

สมรรถนะด้านความร้อนของอาคารที่ติดตั้งช่องระบายอากาศ
ใต้หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูงและการใช้ปล่องระบายความร้อน




นางสาวพิมพ์พรรณ จิโรจน์วงศ์

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 ROOF VENTILATED CAVITY, NOCTURNAL RADIATION,
AND STACK VENTILATION



Miss Pimpun Jirojwong

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

สมรรถนะด้านความร้อนของอาคารที่ติดตั้งช่องระบาย
อากาศ ใต้หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูงและการใช้ปล่อง
ระบายความร้อน

โดย

นางสาวพิมพ์พรรณ จิโรจน์วงศ์

สาขาวิชา

สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ)

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

พิมพ์พรรณ จิโรจน์วงศ์ : สมรรถนะด้านความร้อนของอาคารที่ติดตั้งช่องระบายอากาศ ใต้หลังคาแผ่รังสีความร้อนสูงและการใช้ปล่องระบายความร้อน. (THERMAL PERFORMANCE OF ROOF VENTILATED CAVITY, NOCTURNAL RADIATION, AND STACK VENTILATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อรรถจัน เศรษฐบุตร, 106 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จากความเย็นที่ได้จากการแผ่รังสีความร้อนของหลังคาในเวลากลางคืนโดยวิธีธรรมชาติ และความเป็นไปได้ในการระบายอากาศออกจากหลังคาด้วยหลักการของปล่องลมแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน โดยการนำเสนอรูปแบบหลังคาระบายอากาศตามหลักการข้างต้น ใช้วัสดุหลังคาเป็นเหล็กลอนรีดสีเงิน สีขาว และสีดำ ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากกล่องทดลองภายใต้สภาวะท้องฟ้าจริง และนำข้อมูลอุณหภูมิมาทำการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อดูสมรรถนะด้านอุณหภูมิเมื่อนำไปใช้กับอาคารขนาดจริงที่มีรูปแบบช่องเปิดแตกต่างกัน

การศึกษาด้วยกล่องทดลอง พบว่าหลังคาระบายอากาศมีสมรรถนะด้านอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาปกติที่ไม่มีการติดตั้งทั้งกลางวันและกลางคืน หลังคาเหล็กลอนรีดสีดำ สามารถทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิผิวหลังคาจากบรรยากาศมากที่สุด ทำให้อุณหภูมิภายในกล่องทดลองหลังคาสีดำลดต่ำสุดในเวลากลางคืน แต่ในเวลากลางวันอุณหภูมิภายในกล่องทดลองหลังคาสีขาวมีค่าต่ำที่สุดซึ่งไม่ใช่สีดำ แสดงว่าหลังคาแผ่รังสีความร้อนสูงนี้มีความเป็นไปได้ในเวลากลางคืนแต่กลับไม่ให้ผลที่ดีในเวลากลางวัน ดังนั้น จึงเป็นประโยชน์กับอาคารประเภทพักอาศัยที่มีการใช้งานเวลากลางคืน

การศึกษาด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ พบว่าการที่กลุ่มอาคารไม่มีการเปิดช่องเปิดภายนอกเลยจะทำให้ได้ประโยชน์จากความเย็นที่เกิดจากผิวหลังคาในเวลากลางคืนมากที่สุด โดยขึ้นอยู่กับสัดส่วนความกว้างต่อความสูงของที่ว่างระหว่างอาคาร เมื่อความกว้างต่อความสูงของที่ว่างมีค่าน้อยจะทำให้เนื้อที่ใช้สอยภายในมีอุณหภูมิต่ำ และจะสูงขึ้นเรื่อยๆเมื่อมีระยะห่างมากขึ้น แต่หากอาคารมีช่องเปิดจะทำให้เปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ของลมทำให้อากาศเย็นไหลลงมาได้น้อยลง และหากอาคารมีการเปิดช่องเปิดมากจะไม่ได้รับประโยชน์จากความเย็นที่ผิวหลังคาเลย ส่วนในเวลากลางวันการเปิดช่องเปิดที่ระดับบนสุดไม่ทำให้อาคารได้ประโยชน์จากแรงลอยตัวของอากาศร้อน เนื่องจากมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของอากาศน้อยกว่ากระแสลมภายนอก รูปแบบอาคารที่มีสมรรถภาพด้านอุณหภูมิต่ำที่สุดในเวลากลางวันจึงเป็นอาคารที่มีช่องเปิดมากเพื่อให้เกิดการระบายอากาศเอาความร้อนออกไป

จึงมีการเสนอแนวทางการออกแบบเพื่อให้กลุ่มอาคารใช้ประโยชน์จากความเย็นที่ผิวหลังคาในเวลากลางคืนได้มากขึ้น โดยเสนอการออกแบบอาคารที่นำมาล้อมที่ว่างให้มีความสูงต่างกัน และการใส่แผงกันลม จะช่วยให้กลุ่มอาคารใช้ประโยชน์จากอากาศเย็นเหนือหลังคาได้มากขึ้น รวมทั้งการประยุกต์ใช้กับอาคารเดี่ยวๆ โดยติดแผงกันลมร่วมกับการเปิดช่องนำอากาศเข้าที่ผนังในระดับสูง

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5673336925 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: NOCTURNAL RADIATION / STACK VENTILATION / ROOF THERMAL PERFORMANCE

PIMPUN JIROJWONG: THERMAL PERFORMANCE OF ROOF VENTILATED CAVITY, NOCTURNAL RADIATION, AND STACK VENTILATION. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 106 pp.

The objective of this study is to develop guidelines to take advantage of nocturnal roof radiation in the night time, and to verify the possibility of using a solar chimney on the roof in the daytime. Based on those ideas, the experimental boxes with different colors – zinc, white, and black – were proposed and tested in the actual environment. All the boxes were analyzed by comparing the measured temperatures. Surface temperatures were used in a computational fluid dynamic simulation to investigate the thermal performance of the full-scale model with different openings.

The experimental part shows that the thermal performance of the proposed roofs are better than metal roofs with no insulation in both daytime and night time. The surface temperature of black metal roofs appeared to have a maximum difference in ambient temperatures resulting in a minimum indoor temperature in the night time. On the other hand, the minimum indoor temperature in the daytime is from the box with the white roof. Since the proposed idea of a black roof is beneficial only in the night time, it is suitable for residential buildings which are mainly operated in the night time.

In the simulation part, building blocks with no opening can get the most benefits from the cool roof in night time. It depends on the ratio of the width to height of the linked space, with the smaller ratio, the lower indoor temperature. Once the building block has an opening, cold air rarely drops due to the changing of the wind flow path. No advantages occur when the building block has many openings. In the daytime, the stack effect cannot be seen as a result of outer wind. Thus, the most effective solution in the daytime is to maximize the opening to allow more ventilation throughout the building block and have more heat convection to the outside air.

Design solutions for the building block in the night time were proposed as having different height buildings enclosing the courtyard or adding the wind protection panels on the outer side to prevent the loss of cooling. As applicable to one roof, the wind protection panel was added together with making an air inlet at the top of the wall.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัฏ เศรษฐบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้สั่งสอนให้วิชาความรู้ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัย รวมทั้งสนับสนุนด้านอุปกรณ์เครื่องมือทำการทดลอง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ ผู้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับกล่อง ทดลอง จัดหาสถานที่ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิก รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน และ ดร. ณรงค์วิทย์ อารัมมิตร คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อ งานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท แมกโนเลีย ควอลิตี้ ดีเวล็อปเม้นต์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ผู้ให้ทุนสนับสนุน งานวิจัย

ขอขอบคุณ วิทยาลัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข อาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ ให้ความอนุเคราะห์สถานที่วิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆและรุ่นพี่ ในหลักสูตร 5+1 และหลักสูตรนวัตกรรมการออกแบบนิเวศน์ สถาปัตยกรรมทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและร่วมกันฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ตลอดจนการทำกล่องทดลอง และวิเคราะห์ผล จนทุกอย่างลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกๆด้าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	1
สารบัญตาราง.....	3
สารบัญแผนภูมิ.....	5
บทที่ 1 บทนำ	6
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	6
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	7
1.5 ตัวแปรที่ศึกษา.....	9
1.6 สมมติฐานการวิจัย.....	10
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
1.8 ข้อจำกัดในการวิจัย.....	10
1.9 คำจำกัดความในงานวิจัย	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
2.1 การโคจรของดวงอาทิตย์ในรอบปี.....	12
2.2 ธรรมชาติการกระจายตัวของอากาศ	13
2.3 การระบายความร้อนด้วยการแผ่รังสี.....	13
2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของผิวหลังคา.....	14
2.5 ปล่องแสงอาทิตย์ (Solar chimney)	15
2.6 หลังคาระบายความร้อนเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation).....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Roof Ventilated Cavity	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	29

3.2 รูปแบบการวิจัย.....	31
3.3 การเก็บข้อมูลด้วยกล่องทดลอง	31
3.4 การจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล	36
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	40
บทที่ 4 ผลการเก็บข้อมูลด้วยกล่องทดลองและการอภิปรายผล.....	44
4.1 ผลการเก็บข้อมูล	44
4.2 อภิปรายผลการทดลอง	50
บทที่ 5 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล	60
5.1 การตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อจำลองผล	60
5.2 ผลการจำลองสภาพโดยที่อาคารมีตำแหน่งช่องเปิดแตกต่างกัน	60
5.3 ผลการจำลองสภาพโดยที่อาคารมีระยะห่างและความสูงแตกต่างกัน	66
บทที่ 6 การเสนอแนวทางในการออกแบบ	80
6.1 การเสนอแนวทางในการออกแบบ	80
6.2 การนำอาคารที่มีความสูงแตกต่างกันมาประกอบเป็นกลุ่มอาคาร	80
6.3 การใส่แผงกันลมเพิ่มเติม	82
6.4 รูปแบบหลังคาเพื่อใช้กับอาคารเดี่ยว	83
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	84
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	84
7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป	85
รายการอ้างอิง	86
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	106

สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 2

ภาพที่ 2 - 1 ความเข้มของรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปี (Samimi Mojtaba, 1998).....	12
ภาพที่ 2 - 2 การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในเวลากลางวัน (Olgyay Victor, 1973).....	14
ภาพที่ 2 - 3 แนวคิดการทำงานของระบบ Solar chimney ในเวลากลางวัน (Mathur J., 2006)	16
ภาพที่ 2 - 4 ห้องทดลองของคักคิภัท ทมทิตชงค์ (2555).....	17
ภาพที่ 2 - 5 ห้องทดลองแบบปกติ(ซ้าย) และห้องทดลองที่มีการเจาะช่องระบายอากาศ เป็นปล่องโซล่า(ขวา) (ปรีดา จันทวงษ์ และคณะ, 2554).....	19
ภาพที่ 2 - 6 แนวความคิดที่เสนอโดย Trombe (Martin Marlo, 1989).....	20
ภาพที่ 2 - 7 การทดลองใช้ชุดท่อลูมิเนียมทาสีขาวเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีความร้อน (Bagiorgas H.S. & Mihalakakou G., 2008).....	24
ภาพที่ 2 - 8 การหมุนเวียนอากาศเพื่อใช้ nocturnal radiation ลดอุณหภูมิภายใน (Treamorn Prommajak, 2008).....	25
ภาพที่ 2 - 9 ระบบ Roof radiation trap (Givoni B., 1977).....	26
ภาพที่ 2 - 10 แนวคิดการนำประโยชน์จากการแผ่รังสีความร้อนของหลังคาไปประยุกต์ใช้ กับอาคาร (Hollick John, 2012).....	26
ภาพที่ 2 - 11 รูปตัดหลังคาระบายอากาศของ L.Susanti (2011).....	28
ภาพที่ 2 - 12 อุณหภูมิภายในเนื้อที่ที่ใส่สอยจากการทดลอง (Susanti L., 2011).....	28

บทที่ 3

ภาพที่ 3 - 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	30
ภาพที่ 3 - 2 ดาดฟ้าอาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	31
ภาพที่ 3 - 3 ผังพื้นของกล่องทดลอง (ซ้าย) กล่องควบคุม (ขวา) กล่องต้นแบบ.....	33
ภาพที่ 3 - 4 รายละเอียดส่วนประกอบของกล่องและการติดตั้งเครื่องมือ : กล่องควบคุม	33
ภาพที่ 3 - 5 รายละเอียดส่วนประกอบของกล่องและการติดตั้งเครื่องมือ : กล่องต้นแบบ	33
ภาพที่ 3 - 6 ผังการวางกล่องทดลองทั้งหมด.....	34
ภาพที่ 3 - 7 กล่องทดลองทั้งสี่กล่องก่อนปิดแผงกันลม	34
ภาพที่ 3 - 8 การติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่ผิวด้านบน ช่องว่างใต้หลังคา และภายในกล่อง.....	34
ภาพที่ 3 - 9 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดระหว่างเก็บข้อมูล	35
ภาพที่ 3 - 10 โมเดลอาคารที่ใช้ในการจำลอง CFD.....	37
ภาพที่ 3 - 11 ตัวอย่างการกำหนดขอบเขตเซลล์ในโปรแกรม HEATX	37

ภาพที่ 3 - 12 ตัวอย่างการกำหนด Parameter ของโปรแกรม HEATX	38
ภาพที่ 3 - 13 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติกรอบอาคารของโปรแกรม HEATX	39
ภาพที่ 3 - 14 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของบรรยากาศภายนอกของโปรแกรม HEATX	39
ภาพที่ 3 - 15 อุปกรณ์ HOBO U12-013.....	40
ภาพที่ 3 - 16 อุปกรณ์ 12 Channels recorder (ภาพจากเว็บไซต์ตัวแทนจำหน่าย).....	41
ภาพที่ 3 - 17 อุปกรณ์สายวัดอุณหภูมิ รุ่น GK-03 Type K (ภาพจากเว็บไซต์ตัวแทนจำหน่าย).....	41
ภาพที่ 3 - 18 อุปกรณ์ Solar Power Meter.....	42
ภาพที่ 3 - 19 การนำหัววัดอุณหภูมิจุ่มลงน้ำเย็นและน้ำร้อน	43
ภาพที่ 3 - 20 การเก็บข้อมูลภายใต้สภาวะเดียวกัน.....	43

บทที่ 4

ภาพที่ 4 - 1 แนวคิดเพื่ออธิบายการทำความเย็นในเวลากลางวัน.....	57
ภาพที่ 4 - 2 ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณอัตราการระบายอากาศ	57

บทที่ 5

ภาพที่ 5 - 1 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและไม่มีช่องเปิด	64
ภาพที่ 5 - 2 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดด้านบน	65
ภาพที่ 5 - 3 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดด้านล่าง	65
ภาพที่ 5 - 4 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดทั้งบนและล่าง	66
ภาพที่ 5 - 5 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารปิด สูง 1 ชั้น	75
ภาพที่ 5 - 6 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารปิด สูง 2 ชั้น	76
ภาพที่ 5 - 7 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารเปิด สูง 1 ชั้น	77
ภาพที่ 5 - 8 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารเปิด สูง 2 ชั้น	78
ภาพที่ 5 - 9 ลัดส่วนของความกว้างต่อความสูงและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกรณีศึกษา	79

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2

ตารางที่ 2 - 1 ค่า emissivity ตามงานวิจัยของ จอมภพ แวค์ศักดิ์ และคณะ (2542)	23
---	----

บทที่ 4

ตารางที่ 4 - 1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในวันที่ทำการทดลอง	44
ตารางที่ 4 - 2 ผลการบันทึกอุณหภูมิกล่องควบคุม	45
ตารางที่ 4 - 3 ผลการบันทึกอุณหภูมิก่อนต้นแบบหลังคาสีเงิน	45
ตารางที่ 4 - 4 ผลการบันทึกอุณหภูมิก่อนต้นแบบหลังคาสีขาว	46
ตารางที่ 4 - 5 ผลการบันทึกอุณหภูมิก่อนต้นแบบหลังคาสีดำ	46
ตารางที่ 4 - 6 อุณหภูมิในช่องใต้หลังคาเทียบกับผิวหลังคาและบรรยากาศภายนอก	53
ตารางที่ 4 - 7 อุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2556 เวลา 6:40 น.	56
ตารางที่ 4 - 8 อุณหภูมิกลางกล่อง เมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2556 เวลา 14:40 น.	56
ตารางที่ 4 - 9 อัตราการระบายอากาศ ตั้งแต่เวลา 9:00-19:00 น.	59

บทที่ 5

ตารางที่ 5 - 1 ผลการจำลองแสดงการไหลของลมผ่านกลุ่มอาคารที่มีรูปแบบช่องเปิดต่างกัน	61
ตารางที่ 5 - 2 ผลการจำลองแสดงอุณหภูมิในเวลากลางวัน	62
ตารางที่ 5 - 3 ผลการจำลองอาคารที่มีตำแหน่งช่องเปิดแตกต่างกันในเวลากลางวัน	63
ตารางที่ 5 - 4 รูปแบบอาคารที่เป็นกรณีศึกษาเรื่องสัดส่วนที่วางระหว่างอาคาร	66
ตารางที่ 5 - 5 ผลการจำลองแสดงการไหลของลมผ่านกลุ่มอาคารกรณีศึกษา	68
ตารางที่ 5 - 6 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารมีช่องเปิดภายนอก	69
ตารางที่ 5 - 7 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอก	70
ตารางที่ 5 - 8 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารมีช่องเปิดภายนอก	72
ตารางที่ 5 - 9 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอก	73

บทที่ 6

ตารางที่ 6 - 1 ผลการจำลองกลุ่มอาคารที่ประกอบจากอาคารความสูงต่างกัน.....	81
ตารางที่ 6 - 2 ผลการจำลองการใส่แผงกันลมเพิ่มเติม	82
ตารางที่ 6 - 3 ผลการจำลองรูปแบบหลังคาถ่อทดลองหลังคาปกติ	83
ตารางที่ 6 - 4 ผลการจำลองรูปแบบหลังคาถ่อทดลองหลังคาที่เสนอแนะ.....	83



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

บทที่ 2

แผนภูมิที่ 2 - 1 ความสามารถของท้องฟ้าในการรองรับการแผ่รังสีที่น้อยลง เมื่อหลังคามีน้ำปกคลุม หนามากขึ้น (Martin Marlo, 1989).....	21
แผนภูมิที่ 2 - 2 ความสามารถในการแผ่รังสีลดลงเมื่อมุมเอียงของหลังคามีค่ามากขึ้น (Martin Marlo, 1989).....	22
แผนภูมิที่ 2 - 3 ผลการทดลองหลังคาที่ใช้วัสดุมวลสารต่างกัน (Khedari J., 2000)	23
แผนภูมิที่ 2 - 4 การลดอุณหภูมิภายในห้องด้วยระบบระบายอากาศที่ทำจากขอท่อลูมิเนียม (Bagiorgas H.S. & Mihalakakou G., 2008)	27

บทที่ 4

แผนภูมิที่ 4 - 1 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 23-24 ธันวาคม 2556.....	47
แผนภูมิที่ 4 - 2 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 24-25 ธันวาคม 2556.....	48
แผนภูมิที่ 4 - 3 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 25-26 ธันวาคม 2556.....	49
แผนภูมิที่ 4 - 4 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคา ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556	50
แผนภูมิที่ 4 - 5 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคาเวลากลางคืน ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556.....	51
แผนภูมิที่ 4 - 6 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคาเวลากลางวัน ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556.....	52
แผนภูมิที่ 4 - 7 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิกกลางกล่องทดลอง ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556	54
แผนภูมิที่ 4 - 8 การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิกกลางกล่องตั้งแต่เวลา 19:00-9:00 น.	55
แผนภูมิที่ 4 - 9 การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิกกลางกล่องตั้งแต่เวลา 9:00-19:00 น.	55
แผนภูมิที่ 4 - 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศและความเข้มของรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่ เวลา 10:00-17:00 น.	58

บทที่ 5

แผนภูมิที่ 5 - 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคารกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายใน	79
--	----

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

สภาพอากาศที่รุนแรงมากขึ้นทั่วโลกในปัจจุบัน ส่งผลให้ประเทศไทยซึ่งเป็นเมืองร้อน (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541) อากาศร้อนมากยิ่งขึ้น จนทำให้ความต้องการในการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศเพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับข้อมูลที่เปิดเผยโดยการไฟฟ้านครหลวง เมื่อวันที่ 29 มีนาคม 2556 กล่าวว่า สถิติปริมาณการใช้ไฟฟ้าสูงสุดของวันที่ 28 มีนาคม 2556 เวลา 14:00 น. ได้ทำลายสถิติเป็นครั้งที่สองในรอบปี โดยที่มีสาเหตุหนึ่งมาจากสภาพอากาศที่ร้อนอบอ้าว และได้ขอให้ประชาชนช่วยกันประหยัดไฟฟ้า

การทำความเย็นให้อาคารโดยวิธีธรรมชาติ เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความน่าสนใจในการประหยัดไฟฟ้าที่ใช้กับระบบปรับอากาศ ซึ่งสามารถใช้เพื่อช่วยแก้ปัญหาข้างต้น ได้มีการศึกษาค้นคว้ามาแล้วว่าวิธีการที่มีประสิทธิภาพดี มีอยู่ 4 วิธี (Givoni B., 1994) ได้แก่ การทำความเย็นด้วยการระบายอากาศ (Ventilative Cooling) การทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiative Cooling) การทำความเย็นด้วยการระเหย (Evaporative cooling) และการทำความเย็นใต้พิภพ (Earth Coupling)

แม้การทำความเย็นด้วยการระบายอากาศ (Ventilative Cooling) จะเป็นวิธีการที่ช่วยให้ผู้ใช้อาคารยอมรับความน่าสบายของสภาพอากาศร้อนขึ้น (เฉลิมวัฒน์ ต้นตสวัสดิ์ & ดารณี จาริมิตร, 2005) แต่การระบายอากาศยังคงมีข้อจำกัดในการสร้างความแตกต่างของความกดอากาศเพื่อให้เกิดลม รวมทั้งการกำหนดทิศทางที่ตั้งเพื่อให้รับลมในสภาวะที่เมืองมีการเจริญเติบโตอย่างหนาแน่นเป็นสิ่งที่ทำได้ยากยิ่งขึ้น

การทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีความร้อน (Radiative Cooling) จึงถูกนำมาพิจารณา เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความสม่ำเสมอตามปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้กับทุกพื้นผิว ไม่มีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งและทิศทางการรับลม และไม่มีต้นทุนเพิ่มเติมในการทำความเย็นอย่างต่อเนื่อง เพราะวัสดุทุกชนิดมีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าอยู่ตลอดเวลา (Martin Marlo, 1989) การใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์นี้ จึงมีความน่าสนใจในการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำความเย็นให้กับอาคาร ทำให้ลดภาระในการใช้พลังงานลงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืนของวัสดุหลังคาสีต่างๆ
2. ศึกษาความสามารถในการเกิดการเคลื่อนตัวของอากาศจากการทำความร้อนให้อากาศในปล่องด้วยการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุหลังคา
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนของหลังคาสีต่างกัน
4. หาแนวทางที่เหมาะสมในการประยุกต์หลักการทำความเย็นด้วยวิธีการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้ามาใช้ในการออกแบบอาคาร

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาผลการออกแบบพื้นที่ช่องว่างหลังคาโดยวิเคราะห์จากผลของอุณหภูมิอากาศในตำแหน่งต่างๆ
2. มุ่งศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์สำหรับเนื้อที่ใช้สอยอาคารที่ไม่ได้ใช้เครื่องปรับอากาศ
3. เก็บข้อมูลอุณหภูมิจากกล่องทดลองที่นำไปตั้งกับท้องฟ้าจริง ภายใต้สภาพภูมิอากาศแบบร้อนชื้นในกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ช่วงเดือนธันวาคม และนำผลที่ได้มาศึกษาเพิ่มเติมจากจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เพื่อหาสมรรถนะทางด้านพลังงานของหลังคาระบายอากาศโดยใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าร่วมกับการใช้ปล่องลมแสงอาทิตย์ (Solar chimney) โดยสร้างกล่องทดลองเพื่อทดสอบกับสภาพท้องฟ้าจริง และวัดอุณหภูมิหลังคาจากกล่องทดลองมาใส่ในโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อทำการจำลองลักษณะการไหลของอากาศ

1.4.1 การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ศึกษาแนวความคิดการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน
2. ศึกษาแนวความคิดการระบายอากาศด้วยปล่องลมแสงอาทิตย์
3. ศึกษาารูปแบบอาคารที่จะนำไปประยุกต์ใช้ได้แก่ ระยะเวลาขั้นต่ำตามกฎหมาย

สำหรับอาคารพักอาศัย

1.4.2 การวิจัยเชิงทดลอง

สร้างกล่องทดลอง และนำไปตั้งเก็บข้อมูลในสภาวะท้องฟ้าจริง เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิผิวหลังคาและประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิในเนื้อที่ใช้สอยอาคาร แล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหารูปแบบการระบายอากาศ

1.4.3 การจำลองลักษณะการไหลของอากาศในโปรแกรม CFD

ศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ โดยนำอุณหภูมิผิวหลังคาที่ได้จากการตั้งกล่องทดลองในเวลากลางวันและกลางคืน มาเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและความเย็นในโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics; CFD)

1.4.4 การวิเคราะห์และประเมินผล

1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำความเย็นให้เนื้อที่ใช้สอยด้วยวิธีธรรมชาติจากการออกแบบในรูปแบบต่างๆ
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพและเสนอแนะแนวทางการออกแบบหลังคาและที่ว่างระหว่างอาคาร
3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติตามแนวทางที่เสนอ

1.5 ตัวแปรที่ศึกษา

1.5.1 ตัวแปรต้น

ตอนที่ 1 กล้องทดลอง

- ลักษณะของหลังคา: หลังคาปกติและหลังคาระบายอากาศ
- สีของหลังคา: สีเงิน สีขาว สีดำ

ตอนที่ 2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- ลักษณะการเปิดช่องว่างของอาคาร
- ส่วนสูง ระยะห่าง สัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคาร

1.5.2 ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิในอาคาร
- ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิให้ที่ว่างระหว่างอาคาร
- ประสิทธิภาพในการระบายอากาศ

1.5.3 ตัวแปรควบคุม

ตอนที่ 1 กล้องทดลอง

- ทิศทางการวางกล้องทดลอง
- ลักษณะท้องฟ้าขณะทำการทดลอง

ตอนที่ 2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- อุณหภูมิผิวของหลังคาที่ได้จากการทดลอง
- ความเร็วลมเฉลี่ยที่นำมาคำนวณ

1.6 สมมติฐานการวิจัย

1. คุณสมบัติของวัสดุในด้าน Conductivity, Absorptivity, Reflectivity, Emissivity ของวัสดุหลังคามีผลต่อประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิในเวลากลางคืนและเพิ่มการหมุนเวียนอากาศในเวลากลางวัน
2. สีของวัสดุหลังคา มีผลต่อความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน และความสามารถในการคายความร้อนสู่ปล่องแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน
3. ลักษณะการเปิดช่องเปิดอาคาร มีผลต่อสมรรถนะทางด้านอุณหภูมิทั้งกลางวันและกลางคืน
4. ระยะห่าง สัดส่วน และความสูงของที่ว่างระหว่างอาคาร มีผลต่ออุณหภูมิของเนื้อที่ที่ใช้สอยภายในและที่ว่างระหว่างอาคาร

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความเข้าใจมากยิ่งขึ้นเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนความร้อนของผิวหลังคาและท้องฟ้า
2. ได้แนวทางในการออกแบบหลังคาเพื่อให้เกิดประโยชน์ด้านสมรรถนะทางพลังงานมากยิ่งขึ้น

1.8 ข้อจำกัดในการวิจัย

การศึกษาในขั้นต้นนี้ใช้วิธีการสร้างกล่องทดลองโดยใช้แผ่นโพลีเมอร์ Polystyrene ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนในการกันรูปร่างและที่ว่างเพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ และการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ซึ่งทั้งสองวิธีไม่มีอิทธิพลของมวลสารและค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างอาคารจริง ดังนั้น การนำผลการทดลองไปใช้กับเงื่อนไขที่เป็นวัสดุจริง ยังคงต้องการการศึกษาเพิ่มเติม นอกจากนี้ ค่าความเร็วลมที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ย ซึ่งเป็นเพียงตัวแทนเท่านั้นไม่ใช่ค่าจริงที่เกิดขึ้นตลอดปี

1.9 คำจำกัดความในงานวิจัย

1.9.1 การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ คือ ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากความแตกต่างของความดันอากาศ

1.9.2 การสร้างความเย็นด้วยวิธีธรรมชาติ คือ วิธีการสร้างความเย็นโดยอาศัยกลไกทางธรรมชาติ ที่มีความเหมาะสมกับภูมิอากาศ

1.9.3 การแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้า คือ ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นกับวัสดุทุกชนิด ส่งผลให้มีช่วงเวลาที่วัสดุเย็นตัวลงกว่าบรรยากาศ สร้างความเย็นให้กับอากาศที่อยู่โดยรอบ ระบายวัสดุนั้น มีความหนาแน่นสูงขึ้นและเคลื่อนลงมาด้านล่าง

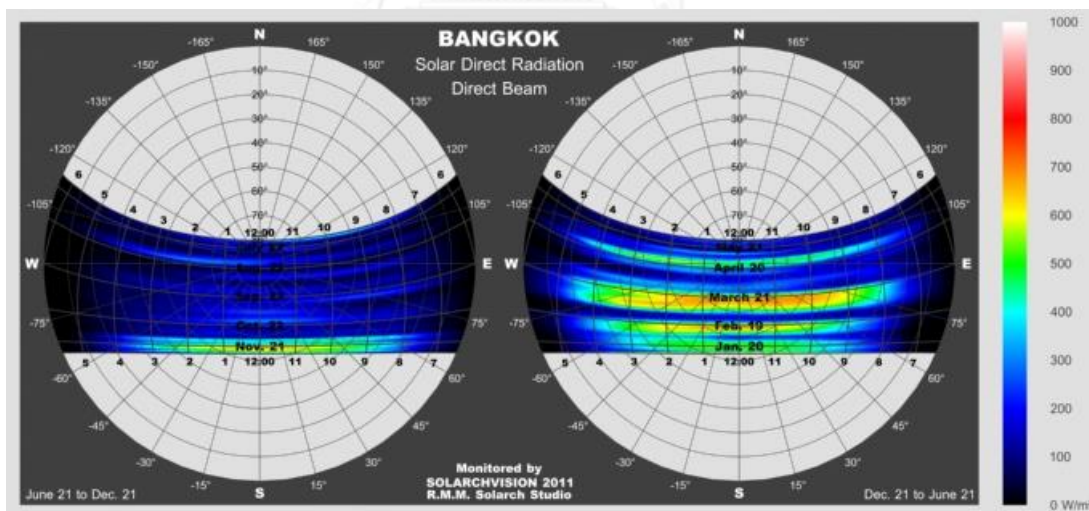
1.9.4 ปล่องลมแสงอาทิตย์ คือ วิธีการเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศ ด้วยการทำความร้อนให้อากาศในปล่องระบายอากาศ เพื่อให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นและมีความดันอากาศเป็นลบ ดึงเอาอากาศด้านล่างที่มีความหนาแน่นมากกว่า และอุณหภูมิต่ำกว่าขึ้นมาแทนที่ เรียกหลักการนี้ว่า Stack effect หรือ Buoyancy

1.9.5 โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล คือ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของของไหล เช่น อากาศ ตามสถานการณ์ต่างๆ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การโคจรของดวงอาทิตย์ในรอบปี

การที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่แกนของโลกเอียง ทำให้ดวงอาทิตย์แผ่รังสีอาทิตย์สู่ตำแหน่งต่างๆของโลก ในแต่ละเดือนในหนึ่งปีไม่เท่ากันทั้งปริมาณความเข้มของรังสีอาทิตย์และทิศทางการตกกระทบ (ธนิต จินดาวนิค และคณะ, 2543) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโลก จะมีทิศทางการตกกระทบอ้อมเหนือในช่วงเดือนมีนาคมถึงกันยายน วันที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบโลกอ้อมเหนือมากที่สุด คือวันที่ 21 มิถุนายน เรียกว่า วันครีษมายัน (Summer solstice) และจะอ้อมใต้ในช่วงเดือนกันยายนถึงมีนาคม วันที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบโลกอ้อมใต้มากที่สุด คือวันที่ 21 ธันวาคม เรียกว่า วันเหมายัน (Winter solstice) ส่วนวันที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบบนโลกโดยที่ไม่เบนไปทางทิศใต้หรือทิศเหนือ มี 2 วันในรอบปี เรียกว่า วันวิษุวัต (Equinox) คือวันที่ 21 มีนาคม และวันที่ 21 กันยายน รังสีอาทิตย์ที่กระทบ ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย จะมีค่าความเข้มของพลังงานมากในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน และจะมากที่สุดในช่วงเดือนมีนาคม ดังภาพด้านล่าง (สมสิทธิ์ นิตยะ, 2541)



ภาพที่ 2 - 1 ความเข้มของรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปี (Samimi Mojtaba, 1998)

2.2 ธรรมชาติการกระจายตัวของอากาศ

จากคุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปในระบบจะทำให้โมเลกุลของสสารเกิดการสั่นและแยกตัวออกจากกัน อากาศที่ร้อนขึ้นจึงมีความหนาแน่นของโมเลกุลน้อยลง ส่งผลให้มวลของอากาศลดน้อยลง เมื่อเทียบกับอากาศที่เย็นกว่า อากาศที่เย็นกว่าจะมีความหนาแน่นสูงกว่า มีน้ำหนักมากกว่า ทำให้อากาศร้อนลอยตัวขึ้นด้านบน และอากาศเย็นเคลื่อนตัวลงต่ำ

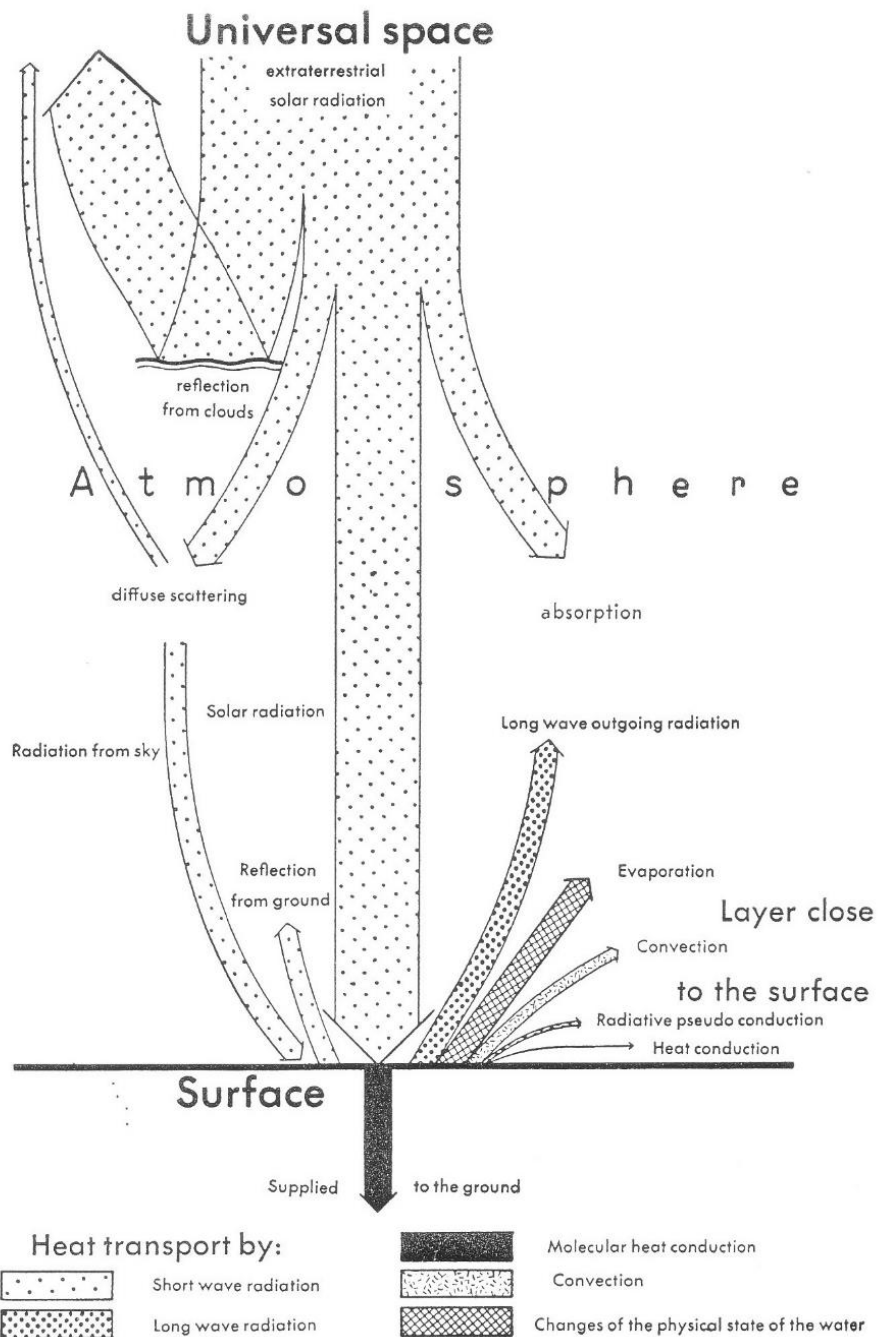
2.3 การระบายความร้อนด้วยการแผ่รังสี

ทุกๆพื้นผิวมีการแผ่รังสีที่มีสเปกตรัมของความยาวคลื่นซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิปกติบนโลก รังสีที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปรังสีคลื่นยาว หากอุณหภูมิของพื้นผิวมีความใกล้เคียงกับอุณหภูมิโดยรอบ ผลต่างของการแผ่รังสีสุทธิจะมีค่าน้อย ทำให้เกิดผลต่างของการรับหรือคายพลังงานน้อยลงตามไปด้วย (Givoni B., 1994)

การแผ่รังสีจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน แต่ในเวลากลางวันรังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกมาต้องเผชิญกับรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ ทำให้การสูญเสียพลังงานสุทธิจากการแผ่รังสีออกจากพื้นผิวนั้นเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากมีการดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เข้ามาตามแต่ค่าความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อนของวัสดุพื้นผิวนั้นด้วย ดังนั้น การทำความเย็นด้วยการแผ่รังสี (Radiant Cooling) จะเกิดขึ้นได้ดีในเวลากลางคืน บางครั้งเรียกการทำความเย็นด้วยวิธีนี้ว่า Nocturnal Radiation (Givoni B., 1994)

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแผ่รังสี เกี่ยวข้องกับทั้งตัววัสดุที่เป็นตัวแผ่รังสี และบรรยากาศโดยรอบ วัสดุที่เกิดการแผ่รังสีได้ดีที่สุดสามารถแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่น 10 ไมโครเมตร (Gray-body radiation) ทั้งยังเกี่ยวข้องกับมวลสารและความจุความร้อนของวัสดุที่เป็นตัวแผ่รังสี แต่อย่างไรก็ตาม ยังคงมีปัจจัยของบรรยากาศโดยรอบที่ส่งผลต่อการแผ่รังสีด้วย ได้แก่ ความชื้นของอากาศ สภาพท้องฟ้า ซึ่งความสามารถในการรองรับการแผ่รังสีของท้องฟ้าเป็นสิ่งที่สามารถคำนวณได้ (Givoni B., 1994)

2.4 คุณสมบัติทางกายภาพของผิวหลังคา



ภาพที่ 2 - 2 การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในเวลากลางวัน (Olgay Victor, 1973)

1. Absorptances

เมื่อรังสีอาทิตย์แผ่มากระทบหลังคา จะเกิดพฤติกรรม 3 อย่าง ได้แก่ สะท้อนออกไปส่วนหนึ่ง (Reflection) ส่งผ่านทะลุหลังคาไปส่วนหนึ่ง (Transmission) และดูดซับไว้ที่ตัวหลังคาในรูปของความร้อนอีกส่วนหนึ่ง (Absorption) ค่าความสามารถในการดูดซับรังสีความร้อนไว้นี้ ถูกเรียกว่า Absorptances มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ สี และความมันวาวของผิว (Anderson Bruce, 1977)

2. Emissivity

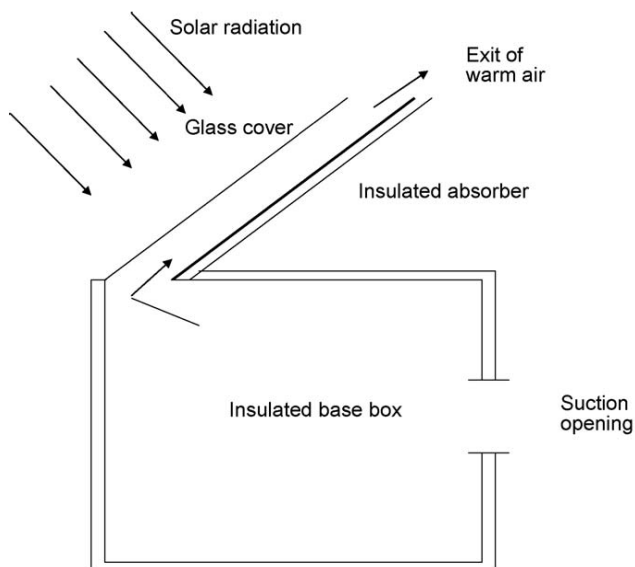
เมื่อแผ่นหลังคาดูดซับความร้อนไว้จะต้องมีการระบายออกด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction) การแผ่รังสีกลับคืน (Re-radiation) และการแผ่ออกด้วยรังสีช่วงความยาวคลื่นสูง (Emission) ค่าความสามารถในการแผ่รังสีออกด้วยความยาวคลื่นสูงนี้เทียบกับ Blackbody ซึ่งเป็นวัสดุในอุดมคติ ($\epsilon = 1.0$) ถูกเรียกว่า Emissivity มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ สี และความมันวาวของผิวเช่นกัน (Anderson Bruce, 1977)

3. Conductivity

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุตัวกลางที่เป็นของแข็งใน 1 หน่วยความหนาต่อ 1 หน่วยเวลา ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุ มีหน่วยเป็น Btu/hr/ft²/°F วัสดุที่มีค่า Conductivity มาก จะส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U-value) มากขึ้นตามไปด้วย ในขนาดความหนาที่เท่ากัน (Anderson Bruce, 1977)

2.5 ปล่องแสงอาทิตย์ (Solar chimney)

จากธรรมชาติของการกระจายตัวของอากาศที่อากาศที่ร้อนกว่าจะเคลื่อนตัวสูงขึ้น ปล่องแสงอาทิตย์อาศัยหลักการนี้ในการทำให้เกิดแรงดึงในการพาความร้อนเพื่อระบายอากาศภายในออกทางด้านบน โดยการสร้างปล่องระบายอากาศตามแนวตั้ง ด้านบนมีช่องปล่องอากาศออก ตามภาพที่ 2 - 3 และมีการออกแบบปล่องให้อากาศในปล่องร้อนขึ้นในเวลากลางวันด้วยวิธีการต่างๆ (Zhai X.Q., 2011) เช่น การติดกระจกและทาสีดำภายใน เพื่อให้รับรังสีอาทิตย์แล้วแปลงเป็นพลังงานความร้อนในช่วงคลื่นยาวก็ไว้ภายในปล่องและช่วยให้อากาศในปล่องเคลื่อนตัวสูงขึ้น (ศักดิ์ทิพย์ ทมทิตชงค์ , 2555) การติดตั้งรอบๆ ปล่องเพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศภายในปล่องที่ร้อนและอากาศภายนอกปล่องที่เย็นกว่า เพื่อให้อากาศร้อนภายในปล่องเคลื่อนตัวขึ้นและระบายออก (Yusoff Mohammad, 2010) มีการนำไปผนวกกับอาคารทั้งส่วนผนังและหลังคาและนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิควิธีอื่นๆ อีกด้วย (Zhai X.Q., 2011)



ภาพที่ 2 - 3 แนวคิดการทำงานของระบบ Solar chimney ในเวลากลางวัน
(Mathur J., 2006)

2.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณอัตราการระบายอากาศ

การคำนวณอัตราการระบายอากาศ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอก อากาศภายในที่ร้อนกว่าภายนอก จะลอยสูงขึ้นเกิดเป็นแรงลอยตัว (Buoyancy) หรือที่เรียกว่า Stack effect ที่มีอัตราการระบายอากาศดังสมการ (Chirarattananon S., 2005)

$$V = AC_D[-2g(h-h_{NL})(T_{ia}-T_{oa})/T_{oa}]^{1/2} \quad \dots(1)$$

- V อัตราการระบายอากาศ (m^3/s)
- A พื้นที่หน้าตัดของปล่อง (m^2)
- C_D Discharged Coefficient (มีค่าเท่ากับ 0.65 ในกรณีอาคารพักอาศัย)
- g อัตราเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโลก ($9.8 m/s^2$)
- h ความสูงของปล่อง (m)
- h_{NL} ความสูงที่ระดับ Neutral pressure (m)
- T_{ia} อุณหภูมิอากาศภายในปล่อง (K)
- T_{oa} อุณหภูมิอากาศภายนอก (K)

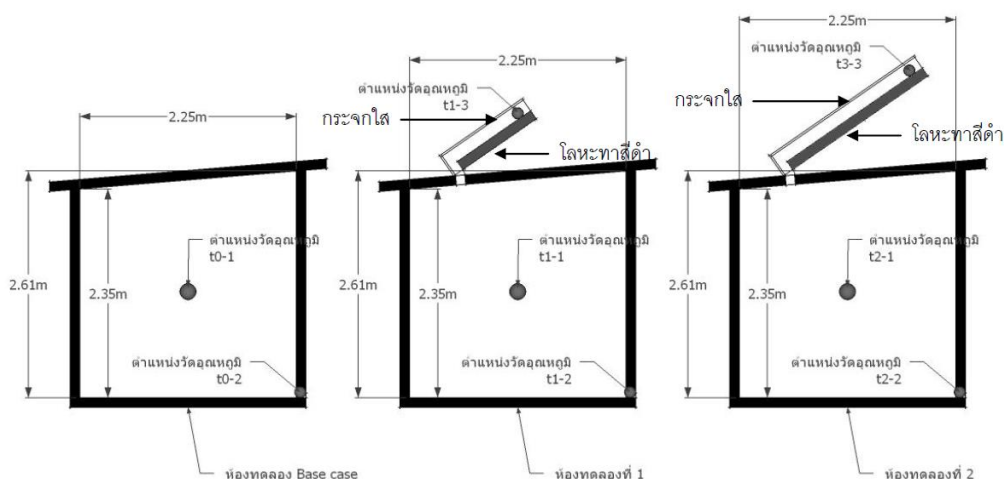
2.5.2 ปัจจัยในการเกิดประสิทธิภาพที่ดีของปล่องแสงอาทิตย์ที่ประกอบกับหลังคา มีดังนี้

2.5.2.1 มุมเอียงของปล่องแสงอาทิตย์

ศักติภัท ทมทิตชงค์ (2555) ทำการทดลองติดตั้งปล่องแสงอาทิตย์เหนือหลังคาห้องทดลองที่มีความชัน 3 ระดับ ได้แก่ 10° , 20° และ 30° ผลปรากฏว่า ที่ความชัน 20° และ 30° สามารถลดอุณหภูมิภายในห้องทดลองลงจากห้องควบคุมได้มากที่สุดถึง 7.5°C

2.5.2.2 ความยาวของปล่องแสงอาทิตย์

ศักติภัท ทมทิตชงค์ (2555) ทำการทดลองติดตั้งปล่องแสงอาทิตย์เหนือหลังคาห้องทดลองที่มีความยาวปล่อง 2 ขนาด ได้แก่ ปล่องสั้น(0.50 เมตร) และปล่องยาว(1.00 เมตร) ผลปรากฏว่า ปล่องยาวสามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่าปล่องสั้นในทุกความชัน(10° , 20° และ 30°) แต่ปล่องสั้นในทุกความชัน(10° , 20° และ 30°) สามารถทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศที่ดีและประหยัดพลังงานไฟฟ้าเทียบเท่าการเปิดพัดลมระบายอากาศมากกว่าปล่องยาว



ภาพที่ 2 - 4 ห้องทดลองของศักติภัท ทมทิตชงค์ (2555)

2.5.2.3 ขนาดและรูปร่างของปล่อง

Lee Sunwoo และคณะ (2009) ทำการทดลองด้วยการสร้างชุดทดลองขนาดตามจริงในห้องปฏิบัติการ พบว่ารูปร่างลักษณะลอนหลังคามีผลต่อการไหลที่ดีของอากาศในช่องใต้หลังคา กล่าวคือ ลอนหลังคาที่มีความชันต่ำ จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสรังสีอาทิตย์ที่มากขึ้น เกิดความต่างอุณหภูมิที่มากขึ้น ทำให้อัตราการระบายอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย ไม่เกิดการสะสมความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิภายในลดต่ำลง

2.5.2.4 รังสีอาทิตย์: สภาพท้องฟ้า ทิศทาง

ประสิทธิภาพของระบบที่ดีขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์ (Lee Sunwoo, 2009) เมื่อรังสีอาทิตย์มีความเข้มสูงก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดียิ่งขึ้น ซึ่งเกิดจากปัจจัยของสภาพท้องฟ้า

ที่มีความเข้มของรังสีอาทิตย์สูงและมีเมฆน้อย รวมทั้งทิศทางที่ปล่อยแสงอาทิตย์หันไปรับรังสีอาทิตย์ได้อย่างเต็มที่

2.5.3 ประสิทธิภาพของปล่อยแสงอาทิตย์

2.5.3.1 ความสามารถในการลดอุณหภูมิภายใน

การทดลองของ Sudaporn Chungloo และคณะ (2007) ในกรุงเทพมหานคร ช่วงเดือน มิถุนายน พบว่าระบบปล่อยแสงอาทิตย์ที่ทำจากโลหะสามารถลดอุณหภูมิภายในห้องได้ 1.0-1.3 °C จากห้องปกติที่มุ่งหลังคากระเบื้องดินเผาและไม่มีการใช้ระบบปล่อยแสงอาทิตย์

การทดลองของปริดา จันทวงษ์ และคณะ (2554) เปรียบเทียบระหว่างบ้านที่มุ่งกระเบื้อง CPAC Monier สองหลัง โดยที่หลังหนึ่งเป็นผ้าแบบธรรมดา ส่วนอีกหลังหนึ่งเป็นผ้าระบายอากาศโดยใช้หลักการของปล่อยแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ไว้ภายนอก ตามภาพที่ 2 – 5 พบว่าระบบนี้สามารถลดอุณหภูมิภายในได้ 5-12°C

การทดลองของศักดิ์ทิพย์ ทมทิตขงค์ (2555) พบว่าระบบปล่อยแสงอาทิตย์นี้สามารถลดอุณหภูมิจากห้องปกติที่ไม่มีการติดตั้งปล่อยแสงอาทิตย์บนหลังคาได้มากกว่า 2°C

L.Susanti และคณะ (2011) ได้ทำการปรับปรุงหลังคาโรงงานด้วยการทำช่องให้อากาศไหลผ่านใต้หลังคา ตามภาพที่ 2 – 11 และเก็บค่าของอุณหภูมิภายใน พบว่าสามารถลดอุณหภูมิภายในได้มากที่สุด 4.4°C เมื่อเทียบกับหลังคาชั้นเดียว

2.5.3.2 ความสามารถในการทำให้เกิดการหมุนเวียนอากาศ

งานวิจัยที่กล่าวถึงความสามารถในการทำให้เกิดการหมุนเวียนอากาศ มีอยู่ 2 งาน ได้แก่

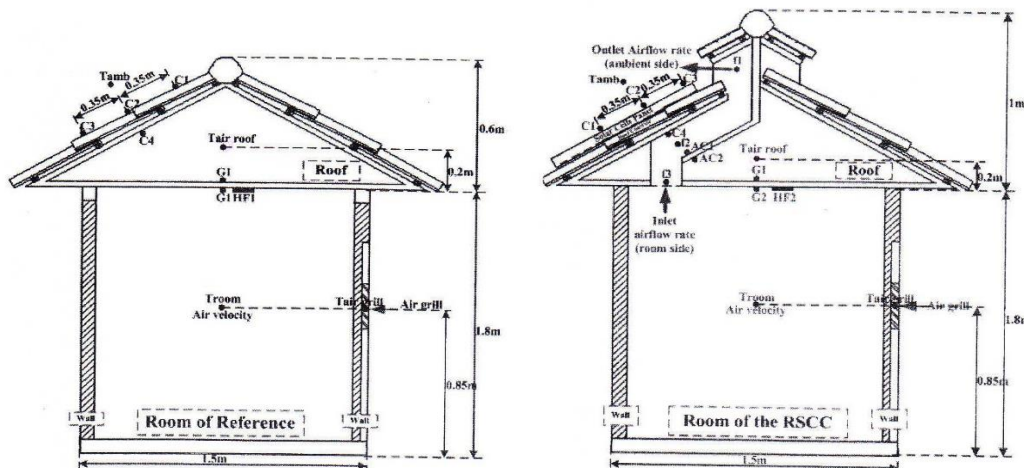
งานแรก วิจัยโดย Sudaporn Chungloo และคณะ(2007) นำอัตราเร็วในการเคลื่อนตัวของอากาศออกจากปล่อย ซึ่งได้มาโดยคำนวณจากอุณหภูมิที่วัดได้ มีค่าเท่ากับ 0.008-0.012 ลบ.ม./วินาที ในช่วงเดือนกรกฎาคม และ 0.012-0.016 ลบ.ม./วินาที ในช่วงเดือนกันยายน คิดเป็น 1.13-2.26 ACH ซึ่งน้อยกว่าการทดลองโดย Khedari และคณะ (2000) ที่ได้ค่า ACH เท่ากับ 4-15 เนื่องจากมีผลจากการใช้ประโยชน์จากลมที่พัดในบรรยากาศ

งานที่สอง วิจัยโดยศักดิ์ทิพย์ ทมทิตขงค์ (2555) ใช้วิธีการสร้างห้องทดลองขนาดจริง ที่ กรุงเทพมหานคร และติดตั้งปล่อยแสงอาทิตย์จำนวน 1 ปล่อยไว้ด้านบนของหลังคากระเบื้องลอนคู่ ทำการทดลองในช่วงเดือนธันวาคม-กุมภาพันธ์ นำอัตราเร็วในการเคลื่อนตัวของอากาศออกจากปล่อย ซึ่งได้มาโดยคำนวณจากอุณหภูมิที่วัดได้ มีค่าเท่ากับ 10,702 -12,474 ลบ.ม./ชม./วัน ไปเปรียบเทียบกับแผนการเปิดพัดลมระบายอากาศขนาดใบพัด 10 นิ้ว ราว 13-16 ชั่วโมง/วัน

2.5.3.3 ความสามารถในการประหยัดพลังงานที่ใช้กับระบบปรับอากาศ

ปริดา จันทวงษ์ และคณะ (2554) ทำการทดลองกับห้องทดลองที่มีหลังคาเป็นผ้าแบบปกติ และห้องทดลองที่มีการเจาะช่องระบายอากาศเป็นปล่อยแสงอาทิตย์ ในกรุงเทพมหานคร ตามภาพที่ 2 - 5 ในกรณีเปิดเครื่องปรับอากาศ ปรับอุณหภูมิที่ 25-26 °C พบว่าหลังคาที่มีการเจาะช่องระบาย

อากาศเป็นปล่อง สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศได้ เนื่องจากหลังคาแบบปกติมีการสะสมความร้อนไว้ที่ช่องใต้หลังคา ทำให้เครื่องปรับอากาศทำงานหนัก

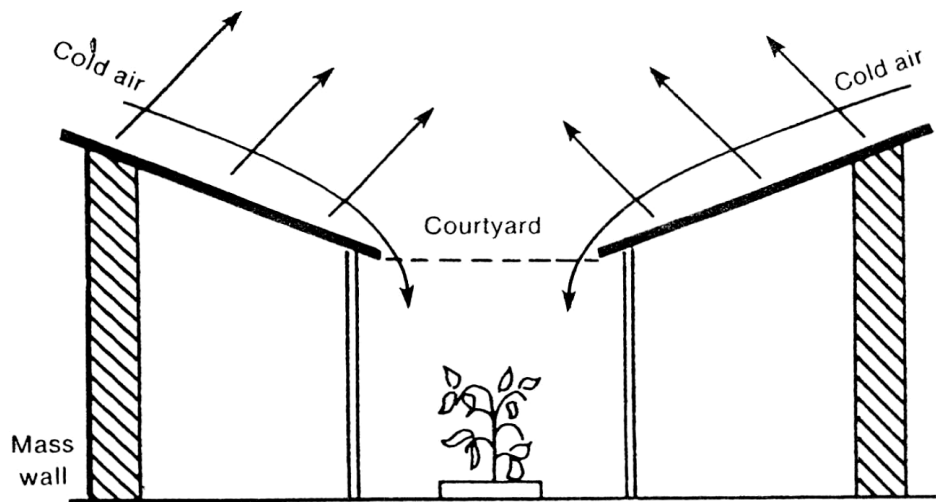


ภาพที่ 2 - 5 ห้องทดลองแบบปกติ(ซ้าย) และห้องทดลองที่มีการเจาะช่องระบายอากาศเป็นปล่องโซล่า(ขวา) (ปริดา จันทวงษ์ และคณะ, 2554)

L.Susanti และคณะ (2011) ทำการทดลองที่ประเทศญี่ปุ่น ได้นำหลักการของปล่องแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในการช่วยทำให้เกิดการระบายอากาศได้เร็วในเวลากลางวัน โดยทำการปรับปรุงหลังคาโรงงานด้วยการทำช่องให้อากาศไหลผ่านใต้หลังคา และเก็บค่าอุณหภูมิภายใน พบว่าสามารถลดการใช้พลังงานของเครื่องปรับอากาศที่เปิดใช้งานเฉพาะเวลาทำงาน ที่อุณหภูมิ 26°C ลงได้ 48% - 52% ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม

2.6 หลังคาระบายความร้อนเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation)

จากทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อนในเวลากลางคืน โดย Givoni (1994) เมื่อหลังคาแผ่รังสีความร้อนสู่ท้องฟ้า ผิวหลังคาจะมีอุณหภูมิต่ำลง ทำให้อากาศที่บริเวณผิวหลังคานั้นมีอุณหภูมิต่ำลงด้วย จึงเกิดแนวคิดที่จะนำความเย็นที่เกิดขึ้นนั้นมาใช้ประโยชน์ เช่น แนวคิดที่เสนอโดย Trombe ตามภาพที่ 2 - 6 (Martin Marlo, 1989)



ภาพที่ 2 - 6 แนวความคิดที่เสนอโดย Trombe (Martin Marlo, 1989)

2.6.1 ปัจจัยในการเกิดประสิทธิภาพที่ดีของหลังคาระบายความร้อนในเวลากลางวัน

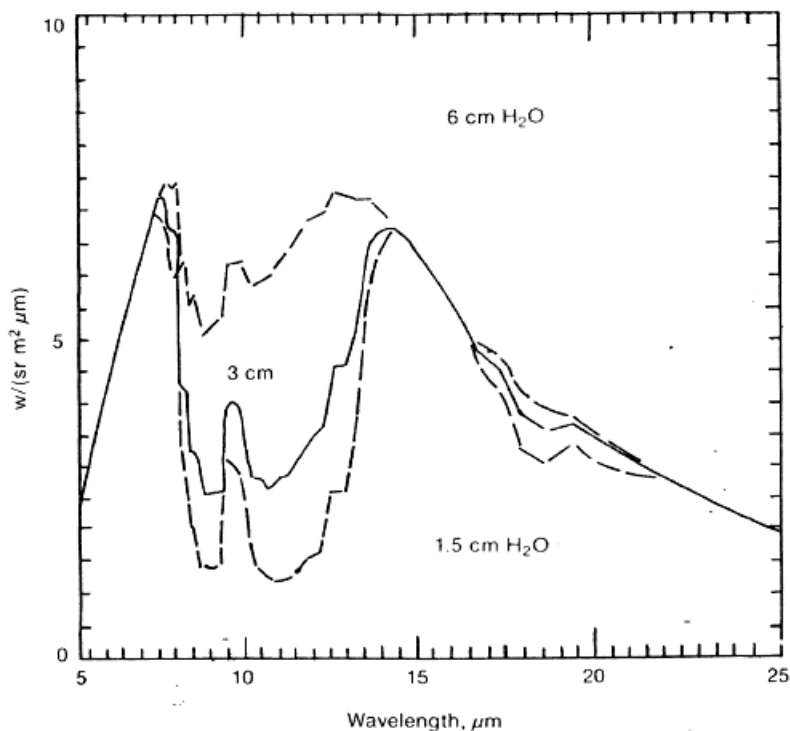
2.6.1.1 สภาพท้องฟ้า

ความเข้มของการแผ่รังสีจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อบรรยากาศมีความชื้นสูง แต่เมื่อบรรยากาศมีความชื้นสูงจะทำให้เกิดหยดน้ำเกาะบนแผ่นหลังคาหนามากขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าลดต่ำลง ดังนั้นการระบายความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าด้วยการแผ่รังสีจึงมีประสิทธิภาพดีที่สุดในภาวะที่บรรยากาศภายนอกมีความชื้นต่ำ ตามแผนภูมิที่ 2 - 1 (Martin Marlo, 1989)

เมฆบนท้องฟ้าก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ การแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าเป็นอย่างมาก กล่าวคือ การแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าจะเกิดได้มากในสภาวะที่มีเมฆน้อย เมื่อมีเมฆมากจะทำให้เกิดการแผ่รังสีได้น้อยลง (Martin Marlo, 1989)

อุณหภูมิของท้องฟ้า (T_{sky} : Temperature sky) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าเช่นกัน กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของท้องฟ้าสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าลดลง ตามสมการที่แสดงการแผ่รังสีกลับสู่ท้องฟ้าของวัตถุดำ (Blackbody) (Martin Marlo, 1989)

$$R_{net} = 4\epsilon r^4 \sigma T_{air}^3 (T_{rad} - T_{sky}) \quad \dots\dots\dots (2)$$



แผนภูมิที่ 2 - 1 ความสามารถของท้องฟ้าในการรองรับการแผ่รังสีที่น้อยลง
เมื่อหลังคามีนํ้าปกคลุมหนามากขึ้น (Martin Marlo, 1989)

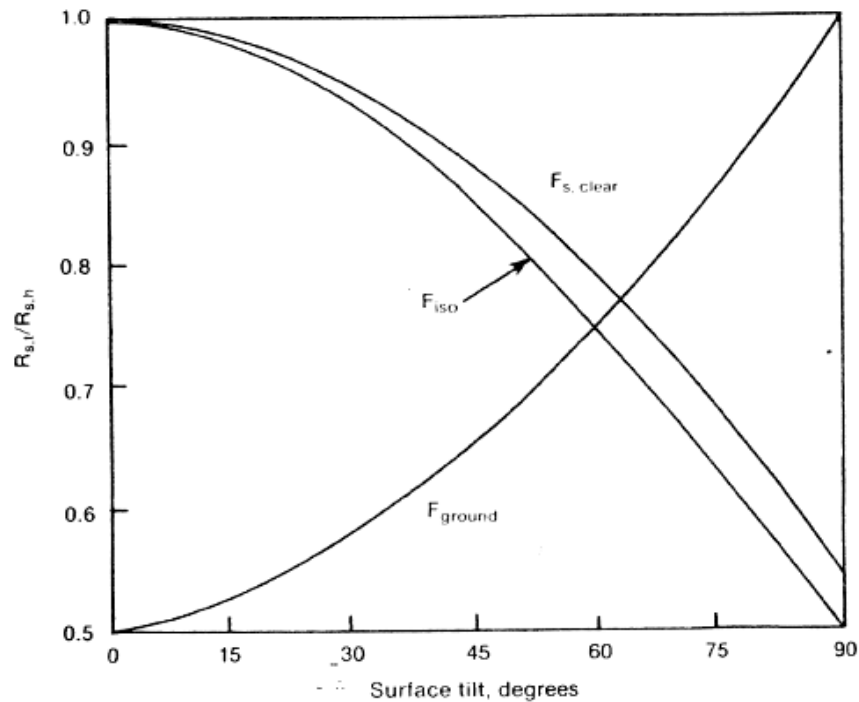
ท้องฟ้าในเมืองไทย R. H. B. Exell (1978) ใช้การคำนวณโดยอาศัยข้อมูลอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่ 4 แห่งในประเทศไทย ได้แก่ เชียงใหม่ อุบลราชธานี กรุงเทพฯ สงขลา ประกอบกับข้อมูลจากการทดลองแผ่รังสีของ Blackbody ที่มีการทดลองในประเทศอินเดียในโซนที่มีละติจูดใกล้เคียงกัน พบว่าพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการแผ่รังสีกลับสู่ท้องฟ้าได้ดีที่สุด ได้แก่ ท้องฟ้าที่จังหวัดเชียงใหม่ ส่วนที่อื่นๆในประเทศก็จะลดหลั่นกันไป

จอมภพ แวค์ศักดิ์ และคณะ (2542) ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิที่หลังคาเย็นตัวลงเปรียบเทียบกันในสภาวะของท้องฟ้า 3 ลักษณะ ได้แก่ ท้องฟ้ากระจ่าง ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม และท้องฟ้ามีฝนตก พบว่า ในกรณีที่ท้องฟ้ากระจ่าง และท้องฟ้ามีเมฆปกคลุม อุณหภูมิของหลังคาจะยังคงสามารถลดต่ำกว่าบรรยากาศได้ แต่ในกรณีที่ฝนตก อุณหภูมิของหลังคาจะใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อม

2.6.1.2 มุมเอียงของหลังคา

การแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าจะสามารถเกิดได้ดีที่สุดเมื่อหลังคาอยู่ในแนวระนาบ และลดลงเรื่อยๆเมื่อหลังคามีมุมเอียงที่ชันมากขึ้น (Martin Marlo, 1989) เนื่องจากองศาความชันที่น้อยๆ จะทำให้ระนาบหลังคาหันเข้าสู่ส่วนที่เย็นที่สุดของท้องฟ้าทรงกลม (Sky dome) และเมื่อความชันมากขึ้น จะทำให้หลังคาหันเข้าหาพื้นซึ่งมีอุณหภูมิสูงในเวลากลางคืนมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการแผ่รังสีลดลง ตามแผนภูมิที่ 2 - 2

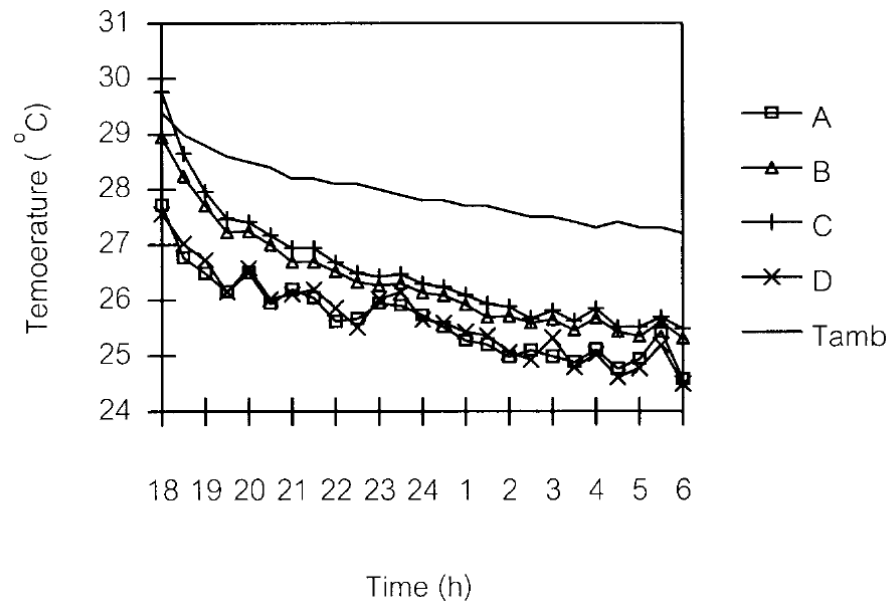
เมื่อระนาบนั้นอยู่ในตำแหน่งของหลังคาแบบ Parapet จะช่วยให้เกิดผลดียิ่งขึ้น เนื่องจากผนังของหลังคาแบบ Parapet จะช่วยป้องกันไม่ให้ลมที่พัดผ่านหลังคา ลดการพาความร้อนจากบรรยากาศโดยรอบที่อุณหภูมิสูงกว่ามาผสมกับอากาศรอบๆหลังคา ทำให้อากาศโดยรอบหลังคายังคงมีอุณหภูมิต่ำ



แผนภูมิที่ 2 - 2 ความสามารถในการแผ่รังสีลดลงเมื่อมุมเอียงของหลังคามีค่ามากขึ้น
(Martin Marlo, 1989)

2.6.1.3 มวลสารและความจุความร้อนของวัสดุหลังคา

Khedari J. และคณะ (2000) ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุหลังคาต่างชนิดกัน พบว่าวัสดุที่มีค่าความจุความร้อนสูง จะทำความเย็นได้น้อยกว่า เนื่องจากในเวลากลางวัน วัสดุเหล่านั้นได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์และเก็บสะสมไว้ ทำให้การคายความร้อนในเวลากลางคืน ต้องใช้เวลามากในการทำให้วัสดุเย็นตัวลง และยังพบว่า ปัจจัยด้านมวลสารของวัสดุนี้มีผลต่อความสามารถในการทำความเย็นมากกว่าค่า Emissivity ของวัสดุ ดังผลการทดลองที่ได้ในแผนภูมิที่ 2 - 3 ซึ่งวัสดุ A และ D มีวัสดุที่เป็นโลหะซ้อนทับอยู่ชั้นบนสุด ส่วน B และ C เป็นกระเบื้อง CPAC Monier



แผนภูมิที่ 2 - 3 ผลการทดลองหลังคาที่ใช้วัสดุมวลสารต่างกัน (Khedari J., 2000)

2.6.1.4 คุณสมบัติด้านการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุหลังคา

การทดลองของ Khedari J. (2000) พบว่า เมื่อวัสดุมีค่า Emissivity สูง ก็จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ดีกว่า และมีอุณหภูมิที่เย็นลงได้มากกว่าวัสดุที่มีค่า Emissivity ต่ำกว่า ดังแสดงในแผนภูมิที่ 2 - 3 ซึ่งวัสดุ B และ C เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน แต่วัสดุ B ถูกนำมาทาสีขาว ทำให้ค่า Emissivity สูงขึ้น ตามค่าในตารางที่ 2 - 1 (จอมภพ แววศักดิ์ และคณะ, 2542) ปรากฏผลว่า B สามารถลดอุณหภูมิได้มากกว่า C

ตารางที่ 2 - 1 ค่า emissivity ตามงานวิจัยของ จอมภพ แววศักดิ์ และคณะ (2542)

Materials	Dimension (cm)	Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal Emissivity *
White painted metal sheet	-	-	0.900
White painted CPAC Monier	0.8	0.6900	0.940
Red-dark CPAC Monier	0.8	0.6900	0.930
White painted corrugated metal sheet	-	-	0.890
Gypsum board	1.3	0.0873	0.903

* วัดโดยอุปกรณ์วัดค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (Emissometer model AE)

2.6.2 ประสิทธิภาพของหลังคาระบายความร้อนในเวลากลางคืน

2.6.2.1 อุณหภูมิหลังคาที่ลดลงจากอุณหภูมิบรรยากาศ

จากการทดลองของจอมภพ แวศักดิ์ และคณะ (2542) พบว่าทั้งในสภาวะท้องฟ้ากระจ่าง และท้องฟ้ามีเมฆมาก อุณหภูมิหลังคาจะสามารถลดต่ำกว่าบรรยากาศได้ประมาณ 1-6°C ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Khedari (2000)

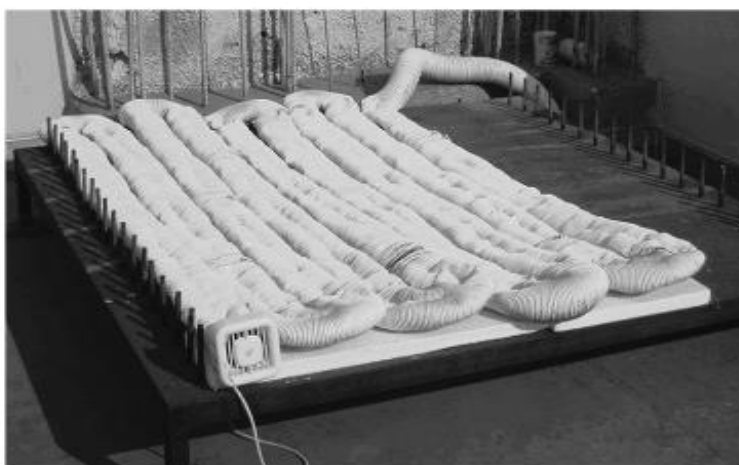
งานวิจัยของ Hollick J. (2012) ทำการทดลองกับ Transpired solar panel ซึ่งเป็นโลหะมีสีเข้ม ทำการทดลองที่ NSTF, Toronto ประเทศแคนาดา พบว่าอุณหภูมิผิวลดต่ำกว่าบรรยากาศประมาณ 6-20°C

การทดลองของ Treamorn Prommajak และคณะ (2008) ทำการทดลองโดยใช้ อลูมิเนียมทาสีดำเป็นตัวแผ่รังสี พบว่าอุณหภูมิของตัวแผ่รังสีลดลงจากบรรยากาศประมาณ 5°C

2.6.2.2 ความสามารถในการลดอุณหภูมิภายใน

จากการศึกษาวิจัยของ Givoni (1977) พบว่าในฤดูร้อน หลังคาโลหะสามารถลดอุณหภูมิภายในเนื้อที่ที่ใส่สอยใต้หลังคาต่ำกว่าบรรยากาศภายนอกประมาณ 4-5°C

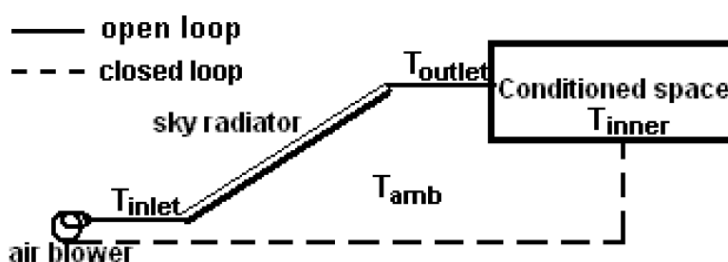
งานวิจัยของ Bagiorgas และ Mihalakakou (2008) ได้ทดลองใช้ท่ออลูมิเนียมทาสีขาว วางขดอยู่บนหลังคาตาดฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี และติดตั้งพัดลมไว้ที่ปลายด้านหนึ่ง เปิดให้พัดเอาความเย็นจากท่ออลูมิเนียมลงมาทำความเย็นในอาคารเฉพาะเวลากลางคืน ช่วยลดอุณหภูมิภายในลงได้ 2.5-4°C ในเวลากลางคืน เมื่อเทียบกับห้องควบคุมที่เป็นหลังคาคอนกรีตธรรมดาไม่มีการติดตั้งระบบท่อปรับอากาศนี้



ภาพที่ 2 - 7 การทดลองใช้ขดท่ออลูมิเนียมทาสีขาวเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีความร้อน
(Bagiorgas H.S. & Mihalakakou G., 2008)

งานวิจัยของ Hollick (2012) ได้ทดลองนำความเย็นที่บริเวณผิวหลังคามาทำความเย็นภายในห้อง โดยใช้พัดลมเป่าลมมา ช่วยลดอุณหภูมิภายในให้ต่ำกว่าบรรยากาศภายนอกได้มากที่สุด ประมาณ 4.7°C

การทดลองของ Treeamorn Prommajak และคณะ (2008) ได้ทำการต่อท่ออากาศจากตัวแผ่รังสีเข้าไปยังห้องทดลองขนาด 2 เมตร x 2 เมตร x 2.5 เมตร โดยใช้พัดลมเป่าหมุนเวียนอากาศดังภาพที่ 2 - 8 ทำให้อุณหภูมิภายในห้องทดลองลดต่ำลง สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเพียง $1-2^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 2 - 8 การหมุนเวียนอากาศเพื่อใช้ nocturnal radiation ลดอุณหภูมิภายใน
(Treeamorn Prommajak, 2008)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Roof Ventilated Cavity

เนื่องจากมองเห็นประโยชน์ของรังสีอาทิตย์ในเวลากลางวัน และการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน จึงมีผู้นำทั้งสองสิ่งนี้มาใช้ประโยชน์ร่วมกัน ดังที่ได้เห็นในงานวิจัยของ Givoni (1977), Hollick (2012), Bagiorgas และ Mihalakakou (2008), และงานของ L.Susanti และคณะ (2011)

2.7.1 งานวิจัยของ Givoni (1977)

Givoni พยายามเก็บเอาความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในการทำ ความอบอุ่นในอาคารในฤดูหนาว และนำหลักการของการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน มาใช้ในช่วงกลางคืนของฤดูร้อน โดยคิดค้นระบบ Roof radiation trap เพื่อให้ระบบสามารถทำงานเป็นประโยชน์ต่ออาคารได้โดยตลอดทั้งในช่วงที่อากาศร้อนและอากาศหนาว ตามภาพที่ 2 - 9

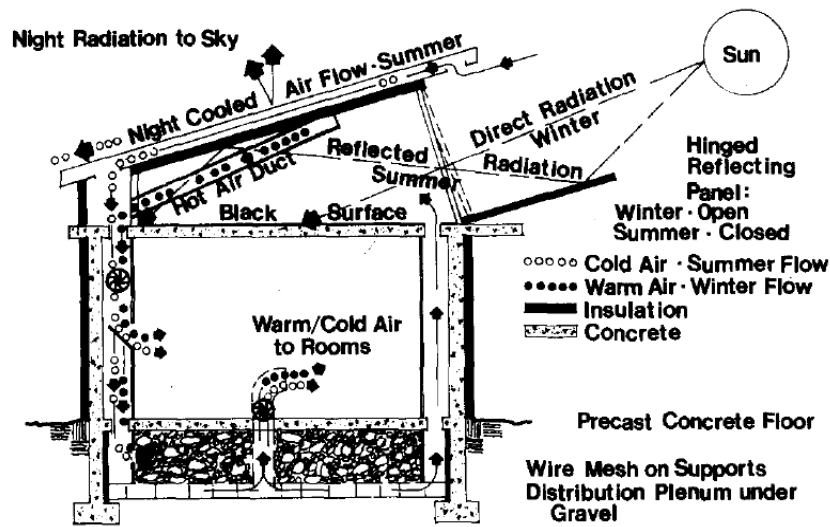
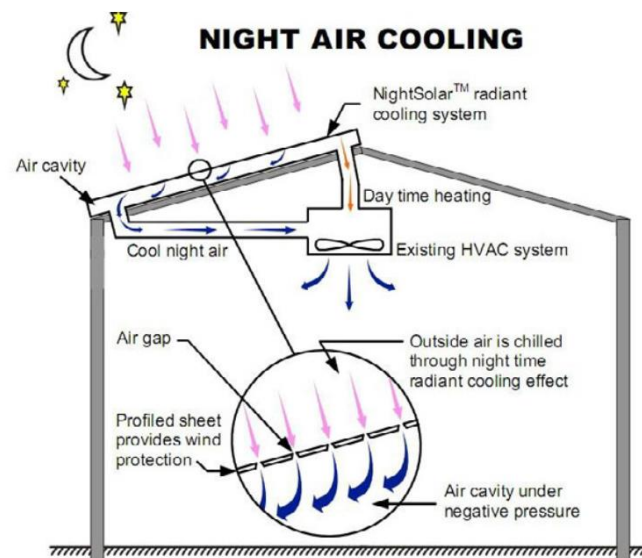


Fig. 1. The roof radiation trap.

ภาพที่ 2 - 9 ระบบ Roof radiation trap (Givoni B., 1977)

2.7.2 งานวิจัยของ Hollick (2012)

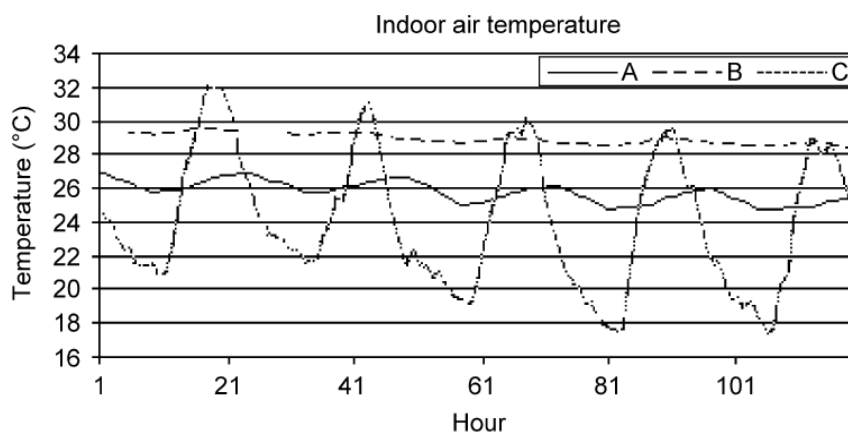
หลังจากทำการทดลองการแผ่รังสีความร้อนของหลังคาในเวลากลางคืน Hollick ได้เสนอแนวคิดการนำไปประยุกต์กับอาคาร โดยใช้ประโยชน์ในการทำความเย็นให้กับเนื้อที่ใช้สอยภายในในเวลากลางคืน และทำความอบอุ่นให้กับเนื้อที่ใช้สอยในเวลากลางวันของช่วงฤดูหนาว โดยออกแบบให้มีช่องไหลเวียนอากาศภายใต้หลังคาอีกชั้นหนึ่ง ตามภาพที่ 2 - 10



ภาพที่ 2 - 10 แนวคิดการนำประโยชน์จากการแผ่รังสีความร้อนของหลังคาไปประยุกต์ใช้กับอาคาร (Hollick John, 2012)

2.7.3 งานวิจัยของ Bagiorgas และ Mihalakakou (2008)

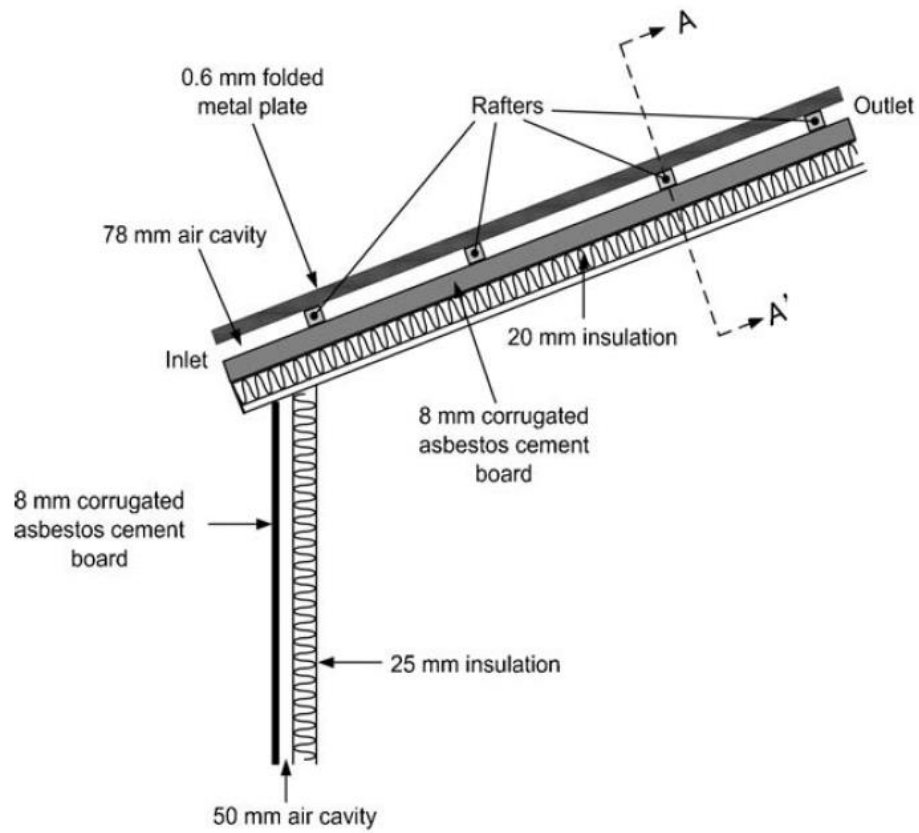
ขดท่ออลูมิเนียมทาสีขาวที่วางอยู่บนดาดฟ้า ไม่ได้ให้ประโยชน์เพียงการทำความเย็นในเวลา กลางคืนเท่านั้น แต่ยังช่วยเป็นตัวระบายอากาศในเวลากลางวันอีกด้วย จากแผนภูมิที่ 2 – 4 จะเห็น ว่าอุณหภูมิภายในห้อง A ที่ติดตั้งระบบระบายอากาศนี้ ต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้อง B ที่ไม่มีการติดตั้ง ระบบระบายอากาศใดๆ อย่างเห็นได้ชัดตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน (ส่วน C แทนอุณหภูมิอากาศ ภายนอก) เนื่องจากในเวลากลางวัน ขดท่ออลูมิเนียมนี้ได้ช่วยทำหน้าที่เป็นตัวระบายอากาศ ทำให้ ความร้อนไม่สะสมอยู่ภายในห้อง อุณหภูมิภายในห้องเวลากลางวันจึงลดต่ำลงด้วย



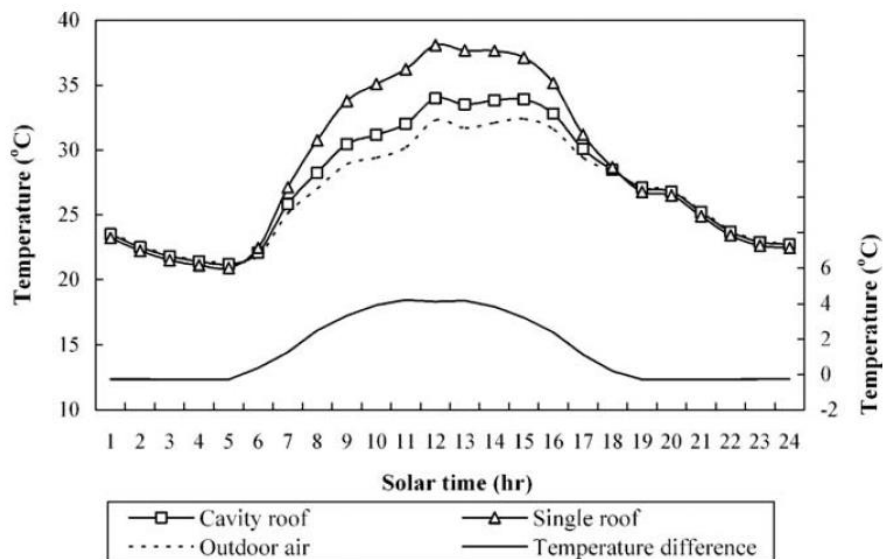
แผนภูมิที่ 2 - 4 การลดอุณหภูมิภายในห้องด้วยระบบระบายอากาศที่ทำจากขดท่ออลูมิเนียม (Bagiorgas H.S. & Mihalakakou G., 2008)

2.7.4 งานวิจัยของ L.Susanti และคณะ (2011)

L.Susanti และคณะ (2011) ได้มีแนวความคิดการใช้ประโยชน์จากหลังคาระบายอากาศทั้งกลางวันและกลางคืน ในการปรับปรุงโรงงานจึงเปลี่ยนหลังคาเป็นสองชั้นโดยที่ฉนวนอยู่ด้านล่าง พบว่าได้ประโยชน์ในการลดอุณหภูมิเนื้อที่ใช้สอยภายในได้เพียงเวลากลางวัน ส่วนเวลากลางคืนหลังคาชั้น เดียวยังคงแสดงอุณหภูมิภายในที่ต่ำกว่า ตามภาพที่ 2 - 12



ภาพที่ 2 - 11 รูปตัดหลังคากระบายอากาศของ L.Susanti (2011)



ภาพที่ 2 - 12 อุณหภูมิภายในเนื้อที่ใช้สอยจากการทดลอง (Susanti L., 2011)

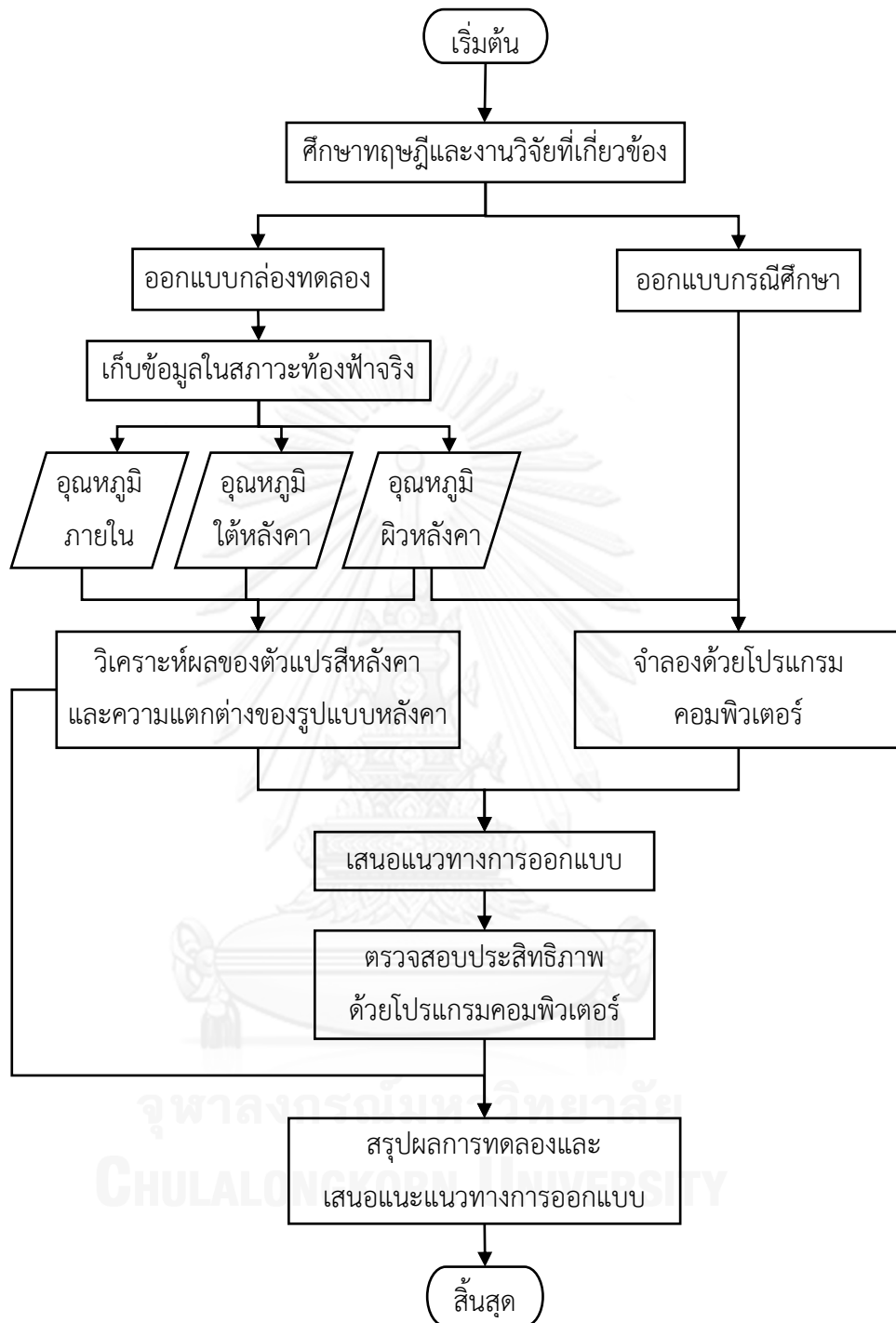
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาสมรรถนะด้านพลังงานของหลังคาระบายอากาศโดยใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าร่วมกับการใช้ปล่องลมแสงอาทิตย์ จากการสร้างกล่องทดลองและนำไปวางในสถานที่จริง มีขั้นตอนในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและก่อสร้างกล่องทดลอง
 - 1) เปรียบเทียบสีของวัสดุหลังคา
 - 2) วิเคราะห์ผลการทดลอง
3. ศึกษาโดยใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล
 - 1) เปรียบเทียบการเปิดช่องเปิดอาคารแบบต่างๆ
 - 2) เปรียบเทียบในสถานะที่มีลมพัดและอากาศนิ่ง
 - 3) เปรียบเทียบความสูงอาคารและระยะห่างระหว่างอาคาร
 - 4) วิเคราะห์ผลการทดลอง
4. เสนอแนวทางการออกแบบและตรวจสอบประสิทธิภาพด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล
5. สรุปผลการทดลองและแนวทางการออกแบบที่เป็นประโยชน์



ภาพที่ 3 - 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 รูปแบบการวิจัย

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้ระบบหลังคาระบายอากาศโดยใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนกลับคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางวันร่วมกับการใช้ปล่องลมแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน ด้วยการสร้างกล่องทดลองและเก็บข้อมูลอุณหภูมิและรังสีอาทิตย์ในสภาวะท้องฟ้าจริง จากนั้นนำผลการทดลองในเวลากลางวันไปคำนวณหาอัตราการระบายอากาศเทียบเท่าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากบทที่ 2 และนำข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคาที่เกิดขึ้นจริงทั้งกลางวันและกลางคืนไปใส่ในโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล เพื่อดูความสามารถในการลดอุณหภูมิและระบายอากาศในบ้านพักอาศัยขนาดจริง รวมทั้งหาแนวทางในการออกแบบเพื่อให้ได้ประโยชน์จากหลังคาในด้านพลังงานสูงสุด

3.3 การเก็บข้อมูลด้วยกล่องทดลอง

3.3.1 สถานที่ทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากรังสีอาทิตย์ทำความร้อนให้หลังคากล่องทดลองในเวลากลางวัน และใช้ท้องฟ้าในเวลากลางวันเป็นที่ระบายออกของความร้อน ในการออกแบบการทดลองจึงต้องติดตั้งชุดการทดลองทั้งหมดไว้บนดาดฟ้าอาคารเพื่อให้กล่องทดลองได้สัมผัสกับท้องฟ้าจริงโดยตรง

สถานที่ที่ใช้ทำการทดลองนี้ คือ ดาดฟ้าอาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร อาคารมีความสูง 5 ชั้น บริเวณพื้นที่ที่ใช้ทำการทดลองไม่มีการบังเงาจากอาคารข้างเคียงในช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลการทดลอง



ภาพที่ 3 - 2 ดาดฟ้าอาคารสถาบัน 2 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 กล่องทดลอง

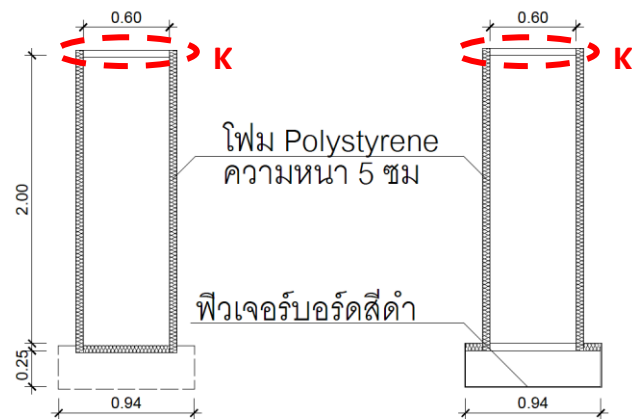
กล่องทดลองมีจำนวน 4 กล่อง ได้แก่ กล่องควบคุม กล่องต้นแบบหลังการระบายอากาศหลังคาสีเงิน กล่องต้นแบบหลังการระบายอากาศหลังคาสีขาว และกล่องต้นแบบหลังการระบายอากาศหลังคาสีดำมีลักษณะทางกายภาพ ดังนี้

1. มีปริมาตรภายในกล่องขนาด $0.60 \times 0.80 \times 2.00$ เมตร
2. ใช้วัสดุบุผิวเป็นแผ่นโฟม Polystyrene หนา 2 นิ้ว เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก อุดรอยต่อของแผ่นวัสดุด้วยซิลิโคน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศ (อภิชญา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555)
3. ใช้วัสดุหลังคาเป็นแผ่นเหล็กลอนรีด มุมเอียงหลังคา 10 องศา หันมุมเอียงของหลังคาไปทางทิศใต้ พร้อมชั้นของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์บอร์ดหนึ่งชั้นเป็นตัวแทนของฝ้าเพดาน
4. กล่องทดลองแต่ละกล่องแยกขาดออกจากกัน ไม่มีส่วนที่สัมผัสกัน เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
5. แผงกันลม ทำจากฟิวเจอร์บอร์ดแผ่นสีดำ

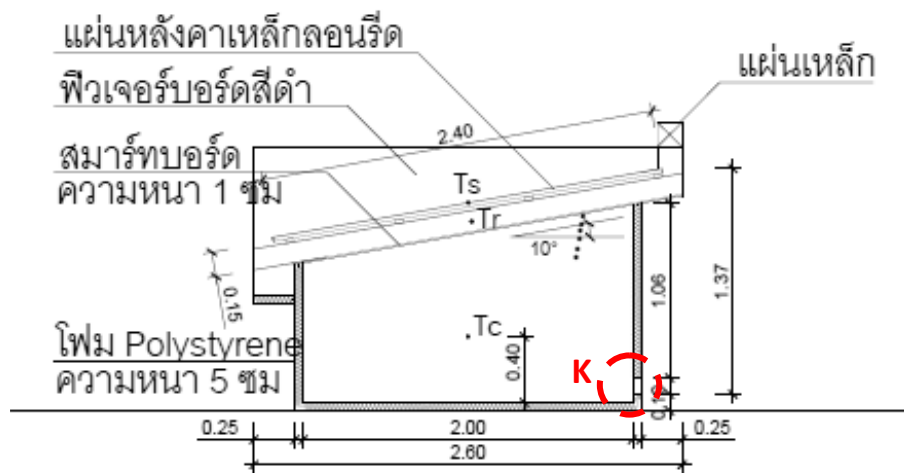
3.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์และเก็บข้อมูล

กล่องทดลองทุกกล่องจะมีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ผิวด้านบนของหลังคา (Ts) อุณหภูมิอากาศในช่องใต้หลังคา (Tr) และอุณหภูมิกลางกล่อง (Tc) ตามภาพที่ 3 – 4 และภาพที่ 3 – 5 เปรียบเทียบกับข้อมูลบรรยากาศภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มของรังสีอาทิตย์ในเวลากลางวัน

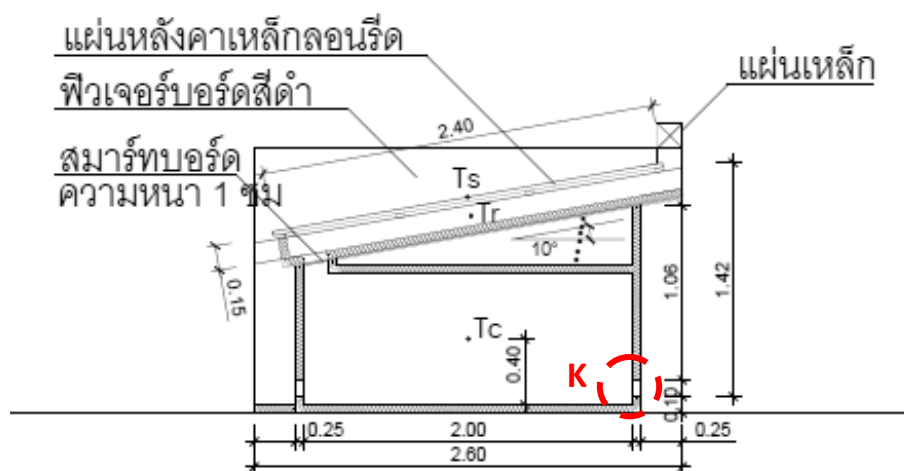
ระหว่างการเก็บข้อมูล มีการเปิดปิดกล่องเก็บข้อมูลที่ตำแหน่ง K โดยเปิดในเวลา 8:30-17:30 น. และปิดในเวลา 17:30-8:30 น. เพื่อจำลองการใช้งานของบ้านพักอาศัยที่มีการใช้งานตลอดวัน ตั้งค่าเครื่องมือให้เก็บข้อมูลทุก 10 นาที (ปรีดา จันทวงษ์ และคณะ, 2554) โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 23-26 ธันวาคม 2556



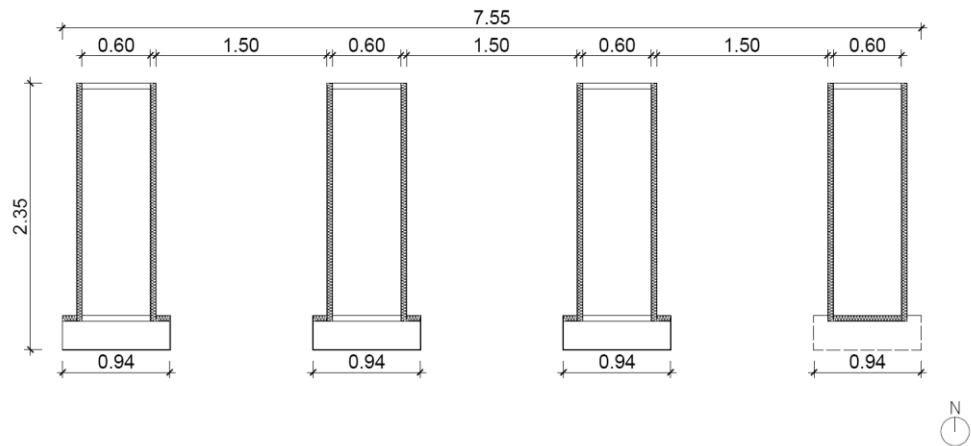
ภาพที่ 3 - 3 ผังพื้นของกล่องทดลอง (ซ้าย) กล่องควบคุม (ขวา) กล่องต้นแบบ



ภาพที่ 3 - 4 รายละเอียดส่วนประกอบของกล่องและการติดตั้งเครื่องมือ : กล่องควบคุม



ภาพที่ 3 - 5 รายละเอียดส่วนประกอบของกล่องและการติดตั้งเครื่องมือ : กล่องต้นแบบ



ภาพที่ 3 - 6 ผังการวางกล่องทดลองทั้งหมด



ภาพที่ 3 - 7 กล่องทดลองทั้งสี่กล่องก่อนปิดแผงกันลม



ภาพที่ 3 - 8 การติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่ผิวด้านบน ช่องว่างใต้หลังคา และภายในกล่อง



ภาพที่ 3 - 9 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดระหว่างเก็บข้อมูล

3.3.5 ตัวแปรในการวิจัย

ตัวแปรต้น	สีของหลังคาเหล็กลอนรีด: สีเงิน สีขาว สีดำ
ตัวแปรตาม	ความสามารถในการช่วยลดอุณหภูมิภายในเนื้อที่ใช้สอย ความสามารถในการทำให้เกิดการระบายอากาศ
ตัวแปรควบคุม	รูปร่าง ลักษณะ วัสดุ และปริมาตรของกล่องทดลอง สภาพท้องฟ้า อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมบรรยากาศภายนอก พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างใต้หลังคากล่องทดลอง

3.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคา จะถูกนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างจากอุณหภูมิบรรยากาศ โดยพิจารณาร่วมกับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุและความเข้มของรังสีอาทิตย์ จากนั้นนำข้อมูลสูงสุดในเวลากลางวัน ต่ำสุดในเวลากลางคืน ณ จุดเวลานั้น ไปใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

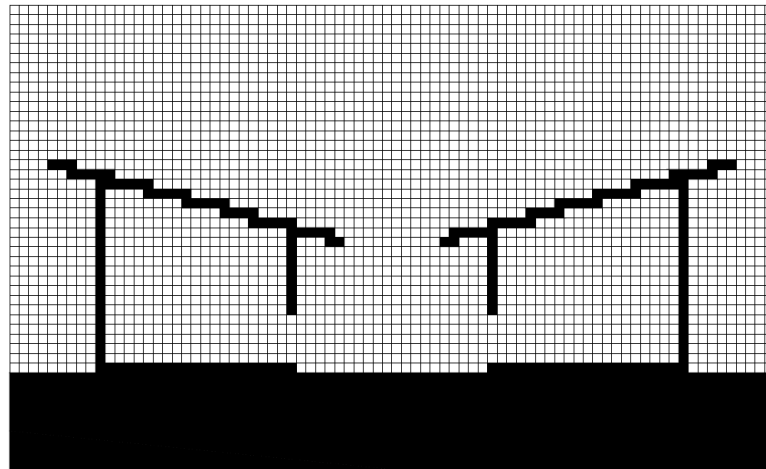
ข้อมูลอุณหภูมิในช่องใต้หลังคา จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับสีของหลังคาเหล็กลอนรีดและลักษณะการติดตั้งที่ฝ้าเพดาน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการนำไปใช้พัฒนาเป็นปล่องระบายอากาศในโอกาสอื่น ๆ ต่อไป

ข้อมูลอุณหภูมิกว้างกล่อง จะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกล่องควบคุม เปรียบเทียบระหว่างแต่ละสี และอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก เพื่อหาปัจจัยที่มีแนวโน้มส่งผลต่ออุณหภูมิภายในรวมทั้งการนำไปคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 เพื่อหาอัตราการระบายอากาศในเวลากลางวัน

3.4 การจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

3.4.1 โมเดลอาคารกรณีศึกษา

โมเดลอาคารกรณีศึกษาที่ใช้ในการจำลอง พัฒนาขึ้นจากแนวคิดการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีที่เสนอโดย Trombe (1967) ซึ่งประกอบด้วยลักษณะของอาคารและที่ว่างตรงกลาง หลังคาอาคารเป็นหลังคาเอียงเทลงภายในที่ว่างตรงกลาง โดยที่ระยะห่างระหว่างอาคารที่น้อยที่สุดเป็น 4 เมตร ตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 55 พ.ศ. 2550 ว่าด้วยการก่อสร้างอาคารที่มีช่องเปิดสูงไม่เกิน 9 เมตร ต้องมีระยะห่างจากเขตที่ดินไม่น้อยกว่า 2 เมตร และหากมีการก่อสร้างมากกว่า 1 หลังบนที่ดินเจ้าของเดียวกัน ผนังที่มีช่องเปิดหรือระเบียงจะต้องอยู่ห่างกัน ไม่น้อยกว่า ๔ เมตร



ภาพที่ 3 - 10 โมเดลอาคารที่ใช้ในการจำลอง CFD

3.4.2 การกำหนดค่าตัวแปรเพื่อนำเข้าข้อมูลในการจำลอง

การจำลองทำในสภาพ steady state โดยที่มีอิทธิพลของการเกิดแรงลอยตัวของอากาศ โดยที่มีการกำหนดค่าต่างๆต่อไปนี้

- 1) ข้อมูลเบื้องต้นของโครงการและรายละเอียดทั่วไป
- 2) กำหนดขอบเขตด้วยขนาดและจำนวนเซลล์ตามแกน x และ แกน y

```

nx=144; ny=76; nz=1
grid(x, 1,12,pow,0.0,12.0)
grid(x, 13,132,pow,0.0,24.0)
grid(x, 133,144,pow,0.0,12.0)
grid(y, 1,4,pow,0.0,4.0)
grid(y, 5,64,pow,0.0,12.0)
grid(y, 65,76,pow,0.0,12.0)
# grid(z, 1,10,pow,0.0,50.0)

```

ภาพที่ 3 - 11 ตัวอย่างการกำหนดขอบเขตเซลล์ในโปรแกรม HEATX

- กำหนดจำนวนเซลล์ทั้งหมดที่ใช้จำลองมีพื้นที่เท่ากับ 144 เซลล์ทางแกน x และ 76 เซลล์ทางแกน 1 เซลล์ทางแกน Z เนื่องจากการจำลองแบบ 2 มิติ

- กำหนดขนาดความกว้างของเซลล์ แสดงถึงความละเอียดในการใช้เซลล์แต่ละช่วง ช่วงที่มีการกำหนดโมเดลกรณีศึกษาลงไปจะมีความละเอียดมาก ส่วนเซลล์ที่อยู่ห่างจากโมเดลที่ศึกษาไม่จำเป็นต้องใช้ความละเอียดมาก เพื่อประหยัดทรัพยากรในการคำนวณในงานวิจัยนี้จึงแบ่งการกำหนดระยะเซลล์ตามแนวแกน x เป็น 3 ช่วง ตั้งแต่เซลล์ที่ 1-12 เทียบเท่ากับระยะจริงเท่ากับ 12 เมตร เซลล์

ที่ 13-132 เทียบเท่าระยะจริงเท่ากับ 24 เมตร และเซลล์ที่ 13-144 เทียบเท่าระยะจริงเท่ากับ 12 เมตร และแบ่งการกำหนดระยะตามแนวแกน y ในลักษณะเดียวกัน

3) ค่า Parameter เพื่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และจำนวนครั้งในการประมวลผลจะมีผลต่อความละเอียดและระยะเวลาในการคำนวณ

```
# RELAXATION
relaxln(p)=0.01
relaxdt(u,v,w)=5.0e-3
relaxdt(ke,ep)=5.0e-3
#relaxdt(h)=1.0e-1

# ITERATION COUNTS
nitphi(p)=20
nitphi(u,v,w)=1
nitphi(ke,ep)=1
nitphi(h,ht1)=1
epsphi(h)=1.0e+5
nital=5000
```

ภาพที่ 3 - 12 ตัวอย่างการกำหนด Parameter ของโปรแกรม HEATX

Parameter ในการคำนวณ แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ รายละเอียดในการประมวลผล และระยะเวลาในการประมวลผล

- รายละเอียดในการประมวลผลของแต่ละตัวแปร(Relaxation) หากกำหนดให้มีค่ามาก ความถูกต้องแม่นยำจะมีมากขึ้น แต่ก็จะทำให้โปรแกรมหยุดประมวลผลได้ง่ายเมื่อโมเดลมีความซับซ้อนมากขึ้นเนื่องจากไม่สามารถคำนวณค่าที่ถูกต้องต่อไปได้อีก

- ระยะเวลาในการคำนวณของแต่ละตัวแปร สามารถกำหนดให้ใช้เวลาในการคำนวณในแต่ละตัวแปรมากขึ้นเมื่อโมเดลมีความซับซ้อนมากขึ้น ทดแทนการลดรายละเอียดในการคำนวณ เพื่อให้โปรแกรมหยุดประมวลผลได้ง่าย รวมทั้งมีการกำหนดจำนวนครั้งในการประมวลผล ยิ่งมากยิ่งขึ้น เกิดความแม่นยำใกล้เคียงสภาพจริงมากยิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ที่ 5000 ครั้ง

4) กรอบอาคาร โดยมีการกำหนดความทึบโปร่ง และอุณหภูมิที่ผิวของกรอบอาคารในส่วนที่เป็นหลังคา

```

# INITIAL CONDITIONS
bdyc(1,ke,set,cell,0.0,0.0013,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)
bdyc(1,ep,set,cell,0.0,0.000003,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)
bdyc(0,h,set,cell,0.0,23540,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)
#zone1
bdyc(1,por,set,cell,0.0,0.0,1,104,1,4,1,1,0,0)#1
bdyc(1,por,set,cell,0.0,0.0,23,42,5,5,1,1,0,0)#2
bdyc(1,por,set,cell,0.0,0.0,22,22,11,21,1,1,0,0)#2
...
#SURFACE TEMPERATURE
bdyc(0,h,walfn,north,0.0,13500,17,18,25,25,1,1,1,1) #2roofDN
bdyc(0,h,walfn,north,0.0,13500,19,21,24,24,1,1,1,1) #2roofDN
bdyc(0,h,walfn,north,0.0,13500,23,26,23,23,1,1,1,1) #2roofDN
...

```

ภาพที่ 3 - 13 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติกรอบอาคารของโปรแกรม HEATX

5) กำหนดค่าความเร็วลมและอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก

```

# BOUNDARY CONDITIONS
bdyc(2,p, inflow,west,2.04,1.0,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,u, inflow,west,2.04,0.001,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,v, inflow,west,0.000,0.0,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,ke,inflow,west,2.04,0.0013,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,ep,inflow,west,2.04,0.000003,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,h, inflow,west,2.04,23540,1,1,5,ny,1,1,1,1)
...

```

ภาพที่ 3 - 14 ตัวอย่างการกำหนดคุณสมบัติของบรรยากาศภายนอกของโปรแกรม HEATX

3.4.3 ตัวแปรในการวิจัย

ตัวแปรต้น	ตำแหน่งช่องเปิดอาคารที่แตกต่างกัน ความสูงของอาคารและสัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคาร
ตัวแปรตาม	อุณหภูมิภายในเนื้อที่ใช้สอย และอุณหภูมิภายในที่ว่างระหว่างอาคาร เวกเตอร์แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ
ตัวแปรควบคุม	ขอบเขตของการจำลอง ค่า Parameter ทางคณิตศาสตร์และจำนวนครั้งในการคำนวณ การกำหนดค่าอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอก

3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การประเมินประสิทธิภาพของกรณีศึกษา จะพิจารณาจากทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศตามทีแสดงผลเป็นเวกเตอร์ ประกอบกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเนื้อที่ใช้สอยและที่ว่างระหว่างอาคาร

3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

3.5.1 เครื่องมือเก็บข้อมูล

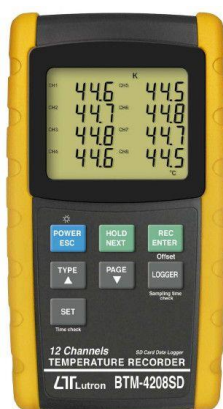
- 1) HOBO U12 Temperature/Relative Humidity/2 External Channel Data Logger - U12-013



ภาพที่ 3 - 15 อุปกรณ์ HOBO U12-013

อุปกรณ์ตรวจและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติในตัว และมีช่องสำหรับเสียบสายวัดอุณหภูมิภายนอกเพิ่มได้อีก 2 ช่อง ตัวเครื่องมีขนาด 58 x 74 x 22 มิลลิเมตร มีความจุข้อมูล 64 kB สามารถเก็บข้อมูลที่บันทึกได้มากที่สุดถึง 43,000 ข้อมูล (12-bit measurements) สามารถกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลได้ตั้งแต่ 1 วินาทีจนถึง 18 ชั่วโมง ทำงานในช่วงอุณหภูมิ -20°C ถึง 70°C ความชื้นสัมพัทธ์ 5% ถึง 95% ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ ในช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 50°C ความชื้นสัมพัทธ์ $\pm 2.5\%$ ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10%-90%

2) Lutron [Temperature Recorder 12 Channels (SD CARD TYPE)] รุ่น BTM-4208SD



ภาพที่ 3 - 16 อุปกรณ์ 12 Channels recorder (ภาพจากเว็บไซต์ตัวแทนจำหน่าย)

อุปกรณ์อ่านค่าและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิอากาศ มีช่องสำหรับเสียบสายวัดอุณหภูมิจำนวน 12 channels รองรับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบ Type K, J, T, E, R, และ S ตัวเครื่องมีขนาด 225 x 125 x 64 มิลลิเมตร มีจอแสดงผลแบบ real time บันทึกข้อมูลลงใน SD card รองรับพื้นที่ความจุของการ์ด 1-16 GB สามารถบันทึกได้ด้วยการตั้งเวลาอัตโนมัติ ตั้งแต่ 1-3,600 วินาที หรือกดบันทึกด้วยมือ ทำงานในช่วงอุณหภูมิ -100°C ถึง 1,300°C ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน $1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ บันทึกในระดับความละเอียด 1°C หรือ 0.1°C

3) สายวัดอุณหภูมิ ชนิด K-General รุ่น GK-03 Type K Thermocouple



ภาพที่ 3 - 17 อุปกรณ์สายวัดอุณหภูมิ รุ่น GK-03 Type K (ภาพจากเว็บไซต์ตัวแทนจำหน่าย)

อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิทั่วไป ความยาว 10 เมตร ช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C ถึง 250°C ผลิตในประเทศไทยได้ทุกวัน

4) Lutron [Solar Power Meter - SD Card Data Logger] รุ่น SPM-1116SD



ภาพที่ 3 - 18 อุปกรณ์ Solar Power Meter

อุปกรณ์อ่านค่าและบันทึกข้อมูลรังสีอาทิตย์แบบ รองรับการวัด Solar Power, Power integration และ Transmission มีจอแสดงผลแบบ real time บันทึกข้อมูลลงใน SD card รองรับพื้นที่ความจุของการ์ด 1-16 GB สามารถบันทึกได้ด้วยการตั้งเวลาอัตโนมัติ ตั้งแต่ 1-3,600 วินาที หรือกดบันทึกด้วยมือ ทำงานในช่วงอุณหภูมิ 0.0-2,000.0 วัตต์ต่อตารางเมตร ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลไม่เกิน ± 10 วัตต์ต่อตารางเมตร

3.5.2 โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

CFD (Computational Fluid Dynamics) เป็นวิธีหนึ่งในการจำลองสภาพการไหลของลม อาศัยการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) ในการแก้สมการสมดุลของมวล อากาศ โมเมนตัม และพลังงาน อีกทั้งยังสามารถแสดงผลออกมาเป็นภาพการไหลเวียนของ อากาศ ทำให้วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมกับงานสถาปัตยกรรมมากกว่าวิธีอื่นที่เคยมีมา ได้แก่ โต๊ะน้ำ และ อุโมงค์ลม ที่ต้องอาศัยการลงทุนที่สูงและใช้ระยะเวลาการเตรียมนานกว่า

ในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรมจำลองการไหลที่ชื่อ HEATX ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Texas Engineering Experiment Station (TEES) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย Texas A&M ประเทศ สหรัฐอเมริกา (ชลธิษฐ์ ถนัดศิลป์กุล, 2546) เป็นเครื่องมือในการศึกษาแนวทางการใช้ประโยชน์จาก ความเย็นที่ผิวหลังคาในเวลากลางคืน

3.5.3 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ

1. จุ่มลงในน้ำเย็น จุ่มลงในน้ำร้อน

นำสายวัดอุณหภูมิชนิด K-General รุ่น GK-03 Type K ต่อกับ Lutron [Temperature Recorder 12 Channels (SD CARD TYPE)] รุ่น BTM-4208SD แล้วนำทุก Channel ที่ใช้ในการ

ทดลองมาจุ่มลงในน้ำเย็นอุณหภูมิ 2-5°C เก็บค่าทุก 10 วินาที เมื่อน้ำมีอุณหภูมิค่อนข้างนิ่งที่อุณหภูมิห้อง ต้มน้ำร้อนเทลงไปให้อ่านค่าได้ประมาณ 70°C คนให้ทั่วภาชนะ รอให้น้ำนิ่ง ให้ทุก channel เก็บค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งกลับมาเป็นปกติที่อุณหภูมิห้อง พบความแตกต่างของแต่ละ channel ไม่เกิน 0.2°C



ภาพที่ 3 - 19 การนำหัววัดอุณหภูมิจุ่มลงในน้ำเย็นและน้ำร้อน

2. ทดสอบโดยเก็บข้อมูลภายใต้สภาวะเดียวกัน

สำหรับอุปกรณ์ที่นำมาเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ไม่สามารถนำไปจุ่มลงในน้ำได้ ได้แก่ HOBO U12 Temperature/Relative Humidity/2 External Channel Data Logger - U12-013 ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดย นำมาวางเก็บข้อมูลในบริเวณเดียวกันกับ Lutron [Temperature Recorder 12 Channels (SD CARD TYPE)] รุ่น BTM-4208SD และนำข้อมูลอุณหภูมิที่เก็บได้มาทำการกระจายและหาความสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์เก็บข้อมูลแต่ละตัว และใช้สมการความสัมพันธ์นั้นเพื่อปรับค่าอุณหภูมิที่เก็บได้จากอุปกรณ์แต่ละตัวให้มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 3 - 20 การเก็บข้อมูลภายใต้สภาวะเดียวกัน

บทที่ 4

ผลการเก็บข้อมูลด้วยกล้องทดลองและการอภิปรายผล

4.1 ผลการเก็บข้อมูล

4.1.1 การเก็บข้อมูลด้วยกล้องทดลอง

การเก็บข้อมูลกับกล้องทดลอง เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาตัวแปรเรื่องสีหลังคาที่แตกต่างกัน มีกล้องทดลองจำนวน 4 กล้อง ได้แก่ กล้องควบคุม กล้องระบบหลังคาต้นแบบสีเงิน กล้องระบบหลังคาต้นแบบสีขาว และกล้องระบบหลังคาต้นแบบสีดำ ซึ่งแต่ละกล้องจะมีข้อมูลอุณหภูมิ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ผิวด้านบนของหลังคา (Ts) อุณหภูมิอากาศในช่องใต้หลังคา (Tr) และอุณหภูมิมากลางกล้อง (Tc) เปรียบเทียบกับข้อมูลบรรยากาศภายนอก ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มของรังสีอาทิตย์ในเวลากลางวัน จะทำการเก็บข้อมูลทุก 10 นาที โดยทำการเก็บข้อมูล ตั้งแต่วันที่ 23-26 ธันวาคม 2556

4.1.2 ผลการเก็บข้อมูล

แสดงผลดังตารางและกราฟต่อไปนี้

ตารางที่ 4 - 1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในวันที่ทำการทดลอง

		อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
		Max	Min	AV	Max	Min	AV
วันที่ 1	9:00-19:00	28.32	23.88	26.90	62.73	46.07	52.39
	19:00-9:00	26.61	24.48	25.32	68.35	54.92	62.23
วันที่ 2	9:00-19:00	28.63	24.96	27.37	64.12	42.17	48.78
	19:00-9:00	27.08	23.19	25.08	63.13	50.35	56.30
วันที่ 3	9:00-19:00	27.98	24.23	26.67	58.88	41.81	47.50
	19:00-9:00	26.10	23.35	24.70	68.04	50.92	58.72

ตารางที่ 4 - 2 ผลการบันทึกอุณหภูมิกล่องควบคุม

		อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	กล่องควบคุม		
				Ts (°C)	Tr (°C)	Tc (°C)
ทั้งวัน	Maximum	28.63	68.35	52.40	37.70	33.30
	Minimum	23.19	41.81	15.90	17.80	19.40
	Average	25.84	55.13	27.03	25.70	25.66
กลางคืน	Maximum	27.08	68.35	27.30	26.30	27.00
	Minimum	23.19	50.35	15.90	17.80	19.40
	Average	25.01	59.15	20.75	22.30	23.03
กลางวัน	Maximum	28.63	64.12	52.40	37.70	33.30
	Minimum	23.88	41.81	22.70	24.60	24.00
	Average	26.98	49.55	35.74	30.44	29.33

ตารางที่ 4 - 3 ผลการบันทึกอุณหภูมิกล่องต้นแบบหลังคาสีเงิน

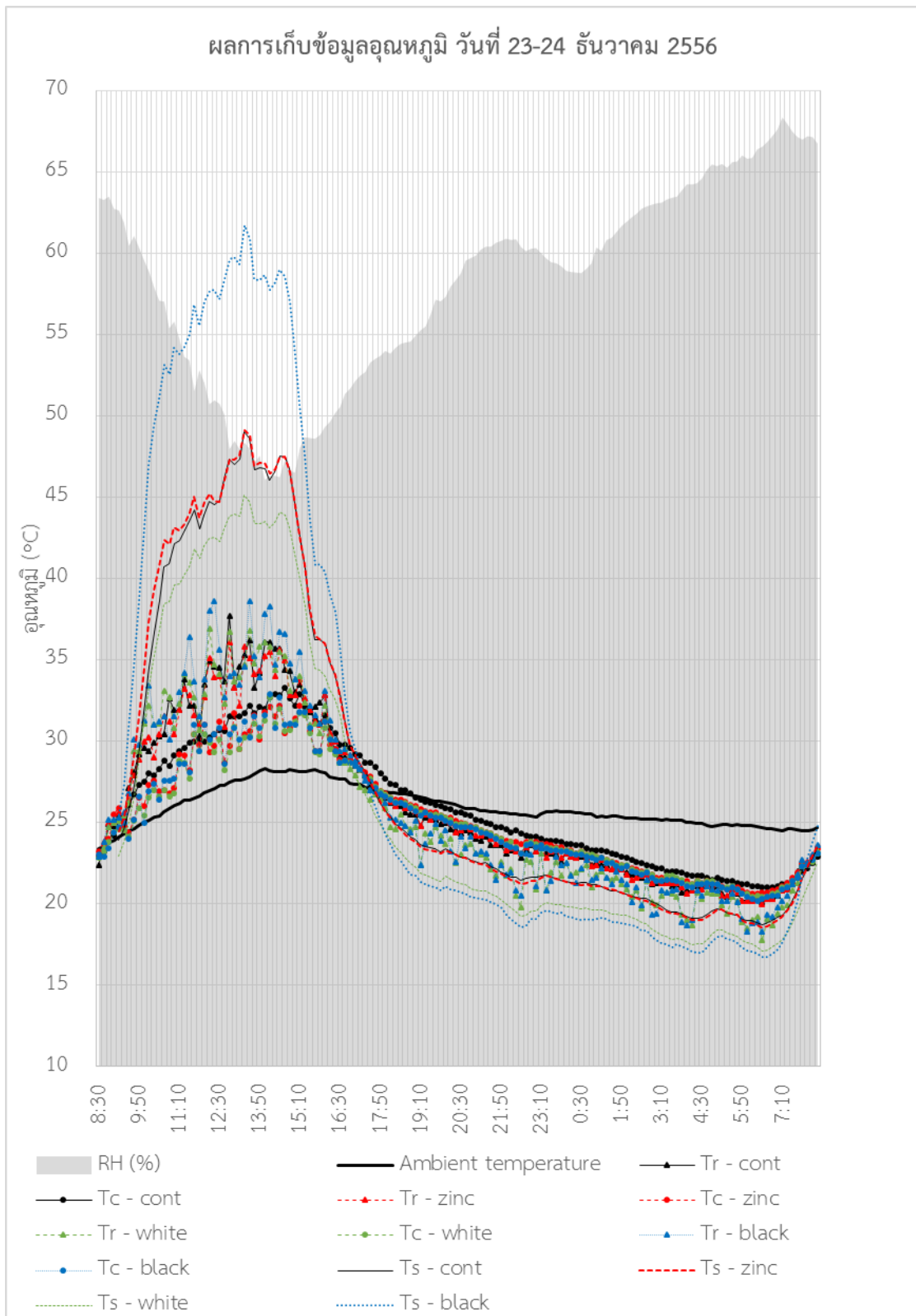
		อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	กล่องต้นแบบหลังคาสีเงิน		
				Ts (°C)	Tr (°C)	Tc (°C)
ทั้งวัน	Maximum	28.63	68.35	52.10	36.30	32.40
	Minimum	23.19	41.81	15.50	17.30	18.70
	Average	25.84	55.13	27.09	25.70	25.37
กลางคืน	Maximum	27.08	68.35	27.90	26.10	26.50
	Minimum	23.19	50.35	15.50	17.30	18.70
	Average	25.01	59.15	20.70	22.30	22.77
กลางวัน	Maximum	28.63	64.12	52.10	36.30	32.40
	Minimum	23.88	41.81	22.70	24.50	24.40
	Average	26.98	49.55	35.95	30.45	29.01

ตารางที่ 4 - 4 ผลการบันทึกอุณหภูมิกล่องต้นแบบหลังคาสีขาว

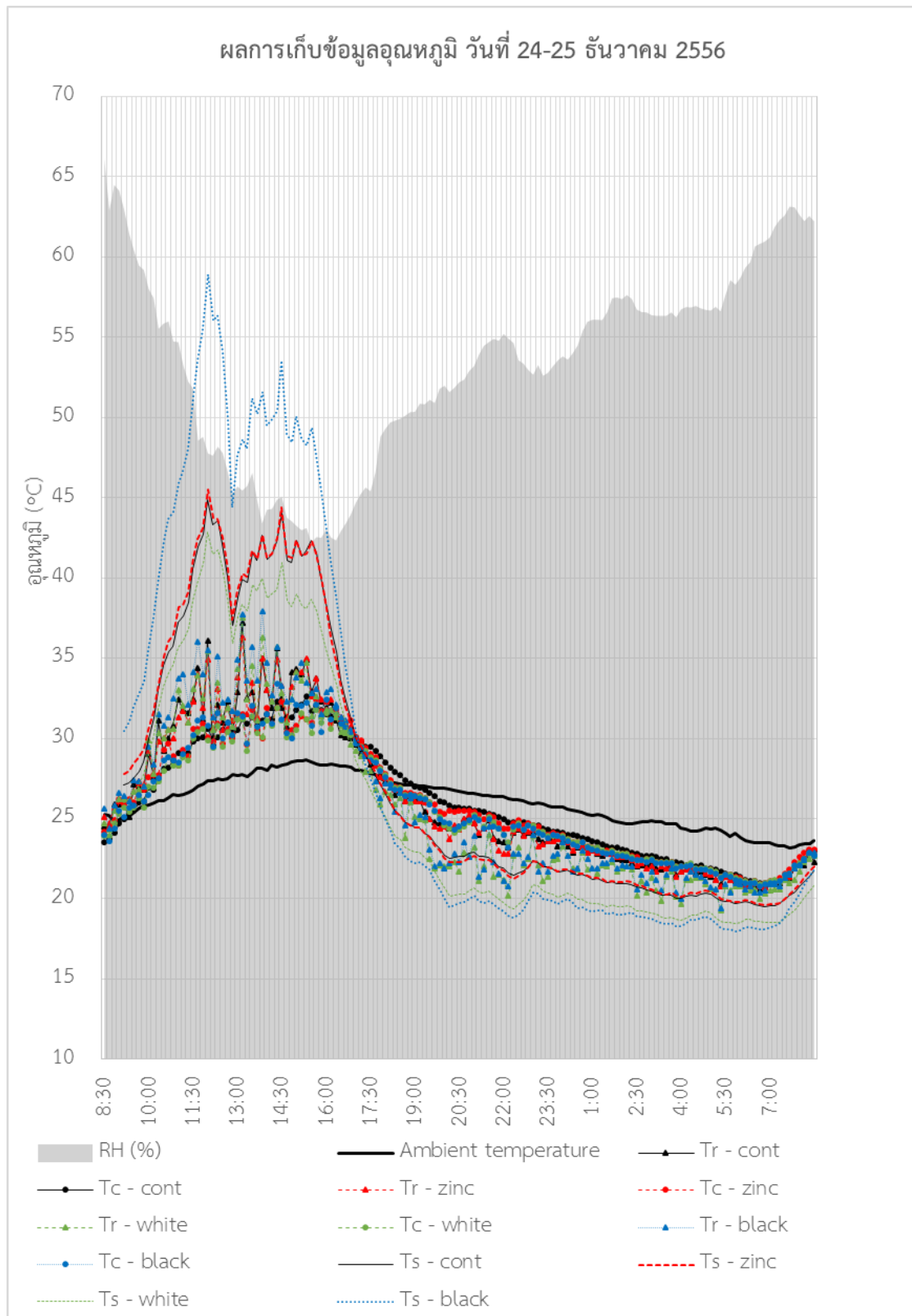
		อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	กล่องต้นแบบหลังคาสีขาว		
				Ts (°C)	Tr (°C)	Tc (°C)
ทั้งวัน	Maximum	28.63	68.35	47.60	37.50	32.70
	Minimum	23.19	41.81	14.20	15.40	18.10
	Average	25.84	55.13	25.25	24.94	25.10
กลางคืน	Maximum	27.08	68.35	26.30	26.20	26.40
	Minimum	23.19	50.35	14.20	15.40	18.10
	Average	25.01	59.15	19.09	21.06	22.56
กลางวัน	Maximum	28.63	64.12	47.60	37.50	32.70
	Minimum	23.88	41.81	21.20	23.30	24.10
	Average	26.98	49.55	33.81	30.37	28.66

ตารางที่ 4 - 5 ผลการบันทึกอุณหภูมิกล่องต้นแบบหลังคาสีดำ

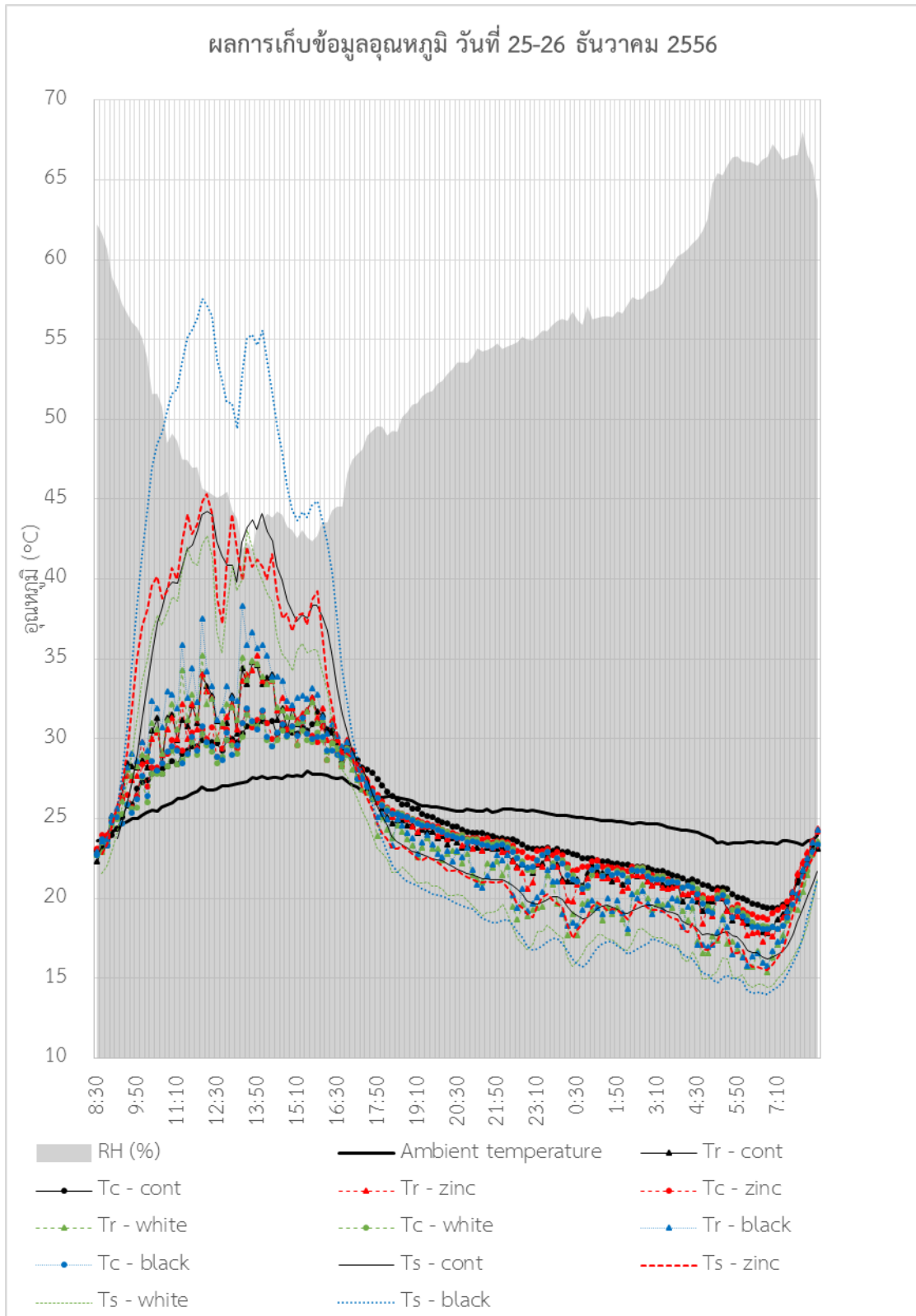
		อุณหภูมิบรรยากาศ (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	กล่องต้นแบบหลังคาสีดำ		
				Ts (°C)	Tr (°C)	Tc (°C)
ทั้งวัน	Maximum	28.63	68.35	67.30	38.60	33.40
	Minimum	23.19	41.81	13.50	15.80	18.10
	Average	25.84	55.13	28.64	25.39	25.14
กลางคืน	Maximum	27.08	68.35	31.10	26.60	26.40
	Minimum	23.19	50.35	13.50	15.80	18.10
	Average	25.01	59.15	18.93	21.27	22.47
กลางวัน	Maximum	28.63	64.12	67.30	38.80	34.00
	Minimum	23.88	41.81	20.10	23.20	24.00
	Average	26.98	49.55	42.31	31.32	29.19



แผนภูมิที่ 4 - 1 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 23-24 ธันวาคม 2556



แผนภูมิที่ 4 - 2 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 24-25 ธันวาคม 2556

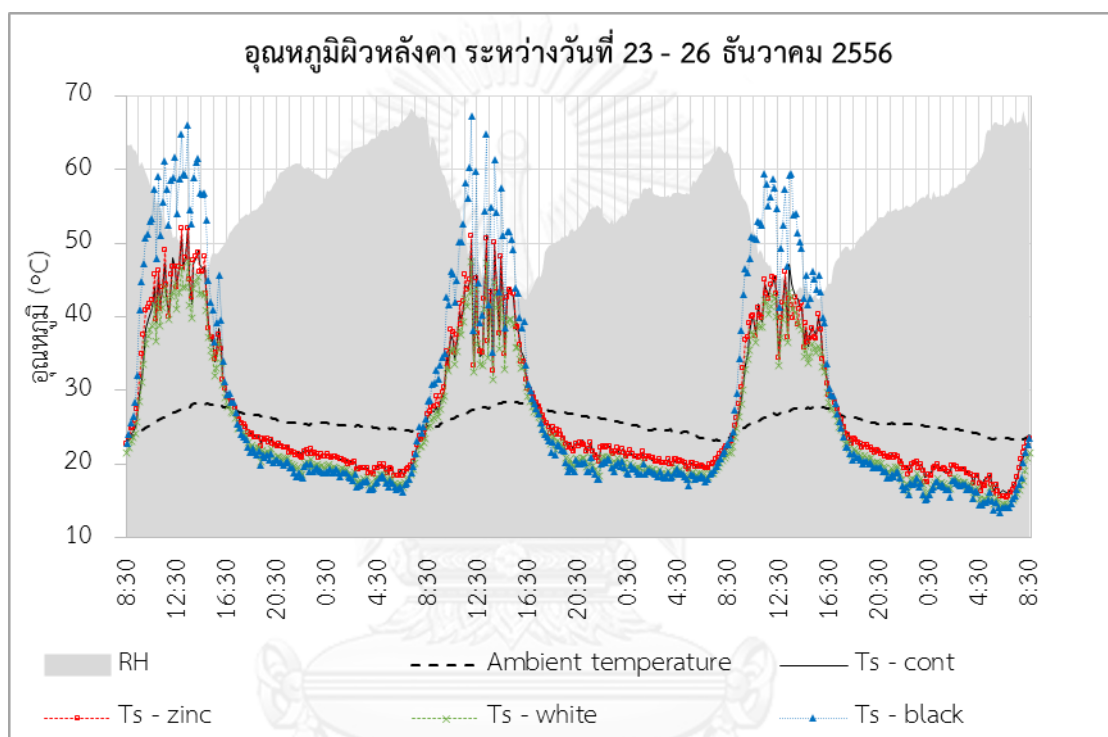


แผนภูมิที่ 4 - 3 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิ วันที่ 25-26 ธันวาคม 2556

4.2 อภิปรายผลการทดลอง

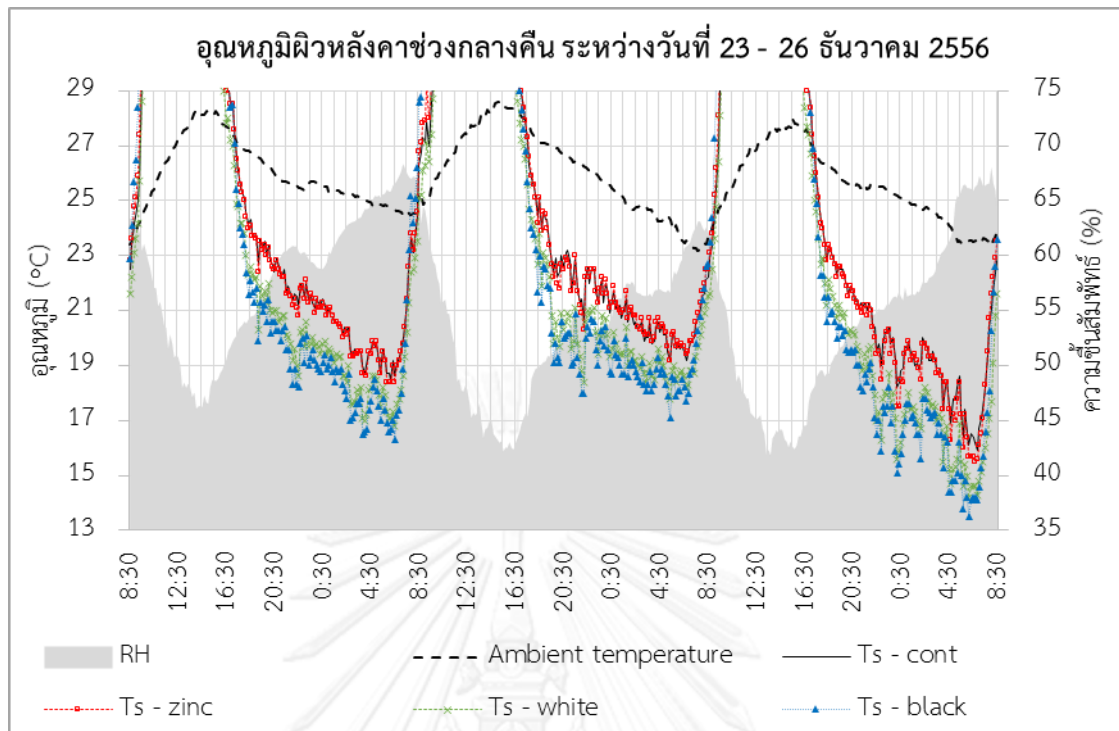
การทดลองจะอภิปรายผลเพื่อศึกษาแนวทางในการพัฒนาระบบหลังการระบายความร้อนให้มีสมรรถนะทางอุณหภูมิสูงที่สุด โดยประเมินจากความสามารถในการลดอุณหภูมิภายใน และความสามารถในการทำให้เกิดความเย็นจากการใช้หลังคาสีต่างๆกัน

4.2.1 อุณหภูมิผิวด้านบนของหลังคา



แผนภูมิที่ 4 - 4 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคา ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556

ผลการบันทึกข้อมูลตลอดทั้งวัน ตามแผนภูมิที่ 4 - 4 พบว่ามีความแตกต่างกัน 4 ช่วง ได้แก่ ในช่วงเช้าเวลา 7:00-10:00 น. ตรงกับเวลาที่ดวงอาทิตย์กำลังเคลื่อนพ้นขอบฟ้า เป็นช่วงที่หลังคาทุกสีมีอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตราเร็วที่มากที่สุด โดยที่สีเงินและสีขาวมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยอัตราเร็วใกล้เคียงกันประมาณ 4.2-5.4°C ต่อชั่วโมง ส่วนสีดำมีอัตราเร็วมากกว่าสองสีแรก โดยมีค่าประมาณ 6.6-9.0°C ต่อชั่วโมง ช่วงกลางวัน เวลา 10:00-16:00 น. อุณหภูมิผิวหลังคาแปรเปลี่ยนตามความเข้มของรังสีอาทิตย์ และลดอุณหภูมิลงค่อนข้างเร็วในช่วงเวลา 16:00-18:00 น. ตรงกับช่วงที่ดวงอาทิตย์กำลังจะลับขอบฟ้า ในอัตราเร็วประมาณ 6.6-8.4°C ต่อชั่วโมงสำหรับสีดำ และ 4.2-5.1°C ต่อชั่วโมงสำหรับสีขาวและสีเงิน แล้วอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงในช่วง 18:00-6:00 น. หลังจากนั้นจะเริ่มสูงขึ้นอีกครั้งตามการปรากฏของดวงอาทิตย์ในวันใหม่

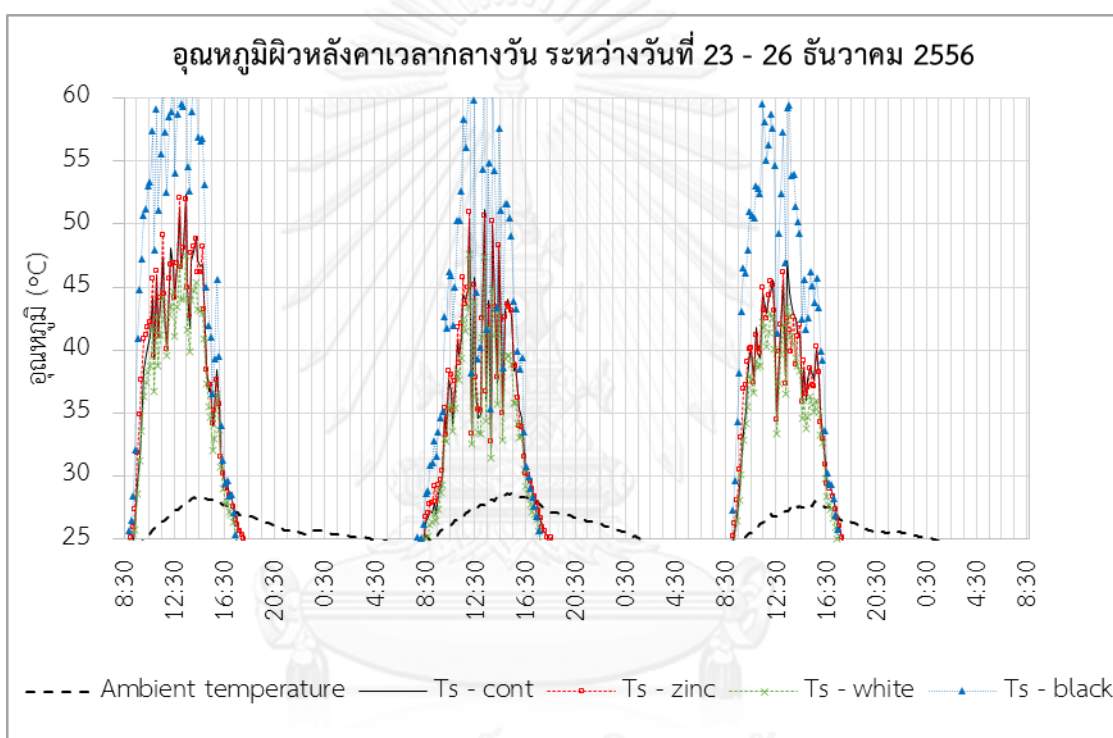


แผนภูมิที่ 4 - 5 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคาเวลากลางคืน
ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556

อุณหภูมิผิวหลังคาในเวลากลางคืนจะต่ำลงจากอุณหภูมิบรรยากาศ โดยที่มีความแตกต่างกัน 3 แบบ ตามสีของหลังคา ตามแผนภูมิที่ 4 - 5 เริ่มมีความแตกต่างกันในเวลาประมาณ 17:30 น. สีที่มีอุณหภูมิต่ำลงจากบรรยากาศมากที่สุด คือ สีดำ ต่ำกว่าบรรยากาศประมาณ 2°C รองลงมาเป็นสีขาว ต่ำลงจากอุณหภูมิบรรยากาศประมาณ 2°C เช่นกัน ส่วนสีเงินทั้งกล่องควบคุมและกล่องต้นแบบมีอุณหภูมิเท่ากัน มีอุณหภูมิต่ำลงจากบรรยากาศน้อยที่สุดประมาณ 1°C

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวหลังคาและอุณหภูมิบรรยากาศในเวลากลางคืน เกิดขึ้นมากที่สุดในเวลา 00:10 น. ของวันที่ 26 ธันวาคม 2556 โดยที่บรรยากาศภายนอกมีอุณหภูมิ 25.2°C หลังคาสีดำมีอุณหภูมิ 15.1°C ต่ำกว่าบรรยากาศประมาณ 10.1°C หลังคาสีขาวมีอุณหภูมิ 15.6°C ต่ำกว่าบรรยากาศประมาณ 9.6°C และหลังคาสีเงินมีอุณหภูมิ 17.5°C ต่ำกว่าบรรยากาศประมาณ 7.7°C พบว่า ความสามารถในการเย็นตัวของอุณหภูมิผิวหลังคา มีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน (Emissivity) ของหลังคา ซึ่งหลังคาสีดำเป็นวัสดุสีเข้ม มีค่า Emissivity สูงที่สุด หลังคาสีขาวรองลงมา และต่ำสุดคือหลังคาสีเงิน เนื่องจากมีความมันวาว

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในประเทศไทยที่ผ่านมา ค่าที่ได้นี้แสดงประสิทธิภาพที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของจอมภพ แวศักดิ์ และคณะ (2542) และงานวิจัยของ J. Khedari (2000) ที่ลดอุณหภูมิลงจากบรรยากาศลงได้เพียง 1-6°C อาจเป็นผลมาจากมวลสารของวัสดุหลังคาที่ใช้ทำการทดลอง ในการทดลองนี้วัสดุหลังคามีมวลสารน้อยกว่าวัสดุตัวอย่างทุกชนิดในการทดลองของ J. Khedari จึงอาจเป็นเหตุให้ลดอุณหภูมิได้มากกว่า และมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองของ Treemorn Prommajak และคณะ (2008) ซึ่งมีเงื่อนไขแตกต่างกันที่ตัวแผ่รังสีทำจากอลูมิเนียมทาสีดำ ลดอุณหภูมิลงจากบรรยากาศได้เพียง 5°C



แผนภูมิที่ 4 - 6 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวหลังคาเวลากลางวัน
ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556

ในเวลากลางวัน พบการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิผิวหลังคา 3 แบบ ตามสีของหลังคาเช่นกัน โดยสีที่มีอุณหภูมิสูงกว่าสีอื่นๆ คือ สีดำ รองลงมาคือสีเงิน และเย็นที่สุดคือสีขาว พบความแตกต่างจากอุณหภูมิบรรยากาศมากที่สุด ในเวลา 12:00 น. ของวันที่ 24 ธันวาคม 2556 หลังคาสีดำมีอุณหภูมิ 67.3°C สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกประมาณ 40°C หลังคาสีเงินมีอุณหภูมิ 51°C สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกประมาณ 24°C และหลังคาสีขาวมีอุณหภูมิ 47.6°C สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกประมาณ 20°C

ค่าที่ได้จากการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (Absorption) ของวัสดุ หลังคาสีดำซึ่งมีสีเข้มจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนสูงที่สุด ทำให้อุณหภูมิผิวของหลังคาขึ้นไปสูงที่สุด รองลงมาเป็นสีเงิน และหลังคาสีขาวมีสีอ่อนที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนต่ำที่สุด จึงทำให้อุณหภูมิผิวของหลังคาสูงขึ้นในปริมาณที่น้อยที่สุด หลังได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์

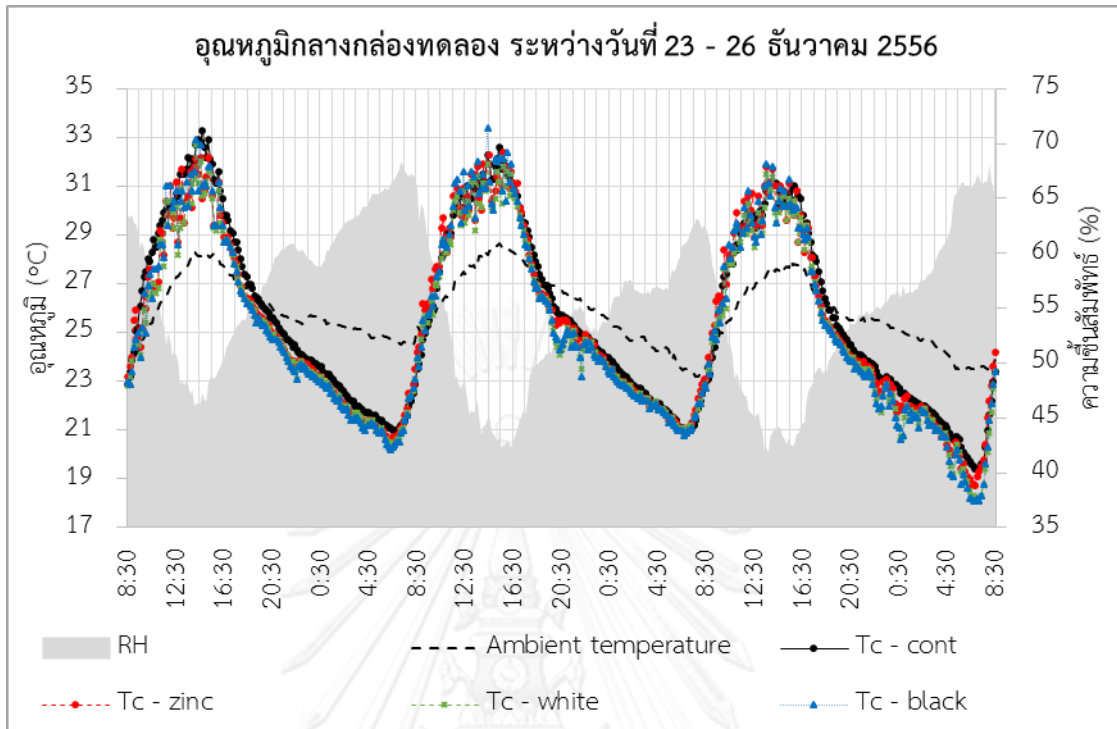
4.2.2 อุณหภูมิในช่องใต้หลังคา

อุณหภูมิในช่องใต้หลังคาได้รับอิทธิพลโดยตรงจากอุณหภูมิของแผ่นหลังคา มีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิหลังคาและอุณหภูมิกกลางกล่อง โดยที่ในเวลากลางวัน อุณหภูมิในช่องใต้หลังคาสีดำเย็นลงกว่าบรรยากาศมากที่สุดประมาณ 7.74 °C และเวลากลางวัน อุณหภูมิในช่องใต้หลังคาสีดำร้อนขึ้นกว่าบรรยากาศมากที่สุดประมาณ 11.54 °C

ตารางที่ 4 - 6 อุณหภูมิในช่องใต้หลังคาเทียบกับผิวหลังคาและบรรยากาศภายนอก

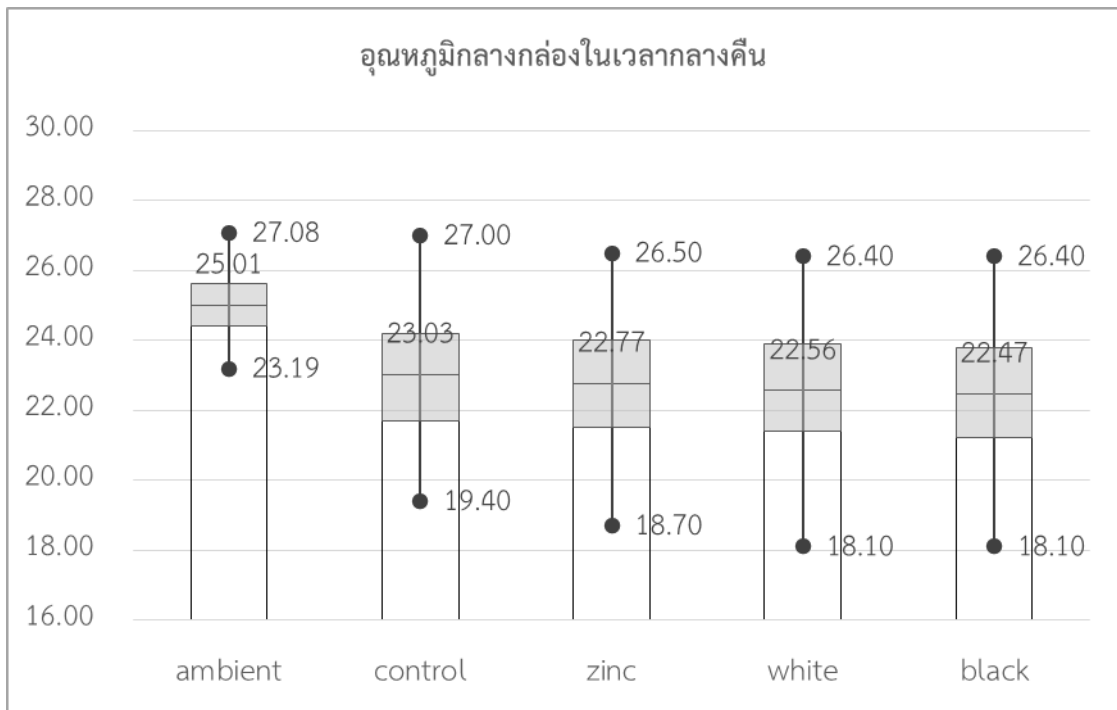
	อุณหภูมิภายนอก (°C)			ผลต่างอุณหภูมิระหว่าง ช่องใต้หลังคา กับ ผิวหลังคา (°C)		ผลต่างอุณหภูมิระหว่าง ช่องใต้หลังคา กับ ภายนอก (°C)		
	max	min	av	max	av	max	av	
กลางคืน	ควบคุม			+2.90	+1.55	-5.68	-2.71	
	สีเงิน			+2.90	+1.60	-6.22	-2.71	
	สีขาว	27.08	23.19	25.01	+3.70	+1.96	-8.08	-3.95
	สีดำ				+4.50	+2.34	-7.74	-3.74
กลางวัน	ควบคุม			-17.10	-5.29	+10.25	+3.46	
	สีเงิน			-16.30	-5.50	+8.65	+3.47	
	สีขาว	28.63	23.88	26.98	-12.80	-3.44	+9.92	+3.38
	สีดำ				-31.80	-10.95	+11.54	+4.17

4.2.3 อุณหภูมิกลางกล่อง

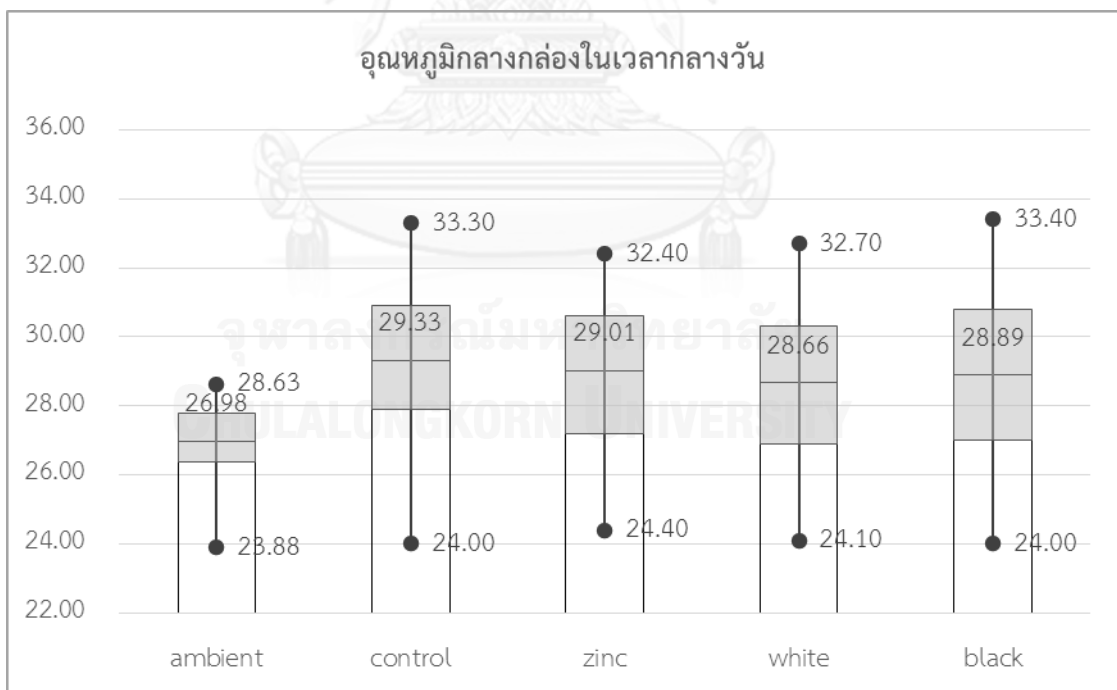


แผนภูมิที่ 4 - 7 ผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิกลางกล่องทดลอง ระหว่างวันที่ 23 - 26 ธันวาคม 2556

อุณหภูมิที่กลางกล่องทดลองทุกกล่อง จะสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกในเวลากลางวัน และต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกในเวลากลางคืน โดยในช่วงเย็นอุณหภูมิกลางกล่องควบคุมจะลดต่ำลงจนเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก (กราฟอุณหภูมิภายนอกและอุณหภูมิกลางกล่องตัดกัน) ในเวลาประมาณ 19:00 น. ส่วนในกล่องต้นแบบทั้งสามกล่อง อุณหภูมิภายในจะลดต่ำลงจนเท่ากับอุณหภูมิภายนอกเร็วกว่ากล่องควบคุมประมาณ 1 ชั่วโมง คือ กราฟจะตัดกันในเวลาประมาณ 18:00 น. อาจเป็นผลมาจากกล่องต้นแบบมีการระบายอากาศร้อนออกได้ดีกว่า ไม่เกิดการสะสมความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในลดลงได้เร็วขึ้นหลังจากดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า ส่วนในเวลาเช้า อุณหภูมิภายในกล่องควบคุมและกล่องต้นแบบจะต่ำที่สุดในเวลาประมาณ 7:30 น. และเริ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงกันทุกกล่องและเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกในเวลาใกล้เคียงกันประมาณ 9:00 น. เนื่องจากเงื่อนไขในการใช้งานที่เหมือนกัน การเปิดช่องเปิดในเวลาเดียวกัน ทำให้อากาศภายนอกที่เริ่มร้อนขึ้นจากการรับรังสีอาทิตย์ไหลเข้าไปภายใน และทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นในเวลาใกล้เคียงกัน และหลังจากนั้นอุณหภูมิในเวลากลางวันของแต่ละกล่องจะเริ่มแตกต่างกันอีกครั้งหนึ่ง



แผนภูมิที่ 4 - 8 การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิกลางกล่องตั้งแต่เวลา 19:00-9:00 น.



แผนภูมิที่ 4 - 9 การกระจายตัวของข้อมูลอุณหภูมิกลางกล่องตั้งแต่เวลา 9:00-19:00 น.

ตลอดทั้งวันอุณหภูมิกลางวันกลางคืนแบบทั้งสามกล่องจะต่ำกว่าอุณหภูมิกลางวันกลางคืน โดยในเวลากลางวันจะเกิดความแตกต่างที่สม่ำเสมอกว่าเวลากลางคืน กล่องที่ลดอุณหภูมิลงต่ำกว่ากล่องควบคุมได้มากที่สุดในเวลากลางวัน ตามที่ปรากฏในแผนภูมิที่ 4 - 8 คือ กล่องต้นแบบหลังคาสีดำนี้อุณหภูมิของผลต่างเท่ากับ 0.56°C รองลงมาคือสีขาว 0.48°C และน้อยที่สุดคือสีเงิน 0.26°C เวลาที่อุณหภูมิกลางวันกลางคืนต่ำสุดจากอุณหภูมิกล่องควบคุมมากที่สุด ในระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้ง 3 วัน คือ ช่วงเช้า 6:40 น. ของวันที่ 26 ธันวาคม 2556 ดังแสดงในตารางที่ 4 - 7

ส่วนในเวลากลางวัน กล่องที่ลดอุณหภูมิลงต่ำกว่ากล่องควบคุมได้มากที่สุด ตามที่ปรากฏในแผนภูมิที่ 4 - 9 คือ กล่องต้นแบบหลังคาสีขาว มีค่าเฉลี่ยของผลต่างเท่ากับ 0.66°C รองลงมาคือสีดำนี้อุณหภูมิของผลต่างเท่ากับ 0.44°C และน้อยที่สุดคือสีเงิน 0.32°C เวลาที่อุณหภูมิกลางวันกลางคืนต่ำสุดจากอุณหภูมิกล่องควบคุมมากที่สุด ในระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้ง 3 วัน คือ ช่วงบ่าย 14:40 น. ของวันที่ 23 ธันวาคม 2556 ดังแสดงในตารางที่ 4 - 8

ตารางที่ 4 - 7 อุณหภูมิกลางวันกลางคืน เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2556 เวลา 6:40 น.

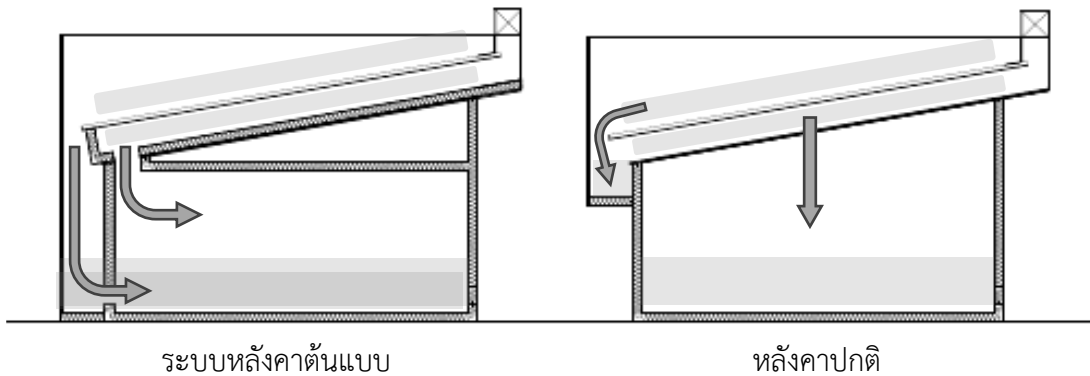
	สีเงิน	สีขาว	สีดำ
อุณหภูมิกลางวันกลางคืน	18.80	18.30	18.10
ลดลงจากอุณหภูมิบรรยากาศ	4.72	5.22	5.42
ลดลงจากกล่องควบคุม	0.70	1.20	1.40

ตารางที่ 4 - 8 อุณหภูมิกลางวันกลางคืน เมื่อวันที่ 23 ธันวาคม 2556 เวลา 14:40 น.

	สีเงิน	สีขาว	สีดำ
อุณหภูมิกลางวันกลางคืน	30.50	30.60	31.00
สูงขึ้นจากอุณหภูมิบรรยากาศ	2.36	2.46	2.86
ลดลงจากกล่องควบคุม	2.80	2.70	2.30

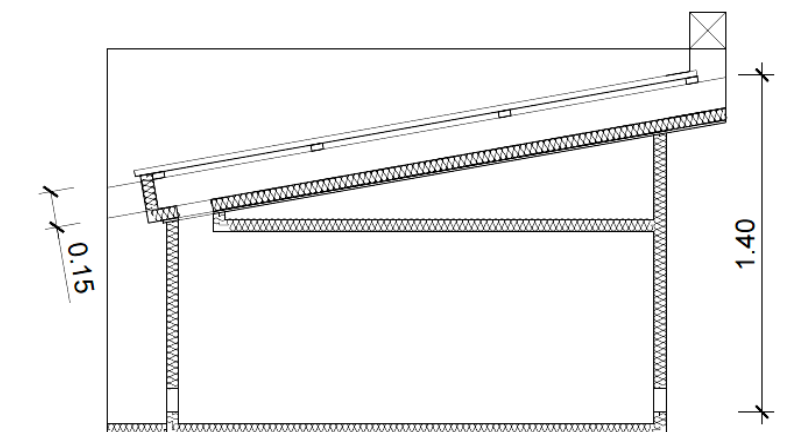
จากตาราง พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างระบบหลังคาต้นแบบในแต่ละสีต่างกันไม่เกิน 0.5°C ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกล่องควบคุมและกล่องต้นแบบ มากเกินกว่า 1°C แสดงว่าการใช้ระบบหลังคาที่แตกต่างกันทำให้อุณหภูมิลดลงได้มากกว่าการใช้ประโยชน์จากสีของหลังคา สาเหตุที่ระบบหลังคาสามารถช่วยลดอุณหภูมิภายในเนื้อที่ที่ใส่สอยได้ดี

ในเวลากลางคืน น่าจะเป็นผลมาจากการที่กล่องหลังคาต้นแบบมีการเปิดให้ความเย็นที่ผิวด้านบนสามารถตกลง และไหลเข้ามาภายในผ่านทางช่องนำอากาศเข้าทางด้านซ้ายได้ (ดูจากภาพที่ 4 - 1) ความเย็นที่เป็นฟิล์มอากาศรอบๆผิวหลังคาในเวลากลางคืนจึงสามารถเข้ามาภายในเนื้อที่ใช้สอยได้มากกว่าเมื่อเทียบกับหลังคาแบบปกติที่ไม่มีการเปิดช่อง ความเย็นที่เข้ามาถึงเนื้อที่ใช้สอยภายในจะมาจากใต้หลังคาเท่านั้น



ภาพที่ 4 - 1 แนวคิดเพื่ออธิบายการทำความเย็นในเวลากลางคืน

ในเวลากลางวัน อุณหภูมิภายในกล่องที่ใช้หลังคาต้นแบบลดลง เนื่องจากฝ้าด้านบนไม่ปิดทึบ ทำให้ไม่มีการสะสมความร้อนภายใน อากาศร้อนที่ลอยตัวขึ้นสูงจึงสามารถระบายออกไปได้ อีกทั้งช่องที่ฝ้านั้นเชื่อมต่อกับที่ว่างใต้หลังคา เมื่อหลังคาได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ก็จะทำให้ช่องว่างใต้หลังคานั้นร้อนขึ้นและลอยสูงขึ้นเพื่อระบายออก เกิดแรงลอยตัวดึงเอาอากาศด้านล่างขึ้นมาแทนที่ ทำให้อากาศร้อนไม่ขังอยู่ภายใน เช่นเดียวกับผลการทดลองของศักดิ์ภักดิ์ ทมทิตชงค์ (2555)



ภาพที่ 4 - 2 ระยะที่ใช้ในการคำนวณอัตราการระบายอากาศ

อัตราการระบายอากาศสามารถคำนวณได้ตามสูตร

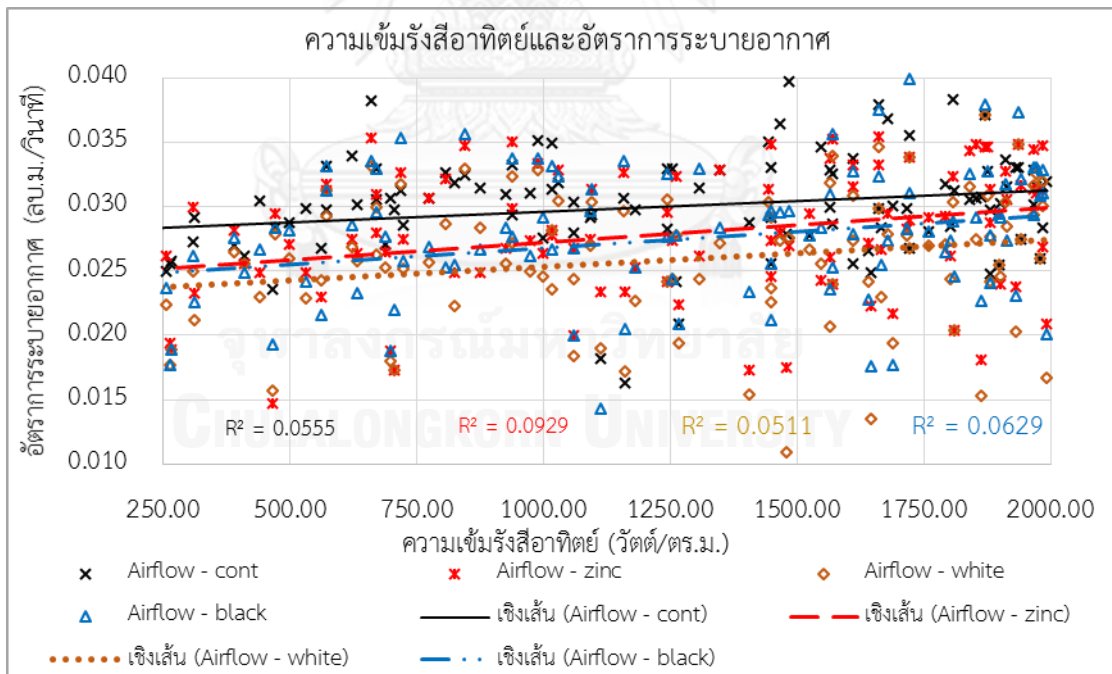
$$V = AC_D[-2g(h-h_{NL})(T_{ia}-T_{oa})/ T_{oa}]^{1/2} \quad \dots(\text{Chirarattananon S., 2005})$$

- เมื่อ V อัตราการระบายอากาศ (m^3/s)
 A พื้นที่หน้าตัดของปล่อง (m^2)
 C_D ค่าสัมประสิทธิ์ (มีค่าเท่ากับ 0.65 ในกรณีอาคารพักอาศัย)
 g อัตราเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโลก (9.8 m/s^2)
 h ความสูงของปล่อง (m)
 h_{NL} ความสูงที่ระดับ Neutral pressure (m)
 T_{ia} อุณหภูมิอากาศภายในปล่อง (K)
 T_{oa} อุณหภูมิอากาศภายนอก (K)

แทนค่า $A = 0.15 \times 0.60 \text{ (m}^2\text{)}$, $h-h_{NL} = 1.40 \text{ (m)}$; จะได้

$$V = (0.15 \times 0.60) (0.65) [-2 (-9.8) (1.40) (T_{ia}-T_{oa})/ T_{oa}]^{1/2}$$

นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์และอัตราการระบายอากาศของระบบหลังคาสี่ด้านได้ ดังนี้



แผนภูมิที่ 4 - 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศและความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์ ตั้งแต่เวลา 10:00-17:00 น.

ตารางที่ 4 - 9 อัตราการระบายอากาศ ตั้งแต่เวลา 9:00-19:00 น.

	อัตราการระบายอากาศเฉลี่ย		อัตราการระบายอากาศสูงสุด	
	³ m/s	ACH	³ m/s	ACH
กล่องควบคุม	0.028	64.79	0.040	92.71
ต้นแบบ หลังคาสีเงิน	0.027	78.40	0.037	108.86
ต้นแบบ หลังคาสีขาว	0.024	70.97	0.037	109.19
ต้นแบบ หลังคาสีดำ	0.026	75.28	0.040	117.45

แม้จะปรากฏว่าหลังคาสีขาวมีอัตราการระบายอากาศที่น้อยที่สุด ในขณะที่อุณหภูมิภายในระบบหลังคาสีขาวมีอุณหภูมิต่ำที่สุด ซึ่งไม่สอดคล้องกับอัตราการระบายอากาศที่คำนวณได้ น่าจะเป็นผลมาจากระยะดึง($h-h_{NL}$) มีค่าน้อยจนทำให้อัตราการระบายอากาศที่คำนวณได้มีค่าน้อยมาก สิ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิภายในจึงมาจากการแผ่รังสีความร้อนของหลังคาลงมายังพื้นที่ใช้สอยเป็นส่วนมาก จึงทำให้กล่องต้นแบบหลังคาสีขาวมีอุณหภูมิภายในต่ำที่สุด

อย่างไรก็ตามระบบหลังคาต้นแบบ ยังคงแสดงอัตราการระบายอากาศที่แปรตามรังสีอาทิตย์ได้ดีขึ้นกว่ากล่องควบคุมในหลังคาที่มีสีเดียวกัน(สีเงิน) น่าจะเป็นผลมาจากการเปิดช่องให้อากาศสามารถไหลเวียนออกได้สะดวก ไม่ขังตัวอยู่ภายใน

4.2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

จากผลการทดลองทั้งสามวัน พบว่าวันที่เกิดผลในเวลากลางคืนได้ดีที่สุด นั่นคือ อุณหภูมิกลางกล่องลดต่ำกว่าอุณหภูมิกำลังควบคุมมากที่สุดคือในคืนที่สาม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิต่ำกว่าวันอื่นๆ ทำให้อุณหภูมิผิวหลังคาต่ำลงได้มากที่สุด

ส่วนคืนที่สามารถเกิดผลได้น้อยที่สุด คือ คืนที่สอง ซึ่งให้อุณหภูมิกลางกล่องลดลงจากกล่องควบคุมค่อนข้างน้อยแม้จะมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิมบรรยากาศที่ต่ำกว่าคืนแรก อาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของลม การที่ลมพัดแรงกว่าจะเข้าไปรบกวนระบบหลังคาต้นแบบ ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพลดลง

สิ่งที่น่าสังเกต คือ การลดลงของอุณหภูมิกำลังกล่องในเวลากลางคืน (แผนภูมิที่ 4 – 7) มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกันทั้ง 3 คืน คือ ระหว่างกลางดึก ในช่วง 22:00-24:00 น. อุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็วอย่างน้อยหนึ่งครั้ง โดยพบว่ามีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่เก็บค่าได้ ซึ่งข้อสังเกตนี้ตรงกันกับรายงานการวิจัยของ Hollick J. (2012) และยังไม่สามารถอธิบายเกี่ยวกับสิ่งที่เกิดขึ้นได้เช่นกัน

บทที่ 5

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และการอภิปรายผล

5.1 การตั้งค่าเริ่มต้นเพื่อจำลองผล

5.1.1 การกำหนดค่าอุณหภูมิบรรยากาศและอุณหภูมิผิวหลังคา

จากผลการเก็บข้อมูลด้วยกล้องทดลอง อุณหภูมิผิวหลังคาสามารถลดต่ำสุดในเวลากลางวันได้ถึง 13.50°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิของหลังคาสีดำ ในขณะที่อุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเท่ากับ 23.54°C (จากข้อมูลวันที่ 26 ธันวาคม 2556 เวลา 06:10 น.) และอุณหภูมิหลังคาสูงที่สุดในเวลากลางวันเป็นอุณหภูมิของหลังคาสีดำเช่นกัน ซึ่งสูงถึง 67.30°C ในขณะที่บรรยากาศภายนอกมีอุณหภูมิเท่ากับ 27.33°C จึงนำค่าเหล่านี้มาใช้เป็นค่าอุณหภูมิผิวหลังคาในการจำลอง

5.1.2 การกำหนดค่าความเร็วลม

การจำลองทำในสภาวะที่บรรยากาศภายนอกมีลมพัดผ่าน จะใช้ค่าความเร็วลมเท่ากับ 2.04 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ยของกรุงเทพมหานครตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537-2547

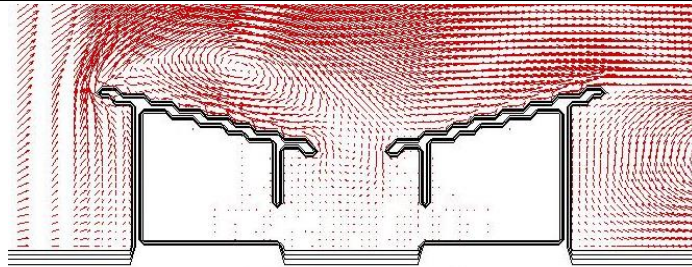
5.2 ผลการจำลองสภาพโดยที่อาคารมีตำแหน่งช่องเปิดแตกต่างกัน

การจำลองสภาพที่มีช่องเปิดแตกต่างกันนี้ เพื่อทดสอบโมเดลแบบอุดมคติตามแนวคิดที่เสนอโดย Trombe (1967) โดยทำการจำลองในภาวะที่มีลมพัดเพื่อดูผลที่เกิดขึ้นจริงเมื่อมีลมพัดผ่านกลุ่มอาคารทั้งในเวลากลางวันและเวลากลางคืน

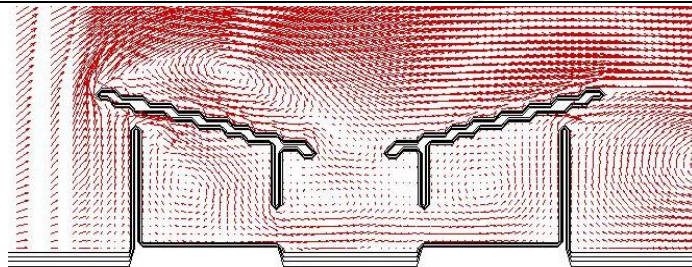
ผลการจำลองในรูปของเวกเตอร์การไหลของอากาศอากาศ แสดงลงตารางที่ 5 – 1 ส่วนผลในรูปของอุณหภูมิอากาศในเวลากลางวันและกลางคืน แสดงลงตารางที่ 5 – 2 และตารางที่ 5 - 3

ตารางที่ 5 - 1 ผลการจำลองแสดงการไหลของลมผ่านกลุ่มอาคารที่มีรูปแบบช่องเปิดต่างกัน

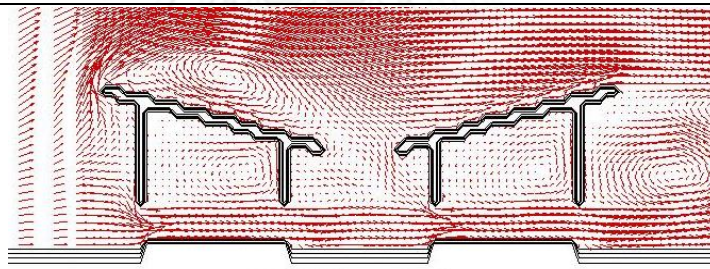
ทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศ



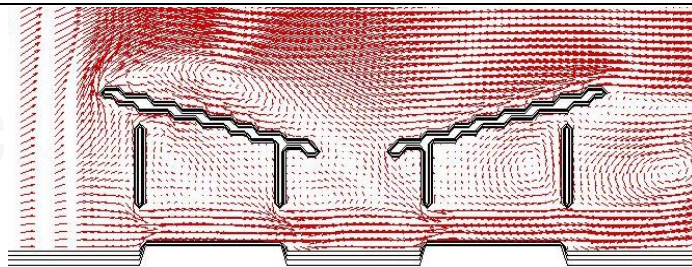
อาคารไม่มีช่องเปิดด้านนอก



อาคารมีช่องเปิดด้านบน



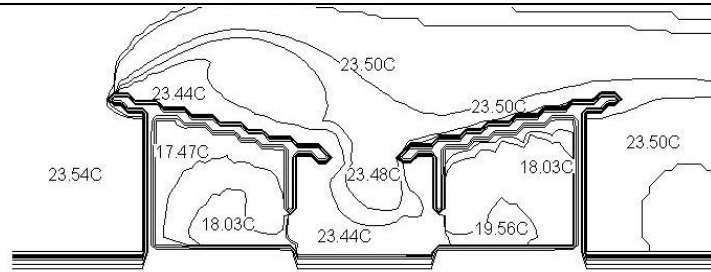
อาคารมีช่องเปิดด้านข้าง



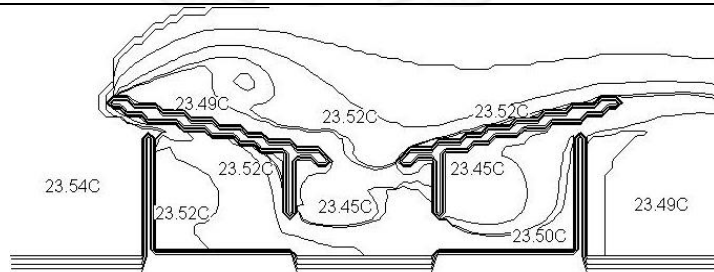
อาคารมีช่องเปิดทั้งบนและข้าง

ตารางที่ 5 - 2 ผลการจำลองแสดงอุณหภูมิในเวลากลางวัน

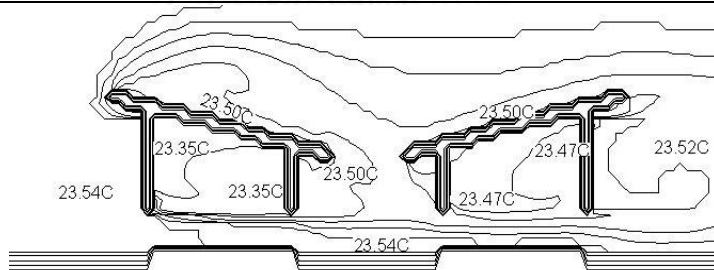
อุณหภูมิอากาศ (°C)



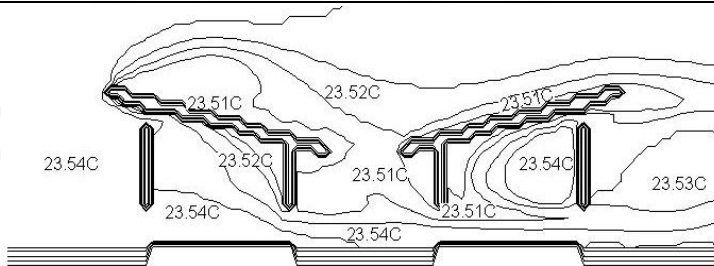
อาคารไม่มีช่องเปิดด้านนอก



อาคารมีช่องเปิดด้านบน

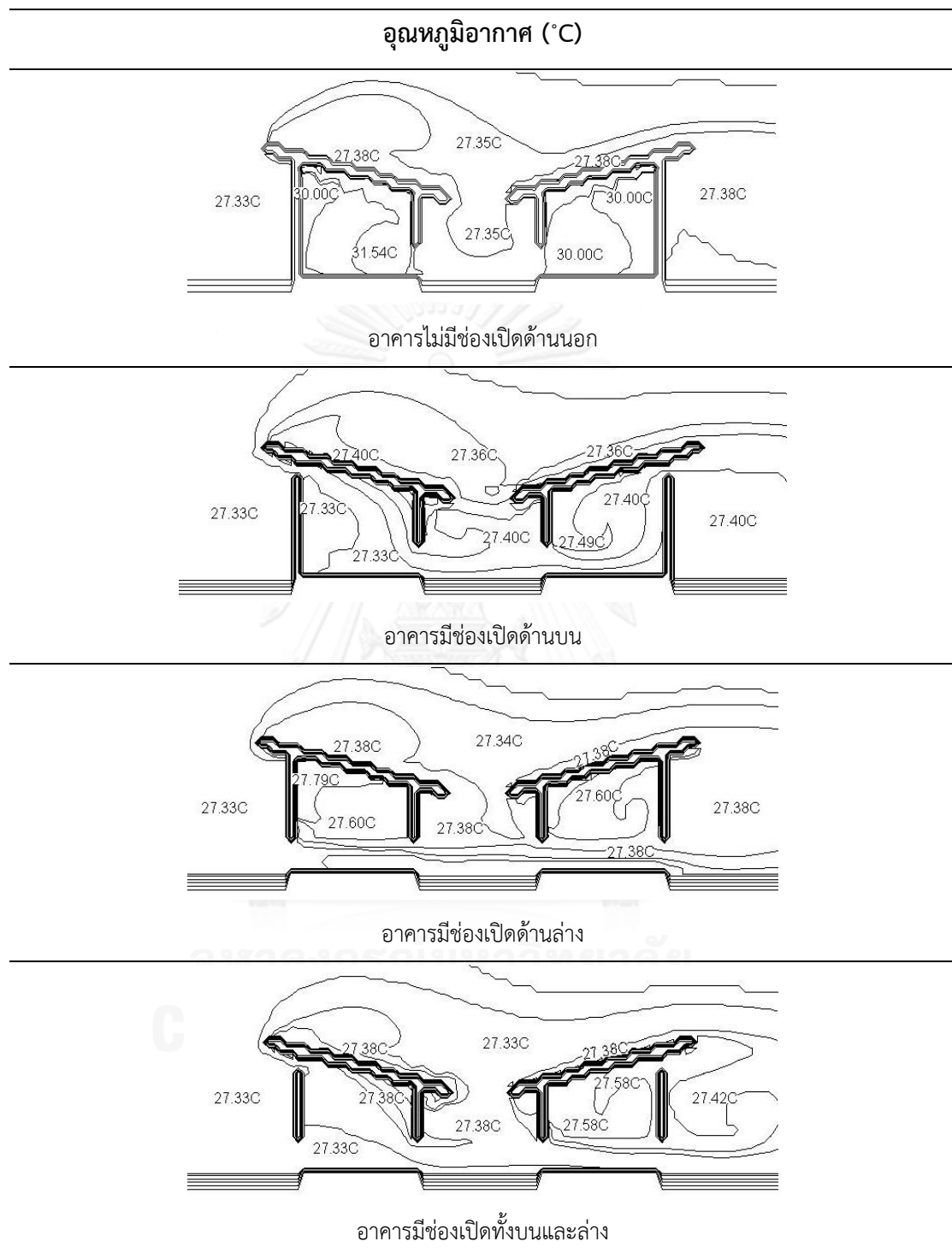


อาคารมีช่องเปิดด้านล่าง



อาคารมีช่องเปิดทั้งบนและล่าง

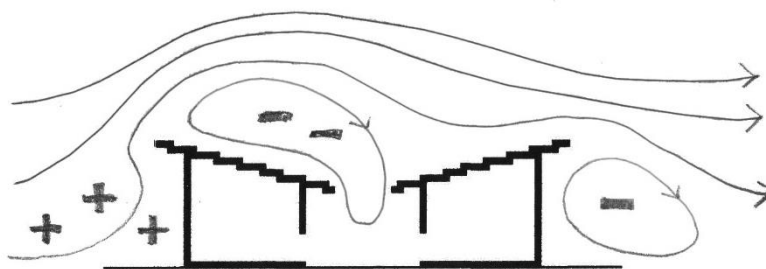
ตารางที่ 5 - 3 ผลการจำลองอาคารที่มีตำแหน่งช่องเปิดแตกต่างกันในเวลากลางวัน



5.2.1 ผลการจำลองกรณีอาคารไม่มีช่องเปิด

จากผลการจำลองในเวลากลางวัน พบว่าอาคารที่ไม่มีช่องเปิดด้านนอก ตามแนวคิดที่เสนอ โดย Trombe (1967) ทำให้พื้นที่ใช้สอยภายในและที่ว่างตรงกลางมีอุณหภูมิต่ำกว่ากรณีอื่นๆ เนื่องจากลมพัดผ่านกลุ่มอาคารทำให้เกิดความแตกต่างของความดันอากาศ ซึ่งบริเวณที่ว่างตรงกลางเกิดความดันเป็น (-) จึงเกิดการดูดอากาศเย็นจากด้านบนหลังคาไหลลงไปยังที่ว่างตรงกลางซึ่งสามารถเห็นได้จากเวกเตอร์แสดงทิศทางการไหลของอากาศ เมื่ออาคารไม่มีช่องเปิดอื่นทำให้อากาศที่ลงมาไม่มีการระบายออกทางอื่น อากาศจึงต้องลอยกลับขึ้นมาตามช่องทางเดิม เกิดเป็นกระแสลมที่ไหลวนอยู่ระหว่างผิวหลังคาที่เย็นและพื้นที่ว่างระหว่างอาคาร ตามที่ปรากฏในแผนภาพแสดงความดันและการไหลของอากาศ ภาพที่ 5 - 1 ในขณะที่ผิวด้านล่างของหลังคาไหลก็มีอุณหภูมิต่ำ ช่วยทำความเย็นให้กับอากาศภายในเนื้อที่ใช้สอยด้วย ส่งผลให้อุณหภูมิภายในของอาคารต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

ในทางกลับกัน เวลากลางวันผิวหลังคาตัวอย่างจะมีอุณหภูมิสูงมาก วงของกระแสลมที่ไหลวนพัดเอาความร้อนจากผิวหลังคาลงมาอยู่ที่ว่างระหว่างอาคารด้วย ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอก ทั้งยังได้รับความร้อนที่แผ่ออกมาจากภายในหลังคาไหลที่ร้อน ทำให้อุณหภูมิใช้สอยภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้น และสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่นๆ

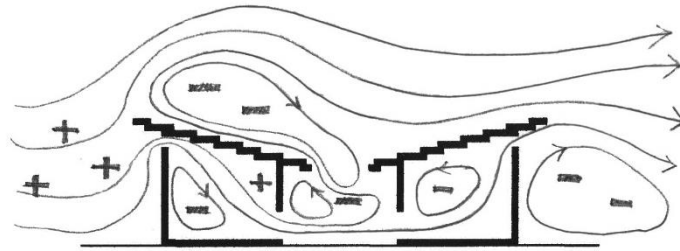


ภาพที่ 5 - 1 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและไม่มีช่องเปิด

5.2.2 ผลการจำลองกรณีอาคารมีช่องเปิดด้านบน

เมื่ออาคารมีช่องเปิด จะทำให้เกิดการถ่ายเทอากาศระหว่างภายในและภายนอกมากขึ้น การเปิดช่องเปิดที่ด้านบน ด้านที่ลมปะทะซึ่งมีความกดอากาศเป็น (+) ทำให้อากาศไหลเข้า ส่วนด้านหลังกลุ่มอาคารมีความกดอากาศเป็น (-) เมื่อมีช่องเปิดจึงเป็นเสมือนประตูที่ดูดอากาศภายในให้ออกไปตามภาพที่ 5 - 2 และอากาศส่วนหนึ่งก็ลอยขึ้นไปตามความดันอากาศที่เป็น (-) บริเวณที่ว่างตรงกลาง เมื่อเจอกับอากาศที่ถูกดูดลงมาจากด้านบน จึงเกิดเป็นกระแสลมไหลวนอยู่ตรงกลางระหว่างที่ว่างนั้น

อากาศที่เข้ามาหมุนเวียนในลักษณะนี้มีช่องทางออกมากกว่าทางเข้า ทำให้มีความเร็วลมค่อนข้างมาก ในเวลากลางคืนจะเป็นผลเสีย เนื่องจากจะพัดพาอากาศเย็นจากใต้หลังคาออกไปด้านนอกกลุ่มอาคารอย่างรวดเร็ว กลุ่มอาคารจึงได้รับประโยชน์จากความเย็นของผิวหลังคาในเวลา กลางคืนน้อยมาก แต่ในเวลากลางวัน จะเป็นประโยชน์เนื่องจากช่วยพัดพาเอาความร้อนที่แผ่จากหลังคาออกไปทั้งภายนอกอาคาร

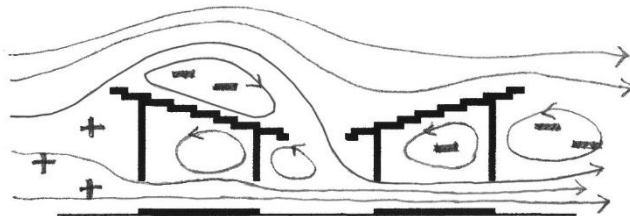


ภาพที่ 5 - 2 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดด้านบน

5.2.3 ผลการจำลองกรณีอาคารมีช่องเปิดด้านล่าง

การที่อาคารมีช่องเปิดด้านล่างทั้งสองกรณี ทำให้เกิดช่องเปิดตรงกันกับภายใน อากาศจึงไหลผ่านกลุ่มอาคารและพื้นที่ใช้สอยภายในออกไปทางด้านหลังเป็นเส้นตรง ทำให้มีความเร็วลมมาก เนื้อที่ภายในที่อยู่เหนือช่องเปิดขึ้นไป จะเกิดกระแสลมหมุนและได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีภายใต้แผ่นหลังคา ตามภาพที่ 5 - 3

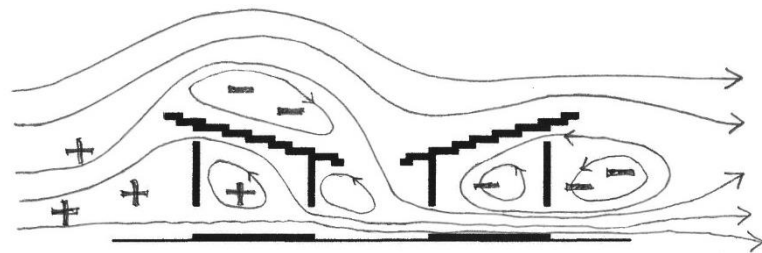
ในเวลากลางคืนจะได้รับประโยชน์ค่อนข้างน้อย เนื่องจากอากาศเย็นที่แผ่ลงมาจากแผ่นหลังคาจะถูกพัดพาออกไปอย่างต่อเนื่อง ส่วนในเวลากลางวัน ช่องเปิดด้านล่างมีส่วนช่วยระบายอากาศแต่ไม่ได้ช่วยระบายความร้อน เนื่องจากอากาศร้อนจะลอยอยู่ด้านบน ทำให้ความร้อนยังคงค้างอยู่ภายในเนื้อที่ที่ใช้สอย และมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อวัสดุหลังคาร้อนขึ้น



ภาพที่ 5 - 3 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดด้านล่าง

5.2.4 ผลการจำลองกรณีอาคารมีช่องเปิดทั้งด้านบนและด้านล่าง

เมื่อกลุ่มอาคารมีช่องเปิดในปริมาณมาก จะทำให้มีช่องทางการระบายอากาศมากขึ้นเห็นได้จากเส้นทางการไหลที่เพิ่มมากขึ้นกว่ากรณีอื่นๆ ตามภาพที่ 5 - 4 ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอกมากที่สุด เป็นประโยชน์มากในเวลากลางวัน เนื่องจากทำให้ความร้อนไม่ขังอยู่ภายใน แต่ในเวลากลางคืนจะทำให้อาคารไม่ได้รับประโยชน์จากความเย็นของผิวหลังคา



ภาพที่ 5 - 4 ความดันและการไหลของอากาศในสภาวะมีลมพัดและมีช่องเปิดทั้งบนและล่าง

5.3 ผลการจำลองสภาพโดยที่อาคารมีระยะห่างและความสูงแตกต่างกัน

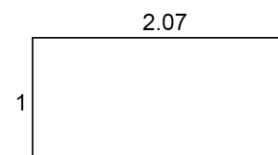
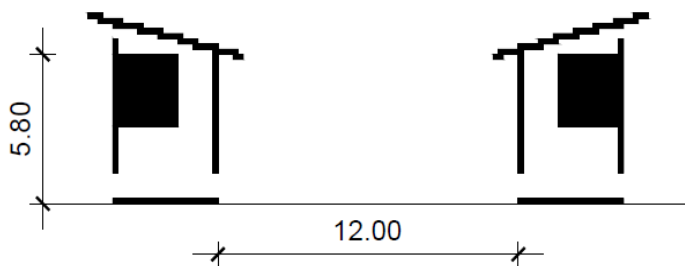
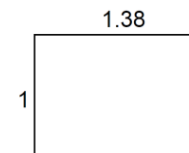
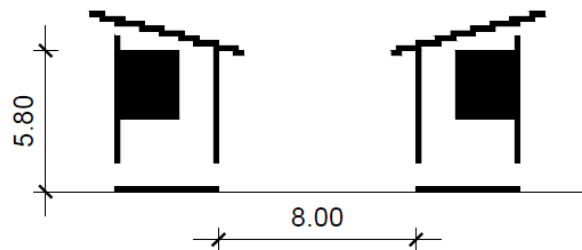
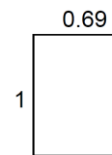
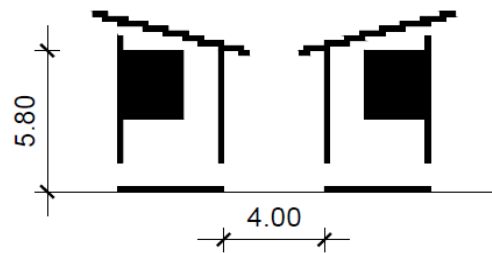
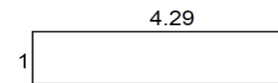
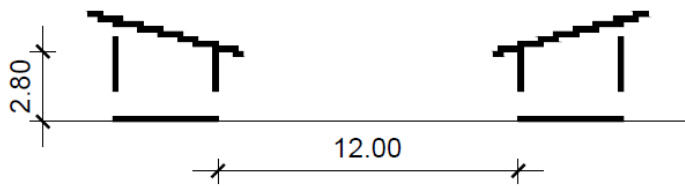
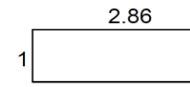
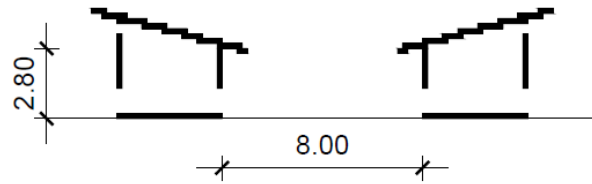
การศึกษาเรื่องระยะห่างและความสูง ทำเพื่อหาสัดส่วนของระยะที่ทำให้อุณหภูมิภายในและที่ว่างระหว่างอาคารต่ำที่สุด โดยจะจำลองอาคารในกรณีที่มีช่องเปิดมากที่สุดคือเปิดทั้งด้านบนและด้านล่าง และกรณีอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอกเลย ระยะห่างที่ทำการจำลองจะเพิ่มกรณีที่เป็น 2 เท่า และ 3 เท่าของระยะต่ำที่สุด ได้แก่ 4 เมตร, 8 เมตร, และ 12 เมตร ส่วนสูงของอาคาร มี 2 ระดับ ได้แก่ สูง 1 ชั้น และสูง 2 ชั้น มีสัดส่วนของที่ว่างดังแสดงในตารางที่ 5 - 4

ตารางที่ 5 - 4 รูปแบบอาคารที่เป็นกรณีศึกษาเรื่องสัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคาร

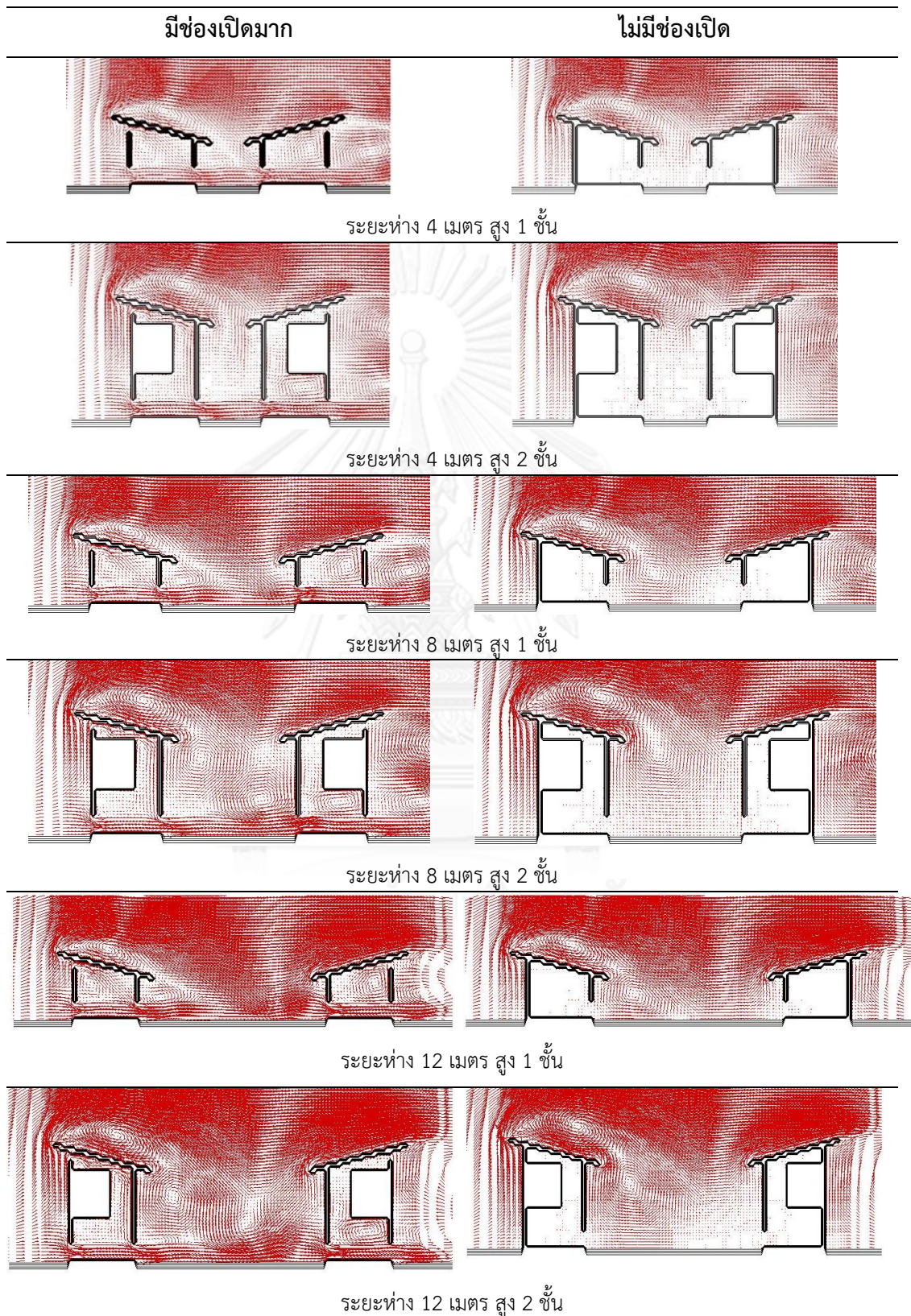
รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	สัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคาร

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา

สัดส่วนที่วางระหว่างอาคาร

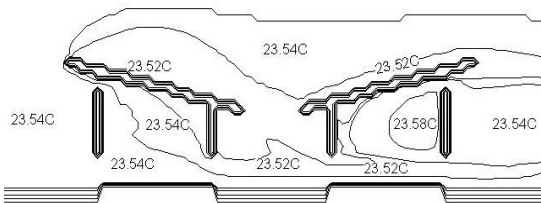
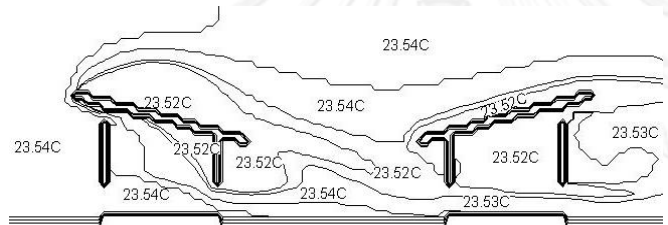
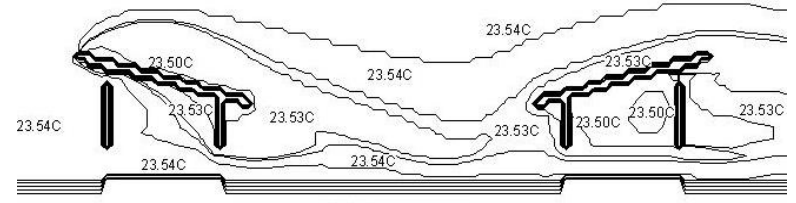
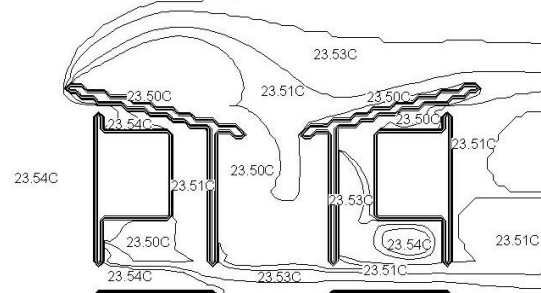


ตารางที่ 5 - 5 ผลการจำลองแสงเงาการไหลของลมผ่านกลุ่มอาคารกรณีศึกษา



ผลการจำลองแสดงอุณหภูมิกับกลุ่มอาคารกรณีมีช่องเปิดภายนอกทั้งด้านบนและด้านล่าง แสดงลงในตารางที่ 5 - 6 และกรณีไม่มีช่องเปิดภายนอก แสดงลงในตารางที่ 5 - 7

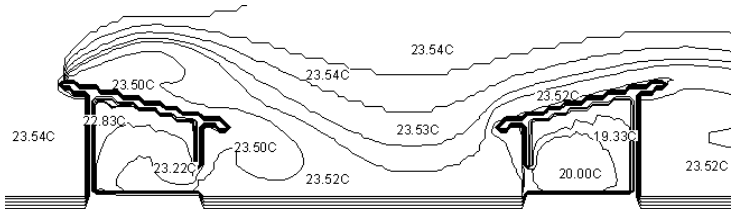
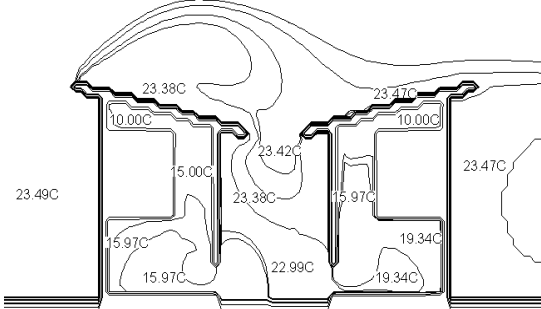
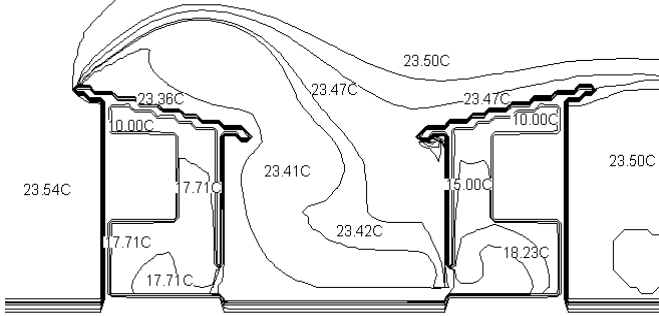
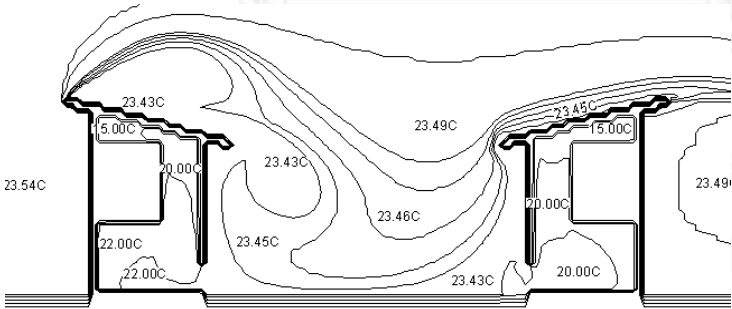
ตารางที่ 5 - 6 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารมีช่องเปิดภายนอก

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย
	ภายใน (ซ้าย) 23.53 °C ภายใน (ขวา) 23.55 °C รวมสองฝั่ง 23.54 °C ที่ว่างตรงกลาง 23.52 °C
	ภายใน (ซ้าย) 23.53 °C ภายใน (ขวา) 23.48 °C รวมสองฝั่ง 23.51 °C ที่ว่างตรงกลาง 23.53 °C
	ภายใน (ซ้าย) 23.53 °C ภายใน (ขวา) 23.51 °C รวมสองฝั่ง 23.52 °C ที่ว่างตรงกลาง 23.53 °C
	ภายใน (ซ้าย) 23.52 °C ภายใน (ขวา) 23.53 °C รวมสองฝั่ง 23.52 °C ที่ว่างตรงกลาง 23.49 °C

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย
	ภายใน (ซ้าย) 23.52 °C
	ภายใน (ขวา) 23.55 °C
	รวมสองฝั่ง 23.54 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 23.51 °C
	ภายใน (ซ้าย) 23.53 °C
	ภายใน (ขวา) 23.52 °C
	รวมสองฝั่ง 23.53 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 23.53 °C

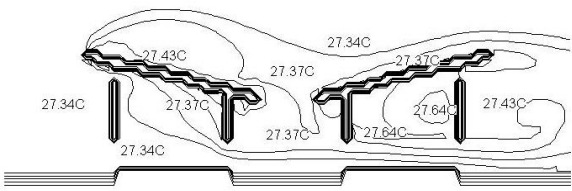
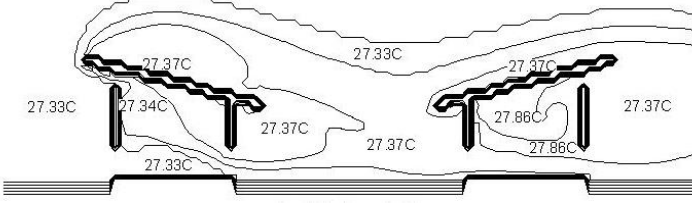
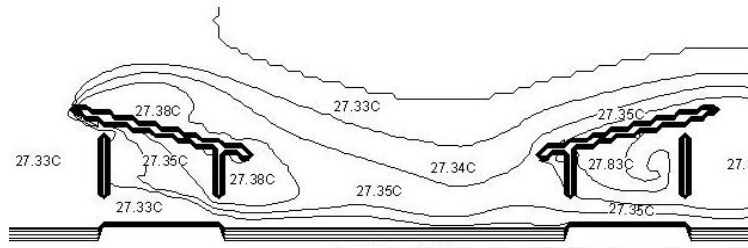
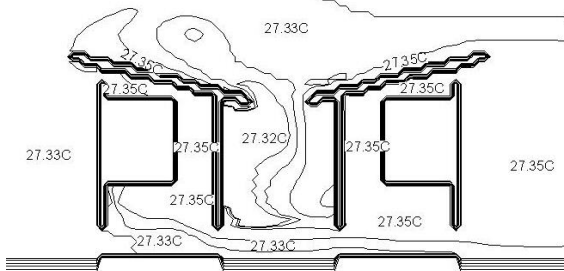
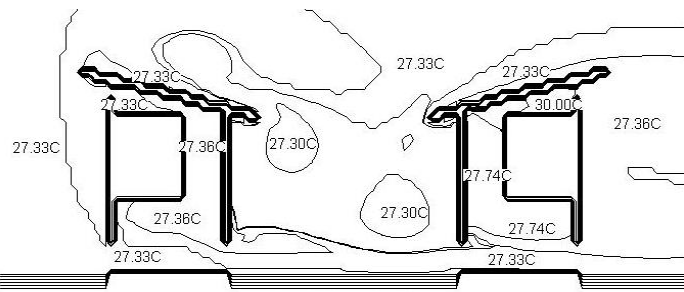
ตารางที่ 5 - 7 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอก

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย
	ภายใน (ซ้าย) 17.54 °C
	ภายใน (ขวา) 19.15 °C
	รวมสองฝั่ง 18.34 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 23.18 °C
	ภายใน (ซ้าย) 22.03 °C
	ภายใน (ขวา) 21.50 °C
	รวมสองฝั่ง 21.77 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 23.36 °C

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
	ภายใน (ซ้าย)	23.01 °C
	ภายใน (ขวา)	19.72 °C
	รวมสองฝั่ง	21.36 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	23.50 °C
	ภายใน (ซ้าย)	15.81 °C
	ภายใน (ขวา)	18.94 °C
	รวมสองฝั่ง	17.38 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	20.88 °C
	ภายใน (ซ้าย)	17.39 °C
	ภายใน (ขวา)	17.89 °C
	รวมสองฝั่ง	17.64 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	23.33 °C
	ภายใน (ซ้าย)	21.63 °C
	ภายใน (ขวา)	19.88 °C
	รวมสองฝั่ง	20.75 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	23.32 °C

ผลการจำลองแสดงอุณหภูมิกับกลุ่มอาคารกรณีมีช่องเปิดภายนอกทั้งด้านบนและด้านล่าง แสดงลงในตารางที่ 5 - 8 และกรณีไม่มีช่องเปิดภายนอก แสดงลงในตารางที่ 5 - 9

ตารางที่ 5 - 8 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารมีช่องเปิดภายนอก

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
	ภายใน (ซ้าย)	27.36 °C
	ภายใน (ขวา)	27.56 °C
	รวมสองฝั่ง	27.46 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.38 °C
	ภายใน (ซ้าย)	27.36 °C
	ภายใน (ขวา)	27.63 °C
	รวมสองฝั่ง	27.50 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.36 °C
	ภายใน (ซ้าย)	27.36 °C
	ภายใน (ขวา)	27.64 °C
	รวมสองฝั่ง	27.50 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.37 °C
	ภายใน (ซ้าย)	27.35 °C
	ภายใน (ขวา)	27.53 °C
	รวมสองฝั่ง	27.44 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.34 °C
	ภายใน (ซ้าย)	27.35 °C
	ภายใน (ขวา)	27.62 °C
	รวมสองฝั่ง	27.49 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.32 °C

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
	ภายใน (ซ้าย)	27.37 °C
	ภายใน (ขวา)	27.49 °C
	รวมสองฝั่ง	27.43 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.34 °C

ตารางที่ 5 - 9 ผลการจำลองอาคารที่มีความสูงและระยะห่างต่างกันในเวลากลางวัน กรณีอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอก

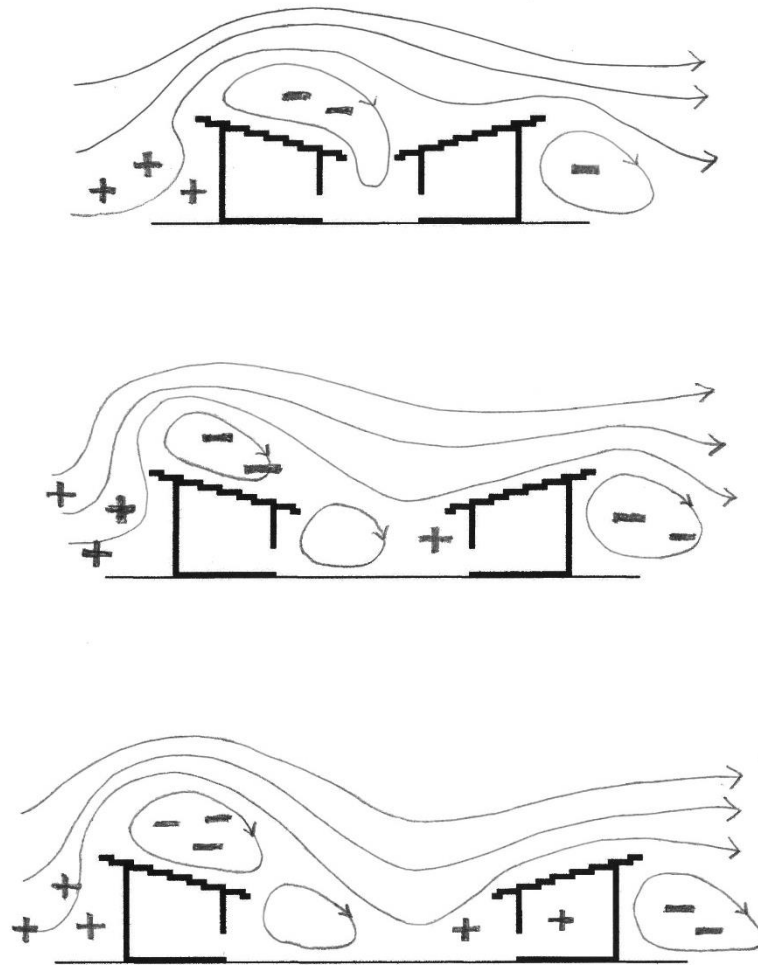
รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
	ภายใน (ซ้าย)	31.23 °C
	ภายใน (ขวา)	30.22 °C
	รวมสองฝั่ง	30.72 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.64 °C
	ภายใน (ซ้าย)	28.40 °C
	ภายใน (ขวา)	28.95 °C
	รวมสองฝั่ง	28.68 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.50 °C
	ภายใน (ซ้าย)	27.88 °C
	ภายใน (ขวา)	36.07 °C
	รวมสองฝั่ง	31.97 °C
	ที่ว่างตรงกลาง	27.37 °C

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย
	ภายใน (ซ้าย) 28.21 °C
	ภายใน (ขวา) 27.66 °C
	รวมสองฝั่ง 27.94 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 27.61 °C
	ภายใน (ซ้าย) 30.81 °C
	ภายใน (ขวา) 31.02 °C
	รวมสองฝั่ง 30.91 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 27.42 °C
	ภายใน (ซ้าย) 28.08 °C
	ภายใน (ขวา) 28.45 °C
	รวมสองฝั่ง 28.26 °C
	ที่ว่างตรงกลาง 27.37 °C

5.3.1 ผลการเพิ่มระยะห่างระหว่างอาคาร

เมื่อพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของลม พบว่าระยะห่างระหว่างอาคารที่มากขึ้น ทำให้ลมที่พัดอยู่เหนือหลังคาสามารถลงมาภายในที่ว่างระหว่างอาคารได้มากขึ้น เนื่องจากมีระยะที่มากเพียงพอให้ลมวกกลับขึ้นไปด้านบนได้ ซึ่งเงื่อนไขของระยะนี้จะเกี่ยวข้องกับความสูงของอาคารด้วย ตามแผนภาพแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของลม (ภาพที่ 5 - 5) อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่างอาคารจะไม่มีผลกับอาคารที่มีช่องเปิดมาก เนื่องจากลมสามารถเคลื่อนเข้าออกผ่านทางช่องเปิดอื่นได้

สำหรับอาคารที่ไม่มีช่องเปิด เนื่องจากระยะห่างมีผลต่อปริมาณลมที่จะพัดผ่านลงมายังที่ว่างตรงกลาง หากลมภายนอกพัดผ่านลงมามากก็จะพัดเอาอากาศเย็นที่เกิดจากผิวหลังคาให้สูญเสียนอกไปภายนอกมาก ดังนั้น ระยะห่างที่มากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิภายในเนื้อที่ใช้สอยและอุณหภูมิของที่ว่างตรงกลางสูงขึ้นตามไปด้วย แต่ในเวลากลางวันระยะห่างจะส่งผลน้อยมากเนื่องจากอากาศไม่มีการระบายออกสู่ภายนอกทำให้อุณหภูมิภายในค่อนข้างสูงจากการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นหลังคา

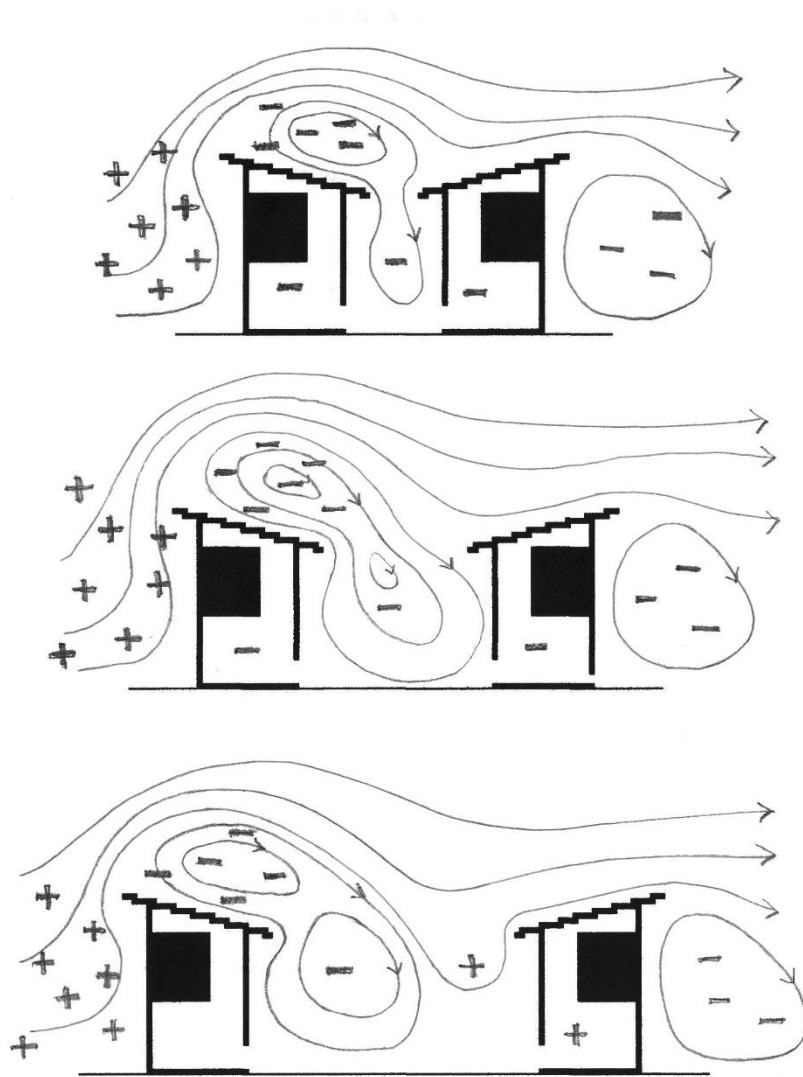


ภาพที่ 5 - 5 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารปิด สูง 1 ชั้น

5.3.2 ผลการเพิ่มความสูงของอาคาร

การเพิ่มความสูงอาคารทำให้สัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคารสูงชะลูดขึ้น ทำให้ลมพัดลงมาได้น้อยลง และเกิดสภาพกระแสลมไหลวนได้มากขึ้นในระยะห่างที่เท่ากัน ทำให้กลุ่มอาคารที่มีระยะห่างเท่ากันเกิดกระแสลมไหลวนได้มากขึ้น ดูจากภาพที่ 5 - 5 เทียบกับ ภาพที่ 5 - 6

ผลต่ออุณหภูมิในเวลากลางคืน การเพิ่มความสูงอาคารช่วยให้อุณหภูมิภายในลดลงเมื่ออาคารมีระยะห่างเท่ากัน ในอาคารที่ไม่มีช่องเปิดจะมีสัดส่วนที่ชะลูดขึ้นทำให้สูญเสียความเย็นออกภายนอกน้อยลง แต่สำหรับอาคารที่มีช่องเปิดมากจะไม่เกิดความแตกต่าง ส่วนในเวลากลางวัน การเพิ่มความสูงของอาคารจะทำให้เนื้อที่ใช้สอยชั้นล่างอยู่ห่างจากหลังคามากขึ้น หลีกเลี่ยงการรับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนโดยตรงจากหลังคา เนื้อที่ใช้สอยภายในจึงมีอุณหภูมิต่ำลง ทั้งในกรณีที่อาคารมีช่องเปิดมากและอาคารไม่มีช่องเปิด



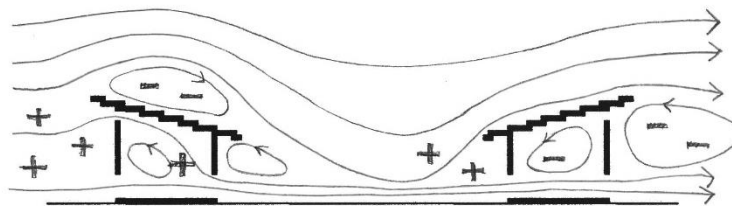
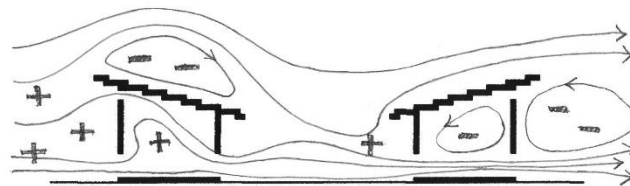
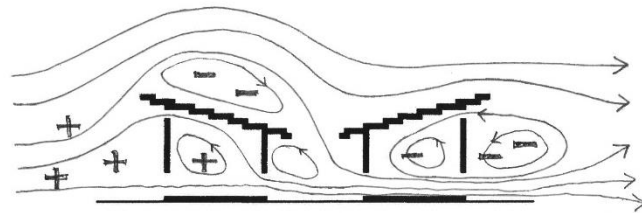
ภาพที่ 5 - 6 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารปิด สูง 2 ชั้น

5.3.3 ความแตกต่างระหว่างอาคารที่มีช่องเปิดมาก และอาคารที่ไม่มีช่องเปิด

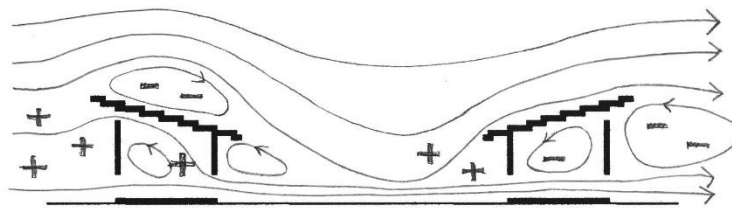
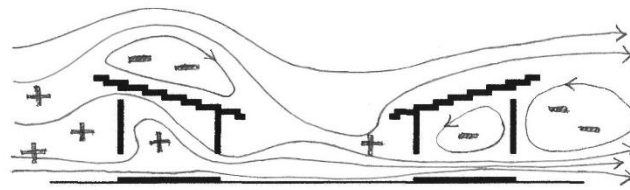
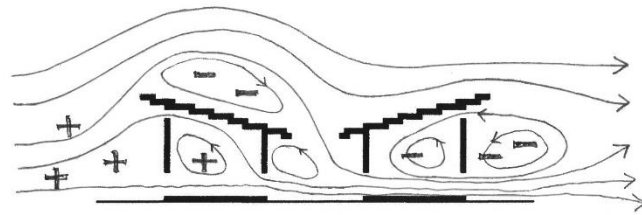
การที่อาคารมีช่องเปิดมากทำให้อุณหภูมิใกล้เคียงกับบรรยากาศ ลดผลกระทบจากตัวแปรอื่น เช่น ระยะเวลาและส่วนสูงของอาคาร แต่เมื่อไม่มีช่องเปิด อุณหภูมิจะสูงขึ้นในเวลากลางวัน เนื่องจากความร้อนที่สะสมไม่มีทางระบายออก และลดลงในเวลากลางคืนเนื่องจากความเย็นที่เกิดขึ้นถูกเก็บกักไว้

ผลกระทบจากระยะห่างของอาคารในอาคารที่ไม่มีช่องเปิดจะค่อนข้างชัดเจน แต่อาคารที่มีช่องเปิดมากนั้นแทบจะไม่เห็นความต่าง เนื่องจากลมมีเส้นทางอื่นในการไหล จึงไม่มีความแตกต่างของการไหลของลมในที่ว่างที่มีสัดส่วนแตกต่างกัน

ผลกระทบในเรื่องความสูงของอาคาร ในกรณีอาคารที่ไม่มีช่องเปิดจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างเห็นได้ชัด ทั้งในเวลากลางวันและเวลากลางคืน ส่วนอาคารที่มีช่องเปิดจะไม่ทำให้เกิดความต่างในเวลากลางคืน แต่จะทำให้เกิดความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในเวลากลางวัน



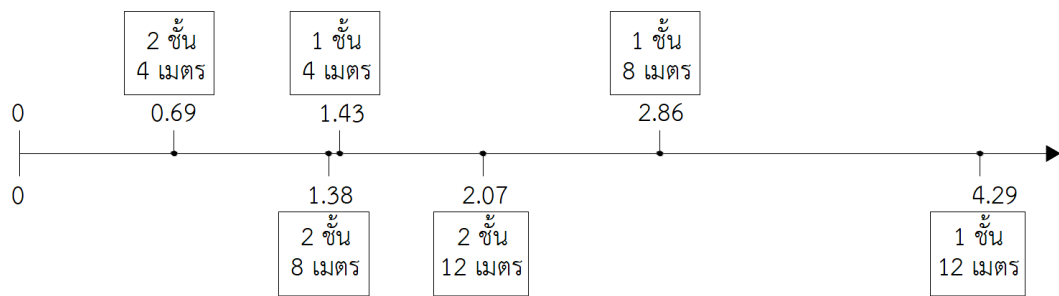
ภาพที่ 5 - 7 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารเปิด สูง 1 ชั้น



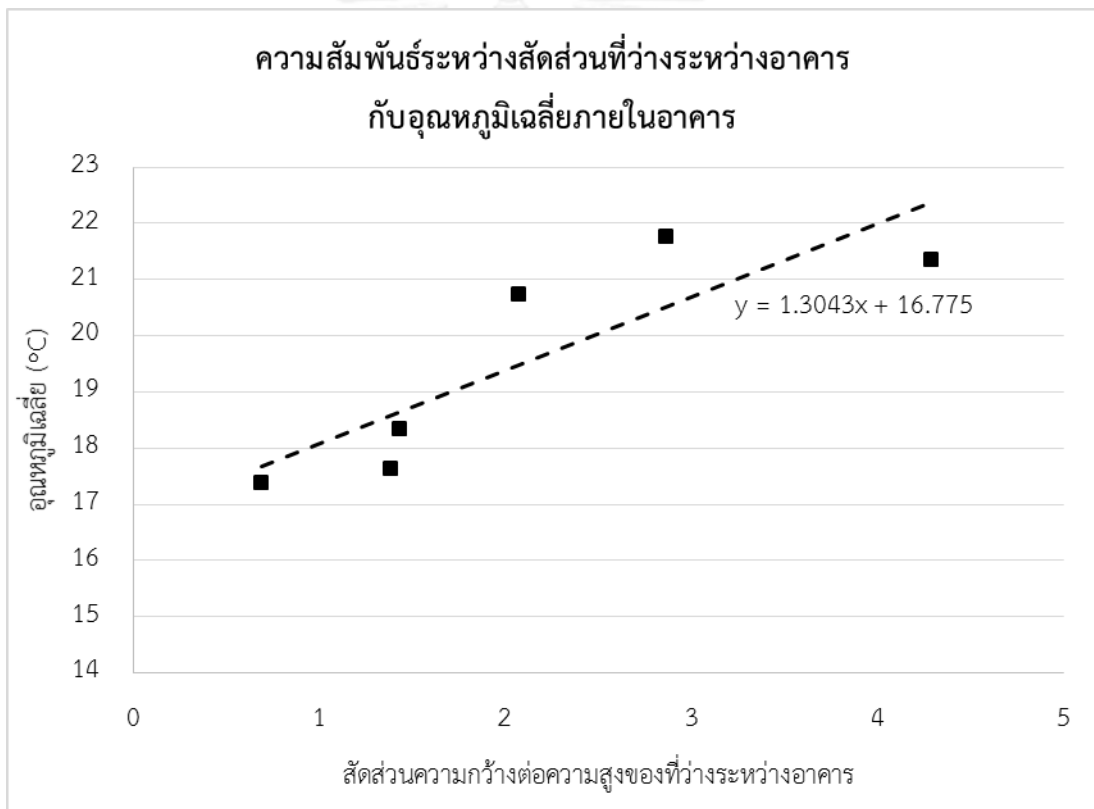
ภาพที่ 5 - 8 ความดันและการไหลของอากาศในอาคารเปิด สูง 2 ชั้น

5.3.4 สัดส่วนความกว้างต่อความสูงของที่ว่างระหว่างอาคาร

เมื่อพิจารณาประเด็นเรื่องระยะห่างระหว่างอาคารและความสูง พบว่าสัดส่วนระหว่างระยะห่างต่อส่วนสูงมีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายใน เนื่องจากกรณีที่ทำให้เกิดอุณหภูมิภายในที่ต่ำที่สุดแปรตามสัดส่วนที่ว่างระหว่างอาคารที่ชะลูดที่สุด กล่าวคือ กรณีที่ทำให้อาคารมีอุณหภูมิลดต่ำที่สุดคือกรณีที่อาคารมีความสูง 2 ชั้น และมีระยะห่าง 4 เมตร ทำให้เกิดสัดส่วนที่ว่างที่สูงชะลูดที่สุด ทำให้อุณหภูมิภายในต่ำลงในเวลากลางคืน และอุณหภูมิจะสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนความกว้างมากขึ้นมากขึ้น ตามที่ได้เรียงลำดับสัดส่วนความกว้างต่อความสูงของอาคารที่ศึกษาแต่ละกรณีในภาพที่ 5 - 9 จนถึงระยะห่าง 12 เมตร สัดส่วนนี้จะหยุดส่งผลกระทบต่อเนื้อที่ใช้สอยภายในชั้นล่างสุดของอาคาร ตามที่แสดงในแผนภูมิที่ 5 - 1



ภาพที่ 5 - 9 สัดส่วนของความกว้างต่อความสูงและอุณหภูมิเฉลี่ยภายในกรณีศึกษา



แผนภูมิที่ 5 - 1 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนที่วางระหว่างอาคารกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายใน

บทที่ 6

การเสนอแนวทางในการออกแบบ

6.1 การเสนอแนวทางในการออกแบบ

การเสนอแนวทางจะเน้นไปที่ประโยชน์ในเวลากลางคืน เพราะจากการวิจัยพบว่าทำให้เกิดการระบายอากาศตามหลักการของปล่องลมแสงอาทิตย์ในเวลากลางวันด้วยการใช้ตัวแผ่นหลังคาเองเป็นตัวทำให้เกิดความร้อน เกิดประสิทธิภาพต่ำมากจนแทบไม่เห็นผล การปรับปรุงสมรรถนะทางอุณหภูมิตั้งแต่กลางวันจึงน่าจะเหมาะกับการใช้วิธีทำให้เกิดการระบายอากาศหลายๆ ตามแนวทางในการปรับปรุงให้มีสภาวะน่าสบายของเขตร้อนชื้นที่มีการศึกษาวิจัยมาแล้ว

เพื่อให้มีสมรรถนะทางอุณหภูมิต่ำขึ้น ในงานวิจัยนี้มีการทดลอง นำอาคารที่มีความสูงต่างกันไปประกอบเป็นกลุ่มอาคาร การใส่แผงกันลมเพิ่มเติม และการจำลองรูปแบบหลังคาตามกล่องทดลองที่ใช้เก็บข้อมูลในช่วงแรก และมีการตรวจสอบผลโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เกิดผลตามที่แสดงในหัวข้อถัดไป

6.2 การนำอาคารที่มีความสูงแตกต่างกันมาประกอบเป็นกลุ่มอาคาร

ผลจากการวิจัยในส่วนที่แล้ว แสดงให้เห็นว่าเส้นทางการไหลของลมในแบบกระแสลมไหลวนจะทำให้อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากไม่สูญเสียออกไปภายนอกกับการพัดพาของลม และสภาวะกระแสลมไหลวนนี้เกิดในภาวะความดันอากาศเป็น (-)

แนวทางนี้จึงพยายามเลื่อนตำแหน่งที่เกิดกระแสลมไหลวนให้อยู่ระหว่างที่ว่างตรงกลางและอากาศเย็นที่เหนือหลังคา เพื่อให้กระแสลมไหลวนพัดพาเอาความเย็นที่เหนือผิวหลังคาลงมาใช้ประโยชน์ด้านล่างได้มากขึ้น โดยการทดลองจะใช้อาคารต้นแบบเป็นอาคารไม่มีช่องเปิดภายนอก ที่สูง 1 ชั้น และ 2 ชั้น มาประกอบเข้าด้วยกัน เนื่องจากเป็นกรณีที่ทำให้เห็นผลความแตกต่างของอุณหภูมิจากสัดส่วนที่ว่างของหลังคาได้มากที่สุด

ตารางที่ 6 - 1 ผลการจำลองกลุ่มอาคารที่ประกอบจากอาคารความสูงต่างกัน

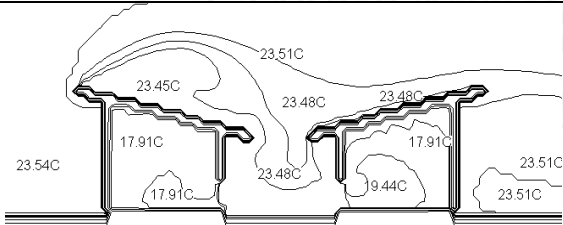
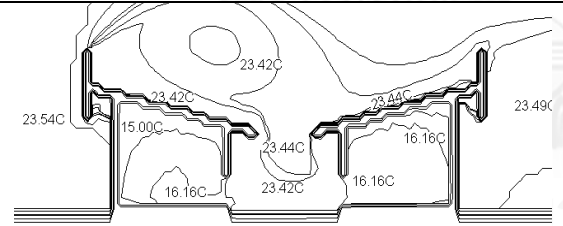
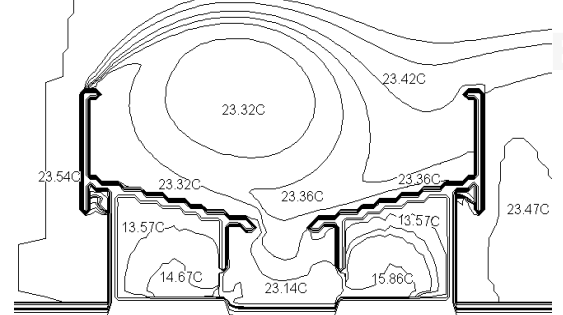
	รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
1 ชั้น		ภายใน (ซ้าย)	17.54 °C
		ภายใน (ขวา)	19.15 °C
		รวมสองฝั่ง	18.34 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	23.18 °C
2 ชั้น		ภายใน (ซ้าย)	15.81 °C
		ภายใน (ขวา)	18.94 °C
		รวมสองฝั่ง	17.38 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	20.88 °C
ผสมกัน		ภายใน (ซ้าย)	18.72 °C
		ภายใน (ขวา)	17.95 °C
		รวมสองฝั่ง	18.34 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	22.60 °C
ผสมกัน		ภายใน (ซ้าย)	16.75 °C
		ภายใน (ขวา)	19.60 °C
		รวมสองฝั่ง	18.18 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	22.92 °C

ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าการนำอาคารที่ความสูงแตกต่างกันมาประกอบกันเป็นกลุ่มอาคาร ในกรณีที่อาคารสูง 2 ชั้นเป็นด้านปะทะลม ทำให้อุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับกลุ่มอาคารที่สูงชั้นเดียวที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความยาวเท่ากัน แต่หากด้านอาคารที่สูงชั้นเดียวเป็นด้านปะทะลม จะทำให้อุณหภูมิในเย็นกว่าอาคารที่สูงชั้นเดียวแต่ร้อนกว่าอาคารที่สูงสองชั้น น่าจะเป็นผลมาจากการที่ความเย็นจากหลังคาอาคารชั้นเดียวถูกกักไว้ใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด

6.3 การใส่แผงกันลมเพิ่มเติม

เมื่อพิจารณาจากเส้นทางการไหลของลมจากผลการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอากาศเย็นเหนือหลังคาส่วนหนึ่งไม่ถูกนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์เนื่องจากถูกพัดออกไปทางด้านหลัง การใส่แผงกันลมเพิ่มเติมจะช่วยกักให้ความเย็นบนผิวหลังคานั้นวนอยู่ภายในกลุ่มอาคาร ลดการสูญเสียความเย็นออกไปภายนอก

ตารางที่ 6 - 2 ผลการจำลองการใส่แผงกันลมเพิ่มเติม

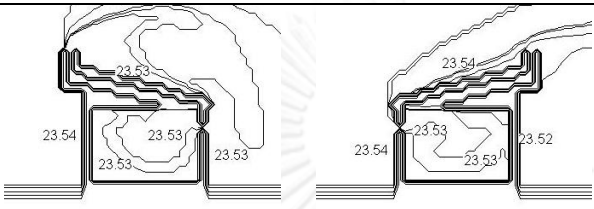
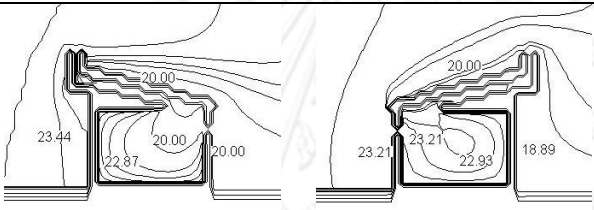
	รูปแบบอาคารกรณีศึกษา	อุณหภูมิเฉลี่ย	
1 ชั้น		ภายใน (ซ้าย)	17.54 °C
		ภายใน (ขวา)	19.15 °C
		รวมสองฝั่ง	18.34 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	23.18 °C
wp		ภายใน (ซ้าย)	15.68 °C
		ภายใน (ขวา)	17.34 °C
		รวมสองฝั่ง	16.51 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	23.01 °C
wpL		ภายใน (ซ้าย)	14.08 °C
		ภายใน (ขวา)	15.15 °C
		รวมสองฝั่ง	14.61 °C
		ที่ว่างตรงกลาง	22.52 °C

ผลการจำลองพบว่าการใส่แผงกันลมช่วยให้อุณหภูมิภายในกลุ่มอาคารต่ำลงได้ แผงกันลมที่สูงชันและมีการหักมุมที่ปลาย จะช่วยเหนี่ยวนำให้อากาศเย็นเหนือผิวหลังคาเกิดเป็นกระแสลมไหลวนอยู่ที่บริเวณกลุ่มอาคาร และมีประโยชน์ในการช่วยลดอุณหภูมิบริเวณเนื้อที่ที่ใส่สอยได้

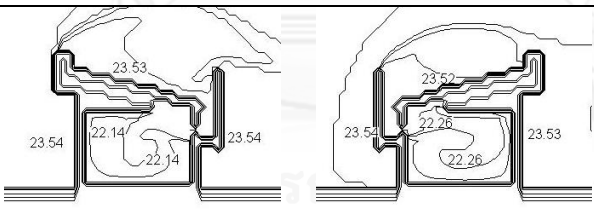
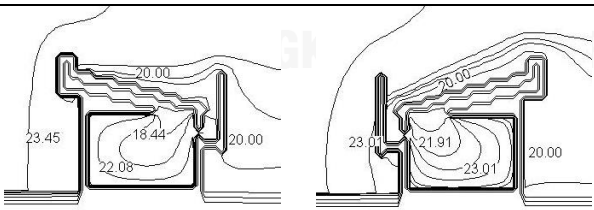
6.4 รูปแบบหลังคาเพื่อใช้กับอาคารเดี่ยว

จากการวิจัยข้างต้น พบว่าแนวคิดนี้ให้ประโยชน์กับกลุ่มอาคารที่ล้อมที่ว่าง จึงน่าจะมีแนวทางประยุกต์ใช้สำหรับอาคารเดี่ยว โดยการนำรูปแบบกล่องทดลองที่ใช้เก็บข้อมูลมาทำการจำลองในขนาดจริง เปรียบเทียบกับอาคารปกติ

ตารางที่ 6 - 3 ผลการจำลองรูปแบบหลังคากล่องทดลองหลังคาปกติ

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา		อุณหภูมิเฉลี่ย	
มีลมพัด		ภายใน (ซ้าย)	23.53 °C
		ภายใน (ขวา)	23.53 °C
		รวมสองฝั่ง	23.53 °C
ไม่มีลม		ภายใน (ซ้าย)	21.24 °C
		ภายใน (ขวา)	23.17 °C
		รวมสองฝั่ง	22.21 °C

ตารางที่ 6 - 4 ผลการจำลองรูปแบบหลังคากล่องทดลองหลังคาที่เสนอแนะ

รูปแบบอาคารกรณีศึกษา		อุณหภูมิเฉลี่ย	
มีลมพัด		ภายใน (ซ้าย)	22.17 °C
		ภายใน (ขวา)	22.28 °C
		รวมสองฝั่ง	22.23 °C
ไม่มีลม		ภายใน (ซ้าย)	21.03 °C
		ภายใน (ขวา)	22.46 °C
		รวมสองฝั่ง	21.74 °C

จากผลการจำลอง พบว่าหลังคาแบบปกติ จะทำให้อุณหภูมิภายในลดลงจากบรรยากาศภายนอกในสถานะที่มีลมพัดเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการที่ไม่มีลมพัดผ่านที่ทำให้ความเย็นตกลงมาภายในได้มากกว่า จึงมีการเสนอแนะให้ติดตั้งแผงกันลมและปิดช่องระบายอากาศเหนือหลังคาในเวลากลางคืน เพื่อช่วยให้บังลมที่จะมารบกวนการตกลงมาภายในของอากาศเย็นในสถานะที่มีลมพัด จะช่วยให้อุณหภูมิภายในลดต่ำลงอีก ทั้งในสถานะที่มีลมพัดและไม่มีลมพัด

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทดลองเก็บค่าอุณหภูมิผิวหลังคาและอุณหภูมิภายในกล่องทดลองต้นแบบหลังคาระบายอากาศด้วยการเปิดช่องระบายอากาศที่ฝ้าเพดาน อุณหภูมิหลังคาแต่ละสี มีความสอดคล้องกับคุณสมบัติทางกายภาพของหลังคา กล่าวคือ ในเวลากลางวัน หลังคาสีดำนั้จะร้อนขึ้นจากบรรยากาศภายนอกมากที่สุด 40°C และสีขาวจะร้อนขึ้นจากบรรยากาศภายนอกน้อยที่สุดโดยเฉลี่ย ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อนของวัสดุ (Absorptance) วัสดุสีอ่อนจะดูดกลืนความร้อนน้อยกว่าวัสดุสีเข้ม ส่วนในเวลากลางคืน หลังคาสีดำนั้จะเย็นลงจากบรรยากาศภายนอกมากที่สุด 10.1°C และหลังคาสีเงินจะเย็นลงจากบรรยากาศภายนอกได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ (Emissivity) วัสดุสีเข้มจะมีค่ามากและวัสดุที่มีความมันวาวจะมีค่าน้อย

กล่องทดลองที่ใช้ มี 2 รูปแบบ ที่เป็นหลังคาแบบปกติที่ไม่มีการติดฉนวน และต้นแบบหลังคาระบายอากาศ พบว่าหลังคาต้นแบบสามารถลดอุณหภูมิภายในลงจากหลังคาแบบปกติได้ทั้งในเวลากลางวันและเวลากลางคืน เนื่องจากมีช่องทางการระบายอากาศในช่วงกลางวันมากกว่า และมีช่องนำเข้าอากาศเย็นที่มากกว่าในเวลากลางคืน

ผลจากการใช้หลังคาสีต่างกัน ในเวลากลางวัน พบว่ากล่องต้นแบบหลังคาสีขาวสามารถทำให้อุณหภูมิในเนื้อที่ใช้น้อยต่ำลงมากที่สุด มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิบรรยากาศน้อยที่สุด 2.46°C ลดลงจากกล่องควบคุมโดยเฉลี่ยประมาณ 0.66°C ส่วนในเวลากลางคืน กล่องต้นแบบหลังคาสีดำนั้สามารถทำให้อุณหภูมิในเนื้อที่ใช้น้อยต่ำลงมากที่สุด อุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศมากที่สุด 5.42°C ลดลงจากกล่องควบคุมโดยเฉลี่ยประมาณ 0.48°C

ในส่วนการจำลองผลด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล ได้นำอุณหภูมิผิวหลังคาที่มากที่สุดในเวลากลางวันและอุณหภูมิลหลังคาที่น้อยที่สุดในเวลากลางคืน และค่าอุณหภูมิบรรยากาศ ณ เวลานั้นมาใช้เป็นค่าอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกในการทำการจำลอง โดยเวลากลางคืน อุณหภูมิผิวหลังคาที่นำมาใช้เท่ากับ 13.50°C และอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 23.54°C ส่วนเวลากลางวัน อุณหภูมิผิวหลังคาที่นำมาใช้เท่ากับ 67.30°C และอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 27.33°C

การจำลองความแตกต่างของช่องเปิด พบว่าอาคารที่ไม่มีช่องเปิดจะทำให้อุณหภูมิที่เนื้อที่ใช้น้อยของกลุ่มอาคารลดต่ำลงจากบรรยากาศได้มากที่สุดในช่วงกลางวัน และกักขังความร้อนจนทำให้ภายในอาคารมีอุณหภูมิสูงสุดสำหรับเวลากลางวัน ส่วนการมีช่องเปิดมากทำให้กลุ่มอาคารมีการระบายอากาศที่ดีในช่วงกลางวันจนอุณหภูมิภายในใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอก แต่ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้อาคารไม่ได้รับประโยชน์จากความเย็นที่ผิวหลังคาในเวลากลางคืน เนื่องจากความเย็นถูกระบายออกไปภายนอกจนหมด

การจำลองระยะห่างและความสูงของอาคารที่แตกต่างกัน พบว่าระยะห่างที่มากขึ้นทำให้อุณหภูมิเวลากลางคืนสูงขึ้นในกรณีความสูงอาคารเท่ากัน และส่วนสูงที่มากขึ้นในอาคารที่มีระยะห่างเท่ากัน จะช่วยลดอุณหภูมิภายในเนื้อที่ที่ใช้อาศัยในเวลากลางคืนได้เนื่องจากที่ว่างระหว่างอาคารมีความชะลุดมากขึ้น และสามารถลดอุณหภูมิในเวลากลางวันได้เนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนจากแผ่นหลังคามีระยะไกลออกไป

รูปแบบการออกแบบที่เสนอแนะ จะเป็นการติดแผงกันลมเพิ่มซึ่งสอดคล้องกับการเสนอแนะของ Martin (1989) ว่าหลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับหลังคาแบบ Parapet สำหรับกลุ่มอาคารจะช่วยให้กักความเย็นไม่ให้ถูกพัดพาออกไปจากบริเวณของกลุ่มอาคารและสร้างกระแสลมไหลวนในหานความเย็นที่เหนือหลังคาออกไปใช้ ส่วนการนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารเดี่ยว ใช้วิธีติดตั้งแผงกันลมในด้านที่หลังคาเอียงลง และทำช่องเปิดเพื่อนำอากาศเย็นเข้าที่ตำแหน่งปลายล่างของแผงกันลม เพื่อให้อากาศเย็นจากบนหลังคาสามารถไหลลงไปได้

การศึกษาครั้งนี้ได้พิสูจน์ผลแนวทางการออกแบบ Passive cooling ที่เสนอโดย Trombe (1967) และ Givoni (1994) ได้อย่างชัดเจน ซึ่งการออกแบบ Passive cooling ที่ได้ผลดี โดยเฉพาะ Radiative cooling จะต้องใช้สภาพอากาศภายนอกที่สนับสนุนโดยการที่ท้องฟ้าโปร่ง สนับสนุนการคายความร้อนขึ้นสู่ท้องฟ้า ซึ่งเหมาะกับอากาศฤดูหนาวของกรุงเทพฯ รวมทั้ง การประยุกต์ใช้หลักการ Passive cooling ที่นำเสนอแนะนี้ จำเป็นต้องคำนึงถึงการระบายความร้อนให้ดีที่สุดในช่วงเวลาที่ร้อน และปิดอาคารให้เก็บกักความเย็นให้มากที่สุดในช่วงอากาศเย็น

7.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

การวิจัยต่อไปควรพิจารณาถึงค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุจริงด้วย เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับประสิทธิภาพในการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น

การทดลองนี้ทำโดยกล่องทดลองขนาดเล็ก ควรจะมีการนำไปทดลองกับอาคารในขนาดจริง

การทดลองนี้ทำการเก็บค่าในช่วงฤดูหนาวที่มีอากาศแห้ง จึงควรมีการเก็บค่าในฤดูอื่นด้วยตลอดทั้งปี

การทดลองนี้อาจนำไปทดลองเก็บข้อมูลในเขตจังหวัดอื่นทางภาคเหนือหรือภาคอีสาน ซึ่งมีอากาศแห้งกว่ากรุงเทพมหานคร

ในประเทศไทย มีบ้านปึกผีเสื้อ ตั้งอยู่ที่จังหวัดอุบลราชธานี ถูกออกแบบโดย ผศ.ดร.อรุณศรี เศรษฐบุตร มีการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ แต่ยังคงขาดการวัดผลในระยะยาวอย่างต่อเนื่อง จึงเสนอแนะให้มีการติดตั้งเครื่องมือเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากบ้านตัวอย่างนี้ เพื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพตลอดทั้งปีของการประยุกต์ใช้หลักการนี้ในประเทศไทยเพิ่มมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Anderson Bruce. (1977). *Solar energy*: . New Hampshire: Total Environmental Action Inc.
- Bagiorgas H.S., & Mihalakakou G. (2008). Experimental and theoretical investigation of a nocturnal radiator for space cooling. *Renewable Energy*, 33, 1220-1227.
- Chirattananon S. (2005). *Building for energy efficiency*. Bangkok: Asian Institute of Technology.
- Givoni B. (1977). Solar heating and night radiation cooling by a roof radiation trap. *Energy and Buildings*, 1, 141 - 145.
- Givoni B. (1994). *Passive and low energy cooling of building*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Hollick John. (2012). Nocturnal radiation cooling tests. *Energy Procedia*, 30, 930-936.
- Khedari J., e., al.,. (2000). Field investigation of night radiation cooling under tropical climate. *Renewable Energy*, 20, 183-189.
- Lee Sunwoo, e., al.,. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, 44, 1431-1439.
- Martin Marlo. (1989). Radiative Cooling. In Cook Jeffrey (Ed.), *Passive Cooling*. Cambridge: MIT Press.
- Mathur J., e., al.,. (2006). Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38, 1156-1163.
- Olgay Victor. (1973). *Design with climate* (4th edition ed.). New Jersey: Princeton University Press.
- Samimi Mojtaba. (1998). Hourly solar direct radiation. Retrieved 2014, Mar 07 http://solarchvision.com/?page_id=601
- Susanti L., e., al.,. (2011). A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building. *Energy and Buildings*, 43, 211-218.
- Treamorn Prommajak, e., al.,. (2008). Passive cooling of air at night by the nocturnal radiation in Loei, Thailand. *International Journal of Renewable Energy*, 3, 141-154.
- Yusoff Mohammad, e., al.,. (2010). Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solar collector and vertical stack. *Building and Environment*, 45, 2296-2308.
- Zhai X.Q., e., al.,. (2011). A review for the applications of solar chimneys in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3757-3767.

- จอมภพ แววศักดิ์ และคณะ. (2542). การศึกษาความเป็นไปได้ของการทำความเย็นโดยการใช้หลักการแผ่รังสีในเวลากลางคืนในประเทศไทย. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 37, 107-112.
- เฉลิมวัฒน์ ตันตสวัสดิ์, & ดารณี จารีมิตร. (2005). การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ: แนวทางการออกแบบผังอาคารชุดพักอาศัยประเภทอาคารสูง. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 3, 23-36.
- ชลธิษฐ์ ถนัดศิลป์กุล. (2546). แนวทางการออกแบบปล่องระบายอากาศสำหรับบ้านพักอาศัยในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนิต จินดาวนิก และคณะ. (2543). ข้อมูลอากาศประเทศไทยสำหรับงานอนุรักษ์พลังงาน จังหวัดกรุงเทพมหานคร. กรุงเทพฯ: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา จันทวงษ์ และคณะ. (2554). สมรรถนะเชิงความร้อนของปล่องโซล่าเซลล์ระบายอากาศแบบธรรมชาติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในสภาวะอากาศแบบร้อนและชื้น. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(3), 559-568.
- ศักดิ์ภัท ทมทิตชงค์. (2555). ประสิทธิภาพของการใช้ปล่องระบายอากาศแสงอาทิตย์กับหลังคากระเบื้องลอนคู่ เพื่อการลดอุณหภูมิภายในอาคารพักอาศัยในประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์.
- สมสิทธิ์ นิตยะ. (2541). การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิขญา อธิคมบัณฑิตกุล. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุหลังคาที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและฉนวนกันความร้อนทั่วไป. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 10 นาที ตั้งแต่วันที่ 23-26 ธันวาคม 2556

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
23/12/2013	8:30	749.60	23.41	63.40	22.50	22.40	22.90	22.80	23.10	23.20	21.60	22.90	22.80	22.90	22.90	23.00
23/12/2013	8:40	837.10	23.52	63.27	23.40	23.40	23.20	23.60	23.80	23.60	22.20	23.50	23.20	24.10	23.80	22.90
23/12/2013	8:50	927.60	23.74	63.48	24.20	24.90	23.90	24.80	25.00	24.00	23.10	24.70	23.80	25.70	25.20	23.40
23/12/2013	9:00	1020.00	23.88	62.73	24.40	24.80	24.20	25.10	25.10	25.50	23.60	25.00	24.40	26.50	25.20	24.40
23/12/2013	9:10	1119.00	24.07	62.63	25.00	25.50	25.10	25.90	25.60	25.90	24.20	25.10	24.60	28.40	25.30	24.70
23/12/2013	9:20	1179.00	24.26	61.89	25.90	24.90	25.20	27.40	25.10	24.80	25.70	25.40	24.50	32.10	25.60	25.00
23/12/2013	9:30	1286.00	24.47	60.44	29.40	27.10	26.10	31.80	26.40	24.40	28.60	26.20	24.10	40.90	26.80	24.00
23/12/2013	9:40	1361.00	24.64	61.07	31.60	28.10	26.70	34.90	27.90	25.20	31.20	29.40	25.10	44.80	30.10	25.20
23/12/2013	9:50	1459.00	24.81	60.34	33.60	29.20	27.30	37.60	28.90	26.50	33.60	29.40	25.90	47.20	29.80	26.60
23/12/2013	10:00	1479.00	25.02	59.56	38.40	29.60	27.50	40.90	30.00	26.00	36.30	31.10	25.40	50.70	31.30	25.00
23/12/2013	10:10	1565.00	25.13	58.85	39.70	29.40	28.00	41.20	30.20	27.30	37.40	32.20	26.50	51.20	33.40	26.90
23/12/2013	10:20	1665.00	25.32	57.91	40.20	29.90	27.90	41.80	29.00	27.60	38.20	31.00	27.00	53.00	31.00	27.40
23/12/2013	10:30	1688.00	25.40	57.09	41.20	30.30	28.30	42.20	30.40	26.90	38.80	31.10	26.60	53.30	31.20	26.40
23/12/2013	10:40	1809.00	25.67	57.02	44.10	30.40	28.80	45.70	31.50	27.00	41.60	33.10	27.00	57.40	31.50	27.60
23/12/2013	10:50	1406.00	25.84	55.38	39.30	32.60	28.50	39.60	31.20	26.80	36.70	32.70	26.60	48.00	30.10	27.60
23/12/2013	11:00	1863.00	26.05	55.80	46.00	31.90	29.10	46.30	30.40	27.10	42.60	30.80	26.80	59.10	31.50	27.70
23/12/2013	11:10	1913.00	26.19	54.76	41.00	31.90	29.40	41.10	31.90	29.20	38.80	32.30	28.80	51.10	33.00	28.60
23/12/2013	11:20	1793.00	26.35	53.63	43.80	33.80	29.60	44.10	33.20	29.10	41.20	34.10	28.70	55.60	34.20	28.60
23/12/2013	11:30	1931.00	26.39	53.42	47.40	32.20	29.90	49.10	32.80	28.20	44.10	33.60	27.70	61.20	36.40	28.10
23/12/2013	11:40	1937.00	26.48	51.51	42.80	32.20	30.00	44.40	31.60	30.40	42.40	32.70	30.40	57.30	33.70	31.00
23/12/2013	11:50	1967.00	26.63	52.81	40.20	30.30	30.10	40.10	31.10	29.80	39.60	30.70	29.40	52.50	31.50	29.40
23/12/2013	12:00		26.85	52.03	45.10	33.50	30.00	45.70	32.70	31.00	42.80	32.90	30.40	58.50	33.80	31.00
23/12/2013	12:10	1984.00	26.98	50.72	48.10	34.90	30.20	46.80	35.10	29.30	43.40	36.90	29.90	58.90	38.00	30.10
23/12/2013	12:20		27.06	50.96	46.60	34.60	30.40	46.90	33.90	29.70	44.60	34.70	29.30	61.70	38.60	30.40
23/12/2013	12:30		27.28	50.75	44.00	34.50	30.70	44.10	34.00	31.20	41.10	34.10	30.10	54.10	35.60	30.80
23/12/2013	12:40	1991.00	27.30	50.08	46.70	33.70	30.60	46.90	30.90	28.70	43.40	32.30	28.20	58.70	32.70	28.60
23/12/2013	12:50		27.45	47.95	51.20	37.70	31.50	52.10	36.10	29.70	46.70	36.70	29.30	64.90	34.00	30.40
23/12/2013	13:00		27.58	48.46	46.60	33.30	31.50	46.60	33.30	31.70	44.00	33.70	30.90	59.50	34.20	30.80
23/12/2013	13:10		27.61	47.95	48.10	34.60	31.50	48.10	32.20	29.50	44.00	33.90	29.50	59.30	33.50	30.10
23/12/2013	13:20		27.69	48.35	52.40	35.30	31.70	52.00	35.80	30.40	47.50	34.70	30.20	66.10	34.60	31.20
23/12/2013	13:30	1680.00	27.79	47.98	44.70	36.20	32.20	45.00	35.10	30.60	41.60	36.80	30.30	54.60	38.60	30.20
23/12/2013	13:40	1611.00	28.01	47.12	41.70	33.30	31.70	42.70	34.10	31.60	39.90	34.80	31.10	52.60	35.20	31.50
23/12/2013	13:50	1547.00	28.19	47.54	47.10	34.20	32.10	47.70	34.30	30.10	43.90	35.80	30.30	58.90	33.90	30.80
23/12/2013	14:00	1911.00	28.32	46.07	47.80	36.10	32.00	48.20	35.20	31.80	44.70	36.10	31.30	61.00	37.80	31.60
23/12/2013	14:10	1871.00	28.21	46.28	49.00	36.10	32.70	48.80	35.50	32.10	45.40	35.80	32.70	61.60	38.30	32.90
23/12/2013	14:20	1807.00	28.11	46.32	47.10	35.70	32.90	46.20	34.00	31.50	43.20	34.40	31.10	56.90	34.70	30.80

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
23/12/2013	14:30	1662.00	28.11	46.23	46.70	35.70	32.80	46.20	35.60	32.20	43.10	35.50	32.00	56.60	36.70	32.70
23/12/2013	14:40	1485.00	28.14	47.27	46.80	34.40	33.30	48.20	35.00	30.50	42.90	35.20	30.60	56.80	36.60	31.00
23/12/2013	14:50	1466.00	28.27	46.65	44.10	34.30	32.60	43.20	32.80	30.80	40.90	33.10	30.70	53.10	34.80	31.10
23/12/2013	15:00	1444.00	28.21	46.51	38.40	33.00	32.20	38.40	32.80	31.40	37.30	33.80	31.20	45.00	33.80	31.00
23/12/2013	15:10	660.00	28.14	48.02	36.70	33.50	32.90	37.20	33.80	32.20	35.50	34.00	31.70	42.00	35.50	31.80
23/12/2013	15:20	990.00	28.10	48.69	37.00	32.30	32.10	37.20	32.60	31.70	34.70	32.40	31.60	41.00	33.10	31.80
23/12/2013	15:30	622.90	28.16	48.64	34.00	31.80	31.90	34.20	31.90	30.60	32.00	31.00	30.50	36.60	32.20	30.80
23/12/2013	15:40	698.30	28.26	48.59	35.20	32.10	31.30	35.20	31.20	29.40	33.00	31.10	29.30	39.30	31.60	29.40
23/12/2013	15:50	1061.00	28.11	48.82	38.40	32.40	31.10	37.60	31.00	29.40	36.50	30.50	29.20	45.60	31.10	29.40
23/12/2013	16:00	571.40	28.03	49.32	35.30	32.80	31.60	35.70	32.80	31.20	33.70	32.20	30.80	39.50	33.10	31.20
23/12/2013	16:10	440.50	27.80	49.63	31.40	30.30	30.80	31.50	30.50	29.80	30.70	30.20	29.50	34.00	31.30	30.10
23/12/2013	16:20	311.90	27.75	50.17	30.10	29.50	30.50	30.20	30.00	29.50	29.00	29.30	29.20	31.30	30.10	29.40
23/12/2013	16:30	265.40	27.69	50.54	29.00	29.10	29.80	29.00	29.30	28.90	27.80	28.70	28.70	29.40	29.40	28.70
23/12/2013	16:40	267.80	27.66	51.36	29.40	29.00	29.80	29.40	29.30	28.80	28.00	28.70	28.80	29.60	29.50	28.80
23/12/2013	16:50	194.80	27.43	51.67	28.50	28.80	29.60	28.50	29.10	28.90	27.20	28.30	28.70	28.40	29.10	28.70
23/12/2013	17:00	240.00	27.37	52.13	28.50	28.50	29.20	28.50	28.80	28.60	27.00	27.90	28.50	28.50	28.80	28.50
23/12/2013	17:10	179.10	27.32	52.47	27.60	28.20	29.10	27.60	28.30	28.30	26.30	27.20	28.20	27.10	28.30	28.30
23/12/2013	17:20	112.20	27.12	52.69	26.50	27.90	28.70	26.50	28.00	28.10	24.90	27.00	27.80	25.40	27.60	27.80
23/12/2013	17:30	70.90	27.06	53.28	26.10	27.30	28.70	26.10	27.70	27.80	24.80	26.40	27.70	24.90	27.00	27.50
23/12/2013	17:40		26.95	53.51	25.50	26.90	28.40	25.60	27.30	27.40	24.20	26.70	27.20	24.00	26.90	27.10
23/12/2013	17:50		26.90	53.69	25.30	26.60	28.00	25.30	26.90	26.90	24.20	26.40	26.90	23.80	26.80	26.70
23/12/2013	18:00		26.87	54.00	25.10	26.50	27.70	25.00	26.60	26.80	23.80	25.90	26.70	23.40	26.20	26.60
23/12/2013	18:10		26.80	53.82	24.60	26.20	27.40	24.40	26.30	26.50	23.00	24.70	26.50	22.40	25.30	26.40
23/12/2013	18:20		26.82	54.17	24.20	26.00	27.30	24.00	26.00	26.40	22.30	24.60	26.30	21.60	25.20	26.20
23/12/2013	18:30		26.77	54.42	24.30	26.00	27.00	24.10	26.20	26.40	22.60	25.50	26.20	22.10	25.00	26.20
23/12/2013	18:40		26.77	54.51	23.80	25.60	27.00	23.70	25.90	26.30	22.30	24.80	26.20	21.70	24.80	26.10
23/12/2013	18:50		26.72	54.56	23.70	25.50	26.80	23.70	25.90	26.10	22.10	24.60	26.00	21.30	24.40	25.90
23/12/2013	19:00		26.61	54.92	23.80	25.50	26.50	23.60	25.70	26.00	22.20	24.70	25.90	21.80	25.10	25.70
23/12/2013	19:10		26.56	55.25	22.70	24.80	26.40	22.40	24.80	25.80	20.30	22.40	25.60	19.90	22.40	25.40
23/12/2013	19:20		26.51	55.49	23.60	25.30	26.30	23.50	25.50	25.70	21.90	24.30	25.60	21.30	23.70	25.60
23/12/2013	19:30		26.40	56.22	23.30	25.20	26.20	23.20	25.20	25.60	21.50	23.80	25.50	21.00	24.30	25.40
23/12/2013	19:40		26.32	57.14	23.50	25.20	26.10	23.40	25.40	25.60	21.70	24.70	25.50	21.20	24.90	25.30
23/12/2013	19:50		26.29	57.04	23.00	24.90	26.00	23.00	25.30	25.40	21.30	24.20	25.40	20.60	23.90	25.30
23/12/2013	20:00		26.26	57.31	23.40	25.00	25.90	23.30	25.10	25.30	22.00	23.70	25.30	21.40	24.50	25.10
23/12/2013	20:10		26.19	57.95	22.80	24.60	25.80	22.80	25.00	25.30	21.00	24.00	25.20	20.20	23.20	25.00
23/12/2013	20:20		26.11	58.34	22.70	24.50	25.60	22.60	24.40	25.10	20.90	22.50	24.90	20.60	22.60	24.80
23/12/2013	20:30		25.99	58.74	22.40	24.30	25.60	22.50	24.50	25.00	21.00	23.00	24.90	20.60	24.10	24.70
23/12/2013	20:40		25.86	59.55	22.90	24.50	25.50	22.80	24.70	24.90	21.00	23.60	24.90	20.30	23.40	24.70
23/12/2013	20:50		25.84	59.70	22.60	24.40	25.40	22.50	24.60	24.80	20.60	23.70	24.70	20.30	24.10	24.70
23/12/2013	21:00		25.84	59.85	22.30	24.00	25.20	22.30	24.20	24.70	20.70	23.10	24.70	19.90	23.10	24.60

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
23/12/2013	21:10		25.72	60.22	22.30	23.90	25.10	22.20	24.20	24.50	20.80	23.00	24.50	20.30	23.20	24.40
23/12/2013	21:20		25.72	60.41	22.50	24.10	25.00	22.20	24.30	24.40	20.80	22.80	24.40	20.40	23.10	24.30
23/12/2013	21:30		25.68	60.40	21.60	23.60	24.90	21.60	24.00	24.30	20.10	22.10	24.30	19.60	22.40	24.20
23/12/2013	21:40		25.67	60.64	21.90	23.60	24.70	21.70	23.70	24.10	20.00	21.70	24.10	19.60	21.50	24.00
23/12/2013	21:50		25.61	60.75	21.60	23.60	24.70	21.50	23.80	24.00	19.80	22.60	24.00	18.90	22.40	23.80
23/12/2013	22:00		25.57	60.89	21.40	23.10	24.60	21.20	23.30	23.90	19.20	21.70	23.70	18.30	21.80	23.60
23/12/2013	22:10		25.51	60.82	21.60	23.30	24.40	21.40	23.40	23.80	19.60	22.10	23.80	18.90	21.90	23.50
23/12/2013	22:20		25.56	60.86	21.50	23.40	24.50	21.10	23.20	23.80	19.00	20.50	23.50	18.30	20.80	23.40
23/12/2013	22:30		25.46	60.38	21.20	22.80	24.30	20.80	23.10	23.70	18.60	19.80	23.10	18.20	20.50	23.10
23/12/2013	22:40		25.46	60.13	22.00	23.30	24.20	21.80	23.50	23.80	20.20	22.70	23.70	19.80	23.10	23.60
23/12/2013	22:50		25.41	60.27	21.90	23.60	24.10	21.90	23.70	23.80	20.30	22.60	23.80	20.00	23.00	23.70
23/12/2013	23:00		25.35	60.32	21.50	23.20	24.10	21.40	23.20	23.80	19.70	20.90	23.70	19.10	21.10	23.50
23/12/2013	23:10		25.54	60.00	22.00	23.50	24.00	22.10	23.60	23.70	20.60	23.10	23.60	20.10	23.40	23.60
23/12/2013	23:20		25.65	59.68	21.40	23.10	23.90	21.30	22.80	23.70	19.70	20.80	23.50	19.00	20.80	23.40
23/12/2013	23:30		25.68	59.44	21.50	23.10	23.90	21.60	23.20	23.60	19.80	21.90	23.40	19.30	21.40	23.30
23/12/2013	23:40		25.70	59.39	21.30	23.00	23.90	21.40	23.30	23.50	20.00	22.60	23.40	19.60	22.90	23.30
23/12/2013	23:50		25.68	59.20	21.10	22.60	23.80	20.90	22.80	23.50	19.70	21.70	23.30	19.20	22.40	23.20
24/12/2013	0:00		25.65	58.91	21.40	23.10	23.70	21.40	23.10	23.30	19.80	22.50	23.30	19.00	22.50	23.20
24/12/2013	0:10		25.64	58.85	21.30	22.90	23.70	21.10	22.90	23.30	19.70	21.80	23.20	18.90	21.70	23.10
24/12/2013	0:20		25.62	58.81	21.20	22.80	23.60	21.10	22.80	23.10	19.40	21.90	23.10	18.80	21.30	23.00
24/12/2013	0:30		25.62	58.78	21.40	22.90	23.60	21.30	23.00	23.20	19.80	22.10	23.20	19.10	22.20	23.00
24/12/2013	0:40		25.53	59.04	21.20	22.90	23.40	21.10	22.80	23.00	19.90	22.40	23.00	19.40	22.70	22.90
24/12/2013	0:50		25.49	59.37	20.90	22.40	23.30	20.80	22.30	22.90	19.40	21.00	23.00	18.90	21.50	22.80
24/12/2013	1:00		25.34	60.35	21.10	22.50	23.30	21.00	22.40	22.90	19.60	21.80	22.90	19.00	21.60	22.70
24/12/2013	1:10		25.40	60.15	20.80	22.40	23.30	21.10	22.70	22.80	19.50	22.00	22.80	19.30	22.20	22.80
24/12/2013	1:20		25.35	60.81	20.70	22.40	23.20	20.80	22.20	22.70	19.30	21.60	22.70	18.80	21.60	22.50
24/12/2013	1:30		25.37	60.94	20.60	22.10	23.10	20.60	22.10	22.60	19.10	21.50	22.60	18.40	21.20	22.50
24/12/2013	1:40		25.37	61.30	20.60	22.10	23.00	20.60	22.20	22.50	19.40	21.60	22.40	18.90	22.00	22.30
24/12/2013	1:50		25.35	61.67	20.50	22.20	22.90	20.50	22.10	22.40	19.30	21.20	22.40	18.80	21.50	22.20
24/12/2013	2:00		25.29	61.93	20.50	21.90	22.80	20.40	21.80	22.30	19.30	20.90	22.40	18.90	21.20	22.30
24/12/2013	2:10		25.27	62.20	20.10	21.80	22.70	20.00	21.50	22.20	18.60	20.40	22.10	18.30	20.10	22.00
24/12/2013	2:20		25.24	62.43	20.40	21.80	22.60	20.20	21.60	22.10	18.60	20.80	22.00	18.10	21.00	21.90
24/12/2013	2:30		25.22	62.73	20.30	21.60	22.50	20.10	21.70	22.00	18.40	19.70	21.90	17.80	19.90	21.80
24/12/2013	2:40		25.19	62.88	20.40	21.80	22.40	20.30	21.80	21.90	19.00	21.40	22.00	18.70	21.50	21.90
24/12/2013	2:50		25.22	62.98	19.40	21.20	22.30	19.30	21.30	21.80	17.60	20.10	21.80	17.00	19.30	21.60
24/12/2013	3:00		25.22	63.07	19.40	21.30	22.20	19.30	21.40	21.60	17.60	19.90	21.50	17.10	19.40	21.40
24/12/2013	3:10		25.15	63.11	19.60	21.40	22.20	19.40	21.30	21.60	17.70	20.50	21.50	17.30	20.80	21.40
24/12/2013	3:20		25.18	63.30	19.40	21.30	22.00	19.40	21.30	21.50	18.10	20.70	21.70	17.60	20.70	21.50
24/12/2013	3:30		25.13	63.41	19.50	21.10	22.00	19.50	21.30	21.50	17.90	20.60	21.70	17.60	20.80	21.50
24/12/2013	3:40		25.15	63.47	19.40	21.20	22.00	19.50	21.30	21.50	18.20	20.40	21.60	17.80	20.90	21.40

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
24/12/2013	3:50		25.11	63.86	19.00	20.70	21.90	18.70	21.00	21.40	17.10	19.30	21.50	16.50	18.90	21.30
24/12/2013	4:00		25.03	64.23	18.70	20.80	21.80	18.70	20.60	21.40	17.00	19.00	21.20	16.60	18.70	21.10
24/12/2013	4:10		24.99	64.22	19.00	20.80	21.70	18.60	20.80	21.20	17.20	18.70	21.20	16.70	19.00	21.00
24/12/2013	4:20		24.94	64.30	19.50	21.10	21.70	19.50	21.20	21.40	18.10	20.70	21.40	17.40	20.80	21.20
24/12/2013	4:30		24.92	64.60	19.60	21.10	21.70	19.40	20.90	21.30	18.20	20.30	21.30	17.70	20.50	21.20
24/12/2013	4:40		24.78	65.14	19.90	21.30	21.60	19.90	21.20	21.40	18.60	20.70	21.40	18.20	21.10	21.30
24/12/2013	4:50		24.75	65.46	19.70	21.00	21.50	19.70	20.90	21.30	18.60	20.60	21.40	18.50	20.90	21.20
24/12/2013	5:00		24.81	65.35	19.80	21.10	21.60	19.90	21.20	21.20	18.50	20.60	21.20	18.10	20.80	21.20
24/12/2013	5:10		24.86	65.49	19.10	20.60	21.50	19.20	20.50	21.10	17.90	19.90	21.00	17.50	20.20	21.00
24/12/2013	5:20		24.88	65.25	18.70	20.40	21.40	18.70	20.50	20.90	17.50	19.40	21.00	17.00	20.20	20.90
24/12/2013	5:30		24.80	65.59	19.60	20.90	21.40	19.50	20.90	21.00	18.20	20.40	21.10	17.80	20.60	21.00
24/12/2013	5:40		24.86	65.64	19.20	20.60	21.30	19.20	20.70	21.00	17.90	20.20	20.90	17.40	20.10	20.90
24/12/2013	5:50		24.80	66.01	18.70	20.20	21.20	18.40	20.20	20.80	17.30	18.90	20.60	16.90	19.10	20.60
24/12/2013	6:00		24.83	65.81	18.70	20.20	21.20	18.40	20.20	20.70	17.10	18.50	20.60	16.60	18.30	20.40
24/12/2013	6:10		24.78	65.86	18.50	20.30	21.10	18.40	20.20	20.60	17.10	19.00	20.40	16.70	18.80	20.30
24/12/2013	6:20		24.73	66.39	19.20	20.40	21.10	19.00	20.50	20.60	17.30	19.20	20.50	17.00	18.90	20.20
24/12/2013	6:30		24.67	66.55	18.60	20.10	21.00	18.40	20.00	20.70	16.80	17.80	20.40	16.30	18.30	20.30
24/12/2013	6:40		24.64	66.84	19.10	20.30	21.00	19.00	20.30	20.70	17.60	19.10	20.40	17.20	19.30	20.40
24/12/2013	6:50		24.62	67.19	19.30	20.40	21.00	19.20	20.30	20.80	17.80	18.70	20.60	17.40	19.20	20.50
24/12/2013	7:00		24.58	67.60	19.50	20.50	21.10	19.50	20.70	20.90	18.10	19.40	20.70	18.00	19.80	20.50
24/12/2013	7:10		24.48	68.35	20.00	20.80	21.20	19.80	20.80	21.10	18.60	19.80	21.00	18.90	20.20	20.90
24/12/2013	7:20		24.61	67.94	20.40	21.00	21.30	20.40	20.90	21.30	19.30	19.90	21.10	19.80	20.50	21.00
24/12/2013	7:30		24.62	67.46	21.40	21.40	21.40	21.40	21.40	21.60	20.20	20.80	21.40	21.40	21.20	21.40
24/12/2013	7:40		24.55	67.14	22.50	22.00	21.60	22.60	21.90	21.90	21.30	21.30	21.70	23.20	21.80	21.60
24/12/2013	7:50		24.50	66.98	23.60	22.50	22.00	23.80	22.50	22.50	22.40	22.30	22.30	25.20	22.70	22.30
24/12/2013	8:00		24.51	67.20	23.10	22.30	22.20	23.20	22.60	22.50	22.50	22.40	22.40	24.20	22.50	22.40
24/12/2013	8:10		24.53	67.14	23.60	22.60	22.50	23.80	22.90	22.90	22.90	22.70	22.60	25.10	23.00	22.70
24/12/2013	8:20		24.69	66.73	24.40	23.20	22.90	24.60	23.50	23.50	23.50	23.20	23.10	26.20	23.60	23.10
24/12/2013	8:30	941.00	25.26	66.10	26.30	24.50	23.50	26.80	25.10	24.20	25.10	24.70	23.90	28.60	25.60	24.00
24/12/2013	8:40	842.20	25.21	62.88	26.80	24.50	23.70	27.10	24.70	24.40	25.20	24.30	23.90	28.80	24.40	23.60
24/12/2013	8:50	612.90	24.86	64.49	27.30	25.90	24.10	27.80	25.70	24.90	26.10	25.50	24.70	30.90	25.80	24.40
24/12/2013	9:00	713.60	24.96	64.12	27.10	25.90	24.70	27.90	26.10	26.20	26.30	26.20	25.30	31.10	26.60	25.50
24/12/2013	9:10	865.00	25.11	62.95	27.90	26.00	25.00	29.20	26.30	25.90	27.10	26.20	25.70	32.80	26.40	25.10
24/12/2013	9:20	689.20	25.15	61.49	27.00	25.10	25.30	28.00	26.10	26.20	26.40	25.70	25.40	31.60	26.10	25.70
24/12/2013	9:30	879.60	25.41	60.40	28.60	27.10	25.50	29.30	26.70	26.00	27.40	26.70	25.70	33.50	27.40	25.80
24/12/2013	9:40	931.70	25.67	59.47	29.20	27.00	26.00	29.70	27.30	27.20	28.70	26.80	26.30	34.60	27.30	26.50
24/12/2013	9:50	927.60	25.78	59.19	30.00	26.80	26.10	30.40	27.10	26.80	29.30	27.00	25.70	35.10	27.00	26.10
24/12/2013	10:00	1114.00	25.84	58.00	35.20	29.00	26.90	35.40	29.20	27.60	33.00	29.90	27.00	42.70	29.50	26.50
24/12/2013	10:10	1162.00	25.96	57.43	33.30	27.60	26.80	33.30	27.80	27.70	32.70	27.80	26.90	41.70	28.40	27.30
24/12/2013	10:20	1268.00	26.10	55.53	37.60	31.10	27.50	38.30	29.80	27.70	35.50	30.30	27.30	46.20	31.50	27.50

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
24/12/2013	10:30	1881.00	26.13	55.85	36.70	29.20	28.10	38.00	30.00	29.30	35.60	30.00	28.00	45.90	30.80	28.60
24/12/2013	10:40	1261.00	26.32	55.98	34.10	30.00	28.20	35.20	30.50	29.70	33.60	30.50	28.80	42.00	31.30	28.80
24/12/2013	10:50	1450.00	26.50	54.74	37.00	30.80	28.60	37.50	30.00	28.90	35.40	30.60	28.30	45.00	32.50	28.60
24/12/2013	11:00	1571.00	26.45	54.69	40.80	32.40	29.10	41.80	31.30	28.30	38.30	33.00	28.30	50.30	33.70	28.50
24/12/2013	11:10	1525.00	26.51	53.26	39.60	31.80	29.00	39.00	31.70	29.30	37.60	32.00	28.80	50.30	34.00	29.00
24/12/2013	11:20	999.80	26.66	52.24	41.00	31.60	29.10	42.10	31.00	28.90	39.40	31.00	28.60	52.60	32.10	29.40
24/12/2013	11:30	1841.00	26.79	51.79	44.40	32.40	29.80	45.80	32.30	30.60	42.40	33.10	30.00	58.30	34.10	30.20
24/12/2013	11:40		27.06	48.55	43.90	34.40	30.00	43.60	34.00	30.60	41.50	33.90	30.40	56.10	36.00	31.10
24/12/2013	11:50		27.16	48.80	44.70	31.20	30.10	45.00	31.90	30.90	43.40	32.50	30.60	60.30	34.00	31.30
24/12/2013	12:00		27.33	47.77	50.40	36.10	30.60	51.00	34.90	30.10	47.60	35.40	29.90	67.30	35.50	30.80
24/12/2013	12:10	725.00	27.37	47.61	33.10	29.70	30.00	33.40	30.60	29.80	32.50	30.50	29.40	38.20	31.30	29.50
24/12/2013	12:20		27.48	48.18	45.80	32.10	30.10	45.20	33.10	30.90	43.80	33.50	30.80	59.80	35.10	31.60
24/12/2013	12:30	925.90	27.40	47.78	36.80	31.00	30.50	37.80	30.50	29.70	36.30	31.30	29.50	44.60	32.20	30.00
24/12/2013	12:40	670.50	27.49	46.63	34.60	32.30	31.00	35.30	31.90	30.60	33.50	31.90	30.40	39.30	32.40	31.00
24/12/2013	12:50	688.60	27.74	45.25	34.90	30.50	30.10	35.20	31.10	30.00	33.40	30.70	29.80	40.20	31.70	30.20
24/12/2013	13:00		27.70	45.70	41.90	32.90	30.50	42.50	33.80	31.50	41.00	34.30	31.20	54.40	34.90	31.60
24/12/2013	13:10		27.74	45.44	51.20	37.20	31.20	50.60	36.30	31.50	47.40	37.50	31.20	64.80	37.70	31.40
24/12/2013	13:20	826.00	27.61	45.74	36.10	32.50	30.90	36.70	31.50	29.60	34.40	32.40	29.20	41.60	33.60	29.70
24/12/2013	13:30	845.70	27.88	46.54	43.90	32.90	31.30	43.40	33.50	31.80	41.80	34.50	31.40	54.90	35.70	32.00
24/12/2013	13:40	498.40	28.13	44.83	32.20	30.50	30.80	32.70	31.30	30.50	31.40	31.10	30.30	35.30	33.60	30.70
24/12/2013	13:50	1902.00	28.14	43.39	49.90	35.00	31.10	50.20	35.00	30.00	44.80	36.30	30.10	61.40	37.90	30.90
24/12/2013	14:00	1876.00	28.01	44.25	43.60	33.00	31.50	43.40	33.00	31.90	41.20	33.40	31.10	54.30	34.70	31.50
24/12/2013	14:10	1716.00	28.31	44.30	37.40	31.90	31.20	37.80	32.30	30.90	35.70	32.30	30.80	43.40	32.70	30.90
24/12/2013	14:20	1723.00	28.19	44.87	48.30	35.60	32.30	48.30	34.90	31.90	43.20	35.70	31.90	57.60	35.70	33.40
24/12/2013	14:30	1448.00	28.36	45.03	41.10	32.50	31.90	42.40	33.30	32.30	39.90	32.80	31.10	51.10	33.30	31.20
24/12/2013	14:40	531.90	28.40	43.76	35.00	30.70	31.30	35.00	31.20	30.40	32.90	31.00	30.10	38.60	32.30	30.30
24/12/2013	14:50	1449.00	28.55	43.53	43.10	34.10	31.30	42.60	33.20	30.50	39.40	32.40	30.20	51.60	32.40	30.00
24/12/2013	15:00	1307.00	28.58	43.24	44.00	34.30	31.80	43.60	34.10	30.80	39.60	34.10	30.50	51.60	33.80	32.10
24/12/2013	15:10	1245.00	28.57	42.97	43.50	34.00	32.10	43.40	34.10	31.40	39.60	33.60	31.60	50.50	34.70	32.00
24/12/2013	15:20	1018.00	28.63	43.11	42.70	34.90	32.60	43.10	35.00	31.20	38.90	34.70	31.20	49.10	33.50	32.20
24/12/2013	15:30	1018.00	28.50	42.17	38.30	32.90	31.70	38.70	32.60	31.00	35.80	31.40	30.30	43.90	32.80	30.80
24/12/2013	15:40	937.50	28.40	42.55	39.10	33.70	32.00	38.70	33.70	32.40	35.80	32.60	31.80	43.30	33.10	32.10
24/12/2013	15:50	807.50	28.34	42.50	36.50	32.30	31.80	36.20	32.40	31.70	34.20	31.40	31.00	39.90	31.50	30.40
24/12/2013	16:00	720.20	28.34	43.03	35.30	31.90	31.50	34.00	32.30	31.80	33.10	31.80	31.60	38.50	32.90	32.40
24/12/2013	16:10	671.40	28.37	42.51	34.60	32.20	31.40	33.90	32.40	30.90	33.20	31.80	30.60	39.40	33.10	31.20
24/12/2013	16:20	571.30	28.34	42.34	31.50	31.10	31.20	31.50	31.90	31.60	30.50	31.30	31.50	33.50	32.10	31.90
24/12/2013	16:30	470.20	28.29	42.92	30.20	30.20	30.90	30.20	31.30	31.10	29.20	30.40	30.80	30.80	31.30	30.90
24/12/2013	16:40	389.50	28.24	43.41	30.10	30.10	30.60	30.10	30.80	30.80	28.60	30.30	30.50	30.00	31.10	30.70
24/12/2013	16:50	309.50	28.19	43.96	29.50	30.00	30.60	29.60	30.70	31.10	27.80	29.60	30.20	29.00	30.50	30.40
24/12/2013	17:00	199.80	28.03	44.68	28.90	29.60	30.10	29.00	30.00	30.10	27.20	29.20	29.80	28.30	30.00	29.70

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
24/12/2013	17:10	160.60	28.01	45.23	28.30	29.10	29.80	28.40	29.80	29.90	27.00	28.90	29.50	27.60	29.40	29.40
24/12/2013	17:20	129.10	27.92	45.64	27.90	29.00	29.50	27.90	29.20	29.40	26.50	27.90	29.20	26.80	28.90	29.00
24/12/2013	17:30	94.20	27.82	45.39	27.10	28.40	29.50	27.30	29.00	29.00	25.60	28.00	28.80	25.70	28.60	28.60
24/12/2013	17:40		27.72	46.58	26.30	28.30	29.20	26.60	28.30	28.80	24.70	26.80	28.60	24.70	27.30	28.50
24/12/2013	17:50		27.51	48.80	25.80	27.70	28.90	25.90	27.60	28.20	24.30	25.90	28.10	24.00	26.30	28.00
24/12/2013	18:00		27.38	49.29	25.50	27.30	28.50	25.60	27.50	27.80	24.10	26.70	27.70	23.80	27.20	27.60
24/12/2013	18:10		27.28	49.69	25.20	26.90	28.20	25.10	27.40	27.40	23.60	26.50	27.20	23.20	26.90	27.10
24/12/2013	18:20		27.24	49.81	24.40	26.50	27.90	24.20	26.80	27.00	22.70	25.90	26.90	21.70	25.40	26.80
24/12/2013	18:30		27.16	49.92	25.10	26.70	27.70	25.10	26.90	26.90	23.80	26.30	26.90	23.00	26.60	26.80
24/12/2013	18:40		27.11	50.10	23.90	26.10	27.40	23.90	26.10	26.60	21.90	23.80	26.50	21.30	24.60	26.40
24/12/2013	18:50		27.09	50.32	24.60	26.40	27.20	24.60	26.50	26.60	23.10	26.00	26.50	22.60	26.30	26.50
24/12/2013	19:00		27.08	50.35	24.30	26.30	27.00	24.50	26.10	26.50	22.90	25.10	26.40	22.50	24.80	26.40
24/12/2013	19:10		27.03	50.85	24.30	26.20	26.90	24.00	26.10	26.50	22.70	25.00	26.40	21.90	25.20	26.30
24/12/2013	19:20		27.03	50.82	23.40	25.40	26.80	23.40	26.00	26.30	22.20	24.90	26.30	21.80	25.10	26.20
24/12/2013	19:30		26.98	51.10	22.70	25.00	26.60	22.70	25.00	26.00	20.80	22.50	26.00	20.20	23.10	25.90
24/12/2013	19:40		26.93	50.90	22.40	24.80	26.40	22.20	24.50	25.90	19.80	21.90	25.40	19.10	22.00	25.50
24/12/2013	19:50		26.90	51.78	22.90	24.70	26.10	22.60	24.40	25.40	20.60	22.10	25.10	19.80	22.20	25.00
24/12/2013	20:00		26.91	51.98	22.20	24.60	26.00	22.00	24.50	25.30	20.00	22.00	24.60	19.30	21.90	24.80
24/12/2013	20:10		26.83	51.58	22.40	24.40	25.80	21.80	23.70	25.50	19.70	22.00	24.40	19.10	22.20	24.70
24/12/2013	20:20		26.74	51.85	23.00	24.50	25.70	22.70	24.60	25.40	20.90	22.30	24.10	20.60	22.80	24.30
24/12/2013	20:30		26.72	52.19	22.60	24.50	25.70	22.50	24.30	25.50	20.30	21.70	24.30	20.00	22.30	24.50
24/12/2013	20:40		26.63	52.36	23.10	25.00	25.60	22.90	25.00	25.50	20.60	22.90	24.50	20.10	23.50	24.70
24/12/2013	20:50		26.59	52.89	23.20	25.10	25.60	22.80	25.20	25.50	20.90	22.70	24.80	20.20	22.60	24.90
24/12/2013	21:00		26.56	53.20	22.80	24.70	25.50	22.60	24.70	25.40	20.80	23.20	25.20	20.20	23.90	25.10
24/12/2013	21:10		26.48	53.91	21.70	24.00	25.50	21.70	24.10	25.20	19.60	21.10	25.00	19.00	21.40	24.90
24/12/2013	21:20		26.42	54.47	22.40	24.40	25.40	22.00	24.40	25.00	19.90	22.00	24.50	19.10	21.80	24.40
24/12/2013	21:30		26.43	54.69	22.90	24.90	25.30	23.00	25.00	25.20	21.10	24.00	25.10	20.90	24.50	25.00
24/12/2013	21:40		26.40	54.90	21.70	23.80	25.20	21.70	23.70	25.10	19.80	21.40	24.80	19.30	22.30	24.50
24/12/2013	21:50		26.35	54.77	21.30	23.60	25.10	21.20	23.00	24.70	19.30	21.50	24.40	18.70	21.60	24.40
24/12/2013	22:00		26.37	55.21	21.40	23.50	25.00	20.90	22.80	24.40	18.80	21.20	24.00	18.00	21.10	24.00
24/12/2013	22:10		26.26	54.90	20.60	23.20	24.80	20.30	22.80	24.40	18.40	20.20	23.50	18.00	20.80	23.20
24/12/2013	22:20		26.19	54.64	22.20	24.10	24.80	22.20	24.20	24.70	20.60	22.70	24.30	20.00	22.80	24.50
24/12/2013	22:30		26.18	53.56	22.60	24.30	24.80	22.50	24.40	24.90	21.00	23.20	24.70	20.40	22.80	24.60
24/12/2013	22:40		26.08	53.35	22.00	24.00	24.80	22.20	23.90	24.60	20.80	22.10	24.30	20.20	22.20	24.30
24/12/2013	22:50		25.99	52.96	22.60	24.10	24.70	22.50	24.20	24.70	21.00	22.50	24.60	20.70	22.60	24.60
24/12/2013	23:00		25.94	52.66	22.50	24.20	24.60	22.50	24.30	24.60	21.10	23.90	24.60	20.60	24.00	24.40
24/12/2013	23:10		25.99	53.27	21.70	23.70	24.60	21.70	23.30	24.50	20.20	22.10	24.20	19.60	21.70	24.10
24/12/2013	23:20		25.92	52.59	21.30	23.50	24.40	21.30	23.40	24.20	19.40	21.10	24.20	19.00	22.20	24.00
24/12/2013	23:30		25.78	52.79	21.80	23.60	24.30	21.80	23.60	24.00	20.10	21.40	23.90	19.90	21.70	23.80
24/12/2013	23:40		25.75	53.19	22.10	23.80	24.20	22.20	23.60	24.10	20.80	22.40	23.90	20.30	22.70	24.00

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
24/12/2013	23:50		25.70	53.56	21.30	23.30	24.20	21.60	23.70	24.00	20.10	22.50	23.90	19.70	22.80	23.90
25/12/2013	0:00		25.70	53.81	22.00	23.70	24.10	22.10	23.80	24.00	20.70	23.30	23.90	20.40	23.50	23.80
25/12/2013	0:10		25.59	53.60	21.80	23.30	24.00	21.60	23.50	23.70	20.10	22.70	23.70	19.60	22.70	23.60
25/12/2013	0:20		25.54	53.99	20.90	22.90	24.00	21.10	23.00	23.50	19.30	21.90	23.50	18.80	21.70	23.40
25/12/2013	0:30		25.46	54.48	21.40	23.20	23.90	21.30	23.30	23.50	19.60	21.80	23.50	18.70	21.90	23.30
25/12/2013	0:40		25.37	55.37	21.70	23.30	23.80	21.90	23.30	23.50	20.20	22.90	23.50	19.90	23.00	23.50
25/12/2013	0:50		25.26	55.96	21.10	22.90	23.70	21.30	22.90	23.30	19.80	21.80	23.30	19.40	22.50	23.20
25/12/2013	1:00		25.22	56.08	21.10	23.00	23.60	21.10	23.00	23.20	19.50	21.90	23.20	19.30	21.90	23.10
25/12/2013	1:10		25.24	56.09	21.20	22.80	23.50	21.00	22.90	23.10	19.40	21.60	23.20	19.00	21.90	23.00
25/12/2013	1:20		25.18	56.07	20.70	22.70	23.40	20.90	22.90	22.90	19.40	22.10	23.00	18.70	22.20	22.90
25/12/2013	1:30		25.03	56.57	21.00	22.80	23.30	21.00	22.80	23.00	19.40	22.00	22.90	18.70	22.20	22.80
25/12/2013	1:40		24.86	57.43	21.40	22.80	23.20	21.70	22.80	23.00	20.40	22.30	23.00	20.00	22.50	22.90
25/12/2013	1:50		24.81	57.48	20.60	22.50	23.20	20.70	22.60	22.70	19.00	21.70	22.80	18.60	21.90	22.70
25/12/2013	2:00		24.77	57.38	21.00	22.40	23.10	21.00	22.60	22.80	19.50	21.90	22.80	19.00	22.10	22.70
25/12/2013	2:10		24.67	57.63	20.90	22.40	23.00	21.10	22.60	22.80	19.50	22.00	22.80	19.20	22.00	22.60
25/12/2013	2:20		24.66	57.38	20.50	22.20	22.90	20.80	22.40	22.70	19.20	21.80	22.60	19.00	22.00	22.50
25/12/2013	2:30		24.75	56.72	20.60	22.00	22.80	20.80	22.10	22.60	19.20	20.20	22.40	18.80	20.60	22.40
25/12/2013	2:40		24.78	56.57	20.30	22.10	22.70	20.40	22.20	22.40	19.00	21.10	22.40	18.60	21.50	22.40
25/12/2013	2:50		24.80	56.55	20.50	22.10	22.70	20.30	21.90	22.50	18.90	20.40	22.50	18.40	21.00	22.30
25/12/2013	3:00		24.84	56.37	20.60	22.20	22.70	20.70	22.00	22.40	19.30	21.30	22.50	19.10	21.70	22.40
25/12/2013	3:10		24.83	56.34	19.90	21.90	22.60	20.20	21.70	22.30	18.70	20.50	22.30	18.30	21.20	22.20
25/12/2013	3:20		24.81	56.33	20.00	21.80	22.50	20.10	22.00	22.30	18.40	19.90	22.30	18.10	20.50	22.20
25/12/2013	3:30		24.67	56.33	20.00	21.90	22.50	20.10	21.90	22.20	18.70	21.40	22.30	18.30	21.50	22.20
25/12/2013	3:40		24.67	56.55	20.60	22.10	22.30	20.70	22.10	22.30	19.10	21.70	22.30	18.80	21.90	22.20
25/12/2013	3:50		24.69	56.24	19.80	21.50	22.30	19.90	21.40	22.00	18.60	20.10	22.00	18.10	20.40	21.90
25/12/2013	4:00		24.40	56.74	19.90	21.70	22.20	20.00	21.70	22.00	18.50	19.70	22.00	18.30	20.00	22.00
25/12/2013	4:10		24.37	56.88	20.40	21.80	22.10	20.60	21.80	22.00	19.20	21.20	22.10	18.90	21.30	22.00
25/12/2013	4:20		24.23	56.85	20.60	21.90	22.10	20.70	21.90	22.10	19.60	21.20	22.20	19.30	21.70	22.10
25/12/2013	4:30		24.25	56.95	20.20	21.60	22.00	20.40	21.80	21.80	19.10	21.30	21.90	18.70	21.50	21.80
25/12/2013	4:40		24.26	56.80	20.50	21.70	22.10	20.50	21.80	21.90	19.30	21.30	21.90	18.90	21.40	21.80
25/12/2013	4:50		24.40	56.70	20.10	21.50	21.90	20.40	21.60	21.80	19.00	20.90	21.90	18.70	21.10	21.80
25/12/2013	5:00		24.36	56.66	20.10	21.40	21.90	20.20	21.50	21.80	18.60	20.60	21.80	18.30	20.70	21.70
25/12/2013	5:10		24.42	56.89	19.50	21.20	21.80	19.70	21.20	21.60	18.40	20.60	21.70	17.90	20.60	21.60
25/12/2013	5:20		24.28	56.61	19.20	20.90	21.70	19.20	20.80	21.40	17.80	19.30	21.40	17.10	19.40	21.30
25/12/2013	5:30		24.10	57.62	20.20	21.40	21.60	20.10	21.40	21.50	18.80	20.80	21.50	18.60	20.90	21.50
25/12/2013	5:40		23.90	58.56	20.10	21.20	21.50	20.20	21.20	21.50	19.00	20.50	21.50	18.50	20.40	21.40
25/12/2013	5:50		24.09	58.27	19.60	21.10	21.50	19.70	21.20	21.40	18.40	20.80	21.30	17.90	21.00	21.20
25/12/2013	6:00		23.81	58.69	19.80	21.00	21.40	19.90	21.10	21.30	18.60	20.80	21.20	18.10	20.90	21.10
25/12/2013	6:10		23.62	59.32	19.60	20.80	21.20	19.70	20.80	21.10	18.70	20.40	21.10	18.10	20.60	21.00
25/12/2013	6:20		23.54	59.67	19.80	20.90	21.10	19.80	20.90	21.00	18.80	20.50	21.00	18.50	20.80	21.00

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
25/12/2013	6:30		23.48	60.66	19.50	20.80	21.10	19.70	21.00	21.10	18.60	20.60	21.10	18.20	20.40	21.00
25/12/2013	6:40		23.52	60.82	19.20	20.60	21.00	19.40	20.80	20.90	18.20	20.00	20.90	17.70	20.40	20.80
25/12/2013	6:50		23.49	60.97	19.40	20.80	21.00	19.50	20.70	21.00	18.30	20.30	21.00	18.00	20.50	20.90
25/12/2013	7:00		23.51	61.21	19.90	20.90	21.00	19.90	21.00	21.10	18.80	20.50	21.10	18.70	20.90	21.00
25/12/2013	7:10		23.37	61.88	19.90	20.90	21.00	19.90	21.00	21.10	18.80	20.60	21.20	18.90	20.90	21.00
25/12/2013	7:20		23.27	62.31	20.00	21.00	21.10	20.10	21.10	21.30	18.70	20.60	21.10	19.20	20.80	21.10
25/12/2013	7:30		23.29	62.58	20.50	21.20	21.20	20.60	21.40	21.60	19.30	21.20	21.50	19.80	21.30	21.50
25/12/2013	7:40		23.19	63.13	20.70	21.30	21.40	20.90	21.40	21.80	19.70	21.00	21.60	20.30	21.50	21.60
25/12/2013	7:50		23.21	63.10	21.10	21.90	21.90	21.30	22.00	22.30	20.10	21.20	21.90	20.80	21.90	22.10
25/12/2013	8:00		23.34	62.62	21.50	22.10	22.20	21.70	22.30	22.60	20.50	21.70	22.20	21.40	22.10	22.10
25/12/2013	8:10		23.46	62.23	21.60	22.10	22.50	22.00	22.50	22.90	20.90	22.30	22.50	21.80	22.40	22.50
25/12/2013	8:20		23.43	62.56	22.10	23.00	23.00	22.50	23.00	23.10	21.20	22.50	22.80	22.60	22.90	22.90
25/12/2013	8:30	596.50	23.63	62.21	22.20	22.30	23.00	22.50	22.90	23.10	21.50	22.70	22.70	22.70	22.90	22.70
25/12/2013	8:40	746.80	23.71	61.63	22.90	23.30	23.10	23.10	23.70	24.00	21.60	22.90	23.50	23.50	23.60	23.70
25/12/2013	8:50	821.60	23.96	60.69	23.40	23.70	23.30	23.80	23.90	24.00	22.50	23.40	23.50	24.40	23.70	23.30
25/12/2013	9:00	1065.00	24.23	58.88	24.80	25.20	24.00	25.20	25.00	25.00	23.60	25.10	24.60	27.30	25.20	24.80
25/12/2013	9:10	1296.00	24.37	58.21	25.50	25.20	24.40	26.20	25.30	25.30	24.80	25.30	25.00	29.60	25.60	25.10
25/12/2013	9:20	1379.00	24.67	57.23	26.90	26.40	25.10	28.10	26.30	26.30	26.40	26.10	25.30	34.30	27.00	24.70
25/12/2013	9:30	1409.00	24.83	56.65	29.10	28.50	25.80	30.50	27.70	26.50	28.10	28.10	25.90	38.20	28.20	25.90
25/12/2013	9:40	1447.00	25.02	56.07	30.40	28.30	25.90	33.10	27.40	25.70	30.10	27.70	25.60	43.10	29.10	25.40
25/12/2013	9:50	1509.00	25.00	55.75	33.60	28.20	26.90	36.90	27.70	26.40	32.90	28.30	25.70	46.50	28.60	26.20
25/12/2013	10:00	1610.00	25.21	55.11	35.20	28.70	27.30	37.20	29.80	28.40	34.20	29.00	27.60	46.10	29.80	27.70
25/12/2013	10:10	1646.00	25.41	53.87	37.80	28.20	27.40	39.10	28.60	27.00	35.50	28.90	26.00	48.00	29.30	26.40
25/12/2013	10:20	1721.00	25.51	51.59	39.80	30.50	27.80	40.10	30.00	28.20	37.90	31.00	27.80	51.00	32.40	28.60
25/12/2013	10:30	1759.00	25.48	51.62	40.00	31.30	28.00	40.20	30.40	28.20	37.60	30.60	27.80	50.70	31.90	28.00
25/12/2013	10:40	1899.00	25.72	50.78	37.70	28.20	27.80	37.40	29.00	28.50	36.60	29.10	27.80	50.50	30.70	28.50
25/12/2013	10:50	1941.00	25.88	48.51	41.80	31.30	28.30	41.20	30.60	29.10	39.20	31.20	28.30	53.00	33.00	29.20
25/12/2013	11:00	1985.00	26.02	49.12	39.80	31.50	28.60	40.20	31.30	29.90	38.60	32.20	29.30	52.80	32.80	29.50
25/12/2013	11:10	1980.00	26.24	48.65	39.40	29.90	28.40	39.80	30.00	29.40	38.70	30.60	28.40	52.40	31.90	29.30
25/12/2013	11:20		26.29	47.50	44.50	31.20	29.10	45.00	32.20	29.30	42.20	34.30	28.70	59.50	35.90	28.50
25/12/2013	11:30		26.37	47.45	43.90	30.80	29.30	43.10	30.00	29.10	41.80	31.20	29.00	58.10	32.60	29.10
25/12/2013	11:40	1968.00	26.58	46.98	42.90	32.10	29.50	42.50	32.20	30.40	40.30	32.80	29.80	55.10	34.40	30.10
25/12/2013	11:50		26.74	47.01	44.40	31.00	29.50	44.30	30.60	29.40	41.40	31.30	29.00	56.30	32.30	29.30
25/12/2013	12:00		26.96	45.69	44.40	34.00	29.90	45.50	34.00	30.60	42.90	35.20	30.30	58.70	37.50	30.80
25/12/2013	12:10		26.82	45.50	45.60	33.30	29.90	45.20	33.00	30.00	42.50	32.20	29.60	57.60	34.20	29.80
25/12/2013	12:20	1854.00	26.77	45.30	42.90	32.70	29.80	43.10	32.60	30.70	40.10	32.50	29.20	54.70	33.30	29.50
25/12/2013	12:30	1180.00	26.85	45.09	34.70	31.10	29.70	34.50	30.00	28.90	33.40	30.00	28.50	41.30	31.20	28.90
25/12/2013	12:40	1642.00	27.03	45.25	39.70	30.80	29.30	39.90	30.80	29.40	37.30	31.00	28.90	49.30	31.80	28.70
25/12/2013	12:50	1661.00	27.03	45.48	41.60	31.00	29.90	42.00	31.40	30.60	39.70	32.20	29.90	52.40	33.30	30.40
25/12/2013	13:00	1882.00	27.14	44.33	45.60	32.70	30.00	46.20	32.10	29.80	42.00	32.00	29.60	57.30	32.60	29.00

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
25/12/2003	13:10	1803.00	27.19	43.78	37.50	30.30	29.80	37.30	30.60	29.40	36.50	31.20	29.10	46.90	32.40	29.60
25/12/2003	13:20		27.25	41.86	47.10	34.40	30.30	42.50	33.60	31.00	43.40	35.10	30.10	59.20	38.30	31.00
25/12/2003	13:30		27.35	42.33	44.50	33.40	30.80	41.60	34.00	31.80	42.70	33.70	31.50	59.40	35.90	31.90
25/12/2003	13:40	1971.00	27.58	41.81	43.80	34.80	30.80	39.90	34.30	30.70	41.10	34.90	31.00	53.90	36.70	31.10
25/12/2003	13:50	1566.00	27.51	43.38	42.80	34.60	31.00	42.60	35.20	31.20	40.50	34.70	30.80	54.00	35.70	30.60
25/12/2003	14:00	1569.00	27.67	43.67	42.50	33.40	31.10	38.90	33.60	31.70	39.40	33.90	31.40	51.40	35.90	31.80
25/12/2003	14:10	1348.00	27.51	44.10	41.40	33.80	31.00	41.10	33.50	31.00	38.80	33.40	29.90	50.20	35.20	30.10
25/12/2003	14:20	1255.00	27.59	43.85	41.30	34.00	31.10	42.00	33.60	30.00	38.30	33.70	29.50	49.30	33.90	29.50
25/12/2003	14:30	1093.00	27.56	44.24	36.00	31.20	30.30	35.90	31.80	30.00	34.60	32.00	29.90	42.50	33.90	30.40
25/12/2003	14:40	1029.00	27.51	44.03	38.50	31.90	30.80	39.20	32.60	31.00	36.00	31.80	30.50	45.60	33.60	30.90
25/12/2003	14:50	938.90	27.72	43.28	36.00	30.60	30.50	36.50	31.90	30.60	33.80	31.40	30.10	41.60	32.40	30.20
25/12/2003	15:00	1096.00	27.62	43.07	37.60	32.00	30.40	37.00	31.90	30.80	34.70	31.40	30.60	42.60	32.10	30.80
25/12/2003	15:10	1244.00	27.72	42.56	38.60	30.90	30.30	38.50	31.20	29.60	36.30	31.00	29.60	46.20	32.60	30.20
25/12/2003	15:20	1158.00	27.66	43.08	38.00	31.20	30.70	37.20	31.60	31.10	35.70	31.10	30.50	45.10	32.70	31.30
25/12/2003	15:30	1060.00	27.98	42.61	37.60	31.80	30.50	37.10	31.80	30.30	35.10	31.70	29.90	43.80	32.50	30.30
25/12/2003	15:40	975.30	27.79	42.38	40.10	32.60	30.90	40.30	32.60	30.20	36.00	32.30	29.80	45.70	33.20	30.00
25/12/2003	15:50	876.40	27.80	42.71	37.60	31.70	31.00	38.20	31.30	29.80	35.10	31.00	30.40	43.40	32.80	30.10
25/12/2003	16:00	773.50	27.77	43.55	35.20	31.50	30.80	34.30	31.90	30.80	33.30	31.20	29.90	39.90	31.40	30.10
25/12/2003	16:10	705.70	27.74	43.55	33.20	30.50	30.60	33.00	29.90	28.70	32.60	29.20	28.70	39.20	30.30	29.30
25/12/2003	16:20	632.20	27.56	44.30	30.90	30.40	30.50	30.90	31.20	29.80	29.80	29.70	29.70	33.60	30.90	29.30
25/12/2003	16:30	563.00	27.49	44.55	29.40	29.40	29.80	29.40	29.90	29.20	28.40	29.10	29.40	30.30	30.20	29.00
25/12/2003	16:40	465.70	27.61	44.54	29.10	28.70	29.40	29.00	29.10	28.30	27.70	28.30	28.40	29.40	29.50	28.80
25/12/2003	16:50	410.40	27.30	46.60	29.10	29.30	29.50	29.20	29.90	29.40	27.40	29.00	29.40	29.30	29.80	29.30
25/12/2003	17:00	257.60	27.09	47.46	28.40	28.80	29.10	28.40	29.10	29.30	26.70	28.10	28.70	28.20	29.10	28.90
25/12/2003	17:10	225.20	26.98	47.83	27.30	27.60	28.70	27.40	28.50	28.10	25.90	27.40	27.60	26.90	28.10	27.50
25/12/2003	17:20	183.90	26.75	48.11	26.60	27.70	28.20	26.60	28.00	28.10	25.00	26.80	27.70	25.80	27.60	27.50
25/12/2003	17:30	137.80	26.64	48.98	25.90	26.80	28.10	26.00	27.50	27.30	24.60	26.60	27.10	24.90	27.20	27.00
25/12/2003	17:40		26.53	49.28	25.00	26.30	27.90	25.10	26.90	26.90	23.60	26.20	26.70	23.70	26.60	26.70
25/12/2003	17:50		26.40	49.58	24.20	26.00	27.50	24.20	26.00	26.50	22.70	23.90	26.30	22.30	25.10	26.30
25/12/2003	18:00		26.34	49.53	24.10	25.60	27.10	24.00	25.80	26.10	22.90	25.10	25.90	22.30	25.30	25.80
25/12/2003	18:10		26.40	49.00	23.40	25.10	26.70	23.40	25.50	25.70	22.00	24.30	25.60	21.50	25.00	25.50
25/12/2003	18:20		26.37	49.28	22.80	24.70	26.40	22.80	25.10	25.50	21.20	23.80	25.30	20.60	23.30	25.30
25/12/2003	18:30		26.32	49.24	23.20	24.90	26.20	23.40	25.30	25.40	22.10	24.60	25.40	21.50	25.00	25.30
25/12/2003	18:40		26.26	50.16	23.30	24.90	25.90	23.20	25.10	25.30	21.80	24.20	25.30	20.90	24.60	25.20
25/12/2003	18:50		26.18	50.46	22.90	24.60	25.90	22.90	25.00	25.20	21.50	23.70	25.10	21.00	24.10	25.10
25/12/2003	19:00		26.10	50.92	22.70	24.60	25.60	22.70	24.50	25.00	21.20	23.30	25.00	20.60	23.80	24.90
25/12/2003	19:10		25.96	51.02	22.30	24.10	25.60	22.20	24.20	24.90	20.70	22.60	24.80	20.00	22.80	24.70
25/12/2003	19:20		25.80	51.46	22.60	24.30	25.30	22.60	24.50	24.80	21.20	23.20	24.70	20.40	23.50	24.60
25/12/2003	19:30		25.80	51.68	22.50	24.20	25.20	22.60	24.50	24.70	20.90	23.80	24.60	20.40	24.00	24.60
25/12/2003	19:40		25.75	51.77	22.50	24.20	25.10	22.30	24.50	24.60	20.70	23.10	24.50	20.10	23.40	24.50

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
25/12/2013	19:50		25.70	52.23	22.20	23.80	24.90	22.20	23.90	24.50	20.90	23.10	24.40	20.30	22.80	24.30
25/12/2013	20:00		25.67	52.42	21.90	23.90	24.80	21.90	24.10	24.30	20.20	22.40	24.30	19.60	22.60	24.20
25/12/2013	20:10		25.59	52.84	21.60	23.40	24.70	21.50	23.70	24.20	20.10	22.80	24.20	19.50	23.00	24.00
25/12/2013	20:20		25.53	53.14	21.90	23.80	24.50	21.90	23.90	24.10	20.30	23.00	24.00	19.60	22.30	23.90
25/12/2013	20:30		25.48	53.57	21.70	23.50	24.50	21.70	23.80	24.00	20.20	22.90	23.90	19.50	23.00	23.80
25/12/2013	20:40		25.49	53.58	21.30	23.20	24.30	21.40	23.30	24.00	20.10	22.20	24.00	19.60	22.60	23.80
25/12/2013	20:50		25.61	53.54	21.40	23.30	24.20	21.30	23.50	23.80	19.70	22.80	23.70	19.00	23.20	23.50
25/12/2013	21:00		25.54	53.87	21.10	23.10	24.10	21.10	23.10	23.80	19.50	21.50	23.70	19.00	21.80	23.60
25/12/2013	21:10		25.48	54.45	21.30	23.20	24.10	21.10	23.50	23.80	19.00	21.20	23.70	18.20	20.90	23.50
25/12/2013	21:20		25.48	54.26	21.10	23.00	24.10	20.90	23.00	23.70	18.80	21.00	23.40	18.10	20.70	23.40
25/12/2013	21:30		25.59	54.35	21.30	23.20	24.00	21.20	23.30	23.80	19.40	22.20	23.50	18.70	21.40	23.30
25/12/2013	21:40		25.43	54.50	21.00	23.10	23.90	20.80	23.20	23.50	18.90	21.90	23.40	18.40	22.10	23.20
25/12/2013	21:50		25.46	54.76	21.30	23.10	23.80	21.20	23.30	23.60	19.60	22.30	23.50	18.90	22.70	23.30
25/12/2013	22:00		25.59	54.41	21.10	23.20	23.80	21.00	22.90	23.60	19.70	21.50	23.50	19.10	22.40	23.40
25/12/2013	22:10		25.59	54.57	20.50	22.70	23.70	20.40	23.00	23.50	18.60	22.00	23.40	18.20	22.70	23.20
25/12/2013	22:20		25.57	54.69	20.40	22.40	23.70	20.00	22.30	23.30	17.90	19.50	23.10	17.10	20.20	22.90
25/12/2013	22:30		25.53	54.84	19.50	22.00	23.60	19.40	21.90	23.00	17.00	18.70	22.60	16.50	19.40	22.50
25/12/2013	22:40		25.51	55.18	19.80	22.10	23.40	19.50	21.60	22.90	17.30	19.60	22.30	17.00	20.60	22.10
25/12/2013	22:50		25.49	54.99	19.00	21.90	23.20	18.50	20.60	22.60	16.30	18.90	21.80	15.90	19.20	21.90
25/12/2013	23:00		25.51	54.96	19.80	21.60	23.10	19.10	21.00	22.50	17.80	19.30	21.70	17.50	19.70	22.00
25/12/2013	23:10		25.45	55.23	20.20	22.10	23.10	19.90	22.20	23.00	18.00	19.40	22.40	17.30	20.10	22.40
25/12/2013	23:20		25.37	55.55	20.20	22.20	23.10	20.20	22.00	23.00	17.90	19.50	22.70	17.50	20.40	22.70
25/12/2013	23:30		25.32	55.54	20.40	22.70	23.20	20.30	22.50	23.10	18.70	21.50	22.90	18.20	21.80	22.90
25/12/2013	23:40		25.27	55.91	19.80	22.00	23.00	19.40	22.20	22.70	17.40	20.90	22.20	16.90	21.10	22.00
25/12/2013	23:50		25.21	56.17	20.00	22.10	23.10	19.90	22.00	22.90	18.00	19.70	22.50	17.50	21.10	22.50
26/12/2013	0:00		25.21	56.30	19.20	21.20	22.90	19.10	21.10	22.70	17.10	19.10	22.40	15.90	19.00	22.20
26/12/2013	0:10		25.19	56.17	18.20	21.10	22.90	17.50	19.90	22.10	15.60	17.70	21.90	15.10	18.30	21.50
26/12/2013	0:20		25.13	56.74	18.40	21.10	22.80	17.50	19.80	21.70	15.90	19.00	21.50	15.40	18.50	21.20
26/12/2013	0:30		25.08	56.24	18.80	21.20	22.70	18.50	20.90	21.80	16.20	17.70	21.10	15.80	18.30	21.10
26/12/2013	0:40		25.05	55.92	18.90	20.80	22.50	18.40	20.40	22.00	16.90	19.70	20.70	16.50	19.30	20.60
26/12/2013	0:50		25.03	57.10	19.70	21.60	22.50	19.40	21.30	22.00	17.20	19.80	20.70	17.00	19.60	20.80
26/12/2013	1:00		24.97	56.27	19.60	22.10	22.50	19.60	21.60	22.30	17.50	19.30	21.50	17.60	19.90	21.80
26/12/2013	1:10		24.94	56.36	19.90	21.70	22.40	19.90	21.50	22.40	18.00	19.70	22.00	17.60	19.40	22.00
26/12/2013	1:20		24.88	56.44	19.40	21.60	22.30	19.20	21.30	22.00	17.40	18.60	21.40	17.10	19.00	21.40
26/12/2013	1:30		24.86	56.47	19.30	21.50	22.30	19.30	21.30	22.00	17.50	19.40	21.80	17.20	20.00	21.70
26/12/2013	1:40		24.84	56.40	19.00	21.10	22.20	19.40	21.40	21.90	17.30	19.00	21.50	16.90	19.20	21.50
26/12/2013	1:50		24.78	56.76	19.10	21.20	22.20	19.20	21.20	21.90	17.00	19.40	21.70	16.50	19.90	21.60
26/12/2013	2:00		24.81	56.64	18.90	20.90	22.10	18.90	20.50	21.80	16.80	18.70	21.60	16.50	19.10	21.50
26/12/2013	2:10		24.73	57.18	19.10	21.10	22.10	18.50	20.70	21.70	16.70	17.80	21.30	15.60	18.10	21.10
26/12/2013	2:20		24.67	57.66	20.00	21.70	22.00	19.80	21.50	22.00	17.90	20.30	21.70	17.80	20.30	21.80

Date	Time	Solar power (Watt/m ²)	Ambient temperature	RH (%)	Control			Zinc			White			Black		
					Ts - cont	Tr - cont	Tc - cont	Ts - zinc	Tr - zinc	Tc - zinc	Ts - white	Tr - white	Tc - white	Ts - black	Tr - black	Tc - black
26/12/2013	2:30		24.75	57.50	19.80	21.40	22.00	19.80	21.50	21.90	18.20	20.40	21.90	17.80	20.00	21.70
26/12/2013	2:40		24.77	57.56	19.70	21.40	22.00	19.60	21.40	21.90	18.00	20.90	21.90	17.40	20.50	21.70
26/12/2013	2:50		24.69	57.98	19.20	21.10	21.90	19.30	21.10	21.60	17.70	20.00	21.60	17.30	19.70	21.40
26/12/2013	3:00		24.66	58.06	19.20	20.80	21.80	19.30	20.80	21.50	17.50	19.30	21.30	17.10	19.00	21.20
26/12/2013	3:10		24.66	58.21	19.50	21.30	21.70	19.30	21.00	21.40	17.60	19.70	21.40	17.20	19.90	21.20
26/12/2013	3:20		24.61	58.51	19.20	20.90	21.70	19.20	20.70	21.40	17.50	19.60	21.40	17.30	19.30	21.20
26/12/2013	3:30		24.47	59.25	18.90	20.80	21.60	18.70	20.60	21.20	17.00	19.70	21.10	16.50	19.60	21.00
26/12/2013	3:40		24.40	59.66	18.90	20.80	21.50	18.80	20.70	21.10	17.20	19.40	21.10	16.90	20.00	21.10
26/12/2013	3:50		24.37	60.21	18.60	20.90	21.40	18.60	20.80	21.10	17.10	20.00	21.10	16.50	19.90	21.00
26/12/2013	4:00		24.26	60.39	17.40	19.80	21.30	17.40	20.30	20.70	15.50	19.20	20.70	15.30	18.20	20.70
26/12/2013	4:10		24.29	60.64	18.30	20.20	21.10	18.40	20.30	20.80	16.50	18.60	20.80	16.40	19.50	20.80
26/12/2013	4:20		24.20	61.02	18.50	20.40	21.20	18.40	20.40	20.80	16.80	19.40	20.90	16.20	19.90	20.70
26/12/2013	4:30		24.12	61.30	17.50	19.80	21.10	17.40	20.10	20.40	15.20	17.30	20.60	14.40	17.10	20.30
26/12/2013	4:40		24.03	61.80	16.90	19.20	20.90	16.30	18.40	20.20	14.70	16.60	20.00	14.40	17.10	19.70
26/12/2013	4:50		23.88	62.55	17.80	19.80	20.80	17.20	19.40	20.00	15.20	16.60	19.50	14.80	17.00	19.20
26/12/2013	5:00		23.76	64.75	17.80	19.80	20.60	17.00	18.90	20.00	15.30	17.60	19.20	14.80	17.10	19.10
26/12/2013	5:10		23.49	65.43	18.20	20.00	20.70	17.80	20.00	20.50	15.60	17.40	20.20	15.10	17.90	20.00
26/12/2013	5:20		23.54	65.29	18.60	20.00	20.70	18.40	20.10	20.40	16.90	18.90	20.40	16.20	18.70	20.20
26/12/2013	5:30		23.44	65.92	17.40	19.30	20.60	17.20	19.20	20.00	15.50	17.20	20.10	15.00	18.20	19.80
26/12/2013	5:40		23.46	66.41	16.40	18.60	20.30	16.00	18.90	19.40	14.60	17.30	19.30	13.80	16.50	18.80
26/12/2013	5:50		23.49	66.47	17.40	19.30	20.10	17.20	18.90	19.60	15.40	16.80	19.40	14.80	17.10	19.20
26/12/2013	6:00		23.48	66.14	16.50	18.80	20.00	16.40	18.50	19.30	15.00	16.40	19.10	14.20	16.30	18.90
26/12/2013	6:10		23.54	66.13	16.10	18.40	19.90	15.70	17.70	19.10	14.20	15.70	18.90	13.50	15.80	18.60
26/12/2013	6:20		23.55	66.07	16.50	18.50	19.70	15.70	17.80	19.00	14.60	15.70	18.50	14.10	16.40	18.20
26/12/2013	6:30		23.51	65.88	16.40	18.30	19.60	15.70	17.90	18.80	14.60	16.70	18.30	14.20	16.60	18.20
26/12/2013	6:40		23.52	66.27	16.20	17.90	19.50	15.50	17.30	18.80	14.60	16.00	18.30	14.20	16.00	18.10
26/12/2013	6:50		23.48	66.44	15.90	17.80	19.40	15.60	17.90	18.70	14.30	15.40	18.20	14.10	15.80	18.10
26/12/2013	7:00		23.46	67.24	16.70	18.20	19.40	16.10	17.60	19.10	14.80	16.30	18.20	14.60	16.70	18.20
26/12/2013	7:10		23.44	66.82	17.10	18.70	19.40	16.50	18.10	19.30	15.10	17.10	18.10	15.30	17.30	18.10
26/12/2013	7:20		23.63	66.27	17.40	19.00	19.60	17.10	18.80	19.50	15.50	17.70	18.30	15.70	17.40	18.30
26/12/2013	7:30		23.60	66.38	18.20	19.30	19.70	18.30	19.10	19.80	16.00	18.60	18.70	16.60	19.20	18.80
26/12/2013	7:40		23.55	66.52	19.40	20.40	20.30	19.50	20.10	20.40	16.50	19.40	19.40	17.30	20.40	19.60
26/12/2013	7:50		23.51	66.57	20.40	21.30	21.00	20.70	21.60	21.50	17.10	19.30	20.10	18.10	20.00	20.30
26/12/2013	8:00		23.35	68.04	21.10	21.80	21.60	21.60	22.30	22.20	17.70	20.40	20.90	20.30	21.80	21.40
26/12/2013	8:10		23.59	66.56	21.70	22.30	22.20	22.20	22.90	22.80	19.10	21.50	21.70	21.70	22.50	22.10
26/12/2013	8:20		23.65	65.92	22.40	23.40	23.00	22.90	23.60	23.60	20.80	22.90	22.70	22.60	23.50	22.90
26/12/2013	8:30	694.30	23.92	63.71	22.80	23.10	23.40	23.50	24.40	24.20	21.60	23.60	23.40	23.60	24.30	23.40

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการ input ในการจำลองด้วยโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล

```

title=Pimpun_day 1f4m
# pilot,2014
idbg=0

restrt=off
dump=on
nx=144; ny=76; nz=1
grid(x, 1,12,pow,0.0,12.0)
grid(x, 13,132,pow,0.0,24.0)
grid(x, 133,144,pow,0.0,12.0)
grid(y, 1,4,pow,0.0,4.0)
grid(y, 5,64,pow,0.0,12.0)
grid(y, 65,76,pow,0.0,12.0)
# grid(z, 1,10,pow,0.0,50.0)

buoy=true
steady=true

# EQUATIONS TO SOLVE
turbke=false # turbulent flow problem
solve(p,u,v,ke,ep,h)=true

# PRINT OUT
iprtmn=23; iprtmx=82 # i cell range for printing
jpvtmn=5; jpvtx=18 # j cell range for printing

```

```

kprtmn=1; kprtmx=nz # k cell range for printing

icol=50 # number of columns
ndtprt=1
iniprt=false # do not print initial field values
neqprt=1;nmoprt=1;print(u,v,h)=1

# RELAXATION
relaxln(p)=0.01
relaxdt(u,v,w)=1.0e-3
relaxdt(ke,ep)=1.0e-3
#relaxdt(h)=1.0e-1

# ITERATION COUNTS
nitphi(p)=20
nitphi(u,v,w)=1
nitphi(ke,ep)=1
nitphi(h,ht1)=1
epsphi(h)=1.0e+5
nitall=5000

# INITIAL CONDITIONS
bdyc(1,ke,set,cell,0.0,0.0013,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)
bdyc(1,ep,set,cell,0.0,0.000003,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)

#zone1
bdyc(1,por,set,cell,0.0,0.0,1,nx,1,4,1,1,0,0)#1

```

bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,23,42,5,5,1,1,0,0)#2
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,22,22,6,23,1,1,0,0)#2
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,42,42,11,18,1,1,0,0)#2
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,46,47,18,18,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,42,46,19,19,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,38,42,20,20,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,35,38,21,21,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,31,35,22,22,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,27,31,23,23,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,22,27,24,24,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,19,23,25,25,1,1,0,0)#2roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,17,19,26,26,1,1,0,0)#2roof

 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,63,82,5,5,1,1,0,0)#3
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,83,83,6,23,1,1,0,0)#3
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,63,63,11,18,1,1,0,0)#3
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,58,59,18,18,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,59,63,19,19,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,63,67,20,20,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,67,70,21,21,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,70,74,22,22,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,74,78,23,23,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,78,83,24,24,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,82,86,25,25,1,1,0,0)#3roof
 bdyd(1,por,set,cell,0.0,0.0,86,88,26,26,1,1,0,0)#3roof

 bdyd(0,h,set,cell,0.0,27330,1,nx,5,ny,1,nz,0,0)
 #bdyd(0,h,source,vol,0.0,15000,32,36,23,23,1,1,1,1) # Heat source

#bdyc(0,h,walfn,south,0.0,15000,28,31,24,24,1,1,1,1) # Surface temperature

#SURFACE TEMPERATURE

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,17,18,25,25,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,19,21,24,24,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,23,26,23,23,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,27,30,22,22,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,31,34,21,21,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,35,37,20,20,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,38,41,19,19,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,43,45,18,18,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,46,47,17,17,1,1,1,1) #2roofDN

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,17,19,27,27,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,20,23,26,26,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,24,27,25,25,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,28,21,24,24,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,32,35,23,23,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,36,38,22,22,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,39,42,21,21,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,43,46,20,20,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,47,47,19,19,1,1,1,1) #2roofUP

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,87,88,25,25,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,84,86,24,24,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,79,82,23,23,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,75,78,22,22,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,71,74,21,21,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,68,70,20,20,1,1,1,1) #3roofDN

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,64,67,19,19,1,1,1,1) #3roofDN

```

bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,60,62,18,18,1,1,1,1) #3roofDN
bdyc(0,h,walfn,north,0.0,67300,58,59,17,17,1,1,1,1) #3roofDN
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,86,88,27,27,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,82,85,26,26,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,78,81,25,25,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,74,77,24,24,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,70,73,23,23,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,67,69,22,22,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,63,66,21,21,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,59,62,20,20,1,1,1,1) #3roofUP
bdyc(0,h,walfn,south,0.0,67300,58,58,19,19,1,1,1,1) #3roofUP
rho=1.0
gravy=-9.81

```

```
# BOUNDARY CONDITIONS
```

```

#bdyc(1,p, inflow,south,1.0, 1.0,1,nx,1,1,1,1,1,1)
#bdyc(1,u, inflow,south,1.0, 1.0,1,nx,1,1,1,1,1,1)
#bdyc(1,v, inflow,south,1.0, 1.0,1,nx,1,1,1,1,1,1)
#bdyc(1,ke,inflow,south,1.0, 0.0013,1,nx,1,1,1,1,1,1)
#bdyc(1,ep,inflow,south,1.0, 0.000003,1,nx,1,1,1,1,1,1)
#bdyc(1,h, inflow,south,1.0, 25000.0,1,nx,1,1,1,1,1,1)

```

```

bdyc(2,p, inflow,west,2.04,1.0,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,u, inflow,west,2.04,0.001,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,v, inflow,west,0.000,0.0,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,ke,inflow,west,2.04,0.0013,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,ep,inflow,west,2.04,0.000003,1,1,5,ny,1,1,1,1)
bdyc(2,h ,inflow,west,2.04,27330,1,1,5,ny,1,1,1,1)

```



```
#bdyc(3,p, outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,u, outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,v, outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,w, outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,ke,outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,ep,outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
#bdyc(3,h,outflow,north,0.0,0.0,1,nx,ny,ny,1,1,1,1)
```

```
bdyc(4,p, outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,u, outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,v, outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,w, outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,ke,outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,ep,outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
bdyc(4,h,outflow,east,0.0,0.0,nx,nx,1,ny,1,1,1,1)
```

```
igradp=3 # High order pressure gradient boundary condition helps alot
```

```
# Thats all
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมพ์พรรณ จิโรจน์วงศ์ เกิดวันที่ 3 เมษายน 2533 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 เข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2556



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY