Build Mater* 2006; 20: 286–295.
16. Kearsley EP, Wainwright PJ. Porosity and permeability of foamed concrete. *Cem Concr Res* 2001; 31(5): 805–812.



17. Koronthalyova O. Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete. *Constr Build Mater* 2011; 25: 879-885.
18. Kurama H, Topcu IB, Karakurt C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. *J Mater Process Tech* 2009; 209: 767-773.
19. Topcu IB, Isikdag B. Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete. *J Mater Process Tech* 2008; 204: 34-38.





เลขทะเบียน.....

หนังสือยินยอมการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการบนเว็บไซต์  
ฐานข้อมูล NU Digital Repository (<http://obj.lib.nu.ac.th/media/>)  
สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตามที่ข้าพเจ้า ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก (ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์) ได้ส่งผลงานทางวิชาการ  
การรายงานการวิจัย (เรื่อง) รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์การออกแบบเชิงนิเวศเศรษฐกิจของอิฐมวลเบาสำหรับ  
พื้นที่เขตอากาศร้อนชื้น

ปีที่พิมพ์ 2556

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานทางวิชาการเป็นลิขสิทธิ์ของข้าพเจ้า ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก  
(ผู้วิจัยร่วม) และท่านอื่น ๆ เป็นเจ้าของลิขสิทธิ์ร่วม และเพื่อให้ผลงานทางวิชาการของข้าพเจ้าเป็น  
ประโยชน์ต่อการศึกษาและสาธารณชน จึงอนุญาตให้เผยแพร่ผลงาน ดังนี้

- อนุญาตให้เผยแพร่  
 ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ เนื่องจาก.....  
.....  
.....

ลงชื่อ .....  
( **ดร.ฉันทนา พันธุ์เหล็ก** )

วันที่.....

หมายเหตุ ลิขสิทธิ์ใดๆ ที่ปรากฏอยู่ในผลงานนี้เป็นความรับผิดชอบของเจ้าของผลงาน ไม่ใช่ของสำนักหอสมุด