

ประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังสองชั้นมีช่องระบายอากาศ ทำด้วยวัสดุดินเผา



นางสาวกิติพร สมวงศ์ชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THERMAL PERFORMANCE OF OPEN JOINT VENTILATED FACADE MADE OF TERRACOTTA

Miss Kitiporn Somwongchai



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

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

5873553925 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: THERMAL PERFORMANCE / VENTILATED FACADE / ENERGY EFFICIENCY

KITIPORN SOMWONGCHAI: THERMAL PERFORMANCE OF OPEN JOINT VENTILATED FACADE MADE OF TERRACOTTA. ADVISOR: ASSOC. PROF. PHANCHALATH SURIYOTHIN, 110 pp.

This research aims to evaluate thermal performance of façade walls made of terracotta that construct with an air cavity between wall and slabs. In this paper studied in Thailand on hot summer climate. The prototype walls were tested by using the test box and installed with temperature measuring instrument in the different kinds of wall test box include: (1.) normal exterior façade of the wall (2.) the terracotta materials walls size 30x30x1.8 cm construct on steel frame, creating 10 mm. thickness of air cavity between wall and slabs. All wall were analyzed by measuring the temperature of the test boxes and used the mathematical equations Then simulation the use of energy by VisualDOE4.1

In the experimental part, it was found that ventilated façade wall made of terracotta can help façade wall have R-Value and heat protection thermal performance better than normal exterior wall façade. In the simulation part, it was found that In the buildings where air conditioning is used only at night, ventilated façade wall made of terracotta reduce energy consumption only at maximum hourly energy used in cooling systems. In the buildings where air conditioning is used only in the daytime, using wall with high thermal resistance helps prevent heat from entering the building, which reduce the burden on cooling systems, and allowed the lowest total energy consumption. Ventilated façade wall made of terracotta posses anti-heat radiation into interior during the day and provide faster exotherm at night, in maximum hourly energy used in cooling systems. have comparable maximum performance of reducing energy use in building compare with basecase wall. This research will propose the alternative way of using materials by terracotta is an alternative in design for energy building and which is suitable for weather in Thailand.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้ ที่ได้รับจากคณาจารย์ทุกท่าน ในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุตตร และ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน และเป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ และคอยชี้แนะแนวทางที่ดีและเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์และในการศึกษา ตั้งแต่เข้ามาศึกษา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์ สำหรับความรู้ต่างๆและให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่เข้ามาศึกษา ในหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาร่วมสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำรวมทั้งมุมมองหลาย ๆด้านที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือในงานวิจัย และคอยช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบพระคุณครอบครัวสมวงศ์ชัย ครอบครัวโสภณวุฒ และครอบครัวเกษมากุล ที่ให้ความสนับสนุน และคอยช่วยเหลือ รวมทั้งให้กำลังใจในด้านต่างๆจนจบการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆน้อง ในบริษัทพีโอเออินทีเรีย จำกัด ที่ให้ความสนับสนุน คอยให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่น IDEA7, IDEA8 รวมทั้ง IDEA9 ที่คอยให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีมาตลอด

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ เพื่อน ๆทุกคน ที่ให้ความสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญแผนภูมิ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	5
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.....	10
2.1.1 การนำความร้อน (Conduction).....	11
2.1.2 การพาความร้อน (Convection).....	12
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation).....	12
2.2 การถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน.....	13
2.2.2 ค่าความต้านทานความร้อน.....	13
2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	14

2.2.4 คุณสมบัติของรังสีความร้อนและการแผ่รังสีของพื้นผิว.....	14
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนผ่านผนังเปลือกอาคาร.....	16
2.3.1 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation).....	16
2.3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผนังเปลือกอาคาร.....	17
2.3.3 ระบบผนังสองชั้นในอาคาร.....	20
2.3.4 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อนในอาคาร.....	20
2.4 ลักษณะทางกายภาพของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta.....	24
2.4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta.....	24
2.4.2 ลักษณะทั่วไปของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta.....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนให้อาคาร.....	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 แนวทางการวิจัย.....	32
3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	32
3.2.1 การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
3.2.2 ตัวแปรในการวิจัย.....	33
3.2.3 ลักษณะทางกายภาพของกล่องทดลอง.....	34
3.2.4 เครื่องมือเก็บข้อมูล.....	35
3.3 การกำหนดรูปแบบและขั้นตอนการผลิตกล่องทดลอง.....	39
3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การประกอบโครงกล่องทดลอง.....	39
3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมผนังทดสอบที่ 1 และกล่องทดลอง.....	40
3.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมผนังทดสอบที่ 2.....	40
3.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การติดตั้งผนังทดสอบกับกล่องทดลอง.....	41
3.4 ช่วงการทดลอง (กล่องทดลอง).....	41

3.4.1	ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิ.....	41
3.4.2	ขั้นตอนที่ 2 การเก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิ.....	42
3.4.3	ขั้นตอนที่ 3 การรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิ.....	43
3.4.4	ขั้นตอนที่ 4 การใช้ผลจากกล่องทดลองในการเข้าสมการทางคณิตศาสตร์.....	43
3.5	ช่วงการทดลอง (จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์).....	44
3.5.1	ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปแบบของอาคารในโปรแกรม VisualDOE4.1.....	44
3.5.2	ขั้นตอนที่ 2 ป้อนข้อมูลต่างๆในโปรแกรม VisualDOE4.1.....	46
3.5.3	การตั้งค่าสถานะการใช้งานของอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE4.1.....	47
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	51
4.1	ผลการทดลอง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน จากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง... 51	
4.1.1	ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง ผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด (base case) กับผนัง terracotta เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 24 ชั่วโมง ในวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky).....	53
1)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก	53
2)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก	54
3)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ด้านใน	55
4)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air).....	58
4.1.2	ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง ผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด (base case) กับผนัง terracotta เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 24 ชั่วโมง ในวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day) ..	60
1)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก	60
2)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก	61
3)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน	62
4)	การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air).....	65
4.1.3	ผลจากการหาค่าความต้านทานความร้อน	66

4.2 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า จากการจำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1	68
4.2.1 อาคารพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางคืน)	68
4.2.2 อาคารพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน)	72
4.2.3 อาคารสำนักงาน (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน)	76
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
5.1 สรุปผลการวิจัย	79
5.1.1 ประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน	79
5.1.2 ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในอาคารประเภทต่างๆ	81
5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก	87
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ	88
ภาคผนวก ข อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองทั้งผนังต้นแบบและผนังทดสอบที่ 2 ตลอด 24 ชั่วโมง	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	110

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่ผลิตจากปูน	3
ตารางที่ 1.2 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่ทำจากดิน	3
ตารางที่ 1.3 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่เป็นโลหะ	4
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสถานะการใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ	48
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลสถานะการใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ	49
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสถานะการใช้งานที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารสำนักงานต้นแบบ	50
ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังทดสอบต่างๆที่ได้จากการทดลอง	68
ตารางที่ 4.2 สรุปผลการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัย	69
ตารางที่ 4.3 สรุปผลการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัย	73
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน.....	76
ตารางที่ 5.1 สรุปค่าคุณสมบัติทางความร้อนของผนังทดสอบต่างๆที่ได้จากการทดลอง	81
ตารางที่ 5.2 สรุปผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานที่ประหยัดได้ (%)	83
ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังต้นแบบ วันที่ 1	92
ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังต้นแบบ วันที่ 2	96
ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังทดสอบที่ 2 วันที่ 1	100
ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังทดสอบที่ 2 วันที่ 2	105

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเทียบกับค่าปกติ (+0.0).....	2
ภาพที่ 1.2 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนและรายปี 2558 ของประเทศไทยที่ต่างจากค่าปกติ (+0.0) (องศาเซลเซียส)	2
ภาพที่ 1.3 แผนผังขั้นตอนการวิจัย	9
ภาพที่ 2.1 แผ่น terracotta และตัวอย่างการติดตั้ง	25
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแผ่น Terracotta Facade Panels ที่มีสีและพื้นผิวที่แตกต่างกัน	26
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างแผ่น Terracotta Baguette & Louver	27
ภาพที่ 2.4 สีของชิ้นตัวอย่างแผ่น terracotta	27
ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta	28
ภาพที่ 3.1 โฟมโพลียูรีเทนหนา 2 นิ้ว และพัดลมระบายอากาศที่ใช้ในการทดลอง.....	35
ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบภายนอกของ 12 Channels Temperature Recorder.....	35
ภาพที่ 3.3 แพลนกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1.....	36
ภาพที่ 3.4 แพลนกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2.....	36
ภาพที่ 3.5 รูปตัดของกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1.....	37
ภาพที่ 3.6 รูปตัดของกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2.....	38
ภาพที่ 3.7 การประกอบโครงเหล็กสำหรับกล่องทดลอง	40
ภาพที่ 3.8 โครงเหล็กหลังประกอบกับโฟมโพลียูรีเทนสำหรับกล่องทดลอง	40
ภาพที่ 3.9 แผ่นผนังทดสอบแผ่น terracotta ที่ 2 เมื่อติดตั้ง short beam ของกล่องทดลองที่ 2..	41
ภาพที่ 3.10 การติดตั้งผนังทดสอบ และผนังทดสอบกับกล่องทดลองที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ..	41
ภาพที่ 3.11 การติดตั้งเซ็นเซอร์เก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของผนังต้นแบบ กับผนัง ทดสอบ และ อุณหภูมิช่องว่างอากาศภายในผนัง	42
ภาพที่ 3.12 การติดตั้งเซ็นเซอร์เก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิของผิวผนังด้านใน อุณหภูมิอากาศภายนอก..	42
ภาพที่ 3.13 แพลนอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ	44

ภาพที่ 3.14 รูปด้านอาคารพักอาศัยต้นแบบ	45
ภาพที่ 3.15 แพลน และรูปด้านอาคารสำนักงานต้นแบบ	45
ภาพที่ 3.16 รูปแบบโปรแกรม VisualDOE4.1.....	46
ภาพที่ 3.17 การป้อนข้อมูลรายละเอียดของผนังเปลือกอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1.....	47
ภาพที่ 4.1 สถานที่ทดลองและการศึกษาด้วยกล่องทดลอง.....	51
ภาพที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างแผ่นกระเบื้อง ทั้งหมด 7 ตัวอย่าง	89
ภาพที่ ก.2 ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ Terracotta	90



สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ	53
แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ	54
แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด	55
แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนัง terracotta.....	56
แผนภูมิที่ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก – ใน (Delta-T) ของผนังทดสอบต่าง ๆ	57
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ.....	58
แผนภูมิที่ 4.7 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (Inlet air) – อากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ.....	59
แผนภูมิที่ 4.8 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ	60
แผนภูมิที่ 4.9 อุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ	61
แผนภูมิที่ 4.10 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด.....	62
แผนภูมิที่ 4.11 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนัง terracotta	63
แผนภูมิที่ 4.12 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก – ใน (Delta-T) ของผนังทดสอบ ต่าง ๆ.....	64
แผนภูมิที่ 4.13 อุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ.....	65
แผนภูมิที่ 4.14 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (Inlet air) – อากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ.....	66
แผนภูมิที่ 4.15 ค่าความต้านทานความร้อนของผนังทดสอบต่าง ๆ ($m^2 \cdot ^\circ C / W$).....	67
แผนภูมิที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานของอาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ ส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน) และค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ basecase (%).....	70
แผนภูมิที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่าง ๆ.....	71
แผนภูมิที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่าง ๆ.....	72

แผนภูมิที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานของอาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน) และค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ basecase (%).....	73
แผนภูมิที่ 4.20 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่างๆ.....	74
แผนภูมิที่ 4.21 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่างๆ.....	75
แผนภูมิที่ 4.22 ผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน	77
แผนภูมิที่ 4.23 ผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน	77
แผนภูมิที่ 4.24 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน ตั้งแต่เวลา 9:00AM – 7:00 PM	78
แผนภูมิที่ 5.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก – ใน (Delta-T) ของผนัง terracotta..	80



บทที่ 1

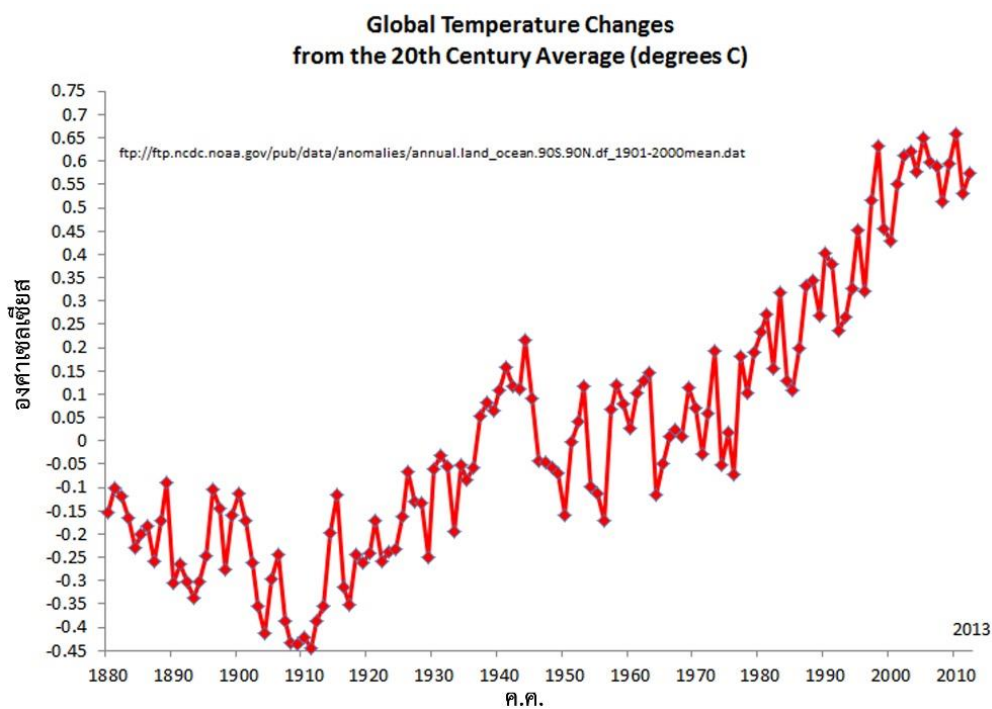
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุณหภูมิอากาศของโลกร้อนขึ้นทุกปี เนื่องจากสภาพแวดล้อมถูกทำลายและการสิ้นเปลืองในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติของมนุษย์ เมื่อประชากรมนุษย์เพิ่มมากขึ้น ปริมาณการใช้ทรัพยากรธรรมชาติยิ่งมีมากขึ้น มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตสิ่งอำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นไปด้วย ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอากาศ มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) มากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming) ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2559 องค์การบริหารด้านบรรยากาศและสมุทรศาสตร์แห่งชาติ หรือ NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) สหรัฐอเมริกา ได้รายงานสภาพอากาศเกี่ยวกับอุณหภูมิของโลกในปี พ.ศ. 2558 ว่าเป็นปีที่ร้อนที่สุดปีหนึ่ง และจากการศึกษาสภาวะอากาศของประเทศไทย พบว่า ในปี พ.ศ. 2558 เป็นปีที่ประเทศไทยมีปริมาณฝนน้อยและต่ำกว่าค่าปกติเกือบทุกเดือน จึงส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยตามภาคต่างๆของประเทศไทยสูงกว่าค่าปกติเกือบทุกภาคด้วย โดยอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีของประเทศไทยสูงกว่าค่าปกติ 0.8 องศาเซลเซียส และสูงกว่าปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2557) (ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

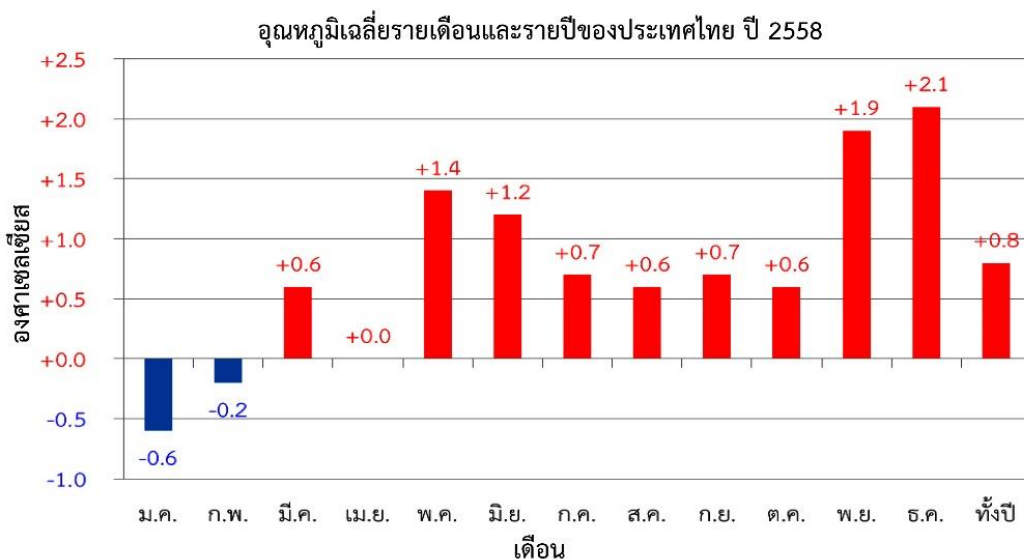
ประเด็นเรื่องการลดภาวะโลกร้อน การลดการใช้พลังงาน เป็นสิ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในทางสถาปัตยกรรมไม่ว่าจะเป็นขั้นการก่อสร้างอาคาร กิจกรรมการก่อสร้าง การใช้งานอาคาร ล้วนเป็นการใช้พลังงานและล้วนปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งสิ้น พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคารเป็นพลังงานหนึ่งที่ถูกใช้บริโภคเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนขึ้น การใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคารส่วนใหญ่จึงเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าในการปรับสภาวะอากาศภายในอาคารด้วยระบบปรับอากาศ เกิดผลกระทบต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในการทำความเย็น ดังนั้น สถาปนิกสามารถช่วยในการลดการใช้พลังงานในอาคารได้ ด้วยการสร้างอาคารที่ลดการใช้พลังงานในอาคาร เช่น การใช้พลังงานสะอาด การออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศ การลดการใช้ระบบปรับอากาศ การเลือกวัสดุเปลือกอาคารที่เหมาะสมยังเป็นทางเลือกหนึ่งในการลดการะใช้พลังงานหลักของอาคาร

ปัจจุบันมีการเล็งเห็นความสำคัญของวัสดุก่อสร้าง ที่สามารถช่วยในการลดการใช้พลังงานในอาคาร และลดภาวะโลกร้อนได้ ตั้งแต่การเลือกใช้วัสดุก่อสร้างหรือวัสดุประกอบอาคารแบบคาร์บอนต่ำ (low carbon) วัสดุที่สามารถรีไซเคิล (recycle) ได้ รวมทั้งกระบวนการผลิตวัสดุที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยที่สุด



ภาพที่ 1.1 ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเทียบกับค่าปกติ (+0.0)

(ข้อมูลจาก : NASA GHCN-M version 3.1.0)



ภาพที่ 1.2 อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนและรายปี 2558 ของประเทศไทยที่ต่างจากค่าปกติ (+0.0) (องศาเซลเซียส) (ข้อมูลจาก : กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

การแก้ปัญหาการใช้พลังงาน และการลดภาวะโลกร้อน ควรคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น การป้องกันความร้อนเข้าสู่เปลือกอาคาร การป้องกันความร้อนด้วยระบบผนังอาคาร การใช้ประโยชน์จากปัจจัยธรรมชาติ การใช้วัสดุที่ทำจากธรรมชาติ เป็นต้น มีการศึกษาพลังงานที่ใช้ในการผลิตวัสดุ (embodied energy) รวมทั้งปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นตลอดกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นการประเมินที่สำคัญมาก สามารถควบคุมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตที่ดี จะเห็นได้ว่าวัสดุก่อสร้างที่ทำจากดินใช้พลังงานในการผลิตน้อย ดังแสดงในตารางที่ 1.1-1.3

ตารางที่ 1.1 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่ผลิตจากปูน (Berge, 1976)

วัสดุ	อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต(°C)	พลังงานที่ใช้ในการผลิต (MJ/kg)
ปูนขาว	900-1000	4.5-5.0
แร่ยิปซัม	200	1.2-1.4
ซีเมนต์พอร์ตแลนด์	1400-1500	3.6-4.0
กระจก	1400	10.0
กระจก (รีไซเคิล 50%)	1200	7.0

ตารางที่ 1.2 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่ทำจากดิน (Berge, 2009)

วัสดุ	อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต(°C)	พลังงานที่ใช้ในการผลิต (MJ/kg)
Sand and Gravel	-	0.5
Earth, compressed	-	0.5
Vitri-fired bricks	1050-1300	3.5
Well-fired bricks	800-1050	3.0
Medium-fired bricks	500-800	2.5
Low-fired bricks	350-500	2.0
Cellular bricks	1000 (approx)	3.5
Ceramic tiles	1100 (approx)	8.0
Expanded clay pellets	1150 (approx)	3.0
Zytan	1200 (approx)	4.0

ตารางที่ 1.3 Embodied energy ในวัสดุก่อสร้างหลักที่เป็นโลหะ (Berge, 2009)

ชนิดโลหะ	From ore (MJ/kg)	Recycling 50% (MJ/kg)	Recycling 100% (MJ/kg)
อะลูมิเนียม	165-260	89-95	13-30
เหล็ก	21-25	18	6-10
ทองแดง	80-125	55	

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตใกล้เส้นศูนย์สูตร ที่มีสภาพอากาศแบบร้อนชื้นตลอดทั้งปี ดังนั้นการป้องกันความร้อนเข้าสู่ภายในอาคาร จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ ระบบผนังอาคารเป็นส่วนประกอบของอาคารที่ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์โดยตรง ดังนั้นการศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนด้วยวัสดุผนังอาคาร โดยการเลือกใช้ประเภทของวัสดุและวิธีการติดตั้งระบบผนังอาคารที่มีส่วนช่วยในการป้องกันความร้อน จึงเป็นหนึ่งในวิธีการออกแบบอาคารที่มีความสำคัญ ในการลดการใช้พลังงานลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศในอาคาร

หนึ่งในวัสดุที่รู้จักกันมานาน คือ วัสดุเปลือกอาคารแผ่น terracotta ผู้ผลิตแผ่น terracotta NBK North America (2016) (NBK North America, 2016) ได้กล่าวว่า แผ่น terracotta มีรูปแบบการติดตั้งเป็นผนังเปลือกอาคารที่มีศักยภาพ คือ การติดตั้งแบบระบบผนังสองชั้นแบบมีช่องว่างระหว่างแผ่น (open joint) และมีช่องว่างอากาศ (air cavity) และด้วยตัววัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัวคือ วัสดุที่มีรูพรุน ทำให้เมื่อติดตั้งเป็นวัสดุเปลือกอาคารแล้ว เปรียบเสมือนเป็นระบบผนังหายใจได้ นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มีกระบวนการผลิตซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เกิดจากการรีไซเคิลด้วยการนำวัสดุที่มีความแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น เช่น เศษของผลิตภัณฑ์หินภูเขาไฟ, แร่และส่วนผสมอื่น ๆ ทำการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง และอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและเผาด้วยอุณหภูมิสูง 1200 องศาเซลเซียส เป็นเหตุผลที่ทำให้วัสดุนี้มีสีสันทากหลาย มีพื้นผิวธรรมชาติ รวมทั้งพื้นผิวอื่น ๆ ให้เลือกมากมาย ทำให้เป็นที่พึงพอใจในกลุ่มผู้ใช้งาน บุคคลทั่วไป และสถาปนิก และยังเป็นวัสดุที่ทนต่อสภาพอากาศมากที่สุดชนิดหนึ่งด้วย

ในการวิจัยนี้จึงทำการศึกษเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และการใช้พลังงานในอาคารที่ใช้วิธีการกันความร้อนด้วยการติดตั้งวัสดุเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ที่ติดตั้งกับผนังภายนอกอาคารแบบมีช่องว่างอากาศ เพื่อทดสอบว่าการใช้แผ่น terracotta เป็นวัสดุเปลือกอาคารนั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนให้ภายในอาคาร และลดภาระการทำความเย็นในอาคารแต่ละประเภทที่มีความแตกต่างกันในแง่ของเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศ หรือไม่ด้วยการตรวจวัดอุณหภูมิบริเวณต่างๆของผนังและจำลองการใช้พลังงานในอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1 โดยมีสมมุติฐานว่า การกันความร้อนด้วยการติดตั้งวัสดุเปลือกอาคาร

ชนิดแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ มีผลต่อการป้องกันความร้อนภายในอาคาร และช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารแต่ละประเภท ซึ่งผลการศึกษานำไปใช้เป็นแนวทางในการใช้วัสดุในอาคารที่ป้องกันความร้อนได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางความร้อนของผนังเปลือกอาคารที่ติดตั้งด้วยแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน วิเคราะห์ค่าการต้านทานความร้อน

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในอาคารของผนังเปลือกอาคารที่ติดตั้งด้วยแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศพร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในอาคารตลอดทั้งปี เพื่อประเมินและเสนอแนะแนวทางในการใช้วัสดุผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ในการนำไปใช้งานกับอาคารต่อไป

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของผนังอาคารที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในอาคาร โดยศึกษาเฉพาะปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่อผนังอาคาร รวมทั้งศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการทดลองต่างๆ และกำหนดตัวแปรในการทดลองต่อไป

1.3.2 กำหนดขอบเขตในการศึกษาเฉพาะคุณสมบัติคุณสมบัติทางความร้อนของแผ่น terracotta เป็นหลัก เพื่อความเป็นไปได้ในงานวิจัย

1.3.3 ศึกษาแนวทางการนำวัสดุแผ่น terracotta มาใช้ในอาคาร โดยนำค่าที่วัดได้จากกล่องทดลอง มาใช้คำนวณปริมาณการใช้พลังงานของอาคาร โดยนำมาใช้เป็นข้อมูลในการจำลองผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1 โดยพิจารณาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของแผ่น terracotta เป็นหลัก

1.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารของข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม VisualDOE4.1 เพื่อนำมาศึกษาเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้ากับการใช้วัสดุผนังอาคารที่เป็นวัสดุผนังทั่วไป เพื่อหาแนวทางการเลือกใช้ผนังอาคารที่มีความเหมาะสมในอาคาร

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.1 การศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง งานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลในการวิเคราะห์แนวคิดและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในอาคาร รวมทั้งทฤษฎีต่างๆของผนังอาคารที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคาร โดยทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีเนื้อหา ดังนี้

- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน
- ศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับแนวทางการป้องกันความร้อนผ่านเปลือกอาคารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติผ่านผนังเปลือกอาคาร ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผนังเปลือกอาคาร ระบบผนังสองชั้นภายนอกอาคาร รวมทั้งคุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อนในอาคาร
- ลักษณะทางกายภาพ และข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความร้อนให้อาคาร ด้วยวัสดุผนังอาคาร

1.4.2 ตั้งสมมุติฐานในการวิจัย

วัสดุเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta เป็นระบบผนังที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนให้อาคารได้ดีกว่าผนังอาคารทั่วไป ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าหาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารต่อไป

1.4.3 กำหนดตัวแปรในการวิจัย

- ตัวแปรต้น ได้แก่ วัสดุผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดที่ไม่มีวัสดุปิดผิวใดๆ กับแผ่น terracotta ที่ติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ และแบบจำลองที่มีประเภทอาคาร รวมทั้งช่วงเวลาในการใช้งานเครื่องปรับอากาศแตกต่างกัน
- ตัวแปรตาม ได้แก่ อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง แต่ละบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ, ค่าความต้านทานความร้อน และผลจากการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแบบจำลอง ซึ่งได้แก่ ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร และ ผลของการใช้พลังงานในการทำความเย็นรายชั่วโมง
- ตัวแปรควบคุม ได้แก่ ผนังแผ่น terracotta สีอิฐขนาด 30 x 30 เซนติเมตรหนา 1.8 เซนติเมตร ที่ติดตั้งบนโครงเหล็กที่มีช่องว่างอากาศกว้าง 10

เซนติเมตร รวมทั้งรายละเอียดต่าง ๆ ประกอบในการจำลอง ในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง, สภาพภูมิอากาศขณะทำการทดลอง ในส่วนของกล่องทดลอง และรายละเอียดต่าง ๆ สำหรับวัสดุที่ใช้ประกอบอาคารในการจำลองกับอาคารแต่ละประเภทสำหรับโปรแกรม VisualDOE4.1

1.4.4 การศึกษาการออกแบบการทดลองเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพทางความร้อนที่เกิดจากการใช้วัสดุเปลือกอาคารด้วยแผ่น terracotta โดยการเปรียบเทียบระหว่าง ผนังภายนอกอาคารที่จำลองด้วยแผ่นสมาร์ทบอร์ด กับผนังภายนอกอาคารที่ติดตั้งผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซนติเมตร บนแผ่นสมาร์ทบอร์ด โดยใช้การทดลองทั้งหมด 2 รูปแบบคือ

- การใช้กล่องทดลอง (Physical Model) เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของผนังทดสอบที่ติดตั้งผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta ในสภาพภูมิอากาศจริง เพื่อนำมาวิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคารต่อไป
- การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) ด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 เพื่อให้ทราบถึงผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี โดยทำการศึกษาอาคารทั้ง 3 ประเภท ที่มีการใช้งานระบบปรับอากาศในเวลาแตกต่างกัน ได้แก่ บ้านพักอาศัย (ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางคืน), อาคารพักอาศัย (ใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืน) และอาคารสำนักงาน (ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน)

1.5.5. สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์เพื่อหาข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- วิเคราะห์ผลการทดลองจากกล่องทดลอง เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของผนังทดสอบ ทั้ง 2 ประเภทที่แตกต่างกัน ของค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆที่ได้มาเข้าสมการหาค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนต่างๆ เช่น ค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุ (Thermal Resistance, R)
- สรุปผลจากการทดลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ให้เห็นถึงผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี

- วิเคราะห์และสรุปผลจากการทดลองทั้ง 2 แบบ เพื่อเสนอแนวทางเลือกใช้ผนังเปลือกอาคาร แผ่น terracotta

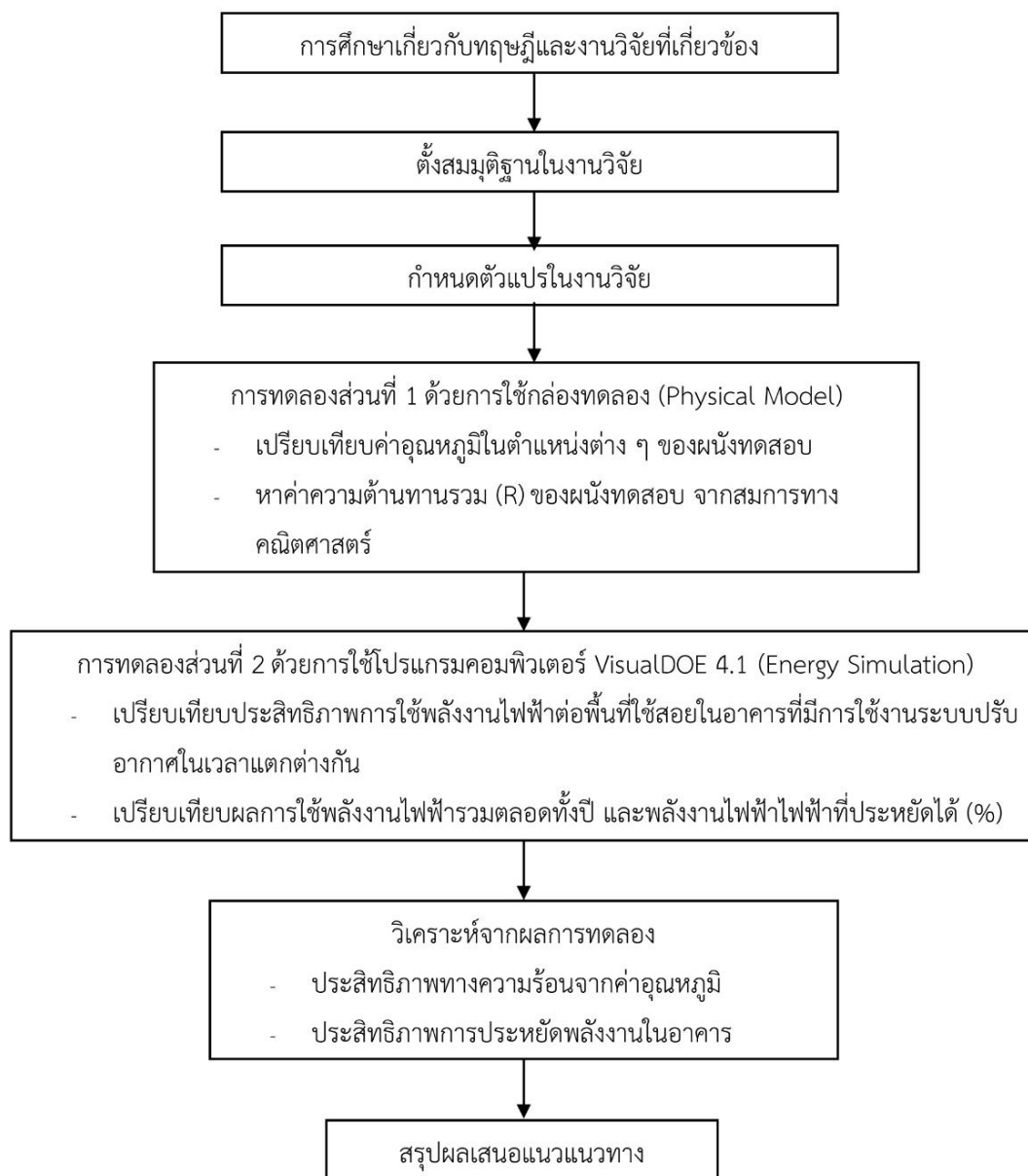
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อให้ทราบถึงปัญหาแนวทางและประสิทธิภาพทางด้านความร้อนของผนังเปลือกอาคาร ชนิดแผ่น terracotta เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าวิจัยต่อไป

1.5.2 เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และคุณสมบัติเชิงความร้อนของผนังเปลือกอาคาร ชนิดแผ่น terracotta

1.5.3 เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของการใช้พลังงานในอาคารตลอดทั้งปีของแผ่น terracotta เปรียบเทียบผนังอาคารที่ใช้วัสดุผนังทั่วไป

1.5.4 เพื่อนำผลที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงาน ในการออกแบบอาคารที่ประหยัดพลังงานและทำให้อาคารเหมาะสมอยู่สภาวะน่าสบายด้วยการนำแผ่น terracotta ประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในอาคารพักอาศัยในอนาคต



ภาพที่ 1.3 แผนผังขั้นตอนการวิจัย (ที่มา : ผู้วิจัย)

บทที่ 2

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาโดยมุ่งเน้นศึกษาตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงข้อมูลพื้นฐานและนำไปใช้ในงานวิจัย จึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีทางความร้อน การป้องกันความร้อนผ่านผนังเปลือกอาคาร รวมทั้งระบบผนังอาคารที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแผ่น terracotta สามารถกำหนดวิธีการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังนี้

- ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน
- การถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- ทฤษฎีเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนผ่านผนังเปลือกอาคาร
- ลักษณะทางกายภาพ และข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนให้อาคาร

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

อิทธิพลทางความร้อนจากภายนอกอาคารหลายอย่าง เช่น ความร้อนจากอากาศร้อนภายนอก ความร้อนจากการดูดกลืนของรังสีอาทิตย์ รวมทั้ง คุณสมบัติของวัสดุผนังและหลังคาของอาคาร ล้วนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความร้อนในอาคาร ความร้อนเหล่านี้เกิดจากกระบวนการถ่ายเทความร้อน (ASHRAE, 1997) ดังนี้

- การนำความร้อน (Conduction)
- การพาความร้อน (Convection)
- การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

ความร้อนเป็นพลังงานของโมเลกุลที่เคลื่อนที่โดยสสาร โดยความร้อนจะเคลื่อนที่จากวัสดุสสารที่ร้อนสู่วัสดุหรือสสารที่เย็นกว่าเสมอ โดยอุณหภูมิก็คือการวัดปริมาณพลังงานความร้อนที่อยู่ในวัสดุหรือสสารนั้นๆ ดังนั้นถ้าวัสดุหรือสสารใด ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็จะไม่มีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อน คือ การถ่ายเทของพลังงานที่เกิดจากความไม่สมดุลทางความร้อนของ 2 วัสดุหรือสสาร โดยเมื่อความร้อนถ่ายเทจากวัสดุหรือสสารหนึ่งไปยังอีกวัสดุหรือสสารหนึ่งทำให้

วัสดุหรือสสารที่ได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยสามารถอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการถ่ายเทความร้อน ได้ดังนี้

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน เกิดจากการเคลื่อนที่ของพลังงานระหว่างโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ติดกันด้วยการถ่ายเทความร้อนไปยังโมเลกุลข้างเคียงโดยโมเลกุลเคลื่อนไหว วัสดุจะมีการนำความร้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุล วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง จึงนำความร้อนได้มากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เช่น วัสดุโลหะจำพวก อลูมิเนียม เหล็ก เป็นต้นนำความร้อนได้ดีกว่าวัสดุธรรมชาติเช่น อิฐ ไม้ ซึ่งมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่า ยกตัวอย่างเช่น ผนังอาคารที่ทำหน้าที่เป็นผนังป้องกันความร้อนด้วยการมีช่องว่างอากาศภายใน ทั้งนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยบางอย่างด้วย ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุหรือสสาร ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างผิววัสดุหรือสสารนั้น ความหนาของวัสดุ เป็นต้น

การเกิดการนำความร้อนในอาคาร เกิดจากการที่วัสดุผนังหรือวัสดุหลังคามีค่าการป้องกันความร้อนต่ำหรือมีค่าการเป็นฉนวนกันความร้อนต่ำ โดยสามารถลดค่าการนำความร้อนให้กับอาคารได้หลายวิธี เช่น การติดตั้งฉนวนกันความร้อน การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน มีสมการในการคำนวณ ดังนี้ (MeyerW.T., 1979)

$$Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$$

Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m ² °C)
A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m ²)
T _o	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า (°C)
T _i	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า (°C)

จากสมการข้างต้น สามารถสรุปสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนได้ว่า ยังมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงแปลว่าวัสดุผนังนั้นสามารถถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารมากและมีค่าความต้านทานความร้อนรวมของวัสดุน้อย ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุในอาคาร ควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำ เพื่อหวังความร้อนให้เข้ามาภายในอาคารน้อยที่สุด

2.1.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากภายนอก โดยการเคลื่อนที่ของของไหลผ่านตัวกลางด้วยการพาความร้อนผ่านอากาศหรือน้ำ โดยสสารเมื่อถูกทำให้ร้อน โมเลกุลจะเคลื่อนที่เร็วขึ้นและกระจายไปยังทิศทางต่างๆ ของเหลวและก๊าซจะลอยตัวขึ้น การนำความร้อนนั้นเกิดจากการเคลื่อนย้ายของพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลใกล้เคียงโดยโมเลกุลไม่เปลี่ยนตำแหน่ง แต่การพาความร้อนนั้นโมเลกุลเป็นตัวเคลื่อนที่พาพลังงานไป การพาความร้อนในอาคาร เกิดจากลมเป็นตัวกลางพาความร้อนเข้ามาในอาคาร ในลักษณะการพาความร้อน มีสมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้ (MeyerW.T., 1979)

$$Q = h \cdot A \cdot (T_a - T_s)$$

Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มอากาศบริเวณที่ของไหลผ่าน (W/m ² °C)
A	คือ	พื้นที่ของวัสดุที่ของไหลผ่าน (m ²)
T _a	คือ	อุณหภูมิอากาศ (°C)
T _s	คือ	อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ (°C)

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนในอาคาร เกิดได้ 2 สาเหตุคือ การแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ลงสู่ผนังและหลังคาของอาคาร ซึ่งเกิดจากแสงแดดตกกระทบลงบนผนังและหลังคาของอาคาร พลังงานความร้อนจากแสงแดดจะดูดกลืนและสะสมบนผิวของอาคาร ซึ่งความร้อนจะซึ่งทะลุผ่านวัตถุเข้ามาในอาคารด้วยกระบวนการนำความร้อน และการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านกระจกหน้าต่างของอาคาร ในลักษณะการพาความร้อน

2.2 การถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลกระทบต่อเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบเปลือกอาคาร คือ ส่วนของอาคารที่สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคารทั้งส่วนที่รับแสงและส่วนโปร่งแสง ระบบเปลือกอาคารที่ดีควรสามารถลดปริมาณความร้อนและความชื้นที่เข้าสู่อาคารได้ และช่วยลดการทำงานของเครื่องทำความเย็นภายในอาคารได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวเฉพาะเปลือกอาคารชนิดผนังทึบแสง โดยมีสมการในการคำนวณดังนี้ (ASHRAE, 1997)

$$Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$$

Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m ² °C)
A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m ²)
T _o	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า (°C)
T _i	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า (°C)

$$\text{หรือ } Q = U \cdot A \cdot (\text{CLTD})$$

Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (S. Chirattananon and J. Taweekun)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m ² °C)
A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m ²)
CLTD	คือ	ภาวะความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า (Cooling Load Temperature Differential - °C)

โดยสมการ $Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$ ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและอุณหภูมิภายในอาคารมีความคงที่ (Steady State Condition)

ส่วนสมการ $Q = U \cdot A \cdot (\text{CLTD})$ ใช้เมื่อต้องการหาค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ใกล้เคียงความเป็นจริง โดย ค่า CLTD คือค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิซึ่งไม่คงที่จากอิทธิพลของสภาพแวดล้อม เช่น เวลา ฤดูกาล อิทธิพลของแสงแดด สภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity : K, K-value) (หน่วย : W/m²°C หรือ Btu/hr ft°F) คือ ค่าที่ระบุถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท หาได้จากการคำนวณอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านหน้าตัดพื้นผิววัสดุสองด้านที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

2.2.2 ค่าความต้านทานความร้อน

ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance : R, R-value) (หน่วย : m².°C /W หรือ (hr ft°F)/Btu) คือ ค่าที่ใช้กำหนดค่าฉนวนกันความร้อนภายในอาคาร บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานความร้อนของวัสดุ เป็นส่วนกลับของค่าการนำความร้อน หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความ

หนาของวัสดุที่ความร้อนไหลผ่านกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K-value) วัสดุใดๆยิ่งค่า R สูง แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนมาก คำนวณได้จากสูตร

$$R = \Delta X / K$$

R	คือ	ค่าความต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)
ΔX	คือ	ความหนาของวัสดุที่นำมาพิจารณา (m)
K	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W / m^2 \cdot ^\circ C$)

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U, U-value)(หน่วย : $W / m^2 \cdot ^\circ C$ หรือ Btu.in) ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากอาคาร เป็นผลรวมส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวมของวัสดุทั้งหมดที่มาประกอบกันเป็นเปลือกอาคารในกรณีผนังหรือหลังคา ซึ่งนับตั้งแต่ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศชั้นนอกสุดของเปลือกอาคาร วัสดุภายนอก วัสดุฉนวนภายนอก ช่องอากาศภายในผนัง วัสดุภายใน และค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายใน โดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$U = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + \dots + (1/R_n)$$

R คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

R_n คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุลำดับที่ n

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ

($W / m^2 \cdot ^\circ C$)

2.2.4 คุณสมบัติของรังสีความร้อนและการแผ่รังสีของพื้นผิว

รังสีความร้อนในธรรมชาตินั้นประกอบไปด้วยรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาว

- รังสีคลื่นสั้น หรือรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Radiation)

วัสดุที่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ผิววัสดุจะสะท้อนรังสี (Reflectance - ρ) ถ้า

วัสดุนั้นโปร่งแสงจะเกิดการส่งผ่านรังสี (Transmittance - τ) ตัวเนื้อวัสดุ และรังสี

ที่เหลือจะถูกดูดกลืน (Absorptance - α) เข้าสู่ตัวเนื้อวัสดุ ดังสมการ $\rho + \alpha + \tau$

= 1 ซึ่งการดูดกลืนจะเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้วัสดุนั้นๆมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือ

น้อยเพียงใด โดยการดูดกลืนมีสมการในการคำนวณดังนี้

- รังสีคลื่นยาว หรือรังสีความร้อนจากผิววัสดุ (Longwave Radiation)

ในกรณีของวัสดุทึบแสง เมื่อวัสดุได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์จะดูดกลืนรังสีนั้นไว้และคายรังสีความร้อนออกมาในช่วงคลื่นยาว ซึ่งในการคายความร้อนรังสีในช่วงคลื่นยาวนี้ไม่สามารถทะลุกระจกได้ เป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect)

วัตถุดำในอุดมคติ (black body) คือวัสดุที่มีการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ (perfect emitted = 1) ดังนั้นในวัตถุใดๆ ค่าการแผ่รังสีความร้อน (emissivity) จะเกิดจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนกับวัตถุดำในอุดมคติดังกล่าว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 เสมอ หากยิ่งวัตถุใดๆ นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 เท่าใด แสดงว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติในการคายและแผ่รังสีความร้อนในปริมาณมาก

การแผ่รังสีความร้อนช่วงรังสีคลื่นยาว สามารถแบ่งตามประเภทของวัสดุได้ดังนี้

1) วัสดุธรรมชาติประเภทโลหะ มีค่าการคายรังสีความร้อนสูงตั้งแต่ 0.85 ขึ้นไป

2) วัสดุประเภทโลหะ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- โลหะเคลือบผิว มีค่าการคายรังสีความร้อนสูงตั้งแต่ 0.85 ขึ้นไป

- โลหะไม่เคลือบผิว เช่น อะลูมิเนียมพอยล์ มีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำน้อยกว่า 0.5 ลงไป

เมื่อวัสดุได้รับการแผ่รังสีความร้อน จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิจะมากขึ้นน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับรังสีความร้อนที่ตกกระทบนั้นมีการสะท้อนรังสี (Reflectance - ρ) และรังสีนั้นถูกส่งผ่าน (Transmittance - τ) ไปมากน้อยเพียงใด และรังสีที่เหลือจะถูกดูดกลืน (Absorptance - α) รังสีเข้าสู่เนื้อวัตถุ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

ρ คือ ค่าการสะท้อนของรังสีความร้อนจากพื้นผิว (Reflectivity)

α คือ ค่าการดูดกลืนของรังสีความร้อน (Absorptivity)

τ คือ ค่าการส่งผ่านของรังสีความร้อน (Transmissivity)

สมการข้างต้นใช้อธิบายแนวคิดของความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ โดยผลรวมของค่าการสะท้อนของรังสีความร้อน ค่าการดูดกลืนของรังสีความร้อน และค่าการส่งผ่านของรังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ 100% ของพลังงานความร้อนที่ตกกระทบลงมาทั้งหมด แต่สำหรับวัตถุทึบตัน (Opaque Material) ค่าการส่งผ่านความร้อนเท่ากับ 0 ส่งผลให้ผลรวมของค่าการสะท้อนของรังสีความร้อนและค่าการดูดกลืนของรังสีความร้อนจะเท่ากับ 1

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนผ่านผนังเปลือกอาคาร

2.3.1 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)

- การสร้างความเย็นโดยการพาความร้อน (Convection Cooling)

เป็นการสร้างความเย็นให้กับอาคารโดยวิธีธรรมชาติ โดยการนำความเย็นจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในอาคาร เข้ามาแทนที่ด้วยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารออกไป เมื่อนำหลักการพาความร้อนมาใช้ในระบบผนังเปลือกอาคาร โดยเฉพาะช่วงเวลากลางวันที่มีการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์หลักการพาความร้อนภายในช่องว่างอากาศ จะช่วยลดอุณหภูมิภายในช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอากาศกับผนังภายนอกอาคาร และลดอุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนังอาคารได้

- การคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Night Sky Radiation)

ชั้นบรรยากาศบนท้องฟ้า โดยเฉพาะชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ซึ่งเป็นแหล่งความเย็นที่สำคัญ ทำให้วัตถุต่างๆบนโลกสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน สังเกตได้จากวัตถุบางชนิดในเวลากลางคืนจะมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศในช่วงเวลาเดียวกัน เช่น ปรากฏการณ์หยดน้ำค้างเกาะอยู่ตามยอดหญ้า หรือรถยนต์ ในช่วงเวลากลางคืน

สภาพท้องฟ้าดังที่กล่าวมาเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมความร้อนและการคายความร้อนมีความแปรปรวนได้ เกิดจากสาเหตุที่ ในเวลากลางวัน แหล่งความร้อนจากดวงอาทิตย์ วันที่มีฝุ่นละออง มีเมฆมาก หรือ ครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day) ความร้อนจากดวงอาทิตย์จะส่งผ่านมายังผิวโลกได้น้อยกว่าวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky) ในทางกลับกัน ช่วงเวลากลางคืน ความร้อนที่สะสมในวัสดุต่างๆบนผิวโลกจะคายรังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า เพื่อรักษาสมดุลทางอุณหภูมิแก่พื้นผิวโลก หากในช่วงเวลานั้นมีฝุ่นละออง มีเมฆมาก หรือท้องฟ้าอยู่ในสภาพครึ้มฟ้าครึ้มฝน จะทำให้การคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้ามีประสิทธิภาพน้อยลง

จากที่กล่าวถึงรังสีคลื่นยาว หรือรังสีความร้อนจากผิววัสดุข้างต้น ค่าการคายความร้อนในช่วงคลื่นยาว (longwave radiation) จึงเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในช่วงเวลากลางคืน หากค่าการคายรังสีความร้อนของวัสดุมีค่าสูง จะมีความสามารถในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าสูงตามไปด้วย ในทางกลับกัน วัสดุใดๆที่มีการคายรังสีความร้อนต่ำ จะมีความสามารถในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าต่ำได้ด้วย เช่น อลูมิเนียมพอยด์ เป็นต้น

2.3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผนังเปลือกอาคาร

วัสดุผนังภายนอกอาคาร และวัสดุผนังเปลือกอาคาร เป็นส่วนประกอบอาคารที่มีความสำคัญ และมีพื้นที่มากกว่าส่วนอื่น ๆ ของอาคาร โดยเฉพาะผนังภายนอกอาคารซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับอากาศภายนอกโดยตรง ทำให้มีผลมากต่อการถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในอาคาร ดังนั้น การเลือกใช้วัสดุผนังภายนอกอาคาร ควรพิจารณาเลือกใช้วัสดุควรคำนึงถึงความสวยงาม คงทนแข็งแรง และมีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนและความชื้นจากภายนอกอาคารได้ดี

การพิจารณาเลือกใช้วัสดุผนังภายนอกอาคารหรือวัสดุผนังเปลือกอาคารนั้น ในอาคารที่ต้องการการประหยัดพลังงาน ควรเลือกวัสดุที่มีความต้านทานความร้อนสูง ไม่สะสมความร้อนหรือมีความจุความร้อนต่ำ หรือมวลสารต่ำ และมีการดูดซับความชื้นต่ำ วัสดุผนังภายนอกอาคารที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แบ่งออกตามลักษณะของระบบโครงสร้าง ได้ดังนี้

1) ผนังก่ออิฐฉาบปูน

ผนังก่ออิฐฉาบปูนหรือผนังก่ออิฐดินเผาหรืออิฐมอญ เป็นวัสดุที่ผลิตจากการนำดินเหนียวมาผ่านกระบวนการเผา จนได้วัสดุอิฐที่มีความคงทนแข็งแรง เป็นผนังภายนอกอาคารที่นิยมกันมากที่สุด ในปัจจุบัน มีคุณสมบัติคือ มีมวลมาก จึงดูดกลืนความร้อนสูง ในการก่อสร้างที่มีความหนาของผนังพอเหมาะสำหรับอาคารที่ไม่ติดตั้งระบบปรับอากาศ ในช่วงเวลากลางวัน ผนังก่ออิฐฉาบปูนสามารถช่วยให้เกิดการหน่วงความร้อนไม่ให้เข้ามาภายในอาคารได้ ซึ่งอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร สำหรับอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ ผนังชนิดนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากในช่วงเวลากลางวัน เมื่อความร้อนถูกดูดกลืนและสะสมไว้ในผนังภายนอกอาคาร ทำให้ผนังอาคารจะร้อนมากและจะยังคงร้อนไปจนถึงช่วงค่ำ ส่งผลให้เพิ่มภาระในการทำความเย็น ทำให้เครื่องปรับอากาศต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นในการนำเอาความร้อนออกจากวัสดุ เนื่องจาก ในวันที่แดดร้อนจัด จึงค่อยๆเย็นตัวลง ส่งผลให้อาคารบ้านพักอาศัยที่มีเครื่องปรับอากาศแล้วก่อผนังบ้านด้วยอิฐมอญ ค่าไฟฟ้าจะค่อนข้างแพง)

อย่างไรก็ตาม อิฐมอญมีน้ำหนักมาก และมีขนาดเล็กจึงทำให้ก่อสร้างได้ช้า จึงนิยมใช้ในงานก่อผนังในอาคารที่มีพื้นที่ไม่ใหญ่นัก เช่น บ้านพักอาศัย

2) ผนังคอนกรีตบล็อก

ผนังคอนกรีตบล็อกหรือซีเมนต์บล็อก หรืออิฐบล็อก เป็นชื่อที่ใช้เรียกกันทั่วไป คอนกรีตบล็อกเป็นวัสดุผสมจากซีเมนต์ ทรายหยาบ และน้ำ ซึ่งจะมีน้ำหนักมากจึงมีรูกลวงเพื่อลดน้ำหนักลง เป็นวัสดุที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อเสริมจุดเด่นได้ดีกว่าอิฐมอญ เช่น มีความแข็งแรงกว่าก่ออิฐได้รวดเร็ว ทนทานและน้ำหนักเบากว่า คอนกรีตบล็อกนิยมใช้กับการก่อผนังอาคารทั่วไปทั้งภายในและภายนอก เพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้าง

3) ผนังคอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา เป็น วัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซั่ม น้ำ และผสมพิเศษ ไม่มีส่วนประกอบที่ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม คอนกรีตมวลเบา มีทั้งแบบที่เป็นคอนกรีตมวลเบาที่ใช้สำหรับก่อผนังทั้งภายในและภายนอก ใช้ได้ทั้งผนังรับน้ำหนัก (load bearing wall) และผนังปกติ (non-load bearing wall) สามารถวางได้ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ติดตั้งง่ายและรวดเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้หลายรูปแบบ เช่น แบบบล็อก แบบแผ่น แบบคานเสริมเหล็ก เป็นต้น

ผนังคอนกรีตมวลเบาคุณสมบัติในการประหยัดพลังงานและกันความร้อนได้ดี จึงช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในอาคาร ช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าจากเครื่องปรับอากาศ ผนังคอนกรีตมวลเบา มีคุณสมบัติความเป็นฉนวน มีค่าความต้านทานความร้อนประมาณ 0.6-0.8 m².k/W และสามารถป้องกันเสียงได้ไม่ต่ำกว่า 38 เดซิเบล คอนกรีตมวลเบา ยังสามารถทนไฟได้นานถึง 4 ชั่วโมง มีน้ำหนักเบา กว่าอิฐมวล 2-3 เท่า และเบา กว่าคอนกรีต 4-5 เท่า ส่งผลให้ประหยัดค่าก่อสร้างโครงสร้างอาคารและเสาเข็ม

4) ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

ระบบผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) เป็นระบบผนังที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปในอาคารสูง และได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ทั้งในโครงการหมู่บ้านจัดสรร คอนโดมิเนียม และอาคารสำนักงาน ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นระบบผนังคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จที่ขึ้นรูปมาจากโรงงานตั้งแต่ ช่องประตูหน้าต่าง แล้วนำมาติดตั้งที่หน้างานจริง ทำหน้าที่เป็นผนังรับน้ำหนัก โดยไม่ต้องมีโครงสร้างเสาคานมารองรับ จึงเป็นระบบที่ช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนในการก่อสร้าง

5) ผนังไม้

ไม้ เป็นวัสดุที่นิยมใช้กันมากในอดีต เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาถูก และมีความสวยงามตามธรรมชาติ ในปัจจุบันไม้มีราคาสูงขึ้น เนื่องจากมีปริมาณน้อยลงทำให้ในปัจจุบันจึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก การใช้ไม้เป็นวัสดุผนังภายนอกอาคารสามารถช่วยทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาในอาคารได้ไม่สูงนัก เนื่องจากไม้เป็นฉนวนกันความร้อนประเภทหนึ่ง ในการติดตั้งผนังไม้ จำเป็นต้องติดตั้งไม้ให้มีช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นไม้ เนื่องจากจะทำให้ความร้อนรั่วซึมเข้ามาได้ นอกจากนี้ ไม้ยังเป็นวัสดุที่มีการดูดซับความชื้นสูง จึงไม่เหมาะสมในการใช้งานในอาคารที่มีระบบปรับอากาศ เพราะความชื้นดังกล่าวจะเพิ่มภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ

6) ผนังระบบฉนวนกันความร้อนภายนอก (EIFS)

ระบบฉนวนกันความร้อนภายนอก คือ ระบบที่ประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันเพื่อทำหน้าที่ต่างๆของผนัง ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วนหลักๆได้แก่ ส่วนที่ 1 เป็นวัสดุฉนวน

กันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง เช่น โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene) หรือโฟมอีพีเอส (EPS Foam) เป็นต้น เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่อาคารน้อยที่สุด ส่วนที่ 2 เป็นตาข่ายไฟเบอร์กลาส (Fiberglass Mesh) ทำหน้าที่สร้างความแข็งแรงให้กับระบบผนังและเป็นตัวยึดวัสดุด้วย ส่วนที่ 3 เป็นวัสดุเคลือบภายนอกเกรดอะคริลิก 100% ผสมกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกรดเอ ในอัตราส่วนเท่าๆกัน แล้วจึงเททับลงบนตาข่ายที่วางอยู่บนแผ่นฉนวนกันความร้อนส่วนที่ 1 ช่วยในการเสริมความแข็งแรงและเบสโค้ต (Adhesive Base Coat) สำหรับวัสดุปิดผิว และส่วนที่ 4 เป็นวัสดุเคลือบผิวชั้นนอกสุด โดยการใช้ปูนอะคริลิกสังเคราะห์ 2 ชั้น มีให้เลือกทั้งหมด 40 เฉดสี สามารถกันกระแทก กันสีซีด และคงทนในทุกสภาวะอากาศ ระบบผนังชนิดนี้ จึงมีมวลสารน้อย ไม่สะสมความร้อน และมีความต้านทานความร้อนสูง นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรง และกันความชื้นได้ดี

นอกจากนี้วัสดุผนังเปลือกอาคารที่นิยมใช้ในอาคารทั่วไป สามารถจำแนกออกได้ดังนี้

- ฝาไม้ (Wood Plank Panel) เป็นผนังอาคารนิยมใช้ติดตั้งในงานสถาปัตยกรรมไทย และในอาคารสมัยใหม่ด้วย
- หินกาบ (Stone Cladding Texture) คือ เป็นวัสดุธรรมชาติที่ซึมซับน้ำได้ดี เกิดจากหินชั้นที่เกิดมาจากการทับถมกันของดินจนกลายเป็นชั้นหิน จึงมีความเปราะค่อนข้างสูง ไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้เพื่อรองรับน้ำหนักมากๆ หรือรองรับแรงกระแทกบ่อยๆ นิยมใช้ในหมู่บ้านจัดสรรทั่วไป
- กระเบื้องเซรามิก (Ceramic Tile) สามารถใช้งานในผนังภายนอกได้
- แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ (Fiber Cement Board) หรือแผ่นสมาร์ทบอร์ด เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทางเคมีที่มีส่วนผสมประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่แข็งแรงแต่เปราะหักง่ายหากกรีดเป็นแผ่นบาง ผสมกับเส้นใยเซลลูโลสและซิลิกา ที่มีความเหนียวยืดหยุ่นแล้วอัดด้วยแรงดันสูง ทำให้แผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์มี มีความแข็งแรงและขนาดค่อนข้างบาง มีความยืดหยุ่นในตัว
- แผ่นไม้อัดซีเมนต์ (Wood Cement Board หรือ Cement Bonded Particle Board) หรือ แผ่นวีว่าบอร์ด ผลิตจากซีเมนต์ผสมชิ้นไม้ย่อย (เส้นใยเซลลูโลสจากต้นไม้ผนวกกับทรายซิลิกา) แล้วอัดให้แน่นเป็นแผ่น แผ่นไม้อัดซีเมนต์ไม่สามารถตัดโค้งได้ง่ายต่อการติดตั้ง มีความแข็งแรง ความเหนียวของไม้กับความแข็งแรงของซีเมนต์ทำให้แผ่นไม้อัดซีเมนต์มีทนทานต่อแรงกระแทก มีอายุการใช้งานยาวนาน และมีค่าการนำ

ความร้อน (Thermal Conductivity) $0.1 \text{ W/m}^2\text{C}$ ช่วยให้อาคารเย็นสบายและประหยัดพลังงาน

- วัสดุกระจก (Glass Wall Panel) เป็นวัสดุที่ใช้ในการตกแต่งอาคารและบาชนิตยังช่วยป้องกันความร้อนเข้ามาภายในอาคารได้อีกด้วย
- แผ่นอะลูมิเนียมคอมโพสิต (Aluminium Composite Panel) (ACP) เป็นผนังเปลือกอาคารที่นิยมใช้ในอาคารขนาดใหญ่เช่นตึกสูง โรงงานหรือห้างสรรพสินค้า

2.3.3 ระบบผนังสองชั้นในอาคาร

ระบบผนังสองชั้น (Double Wall System) คือ นวัตกรรมการออกแบบ ให้มีช่องว่างอากาศระหว่างผนังภายนอกและภายใน โดยช่องว่างอากาศทำหน้าที่เป็นตัวป้องกัน ให้ความร้อนจากภายนอกทำให้ความร้อนเข้าสู่ภายในบ้านได้ช้าลงและช่วยลดภาระของเครื่องปรับอากาศในบ้านพักอาศัยได้อย่างน้อย 25% (คำนวณจากความร้อนที่ผ่านเข้าทางกรอบอาคารเปรียบกับบ้านทั่วไป) จึงช่วยในการประหยัดค่าไฟฟ้าได้มากขึ้นในระยะยาว

ในปัจจุบันระบบผนังสองชั้นเป็นตัวอย่างหนึ่งที่สามารถนำเอาการระบายอากาศมาใช้ โดยเมื่ออากาศระหว่างผนังทั้งสองมีความร้อนสูงกว่าอากาศภายนอกจะทำให้อากาศภายในนี้เบากว่า จะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ โดยอากาศที่เย็นกว่าของภายนอกจะไหลเข้ามาแทนที่อากาศที่ร้อนภายในช่องว่างจึงลอยตัวขึ้นสูงและไหลออกสู่ภายนอกอาคารที่ด้านบน

ในเมืองหนาว อาคารนิยมใช้ระบบนี้ในการช่วยการทำความร้อน โดยการใช้ผนังกระจกรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ทำให้ช่องว่างภายในผนังสองชั้นมีความร้อน เกิดการลอยตัวขึ้น และนำความร้อนที่เกิดขึ้นไหลเวียนเข้าสู่อาคารในหน้าหนาว และในหน้าร้อน ระบบนี้ใช้ในการระบายความร้อนออกจากตัวอาคาร

นอกจากนี้ผนังสองชั้นมีส่วนช่วยในการเป็นฉนวนกันความร้อนของอาคารและเป็นตัวรับความร้อนก่อนที่จะรับความร้อนเข้าสู่อาคาร หรือความร้อนลอยตัวขึ้นก่อนที่อากาศร้อนจะเข้ามาในอาคาร (Oesterle, 2001)

2.3.4 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อนในอาคาร

ฉนวนกันความร้อน (Thermal Insulation) คือวัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนไม่ให้ถูกส่งผ่านไปได้อย่างง่าย ฉนวนกันความร้อนมีกลไกในการทำงานโดยโพรงอากาศภายในมวลสารเป็นตัวการในการต้านการไหลของอากาศหรือก๊าซ ให้ความร้อนส่วนใหญ่ไม่สามารถส่งผ่านจาก

ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ ในกระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฉนวนที่มีค่าความหนาแน่นค่าหนึ่ง สภาพการนำความร้อนจะลดลงได้ เนื่องจากการพาความร้อนโดยช่องว่างอากาศในฉนวนนั้นลดลงจากการลดขนาดของช่องอากาศของเส้นใยในวัสดุฉนวนที่ทำให้อากาศภายในฉนวนนั้นหยุดนิ่งจนกลายเป็นตัวกันการถ่ายเทความร้อนได้อย่างดี และเมื่อความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น จะทำให้การแผ่รังสีความร้อนถ่ายเทระหว่างเส้นใยและพื้นผิวสู่พื้นผิวได้น้อยลง ทำให้สภาพการนำความร้อนลดลงด้วย จนกระทั่งเมื่อเส้นใยและเซลล์เชื่อมต่อนเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้การนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุจนถึงจุดที่การแผ่รังสีลดลง สภาพการนำความร้อนปรากฏจะมากขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, พ.ศ. 2545)

ดังนั้น ฉนวนกันความร้อนที่ดี ควรเป็นฉนวนที่มีค่าสภาพการนำความร้อนปรากฏต่ำสุด ดังนั้น ควรพิจารณาเลือกใช้ฉนวนกันความร้อน ที่มีลสารมีค่าความต้านทานความร้อน (R-Value) สูง

ฉนวนโฟมเป็นฉนวนกันความร้อนชนิดหนึ่งที่ยิยมใช้ในผนังอาคาร มีด้วยกันหลายชนิด ขึ้นอยู่กับสารประกอบทางเคมีที่นำมาใช้ มีทั้งรูปแบบพ่นและแบบแผ่นสำเร็จรูป โดยใช้ได้ทั้งภายในและภายนอกอาคาร มีน้ำหนักเบา ไม่ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้าง มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง และสามารถป้องกันความร้อนได้ดี ฉนวนกันความร้อนแบบแผ่นกับแบบพ่นมีหลายชนิด ดังนี้

- ฉนวนกันความร้อนแบบแผ่น อาจเรียกได้ว่าเป็นฉนวนกันความร้อนสำเร็จรูป มีลักษณะเป็นแผ่น หรือเป็นม้วน แบ่งออกเป็น 4 ชนิดตามวัสดุ คือ อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil), โพลีเอธิลีนโฟม (Polyethylene Foam) หรือโฟม PE, Air Bubble, และ ใยแก้ว (Fiber Glass)
- ฉนวนกันความร้อนแบบพ่น เป็นฉนวนกันความร้อนที่ต้องมาพ่นลงบนพื้นผิว เช่น หลังคาผนัง หรือฝ้าเพดาน โดยจะต้องจ้างบริษัทที่ให้บริการพ่นฉนวนกันความร้อนมาให้บริการ ซึ่งฉนวนกันความร้อนแบบพ่นนี้ แบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามวัสดุ คือ สีสะท้อนความร้อน (Ceramic Coating), โพลียูรีเทนโฟม (Rigid Polyurethane Foam) หรือโฟม PU, และ เยื่อกระดาษ (Cellulose)

ในท้องตลาดมีฉนวนจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงฉนวนกันความร้อนแบบแผ่น ชนิดของฉนวนที่นำมาใช้มีดังนี้

1) แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)

เป็นแผ่นเคลือบอลูมิเนียมถูกทำให้หนาขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนรังสียูวี มีความเหนียว คงทน ไม่ขาดง่าย ราคาประหยัด และชั้นเคลือบฟิล์มจะช่วยส่งผลดีต่อการสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อลูมิเนียมฟอยล์สามารถติดตั้งได้ง่ายต่อการติดตั้งในผิวที่มีความบางเรียบ

2) ฉนวนใยแก้ว (Microfiber)

ฉนวนใยแก้ว ประกอบด้วยเส้นใยไฟเบอร์เล็กๆ มีประสิทธิภาพทนความร้อนสูง จึงช่วยลดปริมาณความร้อนที่จะผ่านเข้าสู่อาคารได้มาก รวมทั้งมีความสามารถในการป้องกันความชื้นสูง ขึ้นรูปเป็นแบบม้วนมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ มีความยืดหยุ่นได้ดีเมื่อถูกกดทับจะสามารถคืนตัวได้เร็ว มีน้ำหนักเบา ทนทาน ติดตั้งได้สะดวก ฉนวนใยแก้วมีให้เลือกหลายชนิด ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบ เช่น ชนิดปิดผิวหน้าด้วยอลูมิเนียมพอยล์ 1 ด้าน และ แบบ 2 ด้าน หุ้มห่อตลอดทั้งม้วน ชนิดติดด้วยพอยล์ขาวและพอยล์ดำ เป็นต้น เหมาะสำหรับงานหลังคาและผนังของอาคาร

ฉนวนใยแก้วมีค่าการนำความร้อนต่ำจึงมีประสิทธิภาพการต้านทานความร้อนสูง ทำให้สามารถลดปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคารได้มากในบริเวณที่มีการติดตั้งฉนวน นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าของอาคารและโรงงานที่มีเครื่องปรับอากาศ

3) ฉนวนสะท้อนความร้อน (Polym Insulation Material)

เป็นฉนวนกันความร้อนซึ่งประกอบด้วยชั้นต่างๆ 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นนอกทั้ง 2 ด้าน ประกอบด้วยอลูมิเนียมพอยล์บริสุทธิ์ สามารถสะท้อนความร้อนได้ถึง 97% แต่ละชั้นผสมกันและเพิ่มความแข็งแรง และอายุการใช้งานนาน ด้วยฟองอากาศโพลีเอเธอเลนป้องกันความร้อนผ่านเข้ามาภายในอาคารได้เป็นอย่างดี ลดการทำงานของเครื่องปรับอากาศ และไม่มีสารพิษ จึงปลอดภัยและเป็นผลดีต่อผู้อยู่อาศัย

4) โฟมโพลีสไตรีน (Polystyrene, PS Foam, EPS)

โฟมโพลีสไตรีนเป็นวัสดุฉนวนที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โฟมชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างที่อากาศถูกห่อหุ้มด้วยโพลีสไตรีน ซึ่งมีสัดส่วนโพลีสไตรีนประมาณ 2% ของโครงสร้างของวัสดุ จึงไม่เป็นพิษ มีน้ำหนักเบาและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากผลิตด้วยวิธีอบความร้อนและไม่มีการใช้สาร CFC ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งฉนวนโพลีสไตรีนมีการผสมสารป้องกันการลามไฟเพื่อความปลอดภัย ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้โฟมโพลีสไตรีนในงานก่อสร้างอาคารอย่างกว้างขวาง จึงมีการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ง่ายต่อการนำโฟมชนิดนี้ไปใช้งาน เช่น การใช้โฟมโพลีสไตรีนร่วมกับคอนกรีตบล็อก โดยมีโฟมโพลีสไตรีนอยู่ตรงกลางซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า คูบล็อก (Cool Block) หรือการใช้โฟมโพลีสไตรีนร่วมกับระบบผนังป้องกันความร้อนและความชื้นภายนอกหรือ EIFS (Exterior Insulation and Finish System) เป็นต้น

ระบบผนังป้องกันความร้อนและความชื้นภายนอกหรือ EIFS (Exterior Insulation and Finish System) คือระบบผนังฉนวนที่มีการเคลือบผิวหน้า สามารถช่วยป้องกันความร้อนและความชื้นภายนอกอาคาร อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา ทำให้ก่อสร้างอาคารได้เร็ว สามารถป้องกันการ

แตกร้าวของผนังอาคารได้ดีมาก โดยระบบผนัง EIFS ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ฉนวน (insulation board) โครงสร้างรับฉนวน (substrate) ลวดตาข่าย (reinforcing mesh) ปูนฉาบ (base coat) และวัสดุปิดผิวหน้า (finish coat)

5) โฟมโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU Foam)

โฟมโพลียูรีเทนเป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมเซต คือ ไม่สามารถหลอมเหลวและขึ้นรูปใหม่ได้ ซึ่งผลิตออกมาหลายรูปแบบ ได้แก่ เป็นโฟมยืดหยุ่น โฟมแข็ง สารเคลือบป้องกันสารเคมี กาว สารผนึก และอีลาสโตเมอร์ เซลล์ภายในโฟมโพลียูรีเทนบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน (k) ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ ค่าการนำความร้อนของฉนวนชนิดนี้จะเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานความร้อน (R-Value) จะลดลงตามอายุการใช้งาน เนื่องจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์

โฟมโพลียูรีเทนเป็นวัสดุที่สามารถลดการแผ่รังสีและการนำความร้อนได้ดี ซึ่งถือว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำที่สุทธองศาจากสภาวะสูญญากาศ สามารถคงสภาพการเป็นฉนวนที่อุณหภูมิการใช้งานได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียสและต่ำสุดถึง ลบ 118 องศาเซลเซียส โดยภายในมีโครงสร้างของเนื้อโฟมเป็นแบบเซลล์กึ่งปิด (Semi-closed cell) แม้ว่าโฟมโพลียูรีเทนจะมีคุณสมบัติที่สามารถกันความร้อนได้ดี แต่มีข้อกำหนด คือ ห้ามใช้โฟมโพลียูรีเทนภายในอาคาร ยกเว้น จะถูกปิดทับด้วยวัสดุไม่ติดไฟ เนื่องจากโฟมโพลียูรีเทนสามารถติดไฟได้ง่าย (flammable) และเมื่อถูกไฟเผาจะปล่อยก๊าซพิษที่มีความอันตรายสูง เช่น คลอรีน ฟลูออรีน และไซยาไนด์ แม้ขณะใช้งานปกติยังมีการปล่อยสารระเหยที่เป็นอันตรายเช่นกัน

6) โฟมโพลีเอทิลีน (Polyethylene, PE Foam)

โฟมโพลีเอทิลีนเกิดจากการนำเอทิลีนโพลิเมอร์อัดขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยมีฟองก๊าซละลายอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบเซลล์ปิด (close cell) ภายในเนื้อฉนวนมีฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากเกาะกันอย่างเหนียวแน่น มีลักษณะอ่อนนุ่ม จึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ โดยฟองอากาศที่อยู่ภายในนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนไม่ให้ส่งผ่านได้ โฟมโพลีเอทิลีนมีคุณสมบัติป้องกันความร้อนสูง สามารถสะท้อนความร้อนได้ดี มีอายุการใช้งานยาวนาน ฉนวนโฟมชนิดนี้เหมาะกับในส่วนของหลังคา นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โกดังสินค้า ที่อยู่อาศัยและโรงงานที่ผลิตสารเคมีต่างๆ เนื่องจากสามารถป้องกันไอระเหยจากกระบวนการผลิตสารเคมีไปกระทบกับแผ่นหลังคาไม่ให้เกิดความเสียหายได้ยังสามารถป้องกันเสียง โดยป้องกันเสียงจากภายนอก เช่น เมื่อฝนตกกระทบลงบนหลังคาจะทำให้ไม่เกิดเสียงดัง มีการเสื่อมสภาพได้จากรังสียูวี ดังนั้นควรมีแผ่นปิดผิวขณะใช้งานหรือควรติดตั้งในบริเวณที่ไม่โดนรังสียูวีโดยตรง โฟมโพลีเอทิลีนเป็นโพลิเมอร์

พลาสติกชนิดหนึ่ง เมื่อเผาไหม้จะก่อให้เกิดควันปริมาณมากและปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เป็นอันตรายออกมา

2.4 ลักษณะทางกายภาพของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

แผ่น terracotta คือ วัสดุดินเผาที่มีกระบวนการผลิตซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูงและทันสมัย โดยกระบวนการรีไซเคิล จากการนำวัสดุที่มีความแตกต่างจากวัสดุชนิดอื่น เช่น เศษของผลิตภัณฑ์หินภูเขาไฟ, แร่และส่วนผสมอื่น ๆ ทำการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันสูง และอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำและเผาด้วยอุณหภูมิสูงที่ 1200 °C ทำให้วัสดุนี้มีสีสรรหลากหลาย มีพื้นผิวธรรมชาติ รวมทั้งพื้นผิวอื่น ๆ ให้เลือกมากมายและตอบสนองต่อการผลิตจำนวนมาก (Lopochina, 2017)

ผนังแผ่น terracotta ถูกนำมาใช้ในระบบโครงสร้างชนิดผนังระบายนอากาศ เป็นผนังเปลือกอาคาร ถูกนำมาใช้ในระบบโครงสร้างเบาติดตั้งกับโครงสร้างเหล็ก ซึ่งได้รับความสนใจมากขึ้น จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่สถาปนิกนำผนังชนิดนี้มาใช้ในการออกแบบอาคารใหม่ ๆ มากมายทั้งอาคารสูงและอาคารพักอาศัย นอกจากนี้ แผ่น terracotta มีรูปแบบการติดตั้งเป็นผนังเปลือกอาคารที่มีศักยภาพ คือ การติดตั้งแบบระบบผนังสองชั้นแบบมีช่องว่างระหว่างแผ่น (open joint) และมีช่องว่างอากาศ (air cavity) และด้วยตัววัสดุที่มีลักษณะเฉพาะตัว คือ วัสดุที่มีรูพรุน ทำให้เมื่อติดตั้งเป็นวัสดุเปลือกอาคารแล้ว เปรียบเสมือนเป็นระบบผนังหายใจได้

2.4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

สามารถสรุปคุณสมบัติเบื้องต้น (NBK North America, 2016) ได้ดังนี้

- 1) แผ่น terracotta เป็นวัสดุที่มีกระบวนการผลิตที่มีคาร์บอนต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยกระบวนการผลิตที่ทันสมัย และง่ายต่อการติดตั้ง
- 2) แผ่น terracotta เป็นวัสดุที่มีลักษณะที่ทันสมัย สวยงาม มีรูพรุนสามารถระบายนอากาศได้แตกต่างจากผนังเปลือกอาคารทั่วไป และสร้างเอกลักษณ์เฉพาะตัว ดึงดูดและน่าสนใจให้กับงานสถาปัตยกรรม
- 3) แผ่น terracotta เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อน เป็นฉนวนป้องกันเสียงรบกวนการประหยัดพลังงานได้อย่างเต็มที่ และมีประสิทธิภาพในการลดเสียงรบกวนและกันลมกันน้ำและเป็นผนังกันฝนได้อีกด้วย

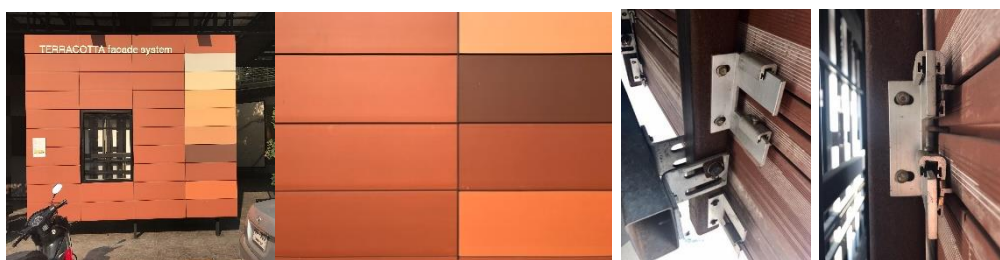
- 4) แผ่น terracotta สามารถใช้เป็นผนังตกแต่งภายนอก ให้มีลักษณะที่แตกต่าง ใช้เป็นผนังเปลือกอาคารเป็นเช่นเดียวกับผนังรับน้ำหนักทั่วไป
- 5) แผ่น terracotta เป็นส่วนหนึ่งของผนังภายนอกคอมโพสิท (composite walls) เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าผนังสองชั้นซึ่งประกอบด้วยผนังด้านนอก, ผนังด้านใน และช่องว่างอากาศระหว่างผนัง ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยในการประหยัดพลังงาน (energy-saving) ในอาคารและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.4.2 ลักษณะทั่วไปของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

1) ขนาดของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

ในปัจจุบันมีแบรนด์ผู้ผลิตแผ่น terracotta เกิดขึ้นมากมาย ซึ่งแต่ละแบรนด์ผู้ผลิต จะมีขนาดและระบบการติดตั้งที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้ แผ่น terracotta มีหลากหลายสี ขนาดและพื้นผิวที่แตกต่างกัน บริษัท NBK ซึ่งเป็นแบรนด์ผู้ผลิตแผ่น terracotta รายหนึ่งจากประเทศสหรัฐอเมริกา ก่อตั้งโดยสถาปนิก Renzo Piano คือ ในปัจจุบันได้ทำการการปรับปรุงแผ่น terracotta นี้เพื่อให้ใช้ประโยชน์มากขึ้นและตอบสนองความต้องการของสถาปนิกและลูกค้ามากขึ้น ด้วยการผลิตแผ่น terracotta ออกมาหลากหลายขนาด สามารถผลิตได้ตามขนาดที่ต้องการ ด้วยความยาวสูงสุด 1.8 เมตร และความสูงมากที่สุดที่ 0.8 เมตร นอกจากนี้ยังมีพื้นผิวให้เลือกมากมาย เช่น พื้นผิวมาตรฐาน แบบขรุขระ แบบขัดเงา แบบกันน้ำฝน

ในประเทศไทยเริ่มให้ความสำคัญในการนำวัสดุแผ่น terracotta มาใช้เป็นผนังเปลือกอาคาร โดยบริษัท บุญถาวร จำกัด ได้นำเข้าวัสดุแผ่น terracotta นี้มาวางขายในประเทศไทย ด้วยการนำเข้าวัสดุแผ่น terracotta จากบริษัท Lopochina เป็นแบรนด์ผู้ผลิตแผ่น terracotta รายหนึ่งจากประเทศจีน และในปัจจุบันบริษัท บุญถาวร จำกัดได้ทำการนำวัสดุมาเสนอใช้ในอาคารในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในขั้นตอนการเสนอราคา



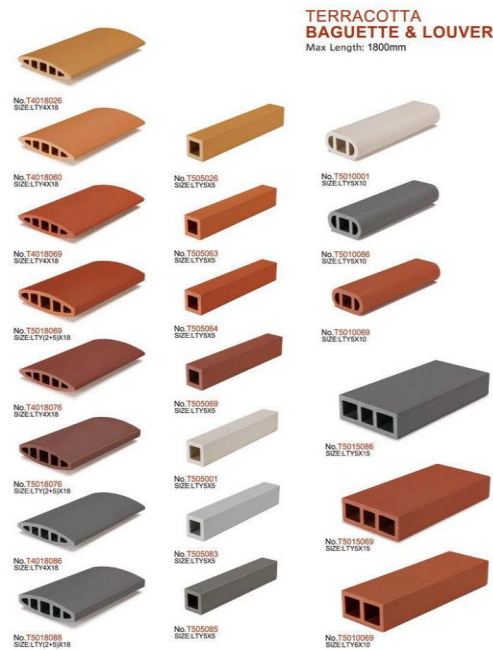
ภาพที่ 2.1 แผ่น terracotta และตัวอย่างการติดตั้ง (ข้อมูลจาก: บริษัท บุญถาวร จำกัด)

แผ่น terracotta จากแบรนด์ผู้ผลิต บริษัท Lopochina ประเทศจีน มีขนาดและรูปแบบการติดตั้งแตกต่างจากบริษัท NBK ซึ่งเป็นแบรนด์ผู้ผลิตจากประเทศสหรัฐอเมริกา โดยในส่วนของแบรนด์ผู้ผลิต บริษัท Lopochina สามารถจำแนกออก 2 ประเภทหลักใหญ่ๆ ได้แก่

- แผ่น Terracotta Facade Panels คือ แผ่นดินเผาชนิดที่เป็นผนังเปลือกอาคารที่ติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศระหว่างผนังและช่องว่างระหว่างแผ่น มีหลากหลายขนาดสามารถผลิตความยาวได้ตั้งแต่ 1.5 – 2.5 เมตร ความกว้างได้ตั้งแต่ 0.15 – 0.6 เมตร และความหนาตั้งแต่ 1.0 – 4.5 เซนติเมตร มีพื้นผิวให้เลือกมากมาย ได้แก่ พื้นผิวธรรมชาติหรือพื้นผิวอิฐ พื้นผิวขรุขระ พื้นผิวขัดเงา พื้นผิวเซาะร่อง เป็นต้น
- แผงระแนงดินเผา (Terracotta Baguette & Louver) คือ ระแนงดินเผานิยมใช้เป็นแผงบังแดดและตกแต่งอาคาร มีหลากหลายขนาด สี เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างแผ่น Terracotta Facade Panels ที่มีสีและพื้นผิวที่แตกต่างกัน (ข้อมูลจาก: บริษัท บุญถาวร จำกัด)



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างแผ่น Terracotta Baguette & Louver (ข้อมูลจาก: บริษัท บุญถาวร จำกัด)

2) สีของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

เป็นสีธรรมชาติของดินเผาที่อุณหภูมิสูงมักจะมีสีแดง, สีเหลือง, สีเทา และสามารถทำสีได้ตามความต้องการของผู้ออกแบบ ทำให้ตอบสนองและเป็นที่น่าสนใจของเจ้าของและสถาปนิก

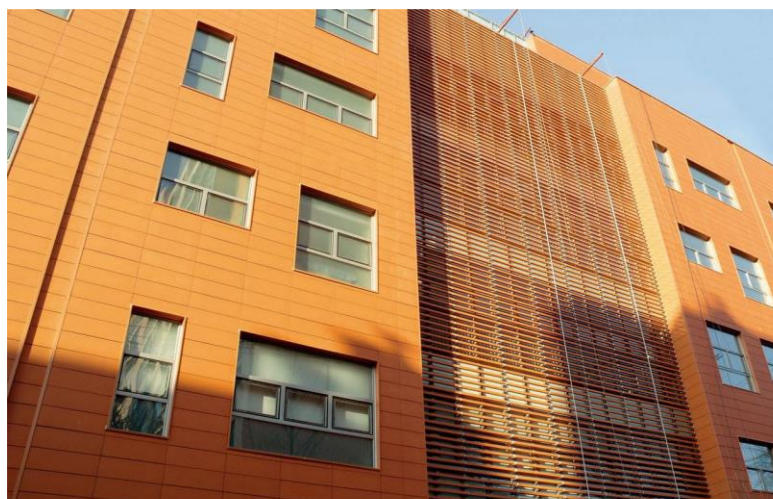


ภาพที่ 2.4 สีของชิ้นตัวอย่างแผ่น terracotta (ข้อมูลจาก: บริษัท บุญถาวร จำกัด)

3) ลักษณะการใช้งานของผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta

วัสดุแผ่น terracotta เป็นที่นิยมใช้กันมานานในหมู่สถาปนิก สามารถใช้เป็นวัสดุเปลือกอาคารทั้งในอาคารพักอาศัย และอาคารขนาดใหญ่ รวมทั้งในอาคารที่ทำการปรับปรุงด้วย Renzo Piano สถาปนิกชาวอิตาลี ผู้ริเริ่มการใช้แผ่น terracotta มาใช้เป็นผนังเปลือกอาคารในงานออกแบบ

อาคารขนาดใหญ่มากมาย เช่น Zentrum Paul Klee, Bern ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2006 และ Whitney Museum of American Art นิวยอร์ก สร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2005 นอกจากนี้ ยังมี The Potsdamer Platz ซึ่งเป็นอาคารสูงที่มีผนังของอาคารบางส่วนที่นำแผ่น terracotta มาใช้เป็นผนังเปลือกอาคาร



ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta (ข้อมูลจาก : <http://www.lopochina.com>)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการป้องกันความร้อนให้อาคาร

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการลดการใช้พลังงานในอาคาร และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร พบว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นตามความสูงของผนังแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศมีการหมุนเวียนค่อนข้างสูงและ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคาร เปรียบเทียบระบบผนังสองชั้นแบบมีช่องว่างอากาศ (Air cavity) และช่องว่างระหว่างวัสดุผนัง (open joint) กับระบบผนังสองชั้นแบบปิดสนิท (A Conventional Sealed Cavity Façade) ได้มีการทดลองด้วยการใช้ภาพถ่ายความร้อน แล้วนำค่าอุณหภูมิที่ได้มาใส่ในโปรแกรม CFD simulation เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างอากาศ และศึกษาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น พบว่า ค่าอุณหภูมิภายในช่องว่างอากาศของระบบผนังสองชั้นแบบปิดสนิท มีค่าอุณหภูมิอากาศสูงและสูงคงที่ แสดงให้เห็นว่าภายในช่องว่างอากาศของระบบผนังสองชั้นแบบปิดสนิทไม่มีการหมุนเวียนเกิดเป็นเกาะความร้อนภายในช่องว่างอากาศ ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นสูงตามไปด้วย ในกรณีของระบบผนังสองชั้นแบบมี

ช่องว่างอากาศและช่องว่างระหว่างวัสดุผนัง พบว่า เกิดการไหลเวียนของอากาศภายในช่องว่างอากาศ ทำให้อากาศร้อนลอยตัวขึ้นสูง ตามทฤษฎีของระบบผนังสองชั้นในอาคาร ซึ่งช่วยในการลดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่า การไหลเวียนของอากาศภายในผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคาร และช่วยลดปริมาณความร้อน จากการไหลเวียนของอากาศที่เกิดขึ้น และจะมีประสิทธิภาพอย่างยิ่งทางทิศใต้ อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในฤดูร้อน นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงข้อดีของผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศ คือ เป็นผนังที่ติดตั้งด้วยระบบโครงสร้างเบาซึ่งเป็นระบบที่ติดตั้งง่ายและรวดเร็ว ทำให้โครงสร้างอาคารแข็งแรงขึ้น สถาปนิกและผู้ออกแบบจึงเริ่มใช้ผนังระบายอากาศมาใช้เป็นผนังเปลือกอาคารมากขึ้น จนเป็นระบบที่สถาปนิกให้ความสนใจ ถือว่า เป็นผนังที่มีความต้องการมากที่สุดชนิดหนึ่งในช่วงฤดูร้อน (Cristina Sanjuan, 2011), (María José Suárez, 2012)

C. Marinoscia , G. Semprinia , G.L. Morinia, 2013. ได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการลดปริมาณความร้อนกับอาคารขนาดใหญ่ โดยกำหนดการศึกษาเฉพาะในช่วงฤดูร้อน ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานมากที่สุด ทำการศึกษาลักษณะของผนังสองชั้นที่มีความแตกต่างกัน ด้วยการจำลองผนังทดสอบบนผนังอาคารจริง และทำการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ที่ความสูง 7.0 เมตร ติดตั้งเครื่องวัดการแผ่รังสีอาทิตย์ (Pyranometer) และทำการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ หรือเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ทั้งหมด 5 จุด ได้แก่ บริเวณผิวผนังภายนอกผนังเปลือกอาคาร บริเวณผิวผนังภายในผนังเปลือกอาคาร ช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารกับผนังภายนอกอาคาร (Air cavity) บริเวณผิวผนังภายนอกผนังอาคาร และบริเวณผิวผนังภายในผนังอาคาร ตามลำดับ ผลจากการศึกษาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังเปลือกอาคาร พบว่า วัสดุผนังเปลือกอาคารที่มาจากวัสดุดินเผาและมีระบบช่องว่างอากาศแบบเปิด และเป็นวัสดุที่มีสีอ่อน มีประสิทธิภาพด้านความร้อนช่วยลดภาระการทำความเย็นได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผนังเปลือกอาคารจากอะลูมิเนียม และผนังเปลือกอาคารมีช่วยในการลดภาระการทำความเย็นได้น้อยที่สุด คือ ผนังเปลือกอาคารที่มาจากวัสดุดินเผาที่ไม่มีระบบช่องว่างอากาศ และมีสีเข้ม จึงสามารถสรุปได้ว่า สีของวัสดุและการติดตั้งแบบช่องว่างอากาศและมีการไหลเวียนของอากาศ เป็นสิ่งสำคัญในการลดการใช้พลังงานในอาคาร นอกจากนี้พบว่าความกว้างของช่องอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารกับผนังอาคารที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของอาคารควรมีค่าประมาณ 10-24 เซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญ และทิศทางที่เหมาะสมกับการติดตั้งผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศ ที่มีผลในการช่วยในการลดปริมาณความร้อนมากที่สุด คือ ทิศใต้ (C. Marinoscia 2013)

ต่อมงานวิจัยของ F.Stazi, F.Tomassoni, A.Vegliò, C. Di Perna, 2011. จึงทำการศึกษาอาคารจริงที่มีการใช้งานผนังเปลือกอาคารด้วยผนังแผ่น terracotta ทำการศึกษาผลของผนังระบาย

อากาศที่มีการหุ้มด้วยผนังแผ่น terracotta โดยเน้นการศึกษาอัตราการไหลของอากาศในช่องว่างอากาศเป็นหลัก ด้วยการติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Resistance Temperature Detector หรือ RTD) ที่ผนังของอาคารที่สูง 6 เมตร และผนังของอาคารที่สูง 12 เมตร เพื่อวัดอุณหภูมิผิวผนัง และทำการติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม ที่ความสูง 2.5 เมตร เพื่อทำการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมบริเวณช่องว่างอากาศ นอกจากนี้ยังติดตั้งเครื่องมือวัดการส่งผ่านความร้อน (Heat flux meter) บริเวณทางเข้าและทางออกของผนังบริเวณช่องว่างอากาศ ผลการวิจัยพบว่า อัตราความเร็วลมเพิ่มขึ้นมากในช่วงตั้งแต่ 10:00 – 15:00 น. และ ผนังของอาคารที่สูง 12 เมตรมีอุณหภูมิผิวผนังภายนอกสูงกว่าผนังของอาคารที่สูง 6 เมตร ซึ่งมีผลมากในวันแสงแดดจัด และสามารถสรุปได้ว่า อัตราการไหลของอากาศในช่องว่างอากาศ มีอัตราความเร็วลมเพิ่มขึ้นมากเมื่อผนังบริเวณช่องว่างอากาศสูงขึ้นเป็นสองเท่า (F. Stazi, 2011)

การศึกษาผลสำรวจระบบการก่อสร้าง 3 แบบสำหรับอาคาร ในกรุงมาดริดเพื่อเสนอเป็นแนวทางในการประหยัดพลังงานของ C. Alonso, I. Oteiza, J. García-Navarro, F. Martín-Consuegra, 2016. ได้ทำการจำลองผนังทดสอบที่มีระบบการก่อสร้างแตกต่างกันทั้ง 3 แบบ ได้แก่ ผนังระบบที่ 1 คือ ระบบผนังก่ออิฐที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เท่ากับ $1.69 \text{ W/m}^2\text{K}$ ผนังระบบที่ 2 คือ ระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศกว้าง 5 เซนติเมตร ติดตั้งบนผนังก่ออิฐฉาบปูน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เท่ากับ $0.48 \text{ W/m}^2\text{K}$ และผนังระบบที่ 3 คือ ระบบผนังฉนวนกันความร้อนภายนอก ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ใกล้เคียงกับผนังระบบที่ 2 คือ $0.49 \text{ W/m}^2\text{K}$ ทำการทดลองด้วยการติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของผนังบริเวณช่องว่างอากาศและทดลองในระยะยาวเพื่อให้ได้ผลของแนวทางในการประหยัดพลังงานในทุกฤดูกาล ผลการทดลองพบว่า ระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศกว้าง 5 เซนติเมตร ในฤดูร้อน ฤดูใบไม้ผลิ และฤดูใบไม้ร่วง มีการใช้พลังงานในอาคารน้อยกว่าระบบผนังฉนวนกันความร้อนภายนอก ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน ยกเว้นในฤดูหนาว ระบบผนังติดตั้งฉนวนความร้อนภายนอกประหยัดพลังงานในการทำความอุ่นมากที่สุด และระบบผนังก่ออิฐมีการใช้พลังงานสูงสุดในทุกฤดูกาล ผลการสรุปสอดคล้องกับงานวิจัยข้างต้น คือ ระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศ มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงาน และช่วยประหยัดพลังงานได้มากขึ้นในฤดูกาลที่มีการแผ่รังสีอาทิตย์ จึงเป็นวัสดุผนังเปลือกอาคารชนิดหนึ่งที่เหมาะสมในการใช้ในอาคารในแถบร้อนชื้น (C. Alonso, 2016)

จะเห็นได้ว่า ระบบผนังสองชั้นภายนอกอาคาร มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณความร้อน ช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคาร มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน รวมทั้งการไหลเวียนของอากาศภายในช่องว่างอากาศของระบบผนังสองชั้น ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน มี

ประสิทธิภาพด้านความร้อน และช่วยลดภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศ ได้ดีกว่าระบบผนังสองชั้นแบบปิดสนิท (หรือไม่มีการไหลเวียนของอากาศ) โดยจากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น พบว่า ความกว้างของช่องอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนควรมีค่าประมาณ 10-24 เซนติเมตร (C. Marinoscia 2013) และช่องว่างอากาศจะมีอัตราการไหลเร็วมากขึ้นมากเมื่อผนังบริเวณช่องว่างอากาศสูงขึ้นเป็นสองเท่า (F. Stazi, 2011) แสดงถึงกระบวนการไหลเวียนของอากาศที่พาความร้อนลอยตัวขึ้นสูงและออกสู่ภายนอกอาคาร นอกจากนี้ การนำแผ่น terracotta มาใช้เป็นผนังเปลือกอาคารแบบมีช่องว่างอากาศยังช่วยลดการใช้พลังงาน ได้ดีกว่าระบบผนังที่ติดฉนวนกันความร้อน และ ยังเหมาะสมในการใช้ในอาคารในแถบร้อนชื้น ดังนั้นอาจเหมาะสมกับอาคารแถบร้อนชื้นในประเทศไทยก็เป็นได้

เนื่องจาก ประเทศไทยตั้งอยู่ในแถบร้อนชื้น และจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงความร้อนตลอดเวลาเกือบทุกฤดูกาล รวมทั้งในปัจจุบันยังมีการตื่นตัวเกี่ยวกับกระแสการประหยัดพลังงาน การลดสภาวะโลกร้อน ในแง่ของสถาปัตยกรรมมีกระแสการออกแบบอาคารเพื่อประหยัดพลังงานเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยว่า ควรทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผ่น terracotta โดยติดตั้งแบบระบบผนังสองชั้นมีช่องว่างอากาศ จึงมุ่งศึกษาระบบผนังด้วยการจำลองติดตั้งเสมือนอาคารจริง 1 ชั้น

ระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศมาใช้เป็นวัสดุผนังเปลือกอาคารจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมอย่างยิ่ง ซึ่งแนวทางในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน และการใช้พลังงานในอาคารของระบบที่ทำการติดตั้งด้วยระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศ ที่ทำการทดลองในเขตประเทศร้อนชื้นยังมีอยู่น้อย ดังนั้น หากมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารของระบบผนังเปลือกอาคารที่ทำการติดตั้งด้วยระบบผนังแผ่น terracotta ที่มีช่องว่างอากาศ โดยอยู่ในเงื่อนไขสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แนวทางการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของการนำวัสดุเปลือกอาคารชนิดแผ่นผนังดินเผาที่มีการติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ (Terracotta) โดยการเปรียบเทียบกับผนังภายนอกอาคารที่ไม่มีวัสดุปิดผิวใดๆ (Basecase) คือ แผ่นสมาร์ทบอร์ด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารของระบบผนัง Terracotta เป็นหลัก โดยการจำลองด้วยการใช้กล่องทดลอง และทำการติดตั้งเครื่องมือเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิ ดำเนินการตรวจวัดเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆที่ได้ นำมาคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนต่างๆ เช่น ค่าการต้านทานความร้อนของวัสดุ (R) จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารด้วยการจำลองอาคารที่มีเวลาการใช้งานปรับอากาศแตกต่างกันด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำวัสดุผนัง terracotta มาใช้เป็นเปลือกอาคารในการใช้งานจริง

3.2 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.2.1 การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเปลือกอาคาร โดยศึกษาเฉพาะส่วนผนังอาคาร เกี่ยวกับรูปแบบของวัสดุกันความร้อนและคุณสมบัติในการกันความร้อน
- ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของผนังแผ่น terracotta ระบบผนังสองชั้น และปัจจัยที่มีผลทางความร้อนของผนัง terracotta
- ศึกษาวิธีการติดตั้ง คุณสมบัติเบื้องต้นของผนัง terracotta
- ศึกษาประเภทของอาคารตัวอย่างที่มีการใช้งานผนัง terracotta และอาคารที่มีการปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จากบทความวิชาการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปเงื่อนไขการใช้งานอาคาร การใช้พลังงานในอาคาร เวลาเปิด-ปิดระบบปรับอากาศ และอื่นๆ เพื่อนำมาใช้เป็นอาคารต้นแบบในการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 เพื่อทำการคำนวณผลการใช้พลังงาน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผนัง terracotta กับผนังอาคารทั่วไป

- ศึกษาการประกอบและการใช้งานกล่องทดลอง รวมทั้งสมการทางคณิตศาสตร์ ในการหาค่าคุณสมบัติของผนัง terracotta เพื่อนำมาประกอบการคำนวณค่าการใช้พลังงานในอาคารในโปรแกรม VisualDOE4.1 ต่อไป

3.2.2 ตัวแปรในการวิจัย

เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อนของผนังแผ่น terracotta ระบบผนังสองชั้นแบบมีช่องว่างอากาศ โดยมีความแตกต่างกันของผนัง terracotta เปรียบเทียบกับผนังต้นแบบ โดยการกำหนดตัวแปรแบ่งออกตามการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ตัวแปรสำหรับการทดลองด้วยกล่องทดลอง

- **ตัวแปรต้น** กล่องทดลอง 2 กล่อง ได้แก่ แผ่นสมาร์ทบอร์ดที่ไม่มีวัสดุปิดผิวใดๆ กับผนัง terracotta ที่มีการติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศบนแผ่นสมาร์ทบอร์ด
- **ตัวแปรตาม** ประสิทธิภาพทางความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน ค่าความต้านทานความร้อน และ อุณหภูมิกล่องทดลอง แต่ละบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ได้แก่ อุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิผิวผนังด้านนอก อุณหภูมิอากาศบริเวณช่องว่างอากาศ อุณหภูมิผิวผนังด้านใน และอุณหภูมิอากาศภายในกล่องที่ปล่อยออกมาผ่านทางพัดลมดูดอากาศ
- **ตัวแปรควบคุม** ผนังแผ่น terracotta สีอิฐขนาด ผนัง terracotta ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร ที่ติดตั้งบนโครงเหล็กที่มีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซนติเมตร, รายละเอียดต่าง ๆ ประกอบในการจำลองในส่วนของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง, สภาพภูมิอากาศฤดูกาลขณะทำการทดลอง

ตัวแปรสำหรับการทดลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1

- **ตัวแปรต้น** อาคารแต่ละประเภท และแบบจำลองอาคารที่มีเวลาการใช้งานปรับอากาศแตกต่างกันและวัสดุเปลือกอาคารแต่ละประเภทที่นำมาใช้เป็นผนังต้นแบบในการจำลองอาคาร
- **ตัวแปรตาม** ผลจากการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแบบจำลอง ได้แก่ ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร และผลของการใช้พลังงานในการทำความเย็นรายชั่วโมงรวมทั้ง พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่สามารถประหยัดได้ (%)

- **ตัวแปรควบคุม** แผ่น terracotta และค่าการต้านทานความร้อนรวมของแผ่น terracotta ที่ได้จากการทดลองด้วยกล่องทดลอง

3.2.3 ลักษณะทางกายภาพของกล่องทดสอบ

เพื่อสอดคล้องกับงานวิจัย ดังนั้นกล่องทดลองจึงควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ผนังกล่องทั้ง 5 ด้านต้องมีความต้านทานความร้อนสูงเพื่อลดผลกระทบของอากาศภายนอกต่อภายในกล่อง
- ผนังของกล่องต้องไม่มีการรั่วซึมของอากาศ
- ขนาดของพัดลมระบายอากาศเท่ากันในทุกการทดลอง
- กล่องทดลองต้องมีความสูงพอเหมาะเพื่อสอดคล้องกับการทดสอบในงานวิจัย

ดังนั้นกล่องทดลองจึงควรมีรูปทรงสี่เหลี่ยมสูง มีขนาดของกล่อง 0.6 x 0.6 เมตร สูง 2.60 เมตร ติดตั้งด้วยโครงเหล็ก สูงจากพื้น 20 เซนติเมตร ผนังทั้ง 5 ด้านทำจากโฟมโพลียูรีเทนหนา 2 นิ้ว เจาะช่องอากาศเข้า (inlet) และช่องอากาศออก (outlet) โดยติดพัดลมระบายอากาศที่มีค่าปริมาตร การไหลของอากาศ (CFM) เท่ากับ 18.67 ft³/minute ที่ช่องว่างอากาศออก ด้านหน้าของกล่องเว้นที่ว่างสำหรับติดตั้งพัดลม ผนัง กว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร

สาเหตุที่เลือกวัสดุที่นำมาใช้ทำกล่องทดลองและขนาดของกล่องทดลอง เนื่องจาก

- การทดสอบนี้เป็นการทดสอบการติดตั้งผนังด้วยระบบระบายอากาศแบบมีแรงลอยตัว ไม่ใช่เพียงทดสอบวัสดุ ดังนั้น ความสูงของกล่องทดลองจึงจำเป็นต้องเทียบเท่าผนังอาคารจริง คือ 2.40 เมตร
- ผนังของกล่องทั้ง 5 ด้านเป็นโฟมโพลียูรีเทน (PU Foam : Polyurethane Foam) ที่มีความสามารถกันความร้อนจากหลังคาหรือผนังได้มากเพราะมีค่าการนำความร้อนประมาณ 0.017 – 0.024 W/m²°C ซึ่งต่ำมาก นอกจากนี้ PU Foam ยังมีความสามารถในการป้องกันการรั่วซึมได้ดี
- การทดลองนี้เป็นการทดสอบการวัดอุณหภูมิภายในกล่อง ซึ่งในการคำนวณจะให้ความร้อนในด้านที่เป็นวัสดุต้นแบบ แล้วคำนวณจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกกล่อง
- กล่องทดลองตั้งอยู่กลางแจ้งเพื่อให้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์กับผนังอาคาร ให้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากที่สุด



ภาพที่ 3.1 โฟมโพลีเอทรีเทน หนา 2 นิ้ว และพัดลมระบายอากาศที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4 เครื่องมือเก็บข้อมูล

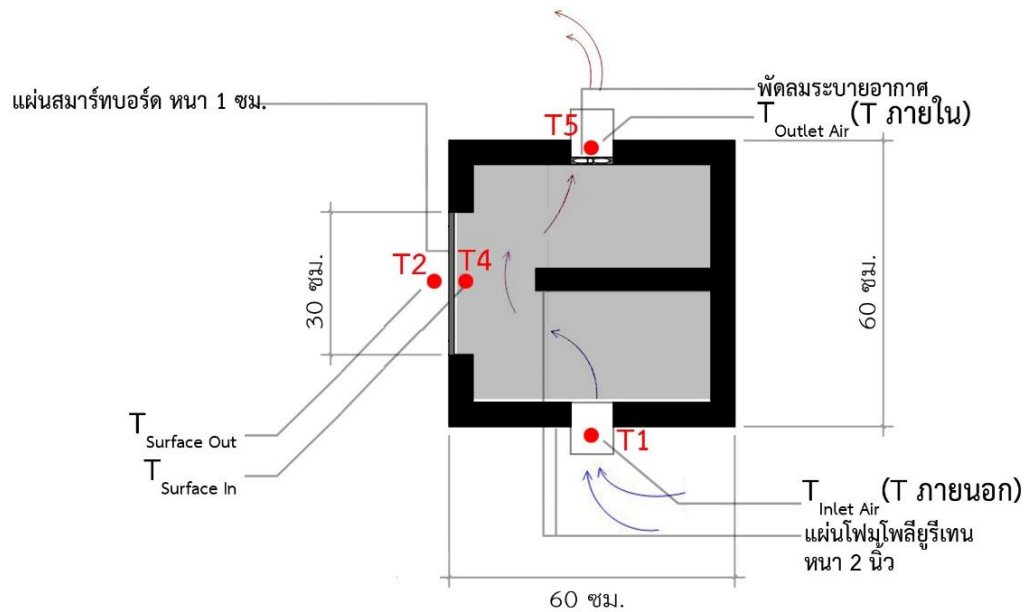
3.2.4.1 อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ

ใช้เครื่องมือเก็บข้อมูลอุณหภูมิ 12-Channel Temperature Recorder PCE-T 1200 จำนวน 1 เครื่อง และสาย thermocouple type K 10 สาย เก็บข้อมูลทั้งหมด 5 จุดต่อ 1 กล้องการทดสอบ เพื่อวัดอุณหภูมิ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอก (T_1) อุณหภูมิผิวผนังด้านนอก (T_2) อุณหภูมิอากาศของช่องว่างอากาศระหว่างผนัง (T_3) อุณหภูมิผิวผนังด้านใน (T_4) อุณหภูมิของอากาศภายในกล่องที่ปล่อยออกมาผ่านทางพัดลมดูดอากาศ (T_5) ดังแสดงในภาพที่ 3.3-3.6 เป็นเวลา 48 ชั่วโมงทั้งวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky) และวันครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day)

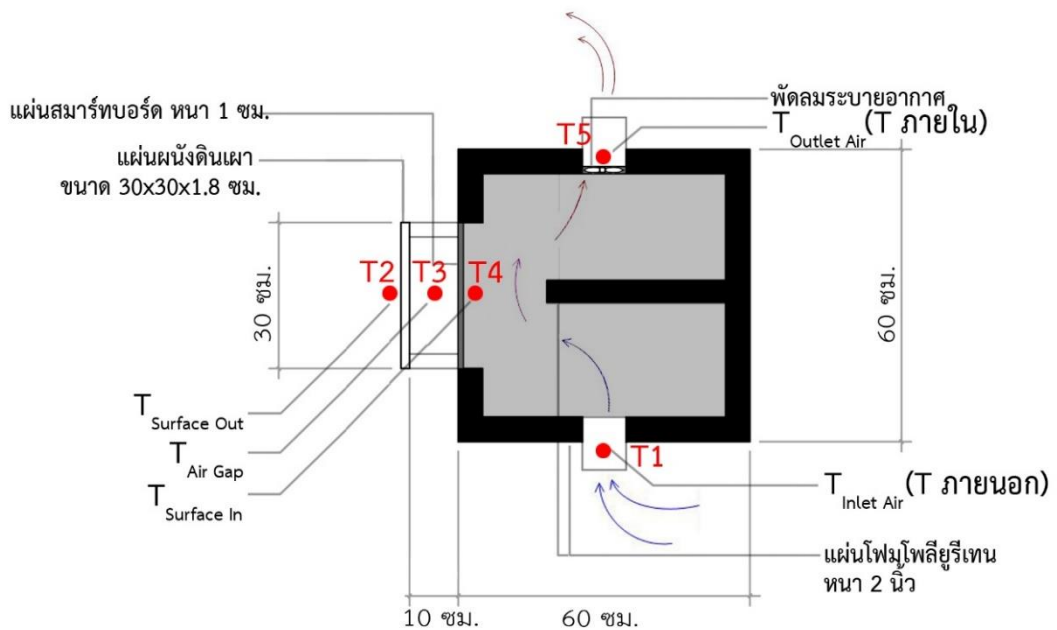


ภาพที่ 3.2 ส่วนประกอบภายนอก ของ 12 Channels Temperature Recorder และสาย thermocouple type K

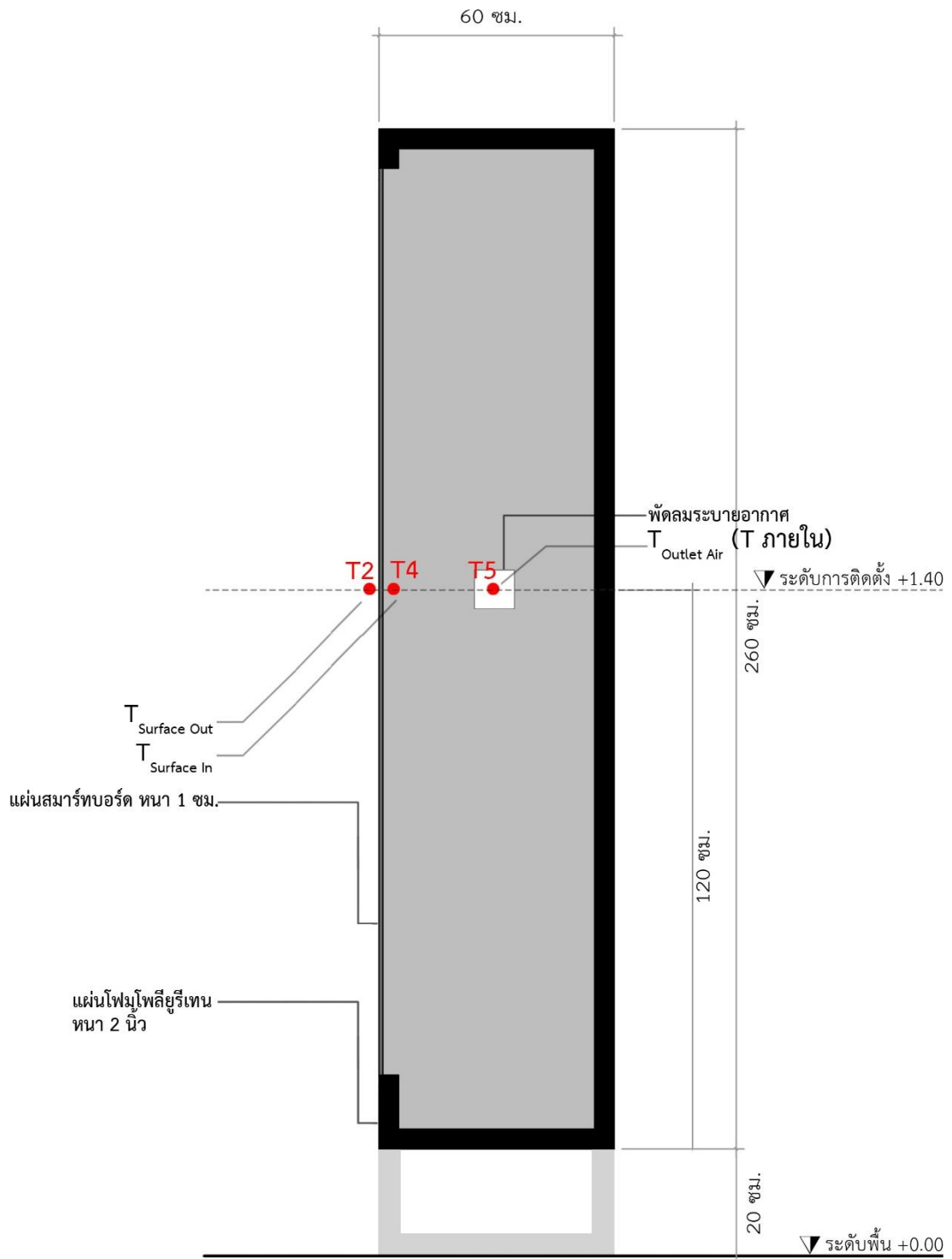
เครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิดังกล่าวนี้สามารถเก็บข้อมูลอุณหภูมิได้นานถึง 24 ชั่วโมง บันทึกข้อมูลด้วย SD CARD



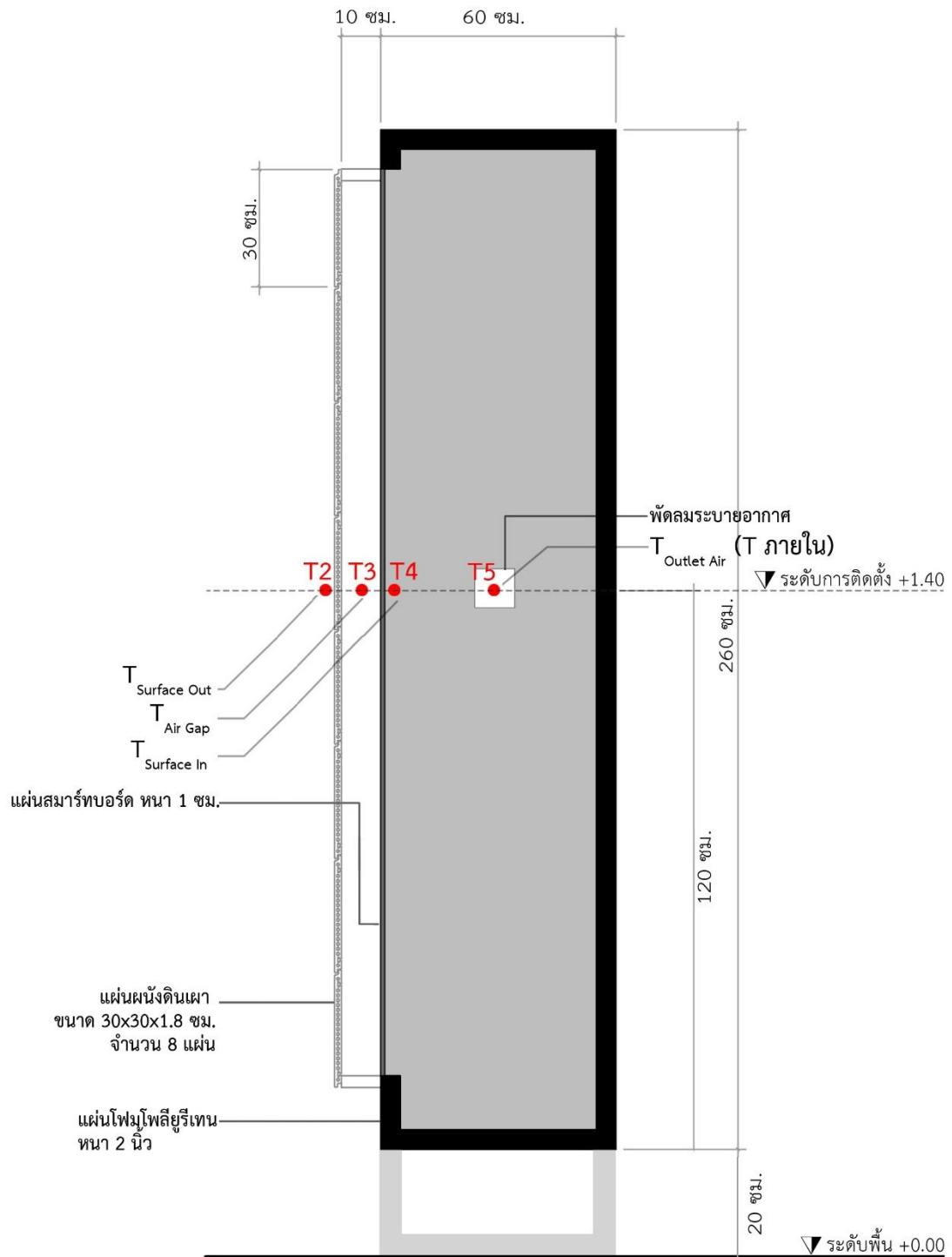
ภาพที่ 3.3 แพลนกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1



ภาพที่ 3.4 แพลนกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2



ภาพที่ 3.5 รูปตัดของกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1



ภาพที่ 3.6 รูปตัดของกล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2

3.2.4.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำการคำนวณผลการใช้พลังงานในอาคาร โดยในการคำนวณผลการใช้พลังงานในอาคาร สามารถแบ่งตามประเภทของอาคาร วัสดุของอาคาร รวมทั้งลักษณะการใช้งานของอาคาร สามารถบันทึกข้อมูลได้ละเอียดถึงรายชั่วโมงในหนึ่งปี

3.3 การกำหนดรูปแบบและขั้นตอนการผลิตกล่องทดลอง

ในการทดลองได้กำหนดการทดสอบระบบผนังเปลือกอาคารที่ทำการติดตั้งด้วยระบบผนัง terracotta เป็นหลัก ดังนั้นจึงเป็นการจำลองกล่องทดลองเสมือนติดตั้งผนังแผ่น terracotta ในอาคารจริงด้วยขนาดกล่องทดลองขนาด 0.6 x 0.6 เมตร สูง 2.6 เมตร และด้านหน้าของกล่องเว้นที่ว่างสำหรับติดตั้งวัสดุผนัง ขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร เปรียบเสมือนการทดสอบระบบการติดตั้งผนังที่อาคารสูง 1 ชั้น โดยเปรียบเทียบผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ที่มีการติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ กับผนังที่ไม่มีวัสดุปิดผิวด้วยผนังเปลือกอาคารใดๆ (Basecase) โดยมีรายละเอียดของกล่องทดลอง ดังนี้

- กล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1 ทำการจำลองผนังที่ไม่มีวัสดุปิดผิวด้วยผนังเปลือกอาคารใดๆ (Basecase) ด้วยวัสดุผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร หนา 1 เซนติเมตร บนกล่องทดลอง
- กล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2 ทำการจำลองด้วยผนังแผ่น terracotta ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร ทั้งหมด 8 แผ่น โดยยึดกับแผ่นสมาร์ทบอร์ดหนา 1 เซนติเมตร ด้วยโครงเหล็ก และมีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซนติเมตร บนกล่องทดลอง โดยมีขั้นตอนในการประกอบกล่องทดสอบ ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนที่ 1 การประกอบโครงกล่องทดลอง

ประกอบด้วยโครงเหล็กเพื่อทำการติดตั้งโพลีเอทิลีนที่ผนังทั้ง 5 ด้าน โดยเจาะช่องอากาศเข้า และช่องอากาศออก ขนาด 9 x 9 เซนติเมตร ผนังที่ขนานกัน และติดพัดลมระบายอากาศที่ช่องว่างอากาศออก ทำการเชื่อมเหล็กกับแผ่นโพลีเอทิลีนด้วยกาวซิลิโคน เพื่อป้องกันอากาศรั่วซึม



ภาพที่ 3.7 การประกอบโครงเหล็กสำหรับกล่องทดลอง

3.3.2 ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมผนังทดสอบที่ 1 และกล่องทดสอบ

หลังจากทำการติดตั้งโคมโพลียูรีเทนที่ผนังเรียบร้อยแล้ว จึงทำการติดตั้งพัดลมระบายอากาศ และติดตั้ง clip สำหรับวางแผ่น terracotta เริ่มต้นจากการเตรียมผนังทดสอบที่ 1 ด้วยการติดตั้งแผ่นสมาร์ทบอร์ดขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร หนา 1 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.8 โครงเหล็กหลังประกอบกับโคมโพลียูรีเทนสำหรับกล่องทดลอง
และ ผนังต้นแบบแผ่นสมาร์ทบอร์ดหนา 1 เซนติเมตร

3.3.3 ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมผนังทดสอบที่ 2

หลังจากนั้นเตรียมผนังทดสอบที่ 2 ด้วยการยึดผนัง terracotta ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร กับ short beam เพื่อเตรียมติดตั้งกับโครงเหล็กบนกล่องทดลองต่อไป



ภาพที่ 3.9 แผ่นผนังทดสอบแผ่น terracotta ที่ 2 เมื่อติดตั้ง short beam ของกล่องทดลองที่ 2

3.3.4 ขั้นตอนที่ 4 การติดตั้งผนังทดสอบกับกล่องทดลอง

ทำการติดตั้งผนังทดสอบกับกล่องทดลอง เพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิต่อไป



ภาพที่ 3.10 การติดตั้งผนังทดสอบ และผนังทดสอบกับกล่องทดลองที่ทำการติดตั้งเรียบร้อยแล้ว (ตามลำดับ)

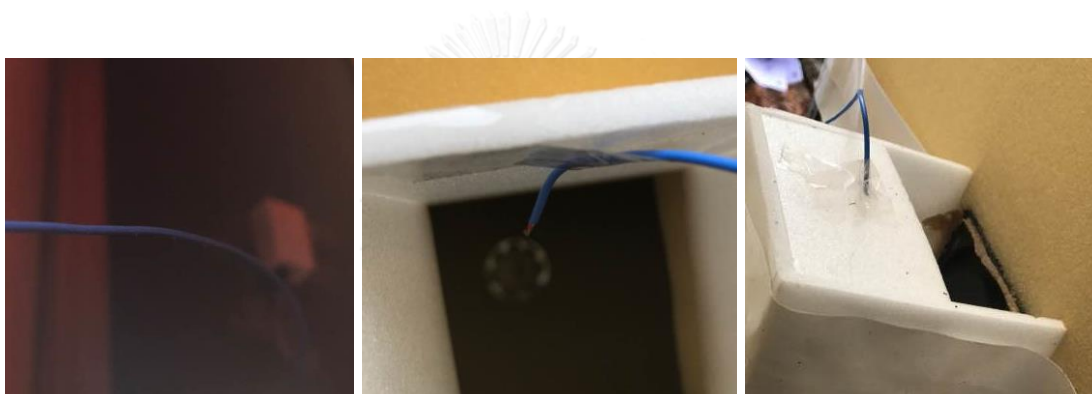
3.4 ช่วงการทดลอง (กล่องทดลอง)

3.4.1 ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ

สำหรับการวัด อุณหภูมิผิวผนังติดตั้งโดยการติดเซ็นเซอร์กับผิววัสดุ โดยปิดทับเซ็นเซอร์ด้วย โฟม เพื่อไม่ให้ความร้อนจากภายนอกมีผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวที่วัดได้ ส่วนเซ็นเซอร์สำหรับเก็บข้อมูล อากาศเข้าและอากาศออก จะติดโฟมไว้รอบบริเวณอากาศเข้าและอากาศออก เพื่อป้องกันแสงแดด ไม่ให้มีผลต่ออุณหภูมิที่วัดได้



ภาพที่ 3.11 การติดตั้งเซ็นเซอร์เก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของผนังต้นแบบ กับผนังทดสอบ และ อุณหภูมิช่องว่างอากาศภายในผนัง (ตามลำดับ)



ภาพที่ 3.12 การติดตั้งเซ็นเซอร์เก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิของผิวผนังด้านใน อุณหภูมิอากาศภายนอก และอุณหภูมิอากาศภายใน (ตามลำดับ)

3.4.2 ขั้นตอนที่ 2 การเก็บข้อมูลวัดอุณหภูมิ

เริ่มต้นการเก็บข้อมูลอุณหภูมิด้วยการบันทึกค่าอุณหภูมิในบริเวณต่างๆ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ทั้งวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky) และวันครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day) ของผนังทดสอบที่ 1 ที่จำลองด้วยวัสดุผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร หนา 1 เซนติเมตร และผนังทดสอบที่ 2 ที่จำลองด้วยผนัง terracotta ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร ทั้งหมด 8 แผ่น โดยยึดกับแผ่นสมาร์ทบอร์ดหนา 1 เซนติเมตร ด้วยโครงเหล็ก และมีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซนติเมตร

ทำการทดลองกลางแจ้งโดยหันหน้าผนังหาทิศทางที่แดดส่องในช่วงเวลาที่ทำกรวัดมากที่สุด เมื่อทำการบันทึกอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว จึงนำค่าอุณหภูมิที่ได้ มาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความต้านทานความร้อน

3.4.3 ขั้นตอนที่ 3 การรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิ

เก็บข้อมูลจาก 12-Channel Temperature Recorder ซึ่งบันทึกใน SD CARD เพื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิมาวีเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน ของผนังทดสอบที่ 1 (Basecase) และผนังทดสอบที่ 2

3.4.4 ขั้นตอนที่ 4 การใช้ผลจากกล่องทดลองในการเข้าสมการทางคณิตศาสตร์

นำใช้ผลจากกล่องทดลอง ไปเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังทดสอบที่ 1 และผนังทดสอบที่ 2 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานความร้อน

$$Q_1 = (1/R) \cdot A \cdot (T_o - T_i) \quad \text{สมการที่ 1}$$

Q_1	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
$1/R$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)
T_o	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า ($^\circ C$)
T_i	คือ	อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า ($^\circ C$)

$$Q_2 = CFM \cdot (1.08) \cdot (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}) \quad \text{สมการที่ 2}$$

CFM	คือ	ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศที่ใช้ ($ft^2/minute$)
1.08	คือ	ค่าคงที่
$T_{\text{outlet air}}$	คือ	อุณหภูมิที่วัด ณ ช่องว่างอากาศออก หรือ อุณหภูมิภายนอก ($^\circ F$)
$T_{\text{inlet air}}$	คือ	อุณหภูมิที่วัด ณ ช่องว่างอากาศเข้า ($^\circ F$)

เมื่อ $Q_1 = Q_2$ จะได้

$$(1/R) \cdot A \cdot (T_o - T_i) = CFM \cdot 1.08 \cdot (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}})$$

เมื่อเข้าสมการแล้วจะได้ค่าความต้านทานความร้อนรวม จากนั้นนำค่าความต้านทานความร้อน ที่ได้ไปใช้ในการป้อนข้อมูลเปลือกอาคารสำหรับอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE4.1 ต่อไป

3.5 ช่วงการทดลอง (จำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์)

3.5.1 ขั้นตอนที่ 1 กำหนดรูปแบบของอาคารในโปรแกรม VisualDOE4.1

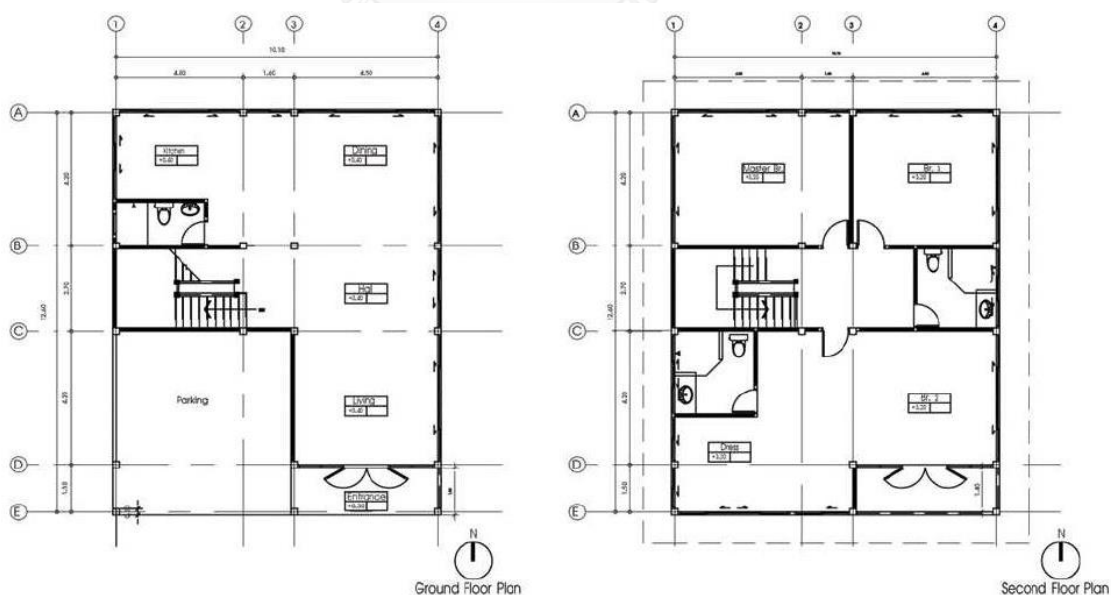
หลังจากได้ค่าความต้านทานความร้อนของระบบผนัง terracotta แล้ว นำค่าที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว มาใส่ค่าในโปรแกรม เพื่อจำลองประสิทธิภาพทางพลังงาน ในสภาพอากาศของประเทศไทย ด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 โดยช่วงเวลาใช้สอยอาคารในการจำลองเพื่อหาค่าในการใช้พลังงาน

การวิจัยนี้ทำการรวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารจากเอกสารทางวิชาการ โดยคัดเลือกอาคารต้นแบบ (Reference Building))จากการศึกษาลักษณะของอาคารซึ่งพบทั่วไปในประเทศไทย ในการจำลองผลการใช้พลังงานของผนังทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางความร้อน

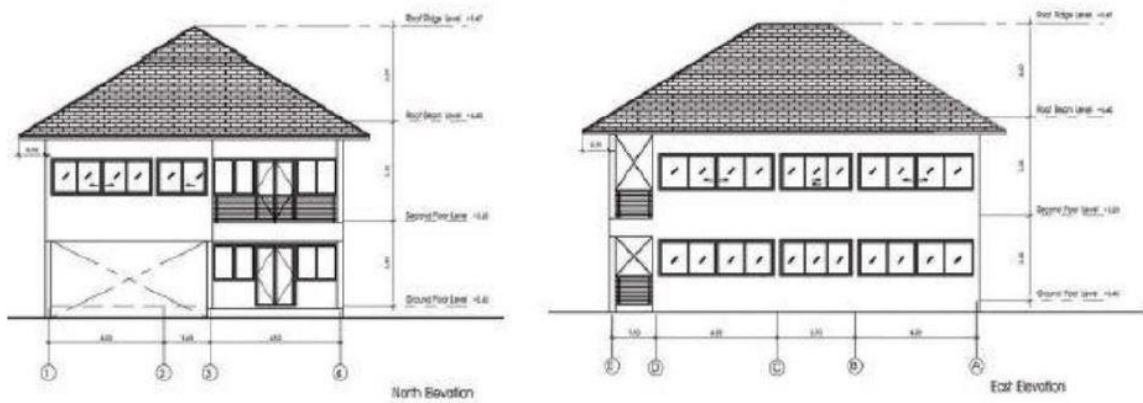
ในการวิจัยนี้ทำการศึกษาอาคาร 2 ประเภท ดังนี้

1) บ้านพักอาศัย

รูปแบบอาคารที่นำมาอ้างอิงในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นบ้านพักอาศัยสองชั้น ที่มีผังอาคารที่เรียบง่าย โดยอาคารบ้านพักอาศัยที่ใช้เป็นอาคารต้นแบบได้มากจากงานวิจัยการพัฒนากেনซ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว (อรรถนเศรษฐบุตุตร, 2549)



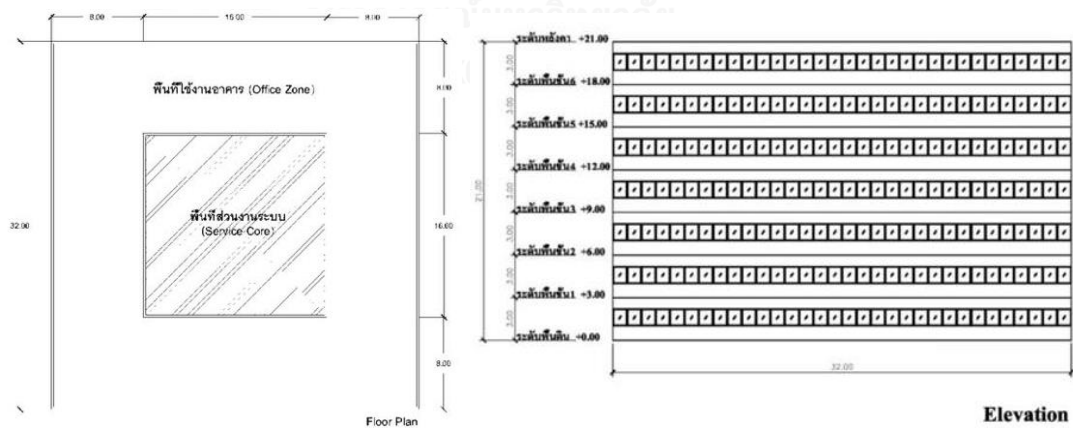
ภาพที่ 3.13 แพลนอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ



ภาพที่ 3.14 รูปด้านอาคารพักอาศัยต้นแบบ

2) อาคารสำนักงาน

อาคารต้นแบบที่นำมาใช้ในการวิจัย ได้มาจากงานวิจัยการจัดทำค่ามาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อาคารนี้มีพื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร และมีความสูงไม่เกิน 7 ชั้น หรือความสูงไม่เกิน 23 เมตร ซึ่งเป็นอาคารที่มีจำนวนมากในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (อรรถน์ เศรษฐบุตุตร, 2552)



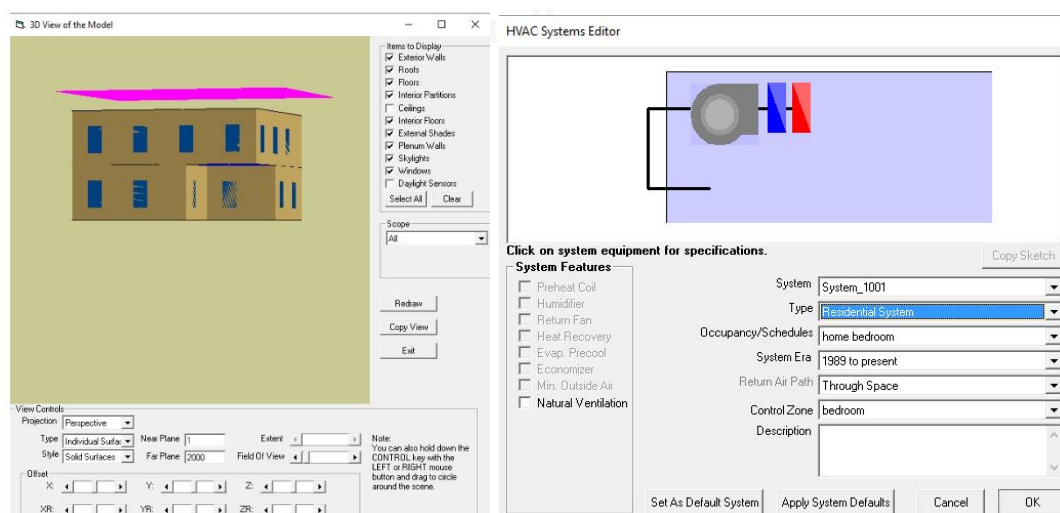
ภาพที่ 3.15 แพลน และรูปด้านอาคารสำนักงานต้นแบบ (ตามลำดับ)

3.5.2 ขั้นตอนที่ 2 ป้อนข้อมูลต่างๆในโปรแกรม VisualDOE4.1

เนื่องจากองค์ประกอบหลักในการจำลองผลการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 แบ่งออกเป็น Cooling Load, System, Plant และ Economics ซึ่งใช้คำนวณรายจ่ายที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงาน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องป้อนข้อมูลต่าง ๆ ลงใน ได้แก่

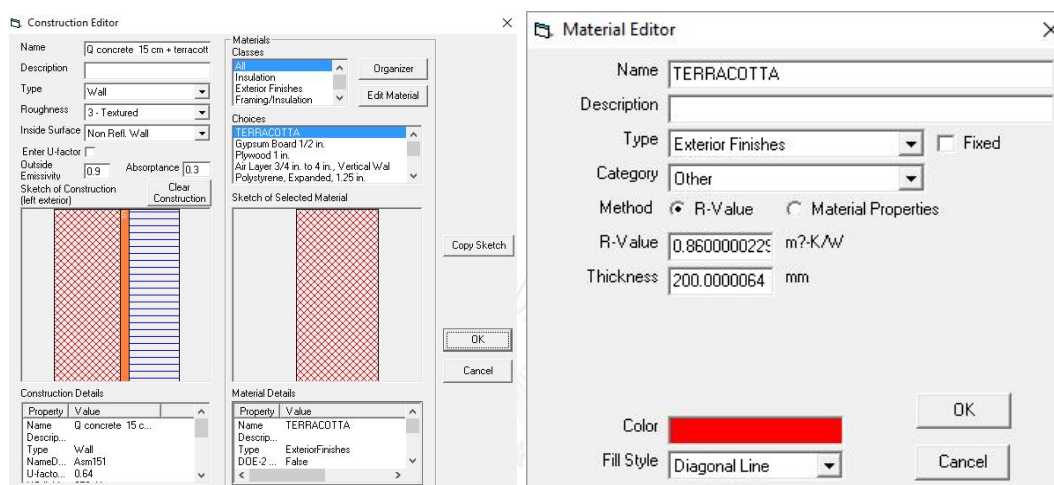
- ระยะเวลาการเปิด-ปิดเครื่องปรับอากาศในแต่ละวัน
- อุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ
- ประเภทและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ
- ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์
- แสงสว่างในแต่ละประเภทอาคาร
- ตารางเวลาการใช้อาคารและความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร

เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี ในการคำนวณการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็น อาศัยปัจจัยภายนอกและภายในอาคาร ปัจจัยภายนอกอาคาร มีดังนี้ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่เปลือกอาคารทั้งผนังและหลังคา อิทธิพลจากการแผ่รังสีอาทิตย์ การรั่วซึมของอากาศ ส่วนปัจจัยภายในอาคาร มีดังนี้ ข้อมูลการใช้งานอาคาร ความร้อนที่เกิดจากความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ ความร้อนที่เกิดจากการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังและไฟฟ้าแสงสว่าง เป็นต้น



ภาพที่ 3.16 รูปแบบโปรแกรม VisualDOE4.1

สำหรับงานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของผนังสมาร์ทบอร์ด เปรียบเทียบกับระบบผนัง terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ กับผนังอาคารแต่ละประเภทที่นิยมใช้กันทั่วไป ในการจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1 จึงระบุประเภทของผนังอาคารด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติการต้านทานความร้อน และความหนาของผนังแล้วนำมาประกอบกันเป็นเปลือกอาคารตามต้องการ



ภาพที่ 3.17 การป้อนข้อมูลรายละเอียดของผนังเปลือกอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.1

3.5.3 การตั้งค่าสภาวะการใช้งานของอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE4.1

โดยพิจารณาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่อตารางเมตรในระยะเวลาการใช้งานในหนึ่งปี ซึ่งประกอบด้วย

- 1) ค่าการใช้พลังงานทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ และเครื่องเป่าลม (Cooling And Fan)
- 2) การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting)
- 3) อุปกรณ์ไฟฟ้า (Equipment)

1) อาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน)

อ้างอิงข้อมูลอาคารจากงานวิจัยการพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว (อรรถน์ เศรษฐบุตร, 2549) ที่ศึกษารูปแบบของอาคารพักอาศัยในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสภาวะการใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ

พื้นที่ใช้งาน	บ้านพักอาศัย	
	ห้องนั่งเล่น	ห้องนอน
ขนาด (ตร.ม.)	112	132
รวม (ตร.ม.)	244	
พื้นที่ปรับอากาศ	112	132
รวม (ตร.ม.)	244	
ระยะเวลาในการใช้งานเครื่องปรับอากาศ		
วันธรรมดา	20:00 - 22:00 น.	20:00 - 07:00 น.
วันเสาร์-อาทิตย์	20:00 - 22:00 น.	20:00 - 08:00 น.
วันหยุด	20:00 - 22:00 น.	22:00 - 08:00 น.
WWR (Window to wall ratio)	13.2%	
WWR ในแต่ละทิศ	13.5%	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตร.ม.)	41	
ปริมาณผู้ใช้อาคาร (คน)	5	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (W/sq.m.)	2.69	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าแสงสว่างLPD (W/sq.m.)	12.91	
ระบบปรับอากาศ	Split type	

2) อาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันและกลางคืน)

อ้างอิงข้อมูลอาคารจากงานวิจัยการพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว (อรรถน์ เศรษฐบุต, 2549) ที่ศึกษารูปแบบของอาคารพักอาศัยในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลสภาวะการใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ

	บ้านพักอาศัย	
	ห้องนั่งเล่น	ห้องนอน
พื้นที่ใช้งาน		
ขนาด (ตร.ม.)	112	132
รวม (ตร.ม.)	244	
พื้นที่ปรับอากาศ		
รวม (ตร.ม.)	244	
ระยะเวลาในการใช้งานเครื่องปรับอากาศ		
วันธรรมดา	06:00 - 21:00 น.	20:00 - 07:00 น.
วันเสาร์-อาทิตย์	06:00 - 21:00 น.	20:00 - 08:00 น.
วันหยุด	06:00 - 21:00 น.	22:00 - 08:00 น.
WWR (Window to wall ratio)	13.2%	
WWR ในแต่ละทิศ	13.5%	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตร.ม.)	41	
ปริมาณผู้ใช้อาคาร (คน)	5	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (W/sq.m.)	2.69	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าแสงสว่างLPD (W/sq.m.)	12.91	
ระบบปรับอากาศ	Split type	

3) อาคารสำนักงาน (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน)

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยการจําค่ามาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยตั้งค่าแต่ละส่วนในอาคารสำนักงาน (อรรถจน์ เศรษฐบุบุตร, 2552) จําแนกดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสภาวะการใช้งานที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศของอาคารสำนักงานต้นแบบ

	อาคารสำนักงาน
พื้นที่ใช้งาน	พื้นที่สำนักงาน
จำนวนชั้น	8
ขนาด (ตร.ม.)	1024
รวม (ตร.ม.)	8192
พื้นที่ปรับอากาศ	1024
รวม (ตร.ม.)	8192
ระยะเวลาในการใช้งานเครื่องปรับอากาศ	
วันธรรมดา	09:00 - 18:00 น.
วันเสาร์-อาทิตย์	-
วันหยุด	-
WWR (Window to wall ratio) (%)	43.8
WWR ในแต่ละทิศ (%)	43.8
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตร.ม.)	1570
ปริมาณผู้ใช้อาคาร (คน)	40
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (W/sq.m.)	8.07
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าแสงสว่างLPD (W/sq.m.)	12
ระบบปรับอากาศ	Split type

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ซึ่งประกอบไปด้วยการทดลอง ทั้งหมด 2 ส่วน ตั้งแต่การทดลองด้วยกล่องทดลองและนำผลจากการทดลองมาประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพื่อจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน จากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง



ภาพที่ 4.1 สถานที่ทดลองและการศึกษาด้วยกล่องทดลอง

ในส่วนของการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่ได้นำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยจำลองกล่องทดลองเสมือนติดตั้งผนังแผ่น terracotta ในอาคารจริง และด้านหน้าของกล่องเว้นที่ว่างสำหรับติดตั้งวัสดุผนัง ขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร เปรียบเสมือนการทดสอบระบบการติดตั้งผนังที่อาคารสูง 1 ชั้น โดยเปรียบเทียบผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ที่มีการติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ กับผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ที่ไม่มีวัสดุปิดผิวด้วยผนังเปลือกอาคารใดๆ (Basecase)

- กล่องทดลองผนังทดสอบที่ 1 ทำการจำลองผนังที่ไม่มีวัสดุปิดผิวด้วยผนังเปลือกอาคารใดๆ (Basecase) ด้วยวัสดุผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ขนาดกว้าง 0.3 เมตร สูง 2.4 เมตร หนา 1 เซนติเมตร บนกล่องทดลอง
- กล่องทดลองผนังทดสอบที่ 2 ทำการจำลองด้วยผนังแผ่น terracotta ขนาด 30 x 30 เซนติเมตร หนา 1.8 เซนติเมตร ทั้งหมด 8 แผ่น โดยยึดกับแผ่นสมาร์ทบอร์ดหนา 1 เซนติเมตร ด้วยโครงเหล็ก และมีช่องว่างอากาศกว้าง 10 เซนติเมตร บนกล่องทดลอง

การวิจัยเลือกสถานที่ในการทดลองตั้งอยู่บริเวณเขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร โดยตั้งกล่องทดลองไว้บริเวณกลางแจ้ง ปราศจากร่มเงารอบด้าน โดยเลือกวันที่ทำการทดลองในช่วงเดือน พฤษภาคม ทั้งวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky) และวันครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day) ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ บันทึกอุณหภูมิทุก 10 นาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยบันทึกข้อมูลทั้งหมด 5 จุดต่อ 1 กล่อง การทดสอบเพื่อวัดอุณหภูมิ ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิของอากาศภายนอก อุณหภูมิผิวผนังด้านนอก อุณหภูมิอากาศของช่องว่างอากาศระหว่างผนัง อุณหภูมิผิวผนังด้านใน อุณหภูมิของอากาศภายใน กล่องที่ปล่อยออกมาผ่านทางพัดลมดูดอากาศ โดยนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ เข้าสมการ เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบผนังนั้น ตามสมการที่ 1 และ 2

ข้อจำกัดในการวิจัย

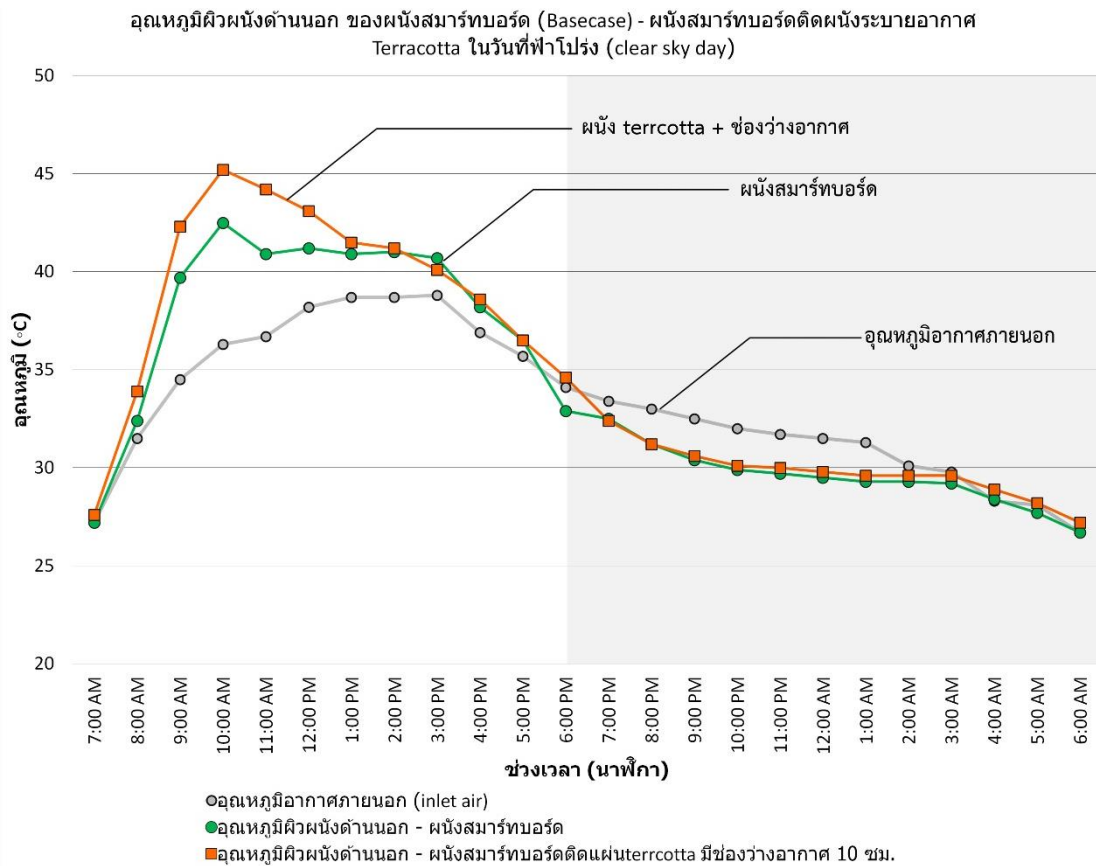
- การทดลองนี้เป็นการทดลองเปรียบเทียบกับผนังต้นแบบ เป็นผนังสมาร์ทบอร์ดเพียงชนิดเดียวเท่านั้น และเปรียบเทียบกับผนังแผ่น terracotta ขนาดและสีเดียวเท่านั้น
- การทดลองนี้เป็นการทดลองกลางแจ้งในทิศเหนือเท่านั้น เนื่องจากเป็นทิศที่แดดส่องมากที่สุด ช่วงเวลาที่ทำการวัดอุณหภูมิ (เดือนพฤษภาคม – เดือนมิถุนายน)
- การทดลองนี้เป็นการทดลองวัดอุณหภูมิวันที่ 1 เป็นวันที่ฟ้าโปร่ง ไม่มีปริมาณฝน (clear sky) และวันที่ 2 เป็นวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day) มีปริมาณฝนต่อวัน 6.9 มม. มีฝนตกเล็กน้อยในช่วงเวลาตั้งแต่ 3:00 PM และมีแสงแดดเล็กน้อยในช่วงเวลา 10:00 AM – 2:00 PM

ผลการทดลอง

จากการทดลองด้วยกล่องทดลอง ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่

4.1.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง ผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด (base case) กับผนัง terracotta เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 24 ชั่วโมง ในวันที่ฟ้าโปร่ง (clear sky)

1) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก



แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ

ช่วงเวลากลางวัน

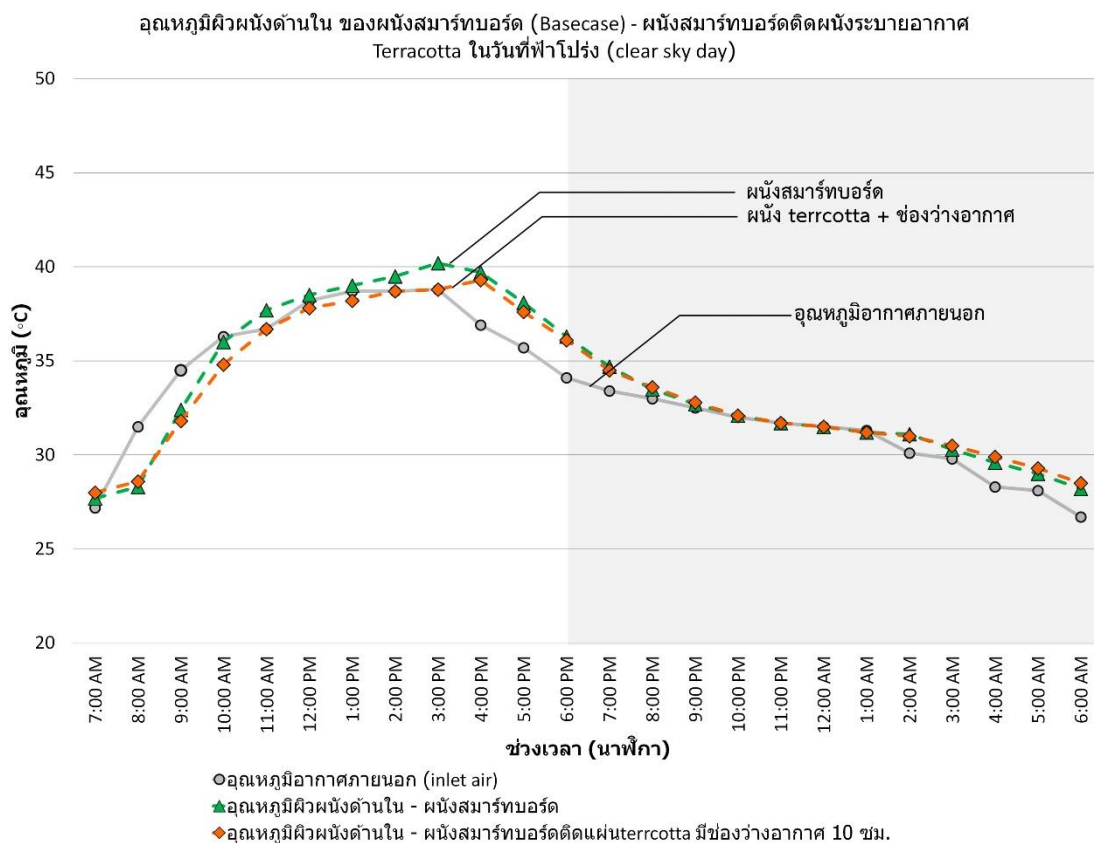
จากแผนภูมิข้างต้น พบว่าในช่วงเวลากลางวัน เมื่อวัสดุผนังได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกสูงขึ้น จากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Solar Absorptance) และการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวผนัง ซึ่งมีผลโดยตรงกับผิวผนังภายนอกของวัสดุผนัง terracotta ส่งผลให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกสูงกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ด 3.7 °C ในเวลา 11:00 AM

ช่วงเวลากลางคืน

เมื่อวัสดุผนังเริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (night sky Radiation) ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกเริ่มต่ำลงและลดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกประมาณ 2 °C ในช่วงเวลา 7:00 PM – 02:00 AM จากแผนภูมิที่ 4.1 พบว่าผนัง terracotta มีความสามารถในการคายความร้อนได้ดี เนื่องจาก

อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกในช่วงเวลากลางวันค่อนข้างสูงและ ในช่วงเวลากลางคืนลดต่ำลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของแผ่นสมาร์ทบอร์ด แสดงให้เห็นว่า ผนัง terracotta สามารถระบายความร้อนได้เร็วกว่าแผ่นสมาร์ทบอร์ด

2) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก



แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ

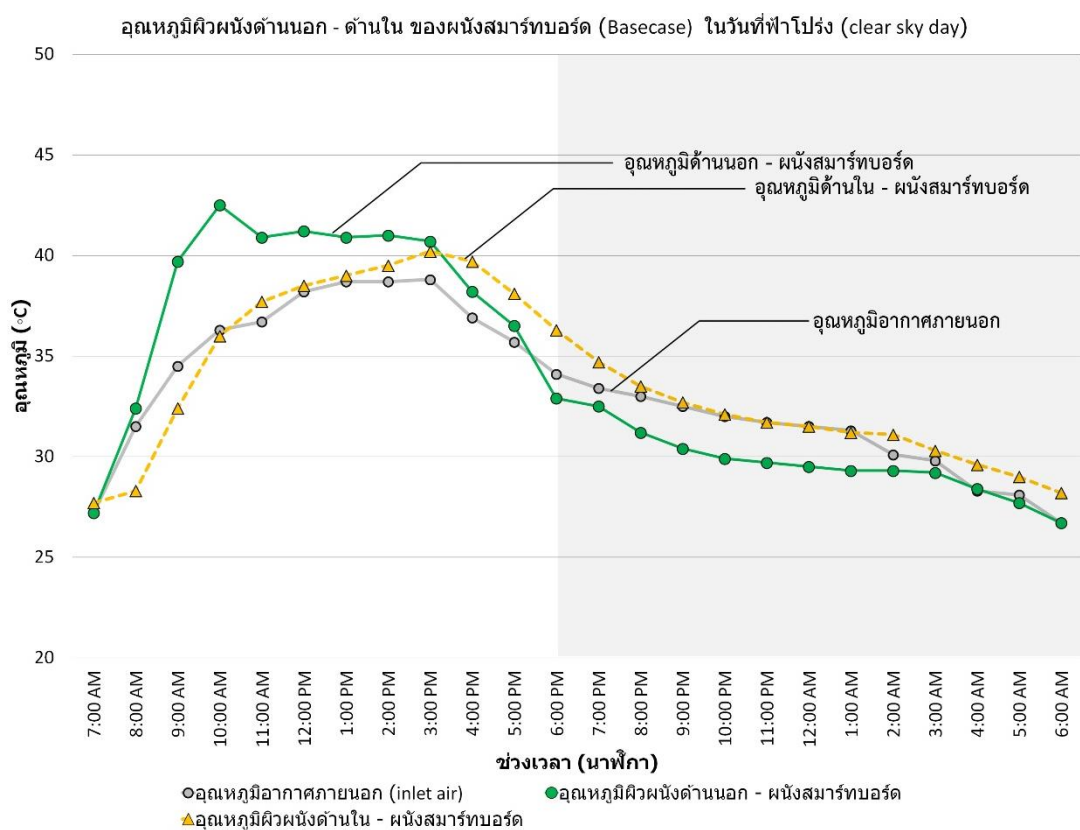
ช่วงเวลากลางวัน

เมื่อวัสดุผนังได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของวัสดุสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่ออุณหภูมิผิวผนังด้านในของวัสดุผนังด้วย จากแผนภูมิที่ 4.2 พบว่าผนัง terracotta ช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta กับผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนด้วยการพาความร้อนให้ลอยตัวขึ้นสูงทำให้อากาศร้อนออกไปยังอากาศภายนอกก่อนที่ความร้อนจะเข้าสู่ภายในอาคาร จึงมีส่วนช่วยในการลดอุณหภูมิผิวผนังด้านใน ส่งผลให้อุณหภูมิผิวผนังด้านในของแผ่น terracotta มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านในของแผ่นสมาร์ทบอร์ดถึง 1.5 °C

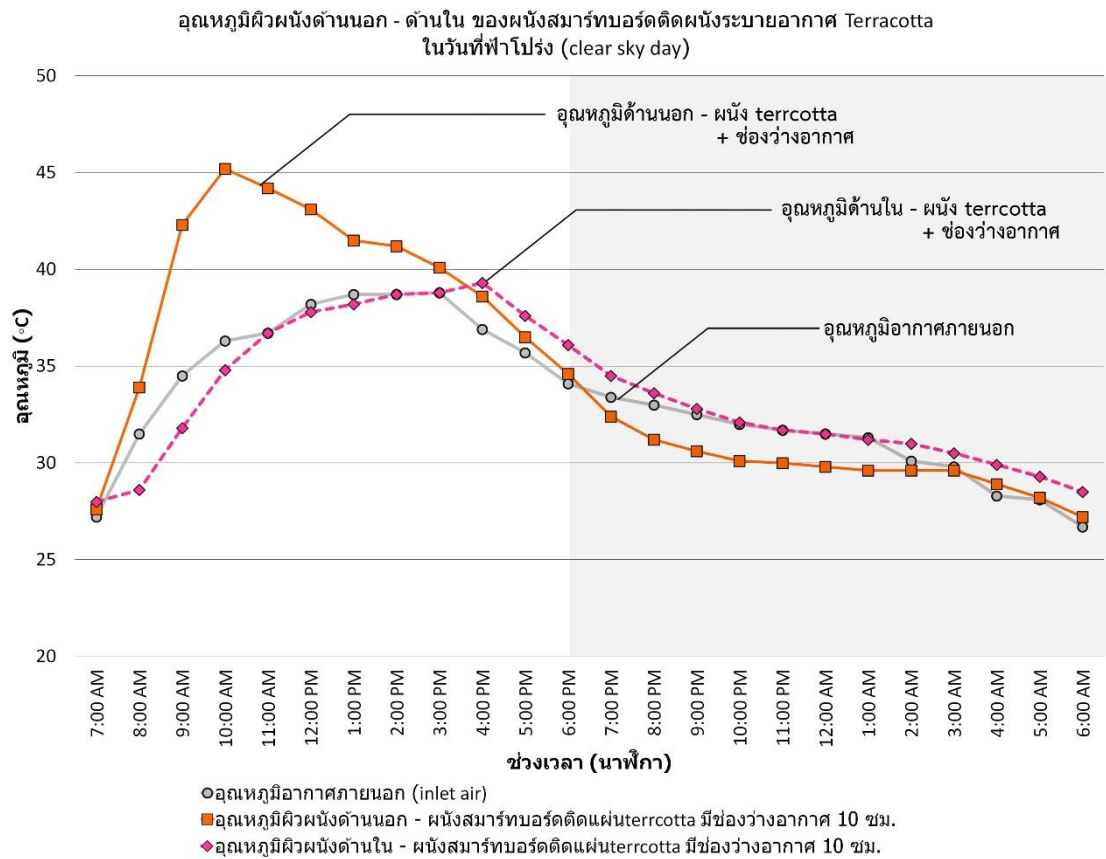
ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงกลางคืน เมื่อวัสดุผนังเริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกเริ่มต่ำลง ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิผิวผนังด้านในของวัสดุผนัง ลดต่ำลงด้วย ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.2 ผนัง terracotta จึงมีอุณหภูมิผิวผนังด้านในใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวผนังด้านในของแผ่นสมาร์ทบอร์ด

3) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ด้านใน



แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด



แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนัง terracotta

จากแผนภูมิที่ 4.3 – 4.4 แสดงให้เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนังทดสอบต่าง ๆ

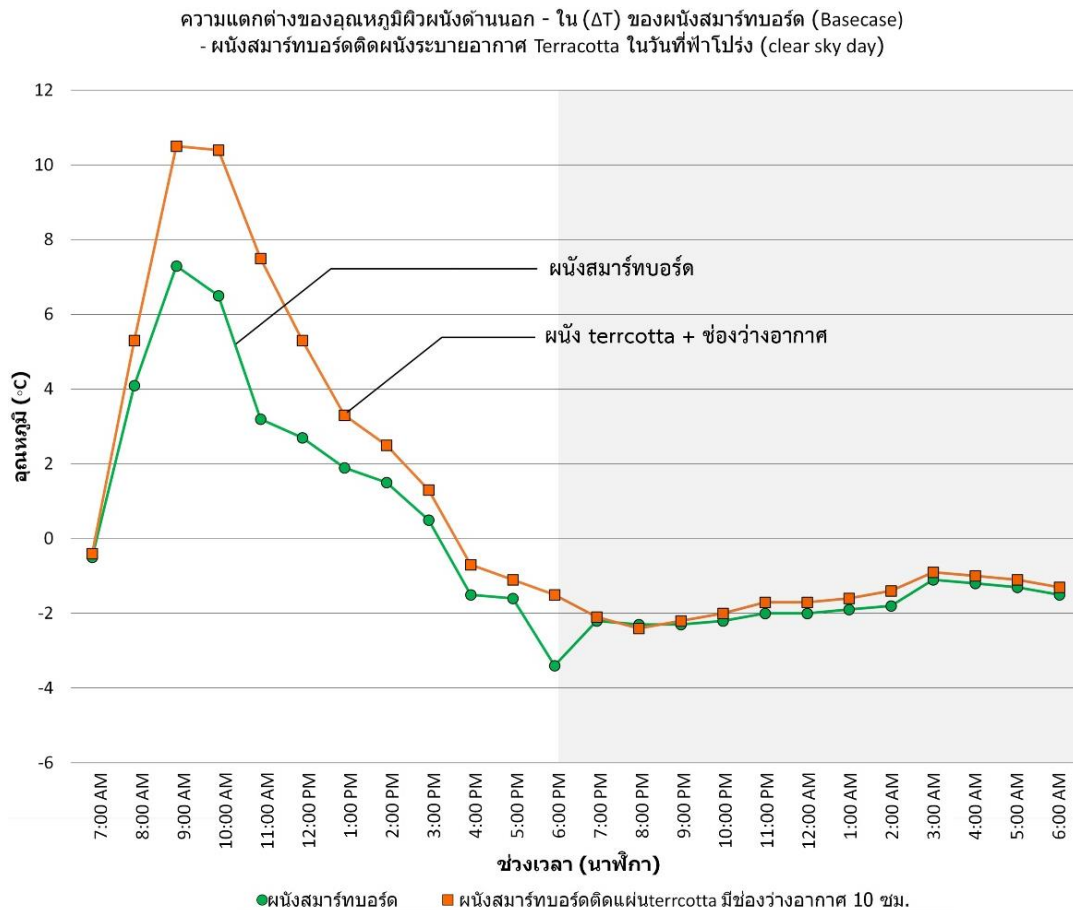
ช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงกลางวัน เมื่อวัสดุผนังได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ แผ่น terracotta ที่ติดตั้งบนแผ่นสมาร์ทบอร์ดแบบมีช่องว่างอากาศ จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในมากกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิที่เข้ามาผ่านระบบผนังสู่ผิวผนังด้านในถึง 9 – 11 °C แสดงว่าผนัง terracotta ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความร้อนจากอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกได้ดีกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ซึ่งลดอุณหภูมิได้น้อยกว่า

ช่วงเวลากลางคืน

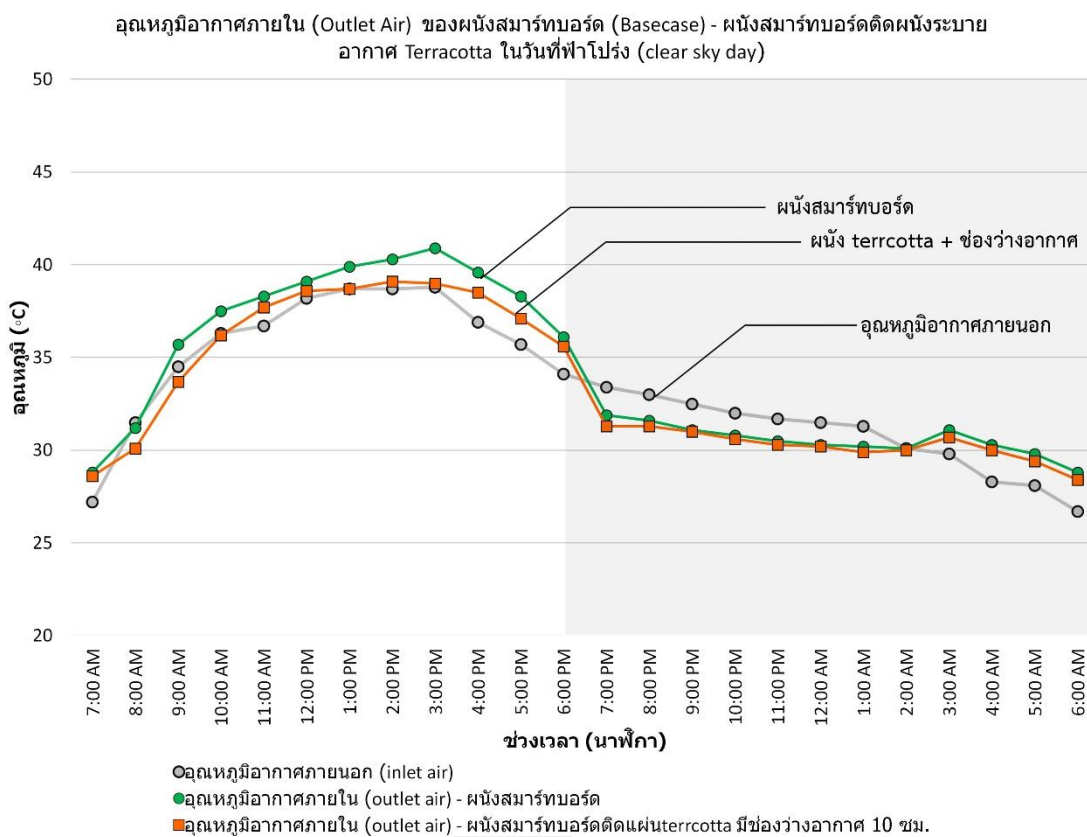
ในช่วงเวลากลางคืนความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนังทดสอบทั้ง 2 พบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนข้างน้อย เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืน มีการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของผนังเปลือกอาคารภายนอก ทำให้อุณหภูมิของผิวผนังด้านนอก

ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ และส่งผลให้อุณหภูมิของผิวผนังด้านในลดต่ำลงไปด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ใน (Delta-T) ของผนังทดสอบต่าง ๆ ดังแผนภูมิที่ 4.5



แผนภูมิที่ 4.5 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ใน (Delta-T) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

4) การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air)



แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

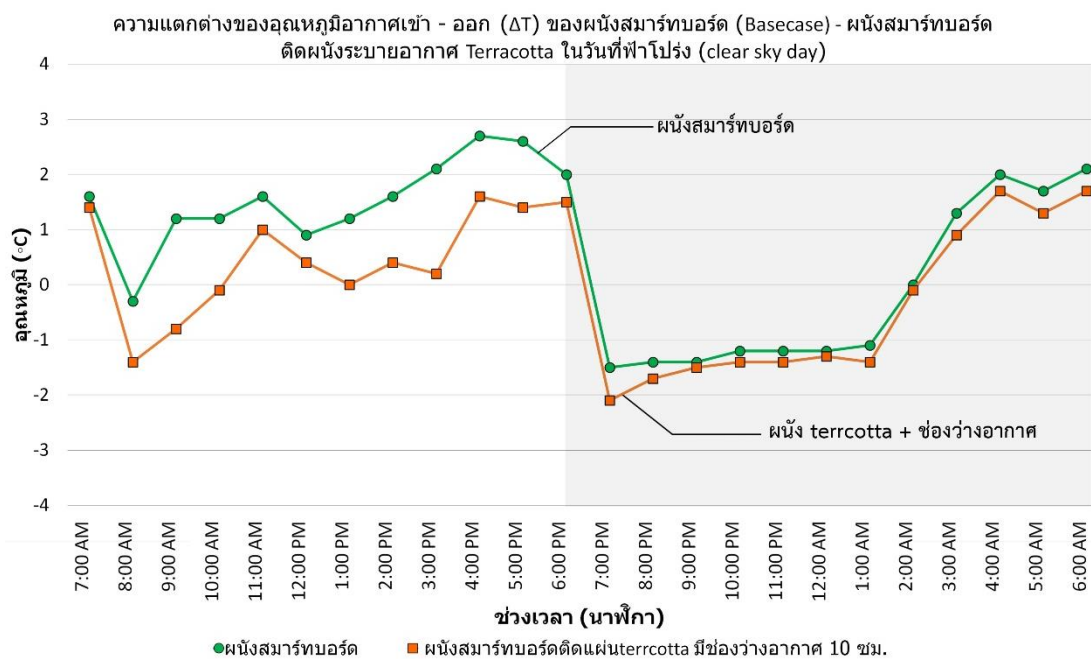
ช่วงเวลากลางวัน

จากแผนภูมิที่ 4.6 ผลจากการวัดอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ซึ่งเปรียบเสมือน อุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลอง หรือ อุณหภูมิภายในห้อง พบว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านในของวัสดุผนัง ส่งผลโดยตรงมายังอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลอง ในช่วงเวลากลางวัน การติดตั้งผนัง terracotta การมีช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta กับผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันความร้อนด้วยการพาความร้อน ให้อุณหภูมิผิวผนังสูงขึ้นทำให้อากาศร้อนออกไปยังอากาศภายนอก ก่อนที่ความร้อนจะเข้าสู่ภายในกล่อง ส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในกล่องของผนัง terracotta ต่ำกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดประมาณ 0.7-2.7 °C

ช่วงเวลากลางคืน

และในช่วงเวลากลางคืน เมื่อวัสดุผนังเริ่มมีการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในลดต่ำลง และลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ประมาณ 1.5-2 °C ในช่วงเวลา 7:00 PM – 01:00 AM ซึ่งผนังทดสอบทั้งสองได้ผลใกล้เคียงกัน

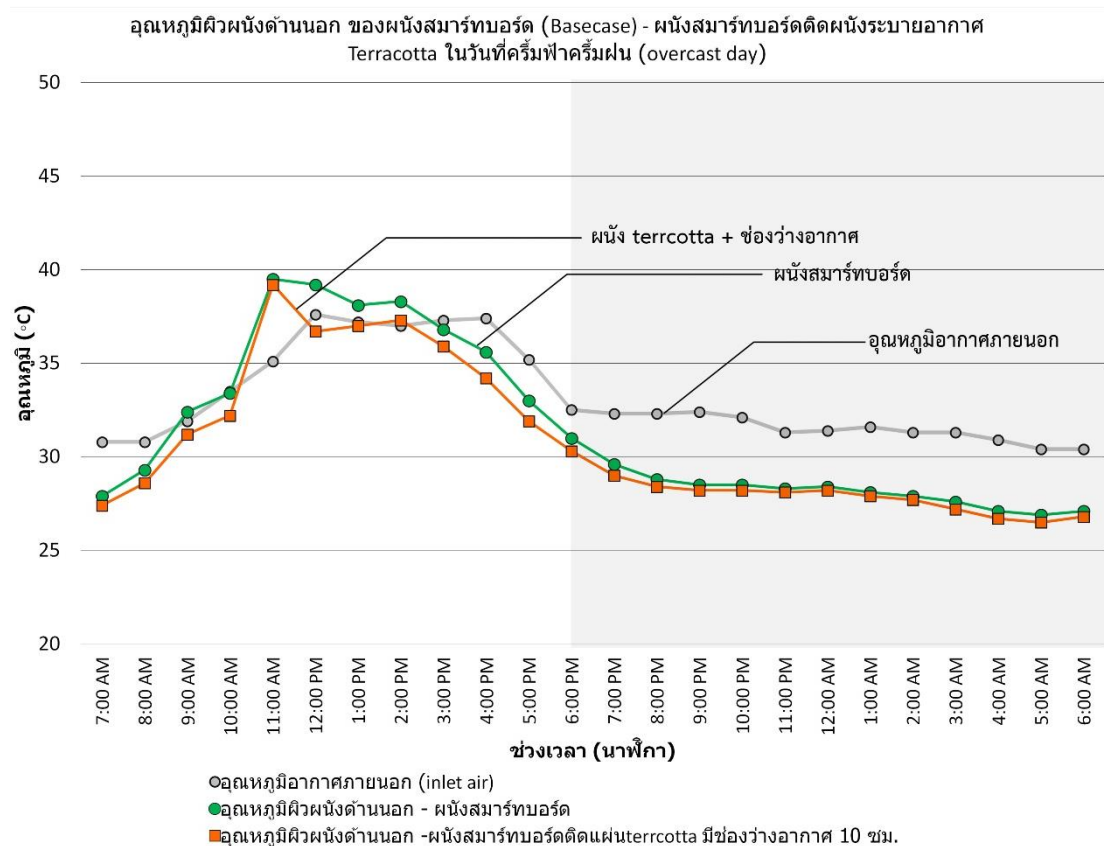
การติดตั้งผนัง terracotta มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (อุณหภูมิอากาศภายนอก) กับอุณหภูมิอากาศออก (อุณหภูมิอากาศภายใน) ต่ำกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด แสดงให้เห็นว่าการติดตั้งผนัง terracotta มีส่วนช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายในเย็นลงกว่า โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวัน ดังแผนภูมิที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า - อากาศออก (Delta-T)



แผนภูมิที่ 4.7 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (Inlet air) - อากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

4.1.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง ผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด (base case) กับผนัง terracotta เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 24 ชั่วโมง ในวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน (overcast day)

1) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก



แผนภูมิที่ 4.8 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ

ช่วงเวลากลางวัน

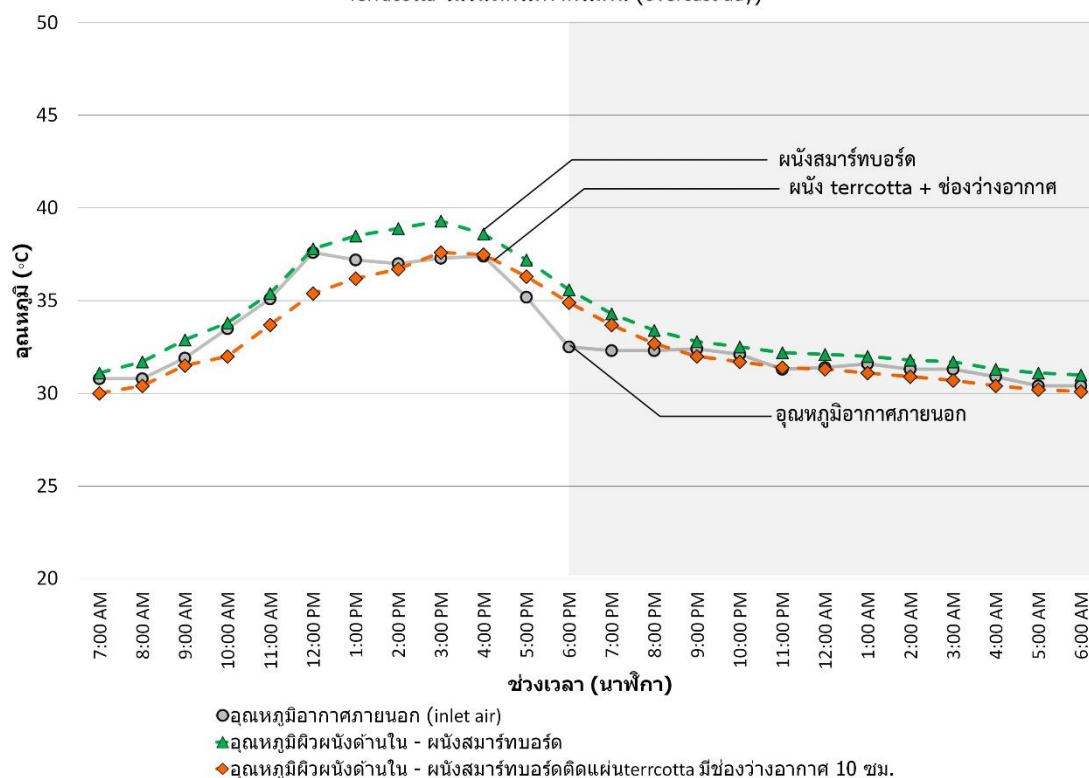
จากแผนภูมิข้างต้น เป็นการบันทึกอุณหภูมิในวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน ที่มีปริมาณฝนต่อวัน 6.9 มม. มีฝนตกเล็กน้อยในช่วงเวลาตั้งแต่ 3:00 PM และมีแสงแดดเล็กน้อยในช่วงเวลา 10:00 AM – 2:00 PM พบว่าในช่วงเวลากลางวัน ที่มีอุณหภูมิอากาศไม่สูงนัก อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของวัสดุผนังสูงชัน ในช่วงที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์เท่านั้น ส่งผลให้อุณหภูมิผิวผนังภายนอกของผนัง terracotta ไม่สูงมากนักและต่ำกว่าอุณหภูมิผิวผนังของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดประมาณ 1-2.5 °C และในช่วงที่มีมีฝนตกเล็กน้อย อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของวัสดุผนังทั้งสอง ลดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก เนื่องจาก วัสดุผนังไม่มีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ จึงไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวผนัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมีผลโดยตรงกับอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของวัสดุผนัง

ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงกลางคืน ในวันครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน เมื่อวัสดุผนังเริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกเริ่มต่ำลงและลดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ในช่วงเวลา 7:00 PM – 02:00 AM จากแผนภูมิที่ 4.8 พบว่า ในช่วงกลางคืนอุณหภูมิผิวผนังภายนอกของผนัง terracotta ลดต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกถึง 4 °C และต่ำกว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ผนัง terracotta ช่วยคายความร้อนได้ดี ในช่วงกลางคืน โดยเฉพาะในวันครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน

2) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก

อุณหภูมิผิวผนังด้านใน ของผนังสมาร์ทบอร์ด (Basecase) - ผนังสมาร์ทบอร์ดติดผนังระบายอากาศ Terracotta ในวันที่ครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน (overcast day)



แผนภูมิที่ 4.9 อุณหภูมิผิวผนังด้านในกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ของผนังทดสอบต่าง ๆ

ช่วงเวลากลางวัน

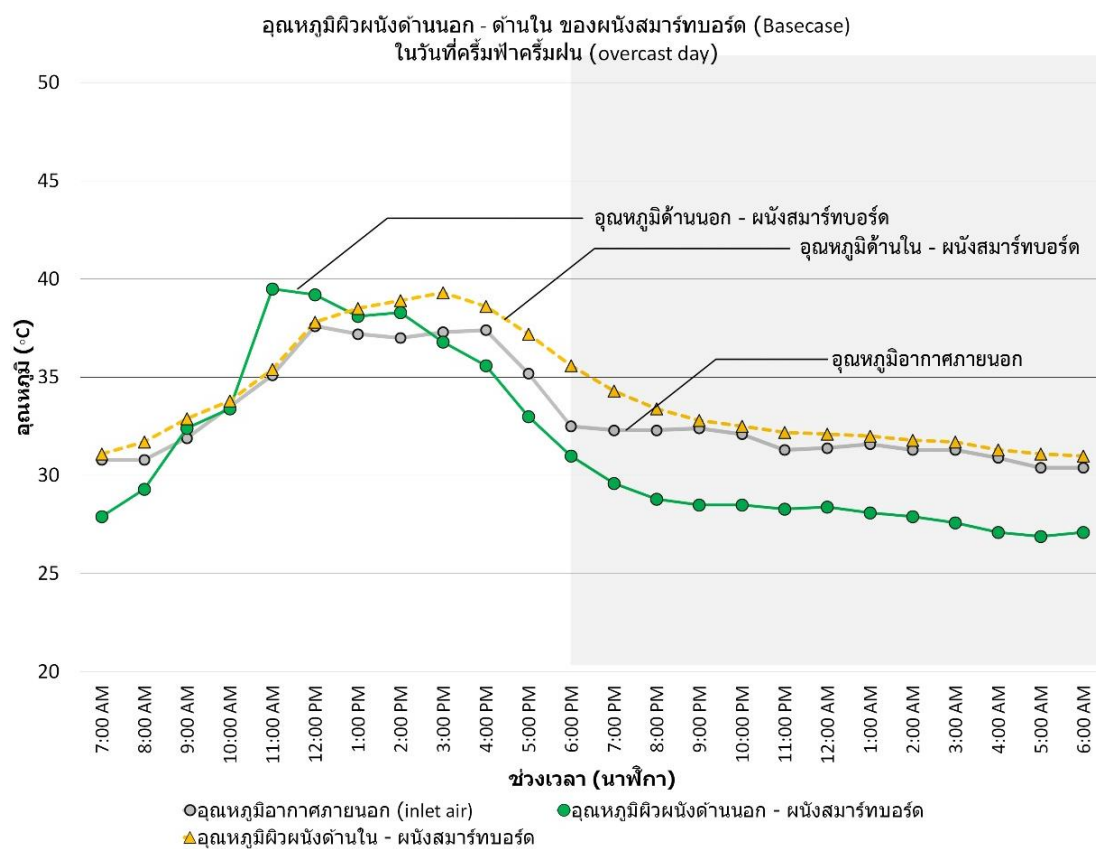
ในวันครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน จากแผนภูมิที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิของผิวผนังด้านในของผนังแผ่น terracotta ที่ติดตั้งบนผนังสมาร์ทบอร์ดแบบมีช่องว่างอากาศ ต่ำกว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ถึง 2.2 °C ในช่วงเวลาที่มีแสงแดดเล็กน้อย 10:00 AM – 2:00 PM แสดงให้เห็นว่า

การติดตั้งผนัง terracotta มีส่วนช่วยในการลดอุณหภูมิผิวผนังด้านในเนื่องจากมีความสามารถในการป้องกันความร้อน โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการแผ่รังสีอาทิตย์ ซึ่งจะเกิดกระบวนการไหลเวียนของอากาศภายในช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta กับผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด

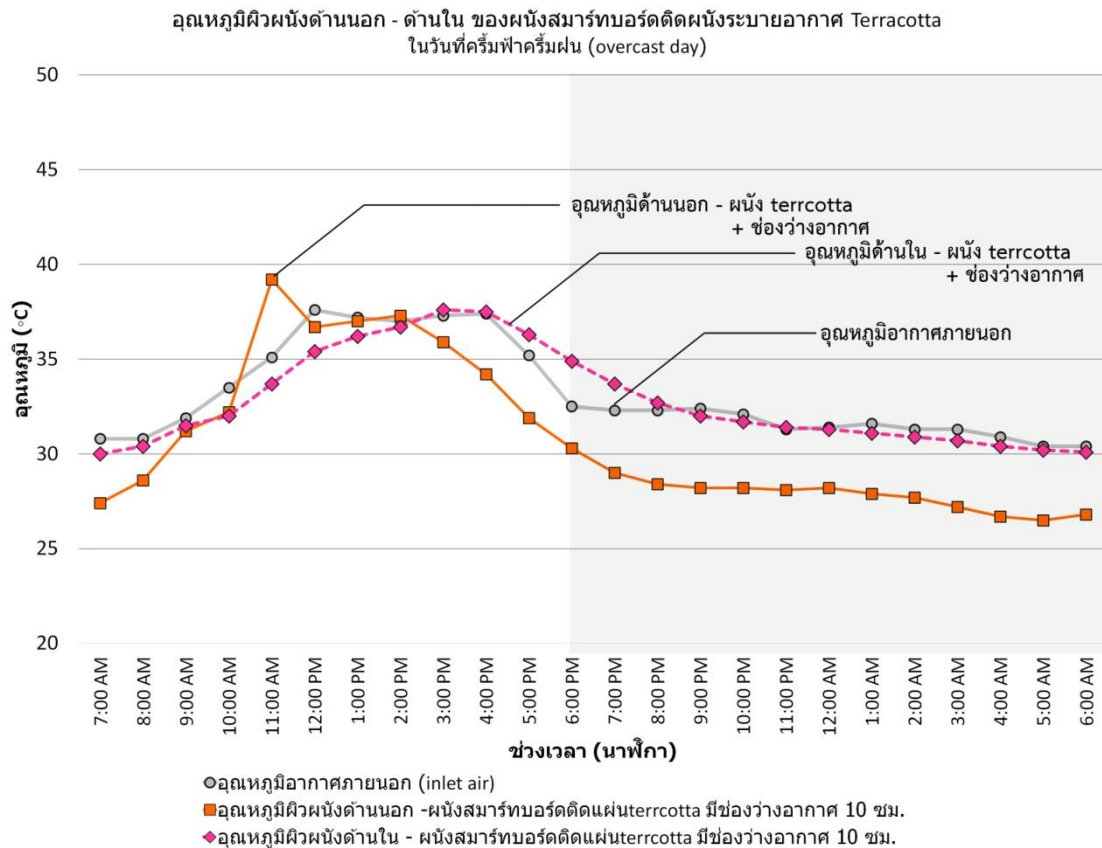
ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงกลางคืน เมื่อวัสดุแผ่น terracotta เริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านในของผนัง terracotta ต่ำลงกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดเล็กน้อย ประมาณ 1°C ดังแผนภูมิที่ 4.9

3) การเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน



แผนภูมิที่ 4.10 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด



แผนภูมิที่ 4.11 อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนัง terracotta

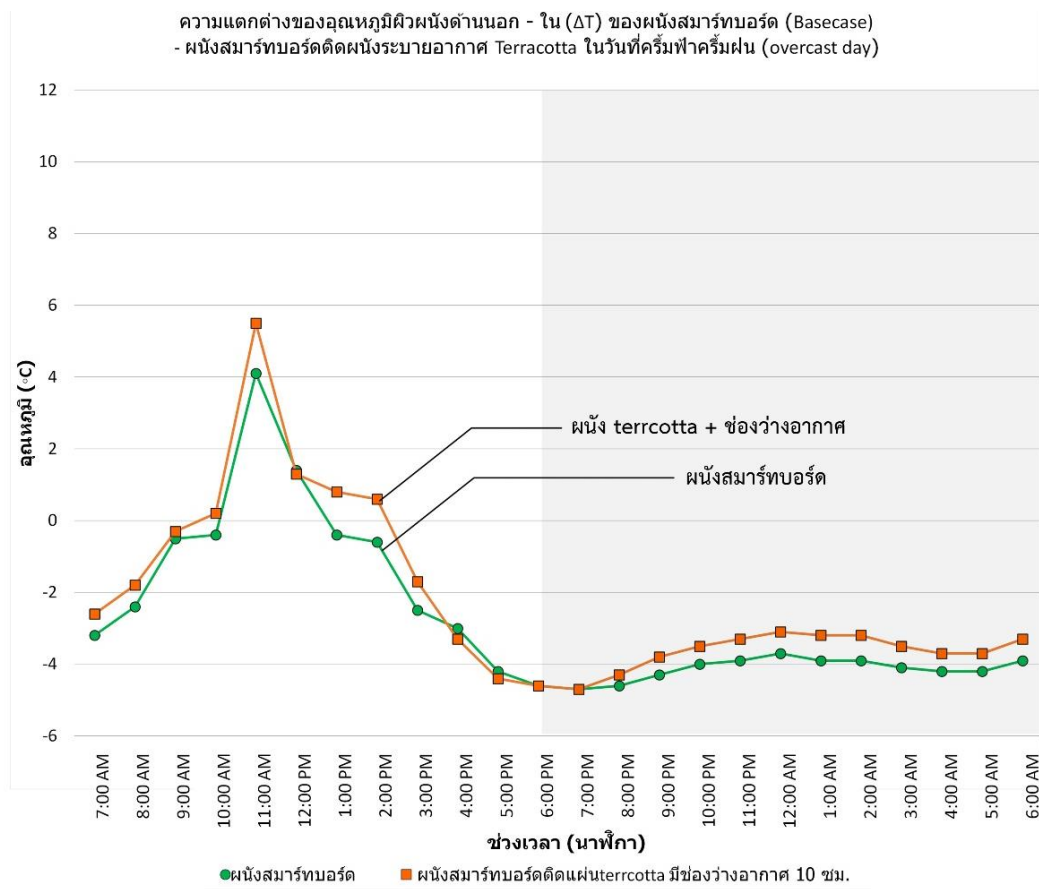
จากแผนภูมิที่ 4.10 – 4.11 แสดงให้เห็นความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในของผนังทดสอบต่าง ๆ

ช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงกลางวัน ในวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน ที่มีแสงแดดเล็กน้อยในช่วงเวลา 10:00 AM – 2:00 PM อุณหภูมิอากาศจึงไม่สูงนัก ทำให้ผนัง terracotta มีความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกและด้านในมากกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดเพียงเล็กน้อย ซึ่งช่วยลดอุณหภูมิที่เข้ามาผ่านระบบผนังสู่ผิวผนังด้านในประมาณ 5.5 °C และผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ดลดอุณหภูมิผิวผนังด้านในประมาณ 4 °C ในเวลา 11:00 AM

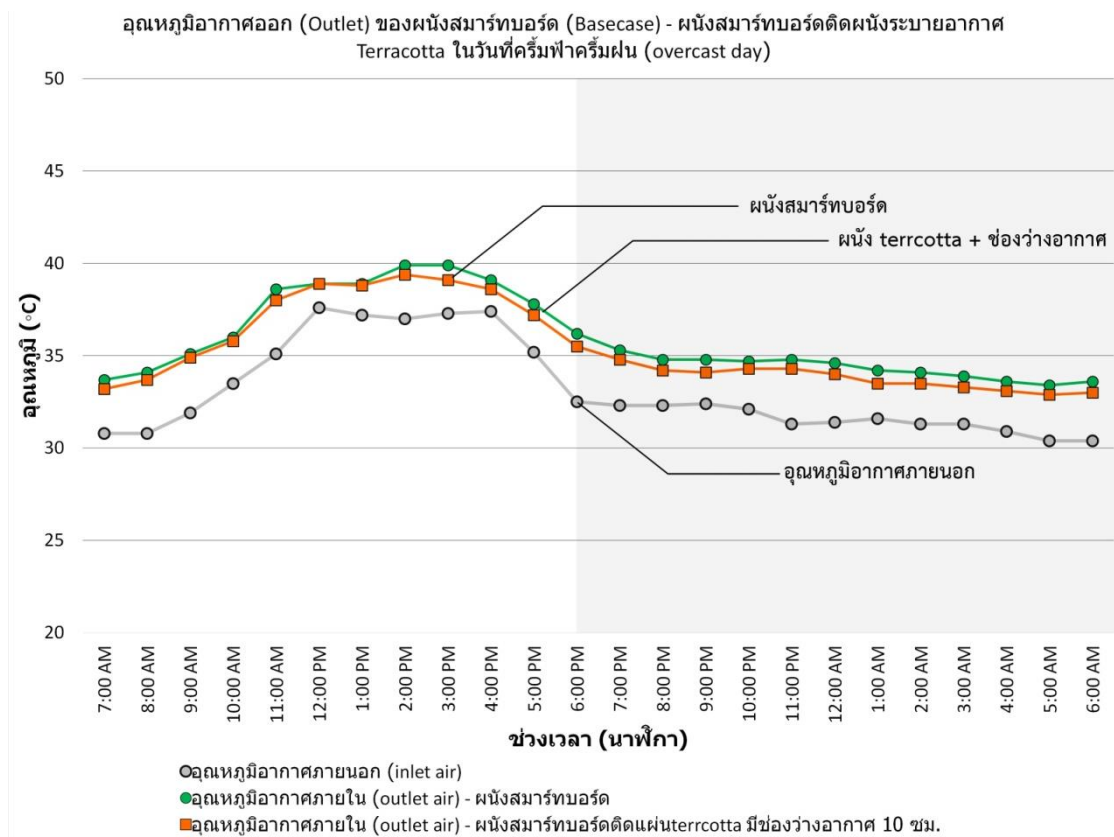
ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงเวลากลางคืน เมื่อศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอกกับอุณหภูมิผิวผนังด้านในแล้ว พบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนข้างน้อย เช่นเดียวกับในวันที่ฟ้าโปร่ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก – ใน (Delta-T) ของผนังทดสอบต่าง ๆ ดังแผนภูมิที่ 4.12



แผนภูมิที่ 4.12 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ใน (ΔT) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

4) การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air)



แผนภูมิที่ 4.13 อุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

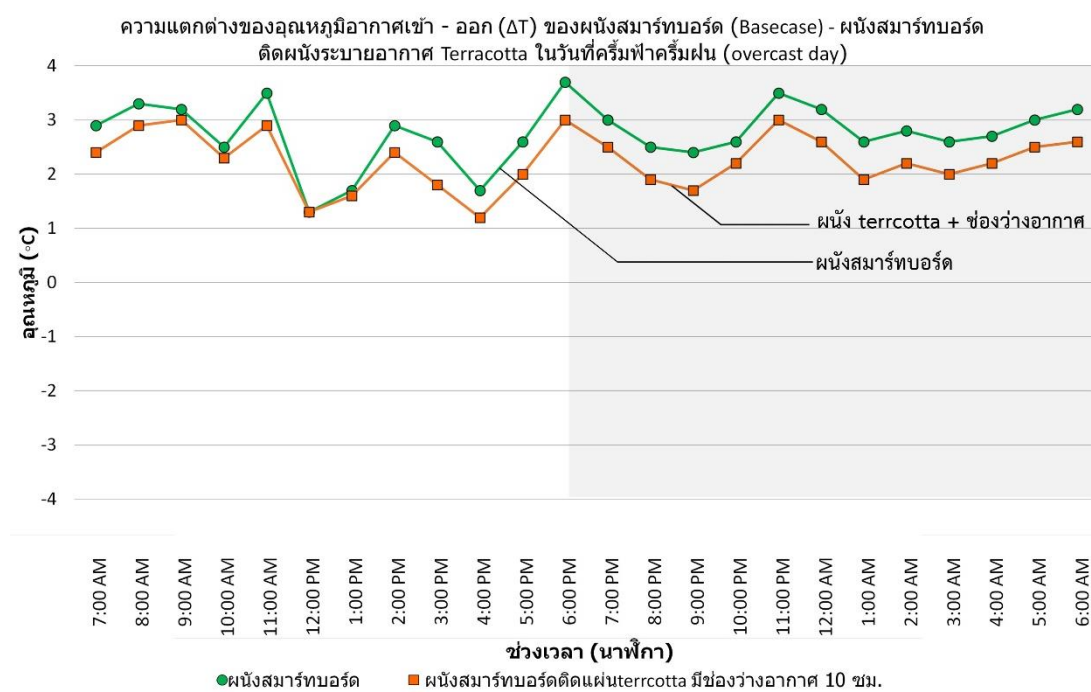
ช่วงเวลากลางวัน

จากแผนภูมิภาพที่ 4.13 ผลจากการวัดอุณหภูมิอากาศออก (Outlet air) ซึ่งเปรียบเสมือนอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลอง หรือ อุณหภูมิภายในห้อง พบว่าอุณหภูมิผิวผนังด้านในของวัสดุผนัง ส่งผลโดยตรงมายังอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลอง ในช่วงเวลากลางวัน ในวันที่ครึ้มฟ้าครึ้มฝน การติดตั้งผนัง terracotta มีอุณหภูมิอากาศภายในต่ำกว่าของผนังแผ่นสมาร์ททอบอร์ดเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก วัสดุผนังไม่มีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ จึงไม่เกิดกระบวนการพาความร้อนของช่องว่างอากาศระหว่างผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta กับผนังแผ่นสมาร์ททอบอร์ด

ช่วงเวลากลางคืน

และในช่วงเวลากลางคืน เมื่อวัสดุแผ่น terracotta เริ่มมีการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า เมื่ออุณหภูมิของผิวผนังภายในลดต่ำลง ส่งผลโดยตรงทำให้อุณหภูมิอากาศภายในของผนัง terracotta ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายในของผนังแผ่นสมาร์ททอบอร์ดประมาณ 1°C

การติดตั้งผนัง terracotta มีความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (อุณหภูมิอากาศภายนอก) กับอุณหภูมิอากาศออก (อุณหภูมิอากาศภายใน) ต่ำกว่าของผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด เช่นเดียวกันกับในวันที่มีฟ้าโปร่ง แสดงให้เห็นว่า ผนัง terracotta มีส่วนช่วยให้อุณหภูมิอากาศภายในเย็นลงกว่า ในวันครึ้มฟ้าครึ้มฝน จะเห็นผลชัดเจนในช่วงเวลาที่มีฝนตกเล็กน้อยในช่วงเวลาตั้งแต่ 3:00 PM ดังแผนภูมิที่ 4.14 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า – อากาศออก (Delta-T)



แผนภูมิที่ 4.14 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า (Inlet air) – อากาศออก (Outlet air) ของผนังทดสอบต่าง ๆ

4.1.3 ผลจากการหาค่าความต้านทานความร้อน

ผลจากการวัดอุณหภูมิทำให้สามารถนำค่าอุณหภูมิที่บันทึกได้ นำมาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ทราบค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ โดยการหาค่า R_t เฉลี่ย โดยยึดหลักว่าในภาวะคงที่ พลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์ ที่เข้าสู่กล่องทดลองผ่านระบบผนังทดสอบทั้งสอง (Q_1) จะมีความสมดุลกับพลังงานความร้อนที่ใช้พัดลมระบายอากาศไหลพัดเวียนออกจากกล่อง (Q_2) ดังสมการที่ 1 และ 2

$$Q_1 = Q_2$$

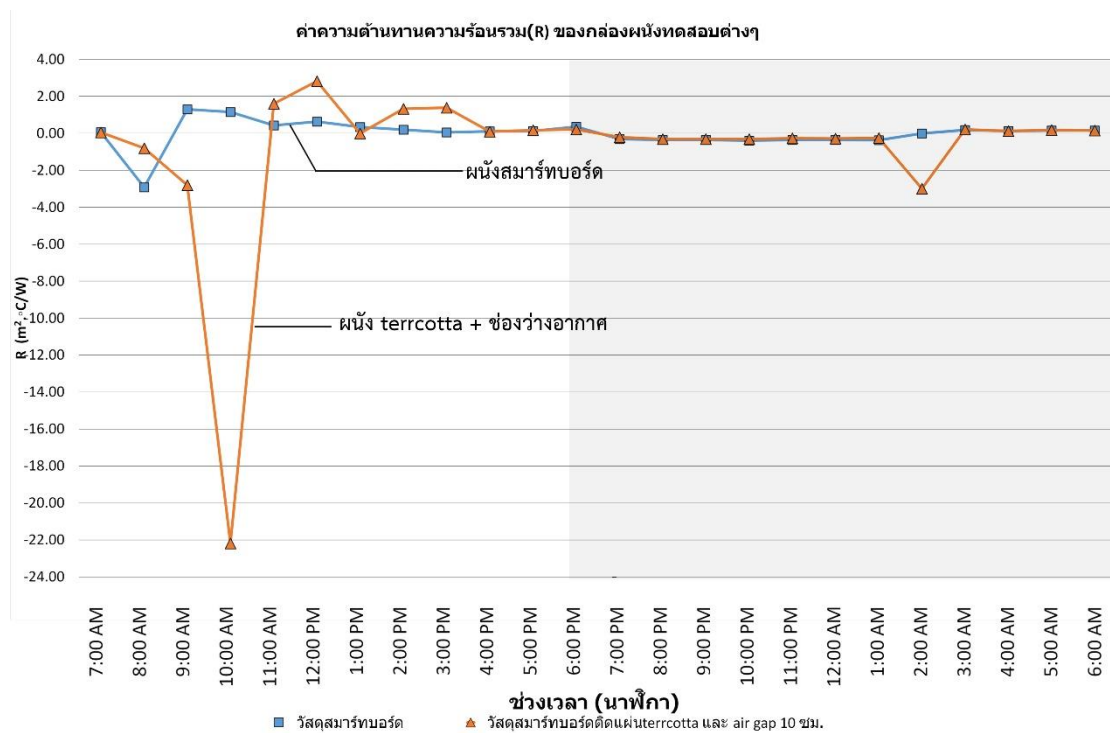
$$(1/R) \times A \times (T_o - T_i) = CFM \times 1.08 \times (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}})$$

เมื่อเข้าสมการแล้ว จะทราบค่า U สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการคำนวณสมการข้างต้น ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเป็นอัตราส่วนผกผันของค่าความต้านทานความร้อนรวม

$$U = 1/R$$

R_t คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)



แผนภูมิที่ 4.15 ค่าความต้านทานความร้อนของผนังทดสอบต่าง ๆ ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

จากแผนภูมิที่ 4.15 พบว่า แนวโน้มค่าความต้านทานความร้อนของผนังทดสอบต่าง ๆ ผนัง terracotta มีค่าสูงกว่าผนังสมาร์ทบอร์ด โดยนำค่าเฉลี่ยค่าความต้านทานความร้อนที่ได้มาสรุปเป็นค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังทดสอบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นการติดตั้งผนัง terracotta มีค่า R_t สูงกว่าผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของผนังทดสอบทั้งสอง ตามกราฟที่แสดงอุณหภูมิที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังทดสอบต่างๆที่ได้จากการทดลอง

ผนังทดสอบ	ค่าความต้านทานความร้อนรวม ($R_T - m^2 \cdot ^\circ C / W$) ของผนังทดสอบต่างๆ	
	ผนังทดสอบที่ 1	ผนังทดสอบที่ 2
อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า ($T_o - ^\circ F$)	109	113
อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า ($T_i - ^\circ F$)	97	95
อุณหภูมิที่วัด ณ ช่องว่างอากาศเข้า ($T_{inlet\ air} - ^\circ F$)	97	97
อุณหภูมิที่วัด ณ อากาศออก ($T_{outlet\ air} - ^\circ F$)	100	96
$T_o - T_i$	12	18
$T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air}$	3	1
$R_T (m^2 \cdot ^\circ C / W)$	0.38	1.12

4.2 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้า จากการจำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1

โดยการนำค่าความต้านทานความร้อนรวมที่ได้จากการคำนวณในกล่องทดลอง ใส่เป็นข้อมูลของผนังอาคาร ในอาคารต้นแบบ 3 ประเภท ที่มีประเภทการใช้สอยอาคาร และการใช้งานอาคารในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยแบ่งการเปรียบเทียบตามวัสดุผนังประกอบอาคาร โดยพิจารณาผลการใช้พลังงานพลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ภายในหนึ่งปี ดังนี้

4.2.1 อาคารพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางคืน)

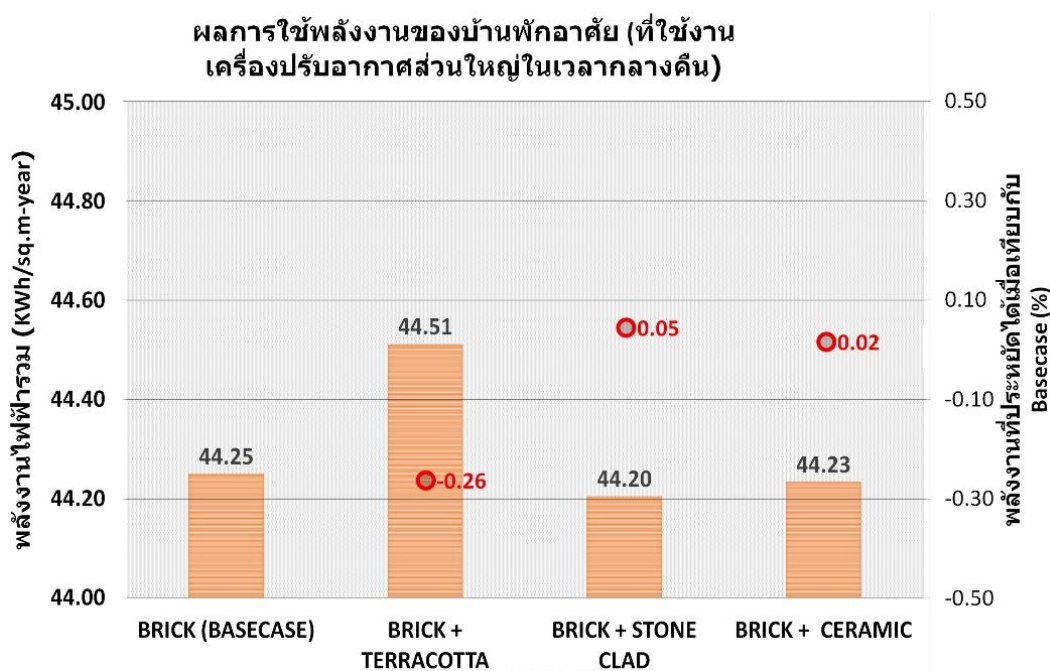
เนื่องจากอาคารต้นแบบเป็นอาคารพักอาศัยสูง 2 ชั้น เป็นหลังคาทรงปั้นหย่าซึ่งเป็นหลังคาทรงสูง โดยจำลองอาคารด้วยการกำหนดค่าความต้านทานความร้อนรวม ที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากการทดลองกล่องทดลองและเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น ผนังที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารพักอาศัย ที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางคืน คือ ผนัง terracotta

ทำการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าโดยการทดลองระบบผนังภายนอกอาคารที่นิยมใช้กันทั่วไป คือ ระบบผนังก่ออิฐฉาบปูน โดยทำการศึกษาวัสดุเปลือกอาคารโดยการกรูผนังเปลือกอาคารแบบต่างๆที่นิยมใช้งานเป็นผนังอาคารพักอาศัย เพื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานที่ใช้ในอาคารพักอาศัย ได้แก่ ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี (Basecase), ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรูหินกาบ, ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรูกระเบื้องเซรามิก และผนังก่ออิฐฉาบปูนที่ติดตั้งผนัง terracotta ทำการจำลองการใช้พลังงานที่ใช้ โดยการใส่ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของผนังอาคาร

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัย

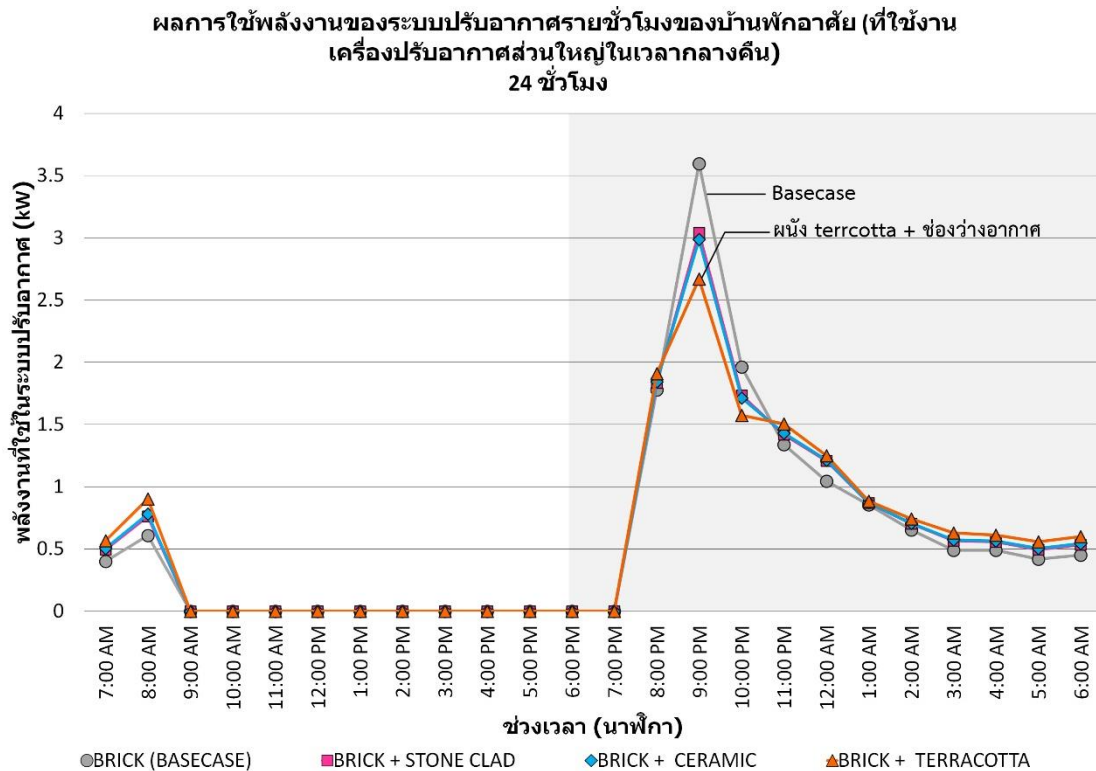
ผนังอาคาร	R_T ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	kWh/sq. m-year	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี (Basecase)	0.33	44.25	-
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรูหินกาบ	0.62	44.20	0.05
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรูกระเบื้องเซรามิก	0.66	44.23	0.02
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรูผนัง terracotta	1.19	44.51	0.26

เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม และผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังประเภทต่างๆ พบว่า ค่าความต้านทานรวมไม่ได้ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของบ้านพักอาศัยของผนังอาคารประเภทต่างๆ ไม่แตกต่างกันมากนักจากการวิเคราะห์ตารางที่ 4.2 และ แผนภูมิที่ 4.16



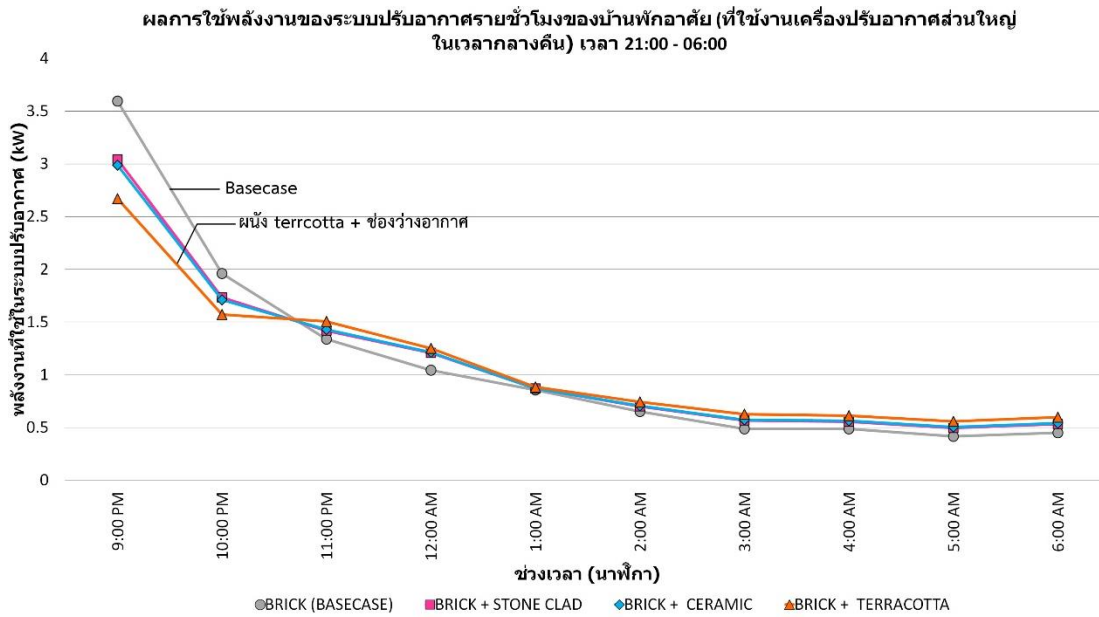
แผนภูมิที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานของอาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน) และค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ basecase (%)

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานระบบปรับอากาศรายชั่วโมงภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารบ้านพักอาศัยที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางวันเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารสูงที่สุดในอาคารลดลงน้อยที่สุด และ เป็นช่วงที่มีการใช้เครื่องปรับอากาศ พบว่าการกรุผนังก่ออิฐฉาบปูนด้วยวัสดุใดๆ ไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงาน เห็นได้จากแนวโน้มการใช้พลังงานของผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศกับผนังเปลือกอาคารรูปแบบอื่นๆนั้น ไม่แตกต่างกันจากแนวโน้มการใช้พลังงาน ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.17



แผนภูมิที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่าง ๆ

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเวลากลางคืนดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ในเวลากลางคืนซึ่งเป็นช่วงที่ผนังเปลือกอาคารเริ่มระบายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก การใช้งานเครื่องปรับอากาศจึงสูงในช่วงแรก พบว่า ในช่วงที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศสูงสุด ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศที่มีค่าความต้านทานความร้อนที่สูงที่สุด ใช้พลังงานในระบบปรับอากาศน้อยที่สุด เนื่องจาก ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนัง terracotta ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้า สอดคล้องกับการทดลองในส่วนของกล่องทดลองข้างต้น



แผนภูมิที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่างๆ ตั้งแต่เวลา 9:00PM – 6:00AM

อย่างไรก็ตาม อาคารพักอาศัยแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอาคารที่ทุกพื้นที่ใช้งานเปิดใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการจำลองอาคารพักอาศัยที่มีเงื่อนไขการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันด้วย การใช้งานผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนัง terracotta อาจมีส่วนช่วยในการประหยัดพลังงานได้มากกว่า เนื่องจากผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนัง terracotta ช่วยป้องกันความร้อน และช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังด้านใน และลดอุณหภูมิภายในห้องด้วย

4.2.2 อาคารพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน)

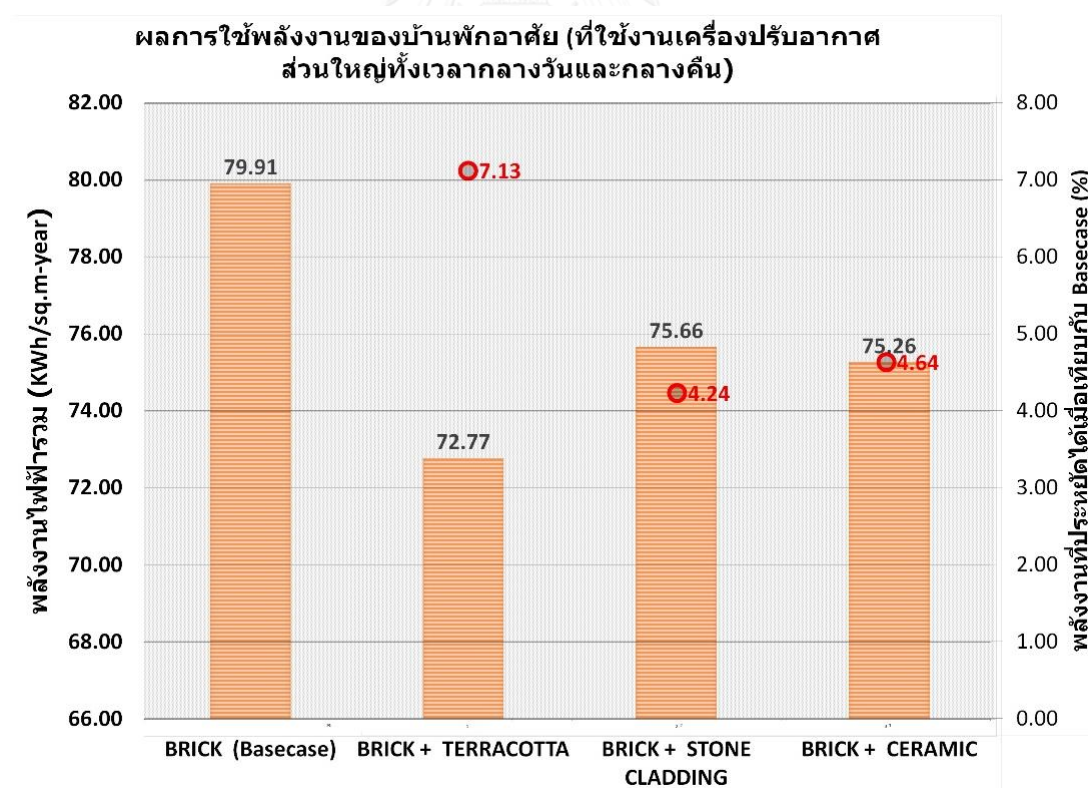
เนื่องจากอาคารต้นแบบเป็นอาคารพักอาศัยสูง 2 ชั้น ที่ทำการจำลองข้างต้นเป็นอาคารที่ทุกพื้นที่ใช้งานเปิดใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน ดังนั้นจึงทำการจำลองอาคารพักอาศัย ที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยจำลองอาคารด้วยการกำหนดค่าความต้านทานความร้อนรวมที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากกล่องทดลองและเข้าสมการทางคณิตศาสตร์

ดังนั้น จึงทำการจำลองการใช้พลังงานที่ใช้โดยการทดลองระบบผนังภายนอกอาคารที่นิยมใช้กันทั่วไปด้วยระบบผนังอาคารชนิดเดียวกัน คือ ระบบผนังก่ออิฐฉาบปูน โดยทำการศึกษาวัสดุเปลือก

อาคารชนิดเดียวกัน ได้แก่ ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี, ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุหินกาบ, ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุกระเบื้องเซรามิก และผนังก่ออิฐฉาบปูนที่ติดตั้งผนัง terracotta ทำการจำลองการใช้พลังงานโดยการใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของผนังอาคาร

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัย

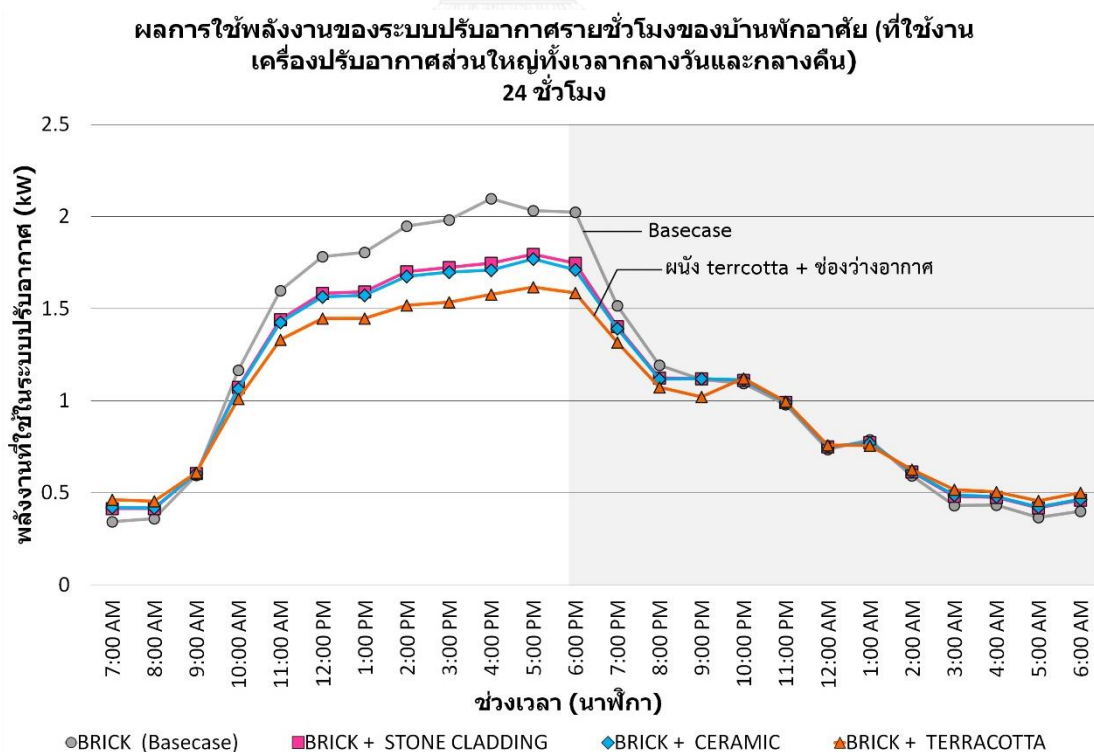
ผนังอาคาร	R_T ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	kWh/sq.m- year	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี (Basecase)	0.33	79.91	-
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุหินกาบ	0.62	75.66	4.24
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุกระเบื้องเซรามิก	0.66	75.26	4.64
ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุผนัง terracotta	1.19	72.77	7.13



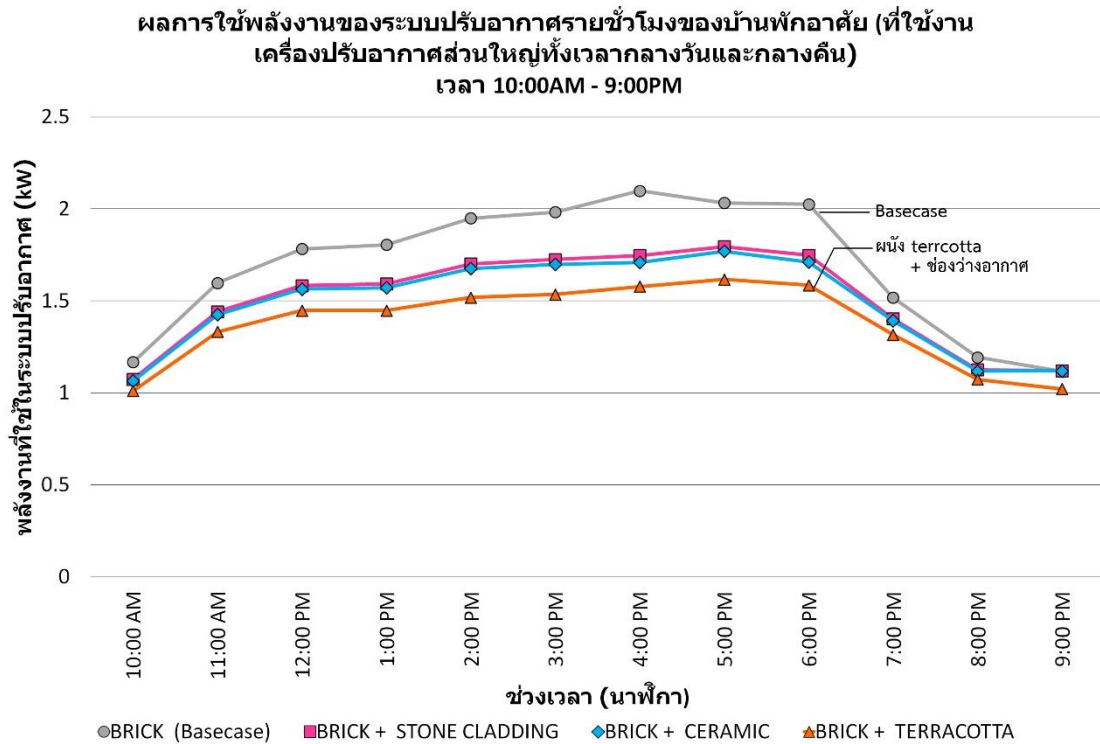
แผนภูมิที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานของอาคารบ้านพักอาศัย (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน) และค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ basecase (%)

จากตารางที่ 4.3 และแผนภูมิที่ 4.19 เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม และ ผลการใช้พลังงานรวมของบ้านพักอาศัยที่ใช้ผนังประเภทต่างๆ พบว่า ผนังที่มีประสิทธิภาพในการลด การใช้พลังงานมากที่สุด คือ ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนัง terracotta ประหยัดพลังงานที่ใช้ได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยวัสดุชนิดอื่น คือมีผลการใช้พลังงานต่ำสุด คือ 72.77 kWh/sq.m-year และประหยัดไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 7.13 % ของผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี ซึ่ง สอดคล้องกับค่าความต้านทานความร้อนที่สูงที่สุด รองลงมาคือผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยแผ่น กระเบื้องเซรามิก และ ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยหินกาบ ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า 75.26 และ 75.66 kWh/sq.m ต่อปีตามลำดับ ประหยัดพลังงานได้ 4.64 % และ 4.24 % เทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูน ทาสี

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานระบบปรับอากาศรายชั่วโมงภายใน 24 ชั่วโมงของอาคาร บ้านพักอาศัยที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.20 พบว่า แนวโน้มการใช้พลังงานรวมของผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta ต่ำกว่าแนวโน้มการใช้ พลังงานรวมผนังเปลือกอาคารรูปแบบอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าอาคารบ้านพักอาศัยในเวลากลางวัน ขณะที่มีการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคาร การใช้ผนังเปลือกอาคาร ที่มีค่า ความต้านทานความร้อนสูง เป็นปัจจัยให้การใช้พลังงานรวม และการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ ลดลง



แผนภูมิที่ 4.20 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่างๆ



แผนภูมิที่ 4.21 ผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยระบบผนังแบบต่างๆ ตั้งแต่เวลา 10:00AM - 9:00PM

จากแผนภูมิที่ 4.21 เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในช่วงเวลา 10:00AM - 9:00PM ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศมากที่สุด พบว่า ระบบผนังอาคาร เมื่อติดตั้งผนัง terracotta เป็นวัสดุเปลือกอาคารสามารถช่วยในการประหยัดพลังงาน และช่วยลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศให้กับอาคารพักอาศัยได้ดี โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศมากที่สุด

การจำลองผลการใช้พลังงานของอาคารบ้านพักอาศัย ที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน สามารถสรุปได้ว่า อาคารที่มีการใช้งานในช่วงเวลากลางวัน ควรพิจารณาวัสดุผนังเปลือกอาคารที่มีค่าความต้านทานสูง เพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้ามาเป็นภาระของระบบปรับอากาศในเวลากลางวัน ผนังก่ออิฐฉาบปูนที่กรุด้วยผนัง terracotta เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยในการลดการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศให้กับอาคารพักอาศัย

4.2.3 อาคารสำนักงาน (อาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน)

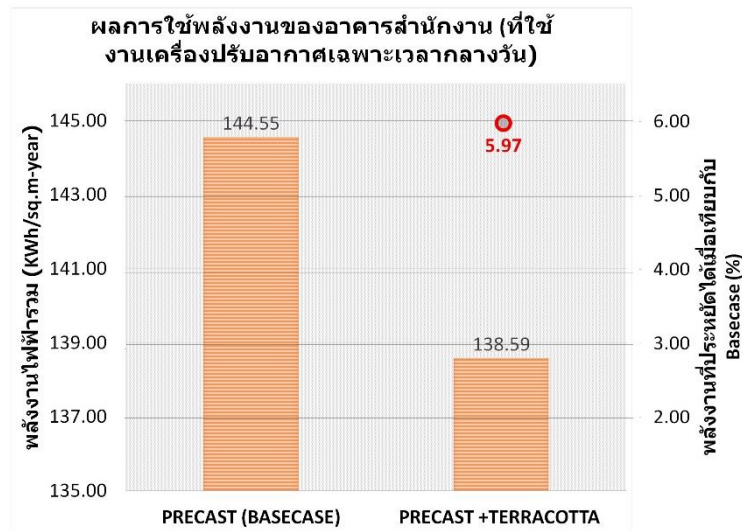
ทำการจำลองอาคารด้วยการกำหนดค่าความต้านทานความร้อนรวม ที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากการทดลองกล่องทดลองและเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น ผนังที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารสำนักงาน ที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน คือ ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Basecase) และผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน

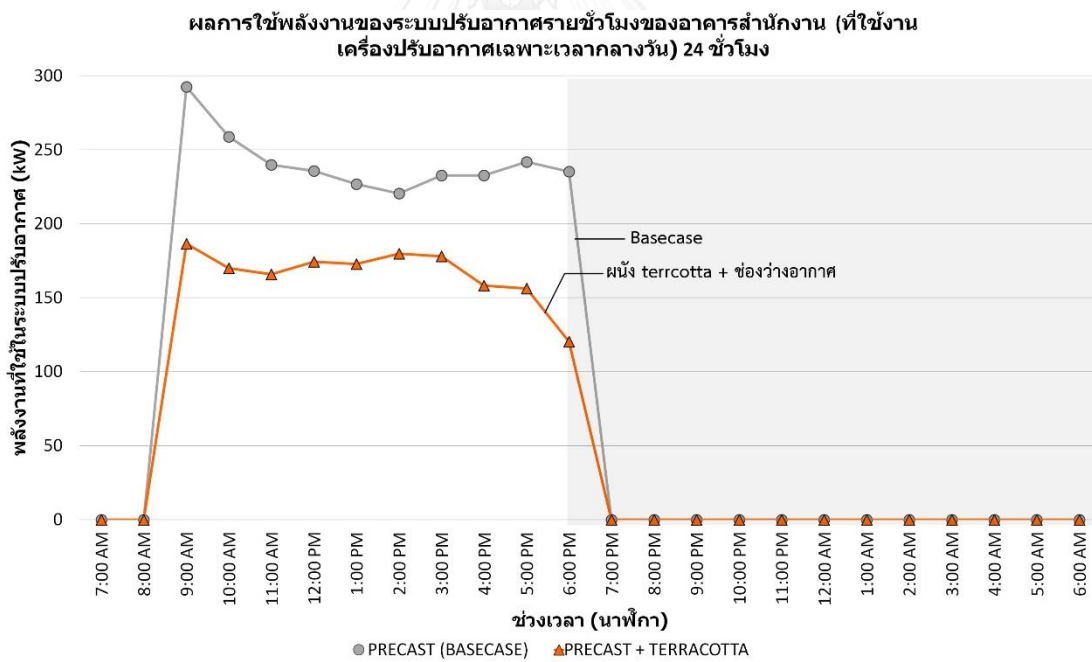
ผนังอาคาร	R_T ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	kWh/sq.m- year	พลังงานที่ประหยัดได้ (%)
ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป (Basecase)	0.43	144.55	-
ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปกรุผนัง terracotta	1.42	138.59	5.97

เมื่อหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่อปี ดังตารางที่ 4.4 พบว่า ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta ประหยัดพลังงานได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังคอนกรีตสำเร็จรูป คือมีผลการใช้พลังงานต่ำสุด คือ 138.59 kWh/sq.m ต่อปี และประหยัดไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 5.97% ของผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

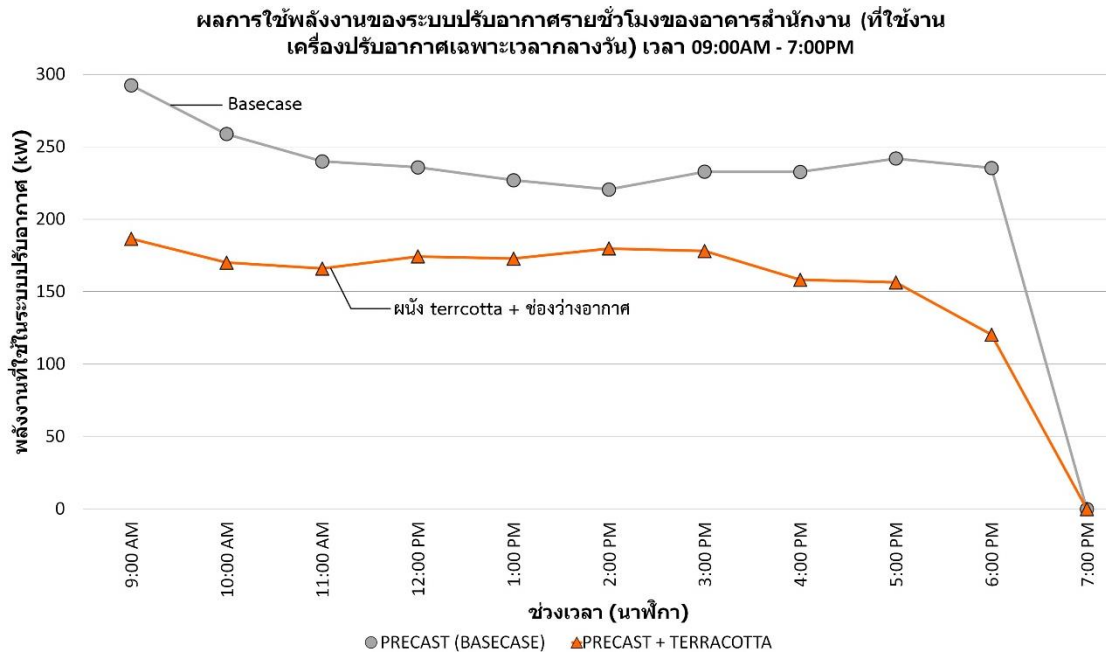
ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงานที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน เป็นส่วนใหญ่ พบว่า ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta ใช้พลังงานต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เนื่องจากอาคารสำนักงาน เน้นการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางวัน ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta ที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงจึงมีประสิทธิภาพสูง



แผนภูมิที่ 4.22 ผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน
และค่าการประหยัดพลังงานเมื่อเปรียบเทียบกับ basecase (%)



แผนภูมิที่ 4.23 ผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน



แผนภูมิที่ 4.24 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน ตั้งแต่เวลา 9:00AM – 7:00 PM

จากแผนภูมิที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งเป็นผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน พบว่า การใช้พลังงานในการทำความเย็นสูงขึ้นเรื่อยๆตามความร้อนที่เข้ามาภายในอาคาร จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของอากาศ โดยผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta ช่วยทำให้การใช้พลังงานในการทำความเย็นต่ำที่สุด และช่วยลดภาระต่อระบบการทำความเย็นในเครื่องปรับอากาศ และจากผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงาน แสดงให้เห็นว่า ตั้งแต่เวลา 11:00 – 19:00 น โดยเฉพาะในช่วงกลางวัน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารมากที่สุด และเมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานระบบปรับอากาศรายชั่วโมงภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน พบว่า แนวโน้มการใช้พลังงานของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่กรุด้วยผนัง terracotta มีค่าต่ำกว่าแนวโน้มการใช้พลังงานรวมผนังผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

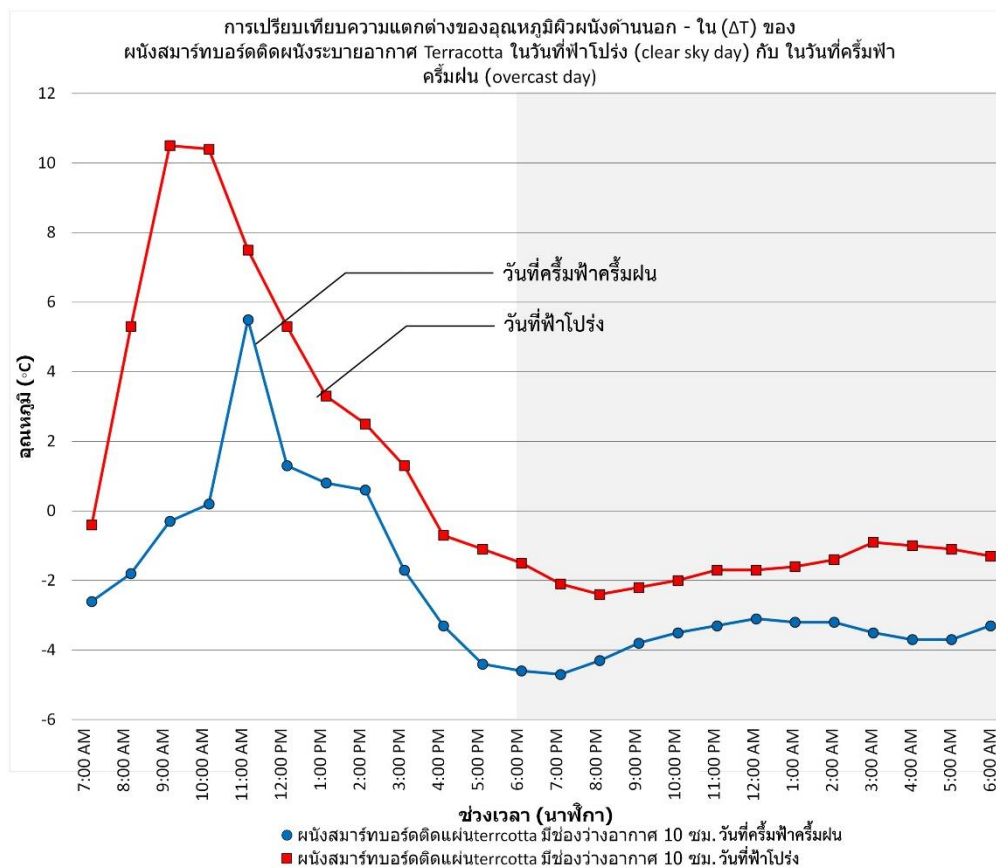
5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน

จากการวิเคราะห์ผลจากการทดลองด้วยกล่องทดลองเพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิ ของผนังทดสอบที่ได้กำหนดไว้ใน การทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ในช่วงเวลากลางวัน ในวันที่ฟ้าโปร่ง เมื่อผนังแผ่น terracotta ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ แผ่น terracotta ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้อุณหภูมิผิวผนังภายนอกของแผ่น terracotta สูงขึ้น นอกจากนี้จากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์และการถ่ายเทความร้อน ทำให้เกิดกระบวนการไหลเวียนของอากาศภายในช่องว่างอากาศด้วยการทำงานของอากาศบริเวณช่องว่างอากาศ ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิภายในช่องว่างอากาศด้วยการพาความร้อน ตามทฤษฎีของระบบผนังสองชั้นในอาคาร หรือที่เรียกกันว่า ระบบผนังหายใจได้ โดยเมื่ออากาศระหว่างผนังทั้งสองมีความร้อนสูงมากกว่าอากาศภายนอกจะเกิดการไหลเวียนของอากาศ โดยอากาศที่เย็นกว่าของภายนอกจะไหลเข้ามาแทนที่อากาศที่ร้อนภายในช่องว่างจึงลอยตัวขึ้นก่อนที่อากาศร้อนจะเข้ามาในอาคาร ช่วยในการลดอุณหภูมิผิวผนังด้านใน และยังช่วยในการลดอุณหภูมิอากาศภายในอีกด้วย ซึ่งเห็นผลชัดเจนในวันที่ฟ้าโปร่งเมื่อผนังแผ่น terracotta ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์เต็มที่

ในวันครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน เมื่ออุณหภูมิอากาศไม่สูงมากนัก ผนังอาคารจึงได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์เพียงเล็กน้อย ทำให้อุณหภูมิผิวผนังภายนอกของแผ่น terracotta สูงขึ้นเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์เท่านั้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมีผลโดยตรงกับอุณหภูมิผิวผนังภายนอกของแผ่น terracotta นอกจากนี้ยังส่งผลต่อกระบวนการไหลเวียนของอากาศภายในช่องว่างอากาศด้วย เมื่อช่องว่างอากาศต้องอาศัยพฤติกรรมทางความร้อนของผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta ดังนั้นกระบวนการไหลเวียนของอากาศจะเกิดขึ้นได้ดีกว่าในวันที่ฟ้าโปร่ง ส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก-ใน ในวันที่ฟ้าโปร่งมากกว่าวันครีမ်ฟ้าครีမ်ฝน แสดงให้เห็นว่าผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอาคารจะมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนได้ดีในวันที่ฟ้าโปร่งหรือในช่วงเวลาที่ผนังเปลือกอาคารได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ ดังแสดงในแผนภูมิที่ 5.1



แผนภูมิที่ 5.1 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก - ใน (ΔT) ของผนัง terracotta

จากแผนภูมิที่ 5.1 เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก-ใน พบว่าในช่วงเวลากลางคืนความแตกต่างของอุณหภูมิลดลงค่อนข้างเร็ว จากการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของผนังเปลือกอาคารภายนอก ทำให้อุณหภูมิผิวผนังด้านนอกลดลง และส่งผลให้อุณหภูมิผิวผนังด้านในลดต่ำลงด้วย จากกระบวนการคายความร้อนของผนังเปลือกอาคารแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ แสดงให้เห็นว่าแผ่น terracotta มีความสามารถในการคายความร้อนได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับอาคารบ้านพักอาศัยที่นิยมใช้วัสดุผนังภายนอกอาคารแบบติดฉนวนกันความร้อน ส่งผลให้ในช่วงเวลากลางคืนเมื่อมีการเปิดเครื่องปรับอากาศ ฉนวนกันความร้อนจะอมความร้อนจึงคายความร้อนได้ช้า ทำให้เกิดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ แต่แผ่น terracotta สามารถคายความร้อนได้ดี จึงมีส่วนช่วยในการลดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน

ตารางที่ 5.1 สรุปค่าคุณสมบัติทางความร้อนของผนังทดสอบต่างๆที่ได้จากการทดลอง

ผนังทดสอบ	ค่าแสดงคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ
	R_T ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
ผนังทดสอบที่ 1: ผนังแผ่นสมาร์ทบอร์ด	0.38
ผนังทดสอบที่ 2: ระบบผนัง terracotta	1.12

จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นในการหาค่าคุณสมบัติความต้านทานด้วยกล่องทดลอง พบว่า ผนัง terracotta ที่ติดตั้งกับแผ่นสมาร์ทบอร์ดแบบมีช่องว่างอากาศ เนื่องจากช่องว่างอากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนทำให้ผนังอาคารที่ติดตั้งด้วยผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ มีค่าความต้านทานความร้อนสูงที่สุด

ดังนั้นระบบผนัง terracotta ที่ติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ เป็นปัจจัยหลักในการช่วยลดอุณหภูมิผิวผนังด้านในของอาคารและยังช่วยลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนให้กับผนังเปลือกอาคารด้วย

5.1.2 ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในอาคารประเภทต่างๆ

เมื่อนำค่าความต้านทานความร้อนรวมมาใช้เป็นข้อมูลคุณสมบัติของผนังอาคารในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.1 เพื่อจำลองผลการใช้พลังงาน พบว่า ในอาคารพักอาศัยที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางคืน พบว่า ในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารลดลงน้อยที่สุด และ เป็นช่วงที่มีการใช้เครื่องปรับอากาศ การกรุผนังก่ออิฐฉาบปูนด้วยวัสดุใดๆ ไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงานเลย แต่ในช่วงที่ผนังเปลือกอาคารเริ่มระบายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอกหรือช่วงที่เปิดเครื่องปรับอากาศ ส่งผลให้การใช้งานเครื่องปรับอากาศจะสูงในช่วงแรก วัสดุผนังที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงที่สุดคือ ผนังแผ่น terracotta ที่ติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ มีส่วนช่วยในการประหยัดพลังงานในช่วงนี้เท่านั้น เนื่องจาก ผนังแผ่น terracotta ช่วงป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้ามาเป็นภาระของระบบปรับอากาศในเวลากลางวัน และคายความร้อนได้เร็วในเวลากลางคืน ทำให้ในช่วงเวลากลางคืน อุณหภูมิอากาศภายในจึงไม่สูงนัก จึงมีส่วนช่วยในการลดภาระในการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ

เมื่อวิเคราะห์การจำลองผลการใช้พลังงานของอาคารพักอาศัยที่มีการใช้งานในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน พบว่า การใช้วัสดุผนังเปลือกอาคารที่มีค่าความต้านทานสูง มีส่วนช่วยในการลดการใช้พลังงาน และลดภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศให้กับอาคารพักอาศัยได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบผนังรูปแบบอื่นๆ ผนังแผ่น terracotta ที่ติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศช่วยป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้ามาเป็นภาระของระบบปรับอากาศในเวลากลางวัน สรุปได้ว่าวิธีการกันความร้อนด้วยผนังอาคารที่ช่วยในการประหยัดพลังงานในอาคารพักอาศัยมากที่สุด คือวิธีการกันความร้อนด้วยผนังอาคารที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมสูง ซึ่งก็คือ ผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ

การจำลองผลการใช้พลังงานในอาคารสำนักงานต้นแบบซึ่งเป็นใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันเท่านั้น เมื่อพิจารณาจากค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่อปี พบว่าวิธีการกันความร้อนด้วยผนังอาคารที่ช่วยในการประหยัดพลังงานในอาคารสำนักงานมากที่สุด คือวิธีการกันความร้อนด้วยผนังอาคารที่มีค่าความต้านทานความร้อนรวมสูง คือ ผนังแผ่น terracotta ที่ติดตั้งกับผนังอาคารแบบมีช่องว่างอากาศ

การจำลองผลการใช้พลังงานในอาคารบ้านพักอาศัยที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันและกลางคืน พบว่า ผนังก่ออิฐฉาบปูนกรุแผ่น terracotta ชนิดติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ 10 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมมากที่สุดที่ $1.19 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ได้ประสิทธิผลในการลดการใช้พลังงานอยู่ที่ 7.13 % เทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี และการจำลองผลการใช้พลังงานในอาคารสำนักงานที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน ได้ผลสอดคล้องกับผลที่เกิดขึ้นในอาคารพักอาศัยที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันและกลางคืน คือ ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานขึ้นอยู่กับความต้านทานความร้อนของวัสดุผนัง โดยในกรณีนี้ การใช้ผนังคอนกรีตสำเร็จรูปกรุแผ่น terracotta ชนิดติดตั้งแบบมีช่องว่างอากาศ 10 เซนติเมตรในอาคารสำนักงานช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมมากที่สุด เท่ากับ $1.42 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ได้ประสิทธิผลในการลดการใช้พลังงานอยู่ที่ 5.97 % เทียบกับผนังคอนกรีตสำเร็จรูปพิจารณาจากค่าการใช้พลังงานรวมต่อปี ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานที่ประหยัดได้ (%)

	วัสดุกรุผนัง	R_T ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	kWh/sq. m-year	พลังงานที่ ประหยัดได้ (%)
อาคารพักอาศัย (ใช้ งานเครื่องปรับอากาศ ส่วนใหญ่ในเวลา กลางคืน)ระบบผนังก่อ อิฐฉาบปูน	ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี	0.33	44.25	-
	หินกาบ	0.62	44.20	0.05
	กระเบื้องเซรามิก	0.66	44.23	0.02
	แผ่น terracotta	1.19	44.51	0.26
อาคารพักอาศัย (ใช้ งานเครื่องปรับอากาศ ทั้งเวลากลางวันและ กลางคืน)ระบบผนังก่อ อิฐฉาบปูน	ผนังก่ออิฐฉาบปูนทาสี	0.33	79.91	-
	หินกาบ	0.62	75.66	4.24
	กระเบื้องเซรามิก	0.66	75.26	4.64
	แผ่น terracotta	1.19	72.77	7.13
อาคารสำนักงาน (ใช้ งานเครื่องปรับอากาศ เวลากลางวัน) ระบบ ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป	ผนังคอนกรีตสำเร็จรูป	0.43	144.55	-
	กรุแผ่น terracotta	1.42	138.59	5.97

จากผลการจำลองการใช้พลังงานในอาคาร สามารถสรุปได้ว่า ในอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางคืน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารสู่ภายในอาคารลดลงน้อยที่สุด เมื่อเปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อลดความร้อนในอาคาร ส่งผลให้ช่วงแรกมีภาระในการทำความเย็นของระบบปรับอากาศมากที่สุด จึงมีการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศสูงที่สุด ผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศ ช่วยลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ เฉพาะช่วงนี้เท่านั้น สำหรับในอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน การใช้วัสดุผนังที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง จะช่วยป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร และลดภาระของระบบปรับอากาศมากที่สุด และผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำที่สุด ซึ่งผนังแผ่น terracotta แบบมีช่องว่างอากาศมีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนจากรังสีอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคารได้ดีในช่วงเวลา

กลางวัน และยังช่วยให้อาคารคายความร้อนได้เร็วในช่วงเวลากลางคืน จึงช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับผนังต้นแบบ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า การเลือกใช้วัสดุผนังเปลือกอาคารในอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันด้วย ควรพิจารณาวัสดุผนังที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง เพื่อป้องกันความร้อนจากรังสีอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคาร ลดภาระของระบบปรับอากาศในเวลากลางวัน ลดภาระของระบบปรับอากาศในเวลากลางคืนที่มีการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศสูงสุด และลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในอาคาร

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

5.2.1. ควรทำการเปรียบเทียบประเภทของวัสดุผนังเปลือกอาคารแบบมีช่องว่างอากาศที่หลากหลายกว่านี้ เช่น แผ่น terracotta แบบที่มีพื้นผิวด้านหน้า (Terracotta Panel Grooved Finish), แผ่น terracotta แบบพื้นผิวมัน (Terracotta Panel Glazed Surface), แผ่น terracotta แบบเป็นระแนง (Terracotta Louver), แผงตะแกรงเจาะรู (Perforated Metal) เป็นต้น และควรมีการเปรียบเทียบผนังเปลือกอาคารที่มีสีที่เข้มขึ้น หรืออาจเพิ่มความหนาของชนิดแผ่น terracotta มากขึ้น

5.2.2. ควรทำการเปรียบเทียบการติดตั้งวัสดุผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ที่มีความสูงมากกว่านี้ เช่น สูงมากกว่า 3 เมตร รวมทั้งแผ่น terracotta สีอื่น ๆ หรือ แผ่น terracotta ที่มีสีภายในเป็นสีอ่อน

5.2.3. อาคารต้นแบบที่นำมาใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรม หาค่าการใช้พลังงานประเภทหนึ่งๆ อาจจัดให้มีเวลาการใช้งานในอาคารและประเภทของอาคารที่แตกต่างกันออกไป เช่น อาคารร้านค้าที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศแบบกึ่งกลางวันกึ่งกลางคืน, พิพิธภัณฑ์ที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศแบบกลางวันและมีการใช้ไฟฟ้าที่แตกต่างออกไป จากบ้านพักอาศัยและอาคารสำนักงาน เป็นต้น

5.2.4. ควรจำลองอาคารที่ติดตั้งวัสดุผนังเปลือกอาคารชนิดแผ่น terracotta ในทิศต่างๆกันออกไป หรือเลือกติดตั้งเฉพาะบางทิศของอาคาร

5.2.5. ควรทำการศึกษาเพิ่มเกี่ยวกับการใช้งานในระยะยาว อายุการใช้งานที่ส่งผลต่อการคุ้มทุนในระยะยาว รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี เพื่อเป็นการต่อยอดเกี่ยวกับการศึกษาผนัง terracotta

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (พ.ศ. 2545). บทที่ 2 การ เลือกใช้ วัสดุอุปกรณ์ก่อสร้างที่มีคุณสมบัติความเป็นฉนวน 10 ชนิด เอกสารเผยแพร่ แนวทางการ เลือกใช้วัสดุก่อสร้างและฉนวนเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน (pp. 2-1 - 2-15).
- ณรัฐ ข้องม่วง. (2559). ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารสีขาวยที่เคลือบสีเทอร์โม โครมิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรม ศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์ภูมิอากาศ สำนักพัฒนาอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา. (2558). Retrieved from <http://climate.tmd.go.th/>
- สรยุทธ รัชชตระกูล. (2553). แผ่นปลูกพืชจากโรงไหมเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อนบนหลังคาลาดเอียง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุทิสา เรืองกันท์. (2553). แนวทางการปรับปรุงผนังอาคารห้องสมุดเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ อาคาร กรณีศึกษาอาคารห้องสมุดโรงเรียนพุลเจริญวิทยาคม. วิทยานิพนธ์ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- อรรถน ศรีษะบุตร. (2549). การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือก อาคารในอาคารทาว์นเฮ้าส์. *Journal of Architectural/Planing Research and Studies* 5, 30-52.
- อรรถน ศรีษะบุตร. (2552). การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของ ผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัย โปรแกรมคอมพิวเตอร์. โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษก.

ภาษาอังกฤษ

- ASHRAE. (1997). *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*: Atlanta, GA.
- Berge, B. (1976). *The Ecology of Building Materials*.

- C. Alonso, I. Oteiza, J. García-Navarro, F. Martín-Consuegra. (2016). Energy consumption to cool and heat experimental modules for the energy refurbishment of facades Three case studies in Madrid. *Energy And Building* 2016, 126, 252–262.
- C. Marinoscia , G. Semprinia , G.L. Morinia. (2013). Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen facade building. *Solar Energy* 2014, 72, 280–287.
- Cristina Sanjuan, Maria Jose Suarez, Marcos Gonzalez, Jorge Pistono, Eduardo Blanco. (2011). Energy performance of an open-joint ventilated facade compared with a conventional sealed cavity facade. *Solar Energy* 2011, 85, 1851–1863.
- F. Stazi, F. Tomassoni, A. Vegliò, C. Di Perna (2011). Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding. *Renewable Energy* 2011, 36, 3373-3385.
- Lopochina. (2017, 21 February 2560). terracotta facade panel manufacture. Retrieved from www.lopochina.com
- María José Suárez, Cristina Sanjuan, Antonio José Gutiérrez, Jorge Pistono, Eduardo Blanco. (2012). Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated facade. *Applied Thermal Engineering* 2012, 37, 302–313.
- MeyerW.T. (1979). *Energy economics and building design*. Newyork: McGraw-Hill Book Company.
- NBK North America. (2016, 21 February 2560). a Hunter Douglas Company. Retrieved from www.nbkterracotta.com/en-US/home.jsp
- Oesterle, E., Lieb, R., Lutz, M., and Heualer. (2001). *Double Skin Facades: Integrated Planning*. Prestel Newyork.
- S. Chirattananon and J. Taweekun. A technical review of energy conservation program for commercial and government buildings in Thailand. *Energy conversion & management*. 44, 2003, 743-762.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทรศัพท์ 0-2470-9671-3, 0-2470-9664-7 โทรสาร 0-2428-3374 <http://www.kmutt.ac.th>

ที่ ศธ 5810/58529-1

8 กรกฎาคม 2558

เรื่อง แจ้งผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแผ่นกระเบื้อง จำนวน 7 ตัวอย่าง

เรียน ผู้จัดการบริษัท เวสต์เซรามิกเซ็นเตอร์ จำกัด

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างวัสดุผนังอาคาร จำนวน 7 ตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยทำการวิเคราะห์/ทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 177 ดังรายงานผลใน เอกสารแนบท้าย

ลำดับที่	รายการตัวอย่าง	ความหนา (มม.)	ผลการทดสอบ
			ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, K, (W/m ² K)
1.	COMPACT LAMINATE (CLADS)	6.9	0.0812
2.	SPAIN CERAMIC	10.3	0.1476
3.	CHINESE CERAMIC (GANI)	10.3	0.0318
4.	BOBO	4.8	0.0676
5.	X - LIGHT	3.5	0.0526
6.	TERRACOTTA	17.3	0.0395
7.	KRION	11.1	0.0118

สภาวะในการทดสอบ

- อุณหภูมิแผ่นร้อน = 37.7 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิแผ่นเย็น = 10.0 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิห้อง = 25.0 - 26.0 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการทดสอบ = 8 นาที
- ความหนาชิ้นงาน = 0.0364 เมตร

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ


(นายอ่อนสา นนทพัล)

ผู้วิเคราะห์/นักวิทยาศาสตร์


(นายอ่อนสา นนทพัล)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดสอบ


(ผศ.นิธิ บูรณ์จันทร์)

ผู้อำนวยการ

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รายงานผลที่สมบูรณ์จะต้องมีประทับตราของมหาวิทยาลัยและลายมือชื่อจริงของผู้มีอำนาจ
รายงานนี้ใช้ได้กับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเท่านั้น ผลการทดสอบตามรายการนี้ใช้ไม่ได้กับวัสดุอื่น หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ แม้จะผลิตจากบริษัทเดียวกัน

ภาพที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวอย่างแผ่นกระเบื้อง ทั้งหมด 7
ตัวอย่าง



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทรศัพท์ 0-2470-9671-3, 0-2470-9664-7 โทรสาร 0-2428-3374 <http://www.kmutt.ac.th>

ที่ ศธ 5810/58529-1/6

8 กรกฎาคม 2558

เรื่อง แจ้งผลการวิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างแผ่นกระเบื้อง จำนวน 7 ตัวอย่าง
เรียน ผู้จัดการบริษัท เวิลด์เซรามิกเซ็นเตอร์ จำกัด
สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการ
วิเคราะห์และทดสอบคุณลักษณะทางกายภาพของตัวอย่างวัสดุผนังอาคาร จำนวน 7 ตัวอย่าง เสร็จเรียบร้อยแล้ว
แล้ว โดยทำการวิเคราะห์/ทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM C 177 ดังรายงานผลใน เอกสารแนบท้าย

ลำดับที่	รายการตัวอย่าง	ความหนา (มม.)	ผลการทดสอบ
			ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน, K _s (W/m ² K)
1.	TERRACOTTA	17.3	0.0395

สภาวะในการทดสอบ

- อุณหภูมิแผ่นร้อน = 37.7 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิแผ่นเย็น = 10.0 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิห้อง = 25.0 - 26.0 องศาเซลเซียส
- เวลาที่ใช้ในการทดสอบ = 8 นาที
- ความหนาชิ้นงาน = 0.0364 เมตร

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ผศ.นิตี ปุรินจันทร์)

ผู้อำนวยการ

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(นายอนันต์ นนทพัลละ)

ผู้วิเคราะห์/นักวิทยาศาสตร์

(นายอนันต์ นนทพัลละ)

หัวหน้าห้องปฏิบัติการทดสอบ

รายงานผลที่สมบูรณ์จะต้องมีประทับตราคุณของมหาวิทยาลัยและลายมือชื่อจริงของผู้มีอำนาจ
รายงานนี้ใช้ได้กับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเท่านั้น ผลการทดสอบตามรายการนี้ใช้ไม่ได้กับวัสดุอื่น หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ แม้จะผลิตจากบริษัทเดียวกัน

ภาพที่ ก.2 ผลการทดสอบค่าการสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ Terracotta

ภาคผนวก ข
อนุภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองทั้งผนังต้นแบบและผนังทดสอบที่ 2 ตลอด 24 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังต้นแบบ วันที่ 1

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมงของผนังต้นแบบ					
Time	Outlet Air Temperature (°C)	Outer Surface Temperature (°C)	Inner Surface Temperature (°C)	Air cavity Temperature (°C)	Inlet Air Temperature (°C)
6:00:02	26.7	26.7	28.2	-	28.8
6:10:02	26.8	26.6	28.1	-	28.9
6:20:02	26.7	26.6	28	-	28.9
6:30:02	26.8	26.5	27.9	-	28.7
6:40:02	27.1	26.7	27.8	-	28.7
6:50:02	27	26.8	27.7	-	28.7
7:00:02	27.2	27.2	27.7	-	28.8
7:10:02	27.5	27.2	27.6	-	28.9
7:20:02	27.8	27.6	27.7	-	29.1
7:30:02	28.4	28	27.7	-	29.2
7:40:02	28.2	28.3	27.8	-	29.4
7:50:02	29.4	30.5	28	-	30
8:00:02	31.5	32.4	28.3	-	31.2
8:10:02	31	34.2	28.8	-	31.9
8:20:02	31.6	35.5	29.5	-	32.5
8:30:02	33	36.9	30.1	-	33.6
8:40:02	33.7	38	30.8	-	34.3
8:50:02	34.1	39.9	31.6	-	35.1
9:00:02	34.5	39.7	32.4	-	35.7
9:10:02	36	40.8	33.1	-	36.6
9:20:02	36	41	33.8	-	37
9:30:02	36.4	40.9	34.4	-	37.1
9:40:02	36.1	41.6	35	-	37.1
9:50:02	37.2	43.6	35.5	-	38
10:00:02	36.3	42.5	36	-	37.5
10:10:02	37.1	40.8	36.4	-	38.3
10:20:02	37.9	43.5	36.8	-	38.9
10:30:02	37.4	41.6	37.1	-	38.8
10:40:02	34.7	42.6	37.4	-	38.2

10:50:02	35.7	40.3	37.6	-	38.3
11:00:02	35.7	40.6	37.7	-	38.3
11:10:02	38.6	43.4	38	-	39.5
11:20:02	37.6	41.1	38	-	39.4
11:30:02	36.5	42.5	38.1	-	38.9
11:40:02	38.6	41.4	38.2	-	39.4
11:50:02	38.1	42.6	38.4	-	39.4
12:00:02	36.2	41.2	38.5	-	39.1
12:10:02	37.3	40.9	38.6	-	39.4
12:20:02	39	41.1	38.7	-	39.9
12:30:02	39	41.1	38.9	-	39.9
12:40:02	39	40.9	38.8	-	39.9
12:50:02	38.7	40.9	39	-	40
13:00:02	38.7	40.9	39	-	39.9
13:10:02	39.2	41.3	39	-	40.1
13:20:02	38.6	40.5	39.1	-	40.1
13:30:02	37.8	40.3	39.2	-	40
13:40:02	38.4	41.5	39.3	-	40.1
13:50:02	38.6	40.8	39.4	-	40.4
14:00:02	38.5	41	39.5	-	40.3
14:10:02	38.7	40.5	39.7	-	40.6
14:20:02	38.5	40.6	39.8	-	40.5
14:30:02	38.6	40.7	39.9	-	40.7
14:40:02	39.1	40.2	40	-	40.8
14:50:02	38.5	40.1	40.1	-	40.6
15:00:02	38.8	40.7	40.2	-	40.9
15:10:02	38.1	40.1	40.1	-	40.7
15:20:02	38.2	39.7	40.2	-	40.6
15:30:02	37.6	39.2	40.3	-	40.4
15:40:02	38	39.6	40.2	-	40.3
15:50:02	37.5	38.9	39.9	-	40
16:00:02	36.9	38.2	39.7	-	39.6
16:10:02	36.6	38.2	39.4	-	39.5
16:20:02	36.5	37.8	39.2	-	39.2
16:30:02	36	37.3	38.9	-	38.8

16:40:02	35.3	37.1	38.7	-	38.4
16:50:02	35.4	36.8	38.4	-	38.4
17:00:02	35.7	36.5	38.1	-	38.3
17:10:02	35.1	35.3	37.8	-	37.9
17:20:02	34.7	34.7	37.5	-	37.7
17:30:02	34.2	34.3	37.2	-	37.2
17:40:02	34.1	34	36.9	-	36.9
17:50:02	34.1	33.7	36.6	-	36.6
18:00:02	33.1	32.9	36.3	-	36.1
18:10:02	33.3	32.7	36.1	-	35.9
18:20:02	32.9	32.5	35.8	-	33.4
18:30:02	32.9	32.1	35.5	-	33.1
18:40:02	32.5	33.2	35.4	-	35.4
18:50:02	32.1	32.8	35	-	32.2
19:00:02	31.4	32.5	34.7	-	31.9
19:10:02	31.8	32.3	34.5	-	31.9
19:20:02	32	32.1	34.3	-	31.7
19:30:02	33.1	31.8	34	-	31.3
19:40:02	33.2	31.6	33.8	-	31.9
19:50:02	33.1	31.4	33.6	-	31.7
20:00:02	33	31.2	33.5	-	31.6
20:10:02	32.9	31.1	33.4	-	31.5
20:20:02	32.8	30.9	33.2	-	31.3
20:30:02	32.8	30.9	33.1	-	31.4
20:40:02	32.6	30.7	32.9	-	31.1
20:50:02	32.4	30.5	32.8	-	30.9
21:00:02	32.5	30.4	32.7	-	31.1
21:10:02	32.4	30.4	32.7	-	30.8
21:20:02	32.2	30.2	32.5	-	30.9
21:30:02	32.1	30.1	32.4	-	30.8
21:40:02	32.1	30	32.3	-	30.9
21:50:02	32	30	32.2	-	30.8
22:00:02	32	29.9	32.1	-	30.8
22:10:02	31.9	29.9	32	-	30.7
22:20:02	31.9	29.8	32	-	30.5

22:30:02	31.9	29.9	31.9	-	30.7
22:40:02	31.8	29.8	31.8	-	30.6
22:50:02	31.8	29.8	31.8	-	30.6
23:00:02	31.7	29.7	31.7	-	30.5
23:10:02	31.7	29.7	31.7	-	30.5
23:20:02	31.7	29.7	31.7	-	30.7
23:30:02	31.6	29.6	31.6	-	30.4
23:40:02	31.6	29.6	31.6	-	30.5
23:50:02	31.6	29.6	31.6	-	30.5
0:00:02	31.5	29.5	31.5	-	30.3
0:10:02	31.5	29.5	31.5	-	30.4
0:20:02	31.4	29.4	31.4	-	30.3
0:30:02	31.4	29.4	31.3	-	30.3
0:40:02	31.4	29.4	31.3	-	30.3
0:50:02	31.4	29.4	31.3	-	30.4
1:00:02	31.3	29.3	31.2	-	30.2
1:10:02	31.3	29.3	31.2	-	30.2
1:20:02	31.3	29.4	31.2	-	30.1
1:30:02	31.2	29.3	31.2	-	30.2
1:40:02	31.2	29.3	31.1	-	30.2
1:50:02	31.1	29.3	31.1	-	29.9
2:00:02	31.1	29.3	31.1	-	30.1
2:10:02	31.2	29.3	31.1	-	30.4
2:20:02	31.1	29.3	31	-	30.2
2:30:02	31.1	29.3	31	-	30.1
2:40:02	31.2	29.4	31.1	-	30.2
2:50:02	31.2	29.4	31.1	-	30
3:00:02	29.8	29.2	30.3	-	31.1
3:10:02	29.1	29	30.1	-	30.8
3:20:02	29.2	29	30	-	30.7
3:30:02	29.6	29	29.9	-	30.7
3:40:02	29.2	28.6	29.7	-	30.5
3:50:02	28.9	28.6	29.6	-	30.4
4:00:02	28.3	28.4	29.6	-	30.3
4:10:02	29.2	28.4	29.4	-	30.3

4:20:02	28.4	28.3	29.4	-	30.2
4:30:02	28.7	28	29.3	-	30.2
4:40:02	27.7	27.8	29.1	-	29.7
4:50:02	27.7	27.8	29	-	29.9
5:00:02	28.1	27.7	29	-	29.8
5:10:02	27.9	27.5	28.8	-	29.6
5:20:02	27.6	27.4	28.7	-	29.6
5:30:02	27.2	27.2	28.7	-	29.3
5:40:02	27.2	27	28.5	-	29.2
5:50:02	26.8	26.9	28.4	-	29

ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังต้นแบบ วันที่ 2

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมงของผนังต้นแบบ					
Time	Outlet Air Temperature (°C)	Outer Surface Temperature (°C)	Inner Surface Temperature (°C)	Air cavity Temperature (°C)	Inlet Air Temperature (°C)
6:00:02	33.6	27.1	31	-	30.4
6:10:02	33.6	27.2	31	-	30.9
6:20:02	33.7	27.3	31	-	30.7
6:30:02	33.9	27.4	31.1	-	30.7
6:40:02	33.5	27.5	31.1	-	30.1
6:50:02	33.5	27.7	31.1	-	30.8
7:00:02	33.7	27.9	31.1	-	30.8
7:10:02	34	28.2	31.2	-	31.2
7:20:02	34.1	28.6	31.2	-	31.3
7:30:02	34	28.8	31.3	-	29.7
7:40:02	34.1	29.1	31.5	-	29.2
7:50:02	34.2	29.2	31.6	-	31.3
8:00:02	34.1	29.3	31.7	-	30.8
8:10:02	34.2	29.4	31.7	-	29.9
8:20:02	34.4	29.5	31.8	-	31.6
8:30:02	34.6	29.7	31.9	-	31.8
8:40:02	35.2	32.2	32.2	-	32.9

8:50:02	35.2	32.4	32.6	-	32.8
9:00:02	35.1	32.4	32.9	-	31.9
9:10:02	35	32.3	33	-	32.9
9:20:02	35	32	33.2	-	32.4
9:30:02	35.2	32	33.2	-	33.2
9:40:02	35.6	32.5	33.3	-	33.2
9:50:02	35.6	32.9	33.5	-	33.9
10:00:02	36	33.4	33.8	-	33.5
10:10:02	36.1	33.8	33.9	-	33.7
10:20:02	36.5	34.8	34.1	-	34.7
10:30:02	37.5	35.9	34.3	-	34.8
10:40:02	38.2	37.3	34.6	-	35.8
10:50:02	39.3	39	34.9	-	35.6
11:00:02	38.6	39.5	35.4	-	35.1
11:10:02	38.7	40.1	36.2	-	35.5
11:20:02	38.1	39.5	36.7	-	35.1
11:30:02	38.1	39	37.2	-	36.2
11:40:02	38.3	39.1	37.5	-	35.4
11:50:02	38.5	39.1	37.5	-	36.7
12:00:02	38.9	39.2	37.8	-	37.6
12:10:02	38.7	39.3	38	-	35.7
12:20:02	38.7	38.9	38.1	-	35.9
12:30:02	38.7	38.8	38.3	-	38.2
12:40:02	39.1	38.6	38.4	-	37.5
12:50:02	39.4	38.6	38.4	-	35.6
13:00:02	38.9	38.1	38.5	-	37.2
13:10:02	39	37.8	38.6	-	35.2
13:20:02	39.3	37.7	38.7	-	37.5
13:30:02	39.6	38.3	38.7	-	38.2
13:40:02	39.8	38.1	38.6	-	37.3
13:50:02	39.6	38	38.7	-	37.8
14:00:02	39.9	38.3	38.9	-	37
14:10:02	39.7	38	38.9	-	37.9
14:20:02	39.6	37.8	39	-	38.5
14:30:02	40	37.6	39.1	-	38.4

14:40:02	39.8	37.1	39.2	-	39.3
14:50:02	40	37.1	39.3	-	38.9
15:00:02	39.9	36.8	39.3	-	37.3
15:10:02	39.5	36.5	39.3	-	36.6
15:20:02	39.3	36.2	39.1	-	36.5
15:30:02	39.6	36.1	38.8	-	37.1
15:40:02	39.7	36.1	38.8	-	38.3
15:50:02	39.8	36	38.8	-	37.3
16:00:02	39.1	35.6	38.6	-	37.4
16:10:02	38.9	35.1	38.5	-	35.6
16:20:02	38.4	34.7	38.2	-	34.8
16:30:02	38.3	34.3	38	-	35.7
16:40:02	38.2	33.8	37.7	-	35.2
16:50:02	38	33.3	37.4	-	36.2
17:00:02	37.8	33	37.2	-	35.2
17:10:02	37.3	32.6	36.9	-	36
17:20:02	37.2	32.2	36.6	-	35.1
17:30:02	37.1	31.9	36.4	-	35.1
17:40:02	37	31.7	36.2	-	34.6
17:50:02	36.7	31.4	35.9	-	34.7
18:00:02	36.2	31	35.6	-	32.5
18:10:02	36	30.7	35.4	-	34.3
18:20:02	35.9	30.5	35.1	-	34.2
18:30:02	35.6	30.2	34.9	-	34.1
18:40:02	35.4	29.9	34.7	-	33.8
18:50:02	35.4	29.8	34.5	-	32.4
19:00:02	35.3	29.6	34.3	-	32.3
19:10:02	35.2	29.4	34.1	-	32.8
19:20:02	35.2	29.3	34	-	32.7
19:30:02	35	29.2	33.8	-	31.6
19:40:02	34.7	29	33.6	-	32.2
19:50:02	35	28.9	33.5	-	32.5
20:00:02	34.8	28.8	33.4	-	32.3
20:10:02	34.9	28.8	33.2	-	32.4
20:20:02	34.8	28.6	33.1	-	32.5

20:30:02	34.9	28.6	33	-	32.2
20:40:02	34.8	28.6	32.9	-	32.4
20:50:02	34.8	28.6	32.9	-	32.4
21:00:02	34.8	28.5	32.8	-	32.4
21:10:02	35	28.6	32.8	-	32.3
21:20:02	35	28.6	32.7	-	32.2
21:30:02	34.8	28.5	32.6	-	31.9
21:40:02	34.6	28.5	32.6	-	32.1
21:50:02	34.7	28.5	32.6	-	32.2
22:00:02	34.7	28.5	32.5	-	32.1
22:10:02	34.6	28.5	32.5	-	32
22:20:02	34.6	28.4	32.4	-	31.2
22:30:02	34.5	28.3	32.3	-	31.8
22:40:02	34.5	28.3	32.3	-	31.8
22:50:02	34.4	28.2	32.2	-	31.9
23:00:02	34.8	28.3	32.2	-	31.3
23:10:02	35.1	28.4	32.3	-	32
23:20:02	34.7	28.4	32.2	-	31.9
23:30:02	34.8	28.4	32.2	-	31.8
23:40:02	34.8	28.4	32.2	-	31.8
23:50:02	34.6	28.4	32.1	-	31.7
0:00:02	34.6	28.4	32.1	-	31.4
0:10:02	34.6	28.3	32.1	-	31.8
0:20:02	34.4	28.3	32.1	-	31.9
0:30:02	34.3	28.3	32.1	-	31.6
0:40:02	34.3	28.2	32.1	-	31.8
0:50:02	34.3	28.2	32.1	-	31.8
1:00:02	34.2	28.1	32	-	31.6
1:10:02	34.3	28.1	32	-	31.2
1:20:02	34.2	28.1	32	-	31.5
1:30:02	34.1	28	31.9	-	31.5
1:40:02	34.1	28	31.9	-	31.4
1:50:02	34	28	31.9	-	31.6
2:00:02	34.1	27.9	31.8	-	31.3
2:10:02	34.2	27.9	31.8	-	31.4

2:20:02	34.3	27.9	31.8	-	31.3
2:30:02	33.9	27.9	31.7	-	31.5
2:40:02	33.8	27.9	31.8	-	30.3
2:50:02	33.7	27.7	31.7	-	31.1
3:00:02	33.9	27.6	31.7	-	31.3
3:10:02	33.6	27.4	31.5	-	29.5
3:20:02	33.7	27.4	31.5	-	31.1
3:30:02	33.8	27.3	31.4	-	30.4
3:40:02	33.6	27.3	31.4	-	31.1
3:50:02	33.6	27.3	31.4	-	30.9
4:00:02	33.6	27.1	31.3	-	30.9
4:10:02	33.6	27.1	31.3	-	30.7
4:20:02	33.4	27	31.3	-	30.6
4:30:02	33.5	26.9	31.2	-	29.6
4:40:02	33.2	26.9	31.2	-	30.7
4:50:02	33.5	26.8	31.1	-	30.4
5:00:02	33.4	26.9	31.1	-	30.4
5:10:02	33.5	27	31.1	-	30.1
5:20:02	33.5	27	31.1	-	29.9
5:30:02	33.4	27	31	-	30.4
5:40:02	33.5	27.1	31	-	30.3
5:50:02	33.5	27.1	31	-	29.9

ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังทดสอบที่ 2 วันที่ 1

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมงของผนังทดสอบที่ 2					
Time	Outlet Air Temperature (°C)	Outer Surface Temperature (°C)	Inner Surface Temperature (°C)	Air cavity Temperature (°C)	Inlet Air Temperature (°C)
6:00:02	26.7	27.2	28.5	27.2	28.4
6:10:02	26.8	27.2	28.4	27.1	28.4
6:20:02	26.7	27.2	28.3	27.1	28.4
6:30:02	26.8	27.1	28.2	27.1	28.3
6:40:02	27.1	27.2	28.1	27.2	28.3

6:50:02	27	27.4	28.1	27.3	28.4
7:00:02	27.2	27.6	28	27.7	28.6
7:10:02	27.5	27.7	28	27.6	28.5
7:20:02	27.8	28.1	28.1	27.9	28.8
7:30:02	28.4	28.4	28	28.4	28.9
7:40:02	28.2	28.8	28.2	28.5	29.2
7:50:02	29.4	32.2	28.4	29.2	29.8
8:00:02	31.5	33.9	28.6	30.6	30.1
8:10:02	31	36.1	29	31.3	30.8
8:20:02	31.6	37.8	29.5	32.8	31.5
8:30:02	33	39.4	30	34.6	32.2
8:40:02	33.7	40.5	30.5	34.1	32.6
8:50:02	34.1	41.8	31.2	33.4	33.1
9:00:02	34.5	42.3	31.8	34.5	33.7
9:10:02	36	43.5	32.4	34.1	34.2
9:20:02	36	43.8	32.8	35	34.3
9:30:02	36.4	44.2	33.4	36	35.1
9:40:02	36.1	44.4	33.9	36.4	35.2
9:50:02	37.2	45	34.4	37.1	35.6
10:00:02	36.3	45.2	34.8	36.8	36.2
10:10:02	37.1	44	35.2	36.9	36.3
10:20:02	37.9	45	35.7	36.3	36.5
10:30:02	37.4	44.8	35.9	37.7	37
10:40:02	34.7	44.5	36.2	35.7	37.2
10:50:02	35.7	44	36.5	37.6	37.3
11:00:02	35.7	44.2	36.7	36.5	37.7
11:10:02	38.6	44.6	36.9	36.4	37.6
11:20:02	37.6	44.2	37.2	37.7	37.7
11:30:02	36.5	43.9	37.4	36.4	38.3
11:40:02	38.6	43.3	37.5	36.2	38.1
11:50:02	38.1	43.5	37.6	37.4	38.5
12:00:02	36.2	43.1	37.8	35.4	38.6
12:10:02	37.3	42.8	37.9	36.6	38.6
12:20:02	39	41.9	38	37.1	38.5
12:30:02	39	41.4	38.1	36.4	38.3

12:40:02	39	41	38.1	36.4	38.6
12:50:02	38.7	41.2	38.2	36.9	38.7
13:00:02	38.7	41	38.2	36.9	38.7
13:10:02	39.2	41.2	38.3	38.3	39
13:20:02	38.6	41	38.3	37	39
13:30:02	37.8	41.2	38.4	37.3	39.3
13:40:02	38.4	41.2	38.5	37.3	39.2
13:50:02	38.6	41.3	38.5	38.4	39.6
14:00:02	38.5	41.2	38.7	37.8	39.1
14:10:02	38.7	40.7	38.7	37.7	39.5
14:20:02	38.5	40.5	38.9	37.5	39.4
14:30:02	38.6	40.4	38.9	38.4	39.4
14:40:02	39.1	40.2	38.8	38.2	39.2
14:50:02	38.5	40.1	38.9	37.7	39.2
15:00:02	38.8	40.1	38.8	37.9	39
15:10:02	38.1	40	38.7	37.6	38.7
15:20:02	38.2	39.8	38.7	37.6	38.6
15:30:02	37.6	39.3	38.9	36.6	38.1
15:40:02	38	39.3	38.9	36.9	38.3
15:50:02	37.5	39	39.1	37	38.6
16:00:02	36.9	38.6	39.3	36.6	38.5
16:10:02	36.6	38.1	39	36.7	38.2
16:20:02	36.5	37.7	38.7	36.4	38.1
16:30:02	36	37.4	38.4	36.3	37.7
16:40:02	35.3	37.1	38.2	35.7	37.6
16:50:02	35.4	36.7	37.8	36.1	37.2
17:00:02	35.7	36.5	37.6	35.9	37.1
17:10:02	35.1	36.2	37.3	35.6	36.9
17:20:02	34.7	36	37.1	35.2	36.6
17:30:02	34.2	35.7	36.9	34.8	36.4
17:40:02	34.1	35.3	36.6	34.8	36
17:50:02	34.1	34.9	36.3	34.5	35.8
18:00:02	33.1	34.6	36.1	34	35.6
18:10:02	33.3	34.2	35.9	33.6	35.2
18:20:02	32.9	33.8	35.6	33.7	34.9

18:30:02	32.9	33.5	35.3	33.2	32.9
18:40:02	32.5	33.1	35.3	33.1	32.7
18:50:02	32.1	32.7	34.8	32.5	32.4
19:00:02	31.4	32.4	34.5	32.3	31.3
19:10:02	31.8	32.2	34.7	32.2	31.7
19:20:02	32	31.9	34.4	32	32.8
19:30:02	33.1	31.7	34.2	31.7	30.7
19:40:02	33.2	31.5	34	31.6	31.4
19:50:02	33.1	31.4	33.8	31.4	31.4
20:00:02	33	31.2	33.6	31.4	31.3
20:10:02	32.9	31.2	33.5	31.3	31.2
20:20:02	32.8	31	33.3	31	31
20:30:02	32.8	30.9	33.2	31.3	31.2
20:40:02	32.6	30.8	33	30.9	30.9
20:50:02	32.4	30.7	32.9	30.6	30.6
21:00:02	32.5	30.6	32.8	30.8	31
21:10:02	32.4	30.5	32.7	30.3	30.5
21:20:02	32.2	30.4	32.5	30.6	30.8
21:30:02	32.1	30.4	32.4	30.6	30.6
21:40:02	32.1	30.3	32.3	30.6	30.7
21:50:02	32	30.2	32.2	30.6	30.7
22:00:02	32	30.1	32.1	30.5	30.6
22:10:02	31.9	30.1	32	30.5	30.5
22:20:02	31.9	30.1	32	30.3	30.4
22:30:02	31.9	30.1	31.9	30.4	30.5
22:40:02	31.8	30.1	31.8	30.3	30.4
22:50:02	31.8	30.1	31.8	30.3	30.5
23:00:02	31.7	30	31.7	30.2	30.3
23:10:02	31.7	30	31.7	30.3	30.3
23:20:02	31.7	30	31.7	30.4	30.5
23:30:02	31.6	29.9	31.6	30.1	30.3
23:40:02	31.6	29.9	31.6	30.2	30.4
23:50:02	31.6	29.9	31.6	30	30.2
0:00:02	31.5	29.8	31.5	30.1	30.2
0:10:02	31.5	29.8	31.5	30.3	30.4

0:20:02	31.4	29.7	31.4	29.8	30
0:30:02	31.4	29.7	31.3	30.1	30.2
0:40:02	31.4	29.7	31.3	30	30.2
0:50:02	31.4	29.7	31.3	30	30.2
1:00:02	31.3	29.6	31.2	29.8	29.9
1:10:02	31.3	29.6	31.2	29.8	29.9
1:20:02	31.3	29.6	31.2	29.8	30
1:30:02	31.2	29.6	31.1	29.8	29.8
1:40:02	31.2	29.5	31	30	30.1
1:50:02	31.1	29.5	31.1	29.7	29.7
2:00:02	31.1	29.6	31	29.9	30
2:10:02	31.2	29.5	31.1	30.1	30.2
2:20:02	31.1	29.6	31	29.9	30
2:30:02	31.1	29.6	31	29.8	30
2:40:02	31.2	29.6	31.1	29.9	30
2:50:02	31.2	29.6	31.1	29.7	29.8
3:00:02	29.8	29.6	30.5	29.9	30.7
3:10:02	29.1	29.5	30.4	29.3	30.4
3:20:02	29.2	29.4	30.3	29.8	30.6
3:30:02	29.6	29.3	30.2	29.8	30.4
3:40:02	29.2	29.1	30	29.5	30.2
3:50:02	28.9	29	29.9	29.5	30.1
4:00:02	28.3	28.9	29.9	29.2	30
4:10:02	29.2	28.8	29.8	29.2	29.9
4:20:02	28.4	28.7	29.7	29	29.8
4:30:02	28.7	28.6	29.6	28.8	29.7
4:40:02	27.7	28.3	29.4	28.1	29.3
4:50:02	27.7	28.3	29.4	28.1	29.4
5:00:02	28.1	28.2	29.3	28.5	29.4
5:10:02	27.9	28	29.1	28.1	29.2
5:20:02	27.6	28	29	28	29.1
5:30:02	27.2	27.8	28.9	27.5	28.9
5:40:02	27.2	27.6	28.8	27.5	28.8
5:50:02	26.8	27.4	28.7	27.3	28.7

ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมง ของผนังทดสอบที่ 2 วันที่ 2

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองตลอด 24 ชั่วโมงของผนังทดสอบที่ 2					
Time	Outlet Air Temperature (°C)	Outer Surface Temperature (°C)	Inner Surface Temperature (°C)	Air cavity Temperature (°C)	Inlet Air Temperature (°C)
6:00:02	33	26.8	30.1	27.2	30.4
6:10:02	32.9	26.9	30	27.1	30.9
6:20:02	33.2	27	30	27.2	30.7
6:30:02	33.3	27.1	30	27.4	30.7
6:40:02	32.9	27.1	30.1	27.3	30.1
6:50:02	33	27.3	30.1	27.3	30.8
7:00:02	33.2	27.4	30	27.5	30.8
7:10:02	33.5	27.8	30.1	27.7	31.2
7:20:02	33.6	28.1	30.1	27.9	31.3
7:30:02	33.6	28.3	30.2	27.9	29.7
7:40:02	33.7	28.4	30.3	28.1	29.2
7:50:02	33.8	28.5	30.4	28.2	31.3
8:00:02	33.7	28.6	30.4	28.3	30.8
8:10:02	33.8	28.7	30.5	28.3	29.9
8:20:02	33.9	28.8	30.6	28.4	31.6
8:30:02	34.2	29.1	30.6	28.5	31.8
8:40:02	35	31.2	30.8	29.6	32.9
8:50:02	35	31.2	31	29.4	32.8
9:00:02	34.9	31.2	31.2	29.6	31.9
9:10:02	34.9	30.9	31.3	29.1	32.9
9:20:02	34.7	30.6	31.5	29.1	32.4
9:30:02	34.9	30.7	31.5	29.2	33.2
9:40:02	35.3	31.3	31.6	29.6	33.2
9:50:02	35.2	31.7	31.7	29.7	33.9
10:00:02	35.8	32.2	32	30.2	33.5
10:10:02	35.8	32.6	32	30.3	33.7
10:20:02	36.2	33.4	32.3	30.6	34.7
10:30:02	37.1	34.7	32.5	31.4	34.8
10:40:02	37.8	36.2	32.7	31.9	35.8

10:50:02	39.2	38.7	33.2	33.9	35.6
11:00:02	38.8	39.2	33.7	33.6	35.1
11:10:02	39	39	34.2	33.1	35.5
11:20:02	38.6	37.9	34.5	33.3	35.1
11:30:02	38.5	37	34.9	32.4	36.2
11:40:02	38.4	36.9	35	32.3	35.4
11:50:02	38.5	36.8	35.2	32.4	36.7
12:00:02	38.9	36.7	35.4	33	37.6
12:10:02	39.1	36.8	35.6	32.9	35.7
12:20:02	39	36.4	35.7	32.7	35.9
12:30:02	38.9	36.4	35.9	33	38.2
12:40:02	39	36.4	36	32.3	37.5
12:50:02	39.6	36.6	36.1	33.2	35.6
13:00:02	38.8	36	36.2	32.8	37.2
13:10:02	38.9	35.7	36.4	32.7	35.2
13:20:02	39.2	35.7	36.4	33.1	37.5
13:30:02	39.4	36.2	36.5	33.6	38.2
13:40:02	39.5	36.3	36.5	33.5	37.3
13:50:02	39.4	36.6	36.5	33.7	37.8
14:00:02	39.4	37.3	36.7	33.5	37
14:10:02	39.4	36.9	36.8	34.1	37.9
14:20:02	39	36.6	36.9	33.7	38.5
14:30:02	39.4	36.7	37.1	33.9	38.4
14:40:02	39.1	36.2	37.3	34	39.3
14:50:02	39.2	36.2	37.4	33.7	38.9
15:00:02	39.1	35.9	37.6	33.5	37.3
15:10:02	38.7	35.3	37.7	32.8	36.6
15:20:02	38.6	34.9	37.7	32.8	36.5
15:30:02	38.9	34.8	37.6	33.1	37.1
15:40:02	39.1	34.9	37.6	34.4	38.3
15:50:02	39.2	34.6	37.6	33.1	37.3
16:00:02	38.6	34.2	37.5	32.6	37.4
16:10:02	38.2	33.7	37.4	32.1	35.6
16:20:02	37.8	33.3	37.3	31.9	34.8
16:30:02	37.8	32.9	37	31.9	35.7

16:40:02	37.7	32.5	36.7	31.5	35.2
16:50:02	37.4	32.2	36.6	31.3	36.2
17:00:02	37.2	31.9	36.3	31	35.2
17:10:02	36.7	31.6	36.1	30.7	36
17:20:02	36.7	31.3	35.9	30.7	35.1
17:30:02	36.5	31	35.6	30.7	35.1
17:40:02	36.4	30.9	35.4	30.6	34.6
17:50:02	36	30.6	35.3	30.1	34.7
18:00:02	35.5	30.3	34.9	29.7	32.5
18:10:02	35.4	30	34.8	29.6	34.3
18:20:02	35.3	29.7	34.5	29.2	34.2
18:30:02	35.1	29.6	34.3	29	34.1
18:40:02	34.9	29.3	34	28.9	33.8
18:50:02	34.8	29.2	33.9	28.9	32.4
19:00:02	34.8	29	33.7	28.8	32.3
19:10:02	34.6	28.8	33.4	28.5	32.8
19:20:02	34.7	28.8	33.3	28.5	32.7
19:30:02	34.6	28.6	33.2	28.6	31.6
19:40:02	34.2	28.4	32.9	28.3	32.2
19:50:02	34.6	28.4	32.8	28.5	32.5
20:00:02	34.2	28.4	32.7	28.5	32.3
20:10:02	34.3	28.3	32.6	28.4	32.4
20:20:02	34.1	28.3	32.4	28.4	32.5
20:30:02	34.3	28.3	32.3	28.3	32.2
20:40:02	34.2	28.2	32.2	28.4	32.4
20:50:02	34.2	28.3	32.1	28.3	32.4
21:00:02	34.1	28.2	32	28.1	32.4
21:10:02	34.4	28.3	32	28.4	32.3
21:20:02	34.3	28.3	31.9	28.5	32.2
21:30:02	34.2	28.2	31.8	28.5	31.9
21:40:02	34.2	28.3	31.8	28.4	32.1
21:50:02	34.2	28.3	31.8	28.5	32.2
22:00:02	34.3	28.2	31.7	28.4	32.1
22:10:02	34.1	28.2	31.7	28.3	32
22:20:02	34.2	28.2	31.6	28.2	31.2

22:30:02	33.9	28.1	31.5	28.1	31.8
22:40:02	34.1	28.1	31.5	28.1	31.8
22:50:02	34	28	31.4	28.1	31.9
23:00:02	34.3	28.1	31.4	28.6	31.3
23:10:02	34.2	28.2	31.4	28.7	32
23:20:02	34.1	28.2	31.3	28.2	31.9
23:30:02	34.2	28.2	31.3	28.4	31.8
23:40:02	34.1	28.2	31.3	28.4	31.8
23:50:02	33.9	28.2	31.3	28.3	31.7
0:00:02	34	28.2	31.3	28.4	31.4
0:10:02	33.9	28.2	31.2	28.2	31.8
0:20:02	33.8	28.1	31.2	28.3	31.9
0:30:02	33.7	28.1	31.2	28.1	31.6
0:40:02	33.7	28.1	31.2	28.2	31.8
0:50:02	33.7	28	31.2	28.1	31.8
1:00:02	33.5	27.9	31.1	28	31.6
1:10:02	33.6	27.8	31.1	28	31.2
1:20:02	33.6	27.8	31.1	28	31.5
1:30:02	33.5	27.7	31	27.9	31.5
1:40:02	33.6	27.7	31	28	31.4
1:50:02	33.5	27.8	31	27.8	31.6
2:00:02	33.5	27.7	30.9	27.9	31.3
2:10:02	33.6	27.7	30.8	27.8	31.4
2:20:02	33.6	27.7	30.8	27.9	31.3
2:30:02	33.2	27.6	30.8	27.6	31.5
2:40:02	33.3	27.5	30.8	27.4	30.3
2:50:02	33.1	27.3	30.7	27.2	31.1
3:00:02	33.3	27.2	30.7	27.3	31.3
3:10:02	33.1	27	30.6	27.1	29.5
3:20:02	33.2	27	30.6	26.9	31.1
3:30:02	33.2	26.9	30.6	27	30.4
3:40:02	33.1	26.9	30.6	26.8	31.1
3:50:02	33.1	26.8	30.5	26.9	30.9
4:00:02	33.1	26.7	30.4	26.8	30.9
4:10:02	33.1	26.7	30.4	26.9	30.7

4:20:02	32.8	26.7	30.3	26.8	30.6
4:30:02	32.9	26.5	30.2	26.8	29.6
4:40:02	32.7	26.5	30.2	26.6	30.7
4:50:02	32.9	26.5	30.2	26.8	30.4
5:00:02	32.9	26.5	30.2	26.9	30.4
5:10:02	32.9	26.6	30.2	26.9	30.1
5:20:02	32.9	26.7	30.2	27.1	29.9
5:30:02	32.8	26.7	30.1	27.1	30.4
5:40:02	33	26.8	30.1	27.1	30.3
5:50:02	32.9	26.8	30.1	27.2	29.9



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว กิติพร สมวงศ์ชัย เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสถาปัตยกรรมปริญญาตรีสถาปัตยกรรมบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559

