ประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

นายธนาบดินทร์ สิปปภากุล

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 SELF-SHADED BRICK WALL

Mr. Thanabordin Sippaphakul

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture
Department of Architecture
Faculty of Architecture
Chulalongkorn University
Academic Year 2016
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง
โดย	นายธนาบดินทร์ สิปปภากุล
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.ดารณี จารีมิตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธนาบดินทร์ สิปปภากุล : ประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง (THERMAL PERFORMANCE OF SELF-SHADED BRICK WALL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร, 80 หน้า.

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง โดยเน้นศึกษาผลกระทบของเงาบนผนังที่มีการแปรเปลี่ยนตลอดเวลาตามองศาของแสงแดดในรูปแบบของ Dynamic Façade ซึ่งเกิดจากสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและการเรียงอิฐด้วยรูปแบบที่แตกต่างกัน การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง กำหนดให้มีการสร้างกล่องทดลองไปวางในสถานที่จริงและทำการเก็บข้อมูลโดยการวัดค่าอุณหภูมิและนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U_{eff} ของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเพื่อเพื่อสามารถนำไปใช้ในการคำนวณ OTTV ตามกฎกระทรวง ในขั้นสุดท้ายได้ศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานตลอดทั้งปีของอาคารสำนักงานขนาดกลางที่มีการใช้งานในเวลากลางวัน ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0

ผลการศึกษาพบว่าผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมากจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องต่ำกว่าผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐน้อยหรือผนังที่ไม่มีการยื่น โดยอุณหภูมิสูงสุดที่ผิวในของผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% มีค่ามากกว่าอุณหูมิสูงสุดที่ผิวในของผนังอิฐเรียบ (Basecase) เท่ากับ 4.6 $^{\circ}$C ส่วนผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นเท่ากันแต่วิธีการเรียงแตกต่างกันพบว่ามีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องแตกต่างกันเพียง 0.2 $^{\circ}$C ส่วนผลคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนพบว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นมากจะมีค่า U_{eff} ต่ำกว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นน้อย และในช่วงที่ดวงอาทิตย์ทำมุมสูงกับผนัง U-value จะมีค่าต่ำกว่าในช่วงที่ดวงอาทิตย์ทำมุมต่ำกับผนัง โดยค่า U_{eff} ต่ำสุดที่คำนวณได้คือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% ในวันที่ดวงอาทิตย์ทำมุม 70° กับผนัง คำนวณค่าได้ 1.61 W/(m^{2} $^{\circ}$C) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอิฐมวลเบาที่มีความหนาใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นผลการศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานตลอดทั้งปีพบว่าอาคารกรณีตัวอย่างที่มีการใช้ผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าในด้านการทำความเย็นลดลงร้อยละ 2.6 ต่อปี จึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและองศาแดดที่ทำมุมกับผนังในแต่ละเดือน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณเงาบนผนังจึงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนัง โดยรูปแบบการเรียงอิฐที่แตกต่างกันในสัดส่วนการยื่นเท่ากันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนค่อนข้างน้อย

ภาควิชา	สถาปัตยกรรมศาสตร์	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2559		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5973351525 : MAJOR ARCHITECTURE
KEYWORDS: SELF-SHADED / BRICK WALL / BRICK PATTERN / DYNAMIC FAÇADE

THANABORDIN SIPPAPHAKUL: THERMAL PERFORMANCE OF SELF-SHADED BRICK WALL. ADVISOR: ASSOC. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 80 pp.

The objective of this study is to evaluate the thermal performance of self-shaded brick wall. The effect of shade on the wall as a result of different Extrusion Percentage (E.P.) of brick and brick patterns, which is the dynamic façade that change throughout the day depending on the angle of the sunlight, was determined. Thermal transmittance or U-values of each experimental condition were calculated from temperatures obtained from mockup units in the experimental field. After that, they were used for determined the Overall Thermal Transfer Value (OTTV) according to the Ministry of Energy's rule and evaluated the annual energy efficiency of daytime-usage low rise office building using VisualDOE 4.0

Results showed that the self-shaded brick wall which has the higher E.P. could reduced the average temperature better than the lower E.P. The highest temperature measures at the inner surface of basecase was significant higher than those of the E.P. 45% wall by 4.6 °C. Meanwhile, the temperature difference among different brick patterns at the same E.P. was not obvious (average temperature difference was 0.2 °C.). The calculation of U-values revealed that they were affected by two factors. Higher E.P. wall and higher sunlight angle resulted in lower U_{eff}. The lowest calculated U_{eff} was 1.61 W/ (m^2°C) similar to the Autoclaved Aerated Concrete Masonry. Moreover, the results of energy simulation show that the buildings which apply self-shade brick wall can reduce the cooling energy consumtion by 2.6% per year. It can be concluded that the thermal performance of self-shaded brick wall was not significantly affected by different brick patterns but noticeably by Extrusion Percentage and solar angle which varies throughout the year. The latter factor plays an important role in formulating different shadow areas on the wall and consequently affected heat transfer.

Department:	Architecture	Student's Signature	....
Field of Study:	Architecture	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2016		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากรองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ดารณี จารีมิตร กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก และรองศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ช่วยชี้แนะและให้คำแนะนำตั้งแต่ในขั้นการเสนอหัวข้อจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ สำนักนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณดนู กตัญญุตานันท์ บริษัท แอฟริคัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิและรังสีดวงอาทิตย์

ขอขอบคุณ ราชเทวีเรสซิเดนท์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำการทดลอง

ขอขอบคุณ เอิร์ธ เปเล่ น้องบูมและเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่คอยถามไถ่และให้ความช่วยเหลือตลอดการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวและอรกานต์ ที่ให้การสนับสนุนและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย...ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...จ

กิตติกรรมประกาศ...ฉ

สารบัญ...ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา...1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 4

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

2.1 แนวคิดและทฤษฎี...6

2.1.1 ทิศทางของแสงแดดตามฤดูกาล 6

2.1.2 ความร้อนที่เข้าสู่อาคาร 7

2.1.3 กระบวนการถ่ายเทความร้อน 8

2.1.4 ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient : U-value)....14

2.1.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านมวลอุณหภาพ (Thermal Mass)................................17

2.1.6 การคำนวณค่า OTTV...19

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...21

2.2.2 การใช้พืชช่วยบังแดด (Tree-Shaded)...25

2.2.3 การบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading)...27

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย...31

3.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31

3.2 การตั้งสมมติฐานการวิจัย 31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.3 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ออกแบบทางเลือก 32
3.4 การออกแบบทางเลือก 32
3.5 การทดลองด้วยกล่องทดลอง 38
3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล 40
3.7 การคำนวนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U-value 41
3.8 การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 42
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล 46
4.1 อุณหภูมิอากาศภายนอกและค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้ในช่วงที่มีการทดลอง (Control) 46
4.2 กรณีที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) แตกต่างกัน 48
4.3 กรณีที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) เท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน 52
4.4 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U_{eff} 54
4.5 ผลการจำลองประสิทธิภาพด้านพลังงานด้วยโปรแกรม VisualDoe 4.0 61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 64
5.1 สรุปผลการวิจัย 64
5.2 ข้อเสนอแนะ 67
5.2.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ 67
5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อยอด 68
รายการอ้างอิง 69
ภาคผนวก 71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 80

Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของวัตุประสงค์ของการศึกษา วิธีการศึกษา 5

ตารางที่ 2.1 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า 16

ตารางที่ 2.2 รายการวัสดุและสีผนังแยกตามระดับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 16

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิอากาศภายในอาคารสำนักงานที่มีการติดตั้งแผงบังแดดแตกต่างกัน.........23

ตารางที่ 3.1 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ออกแบบทางเลือก...32

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของอิฐมอญ...33

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายนอกกล่องและค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยในแต่ละวัน 47

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.1 48

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.2 50

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 2 52

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่า U_{eff} ของผนั งที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดดต่างๆ...60

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าด้านการทำความเย็นของอาคารที่มีการใช้..............................62

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 ความร้อนที่เข้ามาในอาคาร 2

ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้เงาในสถาปัตยกรรมไทย 3

ภาพที่ 1.3 อิฐดินเผาลักษณะพิเศษที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง 3

ภาพที่ 2.1 โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นแนวแกนเอียง..6

ภาพที่ 2.2 Sun Chart กรุงเทพฯ..7

ภาพที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน...10

ภาพที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน...11

ภาพที่ 2.5การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน 12

ภาพที่ 2.6 การสะท้อนความร้อน การดูดซับความร้อนและการทะลุผ่านความร้อน.................13

ภาพที่ 2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์...14

ภาพที่ 2.8 การทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์บังแดดบนดาดฟ้า 24

ภาพที่ 2.9 อาคารที่มีการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร...27

ภาพที่ 3.1 อิฐมอญตัน (ซ้าย) การเรียงอิฐแบบ Flemish Bond (ขวา)..32

ภาพที่ 3.2 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่น 0%, 15% และ 25% ของการทดลองชุดที่ 1.1 35

ภาพที่ 3.3 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 1.1 35

ภาพที่ 3.4 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่น 0%, 20% และ 45% ของการทดลองชุดที่ 1.2 36

ภาพที่ 3.5 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 1.2 36

ภาพที่ 3.6 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นเท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 2 37

ภาพที่ 3.7 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐเท่ากัน แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 2...37

ภาพที่ 3.8 ลักษณะกล่องทดลองอลูมิเนียมบุโฟม 38

ภาพที่ 3.9 การทดลองด้วยกล่องทดลองบนดาดฟ้าอาคาร 39

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.10 รูปตัดกล่องทดลองแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ....................39
ภาพที่ 3.11 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (12 Chanel) และวิธีการติดตั้ง....................40
ภาพที่ 3.12 เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ (Solar Power Radiation) และวิธีการติดตั้ง....................40
ภาพที่ 3.13 การเก็บข้อมูลด้วยกล่องทดลองที่องศาแดดต่างๆ....................41
ภาพที่ 3.14 กรณีศึกษาอาคารสำนักงานขนาดกลาง....................42
ภาพที่ 3.15 การตั้งค่าชนิดผนังในโปรแกรม VisualDOE 4.0....................43
ภาพที่ 3.16 การแทนค่า U_{eff} ของผนังอิฐรูปแบบต่างๆ....................44
ภาพที่ 4.1 องศาแดดที่ทำมุมกับผนังทางทิศใต้ในแต่ละเดือน....................54
ภาพที่ 4.2 การจำลองปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังที่องศาแดดต่างๆ ในเวลาเที่ยงวัน....................55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 2.1 อุณหภูมิอากาศภายในอาคารสำนักงานที่มีการติดตั้งแผงบังแดดแตกต่างกัน 22

แผนภูมิที่ 2.2 อุณหภูมิอากาศภายในห้องพักอาศัยที่มีการติดตั้งแผงบังแดดรูปแบบต่างๆ 23

แผนภูมิที่ 2.3 อุณหภูมิภายในห้องที่มีและไม่มีเงาบนดาดฟ้า 24

แผนภูมิที่ 2.4 ค่าร้อยละของเงาบนผนัง (บน) เทียบกับอุณหภูมิที่ผิวของผนัง (ล่าง).................26

แผนภูมิที่ 2.5 ปริมาณใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารที่มีเงาของต้นไม้.....................27

แผนภูมิที่ 2.6 การใช้พลังงานในการทำความเย็นทั้งหมดของอาคารที่มีการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร 28

แผนภูมิที่ 2.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อพื้นที่อาคารต่อการใช้พลังงานการทำความเย็นในอาคาร 29

แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 1.1..49

แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 1.1 49

แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 1.2..51

แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 1.2 51

แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 2...53

แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 2.......................................53

แผนภูมิที่ 4.7 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 50°............................56

แผนภูมิที่ 4.8 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 60°............................56

แผนภูมิที่ 4.9 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 70°............................57

แผนภูมิที่ 4.10 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 80° 58

แผนภูมิที่ 4.11 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างเปรียบเทียบกันที่องศาแดดต่างๆ ...59

แผนภูมิที่ 4.12 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งปีของอาคารสำนักงานขนาดกลางทั่วไป.....61

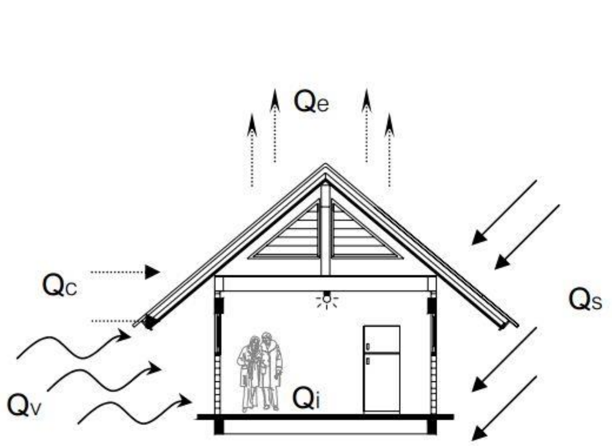
แผนภูมิที่ 4.13 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านการทำความเย็นในหนึ่งปีของผนังแต่ละรูปแบบ..63

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้น บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรขึ้นมาเล็กน้อย ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยต่อปีค่อนข้างสูง เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากแสงแดดตลอดทั้งปี ทิศทางของแสงแดดตามฤดูกาลมาจากทางทิศใต้เป็นส่วนใหญ่ ช่วงเวลาที่แสงแดดส่องมาจากทางทิศใต้กินเวลา 8 เดือน ระหว่างช่วงเดือนกันยายนถึงเดือนเมษายนของทุกปี เดือนที่แสงแดดอ้อมใต้มากที่สุดคือเดือนธันวาคม โดยจะทำมุมยอด 37.5 องศาในตอนเที่ยง ส่วนช่วงเวลาที่แสงแดดส่องมาจากทางทิศเหนือกินเวลา 4 เดือน ระหว่างช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคมของทุกปี เดือนที่แสงแดดอ้อมเหนือมากที่สุดคือเดือนมิถุนายน โดยจะทำมุมยอด 9.5 องศาในตอนเที่ยง ส่วนช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากที่สุดในเดือนมีนาคมและกันยายนของทุกปี แสงแดดจะส่องเฉียงมาจากทางทิศใต้ ทำมุมยอด 14 องศาในตอนเที่ยง

ความร้อนที่เข้ามาในอาคารจะมาจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 ส่วน คือ ความร้อนจากภายนอก และความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร โดยทั่วไปแล้ว ความร้อนในอาคารส่วนใหญ่จะมาจากภายนอกมากกว่า และเป็นความร้อนที่ได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (ภาพที่ 1.1) โดยจะแบ่งเป็น 4 ประเภทหลักๆ ดังนี้ 1. การนำความร้อน (Conduction Heat Gain) ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งการนำความร้อนเข้ามาภายในอาคารหรือการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกโดยตัวนำความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิระหว่างภายนอกและภายในอาคาร โดยความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเสมอ 2. การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) คือการได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง 3. ความร้อนที่มาจากการระบายอากาศ (Ventilation Heat Gain) จะมีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อนแต่จะมีตัวกลางในการพาความร้อนมาโดยอากาศ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทางและความเร็วของกระแสลมด้วย 4. การระเหยหรือความร้อนที่กลายเป็นไอ (Evaporative Heat Loss) ในขณะที่เกิดการระเหยจำเป็นจะต้องใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ ทำให้สามารถช่วยลดความร้อนในบริเวณนั้นได้



ภาพที่ 1.1 ความร้อนที่เข้ามาในอาคาร (ที่มา : http://ienergyguru.com)

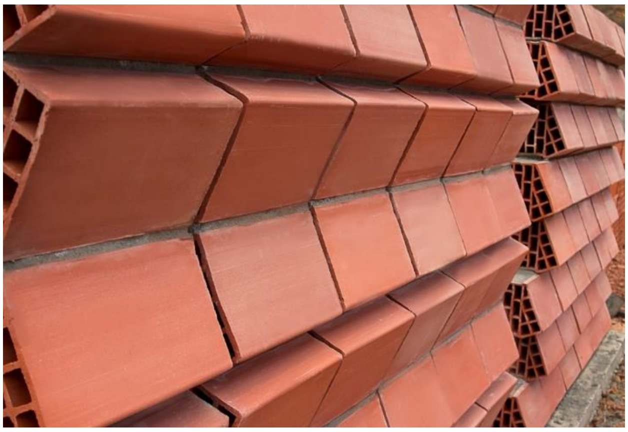
ประเทศไทยที่ตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ความร้อนจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์หรือแสงแดดถือเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมในตัวอาคาร ความร้อนจากแสงแดดจะเข้าสู่ตัวอาคารผ่านทางผนังและหลังคา และหากเทียบสัดส่วนพื้นที่ผนังและหลังคาของอาคารโดยทั่วไป จะพบว่าสัดส่วนพื้นที่ผนังจะมากกว่าหลังคา การบังแดดให้ผนังจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะช่วยลดความร้อนสะสมและลดการใช้พลังงานภายในอาคารลงได้มาก

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบังแดดให้ผนังเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร พบว่าสามารถแบ่งเป็นสองรูปแบบหลักๆ ได้แก่ การบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดด (Shading Devices) และการบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) โดยรูปแบบที่สนใจคือการบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์บังแดดต่างๆ การบังแดดด้วยตัวเองยังมีความสอดคล้องกับรูปแบบของสถาปัตยกรรมไทย ที่มีการทำให้เกิดเงาในงานสถาปัตยกรรมมานานแล้ว เช่น ลวดลายสลักไม้หรือปูนปั้นนูนต่ำบริเวณหน้าบรรณ การมีบัวผนังองค์ประกอบต่างๆ หรือแม้แต่การย่อมุมของเจดีย์ (ภาพที่ 1.2) เป็นการใช้เงาเพื่อเน้นความชัดเจนของลวดลายและสัดส่วนของงานสถาปัตยกรรม แม้ว่าองค์ประกอบในงานสถาปัตยกรรมไทยเหล่านี้จะไม่ได้คิดค้นมาเพื่อการประหยัดพลังงาน แต่จากงานวิจัยหลายๆงานที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเกิดเงาบนผนังสามารถลดความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารได้ จึงเป็นแรงบันดาลใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับผนังของอาคารในปัจจุบันเพื่อลดความร้อนที่จะเข้าสู่ผนังอาคารด้วยการกันแดดด้วยตัวเอง โดยจะเลือกใช้กับผนังอิฐมอญ ซึ่งเป็นผนังที่มีการใช้อย่างแพร่หลายมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เนื่องจากมีอิฐมอญมีคุณสมบัติที่ดีทั้งในเรื่องของราคา ความแข็งแรงและการป้องกันความร้อน (ตารางที่ 3.1) นอกจากคุณสมบัติที่ดีแล้วปัจจุบันยังมีความนิยมที่จะนำอิฐมอญมาใช้ตกแต่งเพื่อความสวยงาม โดยการก่อด้วยรูปแบบที่หลากหลาย หนึ่งในรูปแบบที่หน้าสนใจคือการก่อให้ก้อนอิฐมีลักษณะยื่นออกหรือหดเข้าสลับกันไปมาทำให้เกิดมิติของเงาบนผนัง

ภาพที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้เงาในสถาปัตยกรรมไทย

ปัจจุบันในต่างประเทศได้มีการผลิตอิฐดินเผาที่มีลักษณะพิเศษขึ้นมา (ภาพที่ 1.3) เพื่อใช้เป็นผนังที่มีบังแดดด้วยตัวเองแล้ว แต่ยังไม่มีงานวิจัยชิ้นใดออกมารับรองประสิทธิภาพ และจากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีงานวิจัยชิ้นใดที่ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง โดยเฉพาะในผนังอิฐมอญของไทยที่มีใช้กันมานานอย่างแพร่หลาย จึงนำไปสู่ความสนใจที่จะศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง โดยมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยดังต่อไปนี้

Chulalongkorn University



ภาพที่ 1.3 อิฐดินเผาลักษณะพิเศษที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง (ที่มา: http://www.archdaily.com/778158/in-detail-heat-dispersing-brick-developed-in-colombia)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) แตกต่างกัน

2. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) เท่ากันแต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน

3. หาค่า U-value สำหรับผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง เพื่อใช้ในการคำนวณค่า OTTV และการศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงาน

4. จำลองการใช้พลังงานของอาคารที่มีการใช้ผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงานในหนึ่งปี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองที่เกิดจากรูปแบบการเรียงอิฐ โดยใช้อิฐมอญตันขนาดมาตรฐาน

2. ในการศึกษาและออกแบบทางเลือก จะเลือกใช้รูปแบบการเรียงอิฐเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเน้นความเรียบง่ายและความสะดวกในการก่อผนัง

3. ศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนเฉพาะในเวลากลางวัน โดยการจำลองผนังทางทิศใต้และปรับมุมของผนังโดยการเอียงกล่องขึ้น-ลงตามองศาแดดของดวงอาทิตย์ในแต่ละเดือน

4. ศึกษาและเก็บข้อมูลโดยการนำกล่องทดลองไปวางในสถานที่จริง หลังจากนั้นนำค่าที่มาคำนวณหาค่า U-value สำหรับผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.1 ความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ของการศึกษา วิธีการศึกษา
และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์	**วิธีการดำเนินการวิจัย**	**ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**
1. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) แตกต่างกัน	1. ออกแบบทางเลือกให้มี E.P. 15%, 20%, 25% และ 45%	1. ทราบถึงประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและวิธีการเรียงอิฐที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเลือกรูปแบบผนังได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานเพื่อการประหยัดพลังงานสูงสุด
2. ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) เท่ากันแต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน	2. ออกแบบทางเลือกให้มี E.P. 25% แต่วิธีการเรียงอิฐแตกต่างกัน	
3. หาค่า U-value สำหรับผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเพื่อใช้ในการคำนวณค่า OTTV และการศึกษาประสิทธิภาพด้านพลังงาน	3. คำนวณหาค่า U_{eff} ของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดดต่างๆ	2. ทำให้การคำนวณค่า OTTV มีความแม่นยำมากขึ้น
4. เสนอแนวทางการนำผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองไปใช้ในอาคารได้อย่างเหมาะสม	4. จำลองโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยใช้อาคารที่มีการใช้งานในเวลากลางวัน	3. ทราบแนวทางการใช้ผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเพื่อการประหยัดพลังงานในอาคารจริงตลอดทั้งปี

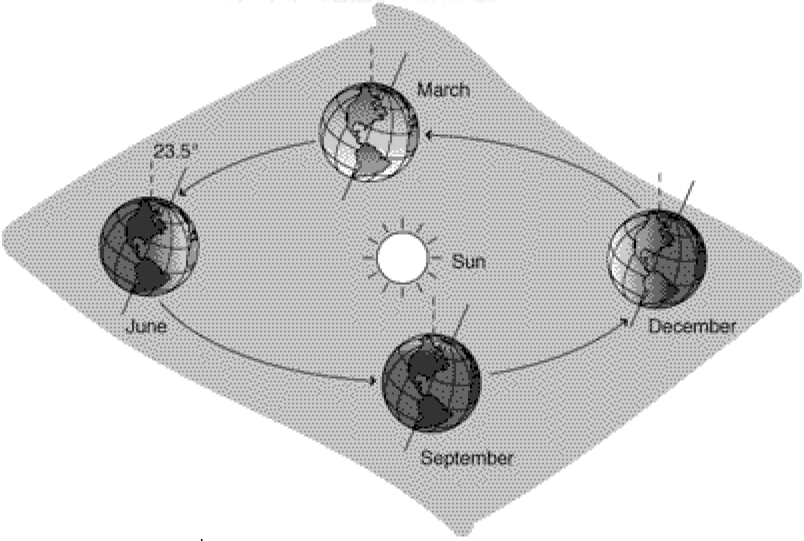
บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่มีมวลสารมาก ในการทบทวนวรรณกรรมจะมุ่งเน้นศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคารด้วยการบังแดดให้ผนังในรูปแบบต่างๆ โดยจะเริ่มจากแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ทิศทางของแสงแดดตามฤดูกาล

เนื่องจากแกนโลกที่วัดจากขั้วโลกเหนือไปยังขั้วโลกใต้วางตัวเป็นแนวเอียงประมาณ 23.5 องศา (ภาพที่ 2.1) และเมื่อโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์แกนโลกจะเอียงเท่าเดิมเสมอ ทำให้มีช่วงเวลาที่โลกเอียงแกนข้างใดข้างหนึ่งเข้าหาดวงอาทิตย์มากกว่าอีกข้างหนึ่ง ส่งผลให้เกิดเป็นฤดูกาลต่างๆ ขึ้น โดยจะสามารถแบ่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ได้เป็น 4 ช่วง ดังนี้



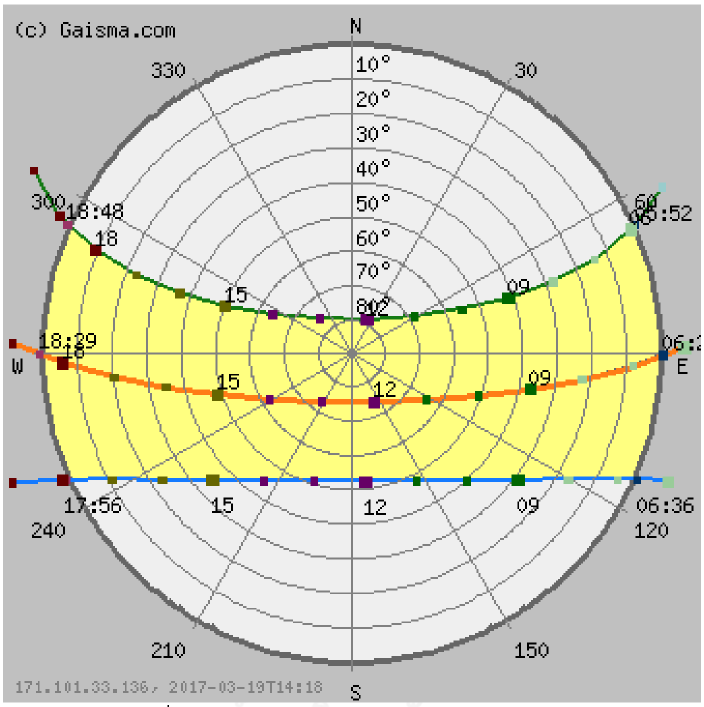
ภาพที่ 2.1 โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นแนวแกนเอียง
(ที่มา: https://dsignsomething.files.wordpress.com/2016/03/2.gif)

- Vernal Equinox ตรงกับวันที่ 21 มีนาคม ของทุกปีโดยประมาณ เป็นวันที่ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากที่สุด ในวันนี้ดวงอาทิตย์จะขึ้นที่ทิศตะวันออกและตกที่ทิศตะวันตกพอดี และเป็นวันที่กลางวันและกลางคืนมีความยาวเท่ากัน เรียกว่า Equinox (Equal Night)

- Summer Solstice ตรงกับวันที่ 22 มิถุนายน ของทุกปีโดยประมาณ จะเป็นวันที่ดวงอาทิตย์ขึ้นเฉียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือมากที่สุด โดยจะเป็นช่วงเข้าสู่ฤดูร้อนของประเทศทางด้านซีกโลกเหนือและเป็นฤดูหนาวของทางซีกโลกใต้

- Autumnal Equinox ตรงกับวันที่ 23 กันยายน ของทุกปีโดยประมาณ โดยดวงอาทิตย์จะกลับมาขึ้นที่ทิศตะวันออกและตกตรงกับทิศตะวันตกพอดี ประเทศทางซีกโลกเหนือกำลังจะเข้าสู่ฤดูหนาว ในขณะที่ประเทศทางซีกโลกใต้จะเข้าสู่ฤดูร้อน

- Winter Solstice ตรงกับวันที่ 22 ธันวาคมโดยประมาณ ทิศทางดวงอาทิตย์ขึ้นจะเฉียงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้และอ้อมใต้มากที่สุด โดยทางซีกโลกเหนือจะเป็นฤดูหนาว



ภาพที่ 2.2 Sun Chart กรุงเทพฯ (ที่มา: http://www.gaisma.com/en/location/bangkok.html)

ประเทศไทยตั้งอยู่เหนือแนวเส้นศูนย์สูตรเล็กน้อย ส่งผลให้แสงแดดจะส่องเฉียงมาจากทางทิศใต้เป็นส่วนใหญ่ (ภาพที่ 2.2) โดยจะเฉียงลงใต้มากที่สุดช่วงวันที่ 20–23 ธันวาคมของทุกปี (ประมาณ 50 องศา) และจะค่อยๆ เฉียงกลับไปทางทิศเหนือ โดยจะทำมุมเฉียงทางทิศเหนือมากที่สุดช่วงวันที่ 20–23 มิถุนายน (ประมาณ 9.5 องศา)

2.1.2 ความร้อนที่เข้าสู่อาคาร

ความร้อนภายในอาคารมาจากแหล่งกำเนิดความร้อน 2 ส่วน ได้แก่ ความร้อนจากภายในอาคารและความร้อนที่เกิดขึ้นภายนอกอาคาร โดยทั่วไปแล้วความร้อนในอาคารส่วนมากจะมาจากภายนอกมากกว่าภายในและเป็นความร้อนที่ได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยการส่งผ่านความร้อนจะมาจากตัวกลางหลายชนิดก่อนจะส่งผ่านทางเปลือกอาคารสู่ภายใน

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในอาคาร (Internal Heat Gain : Q_i) เป็นความร้อนที่อาจเกิดได้ทั้งจากคน หรือมาจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ภายในอาคาร เช่น ความร้อนจากหลอดไฟฟ้า ตู้เย็น เป็นต้น

ความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกอาคาร (External Heat Gain) เป็นความร้อนที่จะเกิดจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ ดังนี้

- Conduction Heat Gain / Loss (Q_c) การนำความร้อน อาจเกิดได้ทั้งการนำความร้อนเข้ามาภายในอาคารหรือการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกโดยตัวนำความร้อน ได้แก่ผนังหรือหลังคา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของอุณหภูมิระหว่างภายนอกและภายใน โดยความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ
- Solar Radiation (Q_s) การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ในกรณีของประเทศไทยที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรส่งผลให้ได้รับผลกระทบจากรังสีดวงอาทิตย์เป็นอย่างมาก
- Ventilation Heat Gain / Loss (Q_v) ความร้อนที่มาจากการระบายอากาศ มีลักษณะคล้ายกับการนำความร้อนแต่จะมีตัวกลางในการพาความร้อนคืออากาศ ซึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับทิศทางและความเร็วของกระแสลมด้วย
- Evaporative Heat Loss (Q_e) การระเหยหรือความร้อนที่กลายเป็นไอในขณะที่เกิดการระเหยจำเป็นจะต้องใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสถานะ ทำให้ความร้อนในบริเวณนั้นลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 กระบวนการถ่ายเทความร้อน

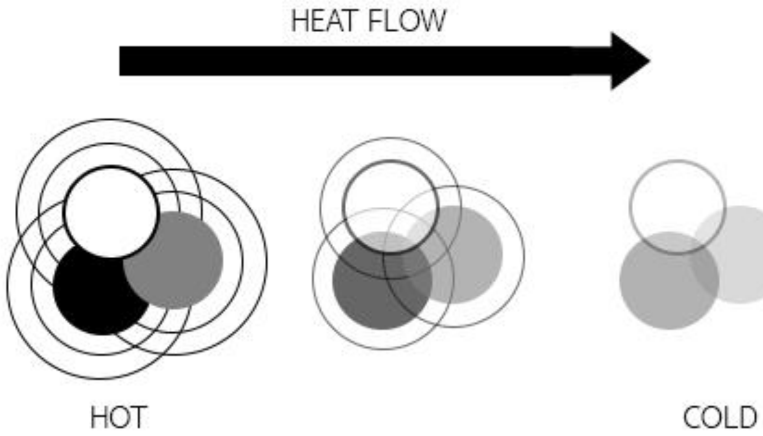
ณัฐกานต์ เกษประทุม (2543) กล่าวว่าความร้อนและอุณหภูมิมีความหมายที่ต่างกัน ความร้อนหมายถึงพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในสสาร ส่วนอุณหภูมิเป็นหน่วยการวัดปริมาณการเคลื่อนที่ของโมเลกุลโดยรวมในสสารนั้นๆ ซึ่งถือว่าอุณหภูมิเป็นการวัดปริมาณพลังงานความร้อนที่อยู่ในสสาร จึงสามารถกล่าวได้ว่าพลังงานความร้อนของสสารเกิดจากการเคลื่อนที่หรือการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลภายใน

ค่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (Absolute Zero) เป็นค่าอุณหภูมิที่โมเลกุลภายในสสารทุกชนิดไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ ที่อุณหภูมิ -459.69 องศาฟาเรนไฮนท์, -273.15 องศาเซลเซียส และ 0 องศาสเคลวิน เนื่องจากยิ่งโมเลกุลมีการเคลื่อนที่เร็วเท่าไรก็จะทำให้สสารมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่านั้น ค่าการวัดอุณหภูมิโดยทั่วไปมีอยู่สองแบบ ได้แก่ แบบที่หนึ่งการวัดอุณหภูมิที่มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสและองศาฟาเรนไฮนท์ที่นิยมกันอยู่ทั่วไป แบบที่สองคือการวัดพลังงานความร้อนมีหน่วยเป็นบีทียู (British Thermal Unit : BTU) หรือแคลอรี่ (Calorie) ซึ่งบีทียูหมายถึงจำนวนปริมาณความร้อนของน้ำ 1 ปอนด์ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาฟาเรนไฮนท์

อัญชนา สังขะกูล (2553) โดยทั่วไปความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่ร้อนมากไปสู่บริเวณที่ร้อนน้อยกว่าเสมอ และถ้าสสารใดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสสารนั้นก็จะไม่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเกิดจากการเคลื่อนที่ของพลังงานไปมาระหว่างโมเลกุลที่อยู่ติดกัน ความร้อนจะถ่ายเทจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมากไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำหรือมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้อยกว่า (ภาพที่ 2.3) ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ในทุกทิศทางและไม่ขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลก วัสดุที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าการนำความร้อน โดยวัสดุที่มีความหนาแน่นมากจะนำความร้อนได้ดี เช่น เงิน ทองแดง เหล็กหรือโลหะชนิดต่างๆ วัสดุที่นำความร้อนได้ปานกลาง เช่น คอนกรีตและอิฐ ส่วนวัสดุที่นำความร้อนได้น้อย เช่น ไม้และโฟม เป็นต้น ส่วนอากาศหรือก๊าซชนิดต่างๆ จะนำความร้อนได้น้อยที่สุด อากาศจึงมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี อย่างไรก็ตามความร้อนไม่สามารถถ่ายเทผ่านสภาพสูญญากาศได้เนื่องจากไม่มีโมเลกุลเป็นตัวกลาง นอกจากนั้นความสามารถในการนำความร้อนยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น คุณสมบัติของวัสดุ ความหนาวัสดุ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ พื้นที่สัมผัสความร้อนและช่วงเวลาสัมผัสความร้อน เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้สามารถบอกเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน

<u>สัมประสิทธิ์การนำความร้อน</u> (Conductivity : k หน่วย W/m.̊K หรือ Btu. In/ (ft^2.h.̊F)) คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของสสารโดยมีความหนา ช่วงเวลา พื้นที่และค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนใช้ในการบอกความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ เช่น คอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากับ 12.0 Btu. In/ (ft^2.h.̊F) หมายความว่า คอนกรีตขนาด 1 ตารางฟุต หนา 1 นิ้ว ถ้ามีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของสองด้านเท่ากับ 1.0 บีทียู แล้วจะสามารถนำความร้อน 12.0 บีทียูผ่านวัสดุในเวลา 1 ชั่วโมง

<u>ความนำความร้อน </u>(Conductance : C หน่วย W/m^2.̊K หรือ Btu. In/ (ft^2. h.̊F)) คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนของสสารโดยมีความหนา และกำหนดด้วยช่วงเวลา 1 หน่วย ค่าความนำความร้อนมีลักษณะคล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน แต่หน่วยของการวัดจะตายตัว เช่น คอนกรีตหนา 2 นิ้ว มีค่าความนำความร้อนเท่ากับ 6.0 Btu. In/ (ft^2.h.̊F) (มาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนหารด้วยความหนา 2 นิ้ว ซึ่งหมายความว่าถ้าคอนกรีตมีพื้นที่ 1 ตารางฟุต หนา 2 นิ้ว มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก 1.0 บีทียู แล้วจะสามารถนำความร้อน 6.0 บีทียูผ่านวัสดุใน 1 ชั่วโมง)

C = k / ความหนาวัสดุ	(1)

<u>ความต้านทานความร้อน</u> (Resistance : R หน่วย m^2.̊K/W หรือ (ft^2.h.̊F/Btu)) คือ ส่วนกลับของค่าความนำความร้อน C เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดค่าความเป็นฉนวนกันความร้อนในอาคาร วัสดุที่มีค่า R-value มากหมายความว่าเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนมาก

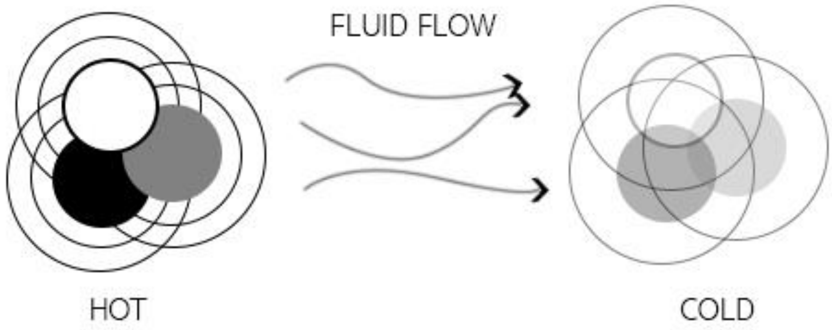
R = 1 / C	(2)

<u>สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน</u> (Thermal transmittance : U หน่วย $W/m^2.^{\circ}K$ หรือ Btu/ $(ft^2. h. ^{\circ}F)$) คือ หน่วยของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาในอาคาร ณ ช่วงเวลาและพื้นที่หนึ่ง มีค่าเป็นส่วนกลับของ R

$$U = 1 / \Sigma R = 1 / (R_1 + R_2 + R_3 + ...+ R_n)$$

การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนผ่านการเคลื่อนที่ของอขงไหล (Fluid) เช่น น้ำหรืออากาศ คล้ายกับการนำความร้อนเมื่อสสารถูกให้ความร้อนโมเลกุลภายในจะเกิดการเคลื่อนที่เร็วขึ้นและแตกกระจายออกไปในทิศทางต่างๆ ทำให้สสารเกิดการขยายตัว หากสสารเป็นของแข็งจะทำให้เกิดการขยายตัว ส่วนของเหลวและก๊าซจะมีความหนาแน่นลดลงและเกิดการลอยตัวขึ้น จากรูปแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากด้านร้อนไปด้านที่เย็นกว่า โดยถ่ายเทผ่านไปยังอากาศซึ่งเป็นตัวกลางพาความร้อน



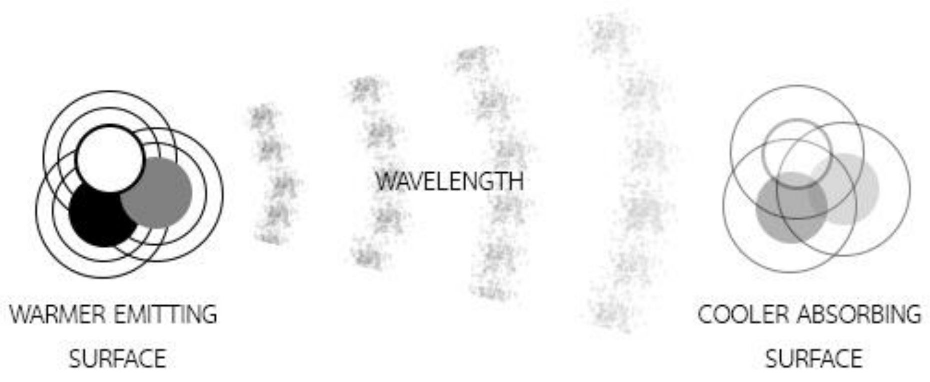
ภาพที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

ความแตกต่างของการพาความร้อนและการนำความร้อนคือความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของโมเลกุล การพาความร้อนโมเลกุลที่เป็นตัวกลางจะเคลื่อนที่ย้ายพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่ง (ภาพที่ 2.4) ส่วนการนำความร้อนโมเลกุลจะไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งแต่พลังงานความร้อนจะเคลื่อนย้ายไปยังโมเลกุลใกล้เคียงแบบตัวต่อตัว

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อโมเลกุลภายในของสสารเกิดการเคลื่อนไหวจะคายพลังงานออกมาในรูปแบบเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนจากวัตถุที่ร้อนกว่าไปยังวัตถุที่เย็นกว่าโดยไม่อาศัยตัวกลางจึงสามารถส่งผ่านความร้อนในสภาพที่เป็นสูญญากาศได้ (ภาพที่ 2.5) การเคลื่อนไหวหรือการสั่นของ

โมเลกุลบริเวณพื้นผิวของสสารจะก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเท่ากับความเร็วแสง และการแผ่รังสีความร้อนจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทุกทิศทางและจะไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก แต่การเคลื่อนที่นั้นจะช้าลงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคลื่นรังสีความร้อน เมื่อความร้อนถูกถ่ายเทผ่านตัวกลางจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง จะเกิดการสะสมพลังงานทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นและคายความร้อนออกมา

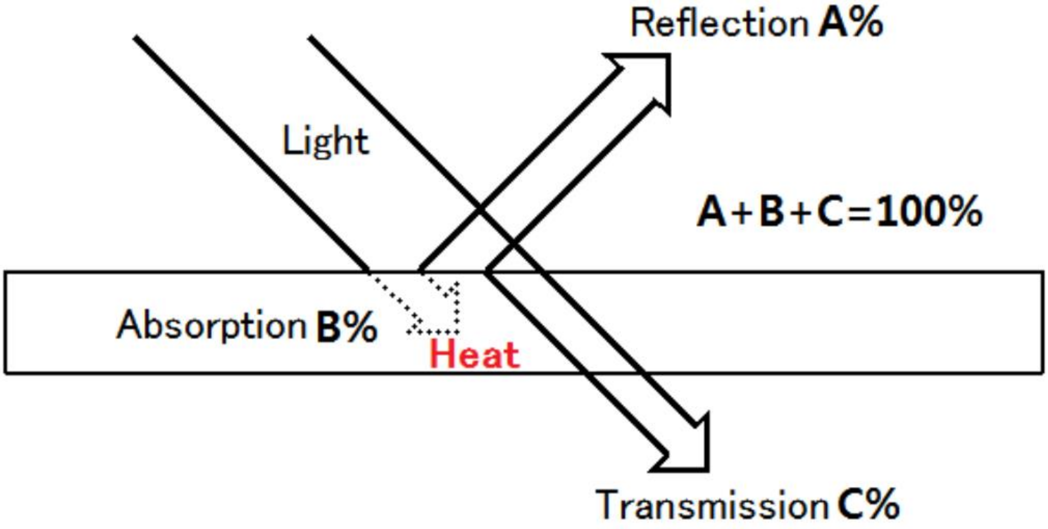


ภาพที่ 2.5การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน

<u>ความยาวคลื่น</u> โมเลกุลที่พื้นผิวของสสารสามารถถ่ายเทความร้อนออกมาเป็นค่าความยาวคลื่น (Wave Length) หรือความถี่คลื่น (Frequency) โมเลกุลที่พื้นผิวของสสารแต่ละชนิดจะมีการเคลื่อนไหวหรือสั่นที่แตกต่างกัน และจะแผ่รังสีความร้อนออกมาในความเร็วที่คงที่ ทำให้เกิดเป็นความถี่ของการแผ่รังสี โดยโมเลกุลที่เคลื่อนไหวเร็วที่สุดหรือร้อนที่สุดจะคายคลื่นรังสีสั้นๆ ออกมา เช่น คลื่นรังสีจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นคลื่นสั้นที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.4-4.0 ไมครอน (Micron : 1 Micron มีค่าเท่ากับ 10^{-6} เมตร) ส่วนโมเลกุลที่เคลื่อนไหวช้าจะคายรังสีที่มีลักษณะคลื่นยาว ซึ่งมีความยาวประมาณ 8-50 ไมครอน

<u>การดูดซับความร้อน</u> (Absorption : α) เมื่อมีการแผ่รังสีความร้อนมากระทบพื้นผิวสสารนั้นจะมีการดูดซับความร้อนที่พื้นผิวนั้น และเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้มีอุณหภูมิที่ผิวสูงขึ้น สสารยังมีความสามารถในการ <u>สะท้อนความร้อน</u> (Reflection : β) โดยเฉพาะวัสดุที่มีผิวมันวาว นอกจากนั้นสสารยังมีความสามารถใน <u>การทะลุผ่านความร้อน</u> (Transmission : τ) ค่าการดูดซับความร้อน การสะท้อนความร้อนและการทะลุผ่านความร้อนจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-1.0 เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและค่าของคุณสมบัติทั้งสามจะรวมกันเท่ากับ 1.0 เสมอดังภาพที่ 2.6

$$\alpha + \beta + \tau = 1$$



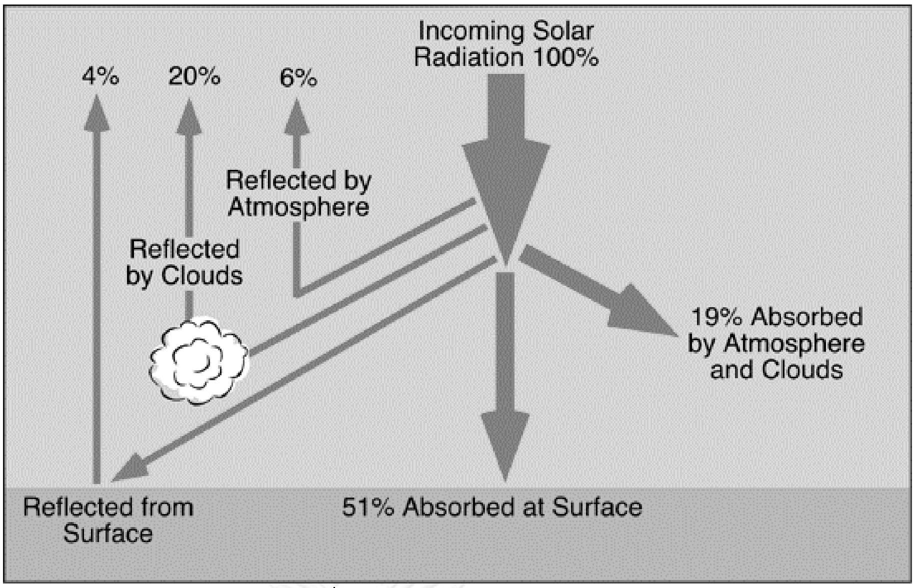
ภาพที่ 2.6 การสะท้อนความร้อน การดูดซับความร้อนและการทะลุผ่านความร้อน
(ที่มา: http://heater.heat-tech.biz/wp-content/uploads/2015/02/5-11e.png)

การคายความร้อน (Emissivity : ε) การคายความร้อนเป็นหน่วยการวัดความสามารถในการคายรังสีความร้อนของพื้นผิววัสดุในอุณหภูมิที่กำหนด ค่าของการคายความร้อนจะมีค่าอยู่ที่ 0.0-1.0 โดยวัสดุที่ไม่มีการคายความร้อนค่าจะเป็น 0 ส่วนวัสดุที่มีค่าการคายความร้อนมากที่สุดค่าจะเป็น 1 เทียบได้กับวัสดุสีดำในอุดมคติ (Black body) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการคายความร้อนเท่ากับดูดซับความร้อนในอุณหภูมิต่างๆ (Kirchoff's law)

$$\varepsilon = \alpha$$

วัสดุที่มีผิวไม่มันวาวหรือไม่เป็นโลหะ (Non-metallic) จะมีความสามารถในการคายความร้อนได้มากกว่าวัสดุมันวาวหรือเป็นโลหะ วัสดุที่มีสีเข้มจะดูดซับความร้อนได้ดีทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับรังสีความร้อน ส่วนวัสดุที่มีสีอ่อนจะมีความสามารถในการสะท้อนรังสีได้ดีทำให้ร้อนช้าและมีอุณหภูมิต่ำกว่า

การแผ่รังสีอาทิตย์ ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่แผ่รังสีความร้อนและแสงสว่างมายังโลก โดยรังสีความร้อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังผิวโลกวัดค่าได้ประมาณ 420 Btu/ft^2/hr หรือเท่ากับ 1.94 Cal/cm^2/min ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่ารังสีความร้อนที่ควรจะเป็น เนื่องจากมีชั้นบรรยากาศของโลก โดยรังสีส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับไว้ที่ชั้นบรรยากาศ บางส่วนกระทบกับโมเลกุลของชั้นบรรยากาศกระจายออกและแผ่กลับมาในสภาพของรังสีกระจาย (Diffuse radiation) ส่วนรังสีที่ตกถึงพื้นดินจะถูกดูดซับและคายความร้อนออกมาในบริเวณโดยรอบทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์

(ที่มา: http://www.physicalgeography.net/fundamentals/images/cascade.GIF)

2.1.4 ค่าสัมประสิทธ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient : U-value)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวม $1/\Sigma R$ มีหน่วยเป็น W/m^2 ˚C โดยค่า ΣR คือค่าความต้านทานรวมของวัสดุมีหน่วยเป็น m^2 ˚C/W ดังนั้นจึงหมายความว่าหากวัสดุผนังมีค่าความต้านทานรวมน้อย วัสดุผนังนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ความร้อนก็จะสามารถผ่านผนังเข้ามาได้มาก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนที่เข้าและออกผนังที่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภานในและภายนอก ซึ่งค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกจะสามารถแบ่งออกเป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 การถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงที่ (Steady state) หรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกคงที่ ซึ่งมีอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกไม่รุนแรง จะใช้สมการในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนดังนี้ (ASHARE, 1989)

$$Q = U\,A\,(t_o - t_i) \quad (3)$$

Q	หมายถึง	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (W หรือ Btu)
U	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/(m^2 ˚C))
A	หมายถึง	พื้นที่ผิวที่ได้รับความร้อน (m^2)
t_o	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายนอก (˚C)
t_i	หมายถึง	อุณหภูมิอากาศภายใน (˚C)

กรณีที่ 2 การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงที่ (Unsteady state) หรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกไม่คงที่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพอากาศเนื่องจากได้รับอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ การคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนจึงต้องใช้ค่า CLTD (Cooling Load Temperature Difference) แทนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในภายนอก (t_o-t_i) โดยค่า CLTD จะได้มาจากการดัดแปลงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในภายนอกโดยคำนึงถึงอิทธิพลภายนอกมากขึ้น เช่น เวลา วัน เดือน ละติจูด มวลอุณหภาพของผนัง ความเข้มของผนังและสภาพแวดล้อม เป็นต้น ทำให้ได้สมการออกมาดังนี้

$$Q = U\ A\ (CLTD)$$

Q	หมายถึง	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (W หรือ Btu)
U	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/(m^2 ℃))
A	หมายถึง	พื้นที่ผิวที่ได้รับความร้อน (m^2)
CLTD	หมายถึง	ค่าความต่างของอุณภูมิภายในและภายนอก

ประเทศไทยการคำนวณปริมาณความร้อนการถ่ายเทความร้อนที่ต้องคำนึงถึงค่าการถ่ายเทความร้อน มวลสารและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ให้ใช้ค่า TD_{eq} (Equipvalent Temperature Difference) ในการคำนวณแทนค่า CLTD ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 โดยจะคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สมการดังนี้ (กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, 2536)

$$Q = (U_w)\ (TD_{eq})$$

Q	หมายถึง	ปริมาณการถ่ายเทความร้อน (W/m^2)
U_w	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ (W/(m^2 ℃))
TD_{eq}	หมายถึง	ค่าความต่างของอุณภูมิภายในและภายนอก ซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ มีหน่วยเป็น ℃

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (ที่มา : คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร, 2536)

มวลของผนัง กก.ม.$^{-2}$	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า				
	ระดับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (α)				
	0.1 <0 – 0.2>	0.3 <0.2 – 0.4>	0.5 <0.4 – 0.6>	0.7 <6 – 0.8>	0.9 <0.8 – 1.0>
0 – 125	14	15	16	17	18
126 – 195	11	12	13	14	15
>195	9	10	11	12	13

ตารางที่ 2.2 รายการวัสดุและสีผนังแยกตามระดับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์
(ที่มา: คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร, 2536)

ประเภทวัสดุ	วัสดุผนัง	สีที่ใช้ทาภายนอก
1. วัสดุที่มีผิวสะท้อน [α<0.2]	- ผิววัสดุที่ฉาบด้วยดีบุก - แผ่นอลูมิเนียม - แผ่นฟิล์มไมลาร์เคลือบอลูมิเนียม -แผ่นสะท้อนแสงทำด้วยอลูมิเนียมขัดมัน	- สีสะท้อนแสง
2. วัสดุที่มีผิวสะท้อน [0.2<α<0.4]	- อิฐเคลือบมันสีขาว - เหล็กชุบสังกะสีทาสีขาว	- แลคเกอร์สีขาว - สีเงิน - สีขาวเป็นเงา
3. วัสดุที่มีผิวสีปานกลาง [0.4<α<0.6]	- วัสดุทาสีอลูมิเนียม - หลังคาประกอบขึ้นรูปสีขาว - อิฐสีเหลืองอ่อน - หินอ่อนสีขาว - กรวดล้างสีขาว	- สีเขียวอ่อน - สีน้ำเงินปานกลาง - สีเหลืองปานกลาง - สีส้มปานกลาง - สีเขียวปานกลาง
4. วัสดุที่มีผิวสีค่อนข้างเข้ม [0.6<α<0.8]	- คอนกรีตไม่ทาสี - ไม้ผิวเรียบ - แผ่นซีเมนต์แอสเบสตอส - หินล้างสีเทา	- สีแดง - สีน้ำเงิน - สีเทาอ่อน - สีสนิมแก่ปานกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5. วัสดุที่มีผิวสีเข้ม [0.8<α<1.0]	- วัสดุลาดผิวด้วยยางมะตอย - คอนกรีตสีน้ำตาล - วัสดุมุงหลังคาสีเขียว - หินชนวนสีเทาแกมน้ำเงิน - อิฐสีแดง - อิฐแสตฟฟอร์ดสีน้ำเงิน - คอนกรีตสีดำ	- สีน้ำเงินแก่หรือสีเขียวแก่ - สีเท่าแกนน้ำเงินเข้ม - สีน้ำตาลแก่ - สีโอลีฟเข้ม - สีดำ - แลคเกอร์สีน้ำเงินแก่ - สีเทาแก่ - แลคเกอร์สีดำ - สีดำธรรมชาติ
α หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์		

2.1.5 การถ่ายเทความร้อนผ่านมวลอุณหภาพ (Thermal Mass)

การกักเก็บความร้อน (Heat storage) ความร้อนจากแหล่งกำเนิดต่างๆ เมื่อมากระทบกับผิววัสดุจะถูกดูดกลืนเข้าไปในมวลสารและความร้อนบางส่วนจะถูกเก็บสะสมไว้ภายในตัววัสดุ โดยสัดส่วนของความร้อนที่จะสะสมในตัววัสดุขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่างได้แก่

1. อัตราส่วนค่าความต้านทานความร้อน (R) ของวัสดุและค่าความต้านทานความร้อนของอากาศที่สัมผัสกับผิวของวัสดุเป็นชั้นบางๆ (Airfilm)

2. ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุกับอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุเปรียบเทียบกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิววัสดุกับอุณหภูมิอากาศบริเวณรอบผิววัสดุ

โดยปกติแล้วค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุทุกชนิดจะต่ำกว่าค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิววัสดุ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ผิววัสดุ ความร้อนจะไม่ถูกถ่ายเทออกและจะสะสมอยู่ในตัววัสดุ และเมื่อวัสดุมีการสะสมความร้อน อุณหภูมิภายในมวลวัสดุจะเริ่มสูงขึ้นและถ่ายเทความร้อนออกไปอย่างช้าๆ

การคำนวณความสามารถในการกักเก็บความร้อนของวัสดุ (Thermal Storage Conductivity)

ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat : S หน่วย Btu/lb.$^{\circ}$F) คือ ค่าพลังงานที่วัสดุปริมาตร 1 ลิตรใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิทุกๆ 1 องศาฟาเรนไฮนท์ มีหน่วยเป็น Btu/lb.$^{\circ}$F โดยน้ำจะใช้พลังงาน 1 Btu/lb. ในการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาฟาเรนไฮนท์ ดังนั้นน้ำมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 1 และมีอุณหภูมิค่อนข้างคงที่

<u>ความจุความร้อน</u> (Heat capacity : C หน่วย Kcal/m^2°C หรือ Kcal/m^3°C) คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัสดุหนึ่งหน่วยปริมาตร หรือพื้นที่ผิวหนึ่งหน่อยพื้นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศา โดยค่าความจุความร้อนจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย ได้แก่ ค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C = \rho S$$

C	หมายถึง	ค่าความจุความร้อนของวัสดุหรือผนัง (Kcal/m^2°C หรือ Kcal/m^3°C)
ρ	หมายถึง	ค่าความหนาแน่นของวัสดุหรือผนัง (kg/m^3 หรือ kg/m^2)
S	หมายถึง	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific heat) (kal/kg °C)

ค่า Thermal Storage Capacity สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Thermal Storage Capacity} = \rho SK \text{ หน่วย } Btu^2/(h.ft^4.°F)$$

K	หมายถึง	ค่าการนำความร้อน (Btu/h.ft.°F)
S	หมายถึง	ค่าความร้อนจำเพาะ (Btu/lb.°F)
ρ	หมายถึง	ความหนาแน่น (lb/ft^3)

ค่า Thermal Diffusivity (ASHRAE, 1997: 39.12)

$$\alpha = K / (\rho S)$$

α	หมายถึง	Thermal Diffusivity
K	หมายถึง	ค่าการนำความร้อน (Btu/h.ft.°F)
S	หมายถึง	ค่าความร้อนจำเพาะ (Btu/lb.°F)

The Stored Thermal Energy (Bansal, Gerd and Grenol, 1994: 42)

$$Q = \rho \, V \, S \, \Delta t$$

Q	หมายถึง	The Stored Thermal Energy (Btu)
ρ	หมายถึง	ความหนาแน่น (lb/ft^3)
V	หมายถึง	ปริมาตร (ft^3)
S	หมายถึง	ค่าความร้อนจำเพาะ (Btu/lb.°F)
Δt	หมายถึง	ความแตกต่างของอุณหภูมิ (°F)

2.1.6 การคำนวณค่า OTTV

OTTV ย่อมาจาก Overall Thermal Transfer Value คือ ค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่ผ่านผนังภายนอกเข้ามาใน 1 ตารางเมตร มีหน่วยเป็น W/m^2 ส่วน RTTV ย่อมาจาก Roof Thermal Transfer Value คือค่าเฉลี่ยของพลังงานความร้อนที่ผ่านหลังคาเข้ามาต่อ 1 ตารางเมตร มีหน่วยเป็น W/m^2

พลังงานความร้อนที่ผ่านผนังจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ คือส่วนที่ผ่านเข้ามาทางผนังทึบ และส่วนที่ผ่านเข้ามาทางผนังโปร่งหรือกระจก โดยมีสมการคำนวณดังนี้

(1.) ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารแต่ละด้าน ($OTTV_i$)

$$OTTV_i = (U_w)(1-WWR)(TD_{eq}) + (U_f)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR)$$

$OTTV_i$	หมายถึง	ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
U_w	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ มีหน่วยเป็น (W/ (m^2. °C))
WWR	หมายถึง	อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสง และ/หรือของผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของผนังด้านที่พิจารณา
TD_{eq}	หมายถึง	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (equivalent temperature difference) ระหว่างภายนอกและภายในอาคารซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)
U_f	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังโปร่งแสงหรือกระจก (W/ (m^2. °C))
ΔT	หมายถึง	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)
$SHGC$	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนังโปร่งแสงหรือกระจก
SC	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด
ESR	หมายถึง	ค่ารังสีอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังโปร่งแสงและ/หรือผนังทึบ (W/m2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

(2.) ค่าค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (OTTV) คือ ค่าเฉลี่ยที่ถ่วงน้ำหนักของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกแต่ละด้าน (OTTVi) รวมกัน คำนวณจากสมการดังนี้

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \ldots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1}+A_{w2}+\cdots+A_{wi}}$$

A_{wi} หมายถึง พื้นที่ของผนังด้านที่พิจารณาซึ่งรวมพื้นที่ผนังทึบและพื้นที่หน้าต่างหรือผนังโปร่งแสง มีหน่วยเป็น (m^2)

$OTTV_i$ หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

(3.) การหาค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังทึบ (U_w)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบด้านนอกอาคาร (U_w) แต่ละด้านให้คำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

(3.1) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) คือ ส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวม ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$U = \frac{1}{R_T}$$

R_T หมายถึง ค่าความต้านทานความร้อนรวม (total thermal resistance) มีหน่วยเป็น ((m^2. °C)/W)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(3.2) ค่าความต้านทานรวม (R) คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุใดๆ ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$R = \frac{\Delta x}{k}$$

R หมายถึง ค่าความต้านทานความร้อน ((m^2. °C)/W)

Δx หมายถึง ความหนาของวัสดุ (m)

K หมายถึง สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/(m. °C))

(3.4) ค่าความต้านทานรวมของผนัง (R_T) ของผนังอาคารซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$R_T = R_o + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \cdots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + R_i$$

R_T	หมายถึง	ค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนังอาคาร ((m^2. C̊)/W)
R_o	หมายถึง	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร ((m^2. C̊)/W)
R_i	หมายถึง	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร ((m^2. C̊)/W)
Δx	หมายถึง	ความหนาของวัสดุ (m)
k	หมายถึง	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ

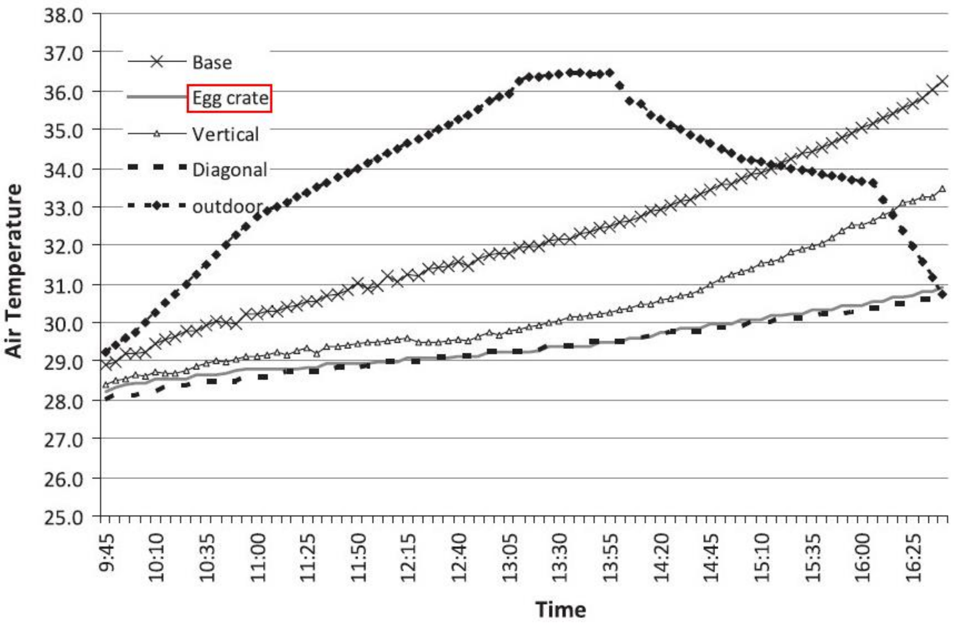
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบังแดดให้ผนังเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร พบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการบังแดดในหลากหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งเป็นสามรูปแบบหลักๆ ได้แก่ การบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดด (Shading Devices) การใช้พืชช่วยในการบังแดด (Tree-shaded) และการบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) ซึ่งทั้งสามรูปแบบนี้ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือสามารถลดความร้อนที่เข้ามาสู่ตัวอาคารได้ ซึ่งจะส่งผลต่อสภาวะน่าสบายและอัตราการใช้พลังงานในอาคาร

2.2.1 การบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดด (Shading Devices) คือ การบังแดดด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ มาติดตั้งบริเวณผนังหรือหลังคาภายนอกอาคาร เพื่อลดความร้อนที่เข้ามาสู่ผนังอาคารจากการแผ่รังสีอาทิตย์และส่งผลต่อประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานภายในอาคาร

Arifin and Denan (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคารที่มีต่ออุณหภูมิและความชื้นภายในอาคารสำนักงานในประเทศมาเลเซีย โดยทำการทดลองด้วยการวัดอุณหภูมิและความชื้นภายในห้องที่มีแผงบังแดดแตกต่างกันสามห้อง ได้แก่ แผงกันแดดแนวตั้ง แผงกันแดดแนวนอนและแผงกันแดดแบบลังไข่ พบว่าทั้งสามแบบสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารลงได้ โดยแผงกันแดดแบบลังไข่มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุด อยู่ที่ 30.5 องศาเซลเซียส ส่วนแผงกันแดดแนวตั้งมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด 31.75 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับ Freewan (2014) ทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์บังแดดทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของอาคารสำนักงานในประเทศจอร์แดน ซึ่งอยู่ในเขตร้อน

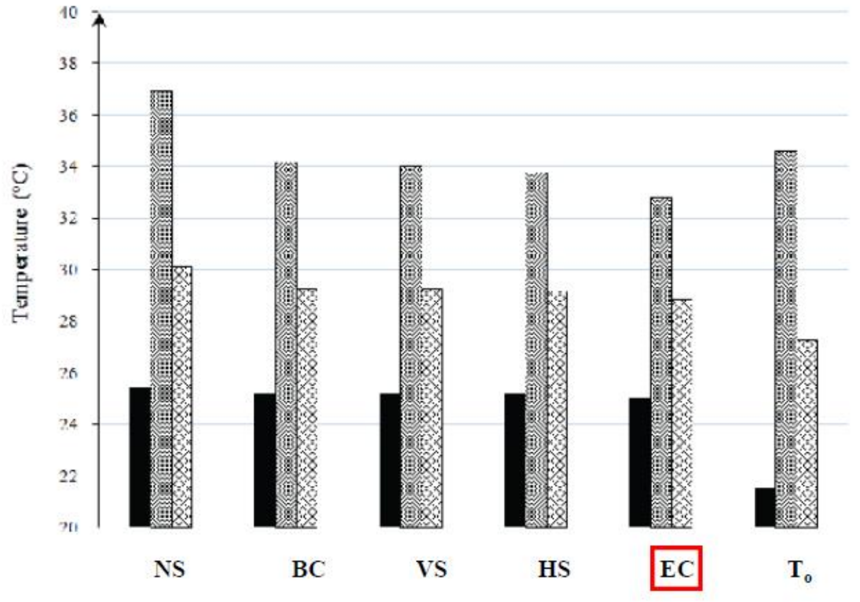
ศึกษาโดยการเปรียบเทียบห้องที่มีแผงกันแดดแบบต่างๆ และห้องที่ไม่มีแผงกันแดด พบว่าห้องที่มีแผงกันแดดสามารถลดอุณหภูมิภายในลงได้ โดยแผงกันแดดแบบลังไข่และแผงกันแดดแบบเฉียงให้ผลดีที่สุด โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Al-Tamimi and Fadzil (2011) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์บังแดดที่มีต่ออุณหภูมิภายในของอาคารพักอาศัยรวมในมาเลเซีย ศึกษาด้วยการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (IESVE) โดยจำลองแผงกันแดดรูปแบบต่างๆ ลงในอาคารพักอาศัยจริงขนาด 29 ชั้น พบว่าแผงกันแดดแบบลังไข่ (Egg-Crate: EC) ส่งผลดีต่อสภาวะน่าสบายภายในอาคารมากที่สุด (แผนภูมิที่ 2.2) จากผลการทดลองของ Arifin, Freewan และ Al-tamimi ที่มีความสอดคล้องกัน (แผนภูมิที่ 2.1, 2.2 และตารางที่2.3) ทำเห็นว่าอุปกรณ์บังแดดภายนอกอาคาร มีผลต่ออุณหภูมิและสภาวะน่าสบายภายในอาคาร โดยรูปแบบที่ดีที่สุด คือแผงบังแดดแบบลังไข่ ซึ่งเป็นรูปแบบที่กันแดดได้ทุกทิศทางจึงทำให้เกิดเงาบนผนังได้ตลอดทั้งวัน



แผนภูมิที่ 2.1 อุณหภูมิอากาศภายในอาคารสำนักงานที่มีการติดตั้งแผงบังแดดแตกต่างกัน
(ที่มา : งานวิจัยของ Freewan (2014))

ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิอากาศภายในอาคารสำนักงานที่มีการติดตั้งแผงบังแดดแตกต่างกัน
(ที่มา: งานวิจัยของ Arifin (2015))

No	Shading	Air temperature (in range)
1	Vertical	29.5-34.0^{0}C
2	Horizontal	29.5-32.0^{0}C
3	Egg-crate	29.5-31.5^{0}C
4	Indoor air quality	23.0-26.0^{0}C
5	ASHRAE	22.0-24.0^{0}C

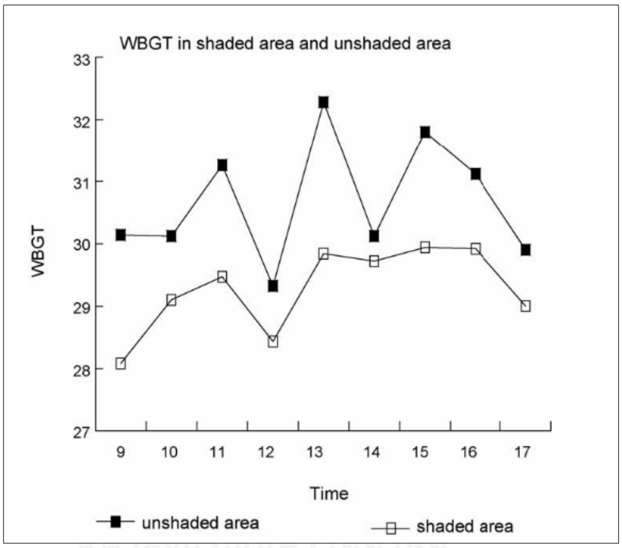


	NS	BC	VS	HS	EC	T_o
■ Min. Val.	25.45	25.17	25.19	25.18	25.04	21.5
▩ Max. Val.	36.93	34.18	34.04	33.78	32.8	34.6
▨ Mean	30.13	29.27	29.26	29.17	28.85	27.28

Max Ti Difference (EC-NS) = (36.93-32.8) = 5.1 ^{o}C

แผนภูมิที่ 2.2 อุณหภูมิอากาศภายในห้องพักอาศัยที่มีการติดตั้งแผงบังแดดรูปแบบต่างๆ
(ที่มา: งานวิจัยของ Al-tamimi (2011))

มีงานวิจัยบางงานทำการทดลองด้วยการบังแดดให้หลังคา เช่นงานวิจัยของ Meng and Zhang (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประหยัดพลังงานของอาคารที่ที่มีเงาอันเกิดจากแผงกันแดดบนดาดฟ้าของอาคารในภูมิอากาศกึ่งเขตร้อน โดยทำการศึกษาในสถานที่จริงในอาคารที่มีแผงกันแดดบนดาดฟ้า (ภาพที่ 2.8) โดยใช้วิธีการวัดอุณหภูมิเวตบัลบ์โกลบ (Wet Bulb Globe Temperature : WBGT) วัดทั้งในบริเวณที่มีเงาและไม่มีเงา พบว่าแผงกันแดดที่ทำให้เกิดเงาบนดาดฟ้ามีผลต่ออุณหภูมิ โดยในบริเวณที่มีเงาจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวดาดฟ้าต่ำกว่าบริเวณที่ไม่มีเงาอยู่ประมาณ 1.4 องศาเซลเซียส (แผนภูมิที่ 2.3) ซึ่งจะส่งผลให้ห้องที่อยู่ใต้บริเวณที่มีเงามีสภาวะน่าสบายกว่าห้องที่ไม่มีเงา



แผนภูมิที่ 2.3 อุณหภูมิภายในห้องที่มีและไม่มีเงาบนดาดฟ้า (ที่มา: งานวิจัยของ Meng (2006))

CHULALONGKORN UNIVERSITY

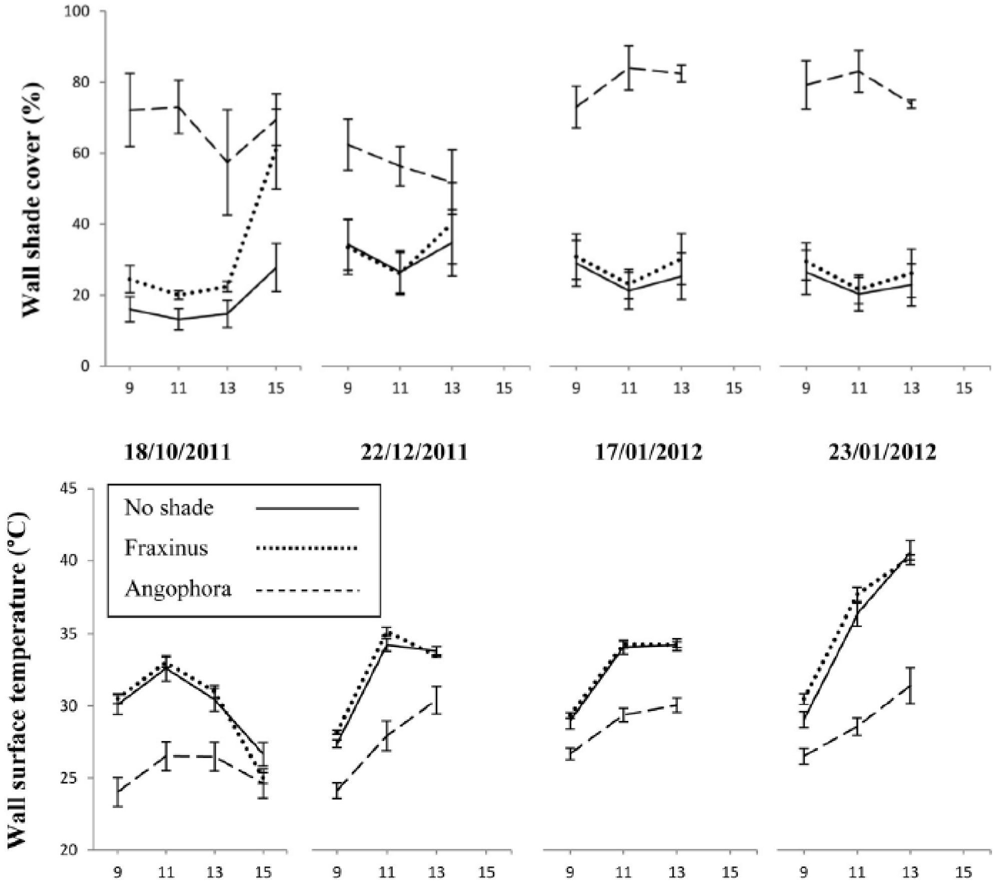
ภาพที่ 2.8 การทดสอบประสิทธิภาพอุปกรณ์บังแดดบนดาดฟ้า (ที่มา: งานวิจัยของ Meng (2006))

2.2.2 การใช้พืชช่วยบังแดด (Tree-Shaded) งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้พืชมาช่วยในการบังแดดให้กับอาคาร ตัวอย่างเช่น ต้นไม้ใหญ่ ต้นไม้กระถางหรือแม้แต่ไม้เลื้อย โดยอาศัยเงาที่เกิดจากความหนาของพุ่มใบ ในการลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร ดังเช่นในงานวิจัยต่อไปนี้

วรวรรณ เนตรพระ (2551) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้ไม้เลื้อยเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังอาคาร ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของผนังโดยใช้ไม้เลื้อยที่มีใบขนาดเล็ก ใบขนาดกลางและใบขนาดใหญ่ ทดสอบกับผนังที่มวลสารต่างๆ พบว่าไม้เลื้อยทุกขนาดใบมีประสิทธิภาพในการช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยไม้เลื้อยที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือใบขนาดกลาง ใบขนาดใหญ่และใบขนาดเล็กตามลำดับ ส่วนผนังที่มีแนวโน้มได้รับประสิทธิผลของไม้เลื้อยในการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดคือผนังที่มีมวลน้อย อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองกลับพบว่าผนังไม้เลื้อยส่งผลต่อการคายความร้อนของผนังในช่วงเวลากลางคืน ทำให้ผนังคายความร้อนออกมาได้ช้ากว่าผนังปกติ การใช้ผนังไม้เลื้อยจึงไม่เหมาะกับอาคารที่ใช้งานตอนกลางคืน

Berry, Livesley et al. (2013) ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากเงาของไม้กระถางต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังอาคาร โดยการวัดอุณหภูมิที่ผิวภายนอกของผนังอาคารจริง ที่มีการใช้ไม้กระถางขนาดต่างกันมาบังแดดทางทิศเหนือและทิศตะวันตก พบว่าเงาของไม้กระถางมีผลอุณหภูมิที่ผิวของผนัง โดยไม้กระถางขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพดีที่สุด สามารถทำให้อุณหภูมิที่ผิวนอกของผนังลดลงได้มากที่สุด 9 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิอากาศภายนอกลดลง 1 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิที่ผิวของผนังจะแปรผกผันกับค่าเปอร์เซ็น shade บนผนัง ผนังมีค่าเปอร์เซ็นต์ shade มากอุณหภูมิจะต่ำกว่าผนังที่มีเปอร์เซ็นต์ Shade น้อยกว่า ดังแสดงในแผนภูมิที่ 2.4

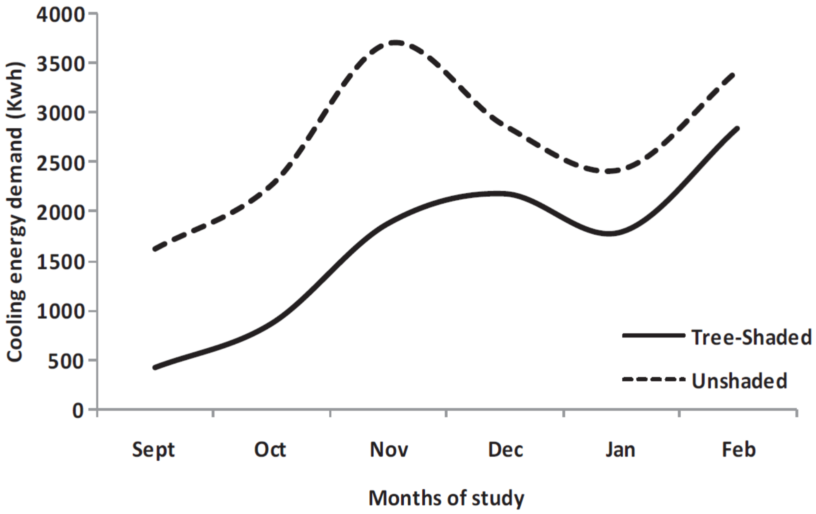
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



แผนภูมิที่ 2.4 ค่าร้อยละของเงาบนผนัง (บน) เทียบกับอุณหภูมิที่ผิวของผนัง (ล่าง)
(ที่มา: งานวิจัยของ Berry (2013))

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ต่อมา Balogun, Morakinyo et al. (2014) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของเงาที่เกิดจากต้นไม้ต่อความต้องการใช้พลังงานในการปรับอากาศ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบอาคารสองหลังที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ที่มีและไม่มีเงาของต้นไม้ใหญ่ในบริเวณใกล้เคียง ทำการวัดอุณหภูมิทั้งภายในและภายนอกของอาคารตลอดเวลา 6 เดือน พบว่าอาคารที่ไม่มีเงามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและสูงกว่าอาคารที่มีเงาของต้นไม้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลงของ Papadakis, Tsamis et al. (2001) ที่กล่าวว่าบริเวณที่ไม่มีเงาของต้นไม้จะมีอุณหภูมิในตอนกลางวันสูงกว่าบริเวณที่มีเงา นอกจากนั้น Balogun ยังยังนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณหาความต้องการใช้พลังงานในการปรับอากาศภายในอาคารพบว่าในอาคารที่มีเงาของต้นใหญ่มีปริมาณความต้องการใช้พลังงานในการทำความเย็นลดลงประมาณ 40% (แผนภูมิที่ 2.5) โดยสามารถช่วยประหยัดค่าไฟฟ้าได้เป็นเงิน 218 ดอลล่าสหรัฐต่อหนึ่งเดือน

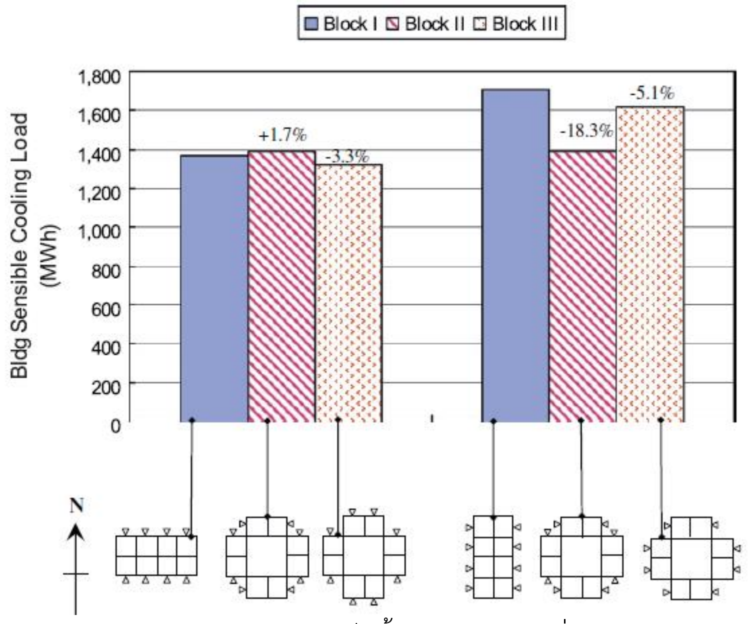


แผนภูมิที่ 2.5 ปริมาณใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารที่มีเงาของต้นไม้
(ที่มา: งานวิจัยของ Balogun, 2014)

2.2.3 การบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) คือ การบังแดดที่เกิดจากรูปทรงหรือผนังของอาคารที่มีส่วนยื่นออกหรือหดเข้าที่ทำให้เกิดเงาด้วยตัวเอง ตัวอย่างเช่น อาคารที่มีผังพื้นยื่นออกมา (ผังพื้นรูปตัว L, T, H) อาคารที่มีผนังเฉียงหรือเป็นขั้นบันไดที่มีลักษณะบานออกทางด้านบน (รูปที่ 2.9) หรืออาคารที่มีผนังช่องเปิดหดเข้าไปในตัวอาคาร ซึ่งสามารถช่วยลดความร้อนที่เข้ามาสู่ผนังอาคารจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

ภาพที่ 2.9 อาคารที่มีการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร (ที่มา : งานวิจัยของ I. Guedi Capeluto, 2013)

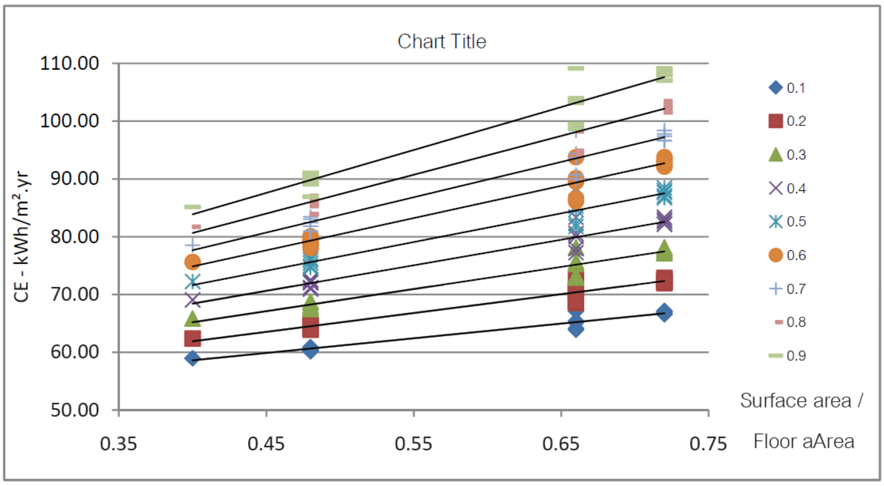
Capeluto (2003) ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (SustArc) จำลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานระหว่างอาคารเดิมที่มีแผงกันแดดทางตั้งและอาคารทางเลือกที่มีผนังบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร โดยใช้โปรแกรม Solar Collection Envelope (SCE) ในการช่วยออกแบบรูปทรงและผนังอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง พบว่าการบังแดดด้วยรูปทรงของอาคารช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอาคาร โดยอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเองมีค่าการใช้พลังงานต่อปีลดลงประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นมุมของแสงแดดและขนาดของช่องเปิดยังมีผลต่อแสงแดดและความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารด้วยเช่นกัน ต่อมาในการทดลองของ Chan (2012) ได้กล่าวว่าผลกระทบของเงาขึ้นอยู่กับการออกแบบผังพื้นอาคาร, รูปทรงของอาคารและการวางห้องพักในแต่ละชั้น โดยในอาคารที่มีผังพื้นยื่นออกมาทำมุมฉากกันจะก่อให้เกิดเงาบนผนังอีกฝั่งของด้านประชิดและจะมีผลต่ออุณหภูมิและอัตราการทำความเย็นของห้องพักอาศัยภายในอาคาร จากศึกษาโดยทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (EnergyPlus) เพื่อศึกษาอัตราการใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารพักอาศัยรวมในฮองกงซึ่งมีภูมิอากาศแบบกึ่งเขตร้อน ที่มีผังพื้นแตกต่างกัน 3 รูปแบบที่เป็นที่นิยม พบว่าทิศทางและรูปร่างของการวางผังพื้นอาคารที่ทำให้เกิดเงาจากมุมประชิดมีผลทำให้อัตราการทำความเย็นของห้องพักภายในอาคารลดลง โดยห้องพักของอาคารที่มีผังเป็นรูปเครื่องหมาย + มีอัตราการใช้พลังงานในการทำความเย็นเฉลี่ยลงลง 18.3 เปอร์เซ็น เมื่อเทียบกับห้องพักของอาคารที่มีผังพื้นรูปตัว I ดังแสดงในแผนภูมิที่ 2.6



แผนภูมิที่ 2.6 การใช้พลังงานในการทำความเย็นทั้งหมดของอาคารที่มีการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร

(ที่มา: งานวิจัยของ A.L.S. Chan, 2012)

ส่วนงานวิจัยของ วัชพล โฆษะโก (2554) ได้ศึกษาการบังแดดด้วยรูปทรงของอาคาร พบว่าอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเองบางประเภทมีค่าการใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากมีพื้นผิวของอาคารเพิ่มขึ้น (แผนภูมิที่ 2.7) ส่วนประเภทที่สามารถลดค่าการใช้พลังงานได้ดีที่สุดคืออาคารที่ใช้ส่วนทึบยื่นออกมากันแดดหรือการร่นกระจกเข้าไปในตัวอาคาร นอกจากนั้นยังพบว่าการคำนวณค่า OTTV ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง เนื่องจากการคำนวณค่า OTTV ตามกฎหมายยังไม่ครอบคลุมรูปแบบอาคารที่หลากหลาย ควรเพิ่มตัวแปรการคำนวณที่เกี่ยวกับลักษณะผิวของผนังทึบด้านการบังแดดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น



แผนภูมิที่ 2.7 เปรียบเทียบอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อพื้นที่อาคารต่อการใช้พลังงานการทำความเย็นในอาคาร
(ที่มา: งานวิจัยของ วัชพล (2011))

แม้จะมีบางงานวิจัยชี้ว่าการบังแดดด้วยตัวเองมีข้อเสียบางประการ เช่น วัชพล (2011) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร กล่าวว่าอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเองบางประเภทมีค่าการใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากมีพื้นผิวของอาคารเพิ่มขึ้น หรือในงานวิจัยของ Chan (2012) ที่แสดงให้เห็นว่าการบังแดดด้วยรูปทรงอาคารไม่ได้ส่งผลดีที่สุดในทุกกรณี (แผนภูมิที่ 2.6)

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารด้วยการบังแดดให้กับผนังอาคาร สามารถสรุปโดยแบ่งเป็นเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

1. ประสิทธิภาพด้านความร้อน พบว่าการบังแดดให้อาคารในทุกรูปแบบให้ผลที่สอดคล้องกัน คือ ช่วยลดอุณหภูมิทั้งที่ผิวผนังและอุณหภูมิอากาศภายในอาคาร ซึ่งจะทำให้อัตราการใช้พลังงานในอาคารลดลงด้วย

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อน พบว่าปริมาณเงาและช่วงเวลาที่เกิดเงามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังอาคาร ผนังที่มีปริมาณเงามากและเกิดเงานานจะช่วยป้องกันความร้อนได้ดี นอกจากนั้นทิศทางการวางผังอาคารและองศาแดดยังส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนเช่นเดียวกัน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย จะแบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆ ได้แก่ การเก็บข้อมูลในสถานที่จริงและการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือใช้ควบคู่กัน ข้อดีของการเก็บข้อมูลในสถานที่จริง คือ จะได้ขข้อมูลที่มีความถูกต้องเป็นไปตามสภาพอากาศจริง ส่วนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำให้สามารถคาดการณ์ผลที่เกิดขึ้นในระยะยาวได้

4. ข้อเสียของการบังแดดด้วยตัวเอง ในรูปแบบของการบังแดดด้วยรูปทรงอาคารจะพบว่าบางกรณีค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคารจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวของอาคารที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นตัวแปรที่ไม่ครอบคลุมรูปแบบอาคารชนิดนี้ยังส่งผลให้การคำนวณค่า OTTV มีความคาดเคลื่อน

แม้จะมีงานวิจัยที่แสดงเห็นถึงข้อเสียของการบังแดดด้วยตัวเองในบางกรณี เช่น งานวิจัยที่ศึกษาการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร แต่ในงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาการบังแดดให้ผนังที่เกิดจากพื้นผิวผนัง ซึ่งปริมาณพื้นผิวที่เพิ่มขึ้นจะมีผลค่อนข้างน้อย จึงคาดว่าจะได้ผลการทดลองที่มีความแตกต่างจากการศึกษาด้วยรูปทรงอาคาร ส่วนการคำนวณค่า OTTV ที่ยังไม่ครอบคลุมอาคารหรือผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง ในการวิจัยชิ้นนี้จึงจะเสนอแนวทางการหาค่า U-value สำหรับผนังชนิดนี้เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่า OTTV ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และจากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมยังพบว่ามีงานวิจัยอีกหลายชิ้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของการบังแดดด้วยตัวเองที่ช่วยลดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารลงได้ โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นปริมาณเงาบนผนัง ช่วงเวลาที่เกิดเงาหรือหลักการในการออกแบบทั้งการวางทิศทางของอาคาร การคำนวณองศาของแสงแดดรวมไปถึงการนำไปใช้งานที่เหมาะสมกับอาคารประเภทต่างๆ นอกจากนั้นหลักการบังแดดด้วยตัวเองยังมีข้อดีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผนังอิฐโดยการเรียงอิฐด้วยวิธียื่นออกหรือหดเข้าเพื่อให้เกิดเงาบนผนัง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์บังแดดรูปแบบอื่นๆ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) กำหนดให้มีการสร้างกล่องทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาตั้งสมมติฐานของการวิจัยและทำการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการออกแบบทางเลือกผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองรูปแบบต่างๆ โดยทำการเก็บข้อมูลในสถานที่จริงด้วยกล่องทดลองและนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า U-value เพื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองการใช้พลังงานในอาคารตลอดหนึ่งปีด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 นอกจากนั้นยังสามารถนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเสนอแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงการคำนวณค่า OTTV สำหรับผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

3.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เน้นศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคาร โดยจะเน้นศึกษางานวิจัยที่มุ่งลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารด้วยการบังแดดให้ผนัง ทั้งการบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดด (Shading Devices) การใช้พืชช่วยในการบังแดด (Tree-Shaded) และการบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) จากการศึกษาพบว่าการบังแดดให้ผนังหรืออาคารสามารถลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคารได้ดี โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณเงาที่ตกลงบนผนัง ลักษณะของการบังแดดหรือมุมตกกระทบของแดด เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่จะนำไปใช้ในการตั้งสมมติฐานการทดลองต่อไป

3.2 การตั้งสมมติฐานการวิจัย

1. ประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเงาบนผนังอิฐ โดยผนังที่มีสัดส่วนของเงาบนผนังมากจะสามารถป้องกันความร้อนได้ดี

2. ผนังอิฐที่มีสัดส่วนของเงาบนผนังเท่ากัน รูปแบบการเรียงอิฐที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐ

3. ค่า U_{eff} จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและองศาแดดที่เปลี่ยนไป โดยผนังที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมากและองศาแดดมากจะมีค่า U_{eff} ต่ำที่สุด

3.3 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ออกแบบทางเลือก

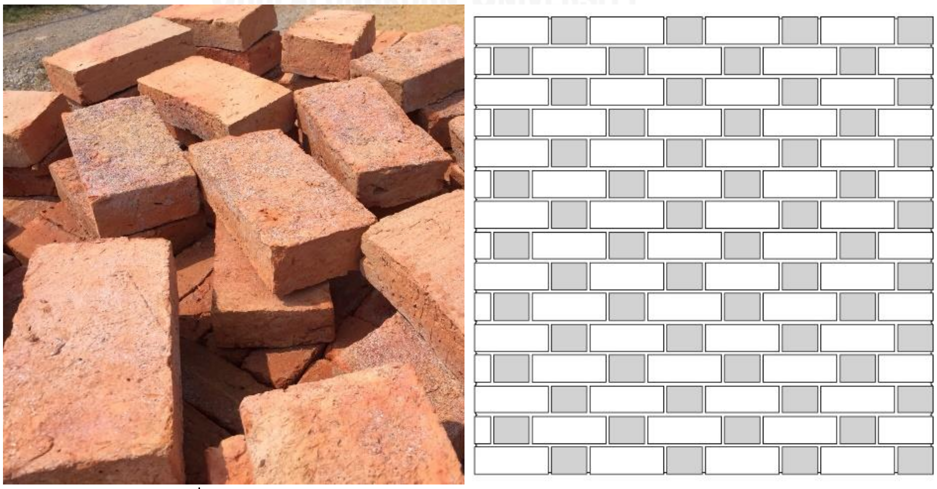
ตารางที่ 3.1 การกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ออกแบบทางเลือก

ตัวแปรต้น	- สัดส่วนของอิฐที่ยื่นออกจากผนัง (Extrusion Percentage) - รูปแบบการเรียงอิฐที่แตกต่างกันที่สัดส่วนของอิฐที่ยื่นเท่ากัน (การยื่นอิฐสลับ, การยื่นอิฐแนวนอนและการยื่นอิฐแนวตั้ง)
ตัวแปรตาม	- อุณหภูมิ - ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ตัวแปรควบคุม	- ชนิดของอิฐ - ชนิดของปูนก่อ - ความหนาของปูนก่อ

3.4 การออกแบบทางเลือก

ออกแบบทางเลือกให้เกิดเป็นผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองโดยใช้รูปแบบการเรียงอิฐ ให้ได้ผนังอิฐขนาด 70× 90 เซนติเมตร ด้วยอิฐมอญต้นที่มีขนาด 14 × 6 × 3 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.1 ซ้าย) นำมาเรียงให้เกิดเป็นผนังที่มีการยื่นของก้อนอิฐโดยอ้างอิงจากการก่อแบบ Flemish Bond (ภาพที่ 3.1 ขวา) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและสามารถประยุกต์ใช้กับการออกแบบทางเลือกได้ง่ายโดยไม่เหลือเศษอิฐ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 3.1 อิฐมอญต้น (ซ้าย) การเรียงอิฐแบบ Flemish Bond (ขวา)

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของอิฐมอญ ที่มา): http://ienergyguru.com(

รูปแบบกายภาพ	หน่วย
ราคาต่อหน่วย (บาท)	0.60
ราคารวมต่อตร.ม (บาท).	100 - 190
ค่าวัสดุ+ค่าแรง / ตรม. (บาท)	425 - 440
ขนาด (Volume) ($cm.^3$)	7x16x3.5
ความหนาแน่น ($kg./m^3$)	1615 - 1650
จำนวนก้อนต่อตร.ม. (ก้อน,แผ่น)	145
น้ำหนักต่อตร.ม. ($kg./m^2$)	130
น้ำหนักรวมปูนฉาบต่อตร.ม. ($kg./m^2$)	200
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม "Q" (Thermal Transfer) ($Watt/m^2$)	30-45
ค่าการนำความร้อน "K" (Conductivity – K value) (W/m.K)	0.473
ค่าการต้านทานความร้อน "R" (Resistivity – R value) (m^2K/W)	0.15
ค่าความจุความร้อน "C" (Thermal Capacity) (J/kg.K)	800-1000
ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Thermal Expansion /°C)	4.6×10^{-6}
	-
การหดตัวเมื่อแห้ง	1.8
การต้านทานแรงอัด ($kg./cm^2$)	35 $kg./cm^2$

ความแข็งแรงทางกล ($kg./cm^2$)	-
การกันเสียง (dB)	36-40
การทนไฟ (ชั่วโมง)	0.5 - 2
การปลอดกลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ความต้านทานแมลง เชื้อรา และความปลอดภัยต่อธรรมชาติ	-
อัตราการซึมน้ำ (%)	30-40%
การยืดหดตัวของวัสดุ (มม./ม.)	+ 0.18
จำนวนผู้ผลิต	มาก
ปริมาณการผลิตเทียบกับความต้องการ	เพียงพอ
ขั้นตอนการก่อสร้าง	ง่าย
การบำรุงรักษา	ง่าย
อายุใช้งาน	มากกว่า 50 ปี
ข้อดี	
- เป็นที่ยอมรับทั่วไป	- ช่างชำนาญ
- แข็งแรง,ทน	- ราคาถูก
- มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อน	
- หาซื้อง่าย	-ไม่เป็นพิษ
ข้อเสีย	
- คุณภาพและขนาดไม่แน่นอน	
- ใช้เวลานานในการก่อสร้าง	- เสียหายขณะขนส่ง
- น้ำหนักมาก	- ขาดแคลนช่วงฤดูฝน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากสมมติฐานการวิจัยที่กล่าวว่าสัดส่วนของอิฐที่ยื่นออกจากผนังและรูปแบบการเรียงอิฐที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐ ทำให้สามารถแบ่งการทดลองได้เป็นสองกรณีดังนี้

กรณีที่ 1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐแตกต่างกัน โดยสัดส่วนการยื่น (Extrusion Percentage: E.P.) จะได้มาจากจำนวนของอิฐก้อนที่ยื่นส่วนด้วยจำนวนอิฐทั้งหมดที่ใช้ในผนัง โดยจะขึ้นอยู่กับความถี่ของอิฐในแนวดิ่งที่จะเพิ่มขึ้นในแต่ละทางเลือกโดยจะมีผนังทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้แก่ ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0% (Basecase), 15%, 20%, 25% และ 45% แต่เนื่องจากกล่องทดลองมีจำนวนน้อยกว่าผนังที่ต้องการทดสอบ ดังนั้นในกรณีนี้การทดลองจึงต้องแบ่งออกเป็นสองชุด โดยในแต่ละชุดจะมีผนังอิฐธรรมดา (Basecase) เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ

การทดลองชุดที่ 1.1 - ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0% (Basecase)
- ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 15%
- ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 25%

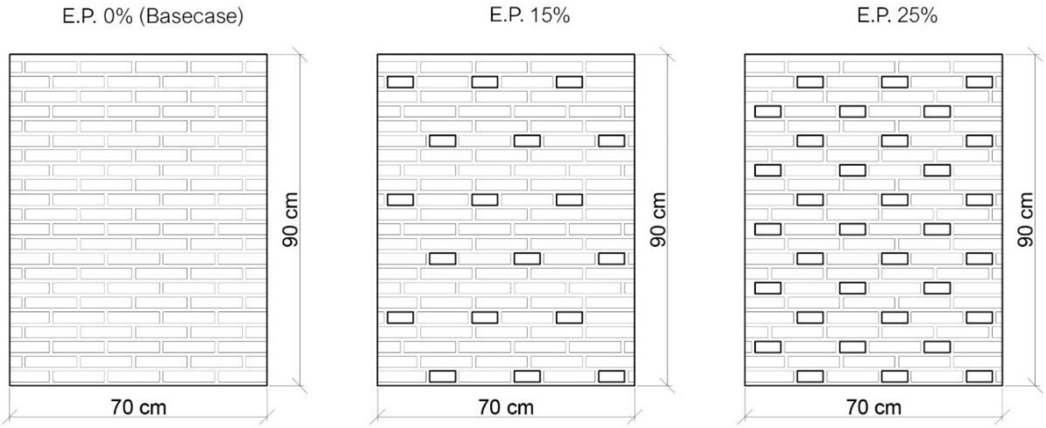
การทดลองชุดที่ 1.2 - ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0% (Basecase)
- ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 20%
- ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 45%

กรณีที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐเท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน

การทดลองชุดที่ 2 - ผนังที่มีการยื่นอิฐแบบสลับ (E.P. 25% Normal)
- ผนังที่มีการยื่นอิฐทางนอน (E.P. 25% Horizon)
- ผนังที่มีการยื่นอิฐทางตั้ง (E.P. 25% Vertical)

<u>การทดลองชุดที่ 1.1</u> เปรียบเทียบผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0% , 15% และ 25%

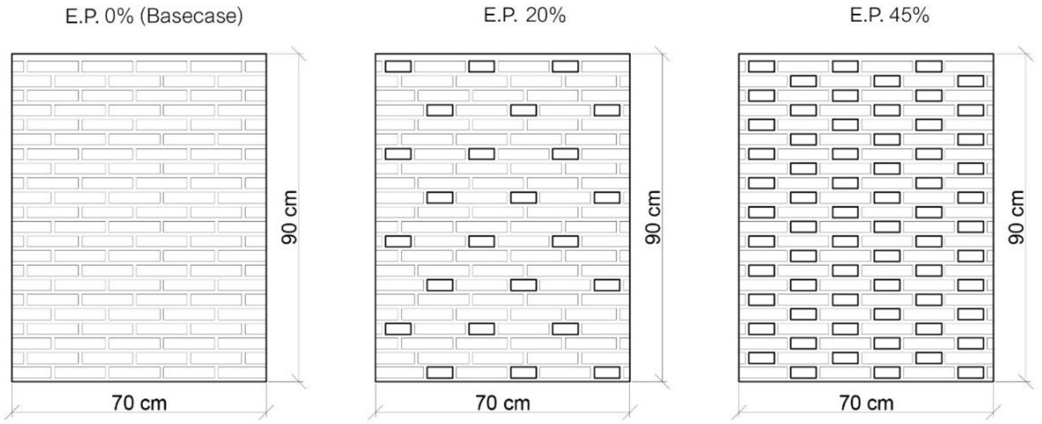
ภาพที่ 3.2 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่น 0%, 15% และ 25% ของการทดลองชุดที่ 1.1



ภาพที่ 3.3 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 1.1

<u>การทดลองชุดที่ 1.2</u> เปรียบเทียบผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0%, 20% และ 45%

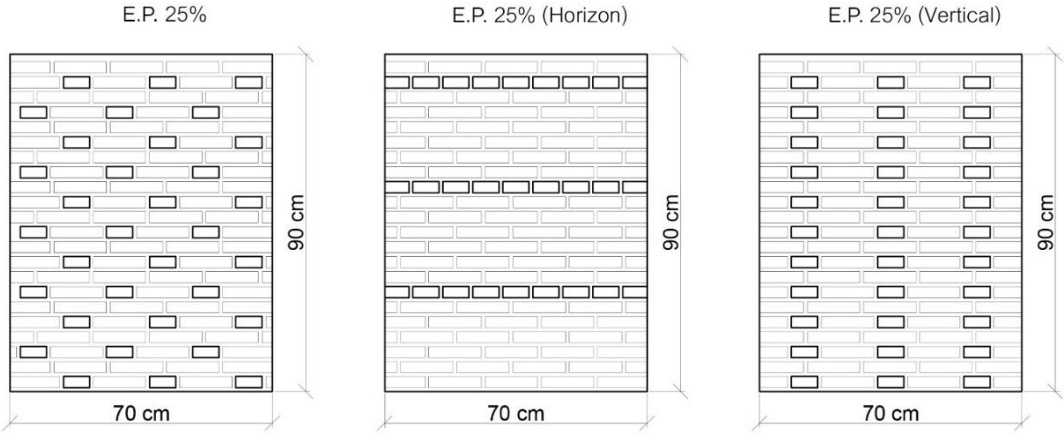
ภาพที่ 3.4 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่น 0%, 20% และ 45% ของการทดลองชุดที่ 1.2



ภาพที่ 3.5 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 1.2

<u>การทดลองชุดที่ 2</u> เปรียบเทียบผนังที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage) เท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน ได้แก่ ผนังที่มีการยื่นอิฐแบบสลับ (E.P. 25% Normal), ผนังที่มีการยื่นอิฐทางนอน (E.P. 25% Horizon) และผนังที่มีการยื่นอิฐทางตั้ง (E.P. 25% Vertical)

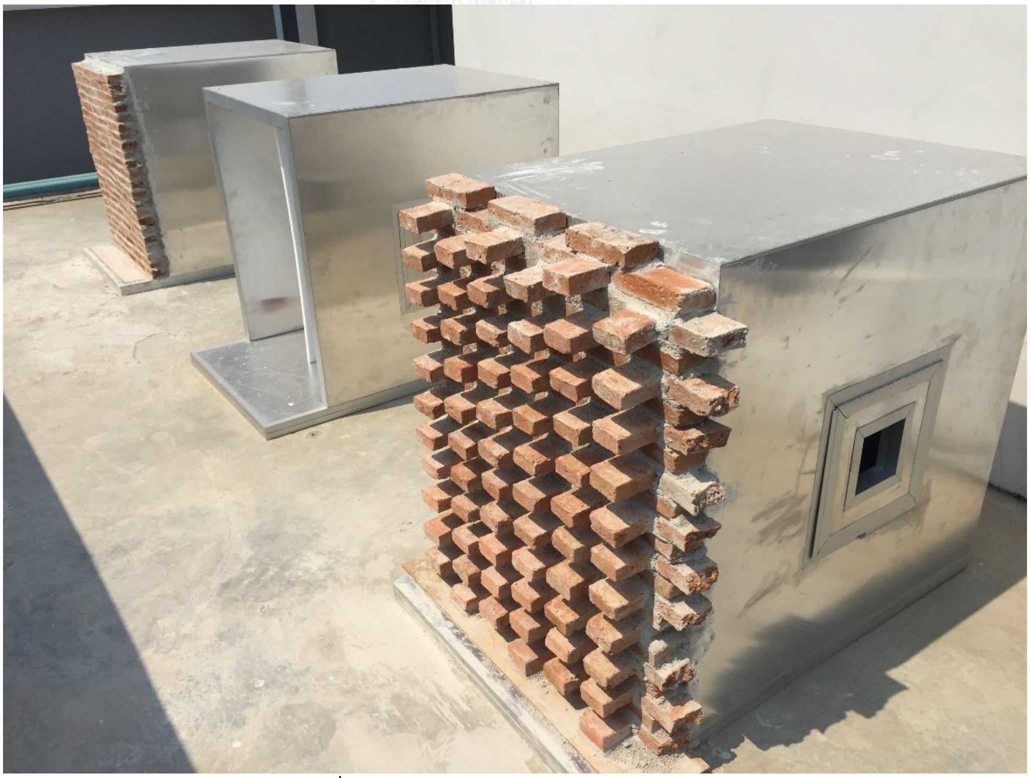
ภาพที่ 3.6 ผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นเท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 2



ภาพที่ 3.7 ผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐเท่ากัน แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกันของการทดลองชุดที่ 2

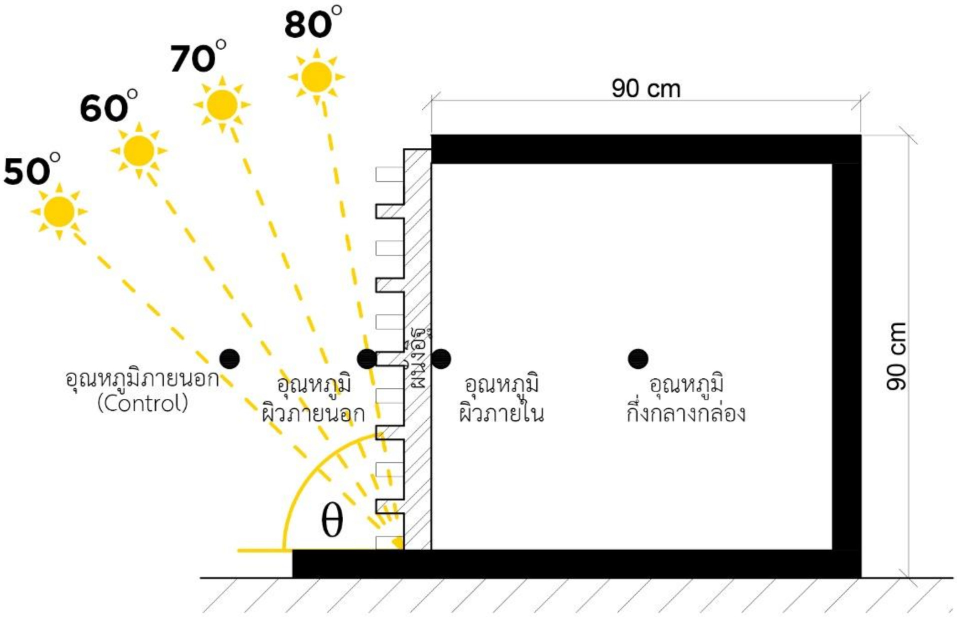
3.5 การทดลองด้วยกล่องทดลอง

การวิจัยนี้ทำการศึกษาด้วยการเก็บข้อมูลจากกล่องทดลองที่นำไปวางในสถานที่จริงในกรุงเทพมหานคร กล่องทดลองที่ใช้มีขนาด 70 × 90 × 90 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.8) จำนวน 3 กล่อง แต่ละกล่องมีลักษณะเป็นกล่องอลูมิเนียมปิดทึบบุด้วยโฟมหนา 3.5 นิ้ว โดยมีด้านหนึ่งเป็นผนังอิฐที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพด้านความร้อน ทั้งสามกล่องจะถูกวางไว้บนดาดฟ้าของอาคารและหันด้านที่เป็นผนังอิฐไปทางทิศใต้เพื่อให้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ (ภาพที่ 3.9) เนื่องจากผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเป็นผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ตกลงบนผนังตลอดเวลาในแบบ Dynamic Facade ซึ่งในที่นี้หมายถึงผนังอิฐที่อยู่นิ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อยๆ ในแต่ละวันหรือแต่ละเดือน แต่ในการวิจัยนี้มีเวลาในการเก็บข้อมูลเพียงช่วงสั้นๆ ดังนั้นการเก็บข้อมูลในหนึ่งการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลในเวลากลางวันทั้งหมด 4 วัน แต่ละวันจะทำการเอียงกล่องทดลองให้ด้านผนังอิฐได้รับแดดที่มุมตกกระทบแตกต่างกันที่องศาแดด 50° ในเดือนธันวาคมและมกราคม องศาแดด 60° ในเดือนกุมภาพันธ์พฤศจิกายน องศาแดด 70° ในเดือนมีนาคมและตุลาคม และองศาแดด 80° ในเดือนเมษายนและกันยายน เพื่อจำลองมุมที่มีการแผ่รังสีอาทิตย์ในหนึ่งปี (ภาพที่ 3.10)



ภาพที่ 3.8 ลักษณะกล่องทดลองอลูมิเนียมบุโฟม

ภาพที่ 3.9 การทดลองด้วยกล่องทดลองบนดาดฟ้าอาคาร



ภาพที่ 3.10 รูปตัดกล่องทดลองแสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

<u>เครื่องมือวัดอุณหภูมิ</u> ในการทดลองนี้ทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 Chanel (ภาพที่ 3.11) และสายเซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิ 12 สาย สามารถวัดอุณหภูมิพร้อมๆ กันได้ 12 จุด ซึ่งทำการติดตั้งโดยนำปลายสายเซ็นเซอร์ไปแตะกับผิวของผนังที่ต้องการวัดและทำการปิดด้วยก้อนโฟมเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิจากอากาศภายนอกมารบกวน เก็บค่าอุณหภูมิทุก 5 นาที ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

- อุณหภูมิภายนอกกล่องทดลอง (Control)
- อุณหภูมิผิวภายนอกของผนังอิฐ
- อุณหภูมิผิวภายในของผนังอิฐ
- อุณหภูมิภายในบริเวณกึ่งกลางกล่องทดลอง

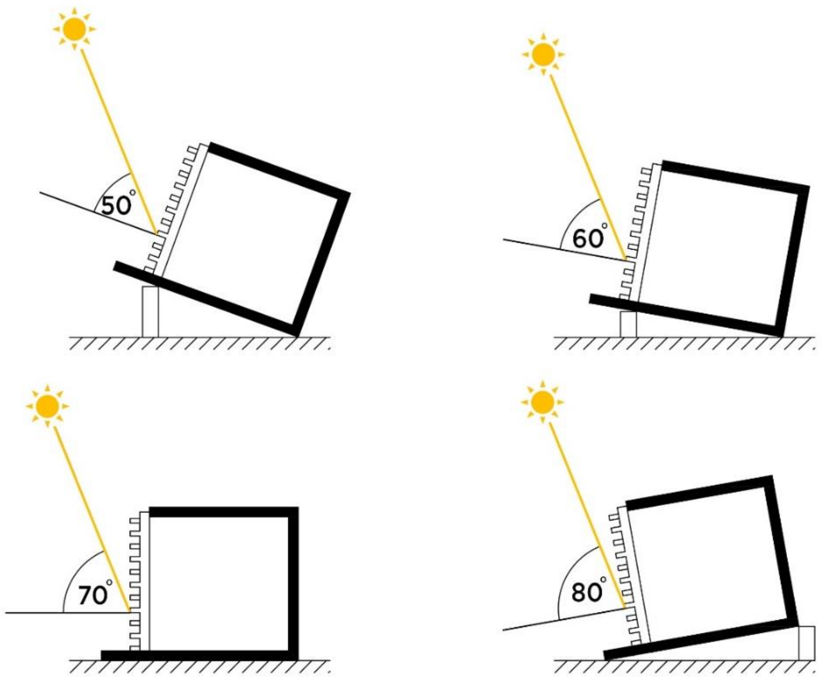
ภาพที่ 3.11 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (12 Chanel) และวิธีการติดตั้ง

<u>เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์</u> เครื่อง Solar Power Radiation ใช้ในการวัดค่าการแผ่รังสีอาทิตย์เพื่อใช้อ้างอิงกับอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละวัน ติดตั้งโดยนำตัวเซ็นเซอร์วางในตำแหน่งที่อยู่ในระนาบเดียวกันกับผนังอิฐเพื่อวัดค่ารังสีที่ตกกระทบในมุมเดียวกันกับผนังอิฐที่ทำการทดสอบ (ภาพที่ 3.12)

ภาพที่ 3.12 เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ (Solar Power Radiation) และวิธีการติดตั้ง

3.7 การคำนวนค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U-value

เนื่องจากผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเป็นผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในรูปแบบของ Dynamic Facade ในผนังรูปแบบหนึ่งๆ จึงมีค่า U-value หลายค่าขึ้นอยู่กับปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามองศาแดดที่ทำมุมแตกต่างกันในแต่ละเดือน ดังนั้นในการทดลองหนึ่งชุดจึงได้ทำการเก็บผลและวัดค่าอุณหภูมิเป็นเวลาทั้งหมด 4 วัน ที่องศาแดดแตกต่าง เพื่อจำลองวันที่ดวงอาทิตย์อ้อมใต้มากที่สุดไปยังน้อยที่สุด ที่มุม 50°, 60°, 70° และ 80° ตามลำดับ (ภาพที่ 3.13) และนำค่าที่ได้ในแต่ละวันมาคำนวณหาค่า U-value ของแต่ละองศาแดด จากสมการ $Q = U A (t_o - t_i)$ โดยในการวิจัยนี้จะกำหนดให้ผนังทุกทางเลือกมีค่าการถ่ายเทความร้อนและพื้นที่ผนังเท่ากัน จากนั้นนำค่า U-value ที่คำนวณได้ในหนึ่งวันมาเขียนกราฟเทียบกับเวลาโดยจะเลือกใช้กราฟช่วงที่นิ่งที่สุดของวันมาเฉลี่ยหาได้ค่า U-value ของแต่ละวัน โดยค่าที่คำนวณได้จะเป็นค่า U-value เทียบเท่า ซึ่งกำหนดให้เรียกว่า U_{eff}

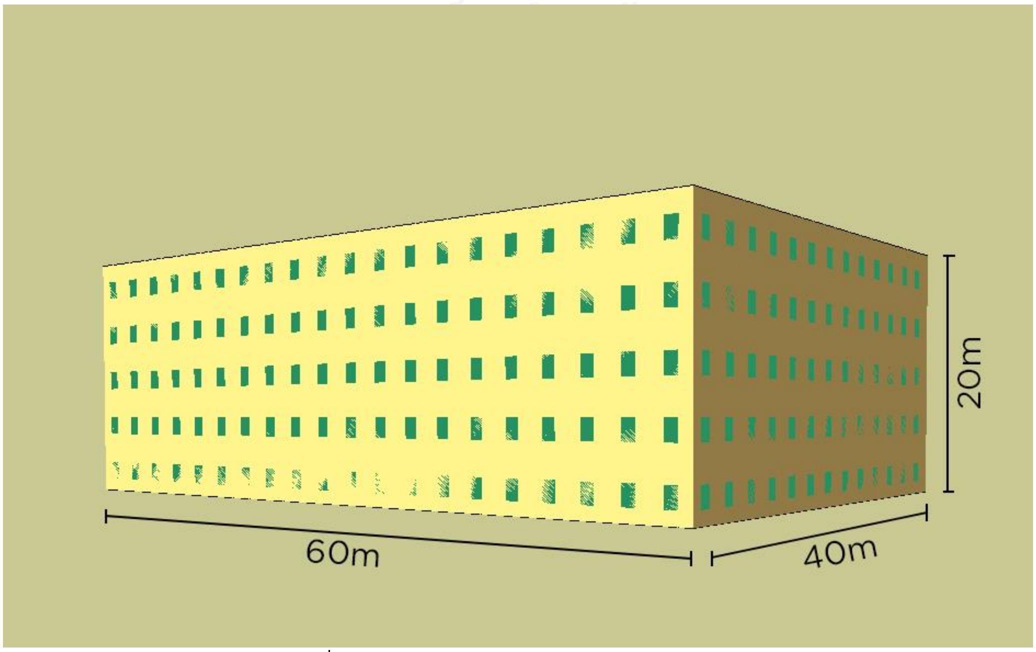


ภาพที่ 3.13 การเก็บข้อมูลด้วยกล่องทดลองที่องศาแดดต่างๆ

3.8 การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0

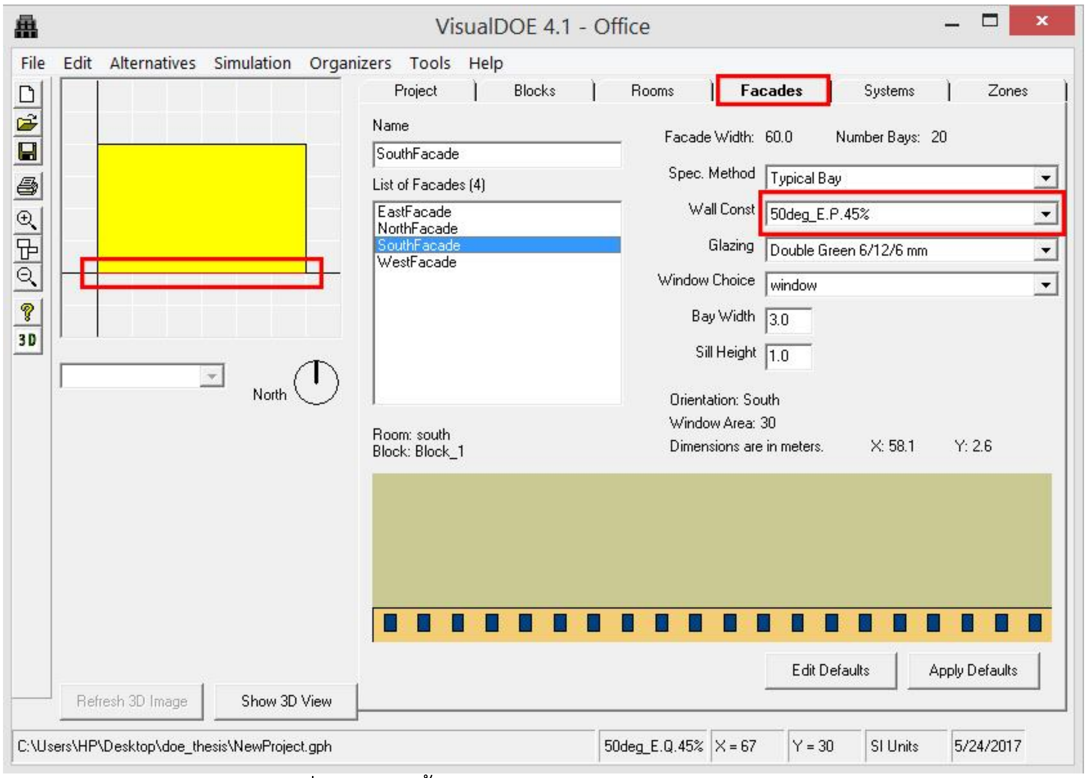
การวิจัยนี้ทำการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 โดยจะศึกษากับอาคารกรณีตัวอย่างที่สามารถประยุกต์ใช้ผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองและจะต้องเป็นอาคารที่มีการใช้งานในเวลากลางวัน เนื่องจากประสิทธิภาพของผนังชนิดจะขึ้นอยู่กับแดดและเงาเป็นหลัก

อาคารที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษาในการวิจัยชิ้นนี้คืออาคารสำนักงานขนาดกลาง ลักษณะโดยทั่วไปของอาคารกรณีศึกษาในการวิจัยนี้อ้างอิงมาจากการสำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างเกี่ยวกับรายละเอียดการออกแบบอาคารสำนักงานทั่วไป (Typical Office Building) ในงานวิจัยของสวิชญา (2009) โดยจะทำการตั้งค่าอาคารให้มีลักษณะเหมือนกันดังนี้ (ภาพที่ 3.14) อาคารสำนักงานขนาดกลาง 5 ชั้น พื้นที่ทั้งหมด 12,000 ตารางเมตร มีผังอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 40 เมตร ยาว 60 เมตร สูง 20 เมตร มีความสูงจากพื้นชั้นล่างถึงพื้นชั้นถัดไป (Floor to Floor) 4 เมตร เป็นอาคารโครงสร้างคอนกรีต หลังคาเป็นคอนกรีต (Concrete Slap) หนา 10 เซนติเมตร บุฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว โดยกำหนดให้มีสัดส่วนพื้นที่ใช้งานต่อคน (Occupant Density) เป็น 25 ตารางเมตรต่อผู้ใช้งาน 1 คน ค่าการใช้ไฟฟ้าแสงสว่างเป็น 12 W/m^2 ไฟฟ้ากำลังเป็น 20 W/m^2 ระบบทำความเย็นใช้เป็น Smart HVAC ทั้งหมด กรอบอาคารจะกำหนดให้ทุกด้านมีสัดส่วนผนังทึบและช่องเปิดเป็น 70 : 30 โดยผนังทึบจะเป็นผนังก่ออิฐฉาบปูนครึ่งแผ่น ส่วนช่องเปิดจะเป็นกระจกสีเขียวตัดแสงสองชั้น หนา 6 มิลลิเมตร 2แผ่นประกอบกันโดยเว้นช่องสูญญากาศตรงกลางหนา 12 มิลลิเมตร

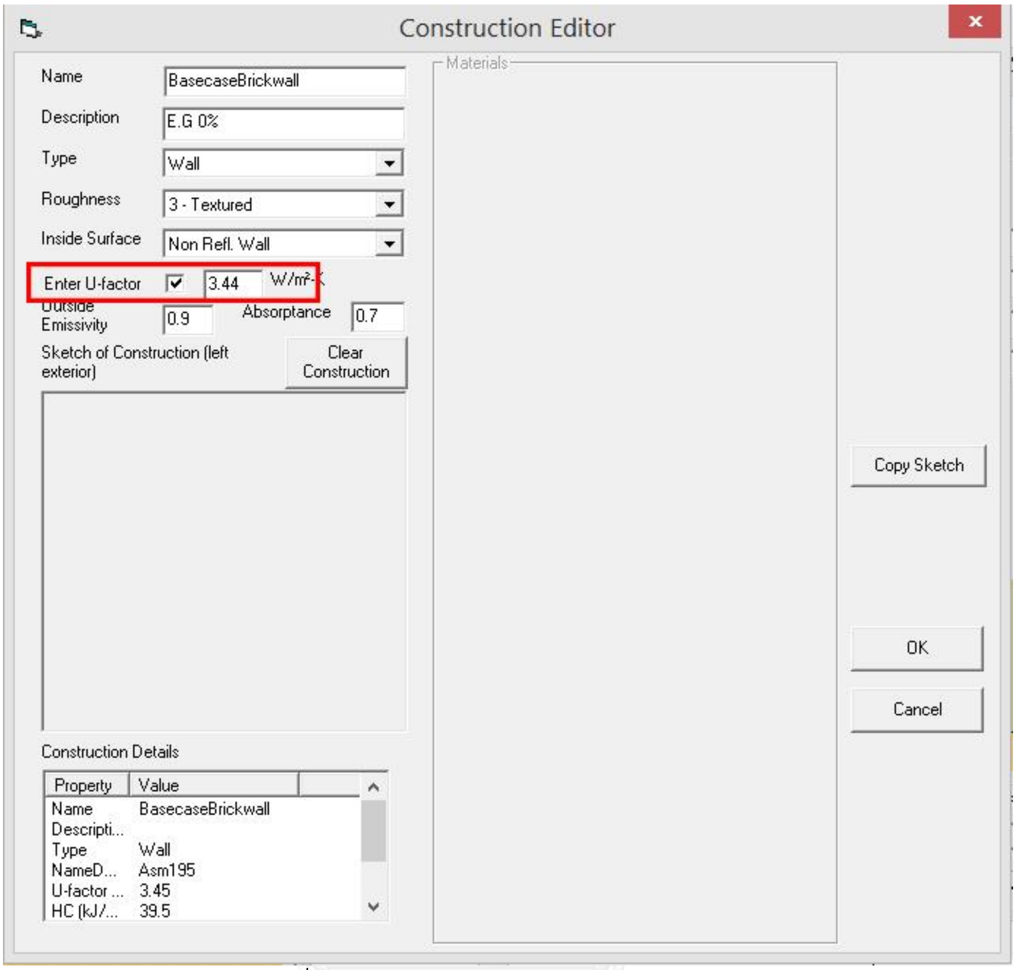


ภาพที่ 3.14 กรณีศึกษาอาคารสำนักงานขนาดกลาง

ในผนังทางทิศใต้ซึ่งเป็นด้านที่ต้องการทดสอบจะทำการแทนค่า U_{eff} ที่ได้จากการคำนวณจากผนังอิฐที่มีการบังแดดทุกรูปแบบที่องศาแดดต่างๆ โดยทำการตั้งค่าที่กรอบอาคาร (Façade) จากนั้นเลือกชนิดผนัง (Wall Construction) (ภาพที่ 3.15) ที่ได้ทำการใส่ค่า U_{eff} ไว้แล้วตามชนิดของผนังและองศาแดดในแต่ละเดือน (ภาพที่ 3.16) เพื่อให้โปรแกรมจำลองการใช้พลังงานโดยแยกเป็นผลของแต่ละเดือนและนำผลที่ได้มารวมกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารในหนึ่งปี โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีผนังก่ออิฐไม่ฉาบปูน (Basecase) และผนังก่ออิฐฉาบปูนครึ่งแผ่น (Typical Wall) โดยจะเว้นผลในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคมซึ่งเป็นช่วงที่ผลการทดลองไม่ครอบคลุมเนื่องจากเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลกและอ้อมเหนือ



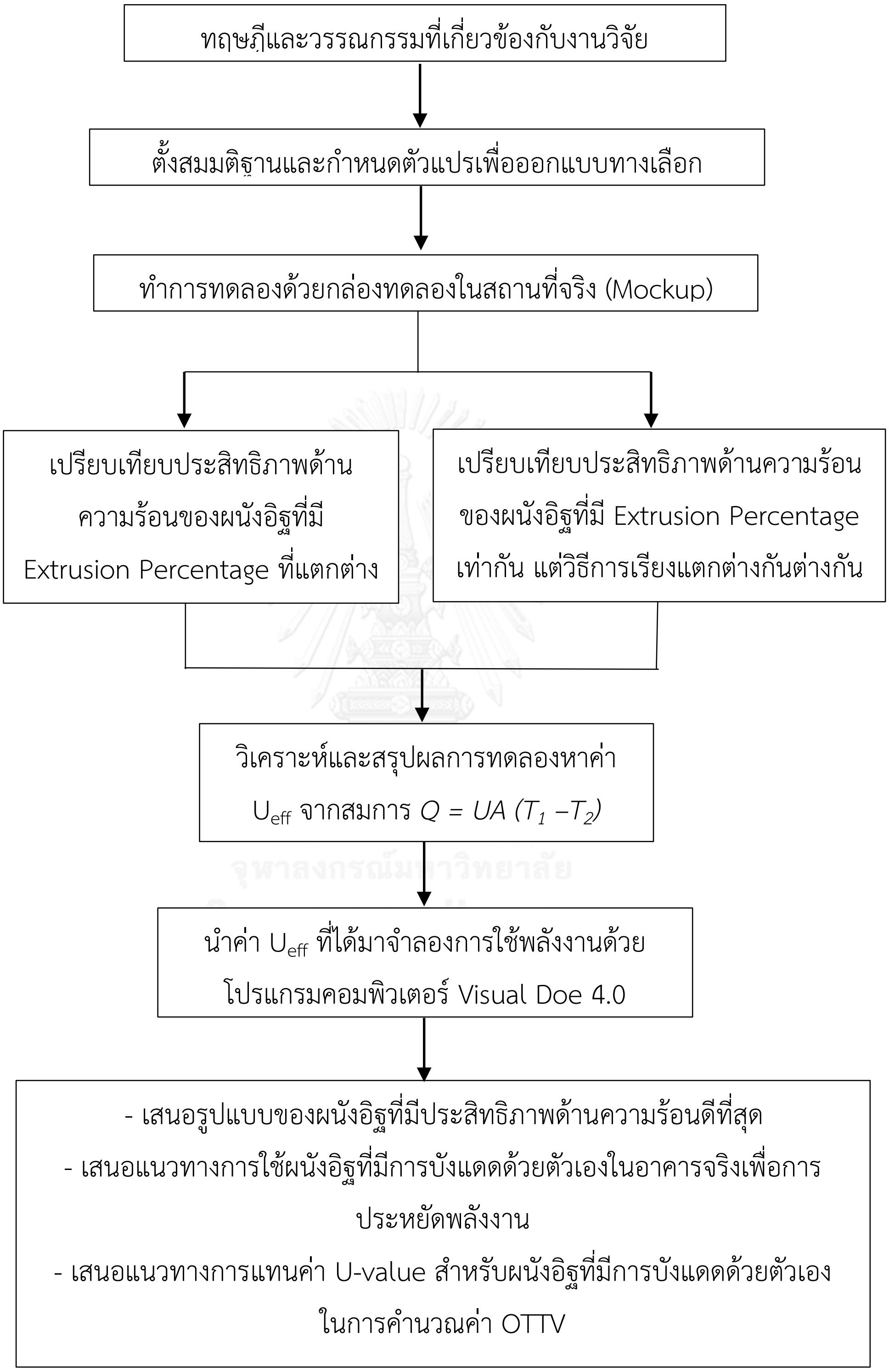
ภาพที่ 3.15 การตั้งค่าชนิดผนังในโปรแกรม VisualDOE 4.0



ภาพที่ 3.16 การแทนค่า U_{eff} ของผนังอิฐรูปแบบต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้ทำการเก็บผลค่าอุณหภูมิและค่าการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวัน ตั้งแต่เวลา 07.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. การเก็บข้อมูลใช้เวลาทั้งหมด 12 วัน แบ่งเป็น 3 การทดลองๆ ละ 4 วัน โดยแต่ละวันโดยทำการเอียงกล่องทดลองให้ด้านผนังอิฐได้รับแดดที่มุมตกกระทบแตกต่างกันที่องศาแดด 50°, 60°, 70° และ 80° เพื่อจำลองการแผ่รังสีอาทิตย์ที่มุมต่างๆ ในเดือนต่างๆ ตลอดหนึ่งปี

4.1 อุณหภูมิอากาศภายนอกและค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้ในช่วงที่มีการทดลอง (Control)

เพื่อให้สามารถนำผลของการทดลองแต่ละวันมาเปรียบเทียบกันได้ การวิจัยนี้จึงได้ทำการวัดอุณหภูมิภายนอกและค่ารังสีอาทิตย์ของแต่ละวันเพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ โดยทำการเก็บข้อมูลที่เวลา 07.00 น. ถึงเวลา 18.00 น. ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยค่อนข้างสูงในรอบปีนอกจากนั้นยังเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์อ้อมใต้จึงเป็นช่วงเวลาเหมาะสมแก่การเก็บข้อมูลมากที่สุด จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกของทั้งสามวันมีค่าใกล้เคียงกัน ในการทดลองชุดที่ 1.1 อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายนอกกล่องทดลองสูงสุดอยู่ที่วันที่ 1 (องศาแดด 50°) เท่ากับ 37.4 °C ค่ารังสีอาทิตย์วัดได้คือ 620.8 W/m^2, โดยอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยสูงสุดของวัน คือ 45.0 °C ส่วนในการทดลองชุดที่ 1.2 พบว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายนอกกล่องทดลองสูงสุดอยู่ที่วันที่ 8 (องศาแดด 80°) เท่ากับ 38.7 °C โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด คือ 46.1 °C ส่วนค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ในวันที่ 5 (องศาแดด 50°) เท่ากับ 758.4 W/m^2 สุดท้ายในการทดลองชุดที่ 2 พบว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ยสูงสุดอยู่ในวันที่ 9 (องศาแดด 60°) เท่ากับ 37.9 °C โดยอุณหภูมิอากาศภายนอกกล่องสูงสุดที่วัดได้ คือ 44.1 °C ค่ารังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยที่วัดได้คือ 454.2 W/m^2

ตารางที่ 4.1 ค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยภายนอกกล่องและค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยในแต่ละวัน

	อุณหภูมิเฉลี่ย ($^\circ C$)	ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2)
การทดลองชุดที่ 1.1 เปรียบเทียบผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0%, 15%, 25%		
วันที่ 1 (องศาแดด 50°)	37.4	620.8
วันที่ 2 (องศาแดด 60°)	35.7	452.2
วันที่ 3 (องศาแดด 70°)	37.3	585.3
วันที่ 4 (องศาแดด 80°)	35.4	393.2
การทดลองชุดที่ 1.2 เปรียบเทียบผนังที่มีสัดส่วนการยื่นอิฐ 0%, 20%, 45%		
วันที่ 5 (องศาแดด 50°)	38.3	758.4
วันที่ 6 (องศาแดด 60°)	37.6	692.3
วันที่ 7 (องศาแดด 70°)	37.6	558.9
วันที่ 8 (องศาแดด 80°)	38.7	469.0
การทดลองชุดที่ 2 เปรียบเทียบผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นเท่ากัน แต่วิธีการเรียงแตกต่างกัน		
วันที่ 9 (องศาแดด 60°)	37.9	454.2
วันที่ 10 (องศาแดด 70°)	36.6	399.0
วันที่ 11 (องศาแดด 80°)	37.1	425.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 กรณีที่ 1 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) แตกต่างกัน

กรณีนี้จะแบ่งการทดลองเป็นสองชุด โดยในการทดลองแต่ละชุดจะมี Basecase เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบผลการทดลอง ดังนี้

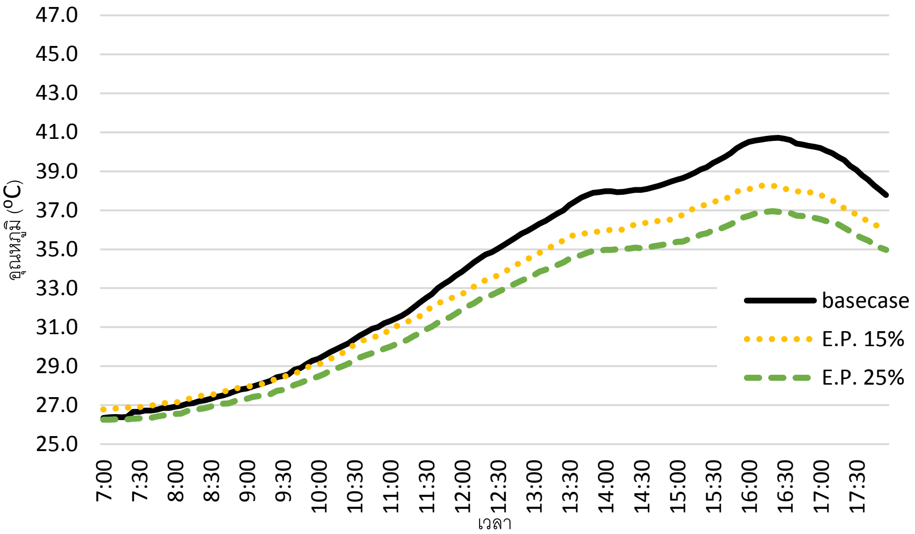
4.2.1 การทดลองชุดที่ 1.1 ได้แก่ผนัง E.P. 0% (Basecase), E.P. 15% และ E.P. 25%

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.1

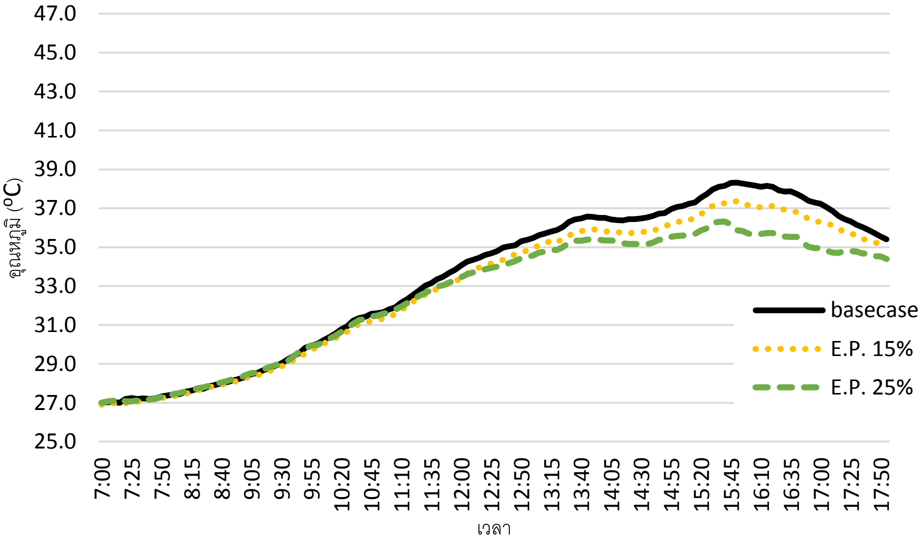
	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายใน (°C)			อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางกล่อง (°C)		
	Basecase	E.P. 15%	E.P. 25%	Basecase	E.P. 15%	E.P. 25%
วันที่ 1 (องศาแดด 50°)	36.9	34.8	35.2	35.6	35.1	34.5
วันที่ 2 (องศาแดด 60°)	31.3	31.2	28.0	31.7	31.1	30.7
วันที่ 3 (องศาแดด 70°)	35.8	34.9	34.3	34.6	34.2	33.9
วันที่ 4 (องศาแดด 80°)	32.1	30.8	30.5	31.6	30.8	30.7
เฉลี่ย 4 วัน	34.0	32.9	32.0	33.4	32.8	32.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.2 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.1 พบว่าผนัง Basecase จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 15% และ 25% ตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ผิวคือผนัง Basecase วัดได้ 36.9 °C ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดที่ผิวในคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 25% วัดได้ 28.0 °C ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดบริเวณกึ่งกลางกล่องคือผนัง Basecase วัดได้ 35.6 °C ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดบริเวณกึ่งกลางกล่องคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 25% วัดได้ 30.7 °C และเมื่อนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้ง 4 วันของการทดลองชุดที่ 1.1 มาเขียนกราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ย (แผนภูมิที่ 4.1 และ 4.2) พบว่าผลการทดลองทั้งอุณหภูมิผิวภายในและอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางมีความสอดคล้องกัน คืออุณหภูมิเฉลี่ยของ basecase จะมีค่าสูงสุด โดยอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในจะมีค่าความแตกต่างมากกว่าอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่อง



แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 1.1



แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 1.1

จากแผนภูมิที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิผิวภายในเฉลี่ยของผนัง Basecase, E.P. 15% และ E.P. 25% คือ 34.0 ̊C, 32.9 ̊C และ 32.0 ̊C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดของผนัง Basecase คือ 40.7 ̊C ส่วนอุณหูมิสูงสุดของผนัง E.P. 25% คือ 37.0 ̊C ซึ่งมีค่าต่างกัน 3.7 ̊C

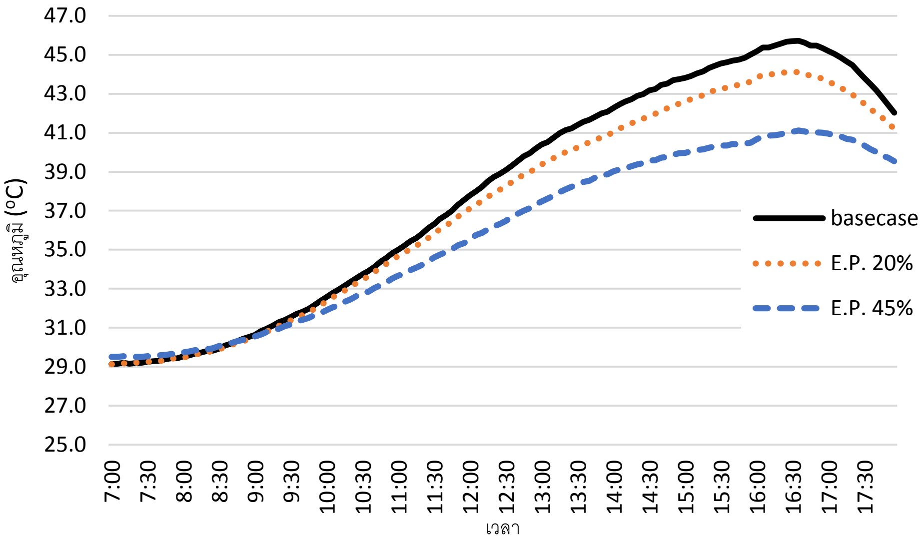
ส่วนแผนภูมิที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเฉลี่ยของ Basecase, E.P. 15% และ E.P. 25% คือ 33.4 ̊C, 32.9 ̊C และ 32.5 ̊C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดของ Basecase คือ 38.3 ̊C ส่วนอุณหูมิสูงสุดของผนัง E.P. 25% คือ 36.3 ̊C ซึ่งมีค่าต่างกัน 2 ̊C

4.2.2 การทดลองชุดที่ 1.2 ได้แก่ผนัง E.P. 0% (Basecase), E.P 20% และ E.P. 45%

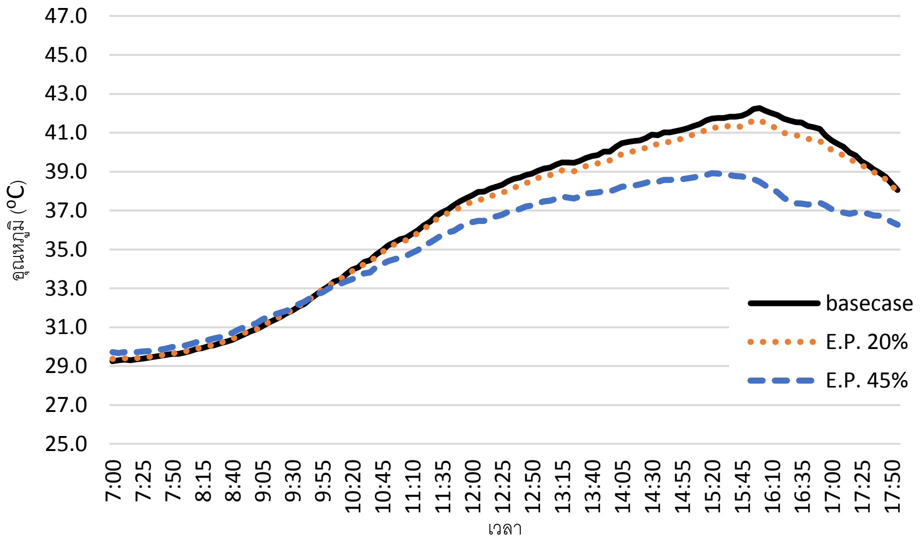
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.2

	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายใน (°C)			อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางกล่อง (°C)		
	Basecase	E.P. 20%	E.P. 45%	Basecase	E.P. 20%	E.P. 45%
วันที่ 1 (องศาแดด 50°)	38.6	38.1	36.6	37.5	37.3	36.3
วันที่ 2 (องศาแดด 60°)	37.4	36.6	35.1	35.9	35.9	34.6
วันที่ 3 (องศาแดด 70°)	38.3	37.4	35.8	36.8	36.4	35.2
วันที่ 4 (องศาแดด 80°)	37.6	36.8	35.6	36.6	35.8	34.6
เฉลี่ย 4 วัน	38.0	37.2	35.8	36.7	36.4	35.2

จากตารางที่ 4.3 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 1.1 พบว่าผนัง Basecase จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 20% และ 45% ตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ผิวคือผนัง Basecase วัดได้ 38.6 °C ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดที่ผิวในคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% วัดได้ 35.1 °C ส่วนอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดบริเวณกึ่งกลางกล่องคือผนัง Basecase วัดได้ 36.8 °C ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดบริเวณกึ่งกลางกล่องคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 25% วัดได้ 34.6 °C และเมื่อนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้ง 4 วันของการทดลองชุดที่ 1.2 มาเขียนกราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ย (แผนภูมิที่ 4.3 และ 4.4) พบว่าลักษณะของกราฟจะมีความคล้ายคลึงกับการทดลองที่ 1.1 คืออุณหภูมิเฉลี่ยของ Basecase จะมีค่าสูงสุด แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของ Basecase และผนังทางเลือกจะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมากเนื่องจากสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมีความแตกต่างกันมากเป็นเท่าตัว



แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 1.2



แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 1.2

จากแผนภูมิที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิผิวภายในเฉลี่ยของผนัง Basecase, E.P. 20% และ E.P. 45% คือ 38.0 ℃, 37.2 ℃ และ 35.8 ℃ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดของผนัง Basecase คือ 45.7 ℃ ส่วนอุณหภูมิสูงสุดของผนัง E.P. 45% คือ 41.1 ℃ ซึ่งมีค่าต่างกัน 4.6 ℃

ส่วนแผนภูมิที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางเฉลี่ยของ Basecase, E.P. 20% และ E.P. 45% คือ 36.7 ℃, 36.4 ℃ และ 35.2 ℃ ตามลำดับ โดยอุณหภูมิสูงสุดของผนัง Basecase คือ 42.3 ℃ ส่วนอุณหูมิสูงสุดของผนัง E.P. 45% คือ 38.9 ℃ ซึ่งมีค่าต่างกัน 3.4 ℃

จากผลการทดลองกรณีที่ 1 ทั้งสองชุด พบว่าสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมีผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐ ที่เห็นได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่อง โดยผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมากจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐน้อย เนื่องจากสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณเงาที่เกิดบนผนังแตกต่างกันด้วย จึงส่งผลต่อความร้อนที่ถูกถ่ายเทเข้าสู่ผนังอิฐ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานการทดลองและยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Berry (2013) ที่กล่าวว่าอุณหภูมิที่ผิวของผนังจะแปรผกผันกับค่าปริมาณเงา (Percent Shade) บนผนัง โดยผนังมีค่าปริมาณเงามากอุณหภูมิจะต่ำกว่าผนังที่มีค่าปริมาณเงาน้อย

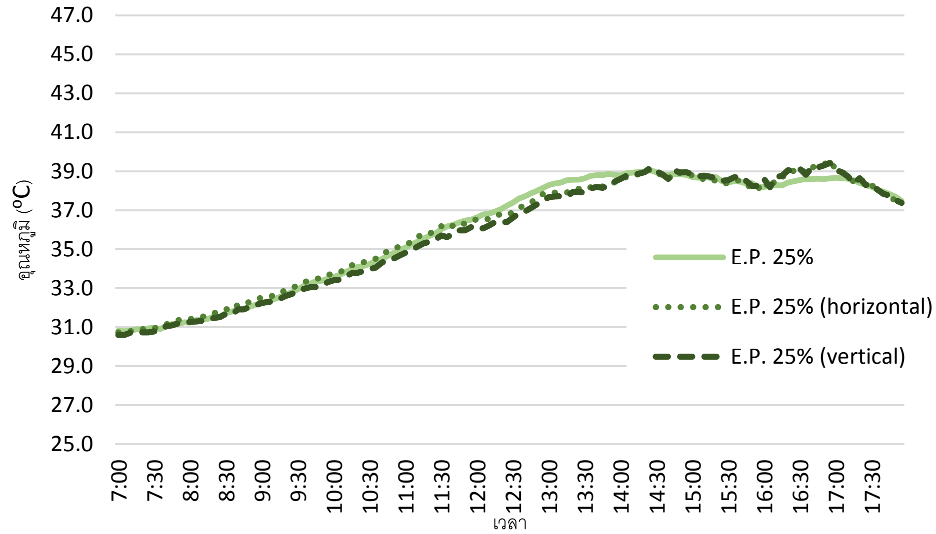
4.3 กรณีที่ 2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐ (Extrusion Percentage: E.P.) เท่ากันที่ 25% แต่รูปแบบการเรียงอิฐแตกต่างกัน

กรณีนี้จะทำการเปรียบเทียบผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่น 25% แต่วิธีการเรียงอิฐแตกต่างกัน ได้แก่ E.P. 25%, E.P. 25% (Horizontal) และ E.P. 25% (Vertical) ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

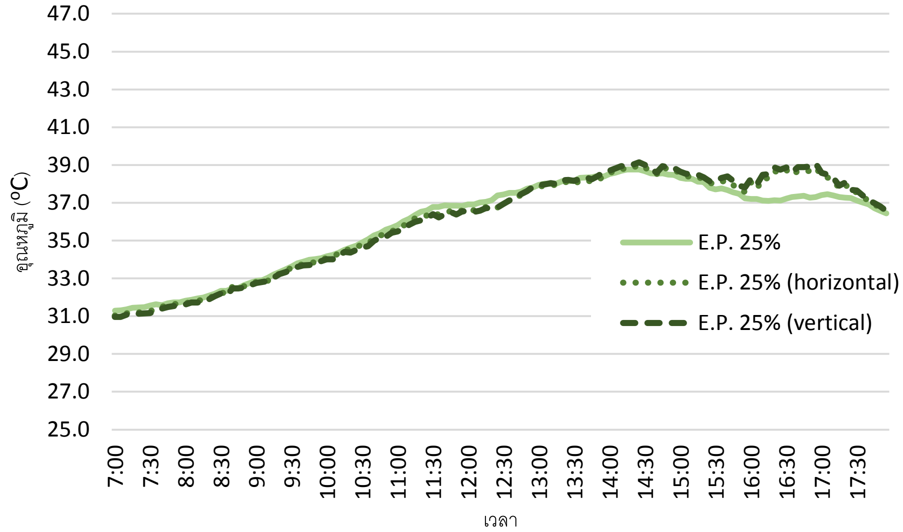
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 2

	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายใน (°C)			อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางกล่อง (°C)		
	E.P. 25%	E.P. 25% (Horizon)	E.P. 25% (Vertical)	E.P. 25%	E.P. 25% (Horizon)	E.P. 25% (Vertical)
วันที่ 1 (องศาแดด 60°)	35.9	36.2	36.2	35.6	36.2	36.3
วันที่ 2 (องศาแดด 70°)	36.0	35.9	35.8	35.9	35.8	35.9
วันที่ 3 (องศาแดด 80°)	36.0	35.9	35.4	36.2	36.1	36.0
เฉลี่ย 3 วัน	36.0	36.0	35.8	35.9	36.0	36.1

จากตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องในแต่ละวันของการทดลองชุดที่ 2 พบว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยแตกต่างกันน้อยมากเพียง 0.2 (°C) และเมื่อนำค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้ง 4 วันของการทดลองกรณีที่ 2 มาเขียนกราฟแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยจะได้ลักษณะของกราฟดังนี้ (แผนภูมิที่ 4.5 และ 4.6)



แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิผิวภายในของการทดลองกรณีที่ 2



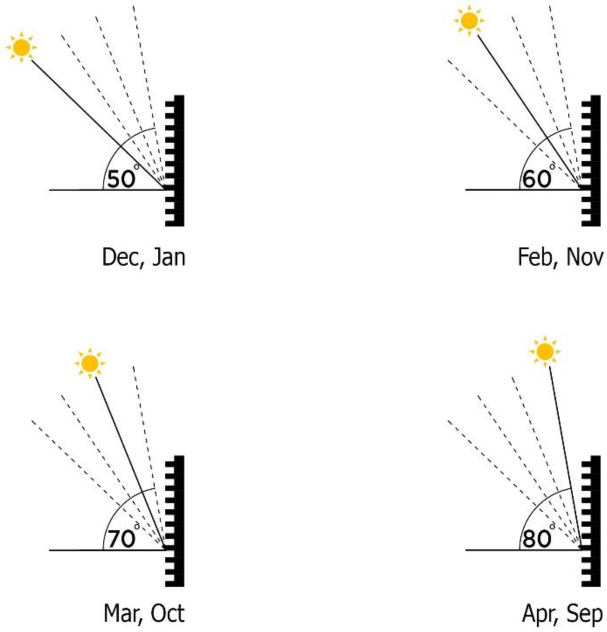
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องของการทดลองกรณีที่ 2

จากแผนภูมิที่ 4.5 พบว่าอุณหภูมิผิวภายในเฉลี่ยของผนัง E.P. 25%, E.P. 25% (Horizontal) และ E.P. 25% (Vertical) คือ 36.0 ˚C, 36.0 ˚C และ 35.8 ˚C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังอิฐทั้งสามชนิดมีค่าแตกต่างกันเพียง 0.2 ˚C ซึ่งถือว่าไม่แตกต่างกัน

ส่วนแผนภูมิที่ 4.6 แสดงอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางกล่องเฉลี่ยของผนัง E.P. 25%, E.P. 25% (Horizontal) และ E.P. 25% (Vertical) คือ 35.9 ˚C, 36.0 ˚C และ 36.0 ˚C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของผนังอิฐทั้งสามชนิดแตกต่างกันเพียง 0.2 ˚C สอดคล้องกับอุณภูมิที่ผิวภายใน

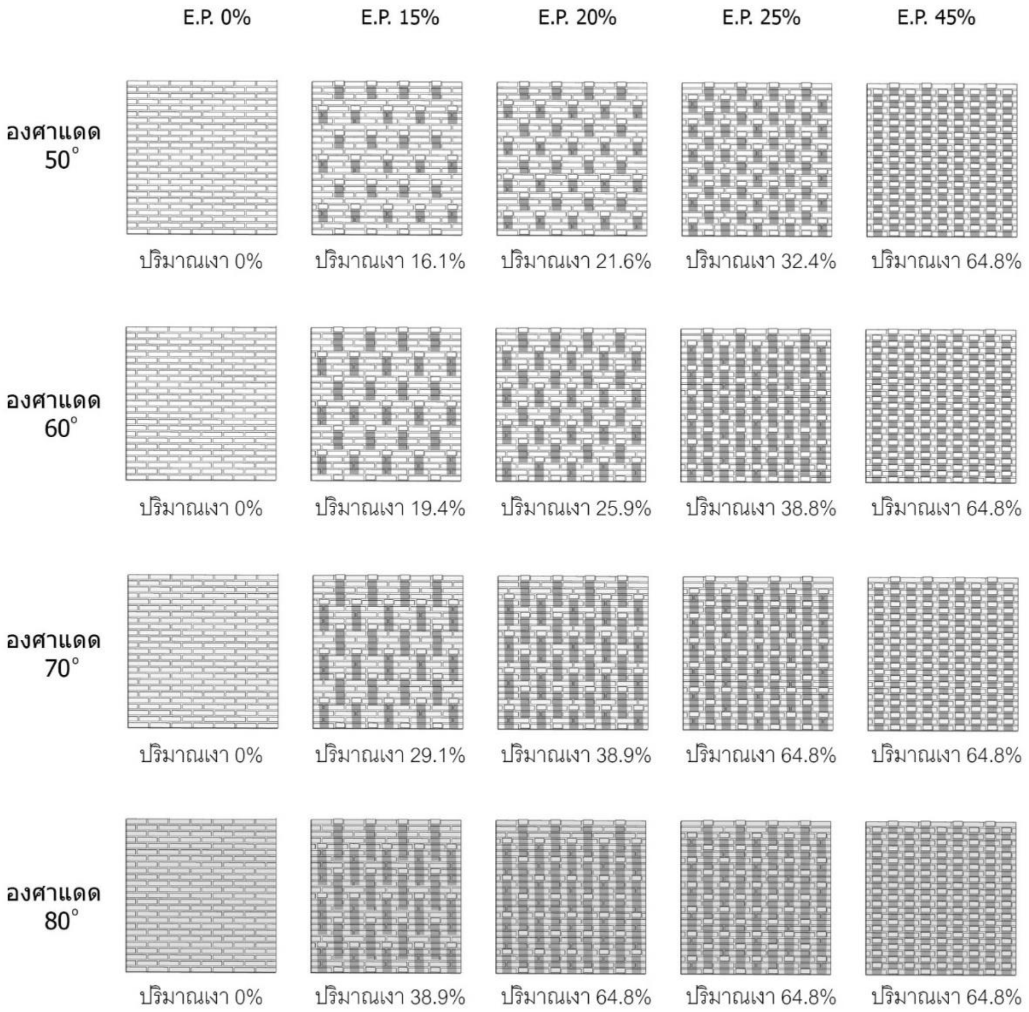
จากผลการทดลองในกรณีที่ 2 จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเรียงอิฐด้วยลวดลายที่แตกต่างกันส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยทั้งที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องน้อยมาก ซึ่งขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Freewan (2014) และ Arifin (2015) ที่ทำการทดลองด้วยแผงบังแดดรูปแบบต่างๆ เพื่อบังแดดให้กับผนังกระจกซึ่งจะส่งผลกับอุณหภูมิภายในอาคารค่อนข้างมาก ผลการวิจัยจึงออกมาแตกต่างกับผนังอิฐทึบที่มีการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่า อย่างไรก็ตามการที่ค่าอุณหภูมิของผนังอิฐมีค่าแตกต่างกันไม่มากอาจเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น ปริมาณแสงแดดไม่เพียงพอ ความชื้นสูง หรือมีลมพัดแรง เป็นต้น ทำให้ความร้อนที่ผนังอิฐได้รับไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนถึงจุดสูงสุดในแต่ละวัน

4.4 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน U_{eff}



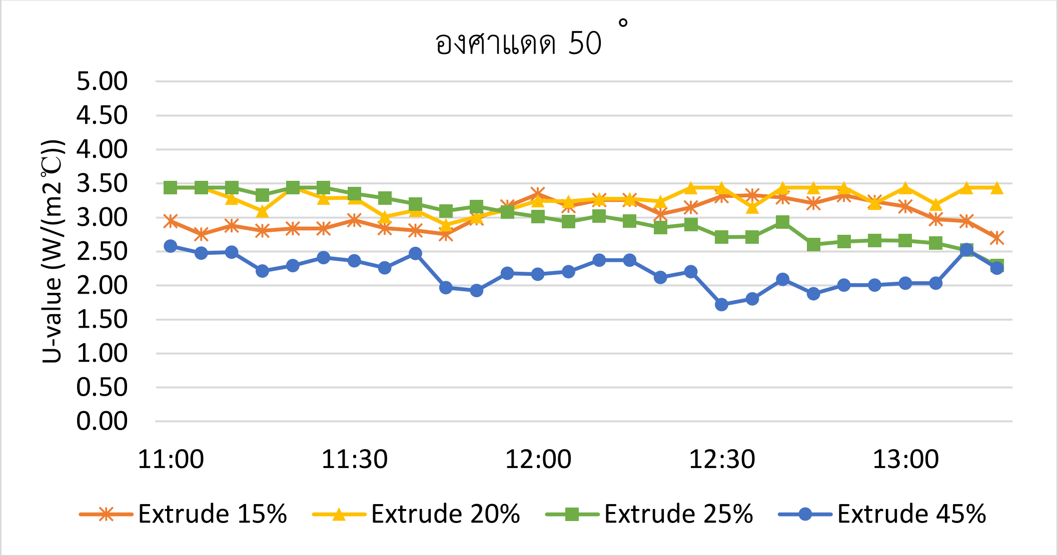
ภาพที่ 4.1 องศาแดดที่ทำมุมกับผนังทางทิศใต้ในแต่ละเดือน

ผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเป็นผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาแบบ Dynamic Facade ในที่นี้คือกำหนดให้ผนังอยู่นิ่งแต่ดวงอาทิตย์ในแต่ละวันหรือแต่ละเดือนจะเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อยๆ ดังนั้นในผนังรูปแบบหนึ่งๆ จะมีค่า U_{eff} หลายค่าขึ้นอยู่กับปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามองศาแดดที่ทำมุมแตกต่างกันในแต่ละเดือน (ภาพที่ 4.2) ในการทดลองนี้จึงได้ทำการเก็บผลและวัดค่าอุณหภูมิที่องศาแดดต่างๆ จากการที่ดวงอาทิตย์อ้อมใต้มากสุดไปยังน้อยสุด ดังนี้ 50°, 60°, 70° และ 80° (ภาพที่ 4.1) และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า U_{eff} จากสมการ $Q = U\,A\,(t_o - t_i)$ โดยแบ่งตามองศาแดดต่างๆ ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.7–4.10



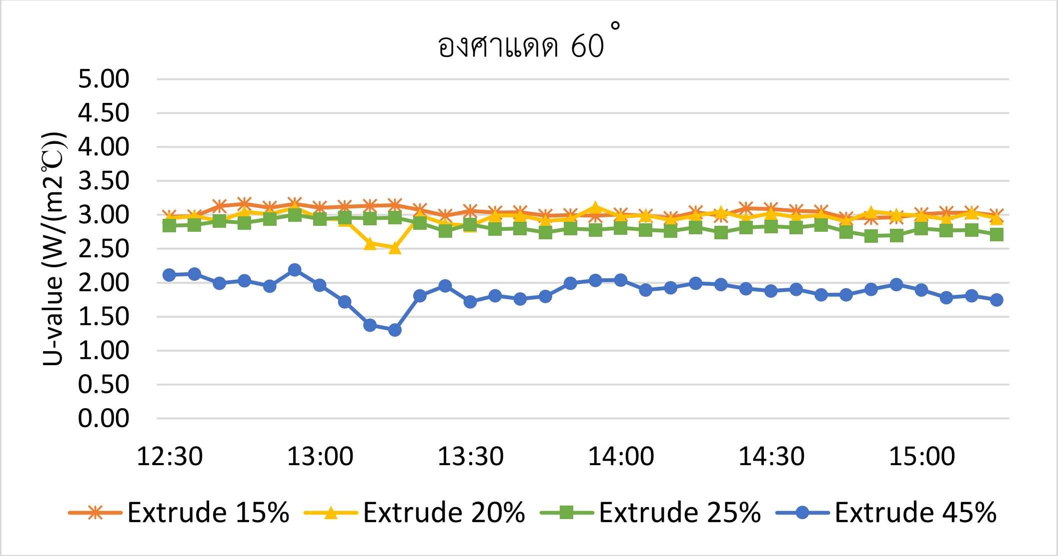
ภาพที่ 4.2 การจำลองปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังที่องศาแดดต่างๆ ในเวลาเที่ยงวัน

จากภาพการจำลองปริมาณเงาที่เกิดขึ้นในเวลาเที่ยงวันแสดงให้เห็นว่าปริมาณเงาที่ตกลงบนผนังมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและองศาแดดที่ทำมุมกับผนัง โดยที่องศาแดด 50 องศา จะมีปริมาณเงาน้อยที่สุดเนื่องจากดวงอาทิตย์ทำมุมต่ำการบังแดดจึงทำได้ยากเงาที่เกิดขึ้นบนผนังจึงมีลักษณะสั้น ส่วนที่องศาแดด 80 องศา จะมีปริมาณเงามากที่สุดเนื่องจากดวงอาทิตย์ทำมุมสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดเงายาวจนเกิดการทับซ้อนกันของเงาทำให้ปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังแต่ละทางเลือกมีค่าใกล้เคียงกัน



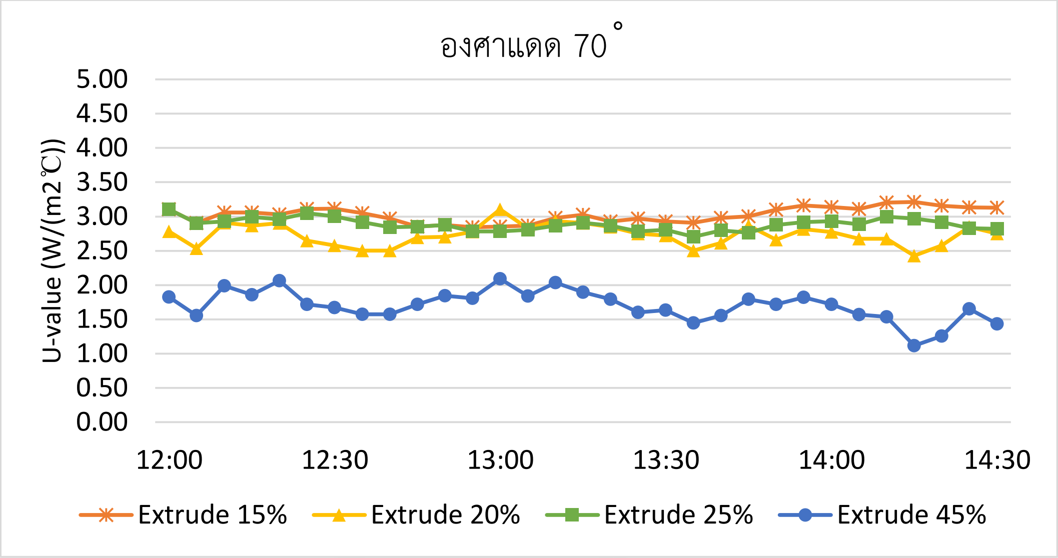
แผนภูมิที่ 4.7 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 50°

จากแผนภูมิที่ 4.7 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 50° พบว่า ผนังที่มีค่า U_{eff} เฉลี่ยต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 25%, 15%, และ 20% คำนวณค่าได้ 2.33 W/(m^2℃), 2.99 W/(m^2℃), 3.28* W/(m^2℃) และ 3.05 W/(m^2℃) ตามลำดับ โดยค่า U_{eff} ต่ำสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 45% คำนวณค่าได้ 1.72 W/(m^2℃) ค่าสูงสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 20% คำนวณค่าได้ 3.44 W/(m^2℃) โดยในช่วงสายของวัน ค่า U_{eff} ของผนัง E.P. 25% มีค่าสูง อาจเกิดจากสภาพอากาศในตอนเช้ามีเมฆมาก ทำให้อุณหภูมิภายนอกและภายในจึงต่างกันไม่มาก ค่า U_{eff} จึงสูงกว่าทุกกรณีและค่าได้กลับมาเป็นปกติในช่วงบ่าย



แผนภูมิที่ 4.8 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 60°

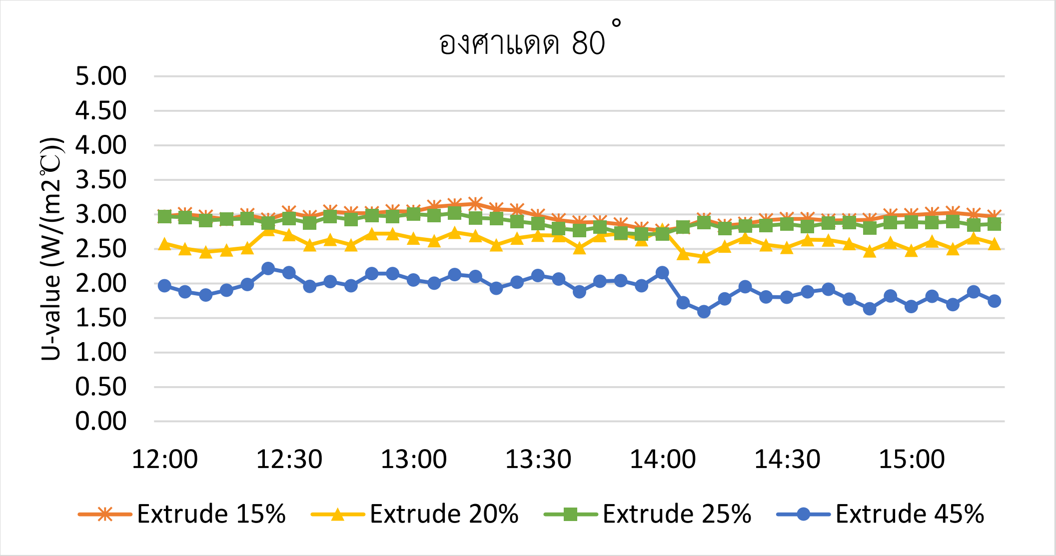
แผนภูมิที่ 4.8 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 60° พบว่า ผนังที่มีค่า U_{eff} เฉลี่ยต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 25%, 20%, และ 15% คำนวณค่าได้ 1.88 W/(m^2°C), 2.83 W/(m^2°C), 2.94 W/(m^2°C) และ 3.03 W/(m^2°C) ตามลำดับ โดยค่า U_{eff} ต่ำสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 45% คำนวณค่าได้ 1.35 W/(m^2°C) ส่วนค่าสูงสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 15% คำนวณค่าได้ 3.19 W/(m^2°C) โดยในช่วงเวลา 13.15 น. ที่กราฟค่า U_{eff} ของผนัง E.P. 20% และ E.P. 45% มีค่าต่ำลงเนื่องจากอุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่าต่ำลงชั่วขณะซึ่งอาจจะเกิดจากมีเมฆเคลื่อนผ่านในช่วงเวลานั้น



แผนภูมิที่ 4.9 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 70°

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

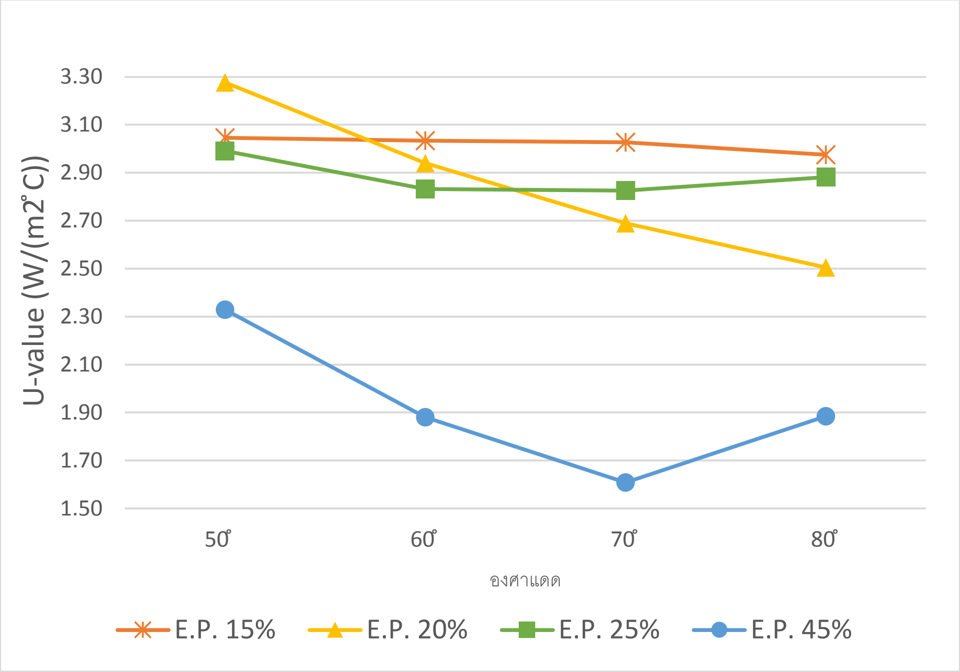
แผนภูมิที่ 4.9 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 70° พบว่า ผนังที่มีค่า U_{eff} เฉลี่ยต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 20%, 25%, และ 15% คำนวณค่าได้ 1.61 W/(m^2°C), 2.83 W/(m^2°C), 2.69 W/(m^2°C) และ 3.03 W/(m^2°C) ตามลำดับ โดยค่า U_{eff} ต่ำสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 45% คำนวณค่าได้ 1.17 W/(m^2°C) ส่วนค่าสูงสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 15% คำนวณค่าได้ 3.23 W/(m^2°C)



แผนภูมิที่ 4.10 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 80°

แผนภูมิที่ 4.10 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดด 80° พบว่า ผนังที่มีค่า U_{eff} เฉลี่ยต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 25%, 20%, และ 15% คำนวณค่าได้ 1.88 W/(m^2°C), 2.88 W/(m^2°C), 2.50 W/(m^2°C) และ 2.98 W/(m^2°C) ตามลำดับ โดยค่า U_{eff} ต่ำสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 45% คำนวณค่าได้ 1.55 W/(m^2°C) ค่าสูงสุดอยู่ที่ผนัง E.P. 15% คำนวณค่าได้ 3.17 W/(m^2°C)

จากแผนภูมิที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่องศาแดดต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างผนัง Basecase ซึ่งเป็นผนังก่ออิฐครึ่งชั้นไม่ฉาบจะมีค่า U-value เท่ากับ 3.44 W/(m^2°C) ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการคำนวณ เนื่องจากเป็นผนังอิฐธรรมดาที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของเงา พบว่าในทุกองศาแดดค่า U_{eff} ของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองทุกชนิดจะมีค่าต่ำกว่าผนัง Basecase ส่วนองศาแดดที่มากขึ้นค่า U_{eff} จะลดลง และเมื่อนำค่าบริเวณที่กราฟนิ่งที่สุดมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ผนังแต่ละรูปแบบในองศาแดดต่างๆ จะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างเปรียบเทียบกันที่องศาแดดต่างๆ ดังแสดงในแผนภูมิที่ 4.11 และจะสามารถแจกแจงค่า U_{eff} ดังตารางที่ 4.5



แผนภูมิที่ 4.11 ค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างเปรียบเทียบกันที่องศาแดดต่างๆ

จากแผนภูมิที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า U_{eff} ของผนังที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างเปรียบเทียบกันที่องศาแดดต่างๆ พบว่าองศาแดดมีผลต่อค่า U_{eff} โดยที่องศาแดด 50 องศา จะมีค่า U_{eff} เฉลี่ยสูงสุดจะอยู่ เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์ทำมุมต่ำ ลักษณะการยื่นของก้อนอิฐป้องกันแดดได้ยากเงาที่เกิดขึ้นบนผนังจึงน้อย ส่งผลให้ค่า U_{eff} ของผนังทางเลือกต่างๆ มีค่าสูงและแตกต่างกันน้อยกว่าที่องศาแดดอื่นๆ ส่วนที่องศาแดด 60 และ 70 องศา จะพบว่าค่า U_{eff} ของผนังแต่ละทางเลือกจะมีความแตกต่างกันมากที่สุด เนื่องจากเป็นองศาแดดที่การก้อนอิฐสามารถป้องกันแดดและทำให้เกิดเงาบนผนังได้อย่างมีประสิทธิภาพ สัดส่วนการยื่นจึงมีผลต่อปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนัง จึงเห็นความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านความร้อนได้ชัดเจนที่สุดที่องศาแดดนี้ แต่เมื่อเราสังเกตที่องศาแดด 80 องศา จะพบว่าค่า U_{eff} ของผนังแต่ละทางเลือกจะมีความแตกต่างค่อนข้างน้อย เนื่องจากดวงอาทิตย์ทำมุมสูง ส่งผลให้เงาที่เกิดขึ้นบนผนังมีปริมาณค่อนข้างมากจนเกิดการซ้อนทับกันของเงา (ภาพที่ 4.2) ซึ่งทำให้ปริมาณเงาของผนัง E.P. 45% และผนัง E.P. 20% มีค่าแตกต่างกันไม่มาก ค่า U_{eff} ของผนังทั้งสองจึงมีค่าใกล้เคียงกันกว่าที่องศาแดด 60 หรือ 70 องศา แต่จะมีค่า U_{eff} บางค่าที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน เช่นในผนัง E.P. 25% และ E.P. 45% ที่องศาแดด 80 องศา จะมีค่า U_{eff} สูงขึ้นเนื่องจากในวันที่ทำการเก็บข้อมูลท้องฟ้ามีเมฆมาก ทำให้อุณหภูมิอากาศภายนอก และภายในกล่องทดลองแตกต่างกันน้อยมาก

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่า U_{eff} ของผนั งที่มีสัดส่วนการยื่นแตกต่างกันที่องศาแดดต่างๆ

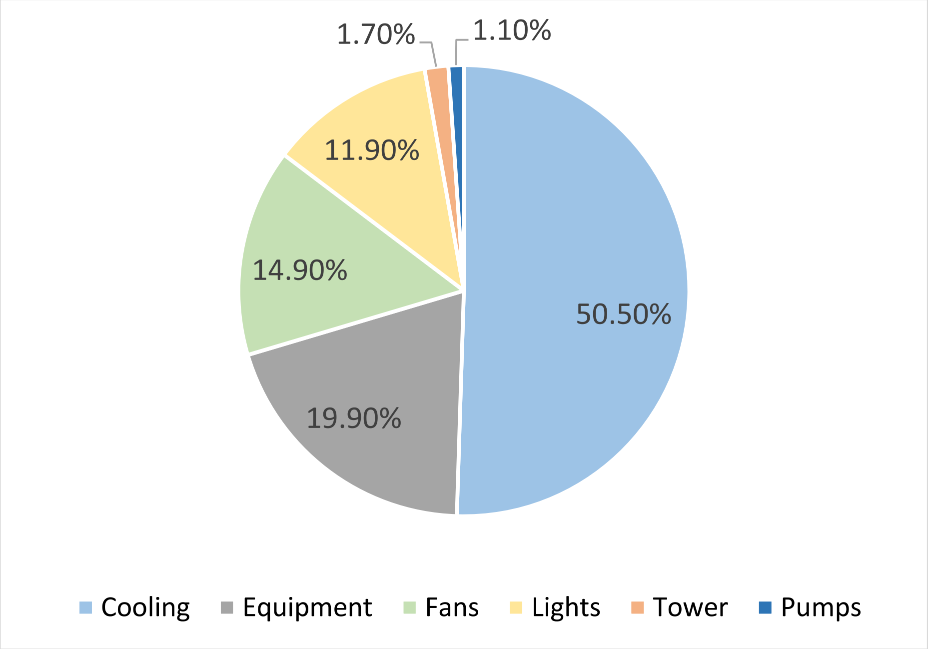
	U_{eff} (W/(m^2 °C))				
	Basecase	E.P. 15%	E.P. 20%	E.P. 25%	E.P. 45%
อาศาแดด 50° (มกราคม, ธันวาคม)	3.44	3.05	3.28*	2.99	2.33
อาศาแดด 60° (กุมภาพันธ์, พฤศจิกายน)	3.44	3.03	2.94	2.83	1.88
อาศาแดด 70° (มีนาคม, ตุลาคม)	3.44	3.03	2.69	2.83*	1.61
อาศาแดด 80° (เมษายน, กันยายน)	3.44	2.98	2.50	2.88**	1.88*

* หมายถึง ค่าที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานในแนวนอนหรือแนวตั้งของตาราง

** หมายถึง ค่าที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐานทั้งในแนวนอนและแนวตั้งของตาราง

เมื่อเทียบกันตามสัดส่วนของการยื่นของก้อนอิฐจะพบว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นมากจะมีค่า U_{eff} ต่ำกว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นน้อย โดยผนังที่มีค่า U_{eff} ต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 25%, 20% และ 15% ตามลำดับ (จากขวาไปซ้ายของตาราง) ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน เนื่องจากปริมาณเงาที่ลดลงความร้อนจึงถ่ายเทเข้าผนังได้มากขึ้น แต่เมื่อเทียบกันที่องศาแดดในแต่ละเดือนจะพบว่าองศาแดด 80° จะมีค่า U_{eff} ต่ำที่สุด รองลงมาคือ 70°, 60° และ 50° (จากล่างขึ้นบนของตาราง) เนื่องจากองศาของแดดที่น้อยลงจึงทำให้เกิดเงาบนผนังน้อยลงความร้อนจึงถ่ายเทเข้าผนังได้มากขึ้น แม้จะมีค่าบางตัวที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยภายนอกต่างๆ เช่น ปริมาณแสงแดดที่ไม่เพียงพอ, ความชื้นหรือความแปรปรวนของสภาพท้องฟ้าภายนอก เป็นต้น จึงส่งผลให้การคำนวณค่า U_{eff} ออกมาได้ค่ามากกว่าที่คาดการณ์ไว้

4.5 ผลการจำลองประสิทธิภาพด้านพลังงานด้วยโปรแกรม VisualDoe 4.0



แผนภูมิที่ 4.12 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งปีของอาคารสำนักงานขนาดกลางทั่วไป

จากแผนภูมิแสดงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าในหนึ่งปีของอาคารสำนักงานขนาดกลางทั่วไป (Typical Medium-size Office Building) ที่มีการใช้งานในเวลากลางวัน ขนาด 12,000 ตารางเมตร พบว่าอัตราการใช้ไฟฟ้ารวมคือ 3,413,849 kWh โดยพลังงานไฟฟ้าที่ถูกใช้ในด้านต่างๆ เรียงตามลำดับจากมากที่สุดไปยังน้อยที่สุดดังนี้ 1.) ด้านการทำความเย็น (Cooling) จำลองค่าได้ 1,723,569 kWh หรือคิดเป็นร้อยละ 50.5 ของทั้งหมด 2.) ด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ (Equipment) จำลองค่าได้ 679,296 kWh หรือคิดเป็นร้อยละ 19.9 ของทั้งหมด 3.) ด้านการระบายอากาศ (Fan) จำลองค่าได้ 508,591 kWh คิดเป็นร้อยละ 14.9 ของทั้งหมด 4.) ด้านแสงสว่าง (Light) จำลองค่าได้ 407,558 kWh คิดเป็นร้อยละ 11.9 ของทั้งหมด 5.) ด้านการระบายความร้อนของระบบปรับอากาศ (Tower) จำลองค่าได้ 58,577 kWh คิดเป็นร้อยละ 1.7 ของทั้งหมด และ 6.) ด้านสุขาภิบาล (Pumps) จำลองค่าได้ 36,258 kWh คิดเป็นร้อยละ 1.1 ของทั้งหมด

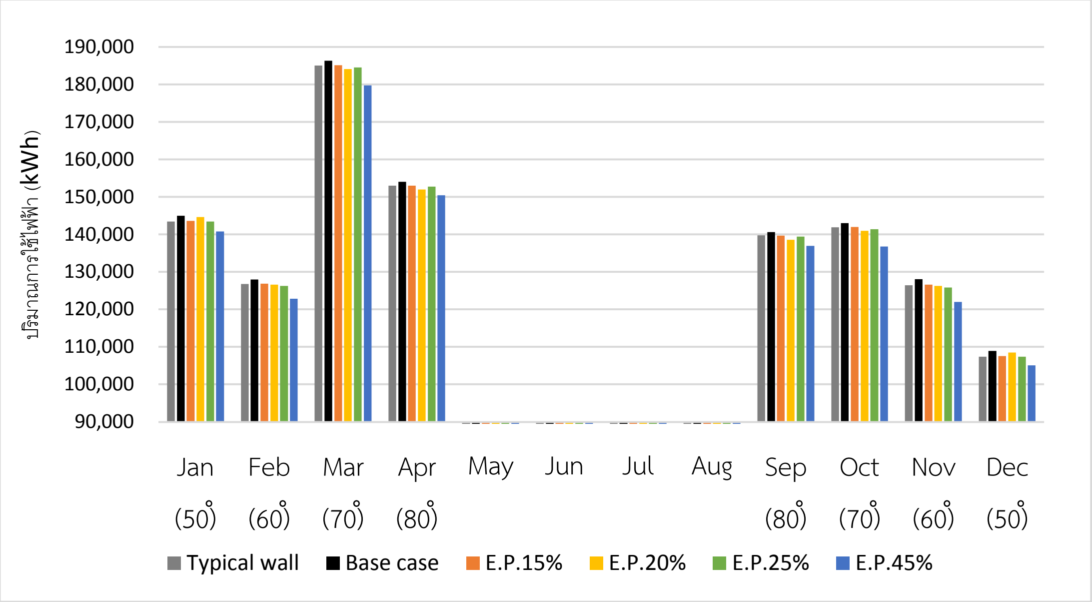
เมื่อทำการเปลี่ยนผนังทางทิศใต้โดยการแทนค่า U_{eff} ที่ได้จากการวัดจากผนังอิฐที่มีการบังแดดทุกรูปแบบที่องศาแดดต่างๆ เพื่อให้โปรแกรมจำลองการใช้พลังงานโดยแยกเป็นผลของแต่ละเดือนตามค่า U_{eff} ที่องศาแดดต่างๆ และนำผลที่ได้มาต่อกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในด้านการทำความเย็นของอาคารในหนึ่งปี โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีผนังก่ออิฐฉาบปูนครึ่งแผ่น (Typical Wall) และผนังก่ออิฐไม่ฉาบปูน (Basecase) โดยจะเว้นผลในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายนที่ผลการทดลองไม่ครอบคลุมเนื่องจากเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นโลกและอ้อมเหนือได้ผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณการใช้ไฟฟ้าด้านการทำความเย็นของอาคารที่มีการใช้ผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า (kWh/ปี)					
	Typical wall	Base case	E.P. 15%	E.P. 20%	E.P. 25%	E.P. 45%
ม.ค. (50ปี)	143,415	144,967	143,628	144,605	143,415	140,801
ก.พ. (60ปี)	126,741	127,985	126,861	126,597	126,249	122,809
มี.ค. (70ปี)	185,044	186,364	185,165	184,094	184,545	179,717
เม.ย. (80ปี)	153,001	154,051	152,981	151,949	152,766	150,409
พ.ค.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
มิ.ย.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ก.ค.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ส.ค.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
ก.ย. (80ปี)	139,770	140,663	139,668	138,601	139,445	136,957
ต.ค. (70ปี)	141,866	143,039	141,968	140,923	141,433	136,746
พ.ย. (60ปี)	126,473	128,105	126,609	126,306	125,859	122,027
ธ.ค. (50ปี)	107,383	108,954	107,573	108,507	107,383	105,093
รวม	1,123,694	1,134,129	1,124,454	1,121,583	1,121,096	1,094,560

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อนำปริมาณการใช้ไฟฟ้าในด้านการทำความเย็นของผนังแต่ละรูปแบบในทุกเดือนมารวมกันจะพบว่าผนังที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดคือผนัง Base case รองลงมาคือผนัง E.P. 15%, Typical wall, E.P. 20% E.P. 25% และ E.P. 45% จำลองค่าได้ 1,134,129 kWh, 1,124,454 kWh, 1,123,694 kWh, 1,121,583 kWh, 1,121,096 kWh และ 1,094,560 kWh ตามลำดับ ค่าที่ได้จากตารางจะสามารถนำมาแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.13 ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านการทำความเย็นในหนึ่งปีของผนังแต่ละรูปแบบ

จากแผนภูมิที่ 4.13 พบว่าเดือนที่มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงที่สุดคือเดือนมีนาคม มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 184,155 kWh ส่วนเดือนที่มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่ำสุดคือเดือนธันวาคม เฉลี่ย 107,482 kWh เมื่อเทียบกันในแต่ละเดือนจะพบว่าผนังที่มีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานสูงสุดคือ Basecase ส่วนผนังที่มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ E.P. 45% โดยในเดือนมีนาคมมีค่าแตกต่างกัน 6,647 kWh และเมื่อดูผลรวมปริมาณการใช้ไฟฟ้าใน 8 เดือน โดยเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ใช้ผนังก่ออิฐฉาบปูน (Typical wall) กับอาคารที่ใช้ผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองที่ดีที่สุด พบว่าผนัง E.P. 45% มีปริมาณการใช้ไฟฟ้าในด้านการทำความเย็นน้อยกว่าผนังก่ออิฐฉาบปูน 29,134 kWh

จากการจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโปรแกรม VisualDOE ด้วยการแทนค่า U_{eff} ที่ได้จากการวัดจากผนังอิฐที่มีการบังแดดทุกรูปแบบที่องศาแดดต่างๆ โดยแยกผลของแต่ละเดือนตามค่า U_{eff} ที่องศาแดดต่างๆ จากนั้นนำผลที่ได้มาเรียงต่อกันพบว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นมากสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในอาคารได้ดีกว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นน้อย โดยเมื่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผนังที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนจะพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในด้านการทำความเย็นของอาคารลงได้ร้อยละ 2.6 ต่อปี

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ประเทศไทยที่ตั้งอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตร ความร้อนจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์หรือแสงแดดถือเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความร้อนสะสมในตัวอาคาร ความร้อนจากแสงแดดจะเข้าสู่ตัวอาคารผ่านทางผนังและหลังคา และหากเทียบสัดส่วนพื้นที่ผนังและหลังคาของอาคารโดยทั่วไป จะพบว่าสัดส่วนพื้นที่ผนังจะมากกว่าหลังคา การบังแดดให้ผนังจึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะช่วยลดความร้อนสะสมภายในอาคารซึ่งจะช่วยลดการใช้พลังงานภายในอาคารลงได้มาก

จากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบังแดดให้ผนังเพื่อลดความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร พบว่ามีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการบังแดดในหลากหลายรูปแบบ โดยสามารถแบ่งเป็นสามรูปแบบหลักๆ ได้แก่ การบังแดดด้วยอุปกรณ์บังแดด (Shading Devices) การใช้พืชช่วยในการบังแดด (Tree-shaded) และการบังแดดด้วยตัวเอง (Self-Shading) ซึ่งทั้งสามรูปแบบนี้ให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือสามารถลดความร้อนที่เข้ามาสู่ตัวอาคารได้ โดยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น รูปแบบของอุปกรณ์บังแดด ทิศทางหรือองศาของแดดหรือปริมาณที่เกิดขึ้นบนผนัง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะนำไปสู่การออกแบบทางเลือกเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง แม้จะมีบางงานวิจัยชี้ว่าการบังแดดด้วยตัวเองมีข้อเสียบางประการ เช่น วัชพล (2011) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบังแดดด้วนรูปทรงอาคาร กล่าวว่าอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเองบางประเภทมีค่าการใช้พลังงานมากขึ้นเนื่องจากมีพื้นผิวของอาคารเพิ่มขึ้น หรือในงานวิจัยของ Chan (2012) ที่แสดงให้เห็นว่าการบังแดดด้วยรูปทรงอาคารไม่ได้ส่งผลดีที่สุดในทุกกรณี แต่อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยอีกหลายชิ้นแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของการบังแดดด้วยตัวเอง คือช่วยลดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารลงได้ โดยประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นปริมาณเงาบนผนัง ช่วงเวลาที่เกิดเงาหรือหลักการในการออกแบบทั้งการวางทิศทางของอาคาร การคำนวณองศาของแสงแดดรวมไปถึงการนำไปใช้งานที่เหมาะสมกับอาคารประเภทต่างๆ นอกจากนั้นหลักการบังแดดด้วยตัวเองยังมีข้อดีที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับผนังอิฐโดยการเรียงอิฐด้วยวิธียื่นออกหรือหดเข้าเพื่อให้เกิดเงาบนผนัง ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์บังแดดรูปแบบอื่นๆ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยจะเน้นศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองอันเกิดจากการเรียงก้อนอิฐให้มีลักษณะยื่นออกมาจากผนังที่สัดส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดเงาลงบนผนังในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งจะ

กำหนดให้มีการใช้กล่องทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง โดยเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาตั้งสมมติฐานของการวิจัยและทำการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการออกแบบทางเลือกผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองรูปแบบต่างๆ และทำการศึกษาด้วยการเก็บข้อมูลจากกล่องทดลองที่นำไปวางในสถานที่จริงในกรุงเทพมหานคร กล่องทดลองที่ใช้มีขนาด 70 × 90 × 90 เซนติเมตร จำนวน 3 กล่อง แต่ละกล่องมีลักษณะเป็นกล่องปิดทึบบุด้วยโฟมหนา 3.5 นิ้ว โดยมีด้านหนึ่งเป็นผนังอิฐที่ต้องการทดสอบประสิทธิภาพด้านความร้อน ทั้งสามกล่องจะถูกวางไว้บนดาดฟ้าของอาคารและหันด้านที่เป็นผนังอิฐไปทางทิศใต้เพื่อให้ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เนื่องจากผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเป็นผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงของเงาที่ตกลงบนผนังตลอดเวลาในรูปแบบ Dynamic Facade ดังนั้นการเก็บข้อมูลในหนึ่งการทดลองจะทำการเก็บข้อมูลในเวลากลางวันทั้งหมด 4 วัน แต่ละวันจะทำการเอียงกล่องทดลองให้ด้านผนังอิฐได้รับแดดที่มุมตกกระทบแตกต่างกันที่องศาแดด 50°, 60°, 70° และ 80° เพื่อจำลองการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ในหนึ่งปี จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า U-value เพื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองการใช้พลังงานในอาคารตลอดหนึ่งปีด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 นอกจากนั้นยังสามารนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเสนอแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงการคำนวณค่า OTTV สำหรับผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองในกรณีที่ 1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐแตกต่างกัน ทั้งสองชุดการทดลองพบว่าสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมีผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐ ที่เห็นได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่อง โดยผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐมากจะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าผนังอิฐมีสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐน้อย เนื่องจากสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐที่แตกต่างกันทำให้ปริมาณเงาที่เกิดบนผนังแตกต่างกันด้วย จึงส่งผลต่อความร้อนที่ถูกถ่ายเทเข้าสู่ผนังอิฐ ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานการทดลองและยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Berry (2013) ที่กล่าวว่าอุณหภูมิที่ผิวของผนังจะแปรผกผันกับค่าปริมาณเงาบนผนัง โดยผนังมีค่าปริมาณเงามากอุณหภูมิจะต่ำกว่าผนังที่มีค่าปริมาณเงาน้อย

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการเรียงแตกต่างกันในการทดลองกรณีที่ 2 พบว่าวิธีการเรียงอิฐด้วยลวดลายที่แตกต่างกันส่งผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยทั้งที่ผิวภายในและบริเวณกึ่งกลางกล่องน้อยมาก ซึ่งขัดแย้งกับผลการวิจัยของ Freewan (2014) และ Arifin (2015) ที่ทำการทดลองด้วยแผงบังแดดรูปแบบต่างๆ และได้ผลว่ารูปแบบของแผงกันแดดที่แตกต่างกันมีผลต่ออุณหภูมิภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม การที่ค่าอุณหภูมิของผนังอิฐมีค่าแตกต่างกันไม่มาก

อาจเกิดจากปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น ปริมาณแสงแดดไม่เพียงพอ ความชื้นสูง หรือมีลมพัดแรง เป็นต้น ทำให้ความร้อนที่ผนังอิฐได้รับไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนถึงจุดสูงสุดในแต่ละวัน

เนื่องจากผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองเป็นผนังที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Dynamic Facade) ในผนังรูปแบบหนึ่งๆ จึงมีค่า U-value หลายค่าขึ้นอยู่กับปริมาณเงาที่เกิดขึ้นบนผนังซึ่งจะแปรเปลี่ยนไปตามองศาแดดที่ทำมุมแตกต่างกันในแต่ละเดือน เมื่อเทียบกันตามสัดส่วนของการยื่นของก้อนอิฐจะพบว่าตรงตามสมมติฐาน โดยผนังที่มีสัดส่วนการยื่นมากจะมีค่า U_{eff} ต่ำกว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นน้อย โดยผนังที่มีค่า U_{eff} ต่ำที่สุดคือผนังที่มีสัดส่วนการยื่น 45% รองลงมาคือ 25%, 20% และ 15% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณเงาที่ลดลงความร้อนจึงถ่ายเทเข้าผนังได้มากขึ้น และเมื่อเทียบกันที่องศาแดดในแต่ละเดือนจะพบว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้เช่นกัน โดยที่องศาแดด 80° จะมีค่า U_{eff} ต่ำที่สุด รองลงมาคือ 70°, 60° และ 50° เนื่องจากองศาของแดดที่ต่ำลงจึงสามารถบังแดดได้ยากทำให้เกิดเงาบนผนังน้อยลงความร้อนจึงถ่ายเทเข้าผนังได้มากขึ้น และในช่วงที่องศาแดดสูงค่า U จะแตกต่างกันน้อยลงเนื่องจากเงาที่เกิดขึ้นมีปริมาณใกล้เคียงกันความร้อนที่ถ่ายเทเข้าผนังจึงแตกต่างกันไม่มาก แม้จะมีค่าบางตัวที่ไม่เป็นไปตามสมมติฐาน ซึ่งอาจจะเกิดจากปัจจัยภายนอกต่างๆ เช่นปริมาณแสงแดด ความชื้นหรือความแปรปรวนของสภาพท้องฟ้าภายนอก เป็นต้น ที่ทำให้การคำนวณค่า U_{eff} ออกมาได้ค่ามากกว่าปกติ ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพด้านพลังงานในหนึ่งปีควรแบ่งช่วงการคำนวณตามเดือนต่างๆ โดยเลือกใช้ค่า U_{eff} ให้ตรงตามองศาแดดในแต่ละเดือน ตัวอย่างเช่น การคำนวณในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคมที่ดวงอาทิตย์อ้อมใต้มากที่สุดควรเลือกใช้ค่า U-value ที่องศาแดด 50° เป็นต้น จากนั้นจึงนำค่าการใช้พลังงานของแต่ละเดือนมารวมกันเพื่อให้การคำนวณประสิทธิภาพด้านพลังงานในหนึ่งปี ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณค่า OTTV และการจำลองการใช้พลังงาน ของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองมีความแม่นยำมากขึ้น และหากต้องการผลการให้ได้ผลที่มีความละเอียดกว่านี้อาจจะต้องทำการทดลองกับองศาแดดที่มีความละเอียดมากขึ้น เช่น มุม 50°, 55°, 60°, 65°, 70° เป็นต้น และทำการจำลองประสิทธิภาพด้านพลังงานที่มีความละเอียดมากขึ้นภายในหนึ่งเดือน เพื่อให้ประสิทธิภาพที่เกิดจาก Dynamic Façade มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เพราะจะมีค่า U_{eff} จำนวนหลากหลายสอดคล้องกับองศาแดดที่ละเอียดยิ่งขึ้น

การจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานในโปรแกรม VisualDOE ด้วยการแทนค่า U_{eff} ที่ได้จากการวัดจากผนังอิฐที่มีการบังแดดทุกรูปแบบที่องศาแดดต่างๆ โดยแยกผลของแต่ละเดือนตามค่า U_{eff} ที่องศาแดดต่างๆ จากนั้นนำผลที่ได้มาเรียงต่อกันพบว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นมากสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในอาคารได้ดีกว่าผนังที่มีสัดส่วนการยื่นน้อย โดยเมื่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าของผนังที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาเทียบกับผนังก่ออิฐฉาบปูนจะพบว่าสามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าในด้านการทำความเย็นของอาคารลงได้ร้อยละ 2.6 ต่อปี ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจะ

ค่อนข้างน้อยเนื่องจากเป็นการบังแดดให้ผนังทึบที่มีมวลสารมาก ผลที่ได้จึงแตกต่างจากการบังแดดให้กับผนังกระจกดังเช่นงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมา แต่สิ่งสำคัญคือการลดค่า U-value ซึ่งจะทำให้สามารถผ่านเกณฑ์การคำนวณค่า OTTV ตามกฎกระทรวงพลังงานได้

จากผลของการศึกษาวิจัยจึงสามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเองจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการยื่นของก้อนอิฐและองศาแดดที่ทำมุมกับผนังในแต่ละเดือน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณเงาบนผนังจึงส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนัง โดยรูปแบบการเรียงอิฐที่แตกต่างกันในสัดส่วนการยื่นเท่ากันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนน้อยมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยกล่องทดลองเป็นระยะเวลา 3-4 เดือน ในช่วงเดือนมกราคมถึงเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์อ้อมใต้ ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจึงเลือกทำการทดลองกับผนังทางทิศใต้เป็นหลัก ข้อมูลที่ได้จึงอาจไม่ครอบคลุมผนังในทิศอื่นๆ รวมไปถึงช่วงเวลาอื่นๆ ของปีที่ดวงอาทิตย์อ้อมเหนือเช่นเดือนพฤษภาคมและมิถุนายน หรือตั้งฉากกับพื้นโลกเช่นเดือนเมษายน นอกจากนี้ยังอาจมีปัจจัยภายนอกอื่นๆ ที่อาจส่งผลต่อผลการทดลองทั้งค่าอุณหภูมิหรือการคำนวณค่า U-value ที่การวิจัยนี้ยังไม่ได้กล่าวถึง ทางผู้วิจัยจึงได้สรุปประเด็นข้อเสนอแนะไว้สำหรับการวิจัยในอนาคตดังนี้

5.2.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์

1. ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเทียบเท่ากับค่า U-value ที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ OTTV ของผนังอิฐที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง ทั้งนี้เพราะการคำนวณ OTTV ที่ใช้กันอยู่ไม่ครอบคลุมผนังอิฐชนิดนี้

2. สามารถประเมินประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอาคารที่มีรูปแบบของเปลือกอาคารที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง

3. สามารถนำผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเองไปประยุกต์ใช้กับอาคารจริงเพื่อการประหยัดพลังงาน โดยสามารถเลือกรูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานของอาคารแต่ละประเภท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อยอด

1. การทดลองในช่วงเวลาและทิศทางอื่นๆ ที่การวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุม เช่น ช่วงที่ดวงอาทิตย์อ้อมเหนือหรือทำมุมตั้งฉากกับพื้นโลกในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม และการวัดค่าที่องศาแดดที่มีความละเอียดมากกว่านี้จากทุก 10 ° เป็นทุก 5°

2. การใช้อุปกรณ์ที่ดีขึ้น เช่น การใช้ Solar Calorimeter ที่ได้มาตรฐานสูงกว่ากล่องทดลองในการทดสอบวัสดุโดยรับการแผ่รังสีความร้อนจากภายนอกและถ่ายเทสู่ภายในกล่องทดลองจนอุณหภูมิอากาศภายในกล่องมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และทำการดูดอากาศภายในออกมาเพื่อคำนวณปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้น

3. การทดลองกับอาคารจริง เนื่องจากผลที่ได้อาจจะมีความแตกต่างจากการทดลองด้วยกล่องทดลองที่มีขนาดจำกัด

4. การเรียงอิฐด้วยรูปแบบอื่นๆ เช่น การออกแบบลวดลายบนผนังอิฐให้มีรูเพื่อใช้ระบายอากาศควบคู่กับการบังแดด

5. การประยุกต์ใช้กับวัสดุอื่นๆ การนำรูปแบบการบังแดดด้วยตัวเองไปประยุกต์ใช้กันผนังชนิดอื่นๆ เช่นผนังไม้ ผนังเบาหรือคอนกรีต เป็นต้น

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยชิ้นนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาประสิทธิภาพด้านความร้อนของผนังที่มีการบังแดดด้วยตัวเอง ทั้งในด้านการคำนวณค่าประสิทธิภาพด้านพลังงานและแนวทางการนำผนังชนิดนี้ไปใช้ในการออกแบบอาคารในเขตร้อนชื้นเพื่อสร้างความสวยงามให้แก่อาคารและเป็นการประหยัดพลังงานควบคู่กัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

ณัฐกานต์ เกษประทุม (2543). พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของผนังอาคารที่มีมวลสารมาก . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรวรรณ เนตรพระ (2551). ประสิทธิผลของไม้เลื้อยที่มีผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังอาคาร .วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วัชพล โฆษะโก (2554). ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารที่มีการบังแดดด้วยรูปทรงอาคาร . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลับ.

อัญชนา สังขะกูล (2553). อิทธิพลของมวลสารผนังภายนอก และทิศทางที่มีผลต่อการประหยัดพลังงาน และสภาวะน่าสบายของอาคารพักอาศัยในภูมิอากาศร้อนชื้น .วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Al-Tamimi, N. A. and S. F. S. Fadzil (2011). "The Potential of Shading Devices for Temperature Reduction in High-Rise Residential Buildings in the Tropics." Procedia Engineering **21**: 273-282.

Arifin, N. A. and Z. Denan (2015). "An Analysis of Indoor Air Temperature and Relative Humidity in Office Room with Various External Shading Devices in Malaysia." Procedia - Social and Behavioral Sciences **179**: 290-296.

Balogun, A. A., T. E. Morakinyo and O. B. Adegun (2014). "Effect of tree-shading on energy demand of two similar buildings." Energy and Buildings **81**: 305-315.

Berry, R., S. J. Livesley and L. Aye (2013). "Tree canopy shade impacts on solar irradiance received by building walls and their surface temperature." Building and Environment **69**: 91-100.

Capeluto, I. G. (2003). "Energy performance of the self-shading building envelope." Energy and Buildings **35**(3): 327-336.

Chan, A. L. S. (2012). "Effect of adjacent shading on the thermal performance of residential buildings in a subtropical region." Applied Energy **92**: 516-522.

Freewan, A. A. Y. (2014). "Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions." Solar Energy **102**: 14-30.

Meng, Q. and L. Zhang (2006). "The rooftop shading system of the Humanities Building at SCUT." Energy and Buildings **38**(11): 1356-1359.

Papadakis, G., P. Tsamis and S. Kyritsis (2001). "An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings." Energy and Buildings **33**(8): 831-836.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางการหาค่า U_{eff} ของการทดลองที่ 1.1

เวลา	Q (W)				U (W/(m^2°C))							
					E.P. 15%				E.P. 25%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
7:00	2.17	4.55	2.60	2.38	3.13	3.80	2.58	2.52	4.30	3.61	2.95	2.52
7:05	2.17	4.12	2.82	2.60	3.13	3.84	2.48	2.43	4.30	3.63	2.98	2.95
7:10	2.60	5.20	2.60	3.25	3.18	3.75	2.58	2.87	4.13	3.59	3.18	2.87
7:15	1.95	3.90	3.47	2.60	3.10	3.87	2.75	3.44	3.87	3.64	3.24	5.90
7:20	2.17	4.33	2.82	1.73	3.13	3.82	2.63	1.62	3.82	3.82	3.19	1.53
7:25	1.73	5.20	3.47	2.17	3.06	3.93	2.75	1.81	3.93	3.59	3.24	1.64
7:30	1.52	4.77	3.03	2.60	3.01	3.78	2.68	2.29	4.01	3.60	3.21	2.17
7:35	3.03	5.63	4.12	4.33	3.21	3.73	2.84	2.75	3.70	3.44	3.27	2.65
7:40	2.82	4.98	3.47	4.55	3.19	3.77	2.90	3.01	3.73	3.60	3.44	2.68
7:45	2.60	5.85	3.25	3.90	3.18	3.87	2.87	2.95	3.75	3.44	3.44	2.69
7:50	2.17	5.63	4.12	3.03	3.13	3.58	2.97	2.83	3.82	3.44	3.44	2.53
7:55	1.95	4.55	3.47	4.12	3.10	3.61	2.75	2.97	3.87	3.14	3.44	2.72
8:00	3.47	5.42	4.12	4.55	3.24	3.58	2.84	3.14	3.93	3.44	3.44	2.89
8:05	4.33	6.28	4.33	5.85	3.28	3.69	2.87	3.10	3.82	3.56	3.44	3.00
8:10	1.95	5.85	3.68	4.55	2.81	3.32	2.92	3.14	3.87	3.32	3.44	3.01
8:15	1.95	6.07	3.90	4.12	2.81	3.57	2.95	3.27	4.42	3.44	3.44	2.84
8:20	2.38	5.63	3.03	4.12	2.70	3.44	2.83	3.27	3.78	3.44	3.44	2.97
8:25	3.68	7.15	5.85	5.85	3.25	3.55	3.20	3.32	3.90	3.55	3.44	3.10
8:30	2.17	5.85	2.82	4.55	2.87	3.44	2.98	3.28	3.82	3.44	3.44	3.01
8:35	4.33	7.15	5.85	6.94	3.13	3.55	3.20	3.34	3.62	3.44	3.44	3.24
8:40	3.90	6.50	5.63	6.07	2.95	3.56	3.08	3.32	3.64	3.44	3.44	3.21
8:45	2.82	6.07	5.42	4.98	2.80	3.44	3.19	3.30	3.73	3.32	3.44	3.30
8:50	2.17	4.77	4.12	4.98	2.87	3.44	3.11	3.16	4.30	3.29	3.44	3.30
8:55	2.82	5.42	4.77	4.98	2.98	3.44	3.15	3.16	3.73	3.19	3.44	3.30
9:00	4.55	6.72	4.98	5.20	3.28	3.44	3.16	3.06	3.80	3.33	3.60	3.30
9:05	4.33	5.85	4.33	5.63	3.28	3.20	3.44	2.98	3.82	3.20	3.44	3.31
9:10	5.85	7.37	6.50	6.28	3.20	3.44	3.33	2.93	3.57	3.34	3.44	3.33
9:15	6.07	7.37	6.07	6.72	3.21	3.44	3.32	2.96	3.57	3.34	3.44	3.33
9:20	6.07	8.02	5.42	6.94	3.21	3.44	3.19	2.98	3.57	3.35	3.44	3.34
9:25	6.94	7.80	5.85	6.72	3.24	3.44	3.32	3.05	3.55	3.26	3.44	3.33
9:30	6.72	6.50	3.25	5.85	3.14	3.44	3.04	3.00	3.55	3.33	3.23	3.20
9:35	5.42	7.59	5.42	6.72	2.87	3.25	3.19	2.96	3.31	3.25	3.31	3.23
9:40	3.03	5.85	4.33	4.12	2.68	3.32	3.28	2.72	3.44	3.10	3.62	3.11
9:45	7.37	7.15	6.28	6.94	3.00	3.34	3.22	2.98	3.54	3.34	3.56	3.34

เวลา	Q (W)				U (W/(m^2°C))							
					E.P. 15%				E.P. 25%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
9:50	3.03	4.55	2.17	4.55	2.53	3.14	2.87	2.78	3.44	2.89	3.82	3.14
9:55	1.30	4.55	3.68	4.77	2.06	3.28	2.92	3.03	4.13	3.01	3.44	3.29
10:00	3.47	6.72	4.33	6.50	2.75	3.33	2.99	3.13	3.67	3.14	3.28	3.23
10:05	2.60	7.59	4.77	5.63	2.58	3.34	3.36	2.98	3.75	3.17	3.15	3.19
10:10	3.47	6.72	5.63	6.28	2.90	3.14	3.38	3.02	3.67	3.05	3.31	3.22
10:15	4.55	6.50	4.98	4.55	2.89	3.23	3.23	2.78	3.61	3.04	3.16	3.14
10:20	4.12	6.94	5.42	5.85	2.72	3.15	3.25	3.00	3.44	3.06	3.07	3.32
10:25	3.90	6.72	6.28	6.28	2.81	3.14	3.27	2.93	3.64	3.05	3.22	3.33
10:30	4.55	6.94	0.87	6.28	2.78	3.06	2.50	2.93	3.44	2.98	2.29	3.22
10:35	4.12	6.50	1.08	5.42	2.84	3.04	2.65	2.77	3.63	3.04	2.87	3.07
10:40	3.25	7.15	1.30	3.90	2.58	3.15	2.75	2.69	3.44	3.07	3.44	2.95
10:45	4.33	5.63	1.08	8.02	2.75	2.80	2.29	3.03	3.44	2.80	3.44	3.18
10:50	5.42	8.45	3.90	7.15	2.87	3.12	3.02	2.91	3.58	3.05	3.26	3.15
10:55	4.98	6.07	3.90	6.72	2.83	3.01	3.18	2.96	3.44	3.01	3.44	3.23
11:00	5.20	7.59	3.25	8.45	2.75	2.94	3.13	3.12	3.44	2.94	3.44	3.19
11:05	5.20	6.72	5.20	7.59	2.85	2.96	3.24	3.01	3.59	2.96	3.44	3.17
11:10	6.07	7.37	7.15	8.02	2.83	3.00	3.29	2.89	3.44	3.00	3.44	2.96
11:15	6.50	6.72	7.15	8.02	2.95	2.81	3.34	3.10	3.44	2.81	3.44	3.10
11:20	5.20	8.45	6.72	8.45	2.75	2.92	3.33	3.19	3.44	2.85	3.33	3.12
11:25	6.72	8.89	4.12	8.45	2.88	3.00	3.11	3.12	3.44	2.88	3.11	3.12
11:30	6.72	8.45	6.50	8.02	2.81	2.92	3.23	2.96	3.33	2.85	3.23	2.89
11:35	7.15	9.97	6.50	9.75	2.84	2.88	3.23	3.10	3.44	2.88	3.23	3.04
11:40	7.15	11.49	6.94	9.10	2.84	3.04	3.24	3.01	3.44	2.94	3.34	2.89
11:45	8.02	10.19	7.15	9.75	2.96	3.05	3.24	3.16	3.35	2.84	3.24	2.98
11:50	9.32	9.32	7.59	10.62	2.84	2.90	3.17	3.01	3.29	2.74	3.17	3.01
11:55	8.67	12.14	8.67	13.44	2.81	3.01	3.20	3.09	3.20	2.88	3.20	3.05
12:00	7.80	8.24	8.02	11.05	2.75	2.84	3.10	2.97	3.10	2.67	3.10	2.97
12:05	9.97	10.40	5.85	11.92	2.99	2.95	2.90	3.00	3.16	2.80	2.90	2.96
12:10	7.37	10.84	8.67	9.54	3.16	2.97	3.06	2.97	3.08	2.87	2.93	2.91
12:15	7.59	11.27	8.67	11.27	3.34	2.98	3.06	2.93	3.01	2.84	2.99	2.93
12:20	7.59	11.49	8.02	11.49	3.17	2.99	3.03	2.99	2.94	2.85	2.96	2.94
12:25	7.80	12.79	10.19	11.05	3.26	3.03	3.11	2.92	3.02	2.86	3.05	2.88
12:30	7.80	12.35	10.40	12.79	3.26	2.97	3.12	3.03	2.95	2.84	3.00	2.94
12:35	8.45	12.57	8.45	12.14	3.05	2.98	3.05	2.96	2.85	2.85	2.92	2.88
12:40	9.32	13.00	8.24	14.95	3.15	3.13	2.97	3.04	2.90	2.91	2.84	2.97
12:45	5.63	12.35	8.45	12.35	3.31	3.16	2.85	3.02	2.71	2.88	2.85	2.93

เวลา	Q (W)				U (W/(m^2 °C))							
					E.P. 15%				E.P. 25%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
12:50	6.50	14.09	8.89	15.60	3.33	3.11	2.88	3.02	2.72	2.94	2.88	2.98
12:55	9.97	14.74	8.24	15.17	3.30	3.16	2.84	3.05	2.93	3.00	2.78	2.97
13:00	6.07	14.09	7.37	16.47	3.21	3.11	2.85	3.04	2.60	2.94	2.78	3.01
13:05	6.50	14.74	8.67	14.30	3.33	3.12	2.87	3.11	2.65	2.96	2.81	2.99
13:10	6.72	15.60	9.75	15.60	3.23	3.14	2.98	3.14	2.67	2.95	2.87	3.02
13:15	7.37	16.04	9.54	14.30	3.16	3.14	3.03	3.15	2.66	2.96	2.91	2.95
13:20	6.94	14.52	8.67	16.47	2.98	3.07	2.93	3.08	2.62	2.88	2.87	2.94
13:25	6.50	11.49	8.24	13.87	2.95	2.99	2.97	3.06	2.52	2.76	2.78	2.90
13:30	4.77	13.87	8.67	14.09	2.70	3.06	2.93	2.98	2.29	2.86	2.81	2.87
13:35	5.20	13.00	7.15	13.22	2.85	3.04	2.91	2.91	2.43	2.79	2.70	2.80
13:40	5.85	13.22	8.45	13.44	3.10	3.04	2.98	2.88	2.44	2.80	2.80	2.77
13:45	5.20	12.79	8.89	13.65	2.95	2.98	3.00	2.89	2.29	2.74	2.77	2.81
13:50	5.20	13.22	9.97	11.70	3.06	3.00	3.10	2.86	2.36	2.80	2.88	2.73
13:55	5.85	12.79	9.75	11.27	3.10	2.98	3.16	2.80	2.38	2.78	2.92	2.71
14:00	5.85	13.44	11.27	10.62	3.00	3.00	3.14	2.76	2.32	2.81	2.93	2.72
14:05	4.55	12.79	10.19	11.70	3.01	2.98	3.11	2.81	2.26	2.78	2.89	2.81
14:10	3.25	13.22	11.70	12.35	2.72	2.96	3.20	2.93	1.84	2.76	3.00	2.88
14:15	4.55	14.74	12.35	11.27	2.89	3.04	3.21	2.84	2.06	2.82	2.97	2.80
14:20	3.47	12.79	12.14	13.00	2.39	2.98	3.16	2.87	1.72	2.74	2.92	2.83
14:25	4.33	13.65	11.05	13.22	2.55	3.10	3.13	2.91	1.91	2.81	2.83	2.84
14:30	4.98	15.17	10.84	13.87	2.73	3.09	3.13	2.94	1.98	2.83	2.82	2.86
14:35	3.47	15.60	11.49	13.87	2.39	3.06	3.14	2.94	1.62	2.81	2.89	2.82
14:40	4.98	16.90	13.22	14.30	2.73	3.05	3.13	2.91	1.98	2.85	2.87	2.87
14:45	3.25	13.00	11.70	14.52	2.46	2.95	3.15	2.92	1.56	2.75	2.86	2.88
14:50	2.17	13.22	10.84	13.44	2.65	2.96	3.07	2.92	1.43	2.69	2.73	2.81
14:55	3.25	13.44	8.45	15.60	2.58	2.96	2.92	2.98	1.72	2.70	2.53	2.88
15:00	2.82	15.17	8.89	15.82	2.35	3.01	2.94	2.99	1.40	2.80	2.56	2.89
15:05	5.42	14.30	11.70	16.69	2.69	3.03	3.00	3.01	1.95	2.77	2.73	2.88
15:10	4.12	16.25	12.35	17.34	2.51	3.04	2.97	3.02	1.63	2.77	2.80	2.90
15:15	7.80	14.52	12.79	14.52	2.88	2.99	3.08	2.99	2.17	2.71	2.74	2.85
15:20	3.25	14.74	11.05	14.95	2.24	3.00	2.97	2.97	1.39	2.69	2.62	2.86
15:25	3.25	13.44	10.40	16.90	2.35	3.00	2.90	3.01	1.39	2.63	2.54	2.89
15:30	1.52	11.49	5.85	10.40	1.61	2.89	2.65	2.80	0.83	2.53	2.16	2.62
15:35	2.60	8.45	2.82	13.22	2.17	2.74	2.13	2.87	1.15	2.31	1.54	2.73
15:40	0.43	12.35	3.25	12.35	0.63	2.88	2.24	2.88	0.25	2.58	1.66	2.69
15:45	-1.52	7.59	1.30	10.62	-8.03	2.68	1.38	2.81	-1.00	2.23	0.76	2.55

เวลา	Q (W)				U (W/(m^2°C))							
					E.P. 15%				E.P. 25%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
15:50	0.87	12.79	1.08	8.02	0.92	2.94	1.23	2.60	0.34	2.57	0.54	2.31
15:55	-0.22	9.10	0.22	6.50	-0.34	2.83	0.34	2.40	-0.10	2.33	0.13	2.15
16:00	0.22	11.05	4.33	3.90	0.29	2.74	2.37	1.94	0.08	2.44	1.56	1.72
16:05	1.95	8.24	4.12	4.33	1.55	2.61	2.42	2.02	0.63	2.18	1.52	1.81
16:10	0.65	9.54	3.03	4.33	0.79	2.70	2.09	2.02	0.25	2.29	1.34	1.86
16:15	1.95	10.40	5.42	1.52	1.47	2.75	2.53	1.15	0.63	2.39	1.83	1.00
16:20	6.28	4.55	2.82	4.12	2.56	2.26	2.13	2.04	1.43	1.76	1.32	1.87
16:25	1.95	5.63	2.17	2.38	1.72	2.56	1.81	1.58	0.62	1.94	1.15	1.40
16:30	-0.65	0.65	4.98	1.08	-1.47	0.79	2.64	0.96	-0.28	0.45	1.88	0.82
16:35	-2.60	1.73	3.68	2.17	20.64	1.45	2.34	1.50	-1.47	0.95	1.58	1.32
16:40	-1.30	6.72	7.37	1.30	-5.16	2.54	2.92	1.03	-0.65	2.05	2.29	0.94
16:45	1.30	5.85	7.15	1.30	1.38	2.44	2.84	1.03	0.44	1.90	2.18	0.98
16:50	2.82	9.97	-0.43	2.82	2.03	2.83	-1.72	1.60	0.83	2.33	-0.40	1.60
16:55	1.52	6.72	3.90	2.38	1.61	2.54	2.58	1.46	0.51	1.94	1.72	1.46
17:00	0.65	5.42	2.17	3.47	0.79	2.39	2.29	1.78	0.24	1.83	1.27	1.78
17:05	1.95	8.89	2.82	3.68	1.93	2.77	2.48	1.89	0.64	2.27	1.49	1.83
17:10	1.73	1.52	-0.65	5.63	1.97	1.50	-10.32	2.29	0.60	0.89	-0.79	2.24
17:15	1.30	2.82	5.63	6.50	2.06	2.03	2.98	2.40	0.50	1.40	2.35	2.40
17:20	-0.87	3.47	3.25	5.85	-6.88	2.39	2.87	2.32	-0.55	1.72	2.06	2.32
17:25	0.65	3.03	1.95	5.85	1.29	2.19	3.10	2.32	0.37	1.55	1.82	2.27
17:30	0.65	3.47	1.30	7.15	2.06	2.29	2.58	2.42	0.41	1.72	1.72	2.42
17:35	-0.43	3.03	2.38	6.72	-3.44	2.09	3.44	2.37	-0.33	1.66	2.36	2.37
17:40	-1.73	3.47	2.17	5.85	9.17	2.39	3.44	2.32	-2.29	1.83	2.46	2.32
17:45	-1.52	3.47	0.43	3.90	8.03	2.39	N/A	2.00	-2.19	1.83	0.98	2.00
17:50	-3.03	3.03	1.30	4.33	4.82	2.41	4.30	2.15	-16.05	1.85	2.29	2.15
17:55	-1.08	3.25	1.73	3.90	4.82	2.46	6.88	2.14	-1.56	1.91	2.29	2.14

ตารางการหาค่า Ueff ของการทดลองที่ 1.2

เวลา	Q (W)				U (W/(m2 °C))							
					E.P. 20%				E.P. 45%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
7:00	1.95	2.38	1.08	1.95	3.87	6.31	3.44	2.38	5.16	9.46	-3.44	2.58
7:05	1.95	1.73	1.08	1.52	3.44	9.17	2.87	2.01	4.42	27.52	-5.73	2.19
7:10	2.17	3.03	0.22	1.73	3.44	5.35	3.44	2.12	4.30	6.88	-0.43	2.29
7:15	1.73	2.38	0.43	1.30	3.44	6.31	4.13	1.88	4.59	9.46	-0.98	2.06
7:20	1.95	3.03	1.30	1.95	3.44	5.35	2.95	2.21	4.42	6.88	-10.32	2.38
7:25	1.95	2.82	0.65	1.08	3.44	5.59	3.44	1.72	4.42	7.45	-2.06	1.91
7:30	2.38	3.03	0.87	1.52	3.44	5.35	2.75	2.01	4.20	6.88	-4.59	2.19
7:35	3.47	3.90	1.73	3.25	3.44	4.76	3.06	2.58	3.93	5.63	27.52	2.72
7:40	2.17	3.90	1.52	2.60	3.44	4.76	2.68	2.43	4.30	5.63	-4.56	2.43
7:45	2.60	3.25	1.52	2.38	3.44	5.16	3.01	2.23	4.13	6.45	-24.08	2.23
7:50	2.60	2.82	1.08	2.17	3.44	5.59	2.87	2.29	4.13	7.45	-5.73	2.29
7:55	2.38	3.47	0.65	1.95	3.44	5.00	2.58	2.21	4.20	6.12	-2.58	2.38
8:00	1.95	3.47	2.17	2.82	3.44	5.00	3.13	2.48	4.42	6.12	11.47	2.63
8:05	3.03	4.12	1.95	3.03	3.44	4.67	3.10	2.53	4.01	5.94	15.48	2.53
8:10	3.03	4.33	2.38	1.95	3.44	4.30	3.15	2.21	4.01	5.29	12.61	2.21
8:15	2.82	3.68	2.38	2.60	3.44	4.50	3.15	2.43	4.07	5.85	9.46	2.29
8:20	1.95	3.25	1.73	2.38	3.44	4.69	2.75	2.37	4.42	6.45	27.52	2.37
8:25	4.12	4.77	2.82	4.12	3.44	4.20	2.98	2.84	3.84	5.41	7.45	2.72
8:30	2.60	3.47	2.17	3.25	3.44	4.59	3.13	2.46	4.13	6.12	17.20	2.46
8:35	4.33	5.20	4.33	5.63	3.62	4.35	3.28	2.98	3.82	5.50	5.29	2.89
8:40	3.03	5.20	3.03	4.12	3.44	4.35	3.21	2.72	4.01	5.50	6.88	2.61
8:45	3.25	4.33	2.17	4.98	3.69	4.30	2.87	2.93	3.97	6.25	11.47	2.83
8:50	1.73	3.47	1.08	1.95	3.93	5.00	2.87	2.21	4.59	7.86	-8.60	2.21
8:55	3.03	3.47	2.38	3.68	3.44	5.00	3.15	2.66	4.01	9.17	7.57	2.44
9:00	4.33	4.55	1.30	4.98	3.44	4.01	2.95	2.73	3.82	5.56	-20.64	2.64
9:05	2.82	4.55	1.30	3.03	3.44	4.25	2.95	2.68	4.07	6.02	0.00	2.53
9:10	4.55	3.25	2.82	2.60	3.44	4.69	2.98	2.58	3.80	7.37	5.59	2.43
9:15	4.33	4.33	2.82	2.60	3.62	4.30	2.98	2.58	3.82	5.73	4.97	2.43
9:20	4.77	3.90	3.68	3.03	3.60	4.13	3.08	2.53	3.98	5.16	4.50	2.41
9:25	3.25	3.90	3.03	3.47	3.44	4.76	3.01	2.62	3.69	5.16	4.38	2.50
9:30	3.25	2.82	1.52	1.73	3.69	4.97	2.68	2.12	3.97	6.39	4.82	1.83
9:35	3.90	2.82	2.17	3.25	3.64	4.97	2.87	2.58	3.87	6.39	4.30	2.35
9:40	1.95	2.17	1.95	2.82	3.87	5.73	2.81	2.63	4.42	8.60	3.87	2.24
9:45	2.60	2.82	2.60	3.47	3.44	4.97	3.18	2.62	4.13	5.59	3.44	2.39

เวลา	Q (W)				U (W/(m2 °C))							
					E.P. 20%				E.P. 45%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
9:50	0.00	0.00	0.43	1.08	0.00	3.44	1.72	1.72	0.00	0.00	1.72	1.43
9:55	1.30	1.08	-0.65	0.65	4.13	17.20	10.32	1.29	4.13	8.60	2.43	0.94
10:00	2.17	-0.22	-0.22	1.52	3.82	1.15	-3.44	2.19	3.82	1.15	-1.72	1.72
10:05	1.30	1.30	0.00	2.38	4.13	5.16	0.00	2.52	4.13	4.13	0.00	2.10
10:10	1.73	1.73	1.30	2.82	3.44	6.88	2.58	2.63	3.44	4.59	1.88	2.13
10:15	2.60	1.08	1.52	1.95	3.75	5.73	2.41	2.21	3.18	3.44	1.85	1.63
10:20	3.47	1.52	-0.22	1.73	3.67	4.82	-1.15	2.12	3.06	3.01	-0.57	1.45
10:25	3.68	1.95	0.65	2.38	3.66	5.16	1.47	2.37	2.92	3.10	1.03	1.80
10:30	3.68	0.65	0.87	1.73	3.44	10.32	1.72	2.12	2.92	2.06	1.06	1.45
10:35	4.33	1.08	1.08	2.17	3.62	5.73	1.91	2.29	2.99	2.46	1.15	1.56
10:40	3.68	-0.43	1.08	1.95	3.44	2.46	1.91	2.21	2.92	N/A	1.15	1.47
10:45	4.33	0.65	1.95	3.03	3.44	10.32	2.58	2.53	2.87	1.72	1.55	1.85
10:50	4.77	1.52	1.30	3.25	3.29	4.82	1.88	2.58	2.80	2.41	1.09	1.84
10:55	4.12	0.65	0.00	2.38	3.44	10.32	0.00	2.37	2.72	1.29	0.00	1.58
11:00	4.12	-0.87	-0.87	3.03	3.44	2.75	-13.76	2.41	2.61	-6.88	-1.38	1.72
11:05	4.12	0.00	0.65	1.73	3.27	0.00	1.72	1.97	2.51	0.00	0.69	1.20
11:10	3.47	1.52	0.22	0.87	3.24	4.82	0.57	1.38	2.39	2.01	0.23	0.72
11:15	4.55	0.43	0.43	2.82	3.44	N/A	1.15	2.24	2.58	0.86	0.40	1.60
11:20	3.90	0.87	-0.22	0.43	3.44	4.59	-1.15	0.86	2.48	1.38	-0.25	0.40
11:25	4.55	1.52	1.30	3.03	3.28	4.01	2.06	2.29	2.49	1.72	0.98	1.66
11:30	3.90	2.38	0.22	3.68	3.10	3.78	0.69	2.54	2.21	2.10	0.20	1.77
11:35	3.47	2.82	1.73	4.33	3.44	3.73	2.12	2.55	2.29	2.35	1.10	1.86
11:40	4.55	2.82	1.52	2.60	3.28	3.73	2.41	2.17	2.41	2.13	1.09	1.42
11:45	4.77	2.17	1.73	4.33	3.29	3.44	2.12	2.46	2.37	1.81	1.10	1.76
11:50	4.55	2.17	1.52	5.42	3.01	3.44	2.01	2.61	2.26	1.81	1.05	1.95
11:55	6.07	3.47	1.30	5.85	3.11	3.44	2.06	2.65	2.47	2.12	0.94	2.06
12:00	3.47	3.68	3.68	5.20	2.90	3.25	2.78	2.58	1.97	2.02	1.83	1.97
12:05	3.03	2.17	3.03	5.20	3.01	2.87	2.53	2.50	1.93	1.50	1.55	1.88
12:10	4.12	4.12	4.77	5.42	3.11	2.97	2.91	2.46	2.18	2.04	1.99	1.83
12:15	3.68	3.25	4.33	5.63	3.25	2.87	2.87	2.48	2.17	1.84	1.86	1.90
12:20	3.47	4.12	5.85	6.50	3.24	2.97	2.90	2.52	2.20	1.98	2.06	1.98
12:25	4.33	4.33	4.33	8.24	3.28	2.87	2.65	2.78	2.37	2.02	1.72	2.22
12:30	4.33	5.20	3.90	8.02	3.28	2.95	2.58	2.71	2.37	2.12	1.67	2.16
12:35	3.47	5.63	3.47	6.28	3.24	2.98	2.50	2.56	2.12	2.13	1.57	1.96
12:40	3.47	4.77	3.47	7.15	3.44	2.91	2.50	2.64	2.20	1.99	1.57	2.03
12:45	1.95	4.98	3.90	6.94	3.44	3.04	2.69	2.56	1.72	2.03	1.72	1.97

เวลา	Q (W)				U (W/(m2 °C))							
					E.P. 20%				E.P. 45%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
12:50	2.38	4.55	4.77	8.24	3.15	3.01	2.70	2.72	1.80	1.95	1.85	2.14
12:55	3.68	6.07	4.55	8.24	3.44	3.11	2.78	2.72	2.09	2.19	1.81	2.14
13:00	2.60	5.20	6.07	7.37	3.44	2.95	3.11	2.66	1.88	1.97	2.09	2.05
13:05	3.03	3.68	4.98	6.94	3.44	2.92	2.83	2.62	2.01	1.72	1.84	2.00
13:10	3.03	2.60	6.28	8.45	3.21	2.58	2.93	2.74	2.01	1.38	2.04	2.13
13:15	2.82	2.38	5.85	7.80	3.44	2.52	2.90	2.69	2.03	1.30	1.90	2.10
13:20	2.82	4.33	5.20	6.94	3.19	2.99	2.85	2.56	2.03	1.81	1.79	1.93
13:25	5.42	5.42	4.33	7.37	3.44	2.87	2.75	2.66	2.53	1.95	1.60	2.02
13:30	4.12	4.12	4.12	8.67	3.44	2.84	2.72	2.70	2.25	1.72	1.63	2.12
13:35	1.08	4.33	3.47	7.80	2.87	2.99	2.50	2.69	1.08	1.81	1.45	2.06
13:40	1.73	4.33	4.12	6.50	3.06	2.99	2.61	2.52	1.45	1.76	1.56	1.88
13:45	4.12	4.77	5.42	7.80	3.27	2.91	2.87	2.69	2.18	1.80	1.79	2.03
13:50	4.12	6.28	5.20	8.24	3.27	2.93	2.66	2.72	2.11	2.00	1.72	2.04
13:55	4.33	6.28	5.85	7.80	3.28	3.12	2.81	2.63	2.08	2.04	1.82	1.97
14:00	2.17	6.94	5.42	10.19	2.87	2.98	2.77	2.79	1.43	2.04	1.72	2.16
14:05	3.47	5.85	4.55	6.28	2.90	3.00	2.68	2.43	1.78	1.90	1.57	1.72
14:10	0.65	6.07	4.55	5.42	1.72	2.92	2.68	2.39	0.54	1.93	1.54	1.59
14:15	1.52	7.15	2.60	6.72	2.41	2.99	2.43	2.54	1.05	1.99	1.12	1.78
14:20	2.82	6.72	3.25	8.24	3.19	3.05	2.58	2.67	1.66	1.97	1.26	1.95
14:25	0.87	6.50	5.20	6.94	2.29	2.95	2.85	2.56	0.72	1.91	1.65	1.80
14:30	2.60	6.28	4.33	7.15	2.95	3.02	2.75	2.52	1.53	1.88	1.43	1.80
14:35	1.08	6.72	3.90	7.80	2.87	2.96	2.69	2.63	0.86	1.90	1.35	1.88
14:40	1.95	5.85	4.55	8.45	2.81	3.00	2.68	2.63	1.24	1.82	1.44	1.92
14:45	0.65	5.85	3.90	7.15	2.06	2.90	2.69	2.58	0.54	1.82	1.32	1.77
14:50	1.52	6.72	3.25	6.07	3.44	3.05	2.58	2.47	1.09	1.90	1.15	1.63
14:55	0.43	7.59	2.17	8.02	3.44	3.01	2.29	2.60	0.40	1.97	0.86	1.82
15:00	4.12	7.15	1.52	6.72	3.63	2.99	2.19	2.48	1.92	1.89	0.65	1.67
15:05	4.12	6.28	3.90	8.24	3.44	2.93	2.95	2.61	1.82	1.78	1.29	1.82
15:10	0.87	6.50	1.52	6.94	2.29	3.04	2.68	2.50	0.57	1.81	0.67	1.69
15:15	3.25	6.50	3.03	8.89	3.04	2.95	2.68	2.66	1.47	1.75	1.07	1.88
15:20	0.43	4.98	0.65	7.80	1.72	2.83	1.72	2.58	0.30	1.55	0.31	1.74
15:25	-1.30	3.47	0.43	7.15	6.88	2.75	1.15	2.58	-1.21	1.28	0.21	1.67
15:30	0.00	5.63	-0.65	2.82	0.00	2.89	-10.32	1.86	0.00	1.66	-0.34	0.93
15:35	-1.08	3.03	-1.30	3.68	4.30	2.68	10.32	2.02	-0.96	1.12	-0.74	1.10
15:40	-2.82	3.90	-4.12	1.73	4.07	2.58	4.36	1.38	-4.07	1.26	-4.67	0.63
15:45	-0.65	4.12	-1.52	1.30	-10.32	2.72	12.04	1.21	-0.45	1.33	-0.89	0.48

เวลา	Q (W)				U (W/(m2°C))							
					E.P. 20%				E.P. 45%			
	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°	50°	60°	70°	80°
15:50	-3.47	2.38	-2.60	0.87	4.59	2.52	5.90	0.86	-4.23	0.86	-1.88	0.31
15:55	-0.87	6.72	0.00	4.33	4.59	2.96	0.00	2.08	-0.53	1.52	0.00	1.08
16:00	-2.60	4.98	0.87	5.42	5.90	2.64	1.53	2.26	-2.06	1.18	0.35	1.26
16:05	-3.25	3.90	1.95	6.72	5.16	2.69	2.21	2.48	-2.87	0.98	0.69	1.46
16:10	0.87	8.24	-0.87	9.75	1.53	3.04	-13.76	2.67	0.36	1.56	-0.44	1.80
16:15	-1.73	7.15	2.17	6.28	1.53	2.84	2.29	2.38	-0.98	1.44	0.72	1.43
16:20	-1.52	5.85	0.00	7.37	-24.08	2.90	0.00	2.49	-0.86	1.29	0.00	1.60
16:25	-3.25	1.95	-2.38	10.84	5.73	2.21	12.61	2.77	-2.72	0.57	-0.95	1.95
16:30	-2.60	1.73	1.52	4.33	8.26	2.12	1.72	2.22	-1.79	0.53	0.40	1.21
16:35	1.52	3.25	0.00	8.02	1.61	2.58	0.00	2.65	0.57	0.89	0.00	1.72
16:40	1.30	6.94	-7.59	8.24	1.59	2.98	4.01	2.61	0.52	1.45	-8.60	1.74
16:45	1.52	6.28	-3.68	7.80	1.72	2.93	5.32	2.58	0.59	1.41	-1.95	1.72
16:50	-2.38	4.55	-0.87	8.45	9.46	2.89	-13.76	2.63	-1.65	1.17	-0.35	1.79
16:55	-1.95	0.87	2.17	6.72	15.48	2.29	2.65	2.54	-1.29	0.33	0.69	1.62
17:00	-1.30	6.28	2.38	7.59	-20.64	3.22	2.70	2.68	-0.76	1.49	0.76	1.77
17:05	-1.95	3.90	3.03	5.20	15.48	3.10	3.01	2.50	-1.29	1.13	0.94	1.45
17:10	-3.03	1.08	1.52	5.20	8.03	2.46	2.68	2.50	-2.53	0.41	0.57	1.47
17:15	-3.68	2.82	0.43	4.33	5.32	3.19	2.29	2.46	-4.18	0.93	0.20	1.38
17:20	-3.47	-2.60	-3.25	2.60	5.50	3.75	3.97	2.17	-4.59	-2.17	-3.04	1.03
17:25	-5.85	1.30	-3.03	0.00	4.04	4.13	3.70	0.00	30.96	0.63	-3.01	0.00
17:30	-3.47	0.43	-0.87	0.22	4.59	N/A	4.59	0.43	-7.86	0.28	-0.55	0.12
17:35	-2.38	1.30	-0.65	-0.43	5.41	5.16	3.44	1.15	-3.78	0.76	-0.41	-0.28
17:40	-4.12	1.52	-5.85	0.43	4.36	6.02	3.44	0.86	-32.68	0.96	92.88	0.25
17:45	-3.90	1.52	-3.47	-1.73	4.42	4.82	3.24	27.52	-30.96	0.93	-7.86	-1.53
17:50	-3.90	1.73	-0.87	-1.08	4.42	4.59	2.75	-17.20	-3.40	1.06	-0.86	-0.86
17:55	-4.33	1.08	-2.17	-1.52	4.30	5.73	2.87	N/A	34.40	0.82	-8.60	-1.34

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนาบดินทร์ สิปปภากุล เกิดวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2535 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University