

สมรรถนะด้านพลังงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา



นายตну กัตัญญุตานันท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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.

THERMAL PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT NOCTURNAL ROOF RADIATOR



Mr. Danu Katunyutanunt

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมรรถนะด้านพลังงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมอลเบา
โดย	นายคณ กัตัญญุตานันท์
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถจัน เศรษฐบุต

---

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์ศักดิ์ วัฒนสินธุ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถจัน เศรษฐบุต)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ณรงค์วิทย์ อารีมิตร)

ดนู กัตัญญุตานันท์ : สมรรถนะด้านพลังงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา. (THERMAL PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT NOCTURNAL ROOF RADIATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อรรถนธ์ เศรษฐบุตร์, 104 หน้า.

ในปัจจุบัน โลกกำลังประสบปัญหาด้านวิกฤติพลังงาน การพัฒนาการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ชีวิตในสังคมเมืองเริ่มมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ Baruch Givoni ได้เสนอแนวทางในชื่อว่า "หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา" (เป็นการแปลงจาก Lightweight nocturnal roof radiators) โดยใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนรูปแบบหลังคา โดยในเวลากลางคืนใช้การแผ่รังสีความร้อน ประกอบกับการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบายอากาศเพื่อทำความเย็น และในเวลากลางวัน ใช้ความเป็นฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคาร

จากการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่เกิดขึ้นจากระบบพบว่า หลังคาเหล็กสีดำ ช่องว่างใต้หลังคา 10 cm. มีความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าได้ดีที่สุด หลังจากนั้น เมื่อได้ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม VisualDOE โดยทดสอบกับบ้านจากโครงการ แบบบ้านยืม ของสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย สังกัดกรุงเทพมหานคร ในช่วงเวลาที่ไม่ใช้ฤดูฝน พบว่าสามารถเพิ่มจำนวนชั่วโมงนำสบายภายในอาคาร ในช่วงที่มีการใช้งาน ตลอดทั้งปีได้มากขึ้นกว่า 1.7 เท่า และสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารตัวอย่างได้ เฉลี่ย 2.43°C

เมื่อทำการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในแง่พลังงาน และทางการเงิน โดยเปรียบเทียบกับการติดตั้งเครื่องปรับอากาศในระบบปรกติ พบว่ามีความคุ้มค่าของการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยคิดเป็น 146.59 kWh/°C ในขณะที่เครื่องปรับอากาศมีค่าถึง 862.41 kWh/°C รวมถึงจำนวนเงินสุทธิตลอดอายุการใช้งานอาคารที่เพิ่มขึ้นจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน มีความคุ้มค่ามากกว่าการลงทุนติดตั้งเครื่องปรับอากาศ

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556





# # 5673318625 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: PASSIVE COOLING / RADIATIVE COOLING / NOCTURNAL RADIATION /  
THERMAL PERFORMANCE / ROOF DESIGN

DANU KATUNYUTANUNT: THERMAL PERFORMANCE OF LIGHTWEIGHT  
NOCTURNAL ROOF RADIATOR. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH  
SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 104 pp.

Although air conditioning systems can easily create a comfortable environment, as a consequence that mechanical cooling can create a negative environmental impact and global energy problems. Passive cooling is a method that vernacular architecture has been using for a long time. The way people live has changed by modern life, so vernacular architecture is not suitable for many people anymore. This study is to investigate the energy performance of the “lightweight nocturnal radiator roof” that Givoni Baruch presented. It creates a passive cooling system that in the night time uses advantageous radiative cooling via a ventilative cooling compound.

The experiment showed that at night the lightweight nocturnal radiator roof that uses a metal sheet roof with black paint and 10cm. attic gap has the best thermal transmittance. After that, with simulation of VisualDOE 4.1 in “Ban Yim,” a residential house from the Housing Development Office Bangkok Metropolitan Administration, in the non-rainy seasons during operation hours, it was found that the lightweight nocturnal radiator roof can increase comfort hours more than 1.7 times and reduce the average temperature 2.43°C

When calculating the energy analysis and financial analysis to compare with the normal HVAC system, it was found that the lightweight nocturnal roof radiator is more valuable in regards to additional energy and additional net value per average, both of which were reduced.

Department: Architecture

Student's Signature .....

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของผู้มีอุปการะคุณดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. อรรถจน์ เศรษฐบุตร์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษามาโดยตลอด ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์ ในฐานะผู้ที่ปูพื้นฐานการศึกษาในระดับปริญญาโทมาเป็นอย่างดี รวมถึงช่วยให้คำแนะนำในการทดลอง นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รศ. ธนิต จินดาวงศ์ รศ. พรรณชลัท สุริโยธิน และ ดร. ณรงค์วิทย์ อาริมิตร กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาร่วมเป็นคณะกรรมการ ขอขอบคุณ อาคารสถาบัน 2 เอื้อเฟื้อสถานที่วิจัยในการทดลองด้วยกล่องทดลอง

และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บริษัท แมกโนเลีย ควอลิตี้ ดีเวล็อปเม้นต์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ผู้ให้ทุนสนับสนุนทั้งหมด ในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ช
กิตติกรรมประกาศ.....	ซ
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	2
สารบัญแผนภูมิ.....	4
บทที่ 1 บทนำ.....	5
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย.....	9
1.3 วิธีการศึกษา.....	9
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 การถ่ายเทความร้อน.....	12
2.2 สภาวะนำสบาย.....	24
2.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ.....	26
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	32
3.1 ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	33
3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง.....	33
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	34
3.4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล.....	47

3.5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ .....	50
3.6 แผนการวิจัย.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล.....	51
4.1 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา .....	51
4.2 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา .....	59
4.3 การทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation).....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 เสนอแนะแนวทางการออกแบบ .....	90
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง .....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	101

## สารบัญตาราง

### บทที่ 1

ตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ของวัสดุประสงค์ วิธีการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	11
---------------------------------------------------------------------------------------------	----

### บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 แสดงแผนเวลาการทำงาน .....	50
----------------------------------------	----

### บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน (°C) .....	54
ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเช้าออกแล้ว (°C).....	55
ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเช้าออกแล้ว (°C).....	57
ตารางที่ 4.4 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในแต่ละวัสดุ .....	59
ตารางที่ 4.5 แสดงอุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเช้าออกแล้ว (°C).....	62
ตารางที่ 4.6 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในแต่ละกล่องทดลองที่มีช่องว่างได้หลังคาแตกต่างกัน .....	64
ตารางที่ 4.7 แสดงผลรวมการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ไม่รวมช่วงฤดูฝน ในระบบปรับอากาศ ของอาคารตัวอย่างที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ .....	81
ตารางที่ 4.8 แสดงผลรวมการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ไม่รวมช่วงฤดูฝน ของพัลลมูดอากาศ ในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา.....	82
ตารางที่ 4.9 การใช้ไฟฟ้าของอาคารในการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง เฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งาน ของอาคารทั้งสองหลัง ไม่รวมช่วงฤดูฝน .....	82
ตารางที่ 4.10 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารตัวอย่าง.....	83
ตารางที่ 4.11 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ .....	83
ตารางที่ 4.12 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารที่ติดตั้งระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา .....	84
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าใช้จ่ายพลังงาน รายปี ของอาคารทั้งสาม .....	84
ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบ มูลค่าสุทธิของอาคาร และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง เป็นเวลาตลอดทั้งปี ของอาคารทั้งสองหลัง .....	86

### บทที่ 5

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในแต่ละวัสดุ .....	88
-------------------------------------------------------------------------------	----

## สารบัญญภาพ

### บทที่ 1

รูปที่ 1. 1 หลังกาเหล็ก และ FALSE COLOR IMAGE แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ.....	6
รูปที่ 1. 2 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (PASSIVE COOLING) ด้วยวิธี LIGHTWEIGHT NOCTURNAL RADIATOR .....	7
รูปที่ 1. 3 งานวิจัย EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF A NOCTURNAL RADIATOR .....	8

### บทที่ 2

รูปที่ 2. 1 การนำความร้อน จากโมเลกุล สู่โมเลกุล.....	13
รูปที่ 2. 2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีต .....	14
รูปที่ 2. 3 การคำนวณค่าความนำความร้อน .....	15
รูปที่ 2. 4 การคำนวณค่าความต้านทานความร้อน ผ่านวัสดุมากกว่า 1 ชนิด.....	16
รูปที่ 2. 5 การพาความร้อน โดยมีของไหลเป็นตัวกลาง.....	17
รูปที่ 2. 6 การแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวของวัสดุ 2 ชั้น.....	18
รูปที่ 2. 7 การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านความร้อนเมื่อรวมกันแล้วต้องเท่ากับ 1 หรือ 100% เสมอ.....	19
รูปที่ 2. 8 ปริมาณพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ .....	20
รูปที่ 2. 9 เกษตรกรรมในประเทศเขตหนาว ใช้ควีนเพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า.....	22
รูปที่ 2. 10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อน เมื่อพื้นผิวของวัตถุทำมุมเอียง และตั้งน้ำที่รับน้ำฝนจากท้องฟ้า .....	23
รูปที่ 2. 11 หลังกาเหล็ก และ FALSE COLOR IMAGE แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ.....	28
รูปที่ 2. 12 งานวิจัย EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF A NOCTURNAL RADIATOR .....	29
รูปที่ 2. 13 ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อนใต้หลังคาที่เหมาะสม .....	31

### บทที่ 3

รูปที่ 3. 1 โฟมโพลีสไตรีน ที่ใช้ในการสร้างกล่องทดลอง .....	35
รูปที่ 3. 2 พัดลมที่ใช้ในกล่องทดลอง.....	36
รูปที่ 3. 3 อุปกรณ์การเก็บข้อมูล เครื่องวัดอุณหภูมิ 12 CHANNEL TEMPERATURE DATA LOGGER .....	36
รูปที่ 3. 4 รายละเอียดกล่องทดลอง.....	37
รูปที่ 3. 5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ .....	39
รูปที่ 3. 6 บ้าน แวมมูรา 11 โดยโครงการแบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย กรุงเทพมหานคร .....	41
รูปที่ 3. 7 ภาพตัวอย่างของโปรแกรม VISUALDOE.....	42
รูปที่ 3. 8 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันธรรมดา .....	44
รูปที่ 3. 9 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันเสาร์ .....	45
รูปที่ 3. 10 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันอาทิตย์ .....	45



## บทที่ 4

รูปที่ 4. 1 การทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในเวลากลางวัน .....	55
รูปที่ 4. 2 การทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในเวลากลางคืน .....	56
รูปที่ 4. 3 บ้าน แวมยูรา 11 โดยโครงการแบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย กรุงเทพมหานคร .....	66
รูปที่ 4. 4 ภาพอาคารที่ใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จากโปรแกรม VISUAL DOE .....	68
รูปที่ 4. 5 การตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ในอาคารพักอาศัย ในวันธรรมดา .....	77
รูปที่ 4. 6 การตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ในอาคารพักอาศัย ในวันหยุดเสาร์ อาทิตย์ .....	77



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญแผนภูมิ

### บทที่ 4

แผนภูมิที่ 4. 1	เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังค้ำด้านใน ในแต่ละช่วงเวลา.....	52
แผนภูมิที่ 4. 2	เปรียบเทียบอุณหภูมิกลางกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา.....	52
แผนภูมิที่ 4. 3	เปรียบเทียบอุณหภูมิช่องว่างหลังคา (อุณหภูมิอากาศเข้าในเวลากลางวัน) ในแต่ละช่วงเวลา .....	53
แผนภูมิที่ 4. 4	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา .....	53
แผนภูมิที่ 4. 5	แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/HR·FT <sup>2</sup> ·°F) ในแต่ละช่วงเวลา .....	58
แผนภูมิที่ 4. 6	เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังค้ำด้านใน ในแต่ละช่วงเวลา.....	60
แผนภูมิที่ 4. 7	เปรียบเทียบอุณหภูมิกลางกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา.....	60
แผนภูมิที่ 4. 8	เปรียบเทียบอุณหภูมิช่องว่างหลังคา (อุณหภูมิอากาศเข้าในเวลากลางวัน) ในแต่ละช่วงเวลา .....	61
แผนภูมิที่ 4. 9	เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา .....	61
แผนภูมิที่ 4. 10	แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/HR·FT <sup>2</sup> ·°F) ในแต่ละช่วงเวลา .....	63
แผนภูมิที่ 4. 11	เปรียบเทียบอุณหภูมิรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ค่า U ต่างกัน ในช่วงเวลาประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี .	69
แผนภูมิที่ 4. 12	เปรียบเทียบ จำนวนชั่วโมงนำสบาย ภายในอาคารทั้งสอง .....	71
แผนภูมิที่ 4. 13	เปรียบเทียบ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้ง 2 และอุณหภูมินำสบาย .....	73
แผนภูมิที่ 4. 14	เปรียบเทียบอุณหภูมิรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ระบบทำความเย็นแต่ละประเภท ในช่วงเวลาประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี เทียบกับอาคารตัวอย่าง.....	75
แผนภูมิที่ 4. 15	เปรียบเทียบ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้ง 3 และอุณหภูมินำสบาย.....	78
แผนภูมิที่ 4. 16	เปรียบเทียบอุณหภูมิรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ระบบทำความเย็นแต่ละประเภท ในช่วงเวลาประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี เทียบกับอาคารตัวอย่าง.....	80
แผนภูมิที่ 4. 17	เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ในแต่ละปี .....	85

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

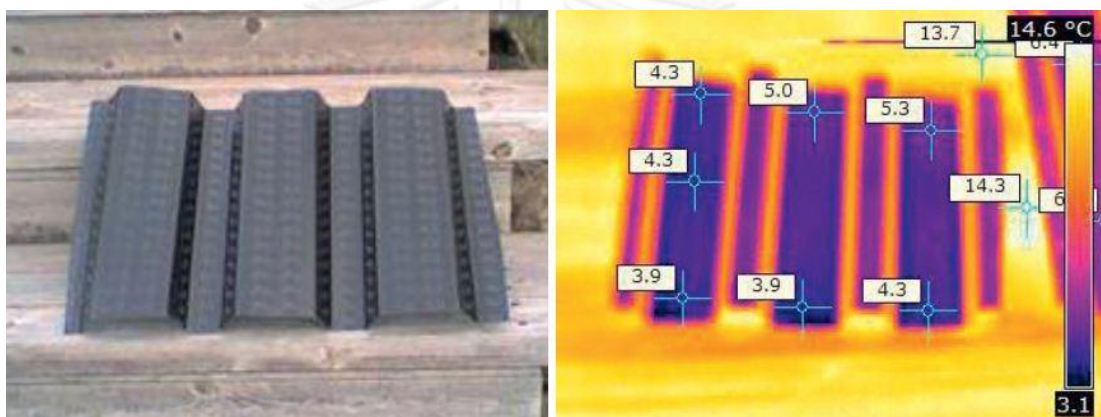
ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตศูนย์สูตร มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น สภาพอากาศไม่ได้อยู่ในสภาวะน่าสบายตลอดทั้งปี ประกอบกับการใช้ชีวิตในสังคมเมือง ที่รูปแบบสถาปัตยกรรม การใช้งาน สภาพเศรษฐกิจ และสังคมได้เปลี่ยนไป จนกระทั่งบ้านทรงไทยที่อยู่คู่วิถีชีวิตเกษตรกรรม ไม่สามารถตอบสนองการใช้งานแบบสังคมเมืองต่อไปได้อีก อาคารเกือบทั้งหมดกลายเป็นอาคารคอนกรีตที่รองรับการอยู่อาศัยภายในเมืองที่หนาแน่น รวมถึงการทำงานในรูปแบบของสำนักงาน

เครื่องปรับอากาศที่ช่วยสร้างสภาวะน่าสบายภายในอาคาร เริ่มกลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอาคารทุกหลังเนื่องจากความเคยชิน แม้ว่าวิธีการปรับอากาศด้วยเครื่องกล (Mechanical Cooling หรือ Active Cooling) อันได้แก่เครื่องปรับอากาศชนิดต่างๆ จะสามารถแก้ปัญหาสภาวะน่าสบายได้เป็นอย่างดี หากแต่มาพร้อมกับค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น และก่อปัญหาด้านพลังงานจนกระทั่งปัจจุบันได้กลายเป็นปัญหาใหญ่ที่สำคัญอันได้แก่ ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม มลภาวะ เนื่องจากของเสียจากระบบปรับอากาศ ปัญหาขาดแคลนพลังงาน ปัญหาเหล่านี้อุณหภูมิสูงใหญ่โต และยังคงมีแนวโน้มรุนแรงขึ้นเรื่อยๆจนกลายเป็นปัญหาหลักที่คนทั้งโลกเริ่มให้ความสนใจ

แนวความคิดการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive Cooling) ที่มีความสามารถในการทำความเย็นให้แก่ผู้ใช้งานอาคาร พร้อมกับสร้างสภาวะน่าสบายให้แก่ผู้อยู่อาศัยในอาคารได้จึงเป็นสิ่งที่ยั่งยืนอย่างยิ่งต่อวิถีชีวิตสังคมเมืองในปัจจุบัน อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และพลังงานที่ยังคงมีแนวโน้มรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ

สถาปัตยกรรมพื้นถิ่นเป็นตัวอย่างที่ดีของอาคารที่สามารถสร้างสภาวะน่าสบายโดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องกล หากแต่รูปแบบการใช้ชีวิตได้เปลี่ยนไปอย่างที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ด้วยความเคยชินกับสภาวะน่าสบาย ในประเทศไทยที่ สภาพอากาศไม่ได้อยู่ในสภาวะน่าสบายตลอดทั้งปี อาคารจึงยังคงจำเป็นต้องพึ่งพาระบบปรับอากาศในบางช่วงเวลา ส่งผลให้บ้านทรงไทยที่เป็นอาคารพื้นถิ่น เหมาะสมกับภูมิอากาศของไทยเป็นอย่างยิ่ง กลับไม่สามารถตอบสนองต่อการติดตั้งระบบปรับอากาศได้ เนื่องจากอาคารทำด้วยไม้มาประกอบกัน ส่งผลให้อาคารมีมวลสารน้อย และมีรอยต่อของวัสดุมาก จึงเกิดการรั่วซึมอากาศได้ง่าย

จากการทบทวนวรรณกรรม และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า การทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธี โดยเฉพาะการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี (Radiative cooling) ซึ่งมีความเรียบง่าย ไม่ต้องใช้วัสดุก่อสร้างที่ซับซ้อน หรือติดตั้งระบบใดๆ เพิ่มเติมมากนัก และน่าจะเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานจริง ในปี ค.ศ. 2012 John Hollick ได้ทำการทดลองในประเทศแคนาดา ด้วยการนำแผ่นหลังคาเหล็ก ติดตั้งเพื่อแผ่รังสีความร้อนในเวลา กลางคืน เพื่อทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ จากการถ่ายด้วยกล้องอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิ พบว่าใน เวลาากลางคืน แผ่นหลังคาเหล็กมีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยรอบถึง  $10^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นได้ตรวจวัดลมที่ไหล ผ่านผิวหน้าของหลังคาเหล็กยาว 8 เมตร พบว่าลมนั้น มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยรอบถึง  $4.7^{\circ}\text{C}$  หากแต่ ไม่ได้ทดลองเพื่อประยุกต์เพื่อใช้งานจริง (ดูรูปที่ 1.1.1 ประกอบ)



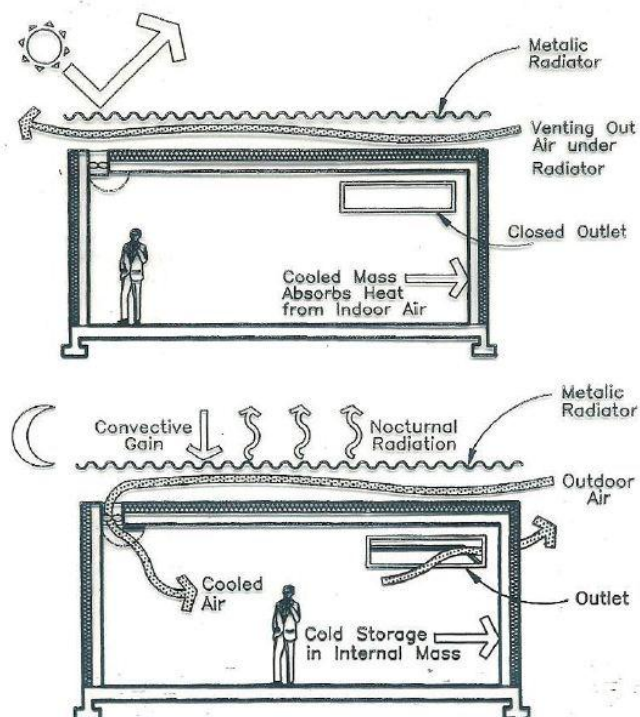
รูปที่ 1. 1 หลังคาเหล็ก และ False Color Image แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ

ที่มา: John Hollick. 2012. Nocturnal radiation cooling tests. *Energy Procedia* 30: 932

ในปี ค.ศ. 1978 R.H.B. Exell ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะใช้การแผ่รังสีความร้อนในการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติในประเทศไทยพบว่า ท้องฟ้าของประเทศไทยมีอุณหภูมิสูงเกินไป จึงไม่สามารถใช้ทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติด้วยวิธีการแผ่รังสีอย่างเดียวได้ แม้ว่าจะความเป็นไปได้ใน บางจังหวัดทางภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงใหม่

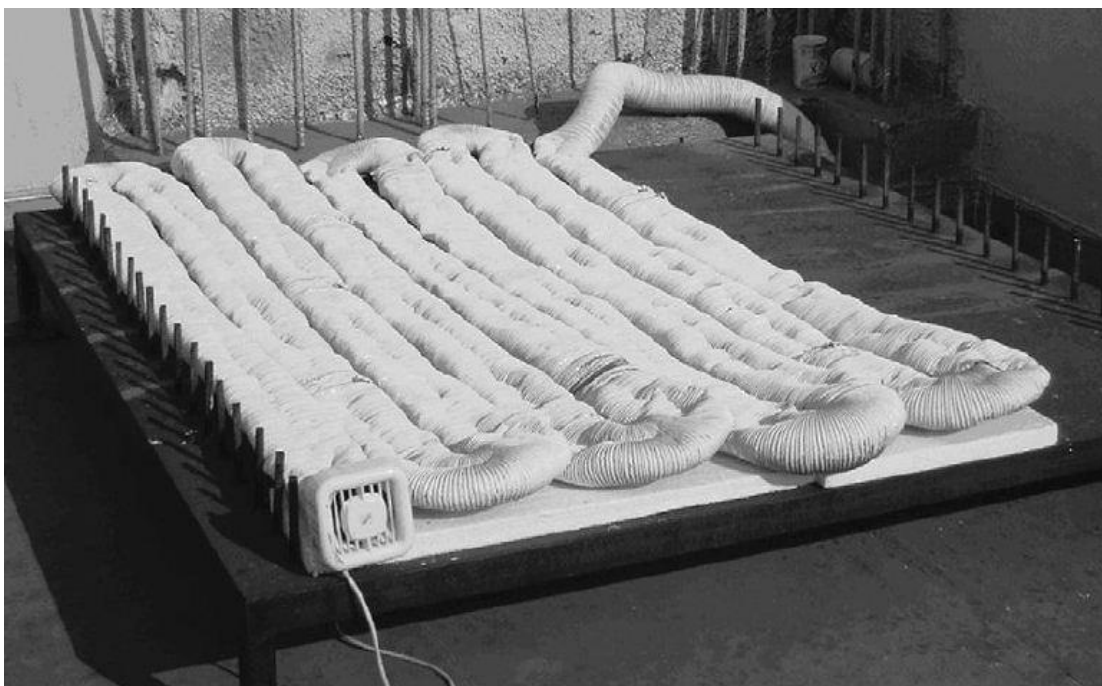
อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี โดยการประยุกต์ใช้การแผ่รังสีความร้อน ประกอบกับการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบาย อากาศ (Ventilative cooling) โดยใช้หลังคาที่มีช่องว่างอากาศ เพื่อช่วยระบายความร้อนในเวลา กลางวัน และใช้พัดลมดูดอากาศเย็นบริเวณใต้ผิวหลังคาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นในเวลา กลางคืนดังที่ Givoni ได้เสนอไว้ในหนังสือ *Passive and Low Energy Cooling of Building* บทที่ 4 RADIANT COOLING ในหัวข้อ Unglazed Solar Collectors as Nocturnal Radiators ในชื่อว่า "หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา" (Lightweight nocturnal radiators) (ดูรูปที่ 2 ประกอบ)

จึงมีความเป็นไปได้ที่การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสีจะสามารถใช้ได้จริงในประเทศไทย



รูปที่ 1. 2 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (Passive Cooling) ด้วยวิธี Lightweight Nocturnal Radiator  
ที่มา Givoni B. 1994. *Passive and Low Energy Cooling of Building*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

ปี 2007 H.S. Bagiorgas และ G. Mihalakakou ได้ทำการทดลองหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบาโดยใช้ท่ออลูมิเนียม ขดบนหลังคาเพื่อทำความเย็นในเวลากลางวัน โดยทดลองกับห้องในมหาวิทยาลัย เมื่อเทียบกับห้องควบคุมที่มีลักษณะเหมือนกันที่ไม่ได้ติดตั้งระบบทำความเย็นพบว่าห้องทดลองมีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องควบคุมถึง 2.5 – 4°C (อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ ทำการวัดเฉพาะในเวลากลางวันเท่านั้น)



รูปที่ 1. 3 งานวิจัย *Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator* ที่มา Bagiorgas H. and Mihalakakou G. 2008. *Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling. Renewable Energy 33: 1220–1227*

ผู้วิจัยเห็นว่าการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมอลเบา มีความเป็นไปได้ในการทำความเย็นในเวลากลางวัน อีกทั้งช่วยระบายความร้อนจากหลังคาได้ในเวลา กลางวัน โดยใช้หลักการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ 2 วิธี นำมาส่งเสริมซึ่งกันและกัน ไม่ซับซ้อน ไม่ ต้องใช้เทคโนโลยีในการก่อสร้าง หรืออุปกรณ์ขั้นสูง ง่ายต่อการดูแลรักษา และมีความเป็นไปได้ที่จะ นำมาพัฒนาให้เหมาะสมกับภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โดยเฉพาะอาคารพักอาศัย ที่มี ช่วงเวลาใช้งานในเวลากลางวันเป็นหลัก ประกอบกับยังไม่มีงานวิจัยใดในประเทศไทยที่ทำการศึกษาร ื่องนี้อย่างจริงจัง

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความเย็นในแต่ละวัสดุ โดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ในภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย
- 1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความเย็นในแต่ละช่องว่างใต้หลังคา โดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ในภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย
- 1.2.3 ศึกษาและเปรียบเทียบการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา และระบบปรับอากาศ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้จริง

## 1.3 วิธีการศึกษา

- 1.3.1 ทบทวนเกณฑ์ในการออกแบบ และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 ศึกษาโดยการสร้างกล่องทดลองในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยวิธี หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา เพื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป
- 1.3.3 จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้จริง โดยใช้อาคารพักอาศัย เนื่องจากเป็นรูปแบบอาคารมีช่วงเวลาการใช้งานในเวลา กลางคืนเป็นส่วนใหญ่
- 1.3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เปรียบเทียบ การใช้พลังงาน การลงทุน และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งาน อาคาร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 พัฒนาทางเลือก และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ ด้วยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา
- 1.4.2 พัฒนาทางเลือกในการออกแบบ และปรับปรุงอาคาร เพื่อให้เป็นอาคารประหยัดพลังงาน และเหมาะสมกับภาวะน่าสบาย สำหรับอาคารพักอาศัยในภูมิอากาศของประเทศไทย

#### 1.5 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.5.1 ทำการศึกษาคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา โดยทำการทดลองด้วยกล่องทดลอง ในช่วงเดือน มกราคม และกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2557 เนื่องจากมีเวลาจำกัด
- 1.5.2 ทำการทดลองในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยทำการทดลองบริเวณดาดฟ้าของอาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.5.3 ทำการทดลอง และวิเคราะห์ผล ด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อประเมินการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดขึ้นของอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา
- 1.5.4 ทำการประเมินการใช้พลังงานด้วยอาคารตัวอย่างจากแบบบ้านยี่ม แวมมยุรา 11 ของสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย กรุงเทพมหานคร



ตารางที่ 1. 1 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์ วิธีการศึกษา และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์ในการวิจัย	วิธีการศึกษา	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความเย็นในแต่ละวัสดุ โดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ในภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย	ทบทวนเกณฑ์ในการออกแบบ และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	พัฒนาทางเลือกในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยวิธี หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา
ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำความเย็นในแต่ละช่องว่างใต้หลังคา โดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ในภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย	ศึกษาโดยการสร้างกล่องทดลองในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ ด้วยวิธี หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา เพื่อนำค่าที่ได้ไปจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป	
ศึกษาและเปรียบเทียบการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา และระบบปรับอากาศ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้จริง	จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อประเมินความเป็นไปได้ ในการนำไปประยุกต์ใช้จริง โดยใช้อาคารพักอาศัย เนื่องจากเป็นรูปแบบอาคารมีช่วงเวลาการใช้งานในเวลา กลางคืนเป็นส่วนใหญ่	พัฒนาทางเลือกในการออกแบบ และปรับปรุงอาคาร เพื่อให้เป็นอาคารประหยัดพลังงาน และเหมาะสมกับภาวณาสบาย สำหรับอาคารพักอาศัยในภูมิอากาศของประเทศไทย
	วิเคราะห์และเปรียบเทียบ ข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	
	เปรียบเทียบการใช้พลังงาน การลงทุน และค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานอาคาร	

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาสมรรถนะด้านพลังงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา นั้น มีทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

- 2.1 การถ่ายเทความร้อน
- 2.2 สภาวะน่าสบาย
- 2.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งมีรายละเอียดเพิ่มเติมดังนี้

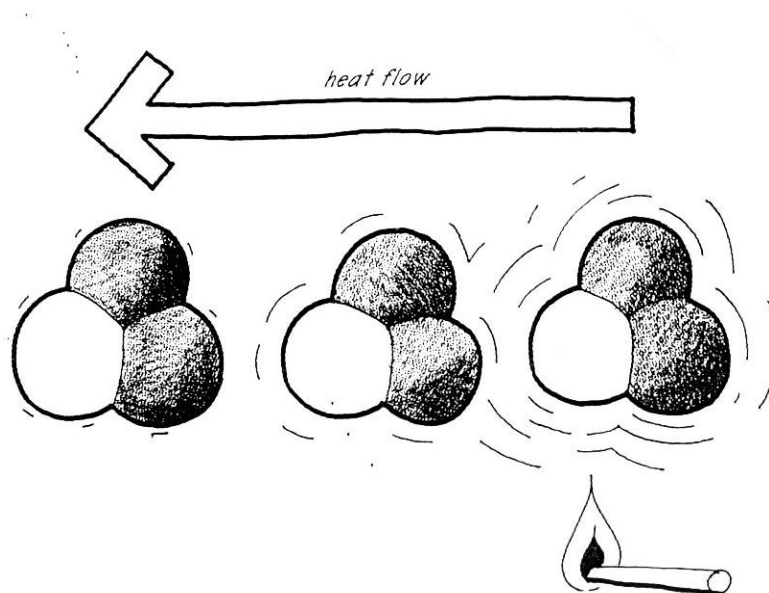
#### 2.1 การถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วไปแล้ว วัตถุทุกชิ้นจะมีความร้อนอยู่เสมอ นั้นแปลว่าโมเลกุลของวัตถุนั้นจะมีการสั่น อยู่ตลอดเวลา ยกเว้นแต่วัตถุที่มีอุณหภูมิเท่ากับศูนย์องศาสัมบูรณ์ นั้นแปลว่าพลังงานจลน์ของ โมเลกุลภายในสสารนั้นๆมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ ) หรือว่าไม่มีความร้อน (การสั่นของโมเลกุล) เลย (Heat transfer) (Moore, 1993)

อุณหภูมิจึงหมายถึงการวัดค่าเฉลี่ยความร้อน หรือพลังงานจลน์ของโมเลกุล ภายในสสาร นั้นๆ (วัตถุ 10kg. ที่อุณหภูมิห้อง มีอุณหภูมิเท่ากับวัตถุ 1kg. ที่อุณหภูมิห้อง แต่วัตถุ 10kg. ที่ อุณหภูมิห้อง มีปริมาณความร้อนมากกว่าวัตถุ 1kg. ที่อุณหภูมิห้อง)

ความร้อน สามารถถ่ายเทได้ โดยจะเคลื่อนที่จากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง ไปหาวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ การถ่ายเทนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาจนกว่าวัตถุทั้งสองจะมีอุณหภูมิเท่ากัน (ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์) โดยสามารถถ่ายเทได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่ การนำความร้อน (heat conduction), การพาความร้อน (heat convection) และการแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)

### 2.1.1 การนำความร้อน (heat conduction)



รูปที่ 2. 1 การนำความร้อน จากโมเลกุล สู่มอเลกุล

ที่มา : Fuller Moore. 1993. *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.

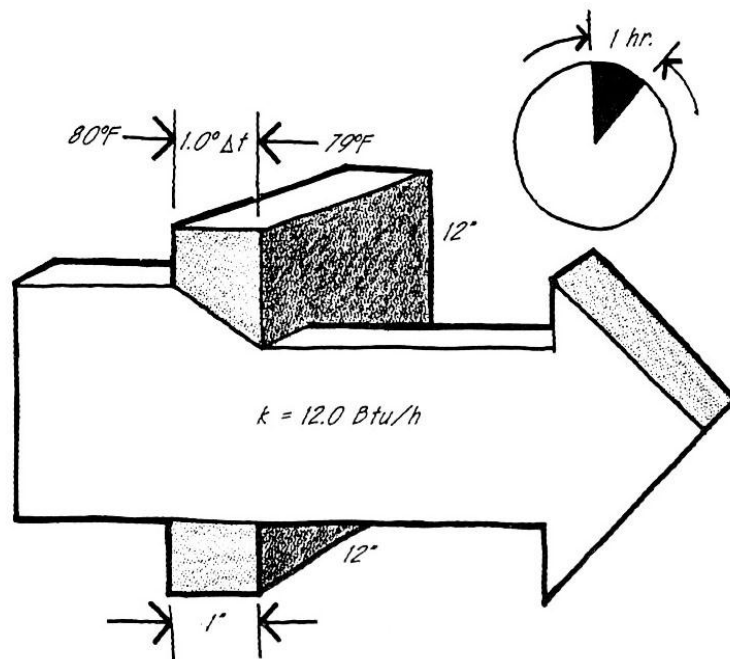
การนำความร้อนคือการถ่ายเทพลังงานของโมเลกุลของวัสดุที่อยู่ติดกัน โมเลกุลที่มีพลังงานสูง หรือก็คือมีการสั่นอย่างรวดเร็วจะถ่ายเทพลังงานไปยังโมเลกุลข้างเคียง ที่มีความเร็วในการสั่นน้อยกว่า ซึ่งจะทำให้โมเลกุลนั้นมีพลังงานสูงขึ้น หรือก็คือมีอุณหภูมิมากขึ้น โดยการถ่ายเทนี้มีค่าเท่ากันในทุกทิศทางไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วง ความเร็วในการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุล วัสดุที่มีความหนาแน่นมากกว่า เช่น หิน โลหะ จะมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า เช่น อากาศ ใยแก้ว หรือขนสัตว์ วัสดุเหล่านี้จึงนิยมนำมาทำเป็นฉนวนให้แก่อาคาร ซึ่งคุณสมบัติการนำความร้อนนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้ ได้แก่

### 2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน

ในการวิจัย จำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพของหลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา ทั้งการคำนวณโดยวิธีทั่วไป และการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเหล่านี้จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ค่าที่ได้จากการคำนวณถูกต้อง แม่นยำต่อความเป็นจริงมากที่สุด

### 2.1.1.2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity : k) (W/m·°K หรือ BTU/hr·ft·°F)

คือคุณสมบัติของวัสดุที่บ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทพลังงานความร้อน ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนจำนวนวัตต์ ถ่ายเทด้วยวิธีนำความร้อน ผ่านเนื้อวัสดุหนา 1m ที่ทึบตัน เมื่อผ่านวัสดุจะมีอุณหภูมิลดลง 1°C หรือเทียบเท่ากับ British thermal unit ต่อชั่วโมง (BTU/hr·ft·°F) ถ่ายเทด้วยวิธีนำความร้อน ผ่านเนื้อวัสดุหนา 1 ฟุตที่ทึบตัน เมื่อผ่านวัสดุจะมีอุณหภูมิลดลง 1°F ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนคงที่

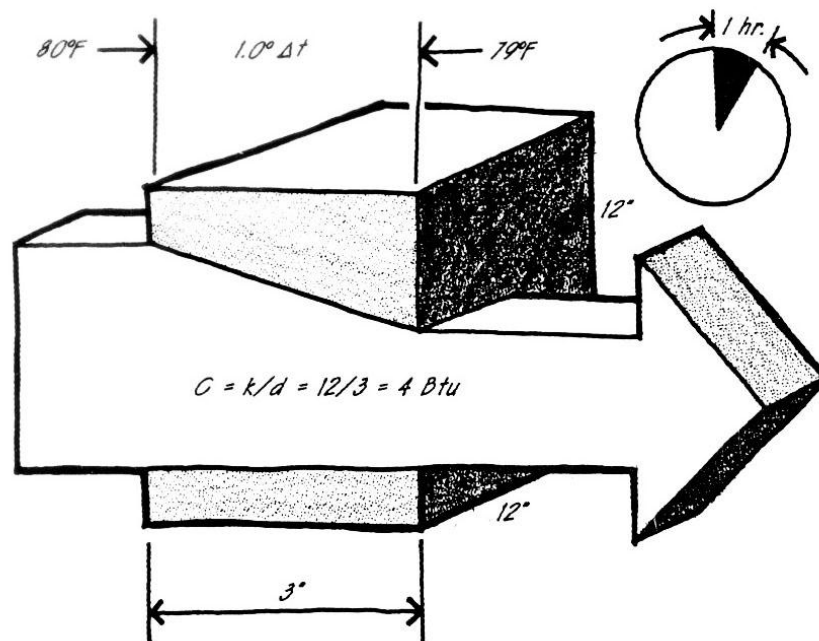


รูปที่ 2. 2 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีต

ที่มา : Fuller Moore. 1993. *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.

### 2.1.1.3 ค่าความนำความร้อน (Conductance : C) ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ หรือ $BTU/hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ )

คล้ายกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เพียงแต่ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนนั้น ไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ ในขณะที่เดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะบ่งบอกถึงคุณสมบัติภายใต้ความหนาของวัสดุที่กำหนดไว้เท่านั้น (วัสดุชนิดเดียวกัน 2 ชิ้น ที่หนาไม่เท่ากัน จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากัน แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากัน) โดย  $C = k \div$  ความหนาวัสดุ

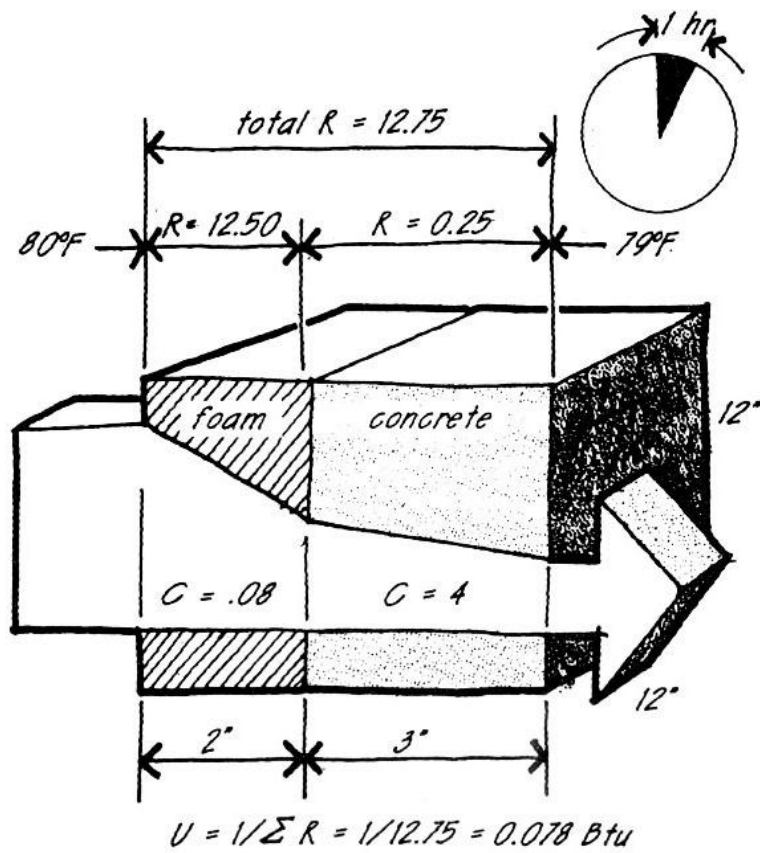


รูปที่ 2. 3 การคำนวณค่าความนำความร้อน

ที่มา : Fuller Moore. 1993. *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.

### 2.1.1.4 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance : R, R-value) ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ หรือ $hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F/BTU$ )

เป็นส่วนกลับของค่าความนำความร้อน ( $R=1/C$ ) เป็นค่าที่นิยมใช้ในการแสดงค่าความเป็นฉนวนให้แก่อาคาร เนื่องจากสามารถแสดงค่าความเป็นฉนวนได้ชัดเจน โดยยิ่งมีค่ามาก จะยิ่งมีความเป็นฉนวนมาก



รูปที่ 2. 4 การคำนวณค่าความต้านทานความร้อน ผ่านวัสดุมากกว่า 1 ชนิด

ที่มา : Fuller Moore. 1993. Environmental control systems: heating, cooling, lighting. United States: McGraw-Hill.

#### 2.1.1.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal transmittance : U, U-value)

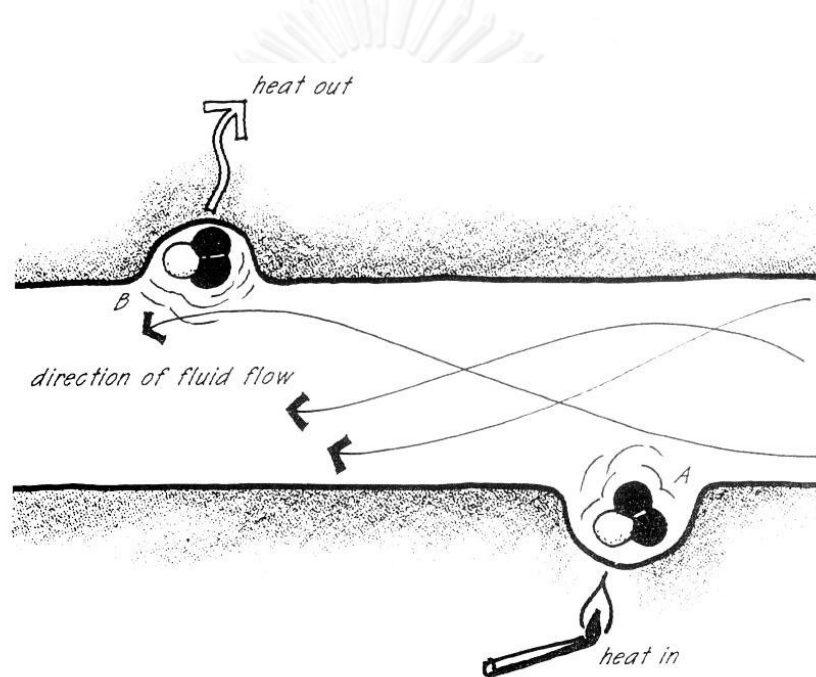
( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}$  หรือ  $\text{BTU}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}$ )

คือผลรวมของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของผิวอาคาร ( $U=1/\Sigma R$ ) โดยพิจารณาถึงผลรวมของปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ผ่านเข้ามา

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผล ได้แก่

- ความหนาของวัสดุ
- ความแตกต่างของอุณหภูมิของวัตถุทั้งสอง
- พื้นที่ผิวสัมผัสที่ใช้ในการนำความร้อนระหว่างวัตถุทั้งสอง
- ระยะเวลาที่วัตถุทั้งสอง สัมผัสกัน

### 2.1.2 การพาความร้อน (heat convection)

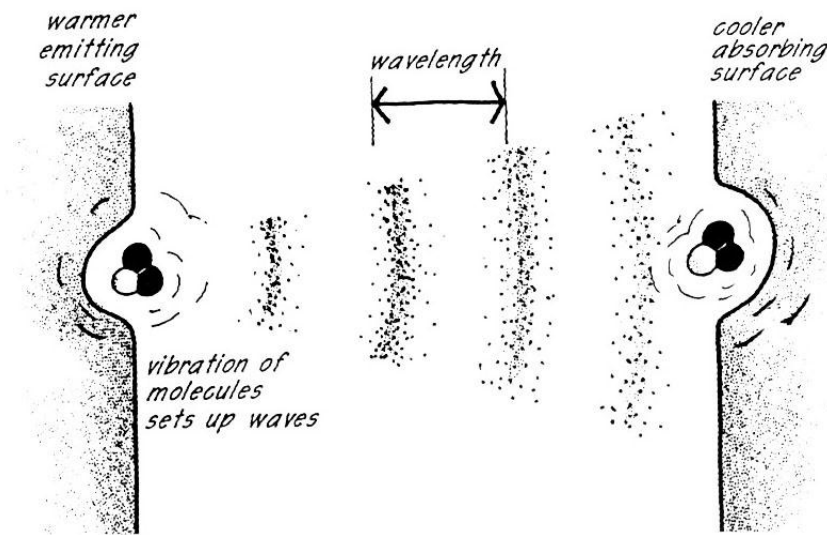


รูปที่ 2.5 การพาความร้อน โดยมีของไหลเป็นตัวกลาง

ที่มา : Fuller Moore. 1993. Environmental control systems: heating, cooling, lighting. United States: McGraw-Hill.

เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของวัตถุนั้นจะสั่นด้วยความเร็วที่มากขึ้น โครงสร้างโมเลกุลจะมีการแยกออกจากกัน ซึ่งส่งผลให้วัตถุนั้นมีการขยายตัว และเมื่อวัตถุมีการขยายตัว โดยที่ยังมีมวลเท่าเดิม ความหนาแน่นของวัตถุนั้นก็จะลดลง โมเลกุลเหล่านั้นในของเหลว และก๊าซก็จะลอยตัวขึ้น การถ่ายเทความร้อนคือการที่ของไหลทำหน้าที่เป็นตัวกลาง นำพาโมเลกุลเหล่านั้นไปยังตำแหน่งอื่นเพื่อการนำความร้อน และแผ่รังสีความร้อนต่อไป เพราะฉะนั้นในทางเทคนิคแล้ว การพาความร้อนก็คือรูปแบบหนึ่งของการนำความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยมีการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในของไหล ในขณะที่การนำความร้อน และแผ่รังสีความร้อนนั้น โมเลกุลของวัตถุจะไม่มีการเคลื่อนที่

### 2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (heat radiation)



รูปที่ 2. 6 การแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวของวัสดุ 2 ชั้น

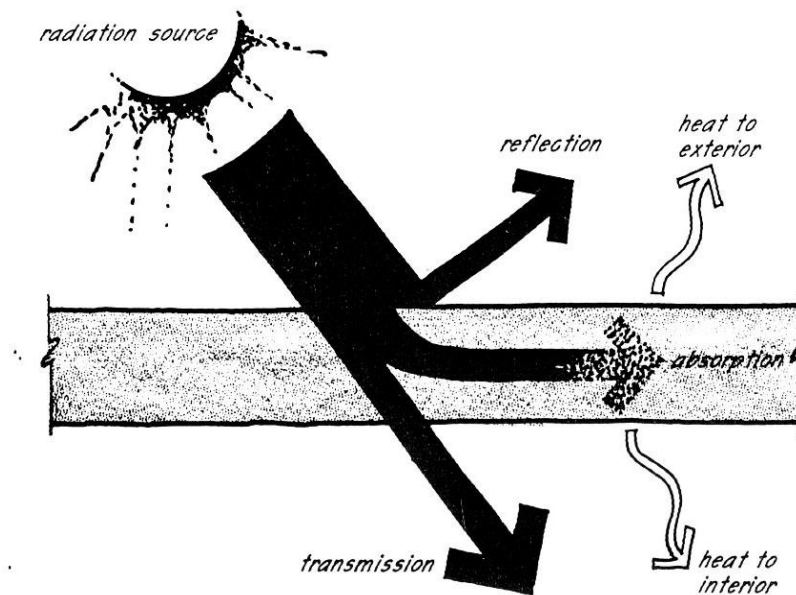
ที่มา : Fuller Moore. 1993. *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.

การแผ่รังสีความร้อนคือการส่งผ่านพลังงาน (การสั่นของโมเลกุล) โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเมื่อโมเลกุลบนพื้นผิวของของวัสดุสั่น จะมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเนื่องจากรังสีความร้อนจึงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องผ่านตัวกลาง ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถถ่ายเทผ่านสุญญากาศได้ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง เป็นเส้นตรงในทุกทิศทาง และไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วง

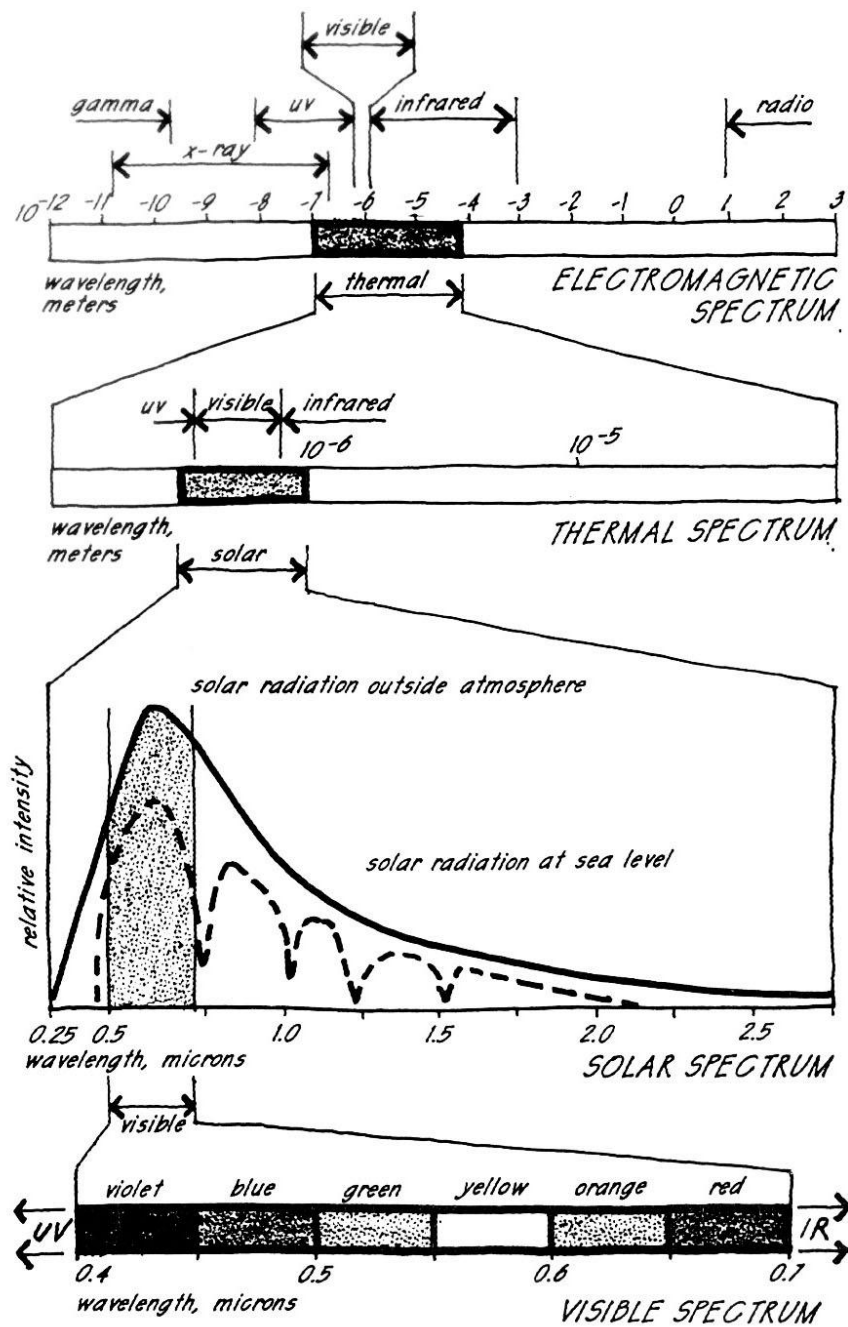
โมเลกุลบริเวณผิววัตถุ เมื่อปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบรังสีความร้อนแล้ว ก็จะสูญเสียพลังงานไป ส่งผลให้โมเลกุลนั้นๆ มีอุณหภูมิลดลง ในขณะที่เดียวกัน โมเลกุลของวัตถุอีกด้านหนึ่งก็ได้รับรังสีนั้น และเปลี่ยนเป็นพลังงาน ส่งผลให้โมเลกุลมีการสั่นที่เร็วขึ้น วัตถุนั้นจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย (วัตถุที่มีความร้อนจะแผ่รังสีความร้อนอยู่เสมอ วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็สามารถแผ่รังสีให้วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม การแผ่รังสีจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ย่อมมีค่ามากกว่า การแผ่รังสีจากวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า) และหากพื้นผิวของวัตถุนั้นเอียง ไม่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่รังสีความร้อน ความหนาแน่นของรังสีต่อพื้นผิวย่อมลดลง ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนย่อมลดลงไปตามสัดส่วน



วัตถุที่ร้อน จะแผ่รังสีออกมาในรูปแบบของคลื่นสั้น เช่น รังสีอาทิตย์ (ประมาณ 0.4 - 4.0 micron) ส่วนโมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จะแผ่รังสีออกมาในคลื่นที่ยาวกว่า เมื่อรังสีความร้อนกระทบกับวัตถุ พลังงานบางส่วนจะถูกดูดกลืน (absorption) ทำให้วัตถุนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานบางส่วนถูกสะท้อนออกไป (reflection) และหากวัตถุนั้นสามารถส่งผ่านความร้อนได้ พลังงานส่วนที่เหลือก็จะส่งผ่าน (transmission) ชั้นวัสดุออกไป คุณสมบัติของวัสดุทั้ง 3 เมื่อรวมกันแล้วต้องเท่ากับ 1 หรือ 100% เสมอ



รูปที่ 2. 7 การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านความร้อนเมื่อรวมกันแล้วต้องเท่ากับ 1 หรือ 100% เสมอ  
ที่มา : Fuller Moore. 1993. Environmental control systems: heating, cooling, lighting. United States: McGraw-Hill.



รูปที่ 2. 8 ปริมาณพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ที่มา : Fuller Moore. 1993. Environmental control systems: heating, cooling, lighting. United States:

McGraw-Hill.

โดยทั่วไปแล้ว วัตถุที่เป็นมันเงา จะสามารถสะท้อนการแผ่รังสีได้ดี ซึ่งส่งผลให้สามารถดูดกลืนรังสีได้น้อย นั่นแปลว่าวัตถุนั้นเงา จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นจากการแผ่รังสีความร้อนได้น้อย (เนื่องจากมีความสามารถดูดกลืนได้น้อย) และหากมีอุณหภูมิสูง ก็จะสามารถรักษาอุณหภูมิได้นาน (เนื่องจากมีความสามารถในการแผ่รังสีที่น้อยเช่นกัน)

ค่าการคายความร้อน (emissivity) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการคายความร้อนของวัสดุ ที่จะคายรังสีออกมาในอุณหภูมิหนึ่ง โดยมีค่าตั้งแต่ 0.00 (ไม่มีการคายความร้อน) ไปจนถึง 1.0 (มีการคายความร้อนได้สูงสุด โดยเทียบเท่าวัตถุในอุดมคติที่เรียกว่า "วัตถุดำ" หรือ black body) ค่าการคายความร้อนจะมีค่าเทียบเท่าค่าการดูดกลืนเสมอ

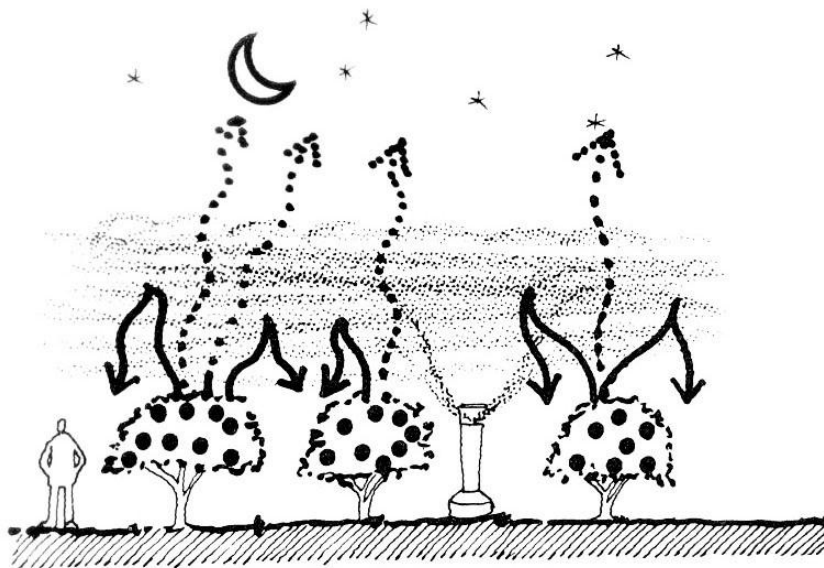
#### 2.1.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนในเวลากลางคืน

วัตถุทุกชนิดมีการแผ่รังสีความร้อนตลอดเวลา โดยอยู่ในรูปของรังสีอินฟราเรด โดยความเข้มของรังสีนี้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุ โดยในวัตถุที่มีความมันวาว หรือมีความโปร่งใส จะมีค่าความสามารถในการแผ่รังสีใกล้เคียงศูนย์ (Santos, 2000)

#### 2.1.3.2 สภาพของท้องฟ้า

สภาพท้องฟ้าที่มีเมฆมาก จะบดบังการแผ่รังสีกลับคืนสู่ท้องฟ้า กล่าวคือวัสดุ และท้องฟ้านั้น ไม่เห็นกันโดยตรง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุ จะถูกเมฆขัดขวางไม่ให้แผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าได้ ท้องฟ้าที่มีเมฆมาก จึงมีประสิทธิภาพการแผ่รังสีกลับคืนสู่ท้องฟ้าของวัสดุต่ำ

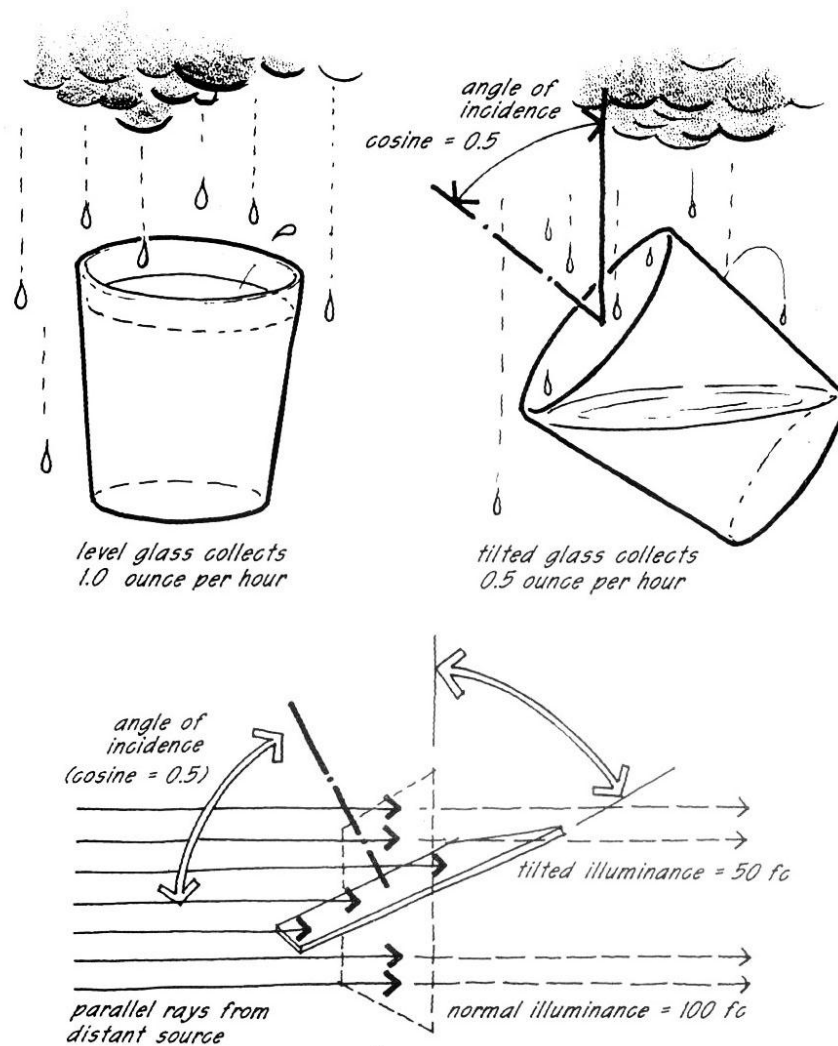
อุณหภูมิของท้องฟ้า (sky temperature) หากท้องฟ้ามีอุณหภูมิต่ำ ความร้อนจะถ่ายเทได้ดี และหากท้องฟ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้น การแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าจะมีประสิทธิภาพต่ำลง



รูปที่ 2. 9 เกษตรกรรมในประเทศเขตนหนาว ใช้ควันเพื่อป้องกันการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า  
ที่มา : Fuller Moore. 1993. *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.

### 2.1.3.3 มุมเอียงของพื้นผิว ต่อท้องฟ้า

การแผ่รังสีความร้อน จะเกิดขึ้นได้อย่างเต็มประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อวัตถุทั้ง 2 หันหน้าเข้าหากันในแนวขนาน อีกทั้งจุดที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดของท้องฟ้า นั้น อยู่ที่มุมเงย 90 องศา เนื่องจากเป็นมุมที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลกน้อยที่สุด จึงสามารถแผ่รังสีได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้น ในกรณีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า นั้น การวางพื้นผิวของวัตถุในแนวขนานกับพื้น จึงมีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 2. 10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อน เมื่อพื้นผิวของวัตถุทำมุมเอียง และถึงน้ำที่รับน้ำฝนจากท้องฟ้า

ที่มา : Fuller Moore. 1993. Environmental control systems: heating, cooling, lighting. United States: McGraw-Hill.

นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางอ้อมอีก 1 ปัจจัย คือหยดน้ำบริเวณผิวหลังคา เมื่อหลังคามีอุณหภูมิ ลดลง และกระทบกับความชื้นในอากาศ อากาศจึงเกิดการควบแน่น กลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะอยู่ บริเวณผิวหลังคา ทำให้การแผ่รังสีความร้อนไม่สามารถทำได้เต็มที่ ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีจึง ลดลงไป

## 2.2 สภาวะน่าสบาย

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) หรือสมาคมวิศวกรรมเครื่องปรับอากาศอเมริกัน ได้นิยามไว้ว่าเป็น "สภาวะที่ร่างกายและจิตใจ แสดงถึงความพึงพอใจของร่างกายต่ออุณหภูมิแวดล้อม โดยไม่รู้สึกรำคาญหรือร้อนเกินไป" ซึ่งในแต่ละบุคคลอาจแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับความชอบ ความเคยชิน วัฒนธรรม ลักษณะทางกายภาพ หรือจิตใจของแต่ละบุคคล สภาวะแบบหนึ่งจึงอาจน่าสบายสำหรับบุคคลหนึ่ง แต่อาจไม่น่าสบายสำหรับอีกบุคคลหนึ่งก็เป็นได้

สภาวะน่าสบายขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิผิวจากการแผ่รังสีความร้อน ความเร็วลม โดยจัดเป็นปัจจัยแวดล้อม นอกจากนี้ ได้แก่ กิจกรรม และเครื่องนุ่งห่ม เป็นปัจจัยของบุคคล ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนของร่างกายในรูปแบบที่แตกต่างกัน

### 2.2.1 อุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิอากาศเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสภาวะน่าสบายของมนุษย์เป็นอย่างมาก โดย ASHRAE ได้กำหนดว่าช่วงที่มีสภาวะน่าสบายจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 22.2 – 26.1°C

### 2.2.2 ความชื้นสัมพัทธ์

ความชื้นสัมพัทธ์ที่พอเหมาะอยู่ในช่วง 20%-50% (อัตราส่วนโดยมวลของไอน้ำในอากาศในขณะหนึ่ง(ที่อุณหภูมิหนึ่ง) ต่อ ไอน้ำสูงสุดที่อากาศ (ที่อุณหภูมินั้น) สามารถแบกรับไว้ได้ (วิกิพีเดีย, 2556)) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิอากาศร้อน ความชื้นสัมพัทธ์มีความสำคัญ เพราะหากอากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ เหนือที่ช่วยระบายความร้อนออกจากร่างกายก็จะสามารถทำงานได้ดีขึ้น (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541)

### 2.2.3 อุณหภูมิผิวจากการแผ่รังสีความร้อน

จากคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ อุณหภูมิผิวของวัตถุโดยรอบจะทำการปล่อยรังสีความร้อน ผิวหนังจึงได้รังสีความร้อนเหล่านั้น ความร้อนจากการแผ่รังสีจึงมีผลต่อความน่าสบายมากกว่าอุณหภูมิอากาศถึง 40% เช่น หากความร้อนจากการแผ่รังสีสูงขึ้น  $1.4^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศลดลง  $1^{\circ}\text{C}$  จะไม่รู้สึกรังสีถึงอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ธนิต จินดาวณิก. เอกสารประกอบการสอน การอนุรักษ์พลังงานในการออกแบบสถาปัตยกรรม. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540)

### 2.2.4 ความเร็วลม

ถ้าอากาศมีการเคลื่อนที่ อากาศนั้นจะพาความร้อนออกไปจากร่างกาย รวมถึงช่วยเร่งให้เหงื่อมีการระเหยเพื่อระบายความร้อนออกจากร่างกายได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากลมนั้นมีความเร็วที่มากเกินไปอาจทำให้รู้สึกรบกวน หรือรำคาญได้

### 2.2.5 กิจกรรม

ร่างกายของมนุษย์นั้นมีการทำงานตลอดเวลา ระดับความร้อนของร่างกายขึ้นอยู่กับปัจจัยทางชีวภาพหลายอย่าง ส่วนใหญ่แล้วขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรม ณ ขณะนั้น หากร่างกายทำกิจกรรมที่ใช้พลังงานมาก ร่างกายก็จะทำงานหนักขึ้น ผลิตพลังงานเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ

### 2.2.6 เครื่องนุ่งห่ม

เสื้อผ้าเป็นฉนวนที่กั้นระหว่างร่างกายและสภาพแวดล้อม ปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับความเป็นฉนวนของเสื้อผ้าที่สวมใส่ โดยถูกวัดในหน่วย Clo units โดยมีค่าประมาณดังนี้ เปลือย 0, กางเกงขายาว เสื้อเชิ้ตแขนสั้น 0.5, ชุดสูททั่วไป 1 ฯลฯ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลต่อสภาวะน่าสบาย เพียงแต่ในระดับที่ไม่มากนัก ได้แก่ อายุ เพศ รูปร่างลักษณะของร่างกาย สี ความหนาแน่นของฝูงชน ณ ขณะนั้น ปริมาณแอลกอฮอล์ในร่างกาย (ปริมาณแอลกอฮอล์ในร่างกาย ส่งผลลวงต่อความรู้สึกว่าร่างกายอุ่นขึ้น แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงการเผาผลาญหรืออุณหภูมิแต่อย่างใด)

## 2.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ

หนังสือ Passive and Low Energy Cooling of Building ของ Baruch Givoni ได้ให้คำอธิบายไว้ว่าเป็นเทคนิควิธีต่างๆ ที่ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง โดยใช้พลังงานธรรมชาติ ซึ่งในบางกรณียังรวมไปถึงการใช้งานพัดลม หรือปั๊มต่างๆ เพื่อให้การทำความเย็นนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และแม้ว่าจะสามารถให้มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ ได้ แต่ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน หรือ COP (coefficient of performance) ในการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาตียังมีค่าที่สูงกว่าการทำความเย็นด้วยวิธีปกติเป็นอย่างมาก

โดยทั่วไปแล้ว การออกแบบเพื่อการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาตินั้นมีจุดมุ่งหมายให้มีปริมาณความร้อนภายในอาคารน้อยที่สุด ซึ่งสามารถกระทำได้ 2 วิธี อย่างใดอย่างหนึ่งหรือประกอบกัน ได้แก่ ลดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคาร และนำความร้อนออกไปจากอาคาร (heat sinks) โดยผ่านทางบรรยากาศ พื้นดิน หรือท้องฟ้า

การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติสามารถจำแนกประเภทได้เป็น

### 2.3.1 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบายอากาศ (Ventilative cooling)

แบ่งได้เป็น 2 วิธี ได้แก่ การระบายอากาศภายในอาคาร โดยแทนที่ด้วยอากาศจากภายนอกที่เย็นกว่า หรือ สร้างการเคลื่อนที่ของอากาศให้ไหลผ่านผู้ใช้งานอาคาร เพื่อเพิ่มสภาวะน่าสบาย (เพิ่มความเร็วลม)

### 2.3.2 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี (Radiative cooling)

ถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ร้อนกว่า ไปยังพื้นผิวที่เย็นกว่า สามารถใช้ได้ทั้งการระบายความร้อนออกจากอาคาร และการระบายความร้อนออกจากผู้ใช้งานอาคารโดยตรง

### 2.3.3 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative cooling)

ใช้การระเหยของน้ำเพื่อลดความเย็นให้แก่อาคาร เมื่อน้ำระเหย จะมีการใช้ความร้อนแฝงเพื่อเปลี่ยนสถานะ ความร้อนจึงถูกดึงออกไปจากอาคาร

### 2.3.4 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการลดความชื้นในอากาศ (Dehumidification)



เป็นการดึงความชื้นออกจากอากาศภายในอาคาร เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดต่ำลง ส่งผลให้การระเหยของน้ำมากขึ้น และดึงความร้อนออกไปได้มากขึ้น

### 2.3.5 การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติโดยการใช้คุณสมบัติของมวลสาร (Mass-effect cooling)

ใช้มวลสารกักเก็บความร้อนในช่วงเวลาที่อุณหภูมิสูง และปล่อยความร้อนออกมาในช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจะสามารถลดอุณหภูมิในช่วงเวลาที่มีความร้อนสูงสุดของวันได้

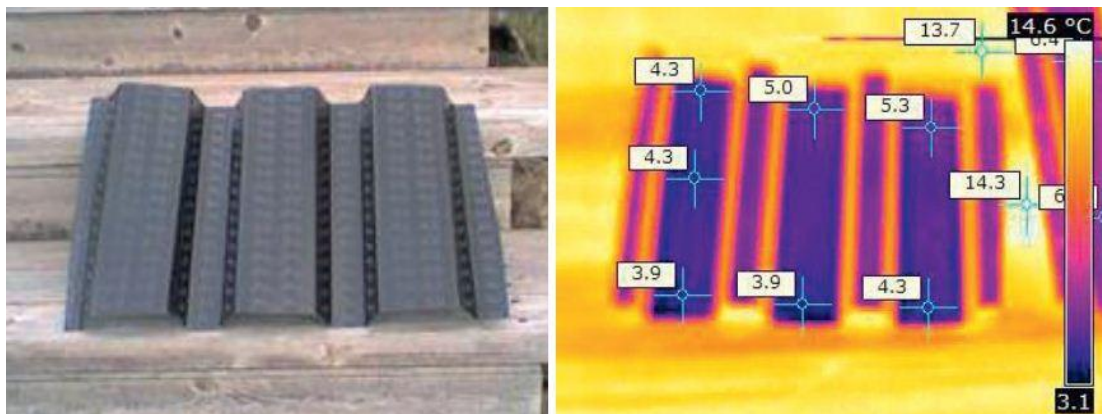
## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษา พบศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

### 2.4.1 การทดสอบ การทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีในเวลากลางคืน (Nocturnal radiation cooling tests)

ในเวลากลางวัน พระอาทิตย์ได้แผ่รังสีความร้อนลงมายังโลก และในทางกลับกัน ในเวลากลางคืน โลกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิพื้นหลัง ก็ได้แผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า จากการทดลองพบว่าในเวลากลางคืน หลังคาได้แผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า จนสามารถมีอุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศได้ถึง 20°C (Hollick, 1978)

การทดลองได้ทดลองในทวีปอเมริกาเหนือ โดยนำแผ่นวัสดุเหล็ก และถ่ายภาพอินฟราเรดเพื่อวัดอุณหภูมิในเวลากลางคืน พบว่าที่อุณหภูมิบรรยากาศ 14.6°C แผ่นเหล็กจะมีอุณหภูมิตั้งแต่ 3.9 ถึง 5.3°C หรือต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศถึง 10°C ตามรูปที่ 2.4.1



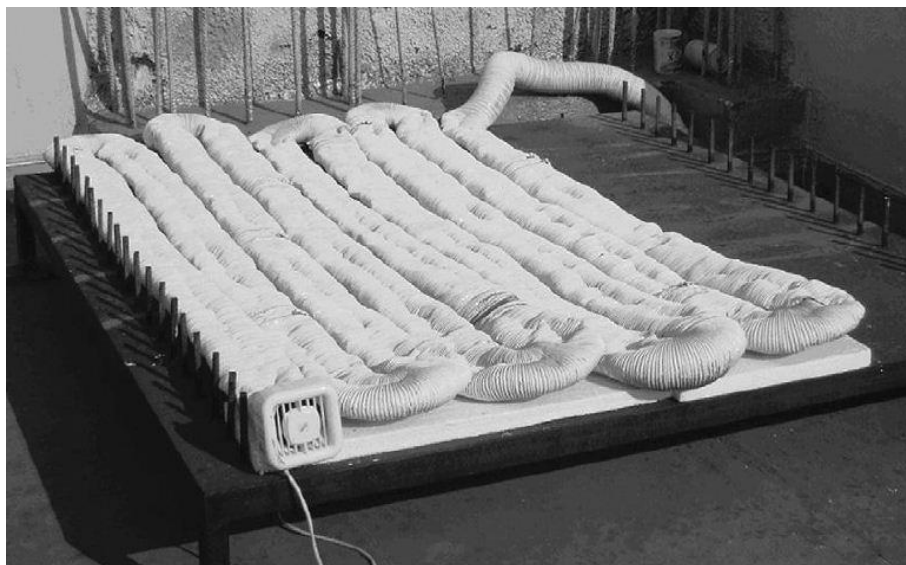
รูปที่ 2. 11 หลังคาเหล็ก และ False Color Image แสดงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ

ที่มา John Hollick. 2012. Nocturnal radiation cooling tests. Energy Procedia 30: 932

หลังจากนั้น ได้ทดลองนำลมไหลผ่านผิวหน้าของแผ่น transpired solar collector ที่หันหน้าเข้าหาท้องฟ้าโปร่งในเวลากลางคืน ขนาด  $8 \times 1.22\text{m}$ . หรือ  $9.76 \text{ m}^2$  ซึ่งพบว่า ลมดังกล่าว เมื่อผ่านผิวหน้าของแผ่นวัสดุที่เย็นแล้ว สามารถมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศได้  $4.7^\circ\text{C}$

#### 2.4.2 การทดลอง และทดสอบการแผ่รังสีความร้อนในเวลากลางคืน เพื่อการทำความเย็นภายในอาคาร (Experiment and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling)

การทดลองนี้มีขึ้นเพื่อทดสอบการทำความเย็นในเวลากลางคืนด้วยวิธีการแผ่รังสี โดยการติดตั้งท่ออลูมิเนียม ทาสีขาว ขดอยู่บนหลังคาของห้องที่ใช้ในการทดลอง ในประเทศกรีซ โดยทดลองทำหน้าที่เป็นวัสดุที่ใช้ในการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน และติดตั้งพัดลมเพื่อดูดลมจากภายในห้องที่ผ่านการทำความเย็นจากการแผ่รังสีเข้ามาภายในห้อง ดังรูปที่ 2.4.2



รูปที่ 2. 12 งานวิจัย *Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator*

ที่มา : *Bagiorgas H. and Mihalakakou G. 2008. Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling. Renewable Energy*

*33: 1220–1227*

โดยผลที่ได้ ห้องที่มีการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสี มีอุณหภูมิต่ำกว่าอีกห้องหนึ่งที่เหมือนกันแต่ไม่ได้มีการทำความเย็น โดยมีอุณหภูมิต่ำกว่า 2.5-4°C (Bagiorgas & Mihalakakou, 2008)

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่บ่งบอกถึงตัวแปรอื่นส่งผลถึงประสิทธิภาพของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ได้แก่ความเร็วลม และขนาดช่องว่างใต้หลังคา

#### 2.4.3 การศึกษาแผงบังลมเพื่อลดการถ่ายเทความร้อน ของพื้นผิวทำความเย็นด้วยการแผ่รังสี ความร้อนในเวลากลางคืน (An investigation into the use of a wind shield to reduce the convective heat flux to a nocturnal radiative cooling surface)

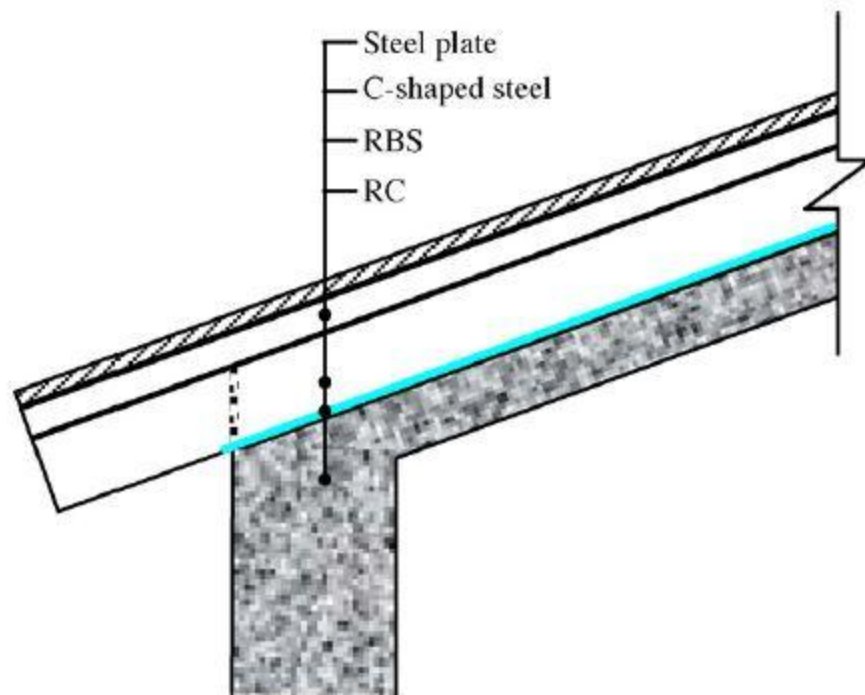
การวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบของแผงกันลมต่อการพาความร้อนของวัสดุ จากการที่อากาศจากบรรยากาศโดยรอบ ไหลผ่านผิวหน้าของของพื้นผิววัสดุที่วางในแนวนอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการทำความเย็น โดยการแผ่รังสีความร้อนในเวลากลางคืน โดยการศึกษาจากการคำนวณในแบบจำลองการไหลในคอมพิวเตอร์ (Computational fluid dynamical calculation) และแบบจำลองที่ทดสอบจากอุโมงค์ลม ที่จำลองสภาพภูมิอากาศแบบประเทศไทย การศึกษาทดสอบโดยแบบจำลองวัสดุขนาด 312mm. x 250mm. และแผงกันลมโลหะยาวตลอดแนววัสดุที่มีความสูงต่างกัน ดังนี้ 0, 25, 50 และ 100mm. ตามลำดับ จากการทดลองพบว่ายิ่งแผงกันลมสูง

ประสิทธิภาพในการระบายความร้อนด้วยลมยิ่งลดต่ำลง หากแต่แผงกันลมที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด กลับเป็นแผงกันลมที่มีความสูงมากที่สุด หรือ 25mm. เนื่องจากมีความสูงที่พอดีจนทำให้เกิด กระแสลมปั่นป่วน (Turbulence) ในบริเวณผิวหน้าวัสดุจึงมีลมไหลผ่านด้วยความเร็วที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับตัวแปรอื่นๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความเร็วลมคือหนึ่งในปัจจัยหลักในการระบายความร้อนในหลังคา 2 ชั้น (Golaka & Exell, 2007)

#### 2.4.4 การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพหลังคา 2 ชั้น โดยร่วมกับแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อน (Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system))

การวิจัยนี้ศึกษาระบบหลังคา 2 ชั้น ที่เป็นที่ทราบดีว่ามีประสิทธิภาพสูงในการลดการนำความร้อน และพาความร้อนจากหลังคาเข้ามาสู่พื้นที่ใช้งานอาคารได้เป็นอย่างดี จึงได้ทำการทดลองที่จะหาทดสอบประสิทธิภาพเพื่อใช้งานร่วมกับแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อน เพื่อที่จะให้หลังคาสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 ชนิดได้ดีที่สุด การวิจัยนี้ทดลองโดยการสร้างแบบจำลองหลังคา 2 ชั้น โดยประกอบด้วย พื้นไร้คาน (RC Flat Slab) และหลังคาเหล็ก โดยในการศึกษาได้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- การศึกษาเพื่อหาความกว้างช่องหลังคาที่ดีที่สุด ของหลังคา 2 ชั้นที่มีลมไหลผ่าน
- การศึกษาเพื่อหาตำแหน่งการติดตั้งแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อน (radiant barrier system) ที่เหมาะสม



รูปที่ 2. 13 ตำแหน่งการติดตั้งแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อนใต้หลังคาที่เหมาะสม  
ที่มา : Chang P., Chiang C. and Lai C. 2007. Development and preliminary valuation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). *Energy and Buildings* 40: 140–147

จากการศึกษาพบว่า ความกว้างช่องหลังคาที่ดีที่สุด ของหลังคา 2 ชั้นที่มีลมไหลผ่านเมื่อช่องว่างหลังคามีความกว้าง 10cm. จะสามารถลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาได้ดีที่สุด และตำแหน่งการติดตั้งแผ่นป้องกันการแผ่รังสีความร้อนที่เหมาะสมที่สุดคือ แขนงไว้บริเวณกึ่งกลางช่องว่างใต้หลังคา (Chang, Chiang, & Lai, 2007)

### บทที่ 3

#### ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพในการทำความเข้าใจโดยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลงเบา ในภูมิอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย โดยการใช้การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อศึกษารูปแบบของหลังคาที่มีประสิทธิภาพในการระบายความร้อนมากที่สุด และการวิจัยในเชิงจำลองสถานการณ์จริง (Simulation Research) โดยการใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 เป็นเครื่องมือในการวิจัยเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการนำไปใช้งานจริง ประกอบกัน โดยมีระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษา แบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

- 3.1 ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง
  - 3.2.1 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา
  - 3.2.2 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา
  - 3.2.3 ส่วนการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)
- 3.3 ขั้นตอนการวิจัย
  - 3.3.1 การออกแบบกล่องทดลอง
  - 3.3.2 การออกแบบการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)
- 3.4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล
- 3.5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ

### 3.1 ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ และการระบายความร้อนด้วยลม รวมถึงวิธีการทดลองเพื่อกำหนดแนวทางการศึกษา และกำหนดตัวแปรในการวิจัย ได้แก่

- 3.1.1 ศึกษาหลักการ วิธีการทำงานของการทำความเย็นโดยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา
- 3.1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการแผ่รังสี และการทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติด้วยการระบายอากาศ
- 3.1.3 ศึกษาการหาค่าประสิทธิภาพการทำความเย็นการทำความเย็นโดยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา ด้วยการคำนวณ เพื่อนำมาใช้ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์
- 3.1.4 ศึกษาการคำนวณทางการเงิน เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการนำไปประยุกต์ใช้จริงต่อไป

### 3.2 การกำหนดตัวแปรในการทดลอง

งานวิจัยนี้ ศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา โดยศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาเป็นสำคัญ จากการกำหนดตัวแปรดังนี้

#### 3.2.1 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่

- หลังคากระเบื้องดินเผา ปลายตรง สีแดงธรรมชาติ ขนาด 18.4 x 39.2 x 1.4 cm  
มีค่า Surface Emissivity = 0.40 – 0.51
- หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ลอนคู่ สีวัสดุ (สีเทา) ขนาด 50 x 120 x 0.55 cm  
มีค่า Surface Emissivity = 0.63
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME หนา 0.35 mm ทาสีน้ำมัน สีดำ  
มีค่า Surface Emissivity = 0.92
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME สีวัสดุ (สีบรอนซ์เงิน) หนา 0.35 mm  
มีค่า Surface Emissivity = 0.28

### 3.2.2 ส่วนการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา

ระยะช่องว่างใต้หลังคาที่ทำการทดสอบ ได้แก่

- ช่องว่างใต้หลังคา 0 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 5 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 10 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 15 mm.

### 3.2.3 ส่วนการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

มีขึ้นเพื่อทดสอบโดยการจำลองกับอาคารพักอาศัย เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในการประยุกต์ใช้จริง โดยพิจารณาในแต่ละแง่มุม ดังนี้

- 3.2.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่ความน่าสบาย (comfort)
- 3.2.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การใช้พลังงาน
- 3.2.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน

## 3.3 ขั้นตอนการวิจัย

### 3.3.1 การออกแบบกล่องทดลอง

สร้างกล่องทดลองด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากบรรยากาศโดยรอบที่จะมารบกวนผลการทดลอง โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้โฟมโพลีสไตรีน หนา 5cm เนื่องจากมีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป หาซื้อได้ง่าย ต่อการนำมาสร้างกล่องทดลอง รวมถึงจากการทบทวนวรรณกรรม มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ใช้โฟมชนิดนี้ในการสร้างกล่องทดลองเช่นกัน โดยนำมาสร้างกล่องขนาด 60 x 60 x 190cm ติดตั้งพัดลมที่มีค่าการไหลเวียนอากาศเท่ากับ 20 CFM และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิภายในกล่องตามจุดที่กำหนด



การทดลองช่วงที่ 1 ติดตั้งแผ่นหลังคา ใช้หลังคาที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ดังนี้

- หลังคากระเบื้องดินเผา ปลายตรง สีแดงธรรมชาติ ขนาด 18.4 x 39.2 x 1.4 cm.
- หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ลอนคู่ สีวัสดุ (สีเทา) ขนาด 50 x 120 x 0.55 cm.
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME ทาสีน้ำมัน สีดำ
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME สีวัสดุ (สีบรอนซ์เงิน) ทน 0.35 mm.

การทดลองช่วงที่ 2 ติดตั้งแผ่นหลังคา โดยมีระยะช่องว่างใต้หลังคาที่แตกต่างกัน ดังนี้

- ช่องว่างใต้หลังคา 0 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 5 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 10 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 15 mm.



รูปที่ 3. 1 โฟมโพลีสไตรีน ที่ใช้ในการสร้างกล่องทดลอง



รูปที่ 3. 2 พัดลมที่ใช้ในกล่องทดลอง

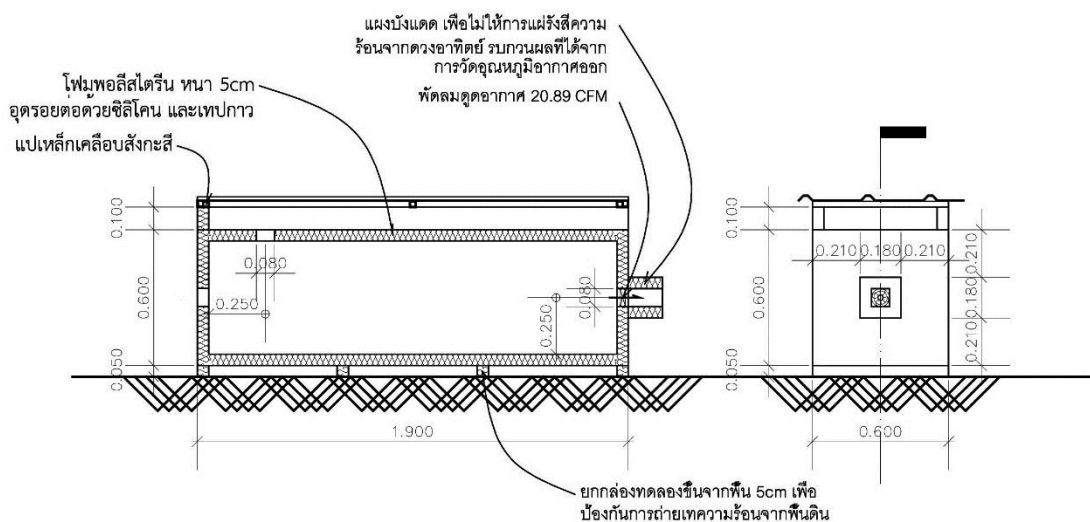


รูปที่ 3. 3 อุปกรณ์การเก็บข้อมูล เครื่องวัดอุณหภูมิ 12 Channel Temperature Data Logger

### 3.3.1.1 การสร้างกล่องทดลอง

กล่องทดลองมีขนาด 60 x 60 x 190 cm. เนื่องจากกล่องทดลองนั้นต้องมีความยาว เพื่อให้ลมไหลผ่านพื้นผิวหลังคาได้เป็นระยะทางที่มาก รวมถึงมีขนาดที่ไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไป ก่อสร้างง่าย และเป็นขนาดที่พอดีกับวัสดุ กล่องทดลองเจาะรูขนาด 8 x 8 cm. เพื่อติดตั้งพัดลม จำนวน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ด้านหน้ากล่องทดลอง ด้านหลังกล่อง และด้านบนกล่องทดลองค่อนไปทางด้านหลัง เพื่อให้เป็นช่องที่อากาศไหลผ่าน โดยรูปแบบการไหลของอากาศ จะมีการปรับเปลี่ยนไปทั้งในเวลากลางวัน และในเวลากลางคืน ตามหลักการทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา

โดยในเวลากลางวัน จะปิดรูบริเวณด้านบน ให้อากาศไหลจากด้านหลังกล่อง มายังด้านหน้ากล่อง เพื่อวัดอุณหภูมิเพื่อนำไปคำนวณการถ่ายเทความร้อนต่อไป (เปิด - ปิดรูอากาศ ด้วยโพนที่มีขนาดเท่ากัน ปิดรอยต่อด้วยเทปกาว) หลังคาของกล่องทดลองจึงมีสภาพเป็นเหมือนหลังคา 2 ชั้น ที่มีช่องว่างตรงกลาง ให้ลมไหลผ่านได้ ช่วยระบายความร้อนที่สะสมบริเวณใต้หลังคา และในเวลากลางคืน จะปิดรูบริเวณหลังกล่อง เปิดรูบริเวณด้านบนกล่อง ปิดช่องว่างใต้หลังคาด้านหลังกล่อง และเมื่อพัดลมดูดอากาศทำงาน ช่องว่างใต้หลังคาด้านหน้าจะทำหน้าที่เป็นช่องนำอากาศเข้า ให้อากาศไหลผ่านผิวหลังคาที่เย็น เนื่องจากมีการแผ่รังสีความร้อน กลับคืนสู่ท้องฟ้า อากาศจะถ่ายเทความร้อนกับหลังคา จนกระทั่งมีอุณหภูมิเย็นกว่าอุณหภูมิอากาศ และไหลเข้ามาในกล่องผ่านทางรูเปิดด้านบน เพื่อทำความเย็นให้แก่ภายในกล่องทดลอง



รูปที่ 3. 4 รายละเอียดของกล่องทดลอง

### 3.3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดผลการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้คือ 12 Channel Temperature Data Logger เพื่อบันทึกเก็บข้อมูลอุณหภูมิของตำแหน่งต่างๆของกล่องทดลอง ในแต่ละกล่องทดลอง โดยมีตำแหน่งการเก็บข้อมูล ดังนี้

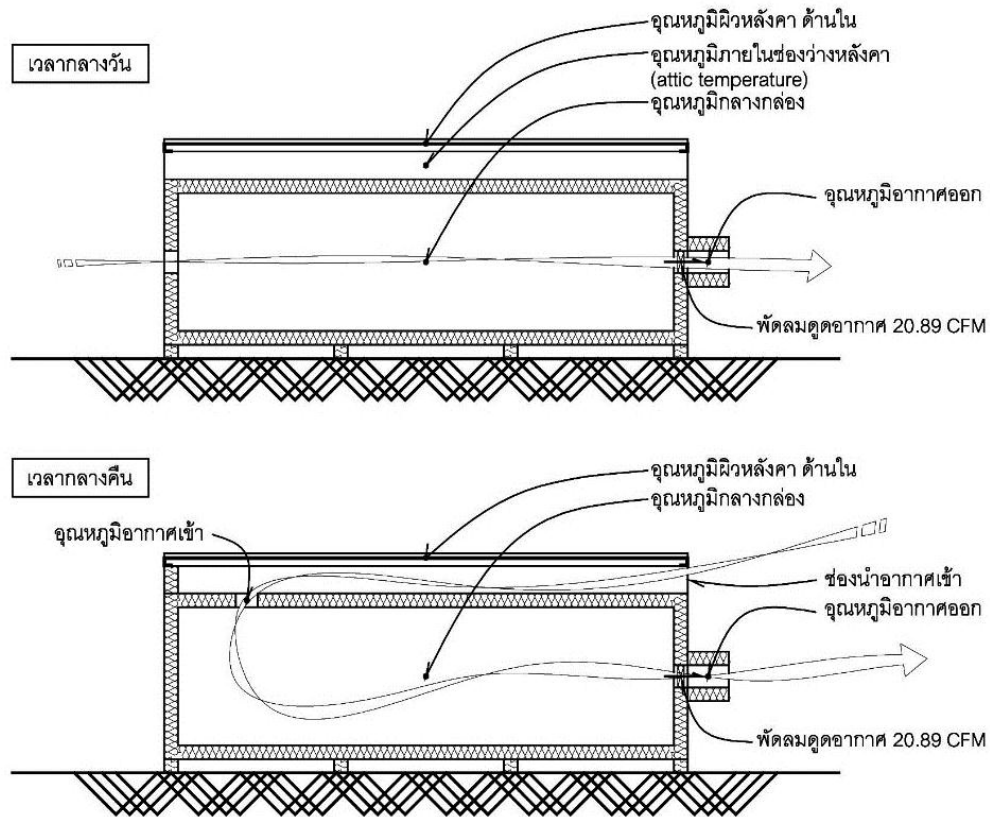
#### เวลากลางวัน (9:00 – 17:30)

- อุณหภูมิผิวหลังคา ด้านใน
- อุณหภูมิภายในช่องว่างหลังคา (attic temperature)
- อุณหภูมิกลางกล่อง
- อุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง

#### เวลากลางคืน (18:00 – 8:30)

- อุณหภูมิผิวหลังคา ด้านใน
- อุณหภูมิอากาศเข้า
- อุณหภูมิกลางกล่อง
- อุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง

โดยมีตำแหน่งในการติดตั้ง ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3.5



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

### 3.3.2 การออกแบบการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ที่ได้จากกล่องทดลอง จึงนำไปแทนที่ในหลังคาที่ใช้ในการจำลอง เพื่อเป็นค่า  $U$  เสมือนที่ได้จากการทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้ต่อ  $1\text{m}^2$  ของหลังคา ความแตกต่างของปริมาตรกล่องทดลอง และปริมาตรของอาคารตัวอย่าง ขนาดช่องเปิด สัดส่วนปริมาตรต่อลม และปริมาตรอาคาร จึงไม่ส่งผลแต่อย่างใด

ตัวแปรอื่นๆในการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.2.1 อาคารตัวอย่าง

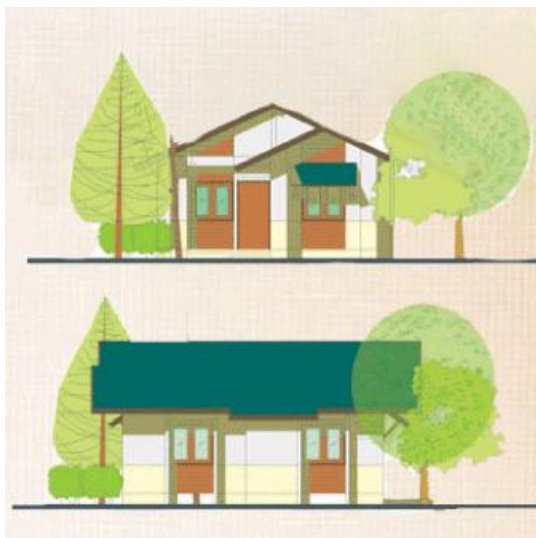
งานวิจัยนี้ศึกษาหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา โดยใช้หลักการแผ่รังสีความร้อน กลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนเป็นหลัก จึงได้เลือกอาคารตัวอย่าง เพื่อทำการจำลองทาง คอมพิวเตอร์ ด้วยเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- เป็นอาคารพักอาศัย เนื่องจากอาคารพักอาศัยมีการใช้งานในเวลากลางคืนเป็นหลัก จึงมีความเหมาะสม กับ หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ที่มีความสามารถระบายความร้อนออกจากอาคารได้ ในเวลา กลางคืน
- เป็นอาคารชั้นเดียว เนื่องจากหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มีการทำงานโดยใช้ความเย็นจากพื้นที่ หลังคา เพราะฉะนั้น อาคารที่มีสัดส่วนพื้นที่หลังคา ต่อ พื้นที่ใช้งานสูง จึงยังมีความเหมาะสม ซึ่งได้แก่ อาคารชั้นเดียว
- เป็นอาคารที่มีการออกแบบที่เป็นมาตรฐาน แพร่หลาย ไม่มีการออกแบบที่ตอบสนองความต้องการพิเศษ ใดๆของผู้อยู่อาศัย
- มีขนาดที่เหมาะสม ไม่เล็ก หรือใหญ่จนเกินไป โดยกำหนดให้ มี 2 ห้องนอน 1 ห้องน้ำ

ผู้วิจัยได้ทำการค้นหาอาคารตัวอย่างที่เหมาะสมกับเกณฑ์ดังกล่าว จึงได้ตัดสินใจเลือกใช้ อาคารตัวอย่าง จากโครงการ แบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย ที่เป็นหน่วยงานการ พาณิชยในสังกัดกรุงเทพมหานคร จัดตั้งขึ้นตามข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร เรื่องสำนักงานพัฒนา ที่อยู่อาศัย พ.ศ. 2545 เนื่องจากกรุงเทพมหานคร ได้ตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนที่อยู่อาศัยของ ประชาชน โดยโครงการแบบบ้านยืมดังกล่าว นั้น มีขึ้นเพื่อช่วยเหลือประชาชนในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร ให้มีโอกาสมีที่อยู่เป็นของตนเอง

จากแบบบ้านกว่า 130 แบบของโครงการแบบบ้านยืม ของสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัยนั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้แบบบ้านที่ 2 “แวมยुरา 11” ที่มีลักษณะตรงตามเกณฑ์ข้างต้นมากที่สุด โดยมี รายละเอียดดังนี้





1 ชั้น 2 ห้องนอน 1 ห้องน้ำ  
พื้นที่ใช้สอย 52 ตร.ม. เนื้อที่ดินอย่างน้อย  
37 ตร.วา หน้ากว้างที่ดินอย่างน้อย 11.5 ม.  
ราคาเริ่มต้น 465,000 บาท

รูปที่ 3. 6 บ้าน แวมยูรา 11 โดยโครงการแบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย กรุงเทพมหานคร

ที่มา : <http://office.bangkok.go.th/housing/Temporary/BanyimBlueprint/>

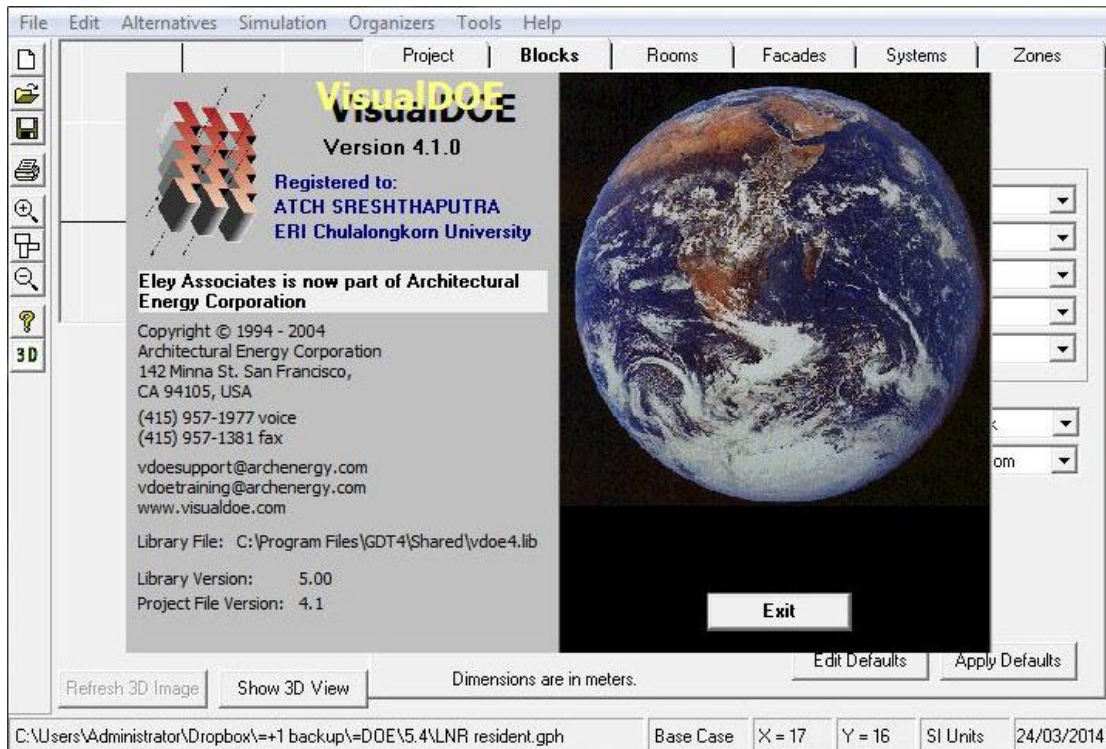
Brochure/BMAhome30mai002.html



### 3.3.2.2 โปรแกรม VisualDOE 4.1

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ ได้เลือกใช้โปรแกรม VisualDOE 4.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับสถาปนิก หรือวิศวกร ในการคำนวณการใช้พลังงานในอาคาร เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคาร โดยในตัวโปรแกรม สามารถคำนวณได้ครอบคลุมถึงระบบต่างๆในอาคาร ได้แก่ ระบบแสงประดิษฐ์ แสงธรรมชาติ ระบบปรับอากาศ ระบบเครื่องทำน้ำร้อน และระบบเปลือกอาคาร อีกทั้งยังรวมถึงการใช้ก๊าซธรรมชาติภายในอาคารด้วย โดยคำนวณจากรูปทรงอาคาร วัสดุก่อสร้างที่เลือกใช้ ประสิทธิภาพของระบบประกอบอาคาร การตั้งค่าการใช้งานในระบบประกอบอาคาร สถานที่ตั้ง ทิศทางการวางตัวอาคาร วัน และเวลาที่มีการใช้งาน ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ทำให้สามารถทราบถึงผลการใช้งานพลังงานในอาคารออกมาเป็นรายชั่วโมง ตลอดทั้งปีได้โดยละเอียด เพื่อนำมาประเมินการใช้งานพลังงานในอาคารต่อไป

โปรแกรม VisualDOE พัฒนาขึ้นโดย Lawrence Berkeley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา จึงเป็นโปรแกรมที่ได้รับความเชื่อถือ ได้รับการพัฒนา และทดสอบความเที่ยงตรงจากนักวิจัยทั่วโลก อย่างต่อเนื่อง ยาวนานกว่า 20 ปี



รูปที่ 3. 7 ภาพตัวอย่างของโปรแกรม VisualDOE

### 3.3.2.3 ฐานข้อมูลสภาพอากาศเพื่อการจำลองการใช้พลังงาน

ในการจำลองการใช้พลังงานด้วย DOE นี้ ได้ใช้ไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพ ที่ถูกจัดให้อยู่ในนามสกุล .TMY ซึ่งไฟล์ข้อมูลนี้จัดทำโดย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, 2542) ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลอากาศรายชั่วโมงตลอดหนึ่งปี ได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature) อุณหภูมิหยดน้ำค้าง (dew point temperature) ความเร็วลม ทิศทางลม ความกดอากาศ ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย (อรจรณ์ เศรษฐบุตร, 2550)

### 3.3.2.4 การตั้งค่าการใช้พลังงานภายในอาคารตัวอย่าง

จากการศึกษาการกำหนดฐานข้อมูลการใช้พลังงานในอาคารบ้านพักอาศัย เพื่อจำลองการใช้พลังงาน ได้กำหนดให้อาคารตัวอย่าง มีรายละเอียดดังนี้

- หลังคากระเบื้องดินเผา
- ฝ้าเพดานยิปซัม
- ระดับพื้นถึงหลังอะเส 2.7m.
- ระยะช่องว่างฝ้าเพดาน 0.30m.



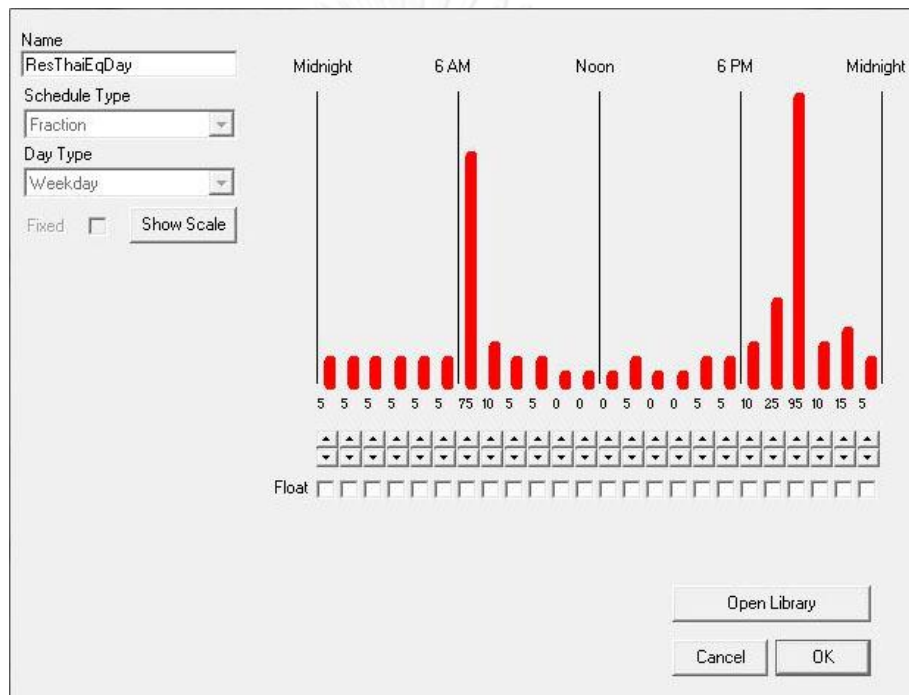
- กำหนดพื้นที่ปรับอากาศ ได้แก่ ห้องนั่งเล่น และห้องนอน โดยมีช่วงเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน
- พื้นที่ห้องน้ำไม่ปรับอากาศ
- ผนังก่ออิฐมวลเบา ฉาบปูน 2 ด้าน
- วงกบล่างของหน้าต่าง สูง 100cm.
- ขอบหน้าต่างล่าง สูงจากพื้น 1m.
- พื้นที่หน้าต่าง เฉลี่ยเท่ากันทุกด้าน โดยมีอัตราส่วนหน้าต่าง ต่อผนัง (Window to Wall Ratio หรือ WWR) มีค่า 30%
- หน้าต่าง ใช้กระจกใส 6mm.
- ค่าการแผ่รังสีความร้อน และดูดกลืนรังสีความร้อน ตั้งให้มีค่า 0.1 (เนื่องจากค่า U เสมือนที่ได้จากกล่องทดลอง ได้รวมการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีไว้แล้ว)

ในส่วนของการใช้งาน ได้อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัย 2 ชิ้น เพื่อให้ตัวแปรควบคุมมีรายละเอียดที่ตรงต่อความเป็นจริงมากที่สุด ได้แก่

ข้อมูลพื้นฐานของอาคารพักอาศัยนำมาจากงานวิจัย การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคาร ในอาคารบ้านเดี่ยว (จินดาวณิก & เศรษฐบุษุต, 2550) มีรายละเอียดดังนี้

- จำนวนผู้อาศัย คิดเป็น 2 คน ต่อจำนวน 1 ห้องนอน หรือทั้งหมด 4 คน ต่อหลัง
- การใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง คิดเป็น  $7.53 \text{ Watt/m}^2$
- การใช้พลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์ คิดเป็น  $8.00 \text{ Watt/m}^2$

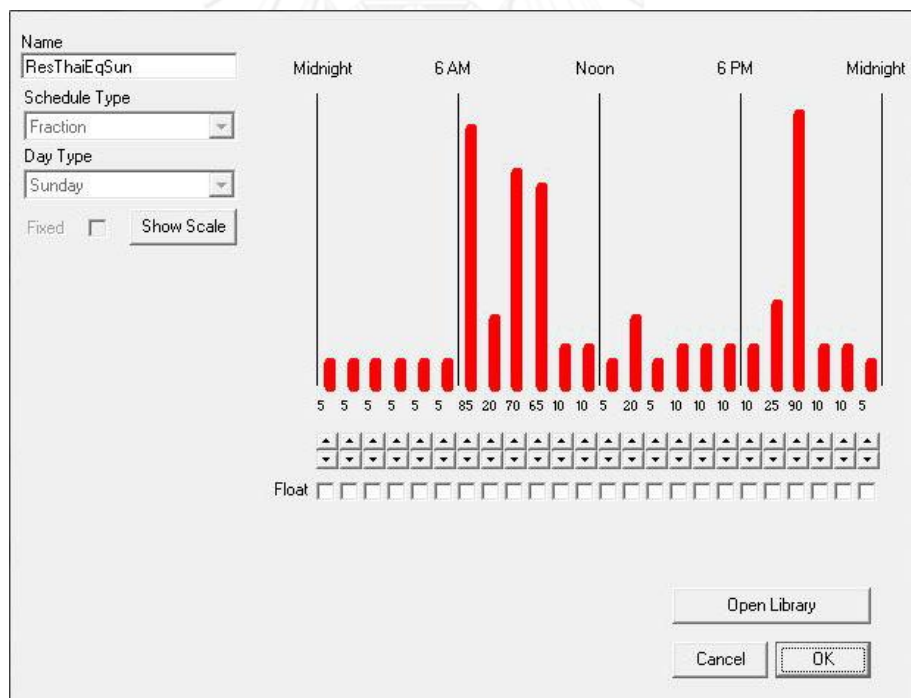
การตั้งปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า และช่วงเวลาที่มีการใช้งานนำมาจากงานวิจัย การพัฒนาวิธีการประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนรวม และการใช้พลังงานรวมของอาคารชุดพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร (บัวขจร, 2554) มีรายละเอียดดังนี้ ดูรูปที่ 3.3.8, 3.3.9 และ 3.3.10



รูปที่ 3. 8 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันธรรมดา



รูปที่ 3. 9 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันเสาร์



รูปที่ 3. 10 ช่วงเวลาที่มีการใช้งานเครื่องใช้ไฟฟ้า ในวันอาทิตย์

### ช่วงเวลาการใช้งานของผู้อยู่อาศัยภายในบ้าน กำหนดให้

- วันธรรมดา
- เวลา 7:00 – 18:00 ไม่มีการใช้งาน
- เวลา 18:00 – 22:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 100%
- เวลา 22:00 – 6:00 มีการใช้งานในห้องนอน 100%
- เวลา 6:00 – 7:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 100%
- วันหยุดเสาร์ อาทิตย์
- เวลา 6:00 – 22:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 100%
- เวลา 22:00 – 6:00 มีการใช้งานในห้องนอน 100%

### ช่วงเวลาการใช้งานไฟฟ้าแสงสว่าง กำหนดให้

- วันธรรมดา และวันเสาร์ อาทิตย์
- เวลา 18:00 – 20:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 60%
- เวลา 20:00 – 22:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 80%
- เวลา 22:00 – 24:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 60%
- เวลา 22:00 – 24:00 มีการใช้งานในห้องนั่งเล่น 80%
- นอกจากนั้น ไม่มีการใช้งานไฟฟ้าแสงสว่าง

ทั้งนี้ ได้ทำการกำหนดพื้นที่ปรับอากาศ ได้แก่ ห้องนอนทั้ง 2 ห้อง ห้องอาหาร และห้องรับแขก และพื้นที่ไม่ปรับอากาศ ได้แก่ ห้องน้ำ โดยทำการจำลองการใช้พลังงานเป็นระยะเวลาตลอดทั้งปี เป็นเวลา 365 วัน หรือ 8,760 ชั่วโมง ไม่นับวันหยุดนักขัตฤกษ์ ให้วันแรกของปีเป็นวันอาทิตย์ โดยให้โปรแกรมรายงานผลอุณหภูมิภายในอาคาร และปริมาณการใช้ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ออกมาในรูปแบบของรายงานรายชั่วโมง (Hourly report) เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

### 3.4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

#### 3.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกล่องทดลอง

- 3.4.1.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ลดลงของหลังคาที่ต่างชนิดกัน
- 3.4.1.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ลดลงของหลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคาต่างกัน
- 3.4.1.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดอุณหภูมิ ของหลังคาแต่ละชนิด
- 3.4.1.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดอุณหภูมิ ของหลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคาต่างกัน

นำผลการวัดอุณหภูมิที่ได้ ไปคำนวณสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ เพื่อเป็นค่า U เสมือนที่ได้จากระบบทำความเย็นด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

การหาสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบในเวลากลางคืน โดยใช้ Infiltration Method (Lechner, 1991) เพื่อหาพลังงานความร้อนที่หลังคาแผ่รังสีออกไปจากกล่อง ดังนี้

$$Q_1 = 1.08 \times CFM \times \Delta T_1$$

โดยที่ :

- $Q_1$  คือ ปริมาณการถ่ายเทความร้อนออกจากกล่องทดลอง (BTU/hr)
- 1.08 คือ ค่าคงที่ ที่มาจากการแปลงหน่วยในสมการ
- CFM คือ ปริมาณอากาศที่ไหลออกจากกล่องทดลอง (ft<sup>3</sup>/min) ซึ่งจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีค่า 20.89 ft<sup>3</sup>/min
- $\Delta T_1$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง (°F)

และคำนวณพลังงานความร้อนที่พัดลมดูดอากาศ นำเข้ามาในระบบ ดังนี้

$$Q_2 = U \times A \times \Delta T_2$$

โดยที่ :

- $Q_2$  คือ ปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่พัดลมดูดเข้ามาในกล่องทดลอง (BTU/hr)  
 $U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F)  
 $A$  คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (ft<sup>2</sup>.) จากกล่องทดลอง มีค่า 9.68752 ft<sup>2</sup>  
 $\Delta T_2$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า (°F)

เมื่อนำมาเท่ากันตามกฎทรงพลังงาน

$$Q_1 = Q_2$$

เพราะฉะนั้น จะสามารถหาค่า  $U$  ของระบบออกมาได้ โดยใช้สมการนี้

$$1.08 \times CFM \times \Delta T_1 = U \times A \times \Delta T_2$$

ย้ายข้างตัวแปรในสมการ

$$U = (1.08 \times CFM \times \Delta T_1) \div (A \times \Delta T_2)$$

โดยที่ :

- $U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F)  
 $1.08$  คือ ค่าคงที่ ที่มาจากการแปลงหน่วยในสมการ  
 $CFM$  คือ ปริมาณอากาศที่ไหลออกจากกล่องทดลอง (ft<sup>3</sup>/min) ซึ่งจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีค่า 20.89 ft<sup>3</sup>/min  
 $A$  คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (ft<sup>2</sup>.) จากกล่องทดลอง มีค่า 9.68752 ft<sup>2</sup>  
 $\Delta T_1$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง (°F)  
 $\Delta T_2$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า (°F)

### 3.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

3.4.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลองในด้านความน่าสบาย

3.4.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การใช้พลังงาน

3.4.2.3 วิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน ได้ทำการเปรียบเทียบกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value หรือ NPV) เพื่อหาผลต่างของมูลค่าปัจจุบัน (Present Value) ของผลรวมกระแสเงินสดจ่ายสุทธิ และกระแสเงินสดรับสุทธิ เนื่องจากอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา แม้จะเป็นการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ แต่ก็ยังคงใช้พัดลมดูดอากาศ เพื่อนำอากาศเย็นที่ได้จากการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติเข้ามาในอาคาร

และในทางทฤษฎี จุดประสงค์ของการหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือเพื่อแสดงความเป็นไปได้ในการลงทุน โดยเปรียบเทียบกับผลตอบแทนที่สามารถได้มาด้วยการลงทุน โดยที่

- $NPV > 0$  หมายถึง สามารถลงทุนได้ ผลตอบแทนจากการลงทุนมีมากกว่า
- $NPV = 0$  หมายถึง คຸ່ມทุนพอดี ควรพิจารณาจากปัจจัยอื่นนอกเหนือจากเรื่องเงิน
- $NPV < 0$  หมายถึง ควรหลีกเลี่ยง ผลตอบแทนจากการลงทุนมีน้อยกว่า

แต่เนื่องจากอาคารที่นำมาคำนวณเป็นอาคารพักอาศัย ไม่มีรายได้จากการดำเนินงานใดๆ และเนื่องจากมีระบบไหลเวียนอากาศเป็นระบบเปิด จึงไม่สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องปรับอากาศเพื่อลดภาระเครื่องปรับอากาศได้ จึงได้นำการคำนวณนี้มาแสดงรายจ่ายสุทธิ ของอาคารที่เกิดขึ้นในแต่ละปี โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้อง ดังนี้





## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ในส่วนของ การทดลองนี้ แบ่งได้เป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

- 4.1 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา
- 4.2 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา
- 4.3 การทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)
  - 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่ความน่าสบาย (comfort)
  - 4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การใช้พลังงาน
  - 4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน

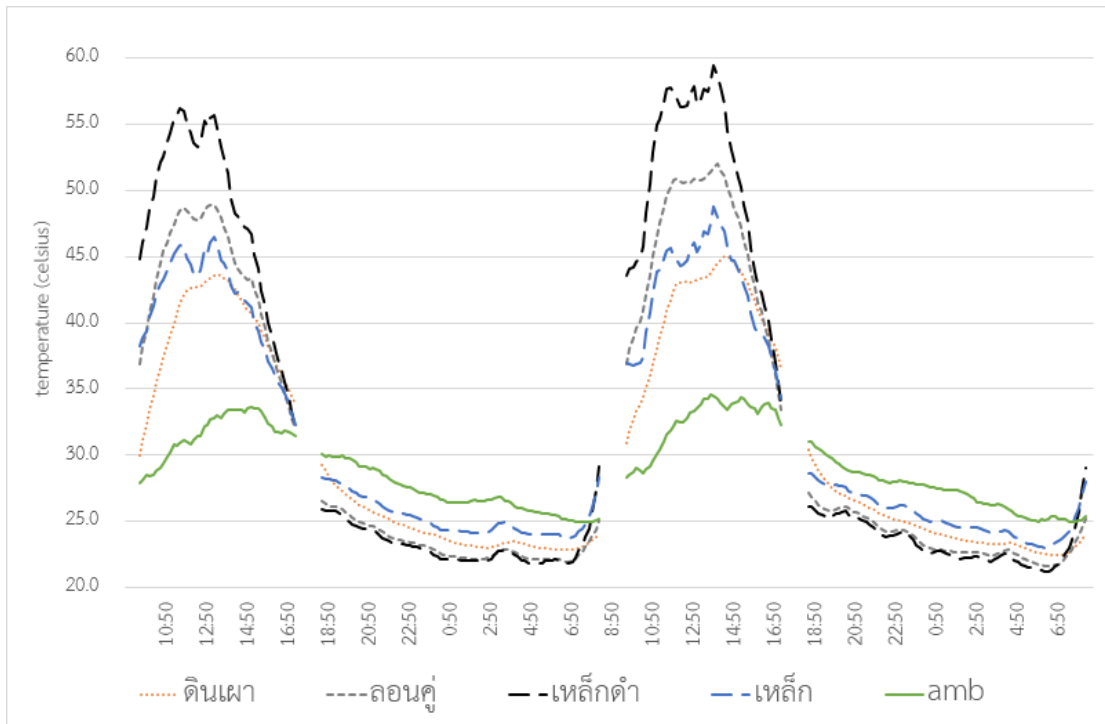
โดยการทดลองด้วยกล่องทดลองนั้นเพื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ดีที่สุด เพื่อนำไปคำนวณด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ต่อไป

#### 4.1 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา

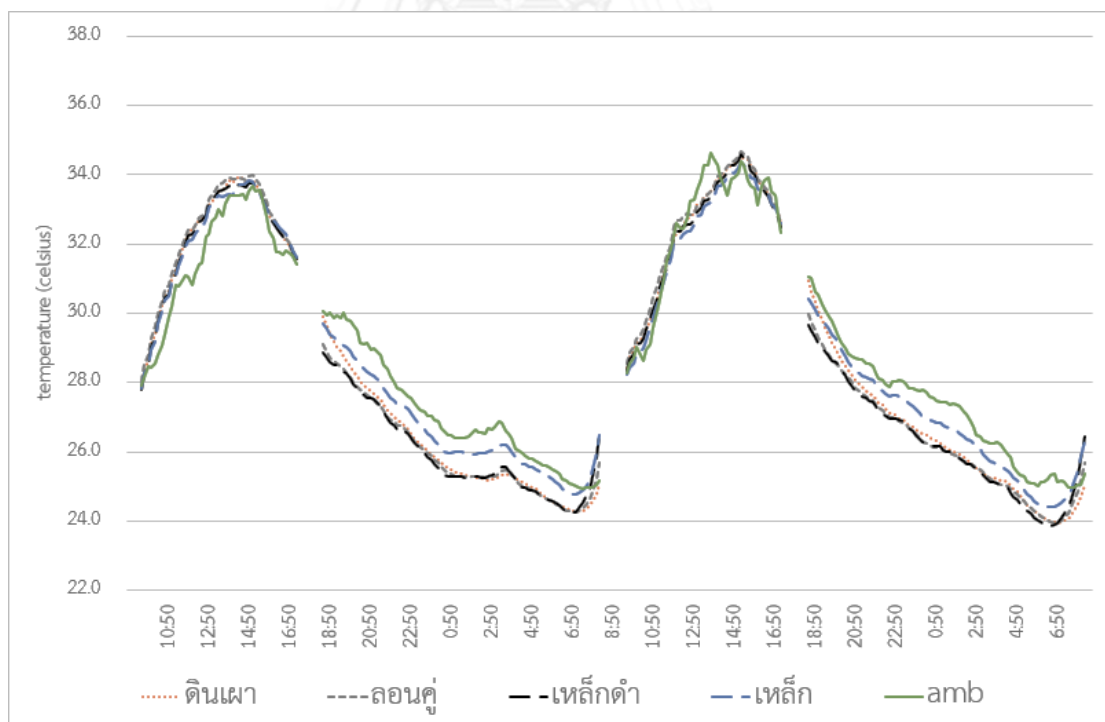
จากการทดลองใช้วัสดุหลังคา 4 ชนิดได้แก่

- หลังคากระเบื้องดินเผา ปลายตรง สีแดงธรรมชาติ ขนาด  $18.4 \times 39.2 \times 1.4$  cm.
- หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ลอนคู่ สีวัสดุ (สีเทา) ขนาด  $50 \times 120 \times 0.55$  cm.
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME หนา 0.35 mm. ทาสีน้ำมัน สีดำ
- หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME สีวัสดุ (สีบรอนซ์เงิน) หนา 0.35 mm.

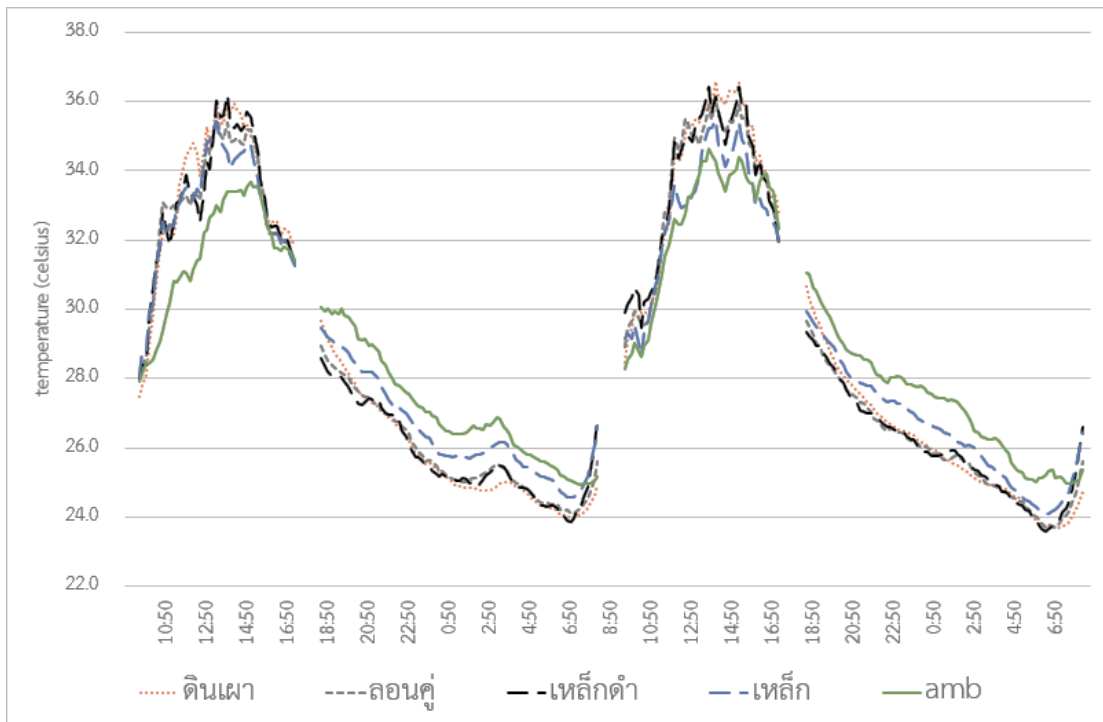
ทำการทดลองบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง ณ วันที่ 4 – 6 มกราคม พ.ศ. 2557 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบกล่องระหว่างรูปแบบกลางวัน และกลางคืน ในเวลา 8:30 – 8:50 และ 17:30 – 17:50 ตามลำดับ เป็นเวลา 2 วัน 2 คืน และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนแผนภูมิเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆของกล่องทดลอง ของหลังคาแต่ละวัสดุ จะได้ผลการทดลอง ดังนี้



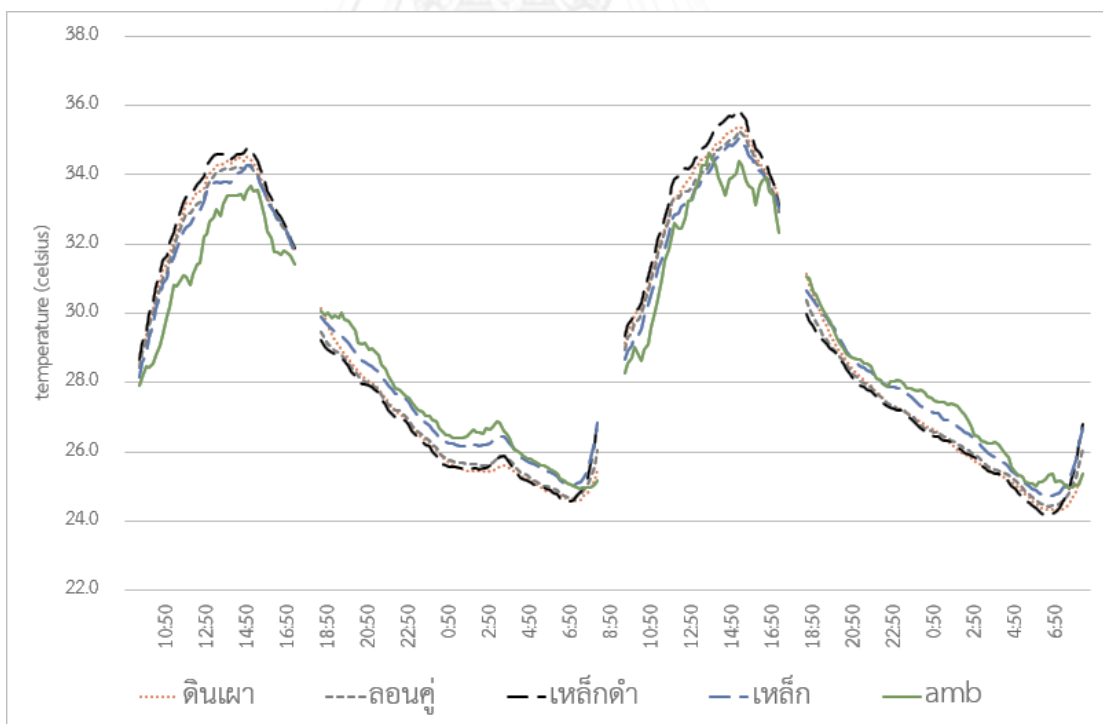
แผนภูมิที่ 4. 1 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังคาคำนใน ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 2 เปรียบเทียบอุณหภูมิกึ่งกลางกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิช่องว่างหลังคา (อุณหภูมิอากาศเข้าในเวลากลางคืน) ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 4 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา

จากแผนภูมิที่ 4.1.1 แผนภูมิเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน ในแต่ละช่วงเวลา จะเห็นได้ว่า หลังคาที่ใช้วัสดุแต่ละชนิด จะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่

ต่างกัน ส่งผลให้อุณหภูมิผิวด้านในนั้น ไม่เท่ากัน ซึ่งจากแผนภูมิจะสามารถเห็นได้ชัดว่า หลังคาเหล็ก สีดำมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ได้มากที่สุด จึงมีอุณหภูมิสูงที่สุด และรองลงมาคือ หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ หลังคาเหล็ก และหลังคากระเบื้องดินเผา ตามลำดับ ในทางกลับกัน ในเวลากลางคืนวัสดุจะทำการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า โดยที่วัสดุที่สามารถดูดกลืนรังสีความร้อนได้ดี ย่อมสามารถแผ่รังสีได้ดีเช่นกัน แต่จากแผนภูมิที่ 4.1.1 จะเห็นได้ว่าหลังคาไม่สามารถคายความร้อนในเวลากลางคืนได้ เท่ากับการดูดกลืนความร้อนในเวลากลางวัน เนื่องจาก การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันอยู่ในรูปแบบของคลื่นสั้น ที่มีพลังงานสูง จึงมีประสิทธิภาพมากกว่า การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุในเวลากลางคืน ที่อยู่ในรูปแบบของคลื่นยาว

ตารางที่ 4. 1 แสดงอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน (°C)

		ดินเผา	ลอนคู่	เหล็กดำ	เหล็ก
day	average (°C)	39.91	44.45	49.31	41.87
	min (°C)	29.94	31.92	32.1	32.3
	max (°C)	45.04	51.96	59.46	48.72
night	average (°C)	24.46	23.49	23.33	25.34
	min (°C)	22.44	21.60	21.22	23.02
	max (°C)	30.38	27.14	29.18	28.64

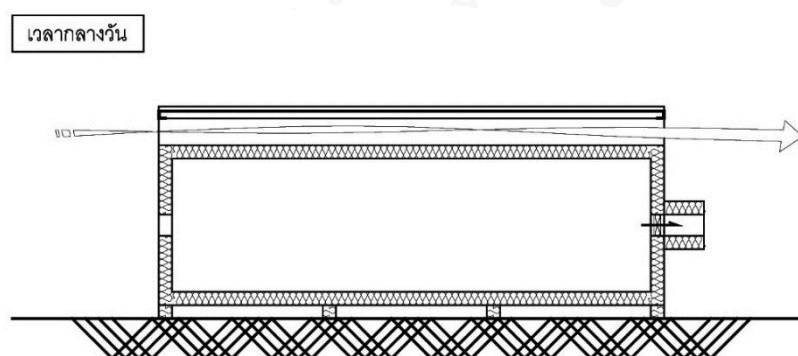
ในช่วงเวลาเช้า ประมาณ 6:00 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิผิวหลังคา จากที่ลดต่ำลงมาเรื่อยๆ ตลอดทั้งคืน กลับพุ่งสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาเช้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของท้องฟ้านั้น สูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิของหลังวัสดุหลังคา การแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนจึงสิ้นสุดลง และเริ่มการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ซึ่งหากตัดข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวออก โดยเริ่มจากช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นในวันที่ทำการทดลอง ในเวลา 6:42 นาฬิกา เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการทำความเย็นในเวลากลางคืนเท่านั้น จะได้ผลตามตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4. 2 แสดงอุณหภูมิผิวหลังคาต้านใน เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเช้าออกแล้ว (°C)

		ดินเผา	ลอนคู่	เหล็กดำ	เหล็ก
day	average (°C)	39.91	44.45	49.31	41.87
	min (°C)	29.94	31.92	32.1	32.3
	max (°C)	45.04	51.96	59.46	48.72
night	average (°C)	24.68	23.59	23.25	25.42
	min (°C)	22.52	21.64	21.22	23.02
	max (°C)	30.38	27.14	26.14	28.64

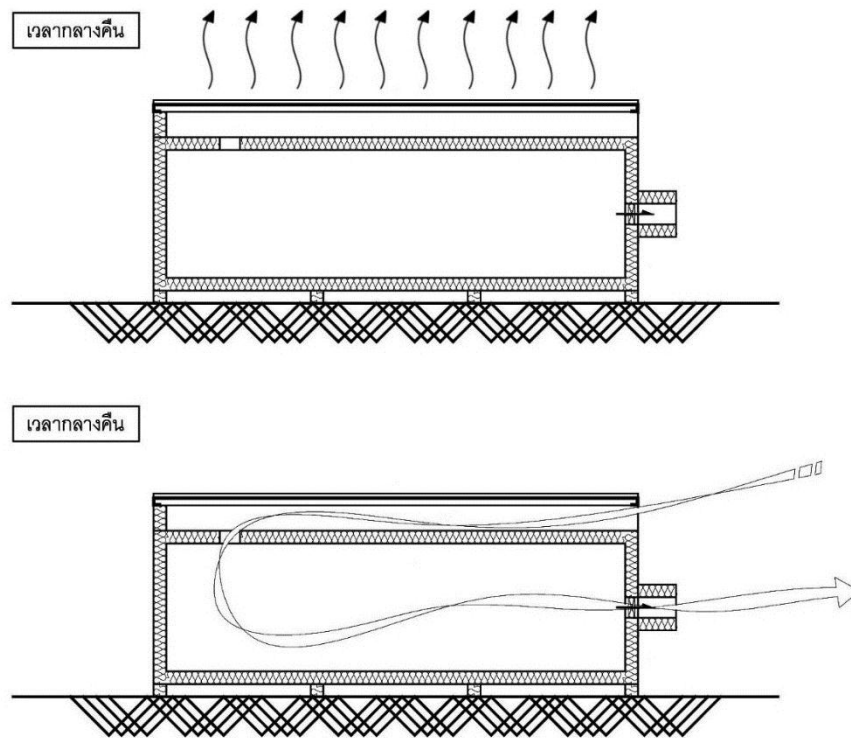
เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิกลางกล่องทดลอง (ดูแผนภูมิที่ 4.1.2) และอุณหภูมิอากาศ จะเห็นว่า ในเวลากลางวันอุณหภูมิผิวหลังคาที่ร้อนจัดนั้น ส่งผลน้อยมากต่ออุณหภูมิกลางกล่องทดลอง โดยในเวลากลางวัน กล่องทดลองหลังคาเหล็กสีดำ ผิวหลังคาต้านในมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 49.31°C ในขณะที่อุณหภูมิอากาศในเวลากลางวัน มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 31.98°C หรือสูงกว่าอุณหภูมิอากาศในเวลากลางวันถึง 17.33°C หากแต่ภายในกล่องทดลอง หลังคาเหล็กสีดำ มีอุณหภูมิเฉลี่ยเพียง 32.23°C หรือสูงกว่าอุณหภูมิอากาศเพียง 0.25°C เท่านั้น

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ในเวลากลางวัน คุณสมบัติดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่สูงนั้น ส่งผลต่อภายในกล่องทดลองน้อยมาก เนื่องจากกล่องทดลองปิดรูอากาศด้านบน ปล่อยให้ช่องว่างใต้หลังคาเปิดโล่ง ทำหน้าที่เป็นหลังคา 2 ชั้น มีการระบายอากาศ จึงสามารถระบายความร้อนจากหลังคาได้ดี และป้องกันความร้อนจากหลังคาที่มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีความร้อนสูงได้



รูปที่ 4. 1 การทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในเวลากลางวัน

ในทางกลับกัน เวลากลางวัน วัสดุหลังคาจะทำการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า ส่งผลให้พื้นผิวหลังคาเย็นกว่าอุณหภูมิอากาศ เช่น หลังคาเหล็กสีดำที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยเฉลี่ย  $23.25^{\circ}\text{C}$  (ดูตารางที่ 4.1.2) หรือเย็นกว่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย  $4.22^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้น พื้นผิวหลังคาด้านในจะส่งผลให้อากาศภายในช่องว่างใต้หลังคาเย็นลง และพัดลมดูดอากาศก็จะทำการดูดอากาศเย็นภายในช่องว่างใต้หลังคา เพื่อไปทำความเย็นภายในกล่องทดลอง



รูปที่ 4. 2 การทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในเวลากลางวัน

บน : หลังคาแผ่รังสีความร้อน กลับคืนสู่ท้องฟ้า ส่งผลให้ผิวหลังคา และอากาศภายในช่องว่างใต้หลังคาเย็นลง

ล่าง : พัดลม ดูดอากาศเย็นภายในช่องว่างใต้หลังคา ลงมาทำความเย็นภายในกล่อง

นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า ในเวลากลางวัน อุณหภูมิกลางกล่องจะลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิอากาศ (ดูแผนภูมิที่ 4.1.2) โดยในหลังคาเหล็กสีดำ จะลดต่ำลงมากที่สุด ถึง  $26.29^{\circ}\text{C}$  หรือต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ  $1.70^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4. 3 แสดงอุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเข้าออกแล้ว (°C)

		ดินเผา	ลอนคู่	เหล็กดำ	เหล็ก
day	average (°C)	32.30	32.42	32.23	32.13
	min (°C)	27.92	28.04	27.80	27.84
	max (°C)	34.50	34.68	34.58	34.36
night	average (°C)	26.50	26.35	26.29	26.97
	min (°C)	24.08	24.08	23.90	24.42
	max (°C)	30.94	29.98	29.66	30.42

จากผลการทดลองข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่า หลังคาเหล็กสีดำ ที่มีคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนสูงนั้น มีประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ โดยใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบาได้ดีกว่าวัสดุประเภทอื่น รวมถึงสามารถลดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองให้ต่ำกว่า อุณหภูมิบรรยากาศได้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ชนิดของวัสดุไม่ได้มีผลต่อการป้องกันความร้อนในเวลากลางวันเท่าใดนัก เนื่องจากปัจจัยหลักในการป้องกันความร้อน คือแผ่นโพลีโพลีไธรีน อุณหภูมิกลางกล่องทดลองในแต่ละวัสดุหลังคา จึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

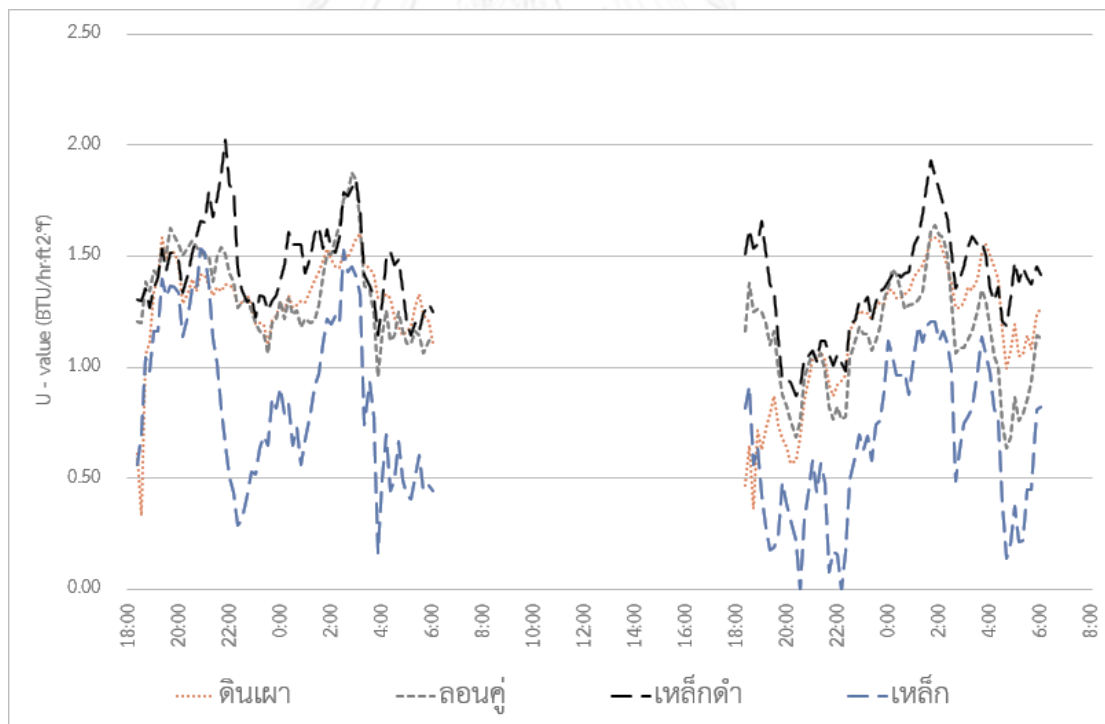
ลำดับต่อไปเมื่อนำผลการทดลองที่ได้ มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบในเวลากลางคืน โดยใช้ Infiltration Method (Lechner, 1991) เพื่อหาพลังงานความร้อนที่หลังคาแผ่รังสีออกไปจากกล่อง โดยใช้สมการ

$$U = (1.08 \times CFM \times \Delta T_1) \div (A \times \Delta T_2)$$

โดยที่ :

- U คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F)  
 1.08 คือ ค่าคงที่ ที่มาจากการแปลงหน่วยในสมการ  
 CFM คือ ปริมาณอากาศที่ไหลออกจากกล่องทดลอง (ft<sup>3</sup>/min) จากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีค่า 20.89 ft<sup>3</sup>/min  
 A คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (ft<sup>2</sup>.) จากกล่องทดลอง มีค่า 9.68752 ft<sup>2</sup>  
 $\Delta T_1$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง (°F)  
 $\Delta T_2$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า (°F)

เมื่อแทนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง และคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F) ในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้



แผนภูมิที่ 4. 5 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F) ในแต่ละช่วงเวลา

จากแผนภูมิที่ 4.1.5 แม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F) ในแต่ละช่วงเวลานั้น มีค่าที่ไม่คงที่ เนื่องจากจากสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูงชนิดมวลเบา ในแต่ละวัสดุนั้นมีค่าที่ค่อนข้างน้อย แต่จากลักษณะของ



แผนภูมิแล้ว ก็ไม่ได้เอียงไปทางใดทางหนึ่ง จึงสามารถสรุปประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ในแต่ละวัสดุ โดยใช้ค่าเฉลี่ย ซึ่งมีค่าดังนี้

ตารางที่ 4. 4 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในแต่ละวัสดุ

	หน่วย	ดินเผา	ลอนคู่	เหล็กดำ	เหล็ก
U-value	(BTU/hr-ft <sup>2</sup> ·°F)	1.224	1.234	1.416	0.761
	(W/m <sup>2</sup> ·°K)	6.950	7.004	8.039	4.320

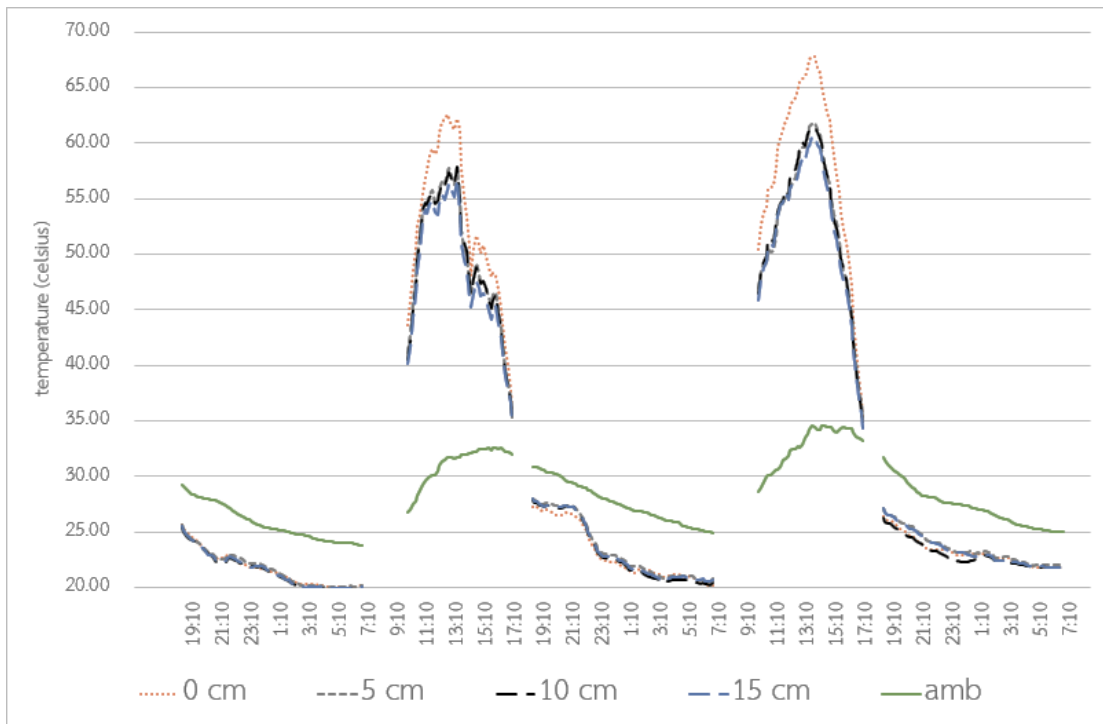
จึงสามารถสรุปได้ว่า วัสดุหลังคาเหล็กสีดำ มีประสิทธิภาพในการทำความร้อน ด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบามากที่สุด โดยรองลงมาคือ กระเบื้องหลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ (ลอนคู่) หลังคากระเบื้องดินเผา ที่มีค่าใกล้เคียงกัน และหลังคาเหล็ก ตามลำดับ

#### 4.2 การทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา

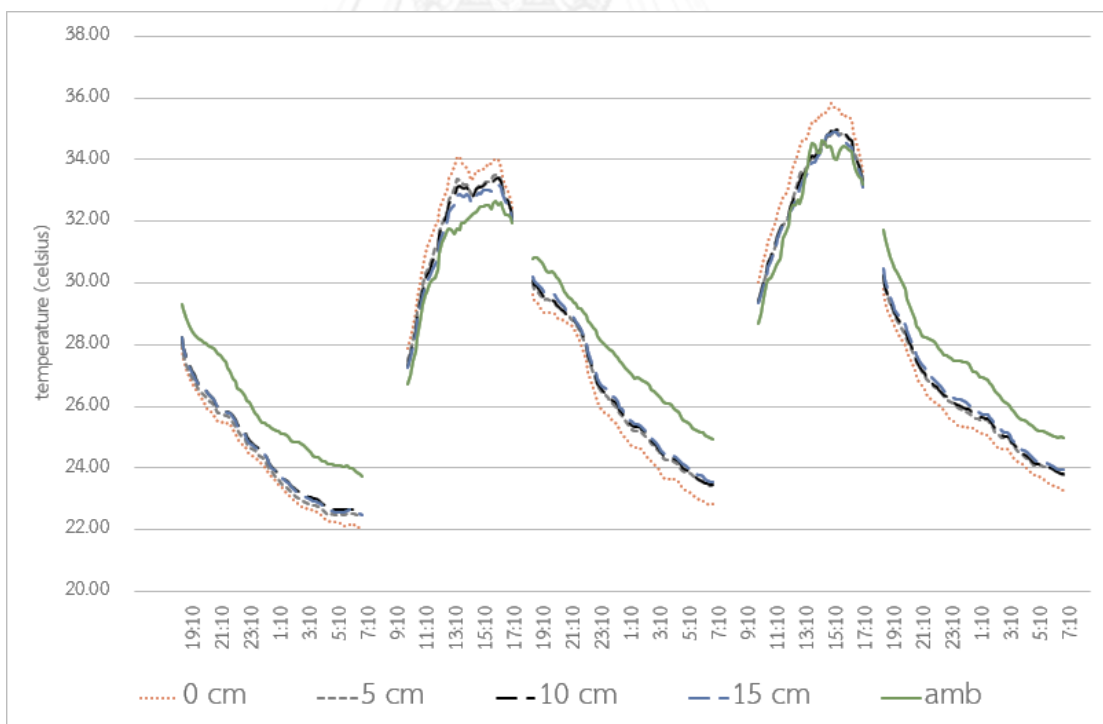
จากการทดลองใช้ช่องว่างหลังคา 4 ระยะ ได้แก่

- ช่องว่างใต้หลังคา 0 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 5 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 10 mm.
- ช่องว่างใต้หลังคา 15 mm.

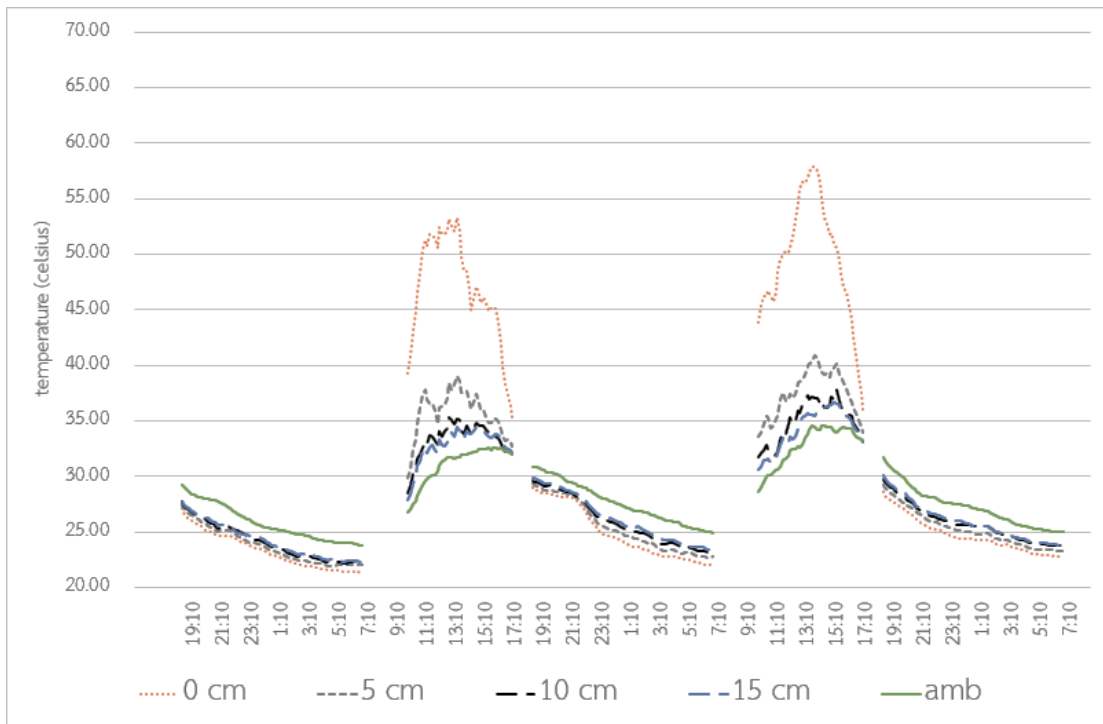
ทำการทดลองบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง ณ วันที่ 26 – 29 มกราคม พ.ศ. 2557 โดยทำการเปลี่ยนรูปแบบกล่องระหว่างรูปแบบกลางวัน และกลางคืน ในเวลา 8:30 – 8:50 และ 17:30 – 17:50 ตามลำดับ เป็นเวลา 2 วัน 3 คืน และเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนแผนภูมิเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆของกล่องทดลอง ของหลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคาต่างกัน จะได้ผลการทดลองดังนี้



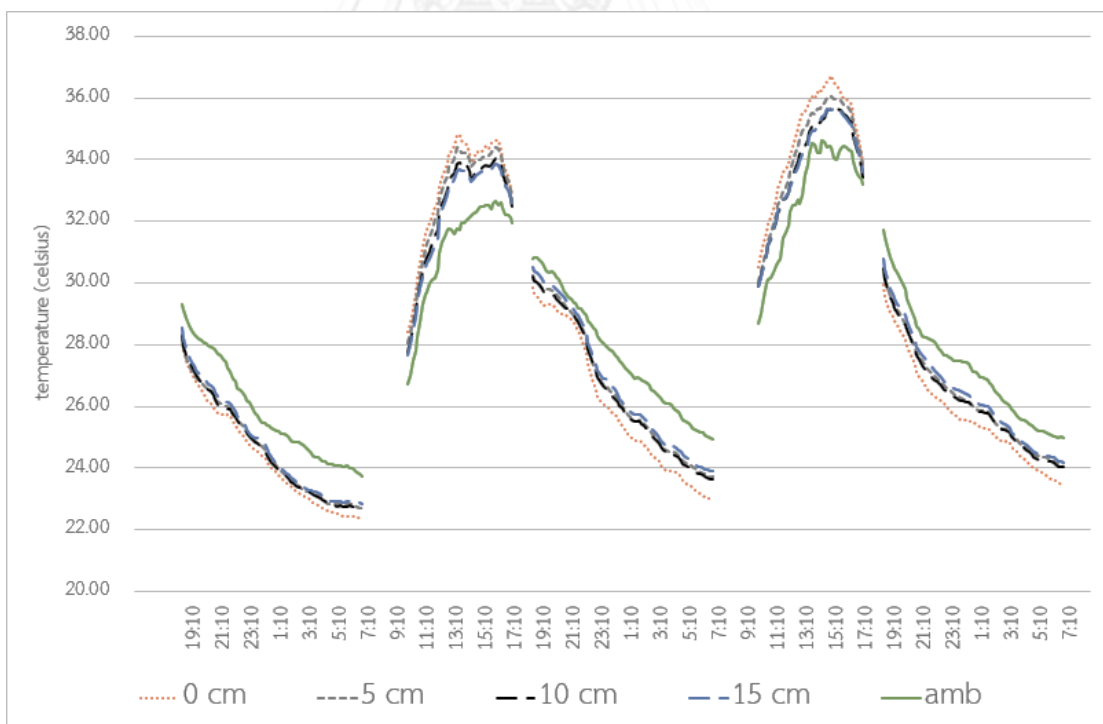
แผนภูมิที่ 4. 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังค้ำด้านใน ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิมิถกกลางกลอง ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิช่องว่างหลังคา (อุณหภูมิอากาศเข้าในเวลากลางวัน) ในแต่ละช่วงเวลา



แผนภูมิที่ 4. 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออกจากกล่อง ในแต่ละช่วงเวลา

จากแผนภูมิที่ 4.2.1 แผนภูมิเปรียบเทียบอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน ในแต่ละช่วงเวลา จะเห็นว่าอุณหภูมิผิวหลังคาด้านในนั้น ไม่แตกต่างกันในแต่ละระยะของช่องว่างใต้หลังคา เว้นแต่ในกล่อง

ทดลองที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคา 0 cm. ที่ในเวลากลางวัน มีอุณหภูมิผิวหลังคาสูงกว่าหลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคา ระยะอื่นๆ เช่นเดียวกับอุณหภูมิของช่องว่างใต้หลังคา หลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคา 0cm. มีอุณหภูมิช่องว่างใต้หลังคาสูงกว่าหลังคาที่มีระยะช่องว่างใต้หลังคาอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิของผิวหลังคาด้านใน และอุณหภูมิช่องว่างใต้หลังคา ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิกลางกล่องทดลองอย่างมีนัยสำคัญเท่าใด รวมถึงระยะช่องว่างหลังคา ระยะอื่นๆ เช่นกัน (ดูตารางที่ 4.2.1)

ตารางที่ 4. 5 แสดงอุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อตัดค่าในช่วงเวลาเช้าออกแล้ว (°C)

ระยะของช่องว่างใต้หลังคา	0 cm.	5 cm.	10 cm.	15 cm.	
day	average (°C)	33.25	32.56	32.51	32.34
	min (°C)	27.90	27.48	27.30	27.24
	max (°C)	35.84	34.86	34.98	34.88
night	average (°C)	25.10	25.49	25.60	25.67
	min (°C)	22.08	22.44	22.54	22.50
	max (°C)	29.78	30.20	30.26	30.48

ลำดับต่อไป เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบในเวลากลางคืน โดยใช้สมการจากบทที่ 4.1 ดังนี้

$$U = (1.08 \times CFM \times \Delta T_1) \div (A \times \Delta T_2)$$

โดยที่ :

- U คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F)  
 1.08 คือ ค่าคงที่ ที่มาจากการแปลงหน่วยในสมการ  
 CFM คือ ปริมาณอากาศที่ไหลออกจากกล่องทดลอง (ft<sup>3</sup>/min) จากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีค่า 20.89 ft<sup>3</sup>/min  
 A คือ พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน (ft<sup>2</sup>.) จากกล่องทดลอง มีค่า 9.68752 ft<sup>2</sup>  
 $\Delta T_1$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง (°F)  
 $\Delta T_2$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า (°F)

เมื่อแทนค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศออกจากกล่องทดลอง และคือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของอุณหภูมิบรรยากาศ และอุณหภูมิอากาศเข้า จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F) ในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้



แผนภูมิที่ 4. 10 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ (BTU/hr.ft<sup>2</sup>.°F) ในแต่ละช่วงเวลา

จะเห็นได้ว่า ช่วงเวลาประมาณ 18:00 – 22:00 ของวันที่ทำการทดลองวันที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบได้ลดลงจากช่วงเวลาอื่นๆของการทดลองอย่างเห็นได้

ชุด ในทุกๆกล่องทดลอง ซึ่งน่าจะเกิดจากสภาพห้องฟ้าที่มีเมฆบดบัง การแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ห้องฟ้า

อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ในแต่ละกล่องทดลองที่มีช่องว่างใต้หลังคาต่างกัน ได้ดังนี้

ตารางที่ 4. 6 แสดงสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ  
ในแต่ละกล่องทดลองที่มีช่องว่างใต้หลังคาแตกต่างกัน

ระยะของช่องว่างใต้หลังคา	0 cm.	5 cm.	10 cm.	15 cm.
U-value (BTU/hr-ft <sup>2</sup> ·°F)	1.393	1.217	1.623	1.477
U-value (W/m <sup>2</sup> ·°K)	7.912	6.911	9.213	8.389

การทดลองนี้ทำขึ้นเนื่องจากสมมุติฐานว่า ช่องว่างหลังคาที่เล็กลง ทำให้พื้นที่หน้าตัดของการไหลเวียนอากาศเล็กลง ความเร็วลมจึงน่าจะเพิ่มขึ้น และน่าจะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหลังคาด้านใน และอากาศภายในช่องว่างหลังคาได้ดีขึ้น แต่ผลการทดลองของค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ของกล่องทดลองทั้ง 4 กล่องนั้น กล่องที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบคือกล่องทดลองที่มีช่องว่างใต้หลังคา ขนาด 10cm. รองลงมาคือ 15, 0 และ 5cm. ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบที่ได้ และระยะของช่องว่างใต้หลังคานั้นไม่เรียงลำดับ ไม่สัมพันธ์กัน

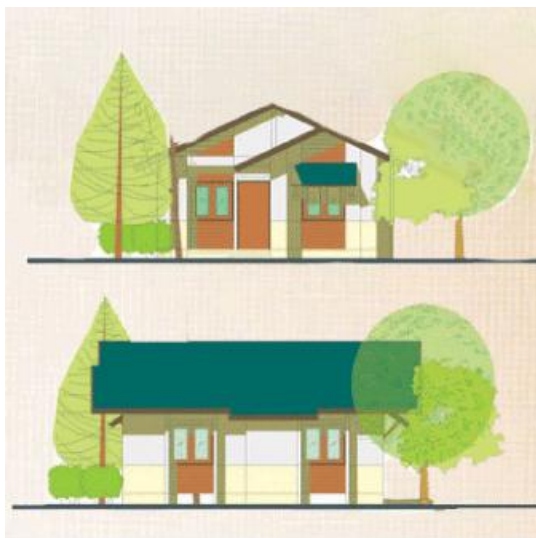
จากการศึกษาของ อรรถพล โกเลขา และ R.H.B. Exell ในปี 2550 ในงานวิจัย การศึกษาแผงบังลมเพื่อลดการถ่ายเทความร้อน ของพื้นผิวทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีความร้อนในเวลากลางวัน ซึ่งได้ทดสอบผลกระทบของแผงกันลมต่อการพาความร้อนของวัสดุ จากอากาศไหลผ่านผิวหน้าของของพื้นผิววัสดุ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ และขนาดของแผงกันลมก็ไม่เรียงลำดับ และไม่สัมพันธ์กัน เช่นกัน แต่จากการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ก็ได้พบว่าในแผงกันลมบางขนาดมีความสูงที่พอดีจนทำให้เกิดกระแสลมปั่นป่วน (Turbulence) ซึ่งมีผลทำให้การพาความร้อนของลมเปลี่ยนแปลงได้ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของช่องลมที่เหมาะสมต่อการนำความร้อนไม่ได้เป็นแปรผันตรงกับขนาดของช่องว่างใต้หลังคาเสมอไป โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient) นั้นขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการนำความร้อนดีที่สุดในระยะช่องว่างใต้หลังคาหนึ่งๆเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้เลือกค่าที่ดีที่สุด ของหลังคาที่มีช่องว่างใต้หลังคาขนาด 10cm. โดยมีค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในเวลากลางวันเท่ากับ  $9.213 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  เพื่อใช้ในการดำเนินการทดลองในขั้นต่อไป

#### 4.3 การทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation)

จากการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบวัสดุของหลังคา และการทดลองด้วยกล่องทดลอง เพื่อทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคา ก่อนหน้านี้ โดยหลังคาที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบที่มากที่สุด (ค่าที่มาก แสดงถึงการนำความร้อนออกจากกล่องทดลองได้ดี) ได้แก่ หลังคาโลหะ สีดำ ที่มีช่องว่างอากาศ 10cm. ซึ่งเมื่อนำมาใช้ในการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ ด้วยวิธีหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบาแล้ว มีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบในเวลากลางวันเท่ากับ  $9.213 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  โดยถือเป็นค่า U เสมือน ที่ได้จากการทำความเย็นโดยหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มาทำการทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อหาความเหมาะสมในการไปประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป ทั้งนี้ ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ได้ต่อ  $1\text{m}^2$  ของหลังคา ความแตกต่างของปริมาตรกล่องทดลอง และปริมาตรของอาคารตัวอย่าง ขนาดช่องเปิด สัดส่วนปริมาตรต่อลม และปริมาตรอาคาร จึงไม่ส่งผลแต่อย่างใด

โดยทำการจำลองหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบาในอาคารเพื่อทดสอบการใช้งานจริง โดยใช้อาคารตัวอย่างของ แบบบ้านที่ 2 “แวมยุรา 11” จากโครงการ แบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย ที่เป็นหน่วยงานการพาณิชย์ในสังกัดกรุงเทพมหานคร จัดตั้งขึ้นตามข้อบัญญัติของกรุงเทพมหานคร เรื่องสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย พ.ศ. 2545 เนื่องจาก กรุงเทพมหานคร ได้ตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนที่อยู่อาศัยของประชาชน โดยโครงการแบบบ้านยืมดังกล่าว นั้น มีขึ้นเพื่อช่วยเหลือประชาชนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ให้มีโอกาสมีที่อยู่เป็นของตนเอง



1 ชั้น 2 ห้องนอน 1 ห้องน้ำ  
พื้นที่ใช้สอย 52 ตร.ม. เนื้อที่ดินอย่างน้อย  
37 ตร.วา หน้ากว้างที่ดินอย่างน้อย 11.5 ม.  
ราคาเริ่มต้น 465,000 บาท

รูปที่ 4. 3 บ้าน แวมยุรา 11 โดยโครงการแบบบ้านยืม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย กรุงเทพมหานคร

ที่มา <http://office.bangkok.go.th/housing/Temporary/BanyimBlueprint/>

Brochure/BMAhome30mai002.html



เนื่องจากการทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ใช้การเปลี่ยนรูปแบบหลังคา ระหว่างกลางวันและกลางคืน ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบในเวลากลางวัน และ ในเวลากลางคืนจึงแตกต่างกัน ทำให้การทดลองด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในโปรแกรม VisualDOE เกิดปัญหา เนื่องจากขีดจำกัดของโปรแกรม โดยโปรแกรมนั้นไม่ได้ออกแบบมาให้ใส่ตัวแปรหลังคาที่มีค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน 2 ค่า ในเวลาต่างกันได้ ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้ แก้ปัญหาโดยดำเนินการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของหลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา 2 กรณี ที่มี ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในเวลากลางวัน และในเวลากลางคืน แตกต่างกัน ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาตัดต่อเข้าด้วยกันเพื่อถือเป็นผลลัพธ์จากอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบาต่อไป

ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนในเวลากลางวันที่พัดลมดูดอากาศไม่ได้เปิดใช้งาน ผู้วิจัย ได้ใช้วิธีการคำนวณตามประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่องหลักเกณฑ์ และวิธีการคำนวณในการออกแบบ อาคารแต่ละระบบการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆ ของอาคาร พ.ศ. 2552 ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 126 ตอนพิเศษ 122 ง โดยมีใจความที่ เกี่ยวข้อง ดังนี้



ค่าการต้านทานความร้อนรวม ( $R_T$ ) ของส่วนใดๆ ของผนังอาคาร ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ  $n$  ชนิดที่แตกต่างกัน ให้คำนวณจากสมการดังนี้

$$R_T = R_o + (\Delta x_1/k_1) + (\Delta x_2/k_2) + \dots + (\Delta x_n/k_n) + R_i$$

โดยที่

- $R_T$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวม มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ [(m<sup>2</sup>.°C)/W]
- $R_o$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ [(m<sup>2</sup>.°C)/W]
- $R_i$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในอาคาร มีหน่วยเป็นตารางเมตร - องศาเซลเซียสต่อวัตต์ [(m<sup>2</sup>.°C)/W]
- $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n$  คือ ค่าความหนาของวัสดุแต่ละชนิด ที่ประกอบเป็นผนังอาคาร มีหน่วยเป็นเมตร (m)
- $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิด ที่นำมาประกอบเป็นผนังอาคาร

เมื่อนำมาแทนค่าโดยวัสดุที่นำมาประกอบหลังคา ดังนี้

- ฟิล์มอากาศภายนอกอาคาร (พื้นผิวมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง) มีค่า  $R = 0.044$
- หลังคาเหล็ก หนา 0.35mm.  $k = 211 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  มีค่า  $R = 1.65877\text{E-}06$
- ช่องว่างอากาศ (พื้นผิวมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ) 10cm มีค่า  $R = 0.606$
- โฟมพอลีสไตรีน ความหนาแน่น  $16\text{kg/m}^3$  หนา 5cm.  $k = 0.037 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$  มีค่า  $R = 1.351$
- ฟิล์มอากาศภายในอาคาร (พื้นผิวมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง) มีค่า  $R = 0.120$

จะได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมเท่ากับ  $2.121 \text{ (m}^2\text{.}^\circ\text{C)/W}$  หรือมีค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ในเวลากลางวัน  $U = 1/R = 0.471 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{K}$

นอกจากนี้ จากการทำงานของระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศ เพื่อนำอากาศเย็นบริเวณช่องว่างใต้หลังคา มาทำความเย็นภายในอาคาร จึงได้เพิ่มอัตราการหมุนเวียนอากาศภายในอาคารตัวอย่าง ที่อัตราเดียวกันกับกล่องทดลอง โดยมีการคำนวณดังนี้

อาคารตัวอย่าง มีพื้นที่  $41.25 \text{ m}^2$  ของกล่องทดลองที่มีพื้นที่  $0.9 \text{ m}^2$

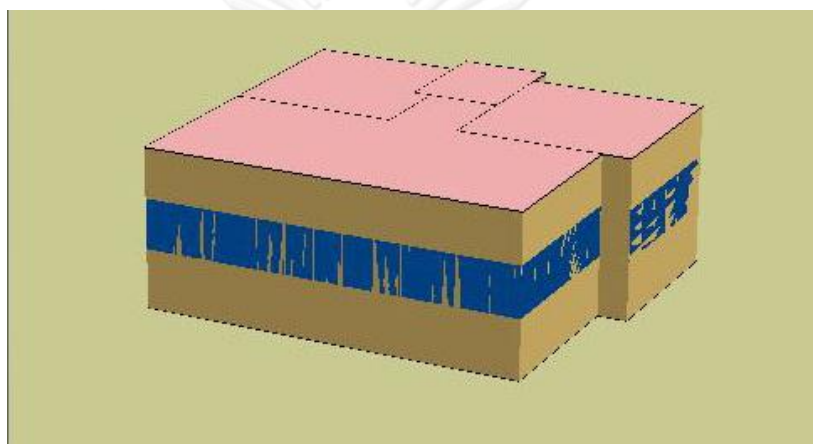
ซึ่งคิดเป็น 45.83 เท่า ของกล่องทดลอง

กล่องทดลองมีการไหลเวียนอากาศเป็นปริมาณ 20.89 CFM หรือ  $35.5 \text{ m}^3/\text{hr}$

ดังนั้น อาคารตัวอย่างจึงมีการไหลเวียนอากาศ เป็นปริมาณ  $35.5 \times 45.83 = 1627 \text{ m}^3/\text{hr}$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารตัวอย่างที่มีปริมาตร  $91.8 \text{ m}^3$

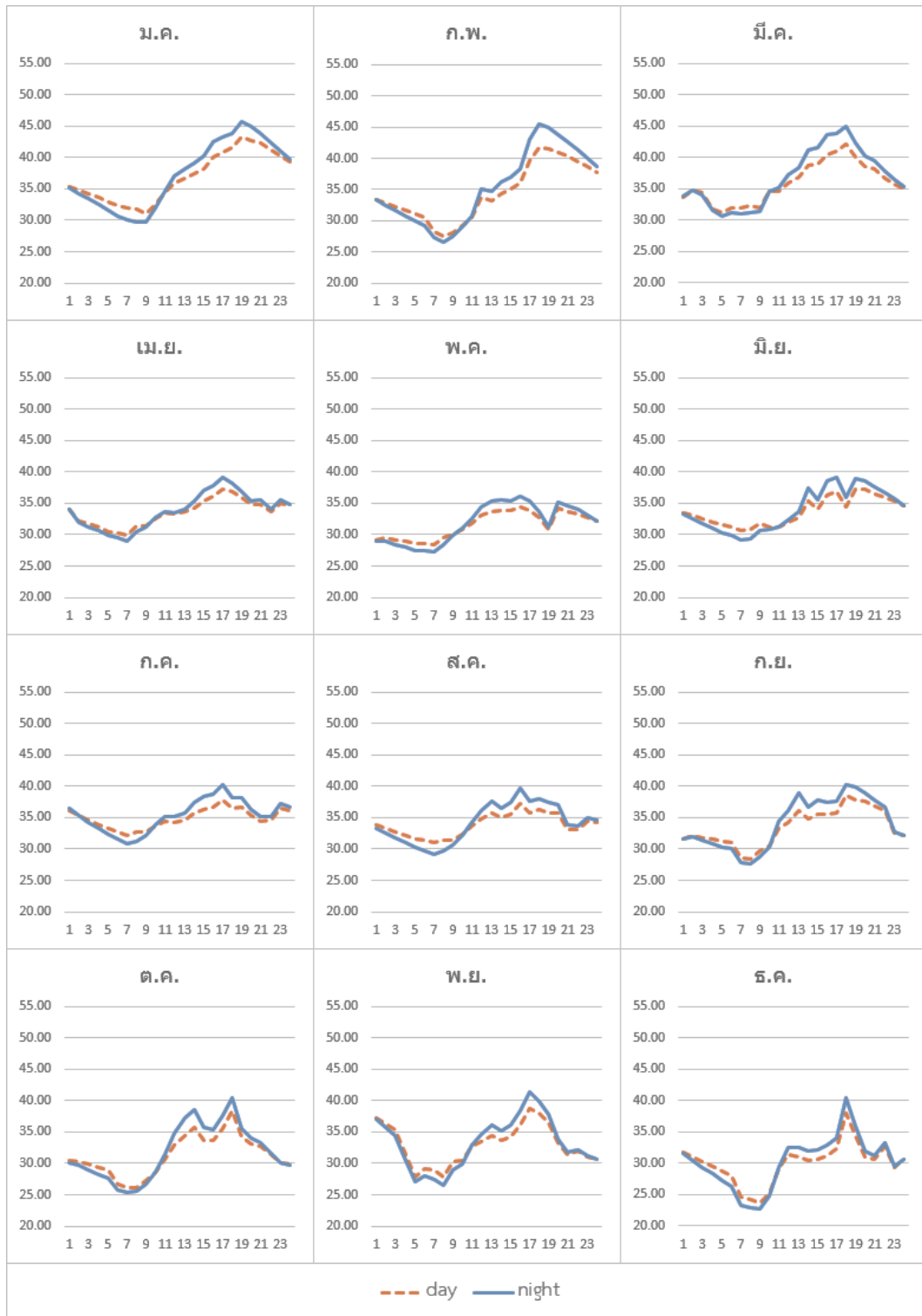
จะได้อัตราการหมุนเวียนอากาศ เท่ากับ 17.72 ACH



รูปที่ 4. 4 ภาพอาคารที่ใช้ในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ จากโปรแกรม Visual DOE

เมื่อนำค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ทั้งในเวลากลางวัน กลางคืน และอัตราการหมุนเวียนอากาศ มาทำการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ โดยแยกเป็น 2 กรณี เพื่อจำลองถึงอุณหภูมิภายในอาคาร และนำค่าที่ได้ มาตัดต่อเข้าด้วยกัน โดยในเวลากลางวัน 6:00 – 18:00 ใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ  $0.471 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  และในเวลากลางคืน 18:00 – 6:00 ใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ  $9.213 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ซึ่งคำนวณได้จากกรณีหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา

โดยเมื่อนำผลของอุณหภูมิตลอดทั้งปี เลือกพิจารณาเฉพาะ 1 วันในแต่ละเดือน เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใน 1 วัน ในช่วงเวลาต่างๆของทั้งปีได้ง่ายยิ่งขึ้น และเลือกวันที่ 21 ของแต่ละเดือน เพื่อให้ตรงกับ วันคริสมาสต์ (วันที่มีช่วงเวลากลางวันยาวนานที่สุด) วันมหายัน (วันที่มีช่วงเวลากลางคืนยาวนานที่สุด) และวันวิษุวัต (วันที่มีช่วงเวลากลางวัน และกลางคืน ยาวเท่ากัน) ในวันที่ 21 มิถุนายน 21 ธันวาคม และ 21 กันยายน และ มีนาคม ตามลำดับ โดยเลือกวันหยุดสุดสัปดาห์ เพื่อให้รูปแบบการใช้พลังงานในแต่ละวันอยู่ในรูปแบบเดียวกัน จะได้ ดังนี้



แผนภูมิที่ 4. 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ค่า  $U$  ต่างกัน ในช่วงเวลาประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี

จะเห็นได้ว่า ในเวลากลางวัน อาคารที่เลือกใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาต่ำ จะมีอุณหภูมิที่เย็นกว่าอาคารที่ใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาสูง เนื่องจากสามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารได้ดี ในขณะที่ในเวลากลางคืน อาคารที่ใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาสูง จะมีอุณหภูมิที่เย็นกว่าอาคารที่ใช้ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาต่ำ เนื่องจากสามารถระบายความร้อนออกไปสู่บรรยากาศได้ดีกว่า ตรงตามสมมุติฐาน

อย่างไรก็ตาม ผลการหาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่ได้จากกล่องทดลอง ที่ได้ทำการทดลองในช่วงเดือนมกราคม และกุมภาพันธ์นั้น ไม่สามารถแทนผลของทั้งปีได้ เนื่องจากปัจจัยการแผ่รังสีความชื้นในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน ดังนั้น อ้างอิงตามงานวิจัยของ จอมภพ แววศักดิ์ ศิริชัย เทพา จงจิตร หิรัญลาภ และโจเซฟ เคตารี ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการทำความเย็นโดยใช้หลักการแผ่รังสีในเวลากลางคืน ในประเทศไทย (ส่วนที่ 1 การทดลอง) จากผลการทดลองภายใต้ท้องฟ้า 3 ลักษณะ ได้แก่ ท้องฟ้ากระจ่าง ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม และฝนตก พบว่า ในกรณีท้องฟ้ากระจ่าง และท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม มีอุณหภูมิของหลังคามีอุณหภูมิต่ำกว่าสภาพแวดล้อมอยู่ประมาณ  $1 - 6^{\circ}\text{C}$  แต่ในกรณีฝนตก อุณหภูมิของหลังคามีค่าใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อม ซึ่งหมายถึงไม่เกิดการทำความเย็นโดยใช้หลักการแผ่รังสีในเวลากลางคืน (แววศักดิ์, เทพา, หิรัญลาภ, & เคตารี, 2542)

จากงานวิจัยดังกล่าว ในช่วงเวลาที่มีมีฝนตกชุกซึ่งได้แก่ช่วงเดือนที่อยู่ในฤดูฝน ได้แก่ มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม ผู้วิจัยจึงตั้งค่าให้การทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา อยู่ในรูปแบบของเวลากลางวัน ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับหลังคา 2 ชั้นแบบปรกติ ตลอดทั้งวัน เนื่องจากไม่มีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า เพื่อป้องกันการประเิมที่สูงเกินจริง

ในการวิเคราะห์ผลของอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ใช้การเปรียบเทียบกับอาคารตัวอย่าง แบบบ้านที่ 2 “แวมยุรา 11” จากโครงการ แบบบ้านยืม ใช้หลังคากระเบื้องโมเนียร์ ที่เป็นที่แพร่หลายในอาคารพักอาศัยมากที่สุด (อรรถจน์ เศรษฐบุตร, 2550)

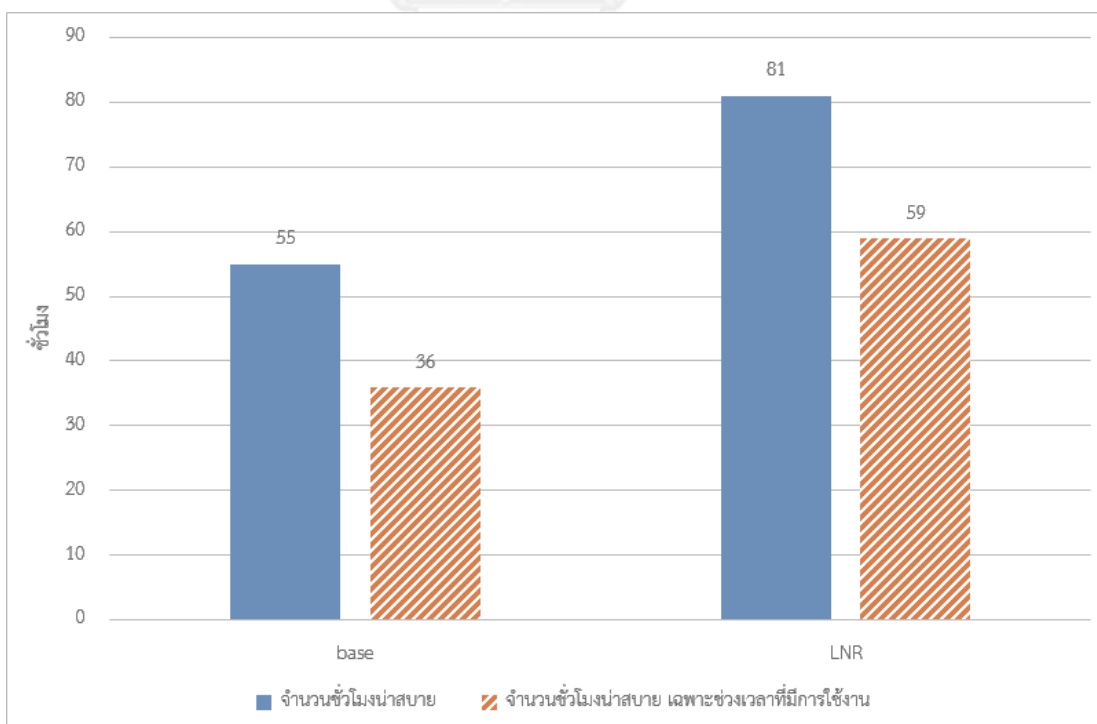
#### 4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่ความน่าสบาย (comfort)

ในการเปรียบเทียบ ได้ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอาคารตัวอย่าง และการใช้พลังงาน โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของอาคารตัวอย่าง คำนวณจากค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ตามขนาดของพื้นที่ใช้งานนั้นๆ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- ห้องนั่งเล่น มีขนาด 21.30 m<sup>2</sup>
- ห้องนอน 1 มีขนาด 9.00 m<sup>2</sup>
- ห้องนอน 2 มีขนาด 7.95 m<sup>2</sup>
- ห้องน้ำ มีขนาด 3.00 m<sup>2</sup>

รวมพื้นที่ของอาคารตัวอย่างทั้งหมด เท่ากับ 41.25 m<sup>2</sup>

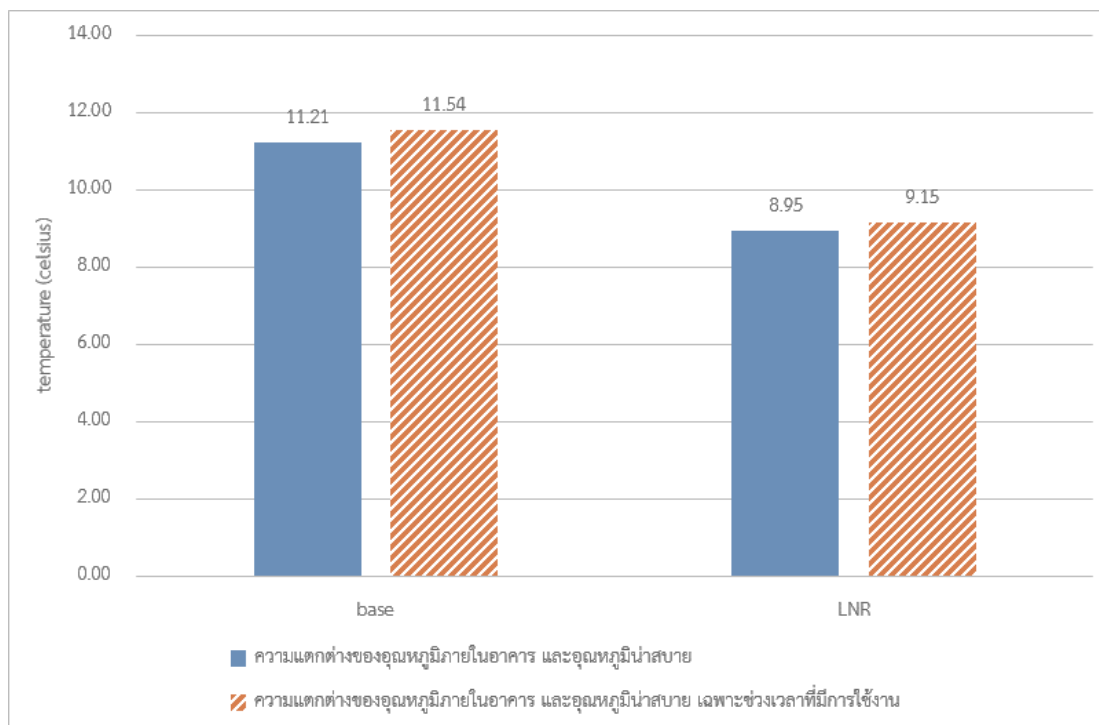
ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบของรายงานรายชั่วโมง (Hourly report) โดยพิจารณาเป็น 2 แ่งมุม ได้แก่ช่วงเวลาทั้งหมด เป็นเวลา 365 วัน หรือ 8,760 ชั่วโมง และพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งาน 5,900 ชั่วโมง เมื่อนับจำนวนชั่วโมงในช่วงอุณหภูมิที่น่าสบาย (22.2 – 26.1°C) จะได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4. 12 เปรียบเทียบ จำนวนชั่วโมงน่าสบาย ภายในอาคารทั้งสอง

จะเห็นได้ว่า ในอาคารตัวอย่าง ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ จะมีชั่วโมงนำสบาย 55 ชั่วโมง จากทั้งหมด 8,760 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 0.6% ของทั้งหมด แต่ในอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา จะสามารถเพิ่มปริมาณชั่วโมงนำสบายได้เป็น 81 ชั่วโมง จากทั้งหมด 8,760 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 0.9% ของทั้งหมด อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะจำนวนชั่วโมงที่มีการใช้งานจริงแล้ว โดยนำมาพิจารณาแค่ช่วงเวลาที่มิได้อยู่อาศัย เฉพาะวันหยุดสุดสัปดาห์ และวันธรรมดาในช่วงเวลา 18:00 – 6:00 เท่านั้น จะพบว่าในอาคารตัวอย่าง ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ จะมีชั่วโมงนำสบาย 36 ชั่วโมง จากทั้งหมด 5,900 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 0.6% ของทั้งหมด แต่ในอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา จะสามารถเพิ่มปริมาณชั่วโมงนำสบายได้เป็น 59 ชั่วโมง จากทั้งหมด 5,900 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 1.0% ของทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้งสอง และอุณหภูมินำสบาย ( $26.1^{\circ}\text{C}$ ) พบว่า ในอาคารตัวอย่าง ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร เฉลี่ย  $37.31^{\circ}\text{C}$  หรือสูงกว่าอุณหภูมินำสบาย เฉลี่ย  $11.21^{\circ}\text{C}$  แต่ในอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร เฉลี่ย  $35.05^{\circ}\text{C}$  หรือสูงกว่าอุณหภูมินำสบาย เฉลี่ยเพียง  $8.95^{\circ}\text{C}$  อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาเฉพาะจำนวนชั่วโมงที่มีการใช้งานจริงแล้ว โดยนำมาพิจารณาเพียงช่วงเวลาที่มิได้อยู่อาศัย วันหยุดสุดสัปดาห์ และวันธรรมดาในช่วงเวลา 18:00 – 6:00 เท่านั้น จะพบว่า ในอาคารตัวอย่าง ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร เฉลี่ย  $37.64^{\circ}\text{C}$  หรือสูงกว่าอุณหภูมินำสบาย เฉลี่ย  $11.54^{\circ}\text{C}$  แต่ในอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร เฉลี่ย  $35.25^{\circ}\text{C}$  หรือสูงกว่าอุณหภูมินำสบาย เฉลี่ยเพียง  $9.15^{\circ}\text{C}$



แผนภูมิที่ 4. 13 เปรียบเทียบ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้ง 2 และอุณหภูมิภายนอก

จะเห็นว่าจำนวนร้อยละปริมาณของชั่วโมงนำสบายของอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา นั้น เพิ่มขึ้นจากอาคารตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่าระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา สามารถเพิ่มความนำสบายให้กับอาคารพักอาศัยได้จริง โดยในช่วงเวลาที่มีการใช้งาน สามารถเพิ่มจำนวนชั่วโมงที่มีความนำสบายจากเดิมได้จาก 36 ชั่วโมง เพิ่มเป็น 59 ชั่วโมง หรือมากขึ้น 1.6 เท่าต่อปี โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยมากกว่าอุณหภูมินำสบาย 9.15°C จากเดิม 11.54°C หรือมีอุณหภูมิภายในอาคารต่ำลงจากเดิม เฉลี่ย 2.33°C

หากแต่ถ้าหลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา ที่มีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนนั้น เหมาะสมกับอาคารพักอาศัยมีช่วงเวลาการใช้งานหลักในเวลากลางคืนจริง การพิจารณาเฉพาะช่วงเวลากลางคืนที่มีการใช้งาน จึงน่าจะมียุทธศาสตร์ของชั่วโมงนำสบายที่เพิ่มขึ้นจากการพิจารณาเป็นเวลากลางคืนทั้งหมดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความเหมาะสมของระบบระหว่างช่วงเวลาที่มีการทำความเย็น และชั่วโมงที่มีการใช้งาน

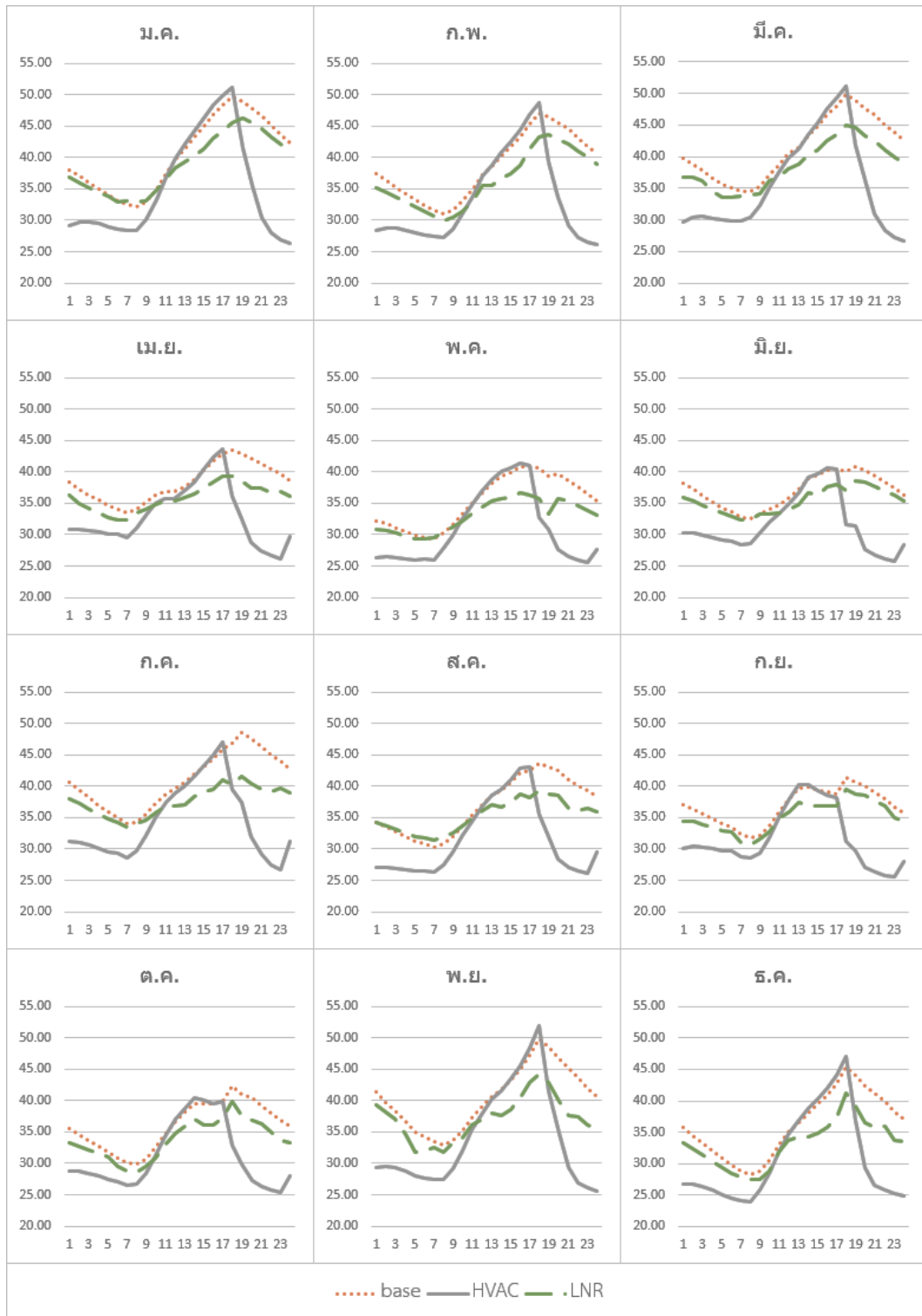
แต่ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จำนวนของชั่วโมงนำสบายจากการพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งานในเวลากลางคืน มีค่า 1.0% จากทั้งหมด ซึ่งมากขึ้นกว่าผลการพิจารณาตลอดทั้งปี ซึ่งมีค่า 0.9% จากทั้งหมด เพียง 0.1% รวมถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของอาคาร เมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งานในเวลากลางคืน อาคารมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าอากาศต้นแบบ 2.93°C ซึ่งมากขึ้นจากการพิจารณาตลอดทั้งปี ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่าอากาศต้นแบบ 2.26°C เพียง 0.67°C

ผลการทดลองนี้ อาจแสดงให้เห็นว่า หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ที่มีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนนั้น เมื่อนำไปใช้งานในอาคารพักอาศัยที่มีช่วงเวลาการใช้งานหลักในเวลากลางคืน ยังไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของการทำความเย็นได้อย่างเต็มที่ จึงยังมีความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีการใช้งานในรูปแบบ และช่วงเวลาอื่นๆ ที่จะสามารถใช้ประโยชน์จากหลังคาแผ่รังสี ชนิดมวลเบาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY





แผนภูมิที่ 4. 14 เปรียบเทียบข้อมูลทฤษฎีรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ระบบทำความเย็นแต่ละประเภท ในช่วงเวลาประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี เทียบกับอาคารตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิภายในอาคาร จะเห็นว่าในแต่ละวัน เริ่มจากเวลา 6:00 นาฬิกา อุณหภูมิเฉลี่ยของอาคารตัวอย่างจะสูงขึ้นเรื่อยๆ จากการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ จนกระทั่งถึงเวลา 18:00 นาฬิกา อุณหภูมิเฉลี่ยของอาคารตัวอย่างจะเริ่มลดต่ำลง ถ่ายเทความร้อน ออกสู่บรรยากาศโดยรอบ ในขณะที่อาคารที่ติดตั้งระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา จะมีรูปแบบที่คล้ายกัน เพียงแต่ในเวลากลางคืน การทำความเย็นของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา จะช่วยให้อาคารมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอาคารตัวอย่างได้ อีกทั้งมีจุดที่น่าสังเกตคือช่วงเวลาประมาณ 6:00 เมื่อพระอาทิตย์ขึ้น การแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าที่ทำงานมาตลอดทั้งคืนสิ้นสุดลง จนกระทั่งจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในรอบวัน แต่เมื่อการทำความเย็นจะสิ้นสุดลงไปแล้ว อาคารก็จะเย็น อยู่ในชั่วระยะเวลาหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคามีค่าต่ำ (หลังคาไม่มีความเป็นฉนวนมาก) ช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารในเวลากลางวัน

ผลการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่า อาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้งานกับอาคารที่มีช่วงเวลาการใช้งานเฉพาะในเวลากลางคืนเสมอไป สามารถลดอุณหภูมิในอาคารได้ตลอดทั้งวัน เนื่องจากความเป็นฉนวนของวัสดุหลังคา ยังสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารในเวลากลางวันได้อีกด้วย

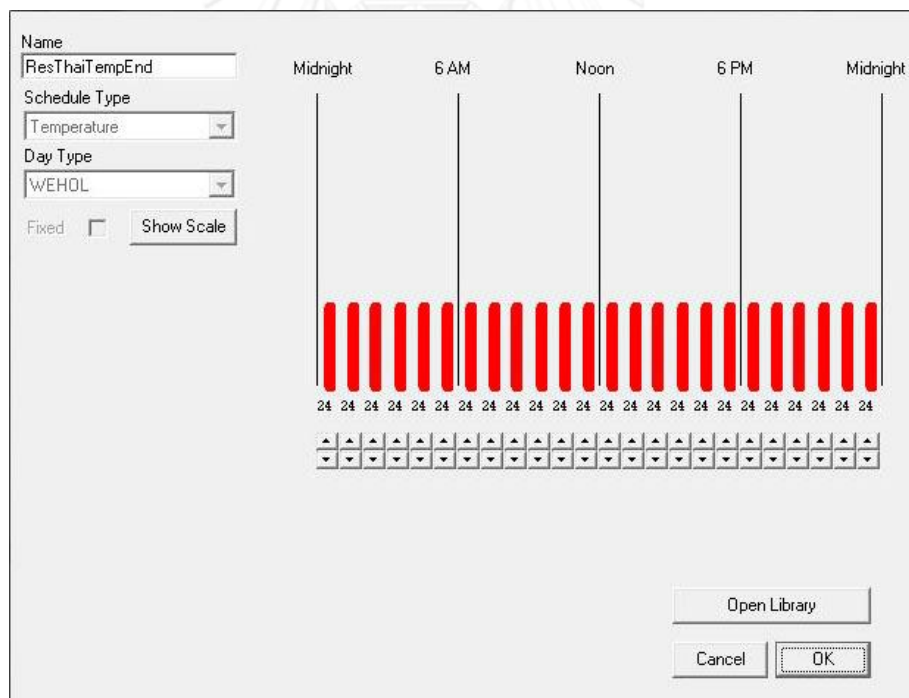
#### 4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การใช้พลังงาน

ในการวิเคราะห์การใช้พลังงาน ผู้วิจัยได้เพิ่มอาคารตัวอย่างขึ้นมาอีก 1 กรณี ได้แก่

- แบบบ้านที่ 2 “แวมยูรา 11” จากโครงการ แบบบ้านยืม ที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศในบริเวณห้องนั่งเล่น และห้องนอนทั้งสองห้อง โดยการตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ และช่วงเวลาที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศ ได้นำข้อมูลมาจากงานวิจัย ผลกระทบของการรั่วซึมของอากาศ ต่อผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศ ของเรือนไทยและบ้านร่วมสมัย (คำรนสุทธิ, 2554) มีรายละเอียดดังนี้
- การตั้งอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ตั้งไว้ที่ 24 °C
- ช่วงเวลาที่มีการใช้งาน ในวันธรรมดาใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลา 18:00 – 6:00 นาฬิกา และในวันเสาร์ อาทิตย์ มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอดทั้งวัน



รูปที่ 4. 5 การตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ในอาคารพักอาศัย ในวันธรรมดา



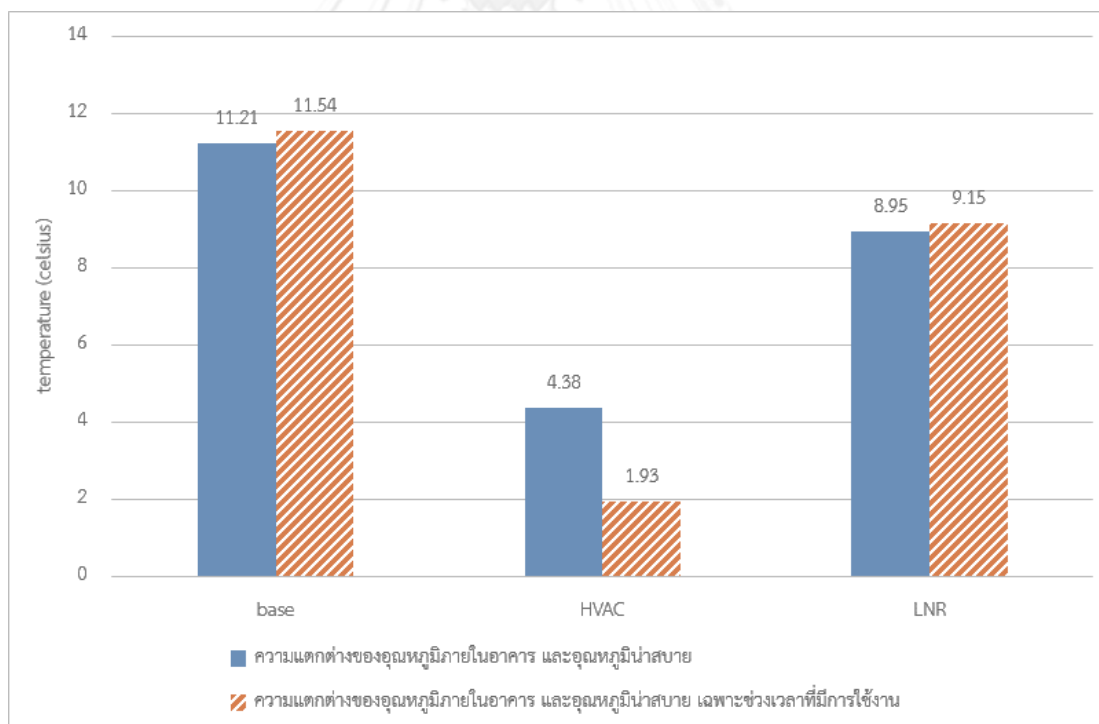
รูปที่ 4. 6 การตั้งค่าอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ในอาคารพักอาศัย ในวันหยุดเสาร์ อาทิตย์

โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการทำความเย็นระหว่างการทำ ความเย็นด้วยระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา และการทำความเย็นด้วยวิธีกล โดยการ ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ในวิธีปรกติ

เมื่อนำอาคารทั้งสามหลังมาเปรียบเทียบกัน ได้แก่

- อาคารตัวอย่าง ที่ไม่มีการปรับอากาศ
- อาคารตัวอย่าง ที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ
- อาคารตัวอย่าง ที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา

ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบของรายงานรายชั่วโมง (Hourly report) โดยพิจารณาเป็น 2 แ่งมุม ได้แก่ช่วงเวลาทั้งหมด เมื่อตัดฤดูฝนออก เป็นเวลา 212 วัน หรือ 5,088 ชั่วโมง และพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งาน 3,427 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ย ภายในอาคารทั้งสาม ดังนี้

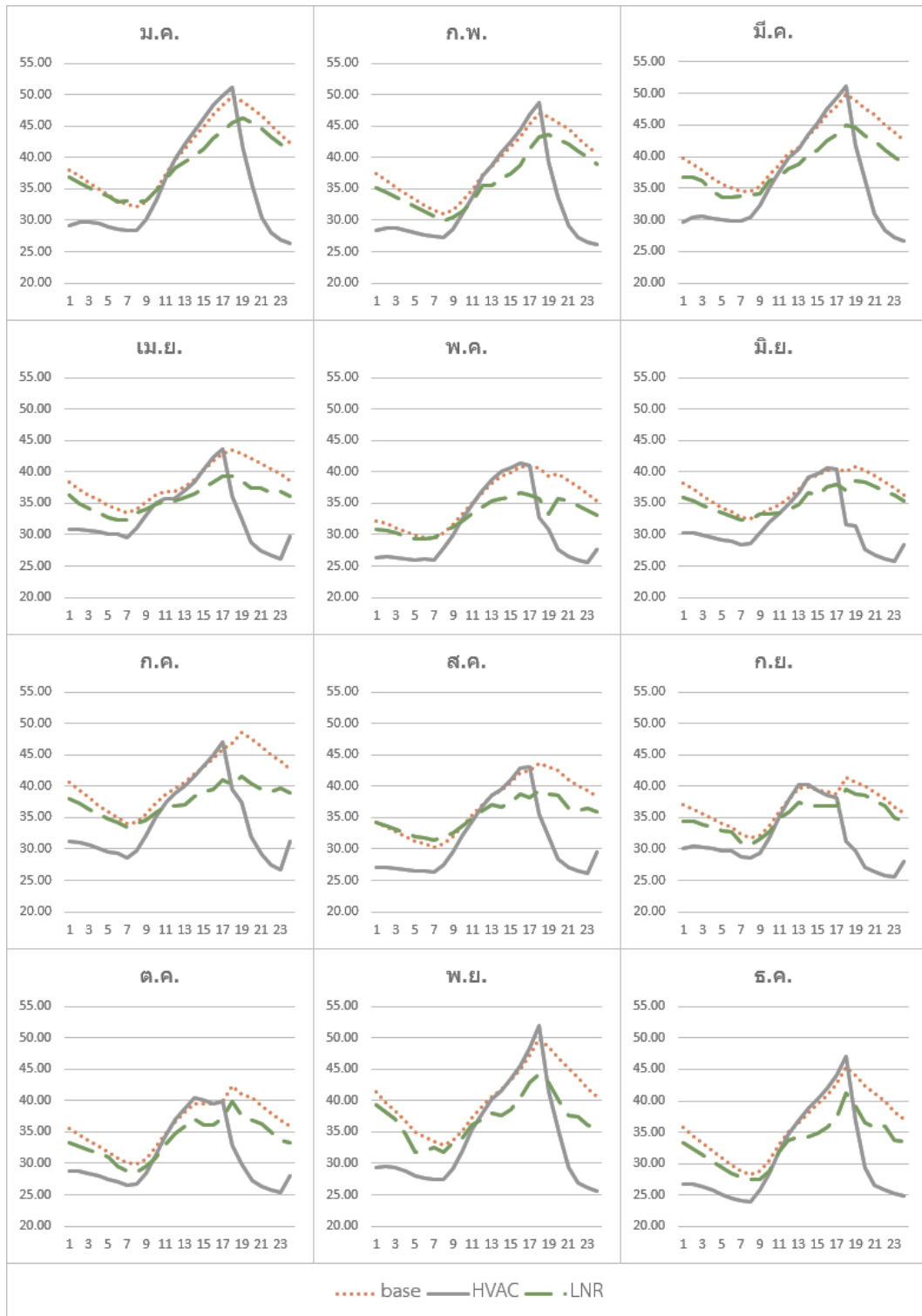


แผนภูมิที่ 4. 15 เปรียบเทียบ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้ง 3 และอุณหภูมิหน้าสบาย

จะเห็นได้ว่า อาคารที่มีการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีอุณหภูมิต่ำกว่าอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบาอย่างเห็นได้ชัด โดยแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคารทั้งสอง และอุณหภูมิหน้าสบาย ( $26.1^{\circ}\text{C}$ ) พบว่า ในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มี

อุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร สูงกว่าอุณหภูมิनाสบาย เฉลี่ย  $8.95^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อาคารที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร สูงกว่าอุณหภูมิनासบาย เฉลี่ย เพียง  $4.38^{\circ}\text{C}$  หากพิจารณาเฉพาะจำนวนชั่วโมงที่มีการใช้งานจริงแล้ว โดยนำมาพิจารณาเพียงช่วงเวลาที่มียู่อาศัย เฉพาะวันหยุดสุดสัปดาห์ และวันธรรมดาในช่วงเวลา 18:00 – 6:00 นาฬิกา เท่านั้น จะพบว่า ในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร สูงกว่าอุณหภูมิनासบาย เฉลี่ย  $9.15^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อาคารที่มีการติดตั้งระบบปรับอากาศ มีอุณหภูมิเฉลี่ยในอาคาร สูงกว่าอุณหภูมิनासบาย เฉลี่ย เพียง  $1.93^{\circ}\text{C}$

เมื่อพิจารณาความชันของแผนภูมิ จะเห็นว่าในแต่ละวัน เมื่อระบบทำความเย็นเริ่มทำงาน ระบบปรับอากาศ สามารถลดอุณหภูมิให้แก่อาคารได้รวดเร็วกว่าระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา แต่ในทางกลับกัน เมื่อระบบหยุดทำงาน อาคารที่มีการใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา จะมีการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารได้ช้ากว่า ซึ่งหมายถึงอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา จะยังคงมีอุณหภูมิต่ำกว่าอาคารที่ใช้ระบบปรับอากาศ ไปจนกระทั่งระบบปรับอากาศเริ่มทำงานอีกครั้ง



แผนภูมิที่ 4. 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิรายชั่วโมงภายในอาคาร ที่ใช้ระบบทำความเย็นแต่ละประเภท ในช่วงเวลา ประมาณวันที่ 21 ในแต่ละเดือน ตลอดทั้งปี เทียบกับอาคารตัวอย่าง

ความแตกต่างของอุณหภูมิและอุณหภูมิหน้าสabayนี้ แสดงให้เห็นว่า ในอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ มีความน่าสabayสูงกว่าอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา อย่างเห็นได้ชัดเจนจนไม่สามารถปฏิเสธได้ว่า อาคารที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ มีความน่าสabayมากกว่าอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา หากแต่เมื่อพิจารณาประกอบกับการใช้พลังงานในอาคาร อาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศยอมใช้พลังงานในการเดินเครื่องปรับอากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เครื่องปรับอากาศถือเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้พลังงานสูง ในขณะที่อาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มีการลดอุณหภูมิโดยปรากฏการณ์ธรรมชาติ ใช้เพียงพัดลมในการสร้างการไหลเวียนของอากาศเย็นเท่านั้น

การใช้พลังงานในส่วนของการทำความเย็น ของอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ (ระบบ Cooling และระบบ Ventilation) จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม VisualDOE ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบของรายงานรายชั่วโมง (Hourly report) เป็นเวลา 365 วัน หรือ 8,760 ชั่วโมง ได้ผลรวมการใช้พลังงานดังนี้

ตารางที่ 4. 7 แสดงผลรวมการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ไม่รวมช่วงฤดูฝน ในระบบปรับอากาศ ของอาคารตัวอย่างที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ

Cooling	Ventilation	SUM
5,603 kWh	2,684 kWh	8,287 kWh

ในขณะที่ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา เมื่อทำการคำนวณอัตราการใช้พลังงานของพัดลมดูดอากาศภายในอาคาร โดยใช้วิธีประมาณค่าด้วยวิธีบัญญัติไตรยางศ์ เทียบกับอัตราการใช้พลังงานของพัดลมดูดอากาศ ของกล่องทดลอง ดังนี้

พัดลมใช้ไฟแรงดัน 12 Volt กระแส 0.25 Ampere จากกฎของโอห์ม

$$P = E \times I$$

โดยที่

P คือ กำลังไฟฟ้า (Watt)

E คือ แรงดัน (Volt)

I คือ กระแส (Ampere)

เมื่อแทนค่าลงไป จะได้ว่า พัดลมที่ใช้ในการทดลองมีกำลังไฟฟ้า 3 Watt หลังจากนั้นก็ได้ทำการประมาณค่าด้วยวิธีบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้

กล่องทดลอง มีพื้นที่หลังคา	0.9m <sup>2</sup>	ใช้พลังงาน 3 Watt•hr
อาคารตัวอย่าง มีพื้นที่หลังคา	41.25 m <sup>2</sup>	ใช้พลังงาน 3 ÷ 0.9 x 41.25
คิดเป็น	137.5 Watt•hr	
หรือ	0.1375 kWh	

จะได้ว่า พัดลมดูดอากาศ ที่ใช้ในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ใช้ไฟฟ้า 0.1375 kWh และเมื่อนำไปติดตั้ง เพื่อใช้งานในระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ซึ่งเปิดพัดลมดังกล่าวเฉพาะในเวลา 18:00 – 6:00 นาฬิกา เท่านั้น เมื่อนำไปคำนวณการใช้งานตลอดทั้งปี จะได้ผลรวมการใช้พลังงานดังนี้

ตารางที่ 4. 8 แสดงผลรวมการใช้พลังงานตลอดทั้งปี ไม่รวมช่วงฤดูฝน ของพัดลมดูดอากาศ ในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา

Cooling	Ventilation	SUM
0 kWh	350 kWh	350 kWh

เมื่อนำการใช้ไฟฟ้าของอาคารในการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น ของอาคารทั้งสองตลอดทั้งปีมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง ในช่วงเวลาที่มีการใช้งาน เป็นเวลาตลอดทั้งปี จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4. 9 การใช้ไฟฟ้าของอาคารในการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง เฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งาน ของอาคารทั้งสองหลัง ไม่รวมช่วงฤดูฝน

	base	HVAC	LNR
การใช้พลังงาน (kWh)	860	9,148	1,210
การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น (kWh)		8,288	350
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	37.64	28.03	35.25
อุณหภูมิที่ลดได้ เฉลี่ย (°C)		9.61	2.39
การใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น/อุณหภูมิที่ลดได้ เฉลี่ย (kWh/°C)		862.41	146.59



สุดท้ายแล้วจะเห็นได้ว่าในอาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศ สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ย จากอาคาร ตัวอย่าง 37.64°C โดยลดลง 9.61°C จนเหลือเพียง 28.03°C โดยใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 8,288 kWh ต่อปี คิดเป็น 862.41 kWh/°C ในขณะที่อาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ย จากอาคารตัวอย่าง 37.64°C โดยลดลง 2.39°C จนเหลือเพียง 35.25°C โดยใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 350 kWh ต่อปี คิดเป็น 146.59 kWh/°C ซึ่งนั่นหมายความว่า อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสี ชนิดมวลเบา มีความคุ้มค่าของอุณหภูมิที่สามารถลดได้ ในชั่วโมงที่มีการใช้งาน ต่อการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น มากกว่าอาคารที่ใช้ระบบปรับอากาศปกติ

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน

อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การใช้พลังงาน การใช้พลังงานรวมในอาคารตลอดทั้งปี ของอาคารที่มีการปรับอากาศ สูงถึง 9,148 kWh มากกว่าในอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีมวลเบาที่ใช้เพียง 1,210 kWh หรือมากกว่าถึง 7.5 เท่า นั้นหมายถึงผู้อยู่อาศัยต้องแบกรับรายจ่ายของการใช้พลังงานที่สูง หากต้องการความน่าสบาย

การวิเคราะห์ผลการทดลองในแง่การเงิน โดยวิเคราะห์ตลอดช่วงอายุการใช้งานของอาคาร 20 ปี โดยไม่พิจารณาถึงค่าบำรุงรักษา (หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา มีรูปแบบที่เรียบง่าย ใช้เครื่องกลเพียงพัดลมดูดอากาศที่ไม่ซับซ้อน โดยทั่วไปจึงน่าจะมีค่าบำรุงรักษาต่ำกว่าระบบปรับอากาศ นั้นหมายถึงจำนวนเงินที่สามารถประหยัดได้ในความเป็นจริง จึงน่าจะสูงกว่าในรายการคำนวณ) โดยอ้างอิงประมาณราคากลาง จาก บริษัท เอสซีจีเอ็กซ์พีเรียนซ์ จำกัด (“SCG XP”) ซึ่งเป็นบริษัทในกลุ่มของธุรกิจเอสซีจี จะได้ ดังนี้

ตารางที่ 4. 10 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารตัวอย่าง

	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม	จำนวน	คิดเป็น
ราคาเริ่มต้นของ บ้านแวมยูรา 11	หลัง	465,000	-	465,000	1	465,000

ตารางที่ 4. 11 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ

	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม	จำนวน	คิดเป็น
ราคาเริ่มต้นของ บ้านแวมยูรา 11	หลัง	465,000	-	465,000	1	465,000
เครื่องปรับอากาศ	เครื่อง	20,000	-	20,000	3	60,000
คิดเป็น						525,000

ตารางที่ 4. 12 ราคาค่าก่อสร้างของอาคารที่ติดตั้งระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวอลเบา

	หน่วย	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	รวม	จำนวน	คิดเป็น
ราคาเริ่มต้นของ บ้านแวมยูรา 11	หลัง	465,000	-	465,000	1	465,000
หักค่าใช้จ่ายของหลังคาหลังคา	ตร.ม.	693.76	32	725.76	41.25	29,938
คงเหลือ						435,062
แผ่นเหล็กกริดลอนเคลือบอะลูซิงค์ หนาไม่น้อยกว่า 0.4 มม.	ตร.ม.	260	80	340	41.25	14,025
โฟมพอลิโอสไตรีน หนา 5cm *	ตร.ม.	125	-	125	41.25	5,156
พัดลมดูดอากาศ	เครื่อง	25	-	25	204	5,100
คิดเป็น						459,344

\*1 แผ่นมีขนาด 60 x 120 cm. มีราคา 90 บาท ราคาซื้อจากขั้นตอนที่ผู้วิจัยสร้างกล่องทดลอง

จากตารางการคำนวณค่าก่อสร้างของอาคารทั้งสาม จะเห็นได้ว่า อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวอลเบา มีมูลค่าก่อสร้างถูกที่สุด โดยมีมูลค่า 459,344 บาท ในขณะที่อาคารตัวอย่าง มีมูลค่า 465,000 บาท และอาคารที่ติดตั้งระบบปรับอากาศ มีมูลค่า 525,000 บาท ซึ่งมีมูลค่าก่อสร้างแพงที่สุด และเมื่อทำการคำนวณค่าใช้จ่ายการใช้พลังงาน โดยกำหนดให้ค่าไฟหน่วยละ 3 บาท จะได้

ตารางที่ 4. 13 แสดงค่าใช้จ่ายพลังงาน รายปี ของอาคารทั้งสาม

	หน่วยละ (บาท)	จำนวน (kWh./year)	คิดเป็น (บาท/ปี)
อาคารตัวอย่าง	3	500	1,500
อาคารติดตั้งระบบปรับอากาศ	3	5,278	15,834
อาคารที่ติดตั้งระบบหลังคาแผ่ รังสีความร้อนสูง ชนิดมวอลเบา	3	2,547	2,547

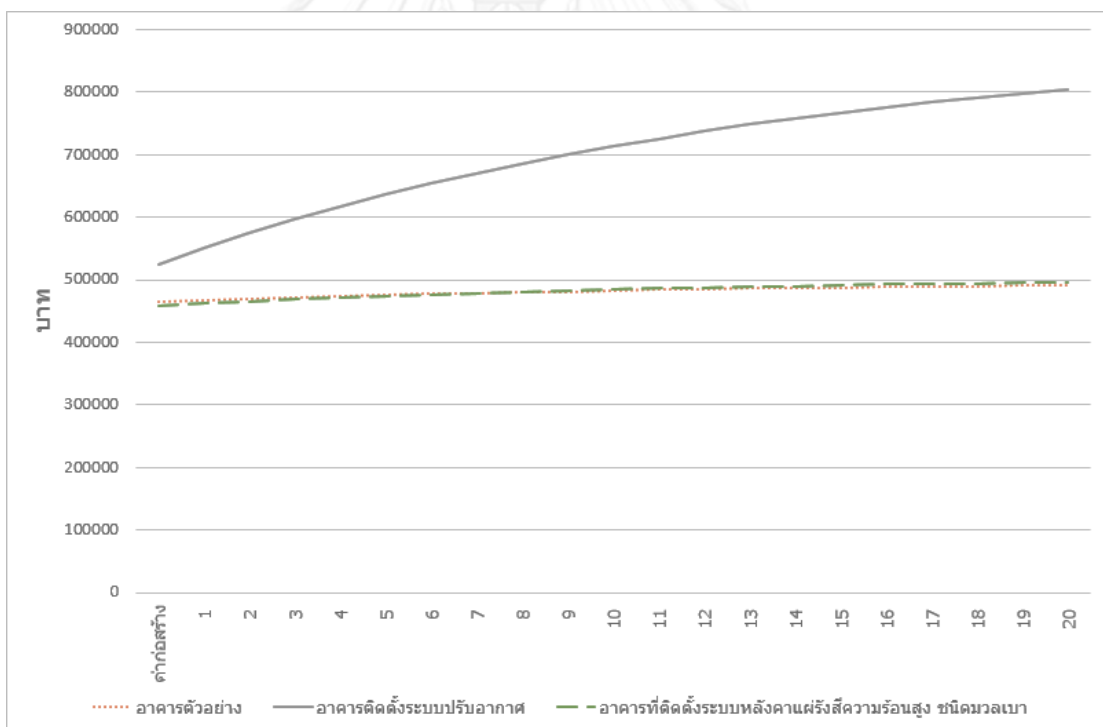
และเมื่อทำการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ในแต่ละปี โดยใช้สูตร

$$NPV = C_0 + \sum C_i \div (1 + r)^i$$

โดยที่

- NPV คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ  
 $C_0$  คือ เงินลงทุนเริ่มแรก  
 $C$  คือ กระแสเงินสด  
 $r$  คือ อัตราคิดลด (Discount Rate) กำหนดให้มีค่า 7.50%  
 $T$  คือ ระยะเวลา (อายุของโครงการ)

โดยทำการคำนวณเป็นระยะเวลา 20 ปี ซึ่งถือเป็นอายุการใช้งานทั่วไปของอาคาร จะได้ ดังนี้



แผนภูมิที่ 4. 17 เปรียบเทียบมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ในแต่ละปี

จากแผนภูมิที่ 4.3.7 ในปี 20 ซึ่งถือเป็นปีสุดท้ายของอายุการใช้งานของอาคาร อาคารตัวอย่างที่ไม่มีการปรับอากาศ จะมีค่าใช้จ่ายสุทธิทั้งหมด 491,303 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ในปี 20 จะมีค่าใช้จ่ายสุทธิทั้งหมด 496,344 บาท ซึ่งมากกว่าอาคารตัวอย่างเพียง 1.01 เท่า ซึ่งถือว่าเพิ่มขึ้นน้อยมาก ในขณะที่อาคารที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ในปี 20 จะมีค่าใช้จ่ายสุทธิทั้งหมดถึง 804,769 บาท ซึ่งมากกว่าอาคารตัวอย่างถึง 1.64 เท่า

เมื่อรวมกับผลการวิจัยที่ว่า อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอาคาร เฉพาะช่วงเวลาที่มีการใช้งานได้ จาก 37.64°C เหลือ 35.25°C หรือลดลง 2.39°C โดยเปรียบเทียบกับมูลค่าสุทธิของอาคาร ในปี 20 จะได้ ดังนี้

ตารางที่ 4. 14 เปรียบเทียบ มูลค่าสุทธิของอาคาร และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง เป็นเวลาตลอดทั้งปี ของอาคารทั้งสองหลัง

	base	HVAC	LNR
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	37.64	28.03	35.25
อุณหภูมิที่ลดได้ เฉลี่ย (°C)		9.61	2.39
มูลค่าสุทธิ (บาท)	491,303	804,769	496,344
มูลค่าสุทธิที่เพิ่มขึ้น (บาท)		313,467	5,042
มูลค่าสุทธิที่เพิ่มขึ้น/อุณหภูมิเฉลี่ยที่ลดได้ (บาท/°C)		32,619	2,113

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา แม้จะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากอาคารตัวอย่าง เนื่องจากพัดลมดูดอากาศ จนมีมูลค่าสุทธิในปี 20 เพิ่มขึ้น 5,042 บาท ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมูลค่าสุทธิของอาคารทั้งหมด และคุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากมีมูลค่าสุทธิที่เพิ่มขึ้นต่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่ลดได้ เพียง 2,113 บาท/°C ในขณะที่อาคารที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศมีค่าถึง 32,619 บาท/°C ซึ่งมีความคุ้มค่าต่ำกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา พบว่าสิ่งที่น่าจะเป็นปัจจัยหลัก ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน ของหลังคาแผ่รังสีชนิดมวลเบา ได้แก่ 2 ปัจจัยหลัก ดังนี้

- คุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ เนื่องจากการทำงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบาใช้การแผ่รังสีความร้อน กลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางวัน วัสดุที่มีคุณสมบัติการแผ่รังสีดีจึงน่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อน ของหลังคาแผ่รังสีชนิดมวลเบา ได้ดีขึ้น
- ระยะห่าง ของช่องว่างใต้หลังคา เนื่องจากช่องว่างหลังคาที่เล็กลง ทำให้พื้นที่หน้าตัดของการไหลเวียนอากาศเล็กลง ความเร็วลมจึงน่าจะเพิ่มขึ้น และน่าจะเกิดการถ่ายเทความร้อน ระหว่างผิวหลังคาด้านใน และอากาศภายใต้ช่องว่างหลังคาได้ดีขึ้น

จากการทดสอบประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนด้วยวัสดุหลังคาต่างชนิด ด้วยกล่องทดลอง พบว่าเวลากลางวัน วัสดุที่มีความสามารถในการคายความร้อนได้ดีในเวลากลางคืน จะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีความร้อนได้ดีในเวลากลางวันเช่นกัน ผิวหลังคาจึงมีอุณหภูมิสูง แต่ผิวหลังคาที่มีอุณหภูมิสูงนั้นส่งผลกระทบต่อภายในกล่องทดลองน้อยมาก เนื่องจากกล่องทดลองปิดรูอากาศ ด้านบน ปล่อยให้ช่องว่างใต้หลังคาเปิดโล่ง ทำหน้าที่เป็นหลังคา 2 ชั้น มีการระบายอากาศ จึงสามารถระบายความร้อนจากหลังคาได้ดี และป้องกันความร้อนจากหลังคาที่มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีความร้อนสูงได้

วัสดุที่มีคุณสมบัติการแผ่รังสีความร้อนสูง จะมีความสามารถแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าสูงเช่นกัน ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบาได้จริง โดยวัสดุหลังคาที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้แก่ หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME หนา 0.35 mm ทาสีน้ำมัน สีดำ และรองลงมาได้แก่ หลังคาไฟเบอร์ซีเมนต์ลอนคู่ สีวัสดุ (สีเทา) หลังคากระเบื้องดินเผา ปลายตรง สีแดงธรรมชาติ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และ หลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME สีวัสดุ (สีบรอนซ์เงิน) หนา 0.35 mm. ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ดังนี้

ตารางที่ 5. 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ในแต่ละวัสดุ

	หน่วย	ดินเผา	ลอนคู่	เหล็กดำ	เหล็ก
U-value	(BTU/hr-ft <sup>2</sup> ·°F)	1.224	1.234	1.416	0.761
	(W/m <sup>2</sup> ·°K)	6.950	7.004	8.039	4.320

หลังจากนั้น เมื่อทำการทดสอบระยะห่างของช่องว่างใต้หลังคา ด้วยกล่องทดลอง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบที่ได้ และระยะของช่องว่างใต้หลังคานั้นไม่เรียงลำดับและไม่สัมพันธ์กัน จึงไม่สามารถสรุปแนวโน้มที่แน่นอนได้ เนื่องจากขนาดของช่องลมที่เหมาะสมต่อการนำความร้อน ไม่ได้เป็นแปรผันตรงกับขนาดของช่องว่างใต้หลังคาเสมอไป โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient) นั้นขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) ที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพการนำความร้อนดีที่สุดในระยะช่องว่างใต้หลังคาหนึ่งๆเท่านั้น การทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคาทดสอบระยะห่างของช่องว่างหลังคาจึงต้องอาศัยการควบคุมตัวแปรที่แน่นอน และละเอียดอ่อนมากขึ้น

ผู้วิจัยได้เลือกค่าที่ดีที่สุด ของหลังคาที่มีช่องว่างใต้หลังคาขนาด 10cm. โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนในเวลากลางคืนเท่ากับ 9.213 W/m<sup>2</sup>·°K ของหลังคาที่มีช่องว่างใต้หลังคา 10cm. เพื่อใช้ในการดำเนินการทดลองในขั้นต่อไป

อย่างไรก็ตาม ผลการหาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่ได้จากกล่องทดลอง ที่ได้ทำการทดลองในช่วงเดือนมกราคม และกุมภาพันธ์นั้น ไม่สามารถแทนผลของทั้งปีได้ เนื่องจากปัจจัยการแผ่รังสีความร้อนขึ้นในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากัน ในช่วงเวลาที่มีมีฝนตกชุกซึ่งได้แก่ช่วงเดือนที่อยู่ในฤดูฝน ได้แก่ มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม ผู้วิจัยจึงตั้งค่าให้การดำเนินงานของหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา อยู่ในรูปแบบของเวลากลางวัน ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับหลังคา 2 ชั้นแบบปรกติ ตลอดทั้งวัน เนื่องจากไม่มีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า เพื่อป้องกันการประเมินที่สูงเกินจริง

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของหลังคา ในเวลากลางคืน ที่ดีที่สุด (มีค่ามากที่สุด) มาทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อทดสอบความเป็นได้กับการประยุกต์ใช้งานจริง โดยใช้อาคารตัวอย่างจาก แบบบ้านที่ 2 “แวมยูรา 11” จากโครงการ แบบบ้านอิม จากสำนักงานพัฒนาที่อยู่อาศัย ที่เป็นหน่วยงานการพาณิชย์ในสังกัดกรุงเทพมหานคร พบว่า จะเห็นได้ว่าจำนวนร้อยละปริมาณของชั่วโมงนำสบายของอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา นั้น เพิ่มขึ้นจากอาคารตัวอย่างอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา สามารถเพิ่มความน่าสบายให้กับอาคารพักอาศัยได้จริง โดยในช่วงเวลาที่มีการใช้งาน อาคารตัวอย่าง ที่ไม่มี

การติดตั้งเครื่องปรับอากาศ จะมีชั่วโมงนำสบาย 36 ชั่วโมง จากทั้งหมด 5,900 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 0.6% ของทั้งหมด แต่ในอาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อนชนิดมวลเบา จะสามารถเพิ่มปริมาณชั่วโมงนำสบายได้เป็น 59 ชั่วโมง จากทั้งหมด 5,900 ชั่วโมง โดยคิดเป็น 1.0% ของทั้งหมด

รวมถึงยังมีข้อสังเกตว่า ช่วงเวลาประมาณ 6:00 นาฬิกา เมื่อพระอาทิตย์ขึ้น การแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าที่ทำงานมาตลอดทั้งคืนสิ้นสุดลง จนกระทั่งจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในรอบวัน แต่เมื่อการทำความเย็นจะสิ้นสุดลงไปแล้ว อาคารก็จะเย็นอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่มีค่าต่ำ (หลังคาที่มีความเป็นฉนวนมาก) ช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารในเวลากลางวัน ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา นั้น ไม่จำเป็นต้องใช้งานกับอาคารที่มีช่วงเวลากาการใช้งานเฉพาะในเวลากลางวันเสมอไป สามารถลดอุณหภูมิในอาคารได้ตลอดทั้งวัน เนื่องจากความเป็นฉนวนของหลังคา ยังสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้ามาในอาคารในเวลากลางวันได้อีกด้วย

เมื่อคำนวณในแง่การใช้พลังงานภายในอาคาร โดยการเพิ่มกรณีติดตั้งเครื่องปรับอากาศ เพื่อเปรียบเทียบเลือกในการทำความเย็นด้วยวิธีกล และการทำความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ผลการทดลองสรุปได้ว่า หากเปรียบเทียบการใช้ไฟฟ้าของอาคารในการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิเฉลี่ยที่สามารถลดได้จากอาคารตัวอย่าง จะเห็นได้ว่าในอาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศ สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ย จากอาคารตัวอย่าง  $37.64^{\circ}\text{C}$  โดยลดลง  $9.61^{\circ}\text{C}$  จนเหลือเพียง  $28.03^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น  $8,288 \text{ kWh}$  ต่อปี คิดเป็น  $862.41 \text{ kWh}/^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อาคารที่ใช้ระบบหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา สามารถลดอุณหภูมิเฉลี่ย จากอาคารตัวอย่าง  $37.64^{\circ}\text{C}$  โดยลดลง  $2.39^{\circ}\text{C}$  จนเหลือเพียง  $35.25^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น  $350 \text{ kWh}$  ต่อปี คิดเป็น  $146.59 \text{ kWh}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งนั่นหมายความว่า อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสี ชนิดมวลเบา มีความคุ้มค่าของอุณหภูมิที่สามารถลดได้ ในชั่วโมงที่มีการใช้งาน ต่อการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น มากกว่าอาคารที่ใช้ระบบปรับอากาศปกติ

เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้น รวมกับค่าก่อสร้างแล้ว ในปีที่ 20 ซึ่งถือเป็นปีสุดท้ายของอายุการใช้งานของอาคาร อาคารที่ใช้หลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา แม้จะมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากอาคารตัวอย่าง เนื่องจากใช้พัดลมดูดอากาศ จนมีมูลค่าสุทธิในปีที่ 20 เพิ่มขึ้น 5,042 บาท ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมูลค่าสุทธิของอาคารทั้งหมด และคุ้มค่าต่อการลงทุน เนื่องจากมีมูลค่าสุทธิที่เพิ่มขึ้นต่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่ลดได้ เพียง  $2,113 \text{ บาท}/^{\circ}\text{C}$  ในขณะที่อาคารที่ติดตั้งเครื่องปรับอากาศมีค่าถึง  $32,619 \text{ บาท}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีความคุ้มค่าต่ำกว่า

## 5.2 เสนอแนะแนวทางการออกแบบ

หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบา เป็นระบบทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ ที่ใช้การแผ่รังสีกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนเป็นปัจจัยหลัก โดยใช้ในการดูดอากาศเย็นที่อยู่บริเวณผิวหลังคา นำลงมาทำความเย็นให้แก่พื้นที่ใช้งาน จากการทดลองด้วยกล่องทดลอง พบว่า การใช้วัสดุหลังคาเหล็กเคลือบโลหะผสม ZINCALUME หนา 0.35 mm ทาสีน้ำมัน สีดำ โดยมีระยะช่องว่างใต้หลังคาขนาด 10cm. มีประสิทธิภาพการทำความเย็นมากที่สุด โดยสามารถเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนของระบบเสมือน ที่มีค่า  $9.213 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

เมื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง พื้นที่หลังคาที่เป็นองค์ประกอบหลักในการทำความเย็นนั้น ไม่จำเป็นต้องมีขนาดเท่ากับพื้นที่ใช้งานเสมอไป อาจก่อสร้างให้มีพื้นที่หลังคามากกว่าพื้นที่ใช้งานก็ได้ ซึ่งการทำความเย็นด้วยหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูง ชนิดมวลเบาจะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่หลังคาที่มากขึ้น จะสามารถถ่ายเทความร้อนออกนอกอาคารได้มากขึ้น โดยมีปริมาณความร้อนในอาคารเท่าเดิม

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากมีเวลาจำกัด ผลการทดลองจากกล่องทดลองที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นผลที่ได้จากช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น จึงควรทำการทดลองตลอดทั้งปีเพื่อตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนในช่วงเวลาต่างๆของปีด้วย
- การเพิ่มความเร็วลม เพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน ของหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบาด้วยวิธีการ เช่น เพิ่มความแรงของพัดลมดูดอากาศให้มากขึ้น หรือติดตั้งพัดลมเพิ่มมากขึ้น อาจให้ผลที่ชัดเจนกว่าการปรับขนาดช่องว่างใต้หลังคา
- ประเภทอาคารที่เหมาะสมกับหลังคาแผ่รังสีความร้อน ชนิดมวลเบา ยังคงต้องศึกษาต่อไป เพื่อสามารถให้ประโยชน์จากระบบได้มากที่สุด
- อาจกำหนดการไหลเวียนของอากาศในเวลากลางคืนเป็นระบบปิด โดยนำอากาศที่ออกจากอาคาร มาผ่านผิวหลังคาด้านในของช่องว่างใต้หลังคาอีกครั้ง เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับเครื่องปรับอากาศ และลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศได้



## รายการอ้างอิง

- Bagiorgas, H. S., & Mihalakakou, G. (2008). Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling. *Renewable Energy*, 33, 1220–1227.
- Chang, P.-C., Chiang, C.-M., & Lai, C.-M. (2007). Development and preliminary valuation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). *Energy and Buildings*, 40, 140–147.
- Golaka, A., & Exell, R. H. B. (2007). An investigation into the use of a wind shield to reduce the convective heat flux to a nocturnal radiative cooling surface. *Renewable Energy*, 32, 593–608.
- Hollick, J. (1978). THE ATMOSPHERIC RADIATION CLIMATE OF THAILAND. *Solar Energy*, 21, 73-79.
- Lechner, N. (1991). *Heating, cooling, lighting: design methods for architects*. United States: Wiley.
- Moore, F. (1993). *Environmental control systems: heating, cooling, lighting*. United States: McGraw-Hill.
- Santos, M. (2000). *Passive Cooling Volume 8 of Solar heat technologies*. United States: MIT Press.
- scgexperience. 2555. STANDARD PRICE [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.scgexperience.co.th/th/home-service/standard-list.aspx?> [22 มีนาคม 2557]
- Schulze T. and Eicker U. 2013. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. *Energy and Buildings* 56: 221–232.
- Exell R.H.B. 1978. THE ATMOSPHERIC RADIATION CLIMATE OF THAILAND. *Solar Energy* 21: 73-79
- Dimoudi A., Androutsopoulos A. and Lykoudis S. 2006. Summer performance of a ventilated roof component. *Energy and Buildings* 38: 610–617
- Gagliano A., Patania F., Nocera F., Ferlito A. and Galesi A. 2012. Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings* 49: 611–618

- Givoni B. 1994. *Passive and Low Energy Cooling of Building*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Biwole P., Woloszyn M. and Pompeo C. 2008. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings* 40: 1487–1497
- Filho B., Henriquez J. and Dutra J. 2011. Effects of coefficients of solar reflectivity and infrared emissivity on the temperature and heat flux of horizontal flat roofs of artificially conditioned nonresidential buildings. *Energy and Buildings* 43: 440–445
- แววศักดิ์, จ., เทพา, ศ., หิรัญลาภ, จ., & เคนทร์, โ. (2542). การศึกษาความเป็นไปได้ของการทำความเย็นโดยใช้หลักการแผ่รังสีในเวลากลางวัน ในประเทศไทย. การประชุมเชิงวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37.
- จินดาวณิศ, ธ., & เศรษฐบุตร, อ. (2550). การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคาร ในอาคารบ้านเดี่ยว. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 3.
- บัวขจร, ด. (2554). การพัฒนาวิธีการประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนรวม และการใช้พลังงานรวมของอาคารชุดพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุบิน วงศ์ฝัน. 2547. แนวทางการใช้รูปแบบการไหลเวียนกระแสลมของเรือนไทยในบ้านพักอาศัย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรภรณ์ กาญจนวิโรจน์. 2542. การศึกษาการเพิ่มขอบเขตภาวะน่าสบายในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คำรน สุทธิ. ผลกระทบของการรั่วซึมของอากาศ ต่อผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของเรือนไทยและบ้านร่วมสมัย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



05/01/2014	1:40	25.2	25.2	25.2	25.9	23.2	22.2	22.1	24.2	24.8	25.0	25.2	26.0	25.4	25.6	25.5	26.2	26.5
05/01/2014	1:50	25.3	25.3	25.3	25.9	23.2	22.2	22.1	24.4	24.7	25.1	24.7	25.6	25.4	25.6	25.4	26.1	26.5
05/01/2014	2:00	25.3	25.4	25.3	26.0	23.0	22.1	22.0	24.1	24.9	25.4	24.8	25.6	25.5	25.7	25.6	26.2	26.8
05/01/2014	2:10	25.2	25.3	25.4	26.0	23.0	22.3	22.1	24.2	24.8	25.2	25.1	26.0	25.5	25.7	25.6	26.3	26.8
05/01/2014	2:20	25.2	25.3	25.2	26.0	23.0	22.1	21.7	23.9	24.8	25.0	25.1	25.9	25.4	25.6	25.5	26.1	26.2
05/01/2014	2:30	25.2	25.1	25.1	25.9	23.0	22.1	21.7	23.9	24.7	25.2	25.0	26.0	25.4	25.5	25.4	26.1	26.4
05/01/2014	2:40	25.2	25.2	25.3	26.0	23.0	22.3	22.3	24.4	24.7	25.4	25.4	25.8	25.4	25.6	25.6	26.2	26.4
05/01/2014	2:50	25.1	25.3	25.4	26.1	23.1	22.5	22.4	24.5	24.8	25.6	25.4	26.1	25.4	25.7	25.6	26.3	27.5
05/01/2014	3:00	25.3	25.5	25.6	26.2	23.2	22.7	22.9	25.0	24.9	25.6	25.5	26.2	25.6	25.9	25.9	26.5	26.6
05/01/2014	3:10	25.3	25.4	25.5	26.1	23.3	22.8	22.8	24.9	25.0	25.5	25.5	26.2	25.5	25.8	25.8	26.4	26.6
05/01/2014	3:20	25.5	25.5	25.8	26.4	23.4	23.1	23.5	25.3	25.0	25.5	25.8	26.2	25.7	26.0	26.1	26.6	27.2
05/01/2014	3:30	25.4	25.6	25.5	26.1	23.5	22.9	22.5	24.5	25.2	25.3	26.0	25.6	26.0	25.9	26.4	26.3	
05/01/2014	3:40	25.3	25.4	25.4	26.1	23.5	22.9	22.9	24.9	25.0	25.3	25.2	26.1	25.6	25.8	25.8	26.3	26.2
05/01/2014	3:50	25.2	25.1	25.1	25.8	23.4	22.6	22.2	24.3	24.9	25.3	24.9	26.0	25.5	25.6	25.5	26.0	26.2
05/01/2014	4:00	25.2	25.1	25.0	25.7	23.5	22.6	22.3	24.4	24.9	24.8	24.7	25.5	25.3	25.4	25.2	25.9	26.0
05/01/2014	4:10	25.1	25.0	25.0	25.6	23.4	22.4	22.3	24.3	24.9	24.7	24.8	25.4	25.3	25.5	25.3	25.9	25.7
05/01/2014	4:20	25.0	24.9	24.8	25.6	23.2	22.2	21.9	23.9	24.6	24.8	24.8	25.3	25.2	25.3	25.2	25.7	26.1
05/01/2014	4:30	25.1	25.0	25.0	25.6	23.3	22.1	21.5	23.8	24.9	25.2	25.1	25.6	25.3	25.3	25.1	25.7	25.8
05/01/2014	4:40	25.1	25.0	25.0	25.7	23.2	22.2	22.1	24.3	24.6	24.7	24.8	25.5	25.2	25.4	25.2	25.8	25.8
05/01/2014	4:50	24.8	24.8	24.7	25.4	23.0	22.0	21.6	23.9	24.4	24.6	24.5	25.4	25.1	25.1	25.1	25.6	25.7
05/01/2014	5:00	24.9	24.8	24.9	25.5	23.0	22.1	22.0	24.0	24.3	24.4	24.4	25.2	25.1	25.1	25.0	25.7	25.7
05/01/2014	5:10	24.7	24.6	24.6	25.3	22.9	22.2	22.0	24.2	24.3	24.1	24.1	25.0	24.9	24.9	24.9	25.4	25.6
05/01/2014	5:20	24.7	24.7	24.6	25.3	23.0	22.1	21.6	23.7	24.4	24.7	24.4	25.1	24.9	25.1	25.0	25.5	25.6
05/01/2014	5:30	24.6	24.6	24.6	25.3	23.0	22.1	22.1	24.2	24.2	24.2	24.2	25.1	24.8	25.0	24.9	25.5	25.5
05/01/2014	5:40	24.5	24.5	24.6	25.3	22.9	22.3	22.5	24.3	24.5	24.7	24.6	25.4	24.9	25.0	25.0	25.5	25.7
05/01/2014	5:50	24.5	24.6	24.6	25.2	22.9	22.2	22.2	24.0	24.2	24.3	24.2	25.0	24.8	25.0	24.9	25.4	25.5
05/01/2014	6:00	24.5	24.4	24.4	25.0	22.8	22.0	22.0	23.9	24.0	23.9	24.3	24.8	24.8	24.8	24.6	25.2	25.2
05/01/2014	6:10	24.4	24.3	24.4	24.9	22.8	22.0	22.0	24.0	24.3	24.7	24.3	24.9	24.8	24.8	24.7	25.2	25.3
05/01/2014	6:20	24.4	24.4	24.3	24.9	22.9	22.0	21.6	23.7	23.9	24.3	23.8	24.6	24.7	24.8	24.6	25.1	25.1
05/01/2014	6:30	24.2	24.2	24.1	24.7	22.8	21.8	21.4	23.3	23.9	23.9	23.5	24.4	24.5	24.5	24.4	24.9	25.0
05/01/2014	6:40	24.3	24.2	24.1	24.7	22.9	21.9	22.1	23.9	24.2	24.1	24.1	24.5	24.6	24.7	24.6	25.0	25.2
05/01/2014	6:50	24.3	24.3	24.3	24.8	22.8	22.1	22.0	23.8	23.8	24.0	23.7	24.5	24.5	24.7	24.5	25.0	24.9
05/01/2014	7:00	24.2	24.3	24.4	24.8	22.9	22.4	22.8	24.2	24.0	24.2	24.2	24.8	24.6	24.6	24.7	25.1	25.0
05/01/2014	7:10	24.3	24.2	24.4	24.8	23.0	22.7	23.2	24.4	24.0	24.3	24.3	24.7	24.6	24.7	24.8	25.1	24.9
05/01/2014	7:20	24.3	24.4	24.6	24.9	23.2	23.0	23.7	24.7	24.2	24.3	24.5	24.9	24.7	24.9	25.0	25.2	24.9
05/01/2014	7:30	24.4	24.6	24.9	25.1	23.3	23.4	24.4	25.1	24.2	24.4	24.8	25.0	24.7	25.0	25.2	25.3	24.9
05/01/2014	7:40	24.5	24.8	25.1	25.3	23.5	23.9	25.0	25.5	24.3	24.7	25.1	25.2	25.0	25.2	25.5	25.6	25.1
05/01/2014	7:50	24.7	25.0	25.4	25.7	23.8	24.3	25.7	27.0	24.6	24.9	25.5	26.0	25.1	25.4	25.8	26.1	25.0
05/01/2014	8:00	24.9	25.4	26.5	26.5	24.1	24.8	29.5	27.9	24.7	25.3	26.9	26.5	25.3	25.7	26.8	26.8	25.0
05/01/2014	8:10	25.4	26.2	27.4	27.2	24.4	25.5	32.2	30.2	25.3	26.2	27.9	27.7	25.7	26.5	27.8	27.6	25.2
05/01/2014	8:20	25.9	27.1	28.1	27.7	24.9	26.7	33.5	30.9	25.7	26.9	28.9	27.7	26.3	27.4	28.5	28.0	25.6
05/01/2014	8:30	26.7	28.0	29.0	28.3	25.7	28.1	35.6	31.7	26.3	28.4	30.1	28.6	27.1	28.4	29.4	28.7	26.7
05/01/2014	8:40	27.7	29.0	29.7	29.0	26.9	30.1	37.3	32.7	27.1	29.6	30.6	29.0	28.1	29.2	30.0	29.2	26.6
05/01/2014	8:50	27.3	27.2	27.1	27.0	27.8	32.0	38.4	33.7	26.7	27.5	27.9	28.2	27.9	27.8	27.9	27.6	27.5
05/01/2014	9:00	27.6	27.6	27.4	27.6	28.9	33.9	40.5	35.2	26.9	28.2	27.8	27.4	28.1	27.9	28.3	27.9	27.2
05/01/2014	9:10	28.4	28.6	28.3	28.1	30.0	35.6	41.9	35.8	28.7	28.9	29.8	29.9	29.2	29.0	29.2	28.4	28.4
05/01/2014	9:20	28.3	28.2	27.9	27.8	31.0	37.0	42.4	35.9	27.8	27.7	27.9	27.1	28.8	28.6	29.1	28.4	26.6
05/01/2014	9:30	28.6	28.8	28.9	28.5	31.8	37.9	44.1	37.4	29.6	29.8	30.5	30.8	29.5	29.4	29.8	29.1	29.1
05/01/2014	9:40	29.2	29.5	29.2	29.1	32.9	39.7	48.9	40.4	29.4	29.9	33.5	30.6	30.1	29.9	30.3	29.6	30.1
05/01/2014	9:50	29.2	29.3	29.0	28.7	33.8	40.1	42.9	35.0	30.1	31.1	29.0	28.2	29.9	29.7	29.9	29.1	28.6
05/01/2014	10:00	29.4	29.3	29.1	28.7	33.9	39.8	42.7	35.3	30.5	29.8	30.8	29.1	30.0	29.6	29.9	29.2	29.1
05/01/2014	10:10	29.3	29.5	29.3	29.1	34.2	40.3	44.2	36.5	30.2	29.1	29.3	28.9	30.3	30.1	30.3	29.7	28.3
05/01/2014	10:20	29.1	29.4	29.2	28.9	34.6	40.8	45.9	37.7	28.7	28.7	29.5	28.3	30.0	29.8	30.3	29.4	27.9
05/01/2014	10:30	29.8	30.1	29.8	29.5	35.5	43.9	52.9	42.6	30.0	29.2	28.7	28.8	30.6	30.6	31.0	30.3	29.3
05/01/2014	10:40	30.1	30.6	30.3	30.0	37.1	45.9	55.3	44.1	29.9	30.9	32.8	31.7	31.2	31.1	31.7	30.8	30.2
05/01/2014	10:50	30.6	31.1	30.7	30.5	38.2	46.6	53.7	43.0	31.1	30.4	31.1	30.5	31.7	31.6	32.0	31.1	29.8
05/01/2014	11:00	30.7	31.0	30.5	30.4	39.1	48.1	56.2	43.8	30.7	31.5	30.4	31.2	31.9	31.7	31.9	31.0	30.6
05/01/2014	11:10	30.9	31.0	30.8	30.8	40.0	47.9	56.7	45.7	30.9	30.5	30.7	31.0	31.8	31.7	32.2	31.5	30.3
05/01/2014	11:20	31.6	31.8	31.5	31.2	40.5	49.3	54.6	43.0	30.5	31.3	31.0	30.3	32.6	32.6	33.0	32.0	31.1
05/01/2014	11:30	32.1	32.2	32.0	31.8	41.9	51.3	62.0	48.3	35.8	37.1	37.2	36.0	32.9	32.8	33.2	32.3	30.3
05/01/2014	11:40	31.9	32.3	31.9	31.9	43.0	51.4	58.9	46.2	33.0	33.9	31.7	32.8	33.1	33.1	33.5	32.5	32.4
05/01/2014	11:50	32.3	32.6	32.3	32.2	43.0	51.1	56.7	44.9	32.0	33.9	32.7	33.2	33.2	33.3	33.8	33.1	32.1
05/01/2014	12:00	32.8	33.5	33.2	32.9	43.5	50.7	54.5	42.8	35.2	35.6	34.8	33.4	34.0	34.1	34.9	33.6	32.2
05/01/2014	12:10	32.6	32.9	32.5	32.0	43.0	49.8	53.0	41.8	36.1	36.1	36.5	33.0	33.6	33.3	34.0	32.7	33.0
05/01/2014	12:20	32.2	32.1	31.9	31.8	42.8	50.2	58.5	45.5	35.0	35.4	34.8	33.6	33.1	32.8	33.5	32.6	32.5
05/01/2014	12:30	33.0	33.0	32.7	32.6	43.1	50.9	58.6	46.7	33.7	34.8	32.9	31.9	33.9	33.7	34.3	33.4	32.4
05/01/2014	12:40	33.0	32.9	32.5	32.5	43.3	51.4	57.5	46.5	35.4	35.6	35.7	33.1	34.2	33.7	34.3	33.4	33.7
05/01/2014	12:50	33.2	33.3	33.3	32.9	43.2	50.4	58.6	47.1	36.8	34.9	35.0	33.4	34				

05/01/2014	19:10	29.6	29.0	28.8	29.6	28.0	25.8	25.0	27.5	29.4	28.8	28.7	29.2	29.9	29.4	29.2	30.0	30.4
05/01/2014	19:20	29.3	28.7	28.6	29.4	27.7	25.7	25.0	27.4	29.1	28.4	28.5	29.0	29.6	29.2	29.0	29.7	29.8
05/01/2014	19:30	29.1	28.6	28.7	29.5	27.5	25.6	25.2	27.5	28.6	28.2	28.3	29.0	29.3	29.0	29.0	29.7	29.7
05/01/2014	19:40	28.9	28.6	28.6	29.4	27.2	25.6	25.4	28.0	28.6	28.3	28.4	29.0	29.2	29.0	29.0	29.7	29.6
05/01/2014	19:50	28.8	28.4	28.5	29.1	27.1	26.4	26.5	28.2	28.3	28.3	28.3	28.9	29.0	28.8	28.8	29.4	29.3
05/01/2014	20:00	28.6	28.4	28.5	29.0	27.0	26.4	26.0	27.8	28.2	28.0	28.0	28.7	28.9	28.8	28.8	29.3	29.1
05/01/2014	20:10	28.5	28.4	28.2	28.8	26.9	25.9	25.0	26.9	28.1	27.7	27.7	28.1	28.8	28.7	28.6	29.1	28.9
05/01/2014	20:20	28.3	28.0	27.9	28.5	26.8	25.9	25.7	27.4	27.9	27.6	27.5	28.1	28.6	28.4	28.2	28.8	28.9
05/01/2014	20:30	28.2	28.0	27.9	28.4	26.7	26.0	25.6	27.4	27.9	27.8	27.9	28.1	28.5	28.4	28.3	28.7	28.7
05/01/2014	20:40	28.1	27.9	27.7	28.3	26.5	25.6	25.0	27.0	27.7	27.3	27.2	28.0	28.3	28.2	28.1	28.6	28.6
05/01/2014	20:50	27.9	27.7	27.6	28.2	26.4	25.3	25.0	27.0	27.7	27.5	27.0	27.9	28.2	28.1	28.0	28.5	28.6
05/01/2014	21:00	27.8	27.6	27.6	28.2	26.3	25.6	25.4	27.2	27.5	27.3	27.1	27.8	28.2	28.0	27.9	28.5	28.8
05/01/2014	21:10	27.8	27.6	27.6	28.2	26.2	25.4	25.0	26.9	27.4	27.3	27.1	27.9	28.1	28.0	27.9	28.4	28.7
05/01/2014	21:20	27.7	27.5	27.4	28.0	26.0	25.1	24.8	26.9	27.4	27.1	26.9	27.7	28.0	27.9	27.7	28.3	28.6
05/01/2014	21:30	27.5	27.5	27.5	28.1	25.9	25.0	24.7	26.8	27.2	27.1	27.0	27.8	27.8	27.9	27.9	28.4	28.1
05/01/2014	21:40	27.6	27.4	27.3	28.0	25.8	24.7	24.0	26.2	27.1	26.9	26.9	27.8	27.8	27.7	27.6	28.2	28.5
05/01/2014	21:50	27.5	27.4	27.3	28.0	25.6	24.6	24.2	26.4	27.1	26.8	27.1	27.7	27.9	27.8	27.7	28.3	28.4
05/01/2014	22:00	27.2	27.0	27.0	27.6	25.5	24.3	23.9	26.1	26.7	26.3	26.8	27.3	27.5	27.5	27.4	28.0	27.7
05/01/2014	22:10	27.2	27.1	26.9	27.5	25.4	24.1	23.5	25.7	26.9	26.8	26.8	27.3	27.5	27.5	27.4	27.9	27.9
05/01/2014	22:20	27.2	27.1	27.0	27.6	25.3	24.2	23.8	25.9	26.8	26.5	26.2	27.4	27.4	27.4	27.3	27.8	27.9
05/01/2014	22:30	27.0	26.9	26.9	27.6	25.2	24.1	23.7	26.0	26.6	26.4	26.5	27.2	27.2	27.3	27.2	27.8	27.9
05/01/2014	22:40	27.0	26.9	27.0	27.7	25.0	24.4	24.6	26.6	26.5	26.4	26.6	27.4	27.3	27.3	27.3	28.0	27.9
05/01/2014	22:50	27.1	27.0	27.0	27.7	25.1	24.4	24.0	26.1	26.5	26.6	26.8	27.5	27.3	27.3	27.2	27.9	28.5
05/01/2014	23:00	26.8	26.8	26.9	27.5	25.0	24.4	24.3	26.2	26.5	26.6	26.4	27.2	27.2	27.2	27.2	27.8	28.0
05/01/2014	23:10	26.9	26.7	26.7	27.4	25.0	24.4	24.3	26.4	26.4	26.2	26.1	27.0	27.1	27.1	27.0	27.6	28.0
05/01/2014	23:20	26.8	26.8	26.8	27.5	24.9	24.2	23.8	26.0	26.7	26.4	26.6	27.3	27.2	27.3	27.2	27.8	27.7
05/01/2014	23:30	26.6	26.6	26.5	27.3	24.8	23.8	23.3	25.8	26.2	26.1	26.3	27.1	27.0	27.0	26.9	27.6	27.6
05/01/2014	23:40	26.7	26.5	26.5	27.2	24.7	23.7	23.7	25.9	26.3	26.1	26.1	27.0	27.0	27.0	26.9	27.5	27.9
05/01/2014	23:50	26.6	26.4	26.4	27.1	24.6	23.4	22.7	25.1	26.3	26.1	26.0	26.7	26.9	26.8	26.7	27.4	28.0
05/01/2014	0:00	26.5	26.3	26.2	27.0	24.4	23.3	22.7	25.1	26.2	26.3	26.1	26.8	26.8	26.8	26.7	27.3	27.7
06/01/2014	0:10	26.4	26.1	26.1	26.9	24.3	23.0	22.5	25.0	26.0	26.0	25.7	26.5	26.8	26.6	26.6	27.2	27.6
06/01/2014	0:20	26.4	26.1	26.1	26.8	24.2	22.8	22.5	25.0	26.0	25.5	25.6	26.9	26.7	26.5	26.4	27.1	27.7
06/01/2014	0:30	26.4	26.3	26.3	27.0	24.2	23.0	22.6	25.0	26.0	26.3	26.0	26.6	26.7	26.6	26.7	27.3	27.6
06/01/2014	0:40	26.3	26.1	26.2	26.9	24.0	22.7	22.6	24.9	26.0	26.0	26.0	26.6	26.6	26.6	26.4	27.2	27.4
06/01/2014	0:50	26.3	26.0	26.1	26.8	24.0	22.9	22.9	25.3	25.9	25.6	25.6	26.5	26.5	26.5	26.4	27.0	27.4
06/01/2014	1:00	26.1	26.1	26.1	26.7	24.0	23.0	23.1	25.3	25.7	25.6	25.6	26.4	26.4	26.5	26.3	26.9	27.2
06/01/2014	1:10	26.1	26.0	26.0	26.7	23.9	22.8	22.5	25.0	25.8	25.7	25.7	26.6	26.5	26.5	26.4	27.1	27.6
06/01/2014	1:20	26.0	26.0	25.9	26.6	23.8	22.5	22.1	24.3	25.6	25.7	26.1	26.4	26.2	26.3	26.2	26.8	27.5
06/01/2014	1:30	26.0	25.9	25.9	26.7	23.7	22.6	22.1	24.5	25.5	25.6	25.9	26.3	26.2	26.3	26.2	26.8	27.4
06/01/2014	1:40	26.0	25.9	26.1	26.7	23.6	22.8	22.7	24.8	25.6	25.7	26.2	26.3	26.2	26.3	26.4	26.9	27.1
06/01/2014	1:50	26.0	25.8	25.7	26.4	23.7	22.7	22.3	24.6	25.4	25.8	25.8	26.1	26.1	26.2	26.1	26.7	27.4
06/01/2014	2:00	25.9	25.8	25.8	26.5	23.7	22.6	22.1	24.5	25.6	26.1	25.7	26.2	26.0	26.2	26.0	26.7	27.3
06/01/2014	2:10	25.7	25.7	25.5	26.2	23.5	22.5	21.8	24.2	25.3	25.5	25.4	25.8	25.9	26.0	25.8	26.4	27.3
06/01/2014	2:20	25.6	25.5	25.6	26.3	23.4	22.6	22.6	24.9	25.2	25.3	25.5	26.1	25.8	26.0	25.9	26.5	26.6
06/01/2014	2:30	25.7	25.7	25.7	26.3	23.4	22.7	22.4	24.6	25.2	25.4	25.5	26.1	25.9	26.0	26.0	26.5	26.7
06/01/2014	2:40	25.5	25.6	25.6	26.3	23.4	22.8	22.5	24.6	25.1	25.6	25.6	26.2	25.8	26.0	25.9	26.4	26.5
06/01/2014	2:50	25.4	25.5	25.5	26.1	23.4	22.7	22.4	24.6	25.1	25.2	25.2	26.0	25.6	25.9	25.8	26.3	26.4
06/01/2014	3:00	25.4	25.4	25.3	25.9	23.4	22.5	21.9	24.1	25.0	25.0	25.1	25.6	25.6	25.8	25.6	26.2	26.2
06/01/2014	3:10	25.3	25.3	25.2	25.8	23.3	22.5	22.1	24.3	24.9	24.9	25.2	25.6	25.5	25.6	25.5	26.0	26.3
06/01/2014	3:20	25.3	25.2	25.0	25.6	23.3	22.4	21.9	24.0	25.0	24.9	24.9	25.4	25.5	25.5	25.3	25.8	26.2
06/01/2014	3:30	25.1	25.1	25.1	25.7	23.2	22.3	21.9	24.0	24.9	25.0	25.4	25.5	25.4	25.5	25.5	26.0	26.3
06/01/2014	3:40	25.2	25.1	25.1	25.6	23.2	22.3	22.1	24.2	24.9	24.9	24.8	25.3	25.4	25.5	25.3	25.8	26.1
06/01/2014	3:50	25.3	25.1	25.2	25.7	23.3	22.9	22.9	24.5	24.9	24.9	24.8	25.5	25.4	25.5	25.5	25.9	26.2
06/01/2014	4:00	25.1	25.0	25.0	25.5	23.3	22.9	22.6	24.3	24.8	24.8	24.8	25.2	25.2	25.4	25.3	25.7	26.6
06/01/2014	4:10	25.1	25.0	24.9	25.4	23.4	23.0	22.6	24.4	24.9	24.6	24.7	25.1	25.2	25.3	25.2	25.6	25.8
06/01/2014	4:20	25.1	25.1	25.0	25.4	23.5	22.8	22.4	24.1	24.7	24.7	24.6	25.0	25.2	25.4	25.2	25.6	25.7
06/01/2014	4:30	25.0	24.8	24.7	25.3	23.4	22.7	22.1	23.8	24.8	24.5	24.7	24.9	25.2	25.3	25.1	25.5	25.4
06/01/2014	4:40	24.8	24.8	24.5	25.2	23.3	22.4	21.6	23.7	24.5	24.8	24.4	24.7	25.1	25.3	24.9	25.4	25.7
06/01/2014	4:50	24.6	24.6	24.4	24.9	23.0	22.0	21.5	23.3	24.4	24.3	24.1	24.6	24.9	25.0	24.7	25.2	25.3
06/01/2014	5:00	24.7	24.6	24.5	25.0	23.0	22.2	21.9	23.6	24.5	24.4	24.4	24.6	24.9	24.9	24.7	25.2	25.0
06/01/2014	5:10	24.5	24.4	24.3	24.8	22.9	22.1	21.8	23.5	24.6	24.3	24.3	24.5	24.8	24.9	24.6	25.1	25.3
06/01/2014	5:20	24.3	24.4	24.2	24.6	22.8	21.9	21.3	23.1	24.2	24.4	24.4	24.6	24.8	24.5	25.0	25.2	25.2
06/01/2014	5:30	24.2	24.2	24.0	24.5	22.7	21.8	21.3	23.1	23.8	24.0	23.8	24.3	24.6	24.7	24.4	24.9	24.9
06/01/2014	5:40	24.2	24.2	24.0	24.5	22.6	21.7	21.4	23.2	23.9	24.0	24.1	24.5	24.6	24.4	24.9	25.0	25.0
06/01/2014	5:50	24.2	24.2	24.0	24.5	22.6	21.9	21.5	23.2	23.8	23.6	23.6	24.2	24.4	24.5	24.3	24.8	25.0
06/01/2014	6:00	24.1	24.1	23.9	24.4	22.5	21.6	20.9	22.7	23.8	24.2	23.7	24.2	24.4	24.5	24.2	24.8	25.0
06/01/2014	6:10	24.0	24.0	23.9	24.4	22.5	21.6	21.3	23.1	23.8	23.9	23.7	24.0	24.3	24.4	24.1	24.7	25.8
06/01/2014	6:20	23.9	23.9	23.7	24.3	22.4	21.4	21.0	22.9	23.5	23.4	23.2						



ตารางที่ ข.1 แสดงอุณหภูมิที่วัดได้ จากการทดลองด้วยกล้องทดลอง เพื่อทดสอบระบบข้างของขบวนขบวนรถ

Date	Time	0cm.	5cm.	10cm.	15cm.	0cm.	5cm.	10cm.	15cm.	0cm.	5cm.	10cm.	15cm.	0cm.	5cm.	10cm.	15cm.	anb
		ผิวหลังคา	ผิวหลังคา	ผิวหลังคา	ผิวหลังคา	ช่องหลังคา	ช่องหลังคา	ช่องหลังคา	ช่องหลังคา	กลางกล่อง	กลางกล่อง	กลางกล่อง	กลางกล่อง	อากาศ	อากาศ	อากาศ	อากาศ	อากาศ
26/01/2014	18:00:00	26.6	26.7	26.4	26.5	28.1	28.4	28.4	28.6	28.8	28.9	29.1	29.1	29.0	29.2	29.1	29.4	29.5
26/01/2014	18:10:00	25.6	25.9	25.6	25.8	27.5	27.8	28.0	28.2	28.2	28.4	28.6	28.7	28.4	28.8	28.7	29.0	29.8
26/01/2014	18:20:00	25.7	25.8	25.4	25.5	27.1	27.3	27.6	27.6	27.8	28.0	28.1	28.2	28.1	28.2	28.1	28.5	29.6
26/01/2014	18:30:00	25.6	25.3	25.2	25.1	26.7	27.1	27.3	27.4	27.5	27.6	27.9	27.8	27.8	27.8	27.9	28.1	28.9
26/01/2014	18:40:00	25.0	24.8	24.5	24.8	26.3	26.9	27.2	27.3	27.2	27.3	27.6	27.5	27.5	27.6	27.7	27.8	28.7
26/01/2014	18:50:00	24.6	24.4	24.3	24.3	26.0	26.5	26.9	26.9	27.0	27.3	27.2	27.1	27.2	27.2	27.3	27.5	28.6
26/01/2014	19:00:00	24.3	24.1	24.0	24.0	25.9	26.4	26.8	27.1	26.7	26.9	27.2	27.1	27.0	27.1	27.3	27.4	28.5
26/01/2014	19:10:00	24.4	24.3	24.3	24.3	25.9	26.6	26.8	26.8	26.6	26.8	27.0	27.0	26.9	27.0	27.2	27.3	28.4
26/01/2014	19:20:00	24.4	24.2	24.1	24.2	25.8	26.2	26.4	26.6	26.5	26.7	26.8	26.8	26.8	26.9	27.0	27.1	28.0
26/01/2014	19:30:00	24.2	24.2	24.0	23.9	25.8	26.1	26.6	26.5	26.6	26.8	26.7	26.7	26.9	26.9	27.1	28.2	
26/01/2014	19:40:00	24.1	24.0	23.9	23.8	25.6	26.1	26.3	26.2	26.4	26.5	26.6	26.6	26.8	26.8	27.0	28.3	
26/01/2014	19:50:00	23.2	23.2	23.2	23.0	25.1	25.6	26.0	26.6	26.0	26.2	26.4	26.4	26.3	26.6	26.5	26.8	28.0
26/01/2014	20:00:00	23.3	23.3	23.3	23.2	25.1	25.7	26.0	26.1	25.9	26.3	26.6	26.6	26.3	26.6	26.7	26.9	28.2
26/01/2014	20:10:00	22.9	23.0	22.8	22.9	25.0	25.6	26.2	26.1	25.9	26.2	26.4	26.4	26.1	26.5	26.6	26.7	27.6
26/01/2014	20:20:00	23.5	23.8	23.3	23.5	25.2	25.6	26.1	26.6	25.9	26.3	26.5	26.5	26.1	26.6	26.6	26.8	28.1
26/01/2014	20:30:00	22.8	22.8	22.4	22.3	24.9	25.1	25.2	25.7	25.7	26.0	26.1	26.1	26.0	26.4	26.3	26.5	27.9
26/01/2014	20:40:00	23.0	23.1	22.9	22.9	24.9	25.3	25.4	25.5	25.7	26.0	26.1	26.1	26.0	26.4	26.2	26.5	27.8
26/01/2014	20:50:00	22.3	22.2	21.8	22.1	24.6	24.9	25.7	25.8	25.5	25.8	26.0	26.1	25.7	26.1	26.1	26.4	27.9
26/01/2014	21:00:00	22.2	22.1	21.7	21.9	24.5	24.9	25.1	25.6	25.3	25.6	25.8	25.8	25.6	25.9	25.9	26.1	27.5
26/01/2014	21:10:00	22.7	22.7	22.2	22.2	24.6	25.2	25.1	25.4	25.3	25.6	25.7	25.7	25.6	25.9	25.8	26.1	27.5
26/01/2014	21:20:00	23.2	22.8	22.6	22.6	24.7	25.4	25.9	25.8	25.7	25.9	26.0	25.9	25.9	26.2	26.1	26.3	27.7
26/01/2014	21:30:00	23.0	23.0	22.7	22.9	24.8	25.3	25.6	25.6	25.5	25.7	25.9	25.9	25.8	26.1	26.0	26.2	27.0
26/01/2014	21:40:00	22.7	22.9	22.6	22.8	24.6	24.9	25.5	25.4	25.4	25.6	25.8	25.8	25.6	25.9	25.9	26.1	27.4
26/01/2014	21:50:00	23.0	23.2	22.9	23.0	24.6	25.0	25.3	25.2	25.4	25.6	25.7	25.7	25.9	25.8	26.0	26.7	
26/01/2014	22:00:00	22.4	22.8	22.5	22.5	24.4	25.0	25.0	25.1	25.1	25.3	25.6	25.6	25.4	25.7	25.7	25.8	26.8
26/01/2014	22:10:00	22.0	22.8	22.3	22.2	24.2	24.6	25.2	25.0	24.8	25.1	25.4	25.2	25.1	25.5	25.4	25.6	26.7
26/01/2014	22:20:00	22.1	22.4	22.0	22.2	24.2	24.2	24.9	24.7	24.9	25.1	25.2	25.3	25.2	25.4	25.4	25.6	26.5
26/01/2014	22:30:00	22.3	22.7	22.2	22.2	24.2	24.4	25.1	24.8	24.8	25.1	25.3	25.2	25.1	25.4	25.4	25.5	26.3
26/01/2014	22:40:00	22.1	22.4	22.1	22.2	23.9	24.3	24.8	24.9	24.7	24.9	25.2	25.1	25.0	25.3	25.3	25.4	26.4
26/01/2014	22:50:00	21.9	22.3	22.0	21.9	23.9	24.2	24.6	24.8	24.6	24.8	25.1	25.0	24.9	25.2	25.2	25.3	26.3
26/01/2014	23:00:00	21.7	22.0	21.9	21.8	23.7	24.1	24.4	24.7	24.5	24.7	24.9	24.8	24.7	25.1	25.0	25.1	26.0
26/01/2014	23:10:00	21.5	21.8	21.5	21.4	23.6	23.9	24.0	24.5	24.3	24.5	24.6	24.5	24.6	24.8	24.8	24.9	25.9
26/01/2014	23:20:00	21.8	22.1	21.9	21.9	23.6	24.0	24.5	24.7	24.2	24.5	24.7	24.5	24.8	24.8	24.9	26.0	
26/01/2014	23:30:00	22.0	22.6	22.2	22.2	23.6	24.2	24.3	24.6	24.4	24.6	24.7	24.7	24.6	24.9	24.8	25.0	25.5
26/01/2014	23:40:00	22.0	22.2	22.0	22.2	23.5	23.9	24.4	24.5	24.3	24.5	24.7	24.7	24.6	24.8	24.8	25.1	25.6
26/01/2014	23:50:00	21.7	22.0	21.7	21.8	23.5	23.8	24.2	24.2	24.1	24.3	24.6	24.6	24.4	24.7	24.7	24.9	25.5
27/01/2014	00:00:00	21.6	21.9	21.6	21.8	23.3	23.6	24.1	24.4	24.0	24.2	24.5	24.5	24.3	24.6	24.6	24.8	25.4
27/01/2014	00:10:00	21.4	21.7	21.3	21.5	23.2	23.5	23.9	24.2	23.9	24.2	24.2	24.2	24.2	24.5	24.4	24.6	25.4
27/01/2014	00:20:00	21.8	21.9	21.6	21.7	23.1	23.4	23.8	23.9	23.9	24.1	24.2	24.2	24.2	24.5	24.3	24.5	25.4
27/01/2014	00:30:00	21.3	21.5	21.4	21.3	22.8	23.2	23.3	23.6	23.6	23.7	24.0	24.0	23.9	24.0	24.1	24.3	25.3
27/01/2014	00:40:00	21.3	21.4	21.1	21.4	22.8	23.4	23.7	23.9	23.6	23.8	24.0	23.9	23.9	24.2	24.1	24.2	25.3
27/01/2014	00:50:00	21.6	21.7	21.3	21.4	22.9	23.2	23.5	23.6	23.6	23.7	23.8	23.8	23.9	24.1	24.0	24.1	25.0
27/01/2014	01:00:00	21.4	21.5	21.3	21.3	22.8	23.2	23.8	23.8	23.6	23.6	23.8	23.8	24.0	23.9	24.1	25.2	
27/01/2014	01:10:00	21.1	21.0	20.8	20.7	22.6	23.1	23.4	23.5	23.3	23.5	23.7	23.6	23.6	23.9	23.8	23.9	25.3
27/01/2014	01:20:00	21.1	21.0	20.7	20.8	22.6	22.8	23.4	23.5	23.3	23.5	23.7	23.7	23.6	23.9	23.9	24.0	25.2
27/01/2014	01:30:00	20.9	21.0	20.8	20.9	22.5	22.6	23.2	23.4	23.2	23.3	23.6	23.6	23.5	23.7	23.7	23.8	24.9
27/01/2014	01:40:00	20.8	20.7	20.2	20.5	22.4	22.8	23.2	23.5	23.1	23.3	23.5	23.5	23.5	23.7	23.7	23.8	25.0
27/01/2014	01:50:00	20.8	20.8	20.8	20.7	22.3	22.6	22.9	23.4	23.0	23.3	23.5	23.4	23.4	23.6	23.6	23.7	24.9
27/01/2014	02:00:00	20.4	20.3	20.3	20.3	22.1	22.6	22.7	22.9	22.9	23.1	23.3	23.3	23.3	23.5	23.4	23.6	24.9
27/01/2014	02:10:00	20.4	20.3	19.9	19.9	22.2	22.6	23.0	23.2	23.0	23.1	23.2	23.2	23.3	23.5	23.4	23.5	24.8
27/01/2014	02:20:00	20.3	20.5	20.2	20.3	22.1	22.4	22.9	23.0	22.8	23.0	23.3	23.2	23.2	23.4	23.4	23.5	24.7
27/01/2014	02:30:00	20.3	20.2	19.9	19.9	22.1	22.4	22.8	22.8	22.8	22.9	23.2	23.1	23.1	23.3	23.3	23.4	24.9
27/01/2014	02:40:00	20.1	20.1	19.8	19.9	21.8	22.4	22.9	22.8	22.7	22.9	23.2	23.1	23.1	23.3	23.3	23.4	24.9
27/01/2014	02:50:00	20.3	20.1	20.1	20.1	22.0	22.3	23.2	23.5	22.7	23.0	23.2	23.1	23.1	23.3	23.4	24.7	
27/01/2014	03:00:00	20.3	20.1	20.0	19.9	21.9	22.6	22.5	23.1	22.6	22.8	23.1	23.0	23.0	23.2	23.2	23.3	24.6
27/01/2014	03:10:00	20.6	20.5	19.9	20.0	22.0	22.3	22.5	22.6	22.8	22.8	22.9	22.9	23.0	23.2	23.1	23.2	24.3
27/01/2014	03:20:00	20.2	20.1	19.9	20.2	21.8	22.0	22.7	23.0	22.5	22.7	23.0	22.9	22.8	23.1	23.1	23.2	24.5
27/01/2014	03:30:00	20.2	20.2	20.0	20.1	21.8	22.2	22.9	23.0	22.6	22.8	23.1	23.0	22.9	23.2	23.2	23.3	24.4
27/01/2014	03:40:00	20.3	20.3	20.1	20.1	21.9	22.5	22.9	23.0	22.6	22.8	23.0	22.9	22.8	23.2	23.1	23.2	24.3
27/01/2014	03:50:00	20.3	20.1	19.9	20.2	21.7	22.1	22.2	22.7	22.5	22.8	23.0	22.9	22.8	23.1	23.1	23.2	24.3
27/01/2014	04:00:00	20.1	19.9	19.6	19.7	21.6	22.1	22.2	22.4	22.4	22.6	22.7	22.8	22.7	22.9	22.9	23.1	24.2
27/01/2014	04:10:00	20.2	20.2	19.9	20.0	21.6	22.1	22.4	22.4	22.3	22.5	22.7	22.6	22.6	22.8	22.8	22.9	24.2
27/01/2014	04:20:00	20.1	20.1	20.1	20.0	21.7	22.0	22.5	22.5	22.3	22.5	22.8	22.7	22.6	22.9	22.9	23.0	24.2
27/01/2014	04:30:00	20.1	20.0	19.6	19.8	21.6	21.8	22.4	22.6	22.3	22.5	22.7	22.6	22.6	22.9	22.9	22.9	24.1
27/01/2014	04:40:00	19.8	19.8	19.4	19.7	21.6	21.8	22.1	22.5									

27/01/2014	11:00:00	53.8	52.1	52.4	51.3	50.2	36.0	32.5	31.5	30.8	30.3	30.0	29.8	31.6	31.2	30.6	30.5	29.5
27/01/2014	11:10:00	59.3	58.3	58.4	58.1	54.1	39.5	34.6	34.4	31.3	30.6	30.7	30.3	31.9	31.4	31.2	30.8	30.2
27/01/2014	11:20:00	60.5	56.1	55.9	56.0	52.4	39.4	34.2	32.5	31.7	30.9	30.6	30.5	32.3	31.7	31.2	31.1	30.0
27/01/2014	11:30:00	58.8	53.1	53.1	51.8	47.3	31.7	30.3	29.2	31.1	30.2	30.0	29.9	31.5	31.4	30.8	30.5	29.6
27/01/2014	11:40:00	61.7	57.6	56.1	55.2	54.9	35.9	37.1	35.4	31.8	30.8	30.7	30.4	32.4	31.7	31.2	30.9	30.7
27/01/2014	11:50:00	56.9	53.7	53.8	53.0	49.6	36.6	32.0	32.6	32.0	31.6	31.4	31.0	32.8	32.4	32.1	31.8	30.0
27/01/2014	12:00:00	57.0	52.7	53.8	52.8	52.8	35.8	32.6	31.9	32.7	32.1	31.6	31.3	33.4	33.1	32.3	32.0	30.5
27/01/2014	12:10:00	63.0	56.8	57.0	55.2	48.4	33.5	32.4	31.6	32.2	31.3	31.4	31.2	32.9	32.6	32.1	32.1	31.4
27/01/2014	12:20:00	65.6	59.0	56.5	56.5	56.4	39.2	36.0	34.9	33.3	32.5	32.5	32.4	34.3	33.6	33.3	33.3	32.1
27/01/2014	12:30:00	67.6	60.6	60.6	59.4	52.1	36.3	34.9	33.2	32.9	32.1	32.4	31.9	33.6	33.4	33.1	32.8	32.5
27/01/2014	12:40:00	57.6	52.5	52.7	50.8	49.1	37.3	34.5	32.1	33.1	32.5	32.3	32.0	34.0	33.6	33.0	32.8	30.9
27/01/2014	12:50:00	59.1	58.1	58.1	56.9	54.6	39.2	33.6	33.9	33.9	33.3	32.8	32.6	34.5	34.1	33.5	33.4	31.8
27/01/2014	13:00:00	61.3	58.8	59.2	58.1	53.9	40.0	37.7	35.3	33.9	33.1	32.8	32.7	34.6	34.1	33.7	33.5	31.5
27/01/2014	13:10:00	62.5	54.8	53.4	53.5	53.3	36.5	34.7	35.1	34.0	33.2	33.2	33.0	34.6	34.2	33.9	33.5	31.9
27/01/2014	13:20:00	65.4	57.1	57.7	56.3	49.1	38.3	32.7	31.8	33.9	33.1	32.8	32.4	34.6	34.3	33.6	33.6	31.9
27/01/2014	13:30:00	62.8	60.0	61.1	59.2	55.6	41.3	37.3	36.1	34.7	34.1	33.9	33.5	35.7	35.2	34.6	34.3	31.8
27/01/2014	13:40:00	53.9	44.1	43.0	42.4	48.6	36.7	33.1	32.3	33.9	33.1	33.1	32.8	34.6	34.0	33.8	33.6	31.4
27/01/2014	13:50:00	43.9	44.3	45.3	43.9	42.7	35.0	32.9	33.1	33.0	32.7	32.5	32.4	33.6	33.5	33.1	33.1	32.7
27/01/2014	14:00:00	50.6	47.2	48.3	46.1	46.1	36.5	33.3	34.3	33.5	33.0	32.9	32.8	34.1	34.1	33.6	33.5	32.0
27/01/2014	14:10:00	55.8	54.0	53.8	52.1	49.2	39.0	36.1	34.4	33.6	33.1	33.1	32.9	34.5	34.4	33.9	33.7	32.2
27/01/2014	14:20:00	49.4	47.8	47.0	46.2	47.6	36.8	34.7	35.0	33.8	33.2	33.2	33.0	34.4	34.0	33.7	33.5	32.3
27/01/2014	14:30:00	41.0	39.0	38.2	37.8	39.5	33.2	32.3	32.4	32.7	32.3	32.2	31.9	33.0	32.9	32.5	32.6	31.6
27/01/2014	14:40:00	56.2	51.2	52.1	49.9	47.4	38.2	35.0	34.5	33.4	32.7	32.7	32.7	33.9	33.8	33.6	33.5	31.2
27/01/2014	14:50:00	55.8	53.8	53.3	52.1	52.0	40.0	36.0	35.9	34.6	34.0	34.0	33.6	35.5	34.9	34.7	34.3	32.1
27/01/2014	15:00:00	51.5	49.0	49.6	48.6	45.1	34.9	34.6	34.7	33.7	33.5	33.4	33.4	34.3	34.4	34.0	33.9	32.9
27/01/2014	15:10:00	46.0	43.2	43.4	42.6	44.3	34.1	35.0	34.1	33.9	33.2	33.2	32.9	34.4	34.0	33.7	33.6	32.5
27/01/2014	15:20:00	44.6	40.7	39.6	39.2	41.6	33.2	32.1	31.8	32.9	32.6	32.4	32.4	33.5	33.3	32.9	32.9	31.8
27/01/2014	15:30:00	51.0	48.4	49.0	47.5	45.0	34.2	33.3	32.9	33.9	33.1	33.1	32.8	34.4	34.1	33.7	33.6	33.3
27/01/2014	15:40:00	51.1	49.0	47.6	47.3	48.4	37.5	34.9	34.7	34.4	33.9	33.7	33.5	35.1	34.9	34.5	34.2	32.2
27/01/2014	15:50:00	47.0	46.2	45.7	44.2	46.9	35.4	33.3	33.7	34.4	33.9	33.5	33.3	35.2	34.8	34.3	34.1	32.1
27/01/2014	16:00:00	48.1	47.2	47.4	46.5	44.5	35.7	34.0	34.8	34.2	33.8	33.8	33.8	34.6	34.6	34.2	34.1	33.4
27/01/2014	16:10:00	43.0	42.1	41.8	41.3	40.6	33.3	32.2	33.1	33.3	32.9	32.8	32.8	33.9	33.6	33.4	33.3	32.2
27/01/2014	16:20:00	44.8	40.8	40.4	39.7	39.0	32.9	32.7	32.4	33.6	33.1	33.2	33.0	34.2	33.9	33.8	33.4	32.7
27/01/2014	16:30:00	42.4	40.7	40.9	40.8	38.3	33.6	32.7	32.9	33.2	32.9	33.0	33.0	33.7	33.7	33.4	33.3	32.7
27/01/2014	16:40:00	40.4	38.5	38.3	37.9	37.4	32.3	31.3	31.7	32.9	32.5	32.5	32.3	33.5	33.4	33.0	33.0	31.2
27/01/2014	16:50:00	37.2	35.8	35.6	35.5	36.4	33.7	32.3	32.7	32.8	32.4	32.4	32.2	33.1	33.0	32.8	32.8	32.2
27/01/2014	17:00:00	35.2	36.1	35.7	35.4	35.6	33.9	32.6	32.6	32.4	32.3	32.2	32.2	32.7	32.7	32.5	32.6	32.3
27/01/2014	17:10:00	33.9	33.7	33.4	33.6	33.9	32.0	31.7	32.0	32.1	31.8	31.8	31.8	32.4	32.3	32.1	32.2	32.1
27/01/2014	17:20:00	32.1	32.7	32.3	32.3	33.4	32.0	31.7	31.7	32.0	31.8	31.7	31.7	32.2	32.2	31.9	32.0	31.9
27/01/2014	17:30:00	30.5	31.1	30.7	30.8	31.1	31.1	31.1	31.3	31.4	31.3	31.3	31.3	31.8	31.7	31.5	31.7	31.6
27/01/2014	17:40:00	29.0	29.8	29.6	29.7	30.6	30.7	30.7	30.8	31.4	31.3	31.2	31.1	31.6	31.6	31.4	31.5	31.6
27/01/2014	17:50:00	28.3	29.1	28.8	29.0	30.1	30.4	30.7	30.8	30.8	30.9	30.9	31.0	31.0	31.2	31.1	31.3	31.5
27/01/2014	18:00:00	27.3	28.3	27.9	28.1	29.3	29.5	29.8	30.0	29.9	30.3	30.4	30.5	30.2	30.6	30.5	30.8	30.9
27/01/2014	18:10:00	26.8	27.8	27.6	27.7	28.8	29.2	29.5	29.8	29.5	29.9	30.0	30.2	29.7	30.2	30.1	30.4	30.9
27/01/2014	18:20:00	27.3	28.1	28.0	28.2	29.0	29.3	29.5	30.0	29.6	29.9	30.0	30.1	29.8	30.1	30.1	30.4	30.8
27/01/2014	18:30:00	27.9	28.1	28.0	28.0	28.9	29.4	29.8	29.8	29.6	29.9	30.1	30.2	29.8	30.2	30.2	30.6	30.8
27/01/2014	18:40:00	27.2	28.0	27.7	27.9	28.9	29.4	29.5	29.9	29.5	29.9	29.9	30.0	29.7	30.2	30.1	30.4	30.6
27/01/2014	18:50:00	26.5	27.2	27.1	27.2	28.4	28.8	29.2	29.6	29.1	29.5	29.7	29.8	29.3	29.8	29.9	30.1	31.1
27/01/2014	19:00:00	27.3	27.3	27.4	27.3	28.5	28.8	29.2	29.5	29.1	29.6	29.7	29.9	29.3	29.9	29.9	30.2	30.8
27/01/2014	19:10:00	26.3	27.2	26.8	26.9	28.2	28.4	29.1	29.1	28.8	29.3	29.4	29.6	29.1	29.6	29.6	29.9	30.4
27/01/2014	19:20:00	27.2	27.9	27.7	27.6	28.6	28.9	29.0	29.1	29.0	29.3	29.4	29.6	29.2	29.6	29.5	29.9	30.3
27/01/2014	19:30:00	27.1	27.9	27.4	27.5	28.7	28.9	29.2	29.3	29.2	29.6	29.5	29.7	29.5	30.0	29.7	30.0	30.2
27/01/2014	19:40:00	27.1	27.7	27.6	27.7	28.6	28.8	29.2	29.7	29.2	29.6	29.6	29.8	29.5	29.9	29.8	30.1	30.2
27/01/2014	19:50:00	26.5	27.4	27.2	27.2	28.4	28.7	29.5	29.5	29.0	29.4	29.5	29.7	29.3	29.8	29.7	29.9	30.6
27/01/2014	20:00:00	26.1	26.9	26.6	26.8	27.9	28.4	28.8	29.2	28.8	29.2	29.2	29.5	29.0	29.5	29.4	29.7	30.5
27/01/2014	20:10:00	26.4	27.3	27.1	27.2	28.1	28.5	28.7	29.0	28.7	29.1	29.2	29.3	28.9	29.4	29.3	29.6	30.0
27/01/2014	20:20:00	26.7	27.4	27.3	27.3	28.3	28.6	28.5	28.8	29.1	29.0	29.3	29.0	29.4	29.2	29.6	29.8	
27/01/2014	20:30:00	27.0	27.7	27.6	27.6	28.4	28.8	29.0	29.1	28.9	29.2	29.3	29.3	29.1	29.5	29.5	29.7	29.6
27/01/2014	20:40:00	26.6	27.3	27.2	27.2	28.1	28.4	28.9	28.7	28.8	29.0	29.0	29.1	29.0	29.2	29.2	29.4	29.8
27/01/2014	20:50:00	26.8	27.5	27.3	27.4	28.2	28.4	28.5	28.6	28.7	28.9	28.9	29.0	28.9	29.1	29.0	29.3	29.4
27/01/2014	21:00:00	26.6	27.3	27.4	27.3	28.1	28.3	28.5	28.6	28.5	28.7	28.8	28.9	28.7	28.9	29.0	29.2	29.8
27/01/2014	21:10:00	26.5	27.2	27.0	27.1	28.0	28.3	28.3	28.5	28.6	28.9	28.9	28.9	29.1	29.1	29.1	29.2	29.1
27/01/2014	21:20:00	26.6	27.4	27.3	27.3	28.0	28.3	28.4	28.5	28.5	28.7	28.7	28.8	28.7	28.9	28.8	29.0	29.4
27/01/2014	21:30:00	26.4	27.2	27.1	27.1	27.9	28.1	28.2	28.6	28.3	28.6	28.7	28.7	28.5	28.8	28.8	29.0	29.1
27/01/2014	21:40:00	26.0	26.5	26.4	26.4	27.5	27.8	27.9	28.1	28.1	28.5	28.6	28.6	28.3	28.7	28.7	28.9	29.4
27/01/2014	21:50:00	25.9	26.2	26.1	26.2	27.1	27.7	27.8	28.0	27.7	28.1	28.2	28.3	28.0	28.5	28.3	28.6	28.9
27/01/2014	22:00:00	25.0	25.5	25.3	25.5	26.7												



28/01/2014	04:30:00	21.0	21.0	20.6	20.8	22.6	23.0	23.7	23.9	23.4	23.9	24.1	24.2	23.6	24.3	24.2	24.5	25.6
28/01/2014	04:40:00	21.1	21.2	20.9	21.1	22.7	23.1	23.9	23.8	23.3	23.9	24.0	24.1	23.6	24.2	24.1	24.4	25.8
28/01/2014	04:50:00	20.8	21.0	20.8	21.1	22.4	23.1	23.6	23.5	23.2	23.8	23.9	24.0	23.4	24.1	24.0	24.4	25.4
28/01/2014	05:00:00	21.0	21.3	21.0	21.3	22.5	23.3	23.6	23.9	23.2	23.9	23.9	24.1	23.5	24.1	24.1	24.3	25.4
28/01/2014	05:10:00	21.2	21.1	20.4	20.7	22.5	23.3	23.7	23.7	23.3	23.9	23.8	24.0	23.5	24.1	24.0	24.2	25.4
28/01/2014	05:20:00	21.0	21.0	20.5	20.5	22.5	23.0	23.5	23.7	23.2	23.8	23.9	23.9	23.4	24.1	24.0	24.2	25.3
28/01/2014	05:30:00	20.9	21.0	20.6	20.7	22.3	23.0	23.6	23.6	23.1	23.7	23.8	23.9	23.3	24.0	24.0	24.2	25.3
28/01/2014	05:40:00	20.5	20.7	20.4	20.8	22.3	22.7	23.1	23.7	23.0	23.6	23.6	23.8	23.2	23.9	23.8	24.1	25.1
28/01/2014	05:50:00	20.3	20.5	20.2	20.5	22.0	22.7	23.1	23.8	22.8	23.5	23.5	23.7	23.1	23.8	23.7	23.9	25.2
28/01/2014	06:00:00	20.5	20.8	20.5	20.7	22.2	22.8	23.2	23.4	22.9	23.5	23.5	23.6	23.1	23.8	23.7	23.9	25.2
28/01/2014	06:10:00	20.4	20.5	20.2	20.8	22.1	22.8	23.4	23.8	22.9	23.6	23.6	23.8	23.1	23.8	23.8	24.1	25.1
28/01/2014	06:20:00	20.3	21.0	20.7	21.0	22.3	23.1	23.4	23.6	23.0	23.6	23.6	23.7	23.1	23.9	23.8	24.0	25.1
28/01/2014	06:30:00	19.6	20.1	19.8	20.0	21.8	22.3	23.2	23.1	22.8	23.4	23.4	23.5	23.0	23.7	23.6	23.9	24.8
28/01/2014	06:40:00	20.1	20.6	20.2	20.4	22.1	22.6	22.9	23.3	22.7	23.4	23.4	23.4	22.9	23.6	23.5	23.8	24.9
28/01/2014	06:50:00	19.7	20.3	20.2	20.5	22.0	22.4	23.2	23.2	22.5	23.2	23.3	23.4	22.8	23.5	23.5	23.8	25.0
28/01/2014	07:00:00	21.0	21.8	21.6	21.8	22.8	23.3	23.5	23.9	23.1	23.7	23.7	23.8	23.3	23.9	23.9	24.1	24.9
28/01/2014	07:10:00	21.7	22.6	22.3	22.4	23.2	23.6	23.8	23.9	23.5	24.0	24.0	24.1	23.7	24.2	24.1	24.4	25.1
28/01/2014	07:20:00	21.7	22.4	22.0	22.1	23.2	23.5	23.9	23.9	23.5	24.0	24.0	24.1	23.7	24.3	24.1	24.3	24.9
28/01/2014	07:30:00	22.2	22.8	22.5	22.6	23.5	23.9	24.1	24.1	23.8	24.2	24.1	24.2	23.9	24.4	24.3	24.4	24.9
28/01/2014	07:40:00	22.9	23.7	23.6	23.7	24.0	24.3	24.5	24.6	24.2	24.5	24.5	24.5	24.3	24.6	24.6	24.8	25.1
28/01/2014	07:50:00	23.4	24.1	23.9	23.9	24.4	24.6	24.6	24.7	24.5	24.7	24.6	24.7	24.7	24.9	24.8	24.9	25.0
28/01/2014	08:00:00	24.5	24.7	24.5	24.6	24.8	24.9	24.9	24.9	25.0	24.9	24.9	25.0	25.2	25.1	25.1	25.1	25.1
28/01/2014	08:10:00	24.6	25.0	25.0	25.0	25.1	25.2	25.2	25.2	25.1	25.2	25.2	25.2	25.3	25.4	25.4	25.4	25.4
28/01/2014	08:20:00	30.5	30.9	31.5	31.5	29.8	28.9	27.9	27.0	28.3	27.5	26.8	26.4	28.3	27.6	26.9	26.3	25.7
28/01/2014	08:30:00	32.6	33.2	34.0	34.7	31.2	30.0	29.2	28.4	30.0	28.9	28.2	28.0	30.0	29.0	28.4	28.0	26.0
28/01/2014	08:40:00	33.8	34.4	35.3	35.3	31.9	30.6	30.0	29.0	30.8	29.6	29.0	29.0	30.9	29.8	29.3	29.0	26.5
28/01/2014	08:50:00	36.7	37.9	38.6	39.8	34.7	32.8	31.1	29.9	32.4	30.9	30.1	29.9	32.4	30.9	30.4	30.0	26.5
28/01/2014	09:00:00	38.4	39.6	40.8	41.6	35.5	33.3	32.0	30.9	33.4	31.7	30.7	30.4	33.5	31.7	30.9	30.6	27.1
28/01/2014	09:10:00	38.8	39.9	40.5	39.6	35.8	34.0	30.0	29.2	34.6	32.8	29.9	29.3	34.6	32.8	30.3	29.7	27.1
28/01/2014	09:20:00	45.8	43.5	44.3	44.0	39.6	32.7	29.7	28.6	29.0	28.5	28.3	28.3	29.3	29.0	28.7	28.8	28.0
28/01/2014	09:30:00	44.9	42.0	42.2	41.9	40.6	33.6	31.8	30.6	29.3	28.8	28.7	28.9	29.6	29.2	29.1	29.4	28.4
28/01/2014	09:40:00	48.3	45.0	45.0	44.3	42.0	31.4	30.6	29.1	29.5	28.8	28.9	28.9	30.0	29.6	29.4	29.4	28.1
28/01/2014	09:50:00	51.1	47.2	46.3	45.7	43.4	31.3	30.4	31.0	29.9	29.2	29.2	29.2	30.4	29.9	29.8	29.6	28.1
28/01/2014	10:00:00	51.5	47.2	46.7	46.4	44.4	33.9	32.7	30.2	30.6	29.8	29.9	29.6	31.1	30.6	30.4	30.3	29.5
28/01/2014	10:10:00	56.6	53.2	52.0	51.1	49.1	37.7	33.0	32.3	30.9	30.3	30.3	30.1	31.5	30.9	30.8	30.8	29.3
28/01/2014	10:20:00	55.9	49.9	52.2	51.5	47.9	35.3	33.8	31.7	31.2	30.2	30.3	30.3	31.7	31.0	30.8	30.9	29.9
28/01/2014	10:30:00	53.7	48.5	49.2	49.3	46.4	35.5	31.9	32.4	31.4	30.6	30.6	30.5	31.8	31.3	31.2	31.2	30.8
28/01/2014	10:40:00	53.3	46.4	48.8	48.2	43.5	34.9	32.9	30.9	31.4	30.7	30.8	30.6	32.0	31.4	31.3	31.4	30.3
28/01/2014	10:50:00	59.8	54.3	54.1	52.8	47.0	33.0	31.0	30.9	31.9	31.0	31.2	31.1	32.6	32.2	32.0	31.8	30.3
28/01/2014	11:00:00	57.3	51.7	53.1	52.7	46.3	32.9	30.1	30.5	31.9	31.2	31.3	31.0	32.4	32.1	31.7	31.9	29.4
28/01/2014	11:10:00	56.8	50.6	50.1	50.2	45.5	36.6	33.1	31.8	32.4	31.6	31.7	31.7	33.2	32.6	32.4	32.4	30.8
28/01/2014	11:20:00	61.8	55.7	57.9	57.8	50.7	38.4	32.8	34.7	32.5	31.8	31.7	31.7	33.4	32.7	32.5	32.6	32.0
28/01/2014	11:30:00	62.5	54.6	53.5	53.9	52.6	36.5	34.2	32.3	32.7	31.7	31.9	31.7	33.6	33.0	32.6	32.8	30.8
28/01/2014	11:40:00	63.9	58.6	58.2	57.3	52.9	40.0	36.5	34.7	33.1	32.2	32.2	32.2	33.7	33.1	32.9	33.0	31.0
28/01/2014	11:50:00	61.1	53.5	55.0	54.4	48.2	36.2	34.0	33.6	33.3	32.2	32.3	32.2	34.0	33.4	33.0	32.8	32.7
28/01/2014	12:00:00	61.5	54.0	54.4	54.4	47.0	33.1	31.8	31.4	32.9	31.9	31.8	31.8	33.7	33.3	32.7	32.8	31.6
28/01/2014	12:10:00	63.3	54.7	55.6	54.7	50.3	38.9	36.7	32.9	33.6	32.6	32.7	32.5	34.3	33.9	33.4	33.3	33.2
28/01/2014	12:20:00	66.0	58.9	61.3	58.8	54.4	39.0	37.6	35.1	34.0	33.0	32.9	32.8	34.7	34.2	33.7	33.7	33.1
28/01/2014	12:30:00	67.5	61.5	61.0	59.4	57.9	37.8	33.5	33.4	34.8	33.7	33.5	32.9	35.3	34.7	34.5	34.1	32.0
28/01/2014	12:40:00	62.3	55.4	55.8	53.8	55.5	38.6	35.3	34.9	34.5	33.9	33.6	33.2	35.6	35.0	34.4	34.1	32.7
28/01/2014	12:50:00	65.5	59.6	59.5	59.5	55.3	37.7	36.7	35.3	34.2	33.3	33.0	32.9	35.1	34.5	33.8	33.6	32.6
28/01/2014	13:00:00	66.5	60.4	60.7	58.1	56.7	39.8	35.4	35.4	34.5	33.7	33.5	33.4	35.5	35.0	34.4	34.2	32.4
28/01/2014	13:10:00	67.5	61.0	63.3	62.3	57.0	39.2	41.1	37.9	35.1	33.8	34.0	33.9	36.0	35.4	34.9	34.9	34.5
28/01/2014	13:20:00	67.9	61.4	59.7	58.4	57.7	40.5	35.8	33.9	34.7	33.7	33.8	33.7	35.6	35.2	34.8	34.7	35.4
28/01/2014	13:30:00	66.6	60.7	61.2	59.5	57.7	42.5	37.3	35.9	35.3	34.3	34.3	34.1	36.4	35.7	35.2	35.0	34.1
28/01/2014	13:40:00	69.4	63.8	60.6	60.6	58.1	39.0	34.9	34.9	35.2	34.2	34.3	33.8	35.9	35.7	35.2	34.9	34.4
28/01/2014	13:50:00	67.8	62.0	62.9	62.0	59.2	40.4	37.1	35.4	35.7	34.3	34.3	34.0	36.3	35.6	35.2	35.1	34.3
28/01/2014	14:00:00	67.4	61.5	62.7	62.6	57.0	42.0	40.0	36.9	35.0	33.8	33.8	34.0	35.7	35.1	34.7	35.0	34.3
28/01/2014	14:10:00	62.7	58.2	57.6	54.9	55.5	39.5	36.0	36.1	35.6	34.7	34.4	34.6	36.6	36.1	35.4	35.5	33.9
28/01/2014	14:20:00	64.0	58.4	58.0	57.3	51.9	37.1	34.7	36.5	35.2	34.6	34.8	34.8	36.1	35.8	35.5	35.6	34.3
28/01/2014	14:30:00	63.9	56.6	58.6	57.6	51.5	38.2	36.0	35.5	35.9	34.9	35.0	34.8	36.8	36.2	35.7	35.6	36.3
28/01/2014	14:40:00	61.8	54.5	53.9	53.2	50.6	38.8	34.1	36.1	35.7	34.6	34.6	34.7	36.7	36.0	35.4	35.4	34.1
28/01/2014	14:50:00	61.4	57.6	57.6	57.2	53.7	43.0	39.9	37.4	35.7	35.0	35.1	35.1	36.6	36.0	36.0	36.1	33.4
28/01/2014	15:00:00	59.2	54.3	51.3	50.5	51.2	37.7	37.6	36.4	36.0	34.7	34.8	34.6	36.9	36.0	35.5	35.2	34.1
28/01/2014	15:10:00	58.2	51.6	51.7	51.0	52.5	40.0	38.2	36.6	35.9	35.1	35.1	35.0	36.5	36.1	35.9	35.8	34.1
28/01/2014	15:20:00	53.9	49.5	51.0	49.3	46.6	39.3	35.1	36.7	35.2	34.5	34.8	35.0	35.8	35.7	35.5	35.7	34.6
28/01/2014	15:30:00	52.5	50.7	49.9	48.4	4												

28/01/2014	22:00:00	23.7	24.3	23.4	24.0	25.4	25.9	26.4	26.5	26.2	26.7	26.7	26.9	26.4	27.0	26.9	27.2	28.1
28/01/2014	22:10:00	23.2	24.0	23.2	23.9	25.0	25.8	25.9	26.3	26.0	26.4	26.4	26.6	26.2	26.7	26.6	26.9	27.7
28/01/2014	22:20:00	23.3	23.8	23.0	23.8	25.1	25.8	26.1	26.3	26.0	26.5	26.5	26.5	26.2	26.8	26.7	26.9	27.6
28/01/2014	22:30:00	23.6	23.8	22.9	23.7	25.0	25.5	26.1	26.4	25.9	26.3	26.4	26.6	26.1	26.7	26.6	26.9	27.7
28/01/2014	22:40:00	23.6	23.8	22.9	23.5	25.0	25.5	26.4	26.2	25.8	26.3	26.3	26.5	26.0	26.6	26.5	26.8	27.8
28/01/2014	22:50:00	23.4	23.4	22.5	23.0	24.7	25.3	25.9	26.0	25.6	26.2	26.2	26.3	25.9	26.5	26.3	26.6	27.5
28/01/2014	23:00:00	23.1	23.1	22.4	23.1	24.6	25.4	25.9	26.1	25.5	26.1	26.1	26.2	25.8	26.4	26.3	26.5	27.6
28/01/2014	23:10:00	23.2	23.4	22.6	23.3	24.6	25.2	25.8	26.0	25.5	26.1	26.2	26.3	25.8	26.5	26.5	26.7	27.5
28/01/2014	23:20:00	23.1	23.2	22.4	23.3	24.6	25.4	25.7	26.3	25.5	26.1	26.1	26.3	25.7	26.4	26.3	26.6	27.5
28/01/2014	23:30:00	22.6	23.1	22.2	23.2	24.4	24.8	25.5	25.9	25.4	25.9	26.0	26.2	25.6	26.2	26.1	26.5	27.4
28/01/2014	23:40:00	22.8	22.9	22.2	23.0	24.3	25.0	25.6	25.8	25.3	25.8	25.9	26.2	25.5	26.2	26.1	26.4	27.3
28/01/2014	23:50:00	22.9	23.3	22.5	23.2	24.4	25.1	25.7	26.0	25.3	25.9	26.0	26.2	25.6	26.3	26.2	26.5	27.7
28/01/2014	00:00:00	23.1	23.4	22.4	23.4	24.4	25.2	25.9	26.1	25.3	25.9	26.0	26.2	25.5	26.2	26.3	26.5	27.6
29/01/2014	00:10:00	23.1	23.3	22.3	23.0	24.6	25.1	25.6	25.7	25.4	25.9	25.9	26.1	25.6	26.2	26.2	26.4	27.2
29/01/2014	00:20:00	22.8	22.7	21.9	22.4	24.3	24.7	25.5	25.4	25.2	25.6	25.8	25.9	25.5	26.0	26.0	26.2	27.4
29/01/2014	00:30:00	23.2	23.3	22.4	22.9	24.5	24.8	25.4	25.5	25.4	25.7	25.8	25.9	25.5	26.0	25.9	26.2	27.1
29/01/2014	00:40:00	23.1	23.5	23.1	23.2	24.3	25.1	25.7	25.7	25.3	25.7	25.8	26.0	25.5	26.0	26.0	26.2	27.1
29/01/2014	00:50:00	22.9	22.7	22.3	22.5	24.3	24.6	25.4	25.4	25.2	25.6	25.7	25.8	25.4	25.9	25.9	26.1	26.9
29/01/2014	01:00:00	23.1	23.2	23.0	23.0	24.3	24.9	25.7	25.7	25.0	25.5	25.6	25.7	25.2	25.7	25.7	26.0	27.1
29/01/2014	01:10:00	22.7	22.9	22.5	22.5	24.1	24.6	25.4	25.3	25.1	25.5	25.5	25.7	25.2	25.8	25.7	25.9	26.9
29/01/2014	01:20:00	23.0	23.0	22.8	23.0	24.3	24.8	25.5	25.6	25.1	25.6	25.6	25.7	25.3	25.9	25.8	26.0	26.8
29/01/2014	01:30:00	23.6	24.0	23.7	23.6	24.7	25.3	25.8	25.8	25.2	25.7	25.8	25.9	25.4	26.0	26.0	26.2	27.1
29/01/2014	01:40:00	22.9	23.1	22.8	22.8	24.1	24.8	25.4	25.2	25.0	25.5	25.6	25.7	25.3	25.8	25.8	26.0	26.6
29/01/2014	01:50:00	22.9	22.8	22.4	22.7	24.2	24.8	25.3	25.5	24.9	25.4	25.5	25.6	25.3	25.7	25.7	25.9	26.8
29/01/2014	02:00:00	22.7	22.7	22.5	22.5	23.9	24.5	25.0	25.1	24.7	25.2	25.2	25.4	25.0	25.5	25.4	25.6	26.5
29/01/2014	02:10:00	22.4	22.4	22.2	22.3	23.7	24.1	24.7	25.0	24.6	25.0	25.1	25.2	24.9	25.3	25.2	25.4	26.4
29/01/2014	02:20:00	22.3	22.4	22.1	22.0	23.6	24.0	24.8	24.6	24.5	24.8	25.0	25.2	24.7	25.1	25.2	25.5	26.2
29/01/2014	02:30:00	22.9	23.0	22.7	22.8	24.0	24.4	24.9	25.0	24.7	25.1	25.1	25.2	24.9	25.3	25.3	25.5	26.2
29/01/2014	02:40:00	22.8	22.9	22.7	22.8	23.9	24.3	24.9	25.1	24.8	25.1	25.2	25.4	25.0	25.4	25.4	25.5	26.2
29/01/2014	02:50:00	22.6	22.8	22.3	22.4	23.9	24.3	24.5	24.8	24.6	25.0	25.0	25.1	24.9	25.3	25.2	25.4	26.1
29/01/2014	03:00:00	22.5	22.6	22.2	22.3	23.8	24.4	25.0	24.6	24.5	24.9	24.9	25.0	24.8	25.2	25.1	25.3	26.1
29/01/2014	03:10:00	22.7	22.8	22.6	22.6	23.8	24.2	24.5	24.7	24.5	24.9	25.0	25.0	24.8	25.2	25.1	25.2	25.9
29/01/2014	03:20:00	22.5	22.6	22.2	22.4	23.6	23.9	24.4	24.4	24.3	24.7	24.8	24.9	24.6	25.0	24.9	25.1	25.8
29/01/2014	03:30:00	22.1	22.2	21.9	22.0	23.3	23.9	24.4	24.5	24.1	24.5	24.6	24.7	24.4	24.8	24.8	24.9	25.7
29/01/2014	03:40:00	22.3	22.4	22.1	22.3	23.4	23.8	24.2	24.4	24.1	24.5	24.5	24.6	24.4	24.8	24.7	24.9	25.6
29/01/2014	03:50:00	22.2	22.4	21.9	22.1	23.5	23.9	24.4	24.4	24.2	24.4	24.5	24.6	24.4	24.8	24.7	24.8	25.5
29/01/2014	04:00:00	22.2	22.3	22.0	22.1	23.4	23.9	24.2	24.5	24.1	24.4	24.5	24.6	24.3	24.7	24.7	24.8	25.5
29/01/2014	04:10:00	22.2	22.3	22.1	22.1	23.4	23.7	24.3	24.3	24.1	24.4	24.5	24.5	24.3	24.7	24.7	24.8	25.6
29/01/2014	04:20:00	21.9	22.0	21.9	22.0	23.1	23.5	24.2	24.2	23.9	24.2	24.3	24.5	24.1	24.6	24.5	24.7	25.6
29/01/2014	04:30:00	21.8	22.0	21.7	21.8	23.0	23.5	23.9	24.2	23.8	24.2	24.2	24.4	24.0	24.5	24.4	24.6	25.3
29/01/2014	04:40:00	21.7	21.8	21.7	21.8	22.9	23.4	23.9	23.9	23.7	24.0	24.1	24.2	23.9	24.3	24.3	24.5	25.2
29/01/2014	04:50:00	21.8	21.9	21.7	21.8	22.9	23.4	23.7	24.1	23.7	24.0	24.1	24.1	23.9	24.4	24.3	24.4	25.3
29/01/2014	05:00:00	22.0	22.2	22.0	22.1	23.1	23.5	23.8	23.9	23.8	24.1	24.2	24.3	24.0	24.4	24.3	24.4	25.3
29/01/2014	05:10:00	22.0	22.2	21.9	21.8	23.1	23.5	24.0	24.0	23.8	24.2	24.1	24.2	24.0	24.4	24.3	24.5	25.2
29/01/2014	05:20:00	21.8	22.1	21.8	21.9	22.9	23.5	23.9	24.0	23.6	24.1	24.1	24.2	23.8	24.4	24.2	24.4	25.1
29/01/2014	05:30:00	21.7	21.9	21.8	21.8	22.8	23.3	24.0	23.9	23.5	24.0	24.1	24.2	23.7	24.3	24.3	24.4	25.2
29/01/2014	05:40:00	21.8	22.0	21.9	21.9	22.8	23.4	23.8	24.1	23.5	23.9	24.1	24.2	23.6	24.3	24.3	24.4	25.2
29/01/2014	05:50:00	21.9	22.1	21.8	21.8	23.0	23.4	23.8	24.0	23.5	24.0	24.0	24.1	23.7	24.3	24.2	24.4	25.0
29/01/2014	06:00:00	21.9	22.0	21.7	21.8	22.9	23.3	23.5	23.7	23.5	24.0	23.9	24.0	23.7	24.2	24.1	24.3	25.0
29/01/2014	06:10:00	22.0	22.2	22.0	22.0	22.9	23.5	23.8	23.8	23.4	24.0	23.9	24.0	23.6	24.2	24.1	24.3	25.0
29/01/2014	06:20:00	21.6	21.8	21.8	21.8	22.6	23.3	24.0	24.0	23.3	23.8	23.9	24.0	23.5	24.1	24.1	24.3	25.0
29/01/2014	06:30:00	21.8	21.9	21.9	21.8	22.8	23.2	23.8	23.8	23.3	23.8	23.9	24.0	23.5	24.1	24.1	24.2	25.2
29/01/2014	06:40:00	21.7	22.1	21.6	21.6	22.7	23.2	23.7	23.6	23.3	23.7	23.7	23.8	23.4	24.0	23.9	24.0	24.8
29/01/2014	06:50:00	21.7	22.0	21.8	21.9	22.7	23.3	23.5	23.8	23.2	23.7	23.8	24.0	23.4	24.0	24.0	24.2	25.1
29/01/2014	07:00:00	21.9	22.1	21.9	21.9	22.9	23.5	23.7	23.9	23.4	23.8	23.8	23.9	23.6	24.1	24.1	24.2	24.9
29/01/2014	07:10:00	22.1	22.4	22.2	22.1	23.0	23.6	24.1	23.9	23.5	24.0	24.0	24.1	23.7	24.2	24.2	24.4	25.0
29/01/2014	07:20:00	22.5	22.7	22.6	22.7	23.3	23.8	24.2	24.2	23.7	24.2	24.2	24.3	23.9	24.4	24.4	24.6	25.3
29/01/2014	07:30:00	22.8	23.0	22.9	22.9	23.6	24.0	24.4	24.4	24.0	24.4	24.4	24.5	24.1	24.7	24.6	24.7	25.3
29/01/2014	07:40:00	23.1	23.4	23.2	23.2	24.0	24.4	24.4	24.6	24.3	24.6	24.6	24.6	24.5	24.9	24.8	24.9	25.2
29/01/2014	07:50:00	23.6	23.9	23.8	23.8	24.5	24.8	24.9	24.9	24.8	25.0	25.0	25.1	25.0	25.2	25.2	25.2	25.6
29/01/2014	08:00:00	24.2	24.3	24.2	24.3	25.2	25.3	25.3	25.3	25.3	25.4	25.3	25.3	25.5	25.7	25.6	25.6	25.7
29/01/2014	08:10:00	26.3	25.3	24.8	24.9	26.2	26.1	25.8	25.7	26.1	26.0	25.7	25.6	26.2	26.2	25.9	25.8	25.7
29/01/2014	08:20:00	31.3	31.7	32.1	31.2	30.3	29.0	27.4	27.0	28.5	27.8	27.2	26.9	28.6	28.0	27.4	27.0	26.3
29/01/2014	08:30:00	34.3	35.0	35.9	36.3	32.8	31.4	30.0	29.2	31.0	29.9	29.2	28.7	31.1	30.0	29.4	28.9	27.0
29/01/2014	08:40:00	36.5	37.0	38.1	38.9	34.6	32.1	32.1	30.4	32.4	31.1	30.4	29.8	32.5	31.1	30.6	30.0	27.2
29/01/2014	08:50:00	38.9	40.1	41.8	42.4	36.4	33.8	33.5	32.5	34.1	32.5	31.6	31.2	34.2	32.5	31.9	31.2	27.3
29/01/2014	09:00:00	40.4	41.5	43.5	43.4	3												

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ดนู กตัญญูตานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชา เทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม ในปีการศึกษา 2556



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**