



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาแนวทางการปรับเย็นในอาคารโดยใช้สวนหลังคา

The study of using roof garden for cooling

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ไกรทอง

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยขอนแก่น

วันรับเข้าเล่ม 05 ต.ค. 2559

เลขทะเบียน 1034 797

เลขจัดหนังสือ ๑ TH

2391

๙๖๒๖๘

๒๕๕๙

งบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ประจำปีงบประมาณ 2559

คำนำ

การศึกษาแนวทางการปรับเย็นในอาคารโดยใช้สวนหลังคานั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำความเย็นจากสวนหลังคามาใช้เพื่อการปรับเย็นภายในอาคารเพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานและยกระดับคุณภาพชีวิตและยังเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมและสร้างสภาวะแวดล้อมที่ดีแก่ชุมชน อันเป็นการยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้คน

การดำเนินงานดังกล่าวสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากงบประมาณเงินรายได้ของมหาวิทยาลัยนเรศวรและความร่วมมือที่ดีจากผู้ร่วมวิจัยคืออาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง ภาควิชาเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ขอแสดงความนับถือ

สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์



บทคัดย่อ

ชื่อ การศึกษาแนวทางการการปรับเย็นในอาคารโดยใช้สวนหลังคา
ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวัญชัย ไกรทอง
หน่วยงานต้นสังกัด ภาควิชา สถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยสาขา การวิจัยทางวิทยาศาสตร์
จำนวนเงิน 220,000 บาท (สองแสนสองหมื่นบาทถ้วน)
ระยะเวลาการทำวิจัย 2 ปี (ขอขยายเวลา)
ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากสวนหลังคาเพื่อปรับอุณหภูมิอากาศภายในห้อง โดยใช้ระบบหมุนเวียนอากาศผ่านผิวเย็นด้านล่างของหลังคาที่ช่องว่างเหนือฝ้าเพดาน ที่ซึ่งการวิเคราะห์การไหลเวียนถูกทำด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยเป็นการวิเคราะห์ลักษณะการหมุนเวียนของอากาศในรูปแบบที่กำหนดขึ้นที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในห้อง จากการวิเคราะห์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าระบบหมุนเวียนอากาศที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถรักษาอุณหภูมิอากาศภายในห้องให้มีค่าน้อยกว่า 30 °C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกอยู่ที่ 37 °C โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกับภายนอกสูงสุดเท่ากับ 8 °C จากนั้นจึงนำข้อมูลดังกล่าวไปทำการกำหนดอาคารทดลองเพื่อการทดลองเก็บข้อมูลภาคสนาม ซึ่งผลที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ ซึ่งสาเหตุอาจมาจากความลึกของดินที่ใช้จัดสวนเพื่อทดสอบ จำนวนช่องเปิดที่ผนังของอาคารทดสอบซึ่งมีพื้นที่ช่องเปิดมากกว่าที่กำหนดไว้ใน การคำนวณ

Project's Name The study of using roof garden for cooling

Researcher Assistant Professor Dr. Sittipong Permpituck
Assistant Professor Dr. Kwanchai Kraitong

Workplace Architecture Department, Faculty of Architecture, Naresuan University, Phitsanuloke
Mechanical Engineer Department, Faculty of Engineer, Naresuan University, Phitsanuloke

Financial Supporter Research and Development Fund

Amount of Fund 220,000 Bath

Research Time 2 Years

Abstract

This research aims to numerically study for utilization of the green roof on flat roof construction in order to regulate the air temperature in a room using an air circulation system through a cold lower surface of the flat roof located at a space above a ceiling. The numerical analysis was done using the method of Computational Fluid Dynamics, CFD, to investigate the effect of the designed air circulation pattern on the heat transfer and the temperature distribution in the room. For the numerical results, it was found that the designed air circulation system could keep the room temperature being less than 30 °C while the ambient temperature of 37 °C at the maximum difference of temperature between the inside and outside temperatures being 8 °C. Then the optimal parameter obtained from the CFD results was used to define the geometry of the experimental building for the field test. The experimental results showed no agreement with the numerical results. It may cause from the thickness of the ground layer and the air space above the ceiling being greater than the result from the numerical parametric analysis.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2

บทที่ 2 ทฤษฎี สมมติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1 สภาพแวดล้อมทางด้านอุณหภูมิตั้งแต่.....	3
2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารและคุณสมบัติของวัสดุ.....	4
2.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร.....	7
2.4 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร.....	8
2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง.....	11

บทที่ 3 วิธีการศึกษาทดลอง

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	14
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	17
3.3 การเก็บข้อมูลการวิจัย.....	19

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 ผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS.....	22
4.2 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	24
4.3 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	25
4.4 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการหมุนเวียนอากาศ.....	27

บทที่ 5 บทวิเคราะห์ผลการศึกษา.....	28
------------------------------------	----

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 การสะท้อนรังสี การดูดซับรังสี และการส่งผ่าน.....	6
ภาพที่ 2.2 การตกกระทบของรังสีอาทิตย์.....	10
ภาพที่ 2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นโลกและท้องฟ้า.....	10
รูปที่ 3.1 ภาพอาคารทดลอง.....	14
รูปที่ 3.2 ผังหลังคาอาคารทดลอง.....	15
รูปที่ 3.3 รูปหลังคาอาคารทดลอง.....	15
รูปที่ 3.4 รูปด้านอาคารทดลอง.....	16
รูปที่ 3.5 ภาพตัดอาคารทดลอง.....	16
รูปที่ 3.6 เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติของ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL840.....	17
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ Kipp&Zonen.....	18
รูปที่ 3.8 Thermocouple Type K.....	19
รูปที่ 3.9 ผังตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูล.....	20
รูปที่ 3.10 ผังตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูล.....	21
ภาพที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศภายในห้อง.....	22
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	23
ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองของอาคารทดลอง ที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	23
ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	24
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองของอาคารทดลอง ที่มีการปลูกพืชบนหลังคา.....	25
ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการ หมุนเวียนอากาศ.....	26

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองของอาคารทดลอง ที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการหมุนเวียนอากาศ.....	26
ภาพที่ 5.1 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน และอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช.....	28
ภาพที่ 5.2 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน และอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืช.....	29
ภาพที่ 5.3 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน และอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชและมีระบบหมุนเวียนอากาศ.....	30
ภาพที่ 5.4 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน ของอาคารทดลองลักษณะต่างๆ.....	31



สารบัญตาราง

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลอง

ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน..... 32



1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในสภาวะอากาศแบบร้อนชื้นซึ่งมีอุณหภูมิและความชื้นสูงเกือบตลอดทั้งปี สภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่อยู่นอกเขตสภาวะน่าสบาย (Comfort Zone) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องปรับสภาวะแวดล้อมเพื่อให้เข้าสู่สภาวะน่าสบายโดยวิธีต่างๆ ซึ่งวิธีหนึ่งซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือการใช้เครื่องปรับอากาศซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการใช้พลังงาน ซึ่งการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศภายในอาคารนั้นมีอัตราส่วนมากกว่า 60% ของการใช้พลังงานของอาคารทั้งหมด[6] แต่เนื่องจากพลังงานมีอยู่อย่างจำกัด ประกอบกับประเทศไทยไม่มีแหล่งพลังงานที่เพียงพอสำหรับการใช้ในประเทศจึงมีความจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานในรูปแบบต่างๆจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติและไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งพลังงานรูปแบบต่างๆดังกล่าวข้างต้นต้องใช้ต้นทุนจำนวนมากในการนำเข้าทำให้ประเทศชาติต้องสูญเสียเงินตราจำนวนมากในแต่ละปี ดังนั้นการประหยัดพลังงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นและควรให้ความสำคัญเป็นอย่างมากเพื่อช่วยลดการสูญเสียเงินตราของประเทศชาติ นอกจากนั้นการใช้พลังงานเป็นจำนวนมากยังมีส่วนในการทำลายสภาพแวดล้อมเป็นที่ทราบกันดีว่าวันที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและขบวนการในการผลิตผลิตภัณฑ์อันเป็นผลพลอยได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีส่วนอย่างมากในการก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อม เช่น สภาวะโลกร้อน ขยะที่เป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อม เป็นต้น

อาคารเป็นพื้นที่ซึ่งมนุษย์เข้าไปใช้ประโยชน์ในการประกอบกิจกรรมต่างๆ เช่น ทำงาน อยู่อาศัย เก็บของ เพื่อความบันเทิง ฯลฯ หลังคาเป็นองค์ประกอบของอาคารที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากดวงอาทิตย์มากกว่าส่วนอื่นๆ จึงทำให้ความร้อนสามารถเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคาได้เป็นอย่างมาก โดยการป้องกันความร้อนให้กับหลังคาอาจกระทำได้โดย การติดตั้งฉนวนกันความร้อนซึ่งการป้องกันความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้ต้องอาศัยคุณสมบัติของวัสดุในการป้องกันความร้อน ซึ่งความร้อนจากภายนอกยังคงเข้าสู่อาคาร มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ นอกจากนั้นบริเวณพื้นผิวด้านบนของหลังคายังมีการสะสมความร้อนและส่งผ่านความร้อนดังกล่าวสู่สภาพแวดล้อมทำให้อุณหภูมิของสภาพแวดล้อมสูงขึ้น การปลูกต้นไม้บนหลังคา(Green Roof)มีส่วนช่วยอย่างมากในการลดความร้อนเข้าสู่อาคารเนื่องจากต้นไม้ป้องกันพื้นผิวของหลังคาไม่ให้ถูกแสงอาทิตย์โดยตรงจึงเป็นการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารได้เป็นอย่างดีขณะเดียวกัน ขบวนการสังเคราะห์แสงที่เกิดขึ้นในต้นไม้ก็มีส่วนอย่างมากในการจัดการกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้นเนื่องจากในขบวนการสังเคราะห์แสงของพืชจำเป็นต้องใช้พลังงานที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ทำให้พลังงานดังกล่าวถูกใช้ไปโดยไม่ถูกสะท้อนออกสู่สภาพแวดล้อม นอกจากนั้นการปลูกต้นไม้บนหลังคาในลักษณะดังกล่าวจะเป็นการช่วยเพิ่มคุณค่าให้กับหลังคา สร้างทัศนียภาพที่สวยงามให้กับชุมชน และเป็นการช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตให้กับผู้คนในบริเวณนั้น เนื่องจากต้นไม้มีส่วนช่วยในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยเพิ่มก๊าซออกซิเจนให้กับสภาพแวดล้อม ในประเทศที่พัฒนาแล้วหลายๆประเทศได้ให้ความสนใจและให้

ความสำคัญกับการเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับสภาพแวดล้อมในชุมชนเมือง เช่น ประเทศสิงคโปร์ที่มีโครงการ Singapore Green City นอกจากนั้นในประเทศไทยที่จังหวัดเชียงใหม่กำลังดำเนินโครงการในลักษณะดังกล่าวอยู่เช่นเดียวกัน

เมื่อมีการพิจารณาถึงภาพรวมของเมือง การใช้สวบบนหลังคาของแต่ละอาคารไม่เพียงเป็นการลดอุณหภูมิให้เฉพาะอาคารเท่านั้นแต่ยังเป็นการสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีให้กับชุมชนและเมือง ซึ่งหากมีการใช้กันอย่างกว้างขวางแล้วจะมีส่วนในการช่วยลดอุณหภูมิของเมืองลงได้ด้วยซึ่งปัจจุบันได้มีผู้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมของพืชพบว่าไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ 1 ต้น มีความสามารถเท่ากับเครื่องปรับอากาศขนาดประมาณ 12,500 BTU นอกจากนั้นพืชพรรณยังมีส่วนช่วยในการสร้างสภาวะน่าสบายทางด้านสายตาอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากสีเขียวของใบพืช นอกจากนั้นสีน้ำตาลของดอกและกลิ่นของไม้บางประเภทยังมีส่วนช่วยในการผ่อนคลายจิตใจอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลที่ได้รับจากการใช้สวบบนหลังคาในการลดความร้อนที่จะเข้าสู่อาคาร
2. เพื่อศึกษาถึงค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้จากการใช้สวบบนหลังคา
3. เพื่อศึกษาถึงแนวทางการนำความเย็นจากสวบบนหลังคามาใช้เพื่อการปรับเย็นให้แก่พื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร

บทที่ 2

ทฤษฎี สมมุติฐานและกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

2.1 สภาวะน่าสบายทางด้านอุณหภูมิ

มนุษย์จะรู้สึกถึงความสบายทางด้านอุณหภูมิที่ สภาพแวดล้อมลักษณะหนึ่ง ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความรู้สึกสบายทางด้านอุณหภูมิของมนุษย์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ตัวแปร โดยแบ่งเป็นตัวแปรด้านสภาวะแวดล้อม และตัวแปรด้านบุคคล ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1. ตัวแปรด้านสภาวะแวดล้อม ประกอบด้วย

ก. อุณหภูมิอากาศ (Ambient Air Temperature) โดยอุณหภูมิอากาศที่เหมาะสมซึ่งทำให้มนุษย์รู้สึกสบาย อยู่ที่ช่วงระหว่าง 22-27 องศาเซลเซียส ซึ่งหากอุณหภูมียู้อยู่ภายนอกช่วงดังกล่าวจำเป็นต้องอาศัยปัจจัยอื่นเข้ามามีส่วนร่วมในการปรับให้เข้าสู่สภาวะน่าสบาย

ข. อุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบ (Mean Radiant Temperature, MRT) อุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบเป็นการวัดค่าเฉลี่ยของรังสีความร้อนที่มีอิทธิพลต่อสภาพแวดล้อมนั้นๆ ซึ่งรวมถึงรังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ด้วย ค่าอุณหภูมิพื้นผิวโดยรอบสามารถวัดได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ย อุณหภูมิพื้นผิวด้านต่างๆในห้องและตำแหน่งที่วัด โดยใช้มุมกระทำ (Solid Angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งที่วัดและขอบเขตของแต่ละพื้นผิว

ค. ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) ความชื้นสัมพัทธ์ คือ สัดส่วนของความชื้นในอากาศเมื่อเทียบกับปริมาณสูงสุดที่อากาศสามารถมีความชื้นอยู่ได้ โดยปราศจากการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ (Condensation) ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับสภาวะน่าสบายคือ ช่วงระหว่าง 20-80% ในสภาพอากาศที่เย็นความชื้นจะมีอิทธิพลต่อสภาวะน่าสบายน้อย เนื่องจากการสูญเสียความร้อนโดยการนำการพา และการแผ่รังสีจะมีอิทธิพลมากกว่า

ง. ความเร็วลม (Wind Speed) ลมเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการปรับสภาวะแวดล้อมให้เข้าสู่สภาวะน่าสบาย เนื่องจากลมมีส่วนช่วยในการระเหยของเหงื่อซึ่งส่งผลให้ร่างกายระบายความร้อนได้ดีขึ้น ซึ่งความเร็วลมที่เหมาะสมจะมีส่วนช่วยในการเสริมสร้างสภาวะน่าสบายหากความเร็วลมมากเกินไปสามารถสร้างความรำคาญให้กับมนุษย์ได้เนื่องจากจะเป็นการรบกวนการประกอบกิจกรรมต่างๆ

2.1.2. ตัวแปรด้านบุคคล

ก. อัตราการเผาผลาญพลังงาน(Metabolism) ร่างกายมนุษย์นั้นเปรียบเสมือนเครื่องจักรที่ผลิตความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่อง จากการเผาผลาญอาหารเพื่อให้เกิดพลังงานสำหรับการทำกิจกรรมต่างๆในชีวิตประจำวันผ่านขบวนการ Metabolism ซึ่งอัตราความร้อนที่มนุษย์ผลิตออกมานั้นส่วนมากขึ้นอยู่กับระดับกิจกรรมของร่างกาย ชนิดของอาหารที่บริโภคและส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับที่อยู่อาศัย

ข. เสื้อผ้าที่สวมใส่ (Clo Value) เสื้อผ้าที่สวมใส่นั้นมีส่วนช่วยในการปกป้องร่างกายมนุษย์จากสภาพแวดล้อม และมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างร่างกายมนุษย์กับสภาพแวดล้อมทั้งจากการนำความร้อน(Conduction) การพาความร้อน(Covection) และการแผ่รังสีความร้อน(Radiation) ตลอดจนถึงการระเหยของน้ำ(Evaporation) ซึ่งลักษณะของเสื้อผ้านั้นมีความเหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของสภาพแวดล้อมแต่ละท้องถิ่นจนเกิดเป็นลักษณะของเครื่องแต่งกายประจำชาติ เช่น คนไทยโบราณจะแต่งกายด้วยเสื้อผ้าที่บางและไม่หุ้มทั้งตัว ขณะที่ชาวเอสกิโมจะแต่งกายด้วยเสื้อผ้าขนสัตว์ที่หุ้มทั้งตัว เป็นต้น

2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารและคุณสมบัติของวัสดุ

2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

วัสดุต่างๆมีคุณสมบัติในการป้องกันและถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ปัจจัยเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมและคุณสมบัติของตัววัสดุแต่ละชนิด ซึ่งคุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของวัสดุในด้านการป้องกันและถ่ายเทความร้อน คือ

ก. ค่าการนำความร้อน(Thermal Conductance,C) คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุใดๆหรืออัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของวัตถุใดๆ ต่อความหนาของวัตถุหรือวัสดุที่มีความหนามาตรฐานในพื้นที่ 1 หน่วย มีหน่วยเป็น Btu./hr.ft².F. และมีหน่วย SI คือ W/m².K ซึ่งมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$C = K/dX \text{ โดยที่}$$

C คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ(Thermal Conductance)

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(Conductivity)

dX คือ ความหนาของวัตถุหรือวัสดุ

ข. ค่าการต้านทานความร้อน(Thermal Resistance,R) คือ ค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนความร้อนของวัตถุและเป็นส่วนกลับกับค่าการนำความร้อน กล่าวคือ จำนวนชั่วโมงที่พลังงานความร้อนถ่ายเทผ่านความหนาของวัตถุหนึ่งในพื้นที่หนึ่งหน่วยเมื่อมีอุณหภูมิผิวทั้งสองด้านต่างกัน1 หน่วยมีหน่วย คือ hr.ft².°F./Btu. และมีหน่วย SI คือ m².K/W. ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R = 1/C = dX/K$$

โดยกำหนดให้ R คือ ค่าการต้านทานความร้อนของวัตถุหรือวัสดุ

ค. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Thermal Conductivity,K) คือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของวัตถุใดๆหรือปริมาณความร้อนภายใต้ภาวะคงที่ ที่ถ่ายเทผ่าน 1 หน่วยพื้นที่ของวัตถุที่มีความหนา 1 หน่วย ใน 1 หน่วยเวลา โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิผิววัสดุทั้ง 2 ด้าน 1 หน่วย มีหน่วยเป็น Btu.-in/hr.ft². °F.และมีหน่วย SI คือ W/m².K

ง. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน(Coefficient of Transmission,U) คือ การคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าสู่อาคาร หรือออกจากอาคารเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ มีหน่วยเป็น Btu./hr.sqft. ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$U = 1/\Sigma R$$

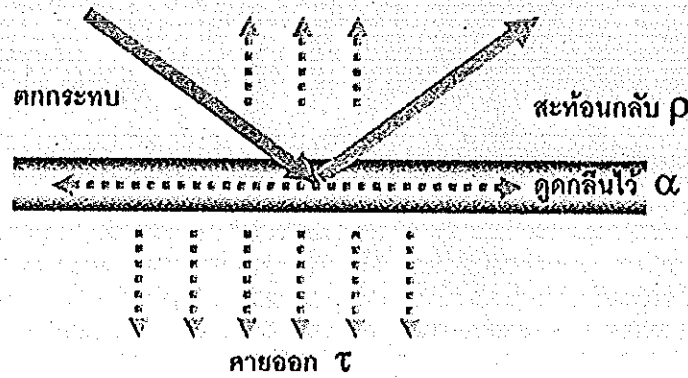
โดยกำหนดให้ ΣR คือ ผลรวมค่าการต้านทานความร้อนของวัตถุหรือเปลือกอาคาร

จ. ค่าความจุความร้อน(Heat Capacity) คือ ค่าคุณสมบัติในการจุความร้อนของวัตถุ หรือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุ 1 หน่วยปริมาตร หรือพื้นที่ผิว 1 หน่วยพื้นที่ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 หน่วย มีหน่วยเป็น Kcal/m³หรือ Kcal/m² โดยวัตถุที่มีค่าความจุความร้อนสูงจะสามารถเก็บความร้อนไว้ได้มาก ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนจากด้านหนึ่งของวัสดุไปสู่อีกด้านหนึ่งช้าลง ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิผิวของวัตถุที่มีค่าความจุความร้อนต่างกันมีค่าต่างกัน

ฉ. ค่าการส่งผ่านความร้อน(Heat Transmissivity) มีความสัมพันธ์กับค่าต่างๆดังนี้ค่าความสามารถในการดูดกลืนรังสี (Absorptivity - α)

ค่าความสามารถในการสะท้อนรังสี (Reflectivity - ρ)

ค่าความสามารถในการคายรังสี (Emissivity - τ)



ภาพที่ 2.1 การสะท้อนรังสี การดูดซับรังสี และการส่งผ่าน

ข. ค่าการถ่ายเทความร้อนจากฟิล์มอากาศที่ผิววัสดุ (Surface Air Film Conductance) คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนจากฟิล์มอากาศที่ผิวของวัตถุ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความเร็วลมที่พัดผ่านผิววัตถุและลักษณะพื้นผิววัตถุ

2.2.2 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

จากกฎข้อที่ 2 ของหลักเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ซึ่งกล่าวว่าความร้อนจะไหลผ่านจากที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่ง จะต้องมีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุด 2 จุด ซึ่งการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารสามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ

ก. การนำความร้อน (Conduction) คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างโมเลกุลซึ่งอาจเป็นโมเลกุลของสสารชนิดเดียวกันหรือระหว่างสสาร 2 ชนิด การนำความร้อนจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าเกิดการสั่นสะเทือนและถ่ายเทพลังงานไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ โดยสิ่งที่มีผลต่อการนำความร้อนมีดังนี้

- สสารที่เป็นตัวนำความร้อน
- ความหนาแน่นของตัวนำความร้อน (Density)
- ความชื้นที่มีอยู่ในสสาร (Moisture Content)
- ระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Different)

ข. การพาความร้อน (Convection) คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในของเหลวหรือก๊าซซึ่งเรียกโดยรวมว่าของไหล เมื่อของไหลถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยแรงธรรมชาติหรือแรงจากเครื่องกลซึ่งโมเลกุลที่หนักและมีอุณหภูมิต่ำกว่าจะตกลงสู่ที่ต่ำ สำหรับโมเลกุลที่เบาและมีอุณหภูมิสูงกว่าจะลอยตัวสูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการไหลเวียนของความร้อน

ค. การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลางโดยรังสีจะเดินทางผ่านที่ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Waves) ไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า รังสีความร้อนสามารถถูกสกัดกันโดยการใช้วัสดุที่มีผิวเป็นมันเงา วัสดุต่างชนิดกันจะมีค่าการดูดซับและการสะท้อนรังสีแตกต่างกัน เมื่อวัสดุหนึ่งมีค่าการดูดซับรังสีมากจะมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ

การถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 ลักษณะดังกล่าวจะเป็นอิสระต่อกัน(Vary Independent) การถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมสู่กรอบอาคารโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติในด้านต่างๆซึ่งได้แก่ ความสามารถในการสะท้อนรังสีของวัสดุ(Reflectance) ค่าความสามารถในการคายรังสี (Emissivity) ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัสดุกับสภาพแวดล้อม(Temperature Different) นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับมุมของการแผ่รังสี(Solid Angle)ระหว่างผิววัสดุกับสภาพแวดล้อม สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมเข้าสู่อาคารโดยการนำความร้อนและการพาความร้อนนั้น ต้องพิจารณาจากลักษณะของผิววัสดุ(Surface Roughness)และความเร็วลมที่พัดผ่านวัสดุ

2.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

อัตราการความร้อนที่ผ่านเปลือกอาคารแสดงถึงอัตราการความร้อนที่เคลื่อนผ่านส่วนประกอบทั้งหมดของผิวอาคาร ได้แก่ พื้น ผนัง หลังคา เป็นต้น ค่านี้จะถูกกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน(Coefficient of Transmission,U) ซึ่งมีหน่วยเป็น BTU/Hr.ft².°F. ค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของผิวอาคารสำหรับวัสดุแต่ละชนิดสามารถคำนวณหาค่า U ได้จากการหาส่วนกลับของค่า ความต้านทานความร้อน(Thermal Resistance, R)

$$U = 1 / \sum R$$

ค่า สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน(U- Value) ที่ได้สามารถนำมาคำนวณค่าปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารได้ โดยทั่วไปมี 2 สมการ คือ

$$Q = U \times A \times \Delta T$$

$$Q = U \times A \times CLTD$$

โดยกำหนดให้	U	=	$1 / \sum R$
	A	=	พื้นที่ของผนังที่ถ่ายเทความร้อน (ft ²)
	ΔT	=	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายใน (°F)
	CLTD	=	ภาวะความแตกต่างของความร้อนเทียบเท่า หรือ Cooling Load Temperature Difference (°F)

โดยที่

สมการที่ 1 ใช้ในกรณีที่ไม่มีอิทธิพลของแสงแดดเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในและภายนอกคงที่(Steady State Condition)

สมการที่ 2 ใช้ในกรณีที่มีอิทธิพลของแสงแดดเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งนี้ CLTD เกิดขึ้นเพราะความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในไม่คงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่า CLTD ต่างจากค่า ΔT เพราะมีการปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ เพื่อรวมเอาอิทธิพลจากหลายองค์ประกอบเข้าไว้ด้วยกัน เช่น วัน เวลา เดือน และเขตละติจูดที่เกิด Peak Load มวลสารและสีของวัสดุ การหน่วงของเวลา ผลกระทบของแสงแดด อุณหภูมิและสภาพแวดล้อม ในการคำนวณค่าภาระในการทำความเย็นสูงสุดของเครื่องปรับอากาศ(Peak Load) จึงนิยมใช้ค่า CLTD แทนค่า ΔT

2.4 อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร

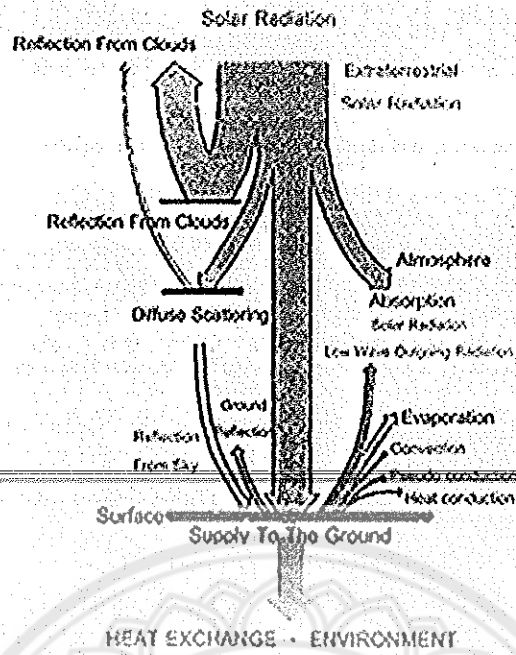
2.4.1 อิทธิพลจากรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตบนโลกโดยดวงอาทิตย์ส่งพลังงานมายังโลกโดยการแผ่รังสี ซึ่งรังสีดังกล่าวจะเคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศชั้นต่างๆของโลกก่อนที่จะสัมผัสกับวัตถุต่างๆโดยรังสีจากดวงอาทิตย์บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับออกไปโดยชั้นบรรยากาศและบางส่วนจะถูกดูดซับไว้และสะท้อนโดยชั้นบรรยากาศเข้าสู่ผิวโลกโดยรังสีดังกล่าวจะประกอบด้วยรังสีตรง (Direct Radiation) และรังสีกระจาย (Diffuse Radiation) สำหรับคลื่นรังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศเข้ามาสู่พื้นผิวโลกจะประกอบด้วยคลื่นรังสี 2 ประเภท คือ

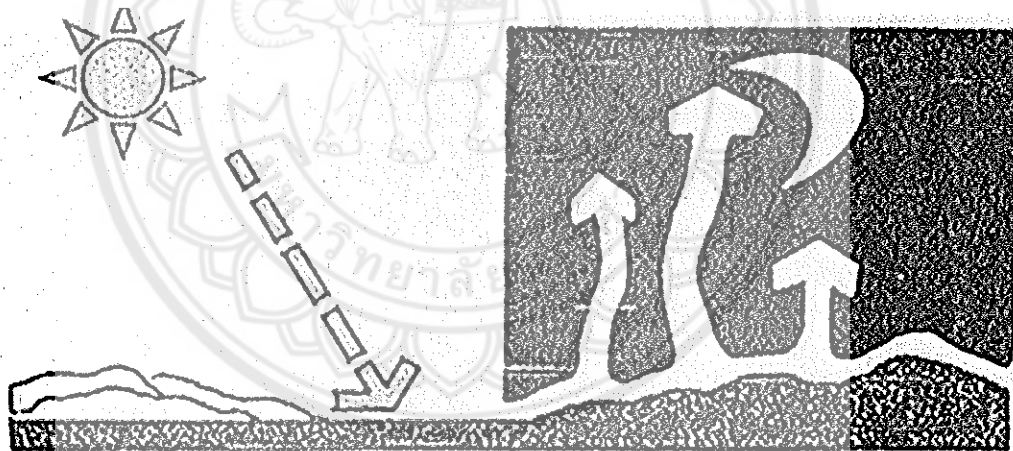
- ก. รังสีคลื่นสั้น(Short Wave Radiation) เป็นรังสีที่ส่งมาจากดวงอาทิตย์ ผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆของโลกและเข้าสู่สภาพแวดล้อมโดยมีคุณสมบัติที่สามารถทะลุผ่านวัสดุโปร่งแสงและโปร่งใสได้
- ข. รังสีคลื่นยาว(Long Wave Radiation) เป็นรังสีที่เกิดจากการที่รังสีคลื่นสั้นกระทบกับวัสดุที่มีมวลสารรังสีคลื่นสั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นยาวหรือความร้อน ส่วนหนึ่งสะสมอยู่ในวัตถุนั้น อีกส่วนหนึ่งจะแผ่รังสี(Radiation) ความร้อนนั้นไปยังที่ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อเข้าสู่สมดุลพลังงาน

รังสีจากดวงอาทิตย์ทั้งที่เป็นรังสีตรง(Direct Radiation)และรังสีกระจาย(Diffuse Radiation) จะถูกดูดกลืนและสะท้อนโดยสภาพแวดล้อม โดยเมื่อรังสีคลื่นสั้นกระทบกับวัตถุที่มีมวลสารจะเปลี่ยนจากรังสีคลื่นสั้นเป็นรังสีคลื่นยาวซึ่งเป็นคลื่นรังสีความร้อน และความร้อนดังกล่าวจะถูกถ่ายเทไปในลักษณะต่างๆ ทั้งการนำความร้อน(Conduction) การพาความร้อน(Convection) และการแผ่รังสีความร้อน(Radiation) จากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทั้งนี้ปริมาณความร้อนภายในโลกจะต้องอยู่ในสภาวะที่สมดุล คือ ปริมาณความร้อนที่โลกสูญเสียกับความร้อนที่โลกได้รับจะต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อให้สภาพแวดล้อมภายในโลกอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิตบนโลกซึ่งการลดปริมาณความร้อนดังกล่าวมี 3 วิธี คือ

- ก. Long Wave Radiation Heat Exchange คือ การส่งผ่านความร้อนจากผิวโลกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า
- ข. Evaporative คือ การสูญเสียความร้อนในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำ จากน้ำกลายเป็นไอน้ำ
- ค. Convection คือ การพาความร้อนซึ่งเกิดจากการที่อากาศได้รับความร้อนทำให้ลอยตัวสูงขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



ภาพที่ 2.2 การตกกระทบของรังสีอาทิตย์



RADIATION LOSS ON CLEAR NIGHT

ภาพที่ 2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นโลกและท้องฟ้า

2.4.2 อิทธิพลจากความเร็วลม

ลมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความรู้สึกทางด้านอุณหภูมิของมนุษย์ ในสภาวะอากาศแบบร้อนชื้นลมจะเป็นปัจจัยที่ช่วยทำให้การระเหยของน้ำดีขึ้น ดังนั้นเมื่อคนมีเหงื่อออกการระเหยของเหงื่อจะดี ทำให้คนรู้สึกเหมือนว่าเย็นลงแม้อุณหภูมิอากาศยังคงที่ก็ตาม ซึ่งจากการศึกษาพบว่าความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นทุก 1 กม./ชม. คนจะรู้สึกเหมือนว่าอุณหภูมิลดลง 0.2 องศาเซลเซียส นอกจากนั้นลมยังมีผลต่ออุณหภูมิของอากาศ

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อลมพัดผ่านสนามหญ้าอุณหภูมิของลมบริเวณใต้ลมจะมีค่าต่ำกว่าบริเวณเหนือลมเนื่องจากลมเป็นตัวกลางในการพัดพาความร้อนออกไปประกอบกับการได้รับอิทธิพลอุณหภูมิที่ลดต่ำลงจากการระเหยของน้ำจากพืชและหญ้าในสนามจากขบวนการสังเคราะห์แสงจึงทำให้อุณหภูมิลดลงได้ ลมมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า(วิชัย, 2539) และการที่ลมพัดผ่านอาคารกระทบแนวแสงลมจะช่วยพาความร้อนที่สะสมในอาคารออกไป ส่งผลให้อุณหภูมิผิวภายนอกหรือเปลือกอาคาร(Surface Temperature)ลดลง

2.4.3 อิทธิพลจากมวลสาร

มวลของสารมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ รวมถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสภาพแวดล้อม ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาวะน่าสบายทางด้านอุณหภูมิ โดยวัสดุที่มีมวลสารแตกต่างกันย่อมมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนที่แตกต่างกัน วัสดุที่มีมวลสารมากและมีค่าความจุความร้อนสูง (Thermal Capacity) จะมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนสูง ก่อให้เกิดการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Thermal Time Lag) ที่มากกว่าวัสดุที่มีมวลสารน้อยกว่า และทำให้การคายความร้อนของวัสดุอยู่ในอัตราที่ช้ากว่าวัสดุที่มีมวลสารน้อยกว่า

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการขยายตัวของเมืองประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรมประเภทต่างๆส่งผลให้พื้นที่สีเขียวลดน้อยลงอันเป็นผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์ เช่น การเกิดปรากฏการณ์ผิวดินธรรมชาติ เช่น ฝนแล้ง อุณหภูมิสูงขึ้นผิดปกติ เป็นต้น ทำให้มนุษย์พยายามแสวงหาแนวทางในการปรับสภาพแวดล้อมเพื่อให้มีความเป็นอยู่และมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น บางแนวทางจำเป็นต้องใช้พลังงาน การสร้างสวนบนหลังคาเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดค่าอุณหภูมิภายในอาคารลงได้โดยไม่ต้องสิ้นเปลืองพลังงานนอกจากนั้นพืชสีเขียวยังมีส่วนช่วยในการสร้างสภาพแวดล้อมที่ดี

จากการศึกษาของ S. Onmura และคณะเกี่ยวกับอิทธิพลจากการระเหยของน้ำจากสนามหญ้าบนหลังคา ซึ่งทำการศึกษาโดยใช้วัสดุปลูกสังเคราะห์ทำการทดลองบนอาคารคอนกรีตสูง 5 ชั้น ที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากการบังเงาหรือการสะท้อนรังสีของอาคารข้างเคียง โดยทำการทดลองในช่วงฤดูร้อนในประเทศญี่ปุ่น พบว่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารจากหลังคาลดลงเป็นอย่างมากโดยการศึกษาได้ทำการวัดอุณหภูมิผิวของหลังคาพบว่าอุณหภูมิผิวของหลังคาลดลงจากอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ลงมาเหลือประมาณ 30 องศาเซลเซียส ในช่วงระยะเวลากลางวัน จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าความร้อนที่จะผ่านเข้าสู่อาคารสามารถลดลงได้เกือบ 50% นอกจากนั้นค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของสนามหญ้ามี่ประมาณ 0.78 ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่ไม่สูงมากนักซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ทำขึ้นในประเทศไทยโดย

วิจัย อธิธิศวกุล ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิบริเวณลานจอดรถคอนกรีตพบว่า อุณหภูมิบริเวณลานจอดรถคอนกรีตมีค่าสูงตลอดเวลาเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสภาพแวดล้อม เช่นเดียวกับหลังคาอาคารซึ่งเป็นคาตฟ้าทั่วไป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเป็นคอนกรีตหรือวัสดุที่มีมวลสารมากจึงส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณหลังคาสูงตามไปด้วย โดยการศึกษาได้ทำการวัดอุณหภูมิอากาศใต้ต้นไม้และอุณหภูมิของดินซึ่งพบว่าอุณหภูมิใต้ต้นไม้ในเวลากลางวันต่ำกว่าอุณหภูมิกกลางแจ้งในช่วงเวลาที่ร้อนที่สุดถึง 2.8 องศาเซลเซียส ความต่างของอุณหภูมิบริเวณลานคอนกรีตในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืนมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงถึง 17 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิใต้ดินที่ระดับความลึก 0.5 ม. มีความแตกต่างของอุณหภูมิเพียง 2.1 องศาเซลเซียส โดยความแตกต่างของอุณหภูมิต่างๆนั้นมีส่วนอย่างมากต่อสภาวะน่าสบาย

ในประเทศสิงคโปร์ได้มีการศึกษาถึงผลของการใช้สวนบนหลังคาในการลดการใช้พลังงานของอาคารพาณิชย์ จากการศึกษาของ N.H. Wong ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสวนบนหลังคาของอาคารพาณิชย์สูง 5 ชั้น โดยทำการศึกษาโดยใช้ดินที่มีระดับความลึกแตกต่างกันตั้งแต่ 10 เซนติเมตร ถึง 90 เซนติเมตร พบว่าสวนบนหลังคามี่ประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานลงได้ 1 - 15% นอกจากนั้นยังลดค่าการใช้พลังงานของพื้นที่ปรับอากาศลงได้ 17 - 79% โดยลักษณะของสวนหลังคาที่เหมาะสม คือ สวนหลังคาที่มีไม้พุ่มปกคลุมมีระดับความลึกของดิน 30 เซนติเมตร สวนดังกล่าวสามารถลดค่าการใช้พลังงานลงได้ถึง 15% และ 79% ในพื้นที่ปรับอากาศ ลักษณะของดินที่เหมาะสมสำหรับสวนบนหลังคาคือ Clay Soil ชนิดแห้งโดยที่ระดับความลึก 90 เซนติเมตร สามารถลดค่าการใช้พลังงานลงได้ 3% และ 64% ในบริเวณที่มีการปรับอากาศ ซึ่งสวนบนหลังคามี่ส่วนอย่างมากในการให้ร่มเงาแก่หลังคาของอาคารซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Rakesh Kumar และ S.C. Kaushik เกี่ยวกับการให้ร่มเงาแก่หลังคาซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่มีส่วนช่วยในการลดความร้อนที่ส่งผ่านจากหลังคาเข้าสู่อาคาร ในการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ต้นไม้ในการให้ร่มเงาแก่พื้นที่หลังคาของ Rakesh Kumar และ S.C. Kaushik ที่ทำการศึกษาโดยการกำหนดสัดส่วนของพื้นที่ของใบต่อพื้นที่ส่วนที่ถูกปกคลุมพบว่า ความหนาแน่นของใบมีส่วนช่วยในการป้องกันความร้อนให้กับหลังคา ทำให้อุณหภูมิอากาศมีความคงที่มากขึ้น ซึ่งหากใบมีความหนาแน่นมากจะช่วยลดค่าพลังงานลงได้ถึงประมาณ 4 W/m². นอกจากนั้นอุณหภูมิภายในอาคารที่มีสวนด้านบนสามารถลดลงได้ถึงประมาณ 5.1 องศาเซลเซียส หากคิดถึงศักยภาพในการทำความเย็นแล้วพบว่าหลังคาที่มีสวนในลักษณะดังกล่าวมีศักยภาพในการทำความเย็นได้ถึง 3.02 kWh. ต่อวัน

จากการศึกษาของ Rakesh Kumar และ Shweta Sachdeva, S.C. Kaushik ในการใช้ดินเพื่อการป้องกันความร้อนให้กับอาคารสำหรับการประหยัดพลังงานแบบยั่งยืนพบว่า การใช้ดินในการป้องกันความร้อนให้กับผนังอาคารมีผลอย่างมากต่อการลดการใช้พลังงานของอาคารโดยการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณพื้นผิวที่สัมผัสกับดินมีส่วนช่วยลดการใช้พลังงานของอาคาร

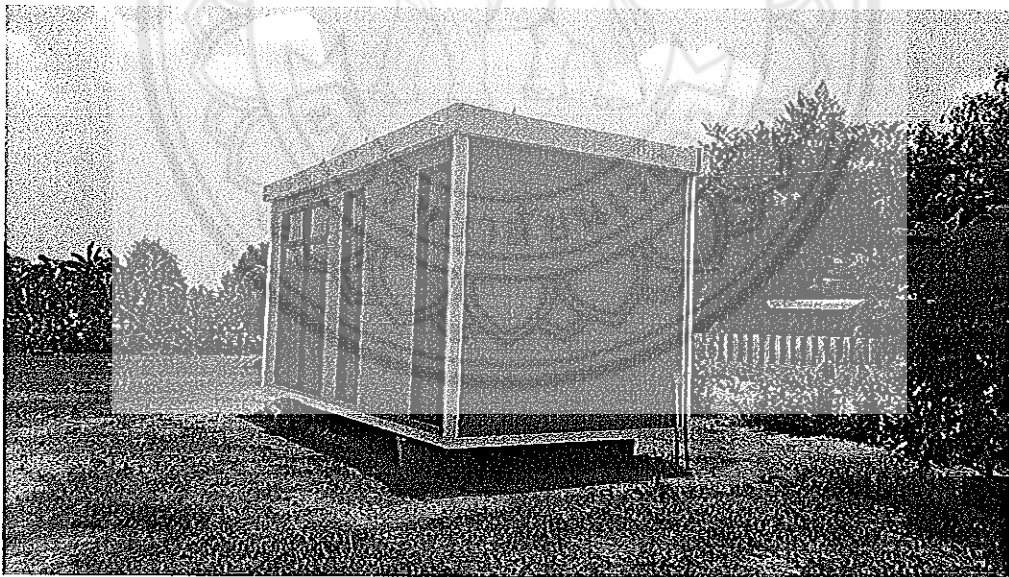


บทที่ 3

วิธีการศึกษาทดลอง

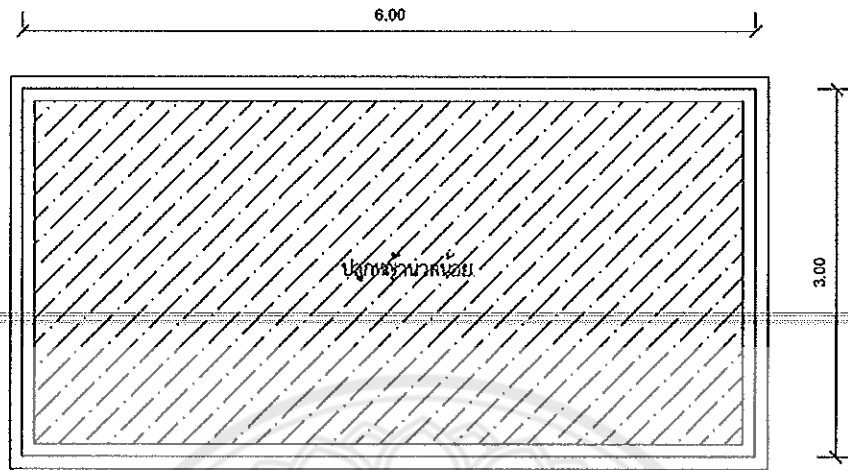
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาแนวทางการการปรับเย็นในอาคารโดยใช้สวนหลังคาเป็นการศึกษาทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่ทำบนสมมติฐานของการศึกษาว่า “หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการปลูกต้นไม้บนหลังคานั้นมีอุณหภูมิผิวด้านล่างที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ” ซึ่งในการศึกษาจะทำการศึกษิตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการนำความเย็นจากอุณหภูมิผิวของผิวคอนกรีตได้สวนหลังคาดังกล่าวมาใช้ในการปรับเย็นให้กับพื้นที่ภายในอาคาร โดยการศึกษาจะทำการทดลองและเก็บข้อมูลจากอาคารทดลอง ขนาด 3 x 6 เมตร และสูง จากพื้นถึงฝ้าเพดาน 2.70 เมตร มีระยะพื้นที่เหนือฝ้าเพดานถึงผิวคอนกรีตของดาดฟ้า 0.20 เมตร พื้นคอนกรีตหนา 0.10 เมตร ปูดินหนา 0.10 เมตร และปลูกหญ้าขนาดเล็กไว้ด้านบน โดยอาคารดังกล่าววางด้านแคบ (ด้านที่มีความกว้าง 3 เมตร) ไปในแนวตะวันออกตะวันตก โดยการออกแบบอาคารจะทำให้อาคารทดลองมีสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงอาคารที่สามารถใช้งานได้จริง ในการทดลองนี้นั้นได้กระทำขึ้นที่ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก โดยรอบอาคารทดลองเป็นพื้นที่โล่ง

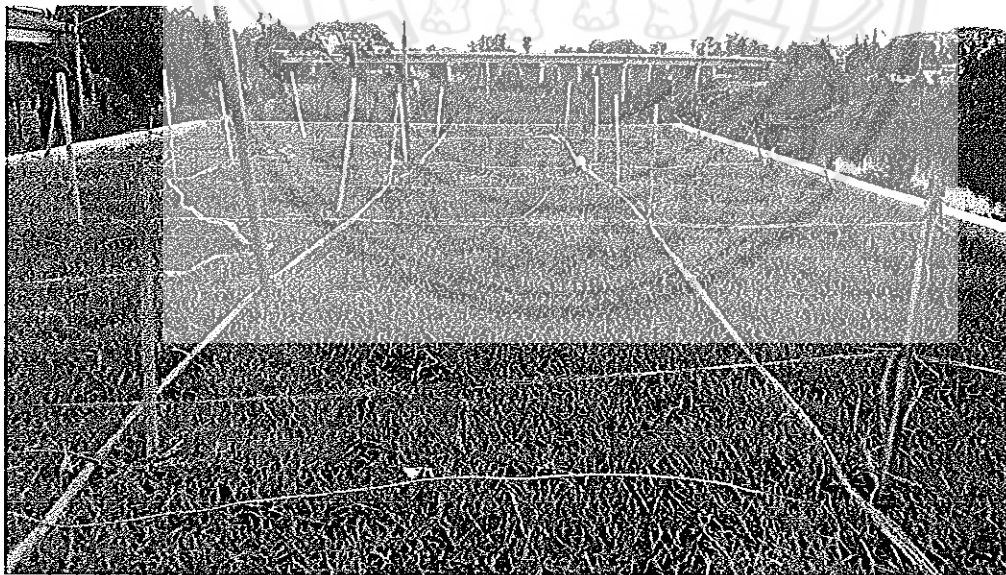


รูปที่ 3.1 ภาพอาคารทดลอง

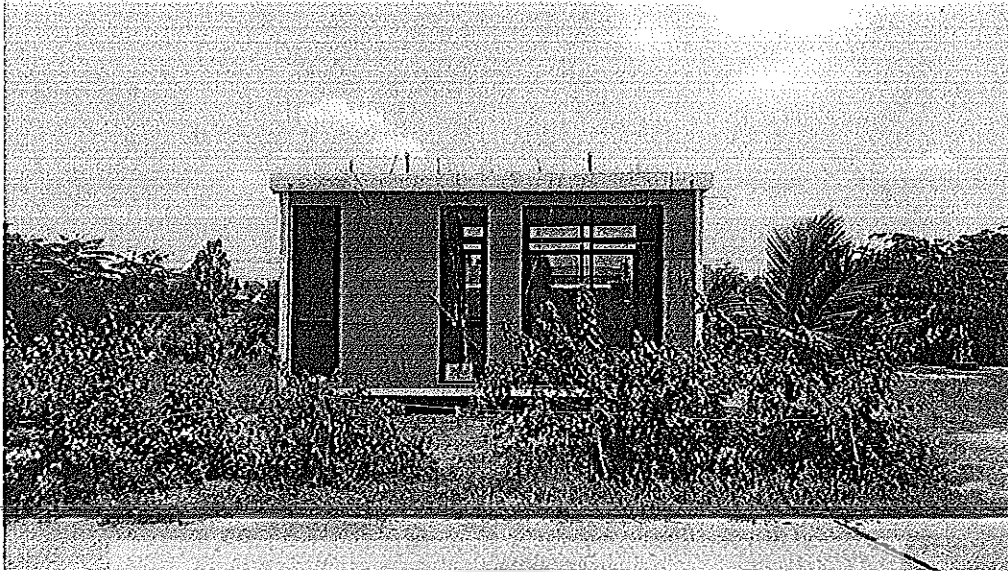
หลังคาของอาคารทดลองขนาด 3 x 6 เมตร ปลูกหญ้าเต็มพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โครงสร้างอาคาร เป็นโครงสร้างเหล็กกรุภายนอกและภายในด้วยผนังเบา หลังคาเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กปูทับด้วยดินหนา 0.10 เมตร และปลูกหญ้าไว้ด้านบน



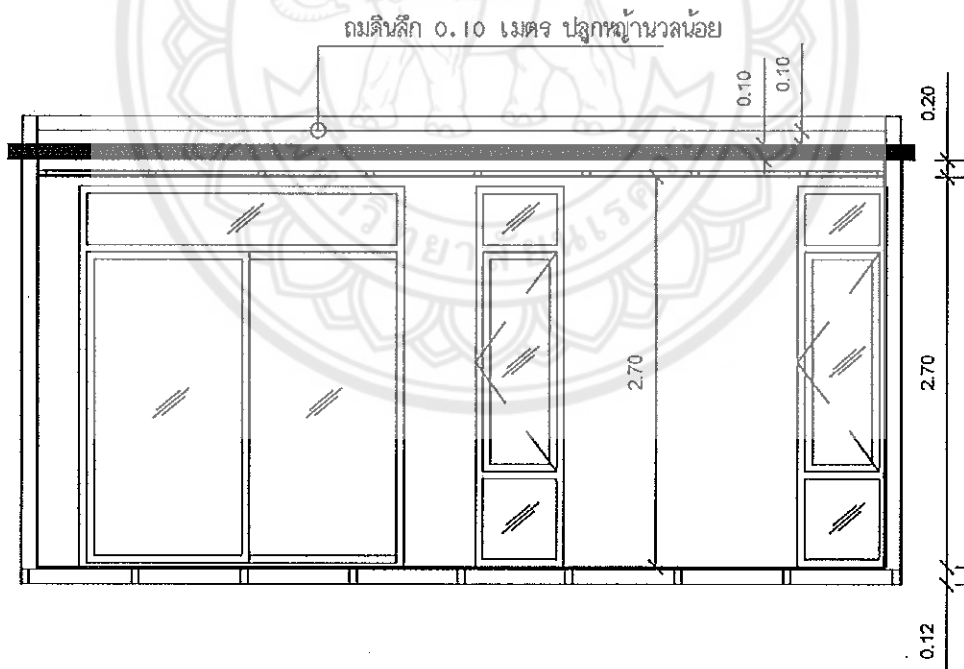
รูปที่ 3.2 ผังหลังคาอาคารทดลอง



รูปที่ 3.3 รูปหลังคาอาคารทดลอง



รูปที่ 3.4 รูปด้านอาคารทดลอง



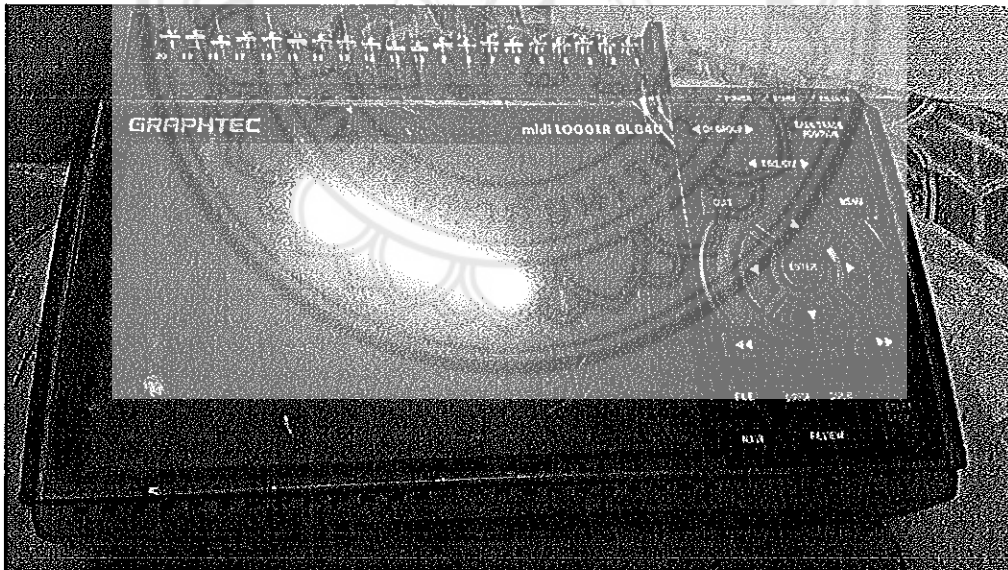
รูปที่ 3.5 ภาพตัดอาคารทดลอง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำความเย็นจากสวนบนหลังคามาใช้เพื่อการปรับเย็นในอาคารนั้น มีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลตัวแปรต่างๆในหลายๆจุดในเวลาใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะตัวแปรด้านอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลอง นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์ และความเร็วลมภายในอาคารทดลองเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือต่างๆเพื่อช่วยในการเก็บข้อมูลให้ได้ข้อมูลถูกต้อง ดังนี้

3.2.1 เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger)

เนื่องจากการทดลองมีความจำเป็นต้องเก็บข้อมูลเป็นจำนวนมากในช่วงเวลาใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้ผลของการศึกษาที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด จึงมีการใช้เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติของ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL840 เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น หัววัดอุณหภูมิ เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ เป็นต้น โดยเครื่องมือดังกล่าวสามารถวัดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการศึกษาได้ในเวลาใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3.6 เครื่องเก็บและบันทึกข้อมูลอัตโนมัติของ GRAPHTEC รุ่น midi LOGGER GL840

3.2.2 เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ (Pyranometer)

เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งรังสีตรง รังสีกระจายและรังสีรวม ซึ่งในการทดลองดังกล่าวจะใช้ค่ารังสีรวมเพื่อการศึกษา โดยการเก็บค่ารังสีรวมดังกล่าวของเครื่อง วัดค่ารังสีอาทิตย์ เครื่องดังกล่าวจะแปลงค่ารังสีอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถเชื่อมต่อสัญญาณดังกล่าวเข้าสู่เครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติได้โดยตรง โดยเครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติจะทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงดังกล่าวเป็นค่ารังสีอาทิตย์และเก็บบันทึกไว้ โดยในการศึกษาค้างนี้จะใช้เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ของ Kipp&Zonen ซึ่งสามารถวัดค่ารังสีอาทิตย์ได้ในช่วง 1-1400 วัตต์/ตารางเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน + 5%



รูปที่ 3.7 เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ Kipp&Zonen

3.2.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ

ในการวัดค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของชุดการทดลองสำหรับการทดลองชุดนี้ใช้ เทอโมคัพเพิล (Thermocouple) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดข้อมูลด้านอุณหภูมิซึ่งอาศัยหลักการทำงานโดยการแปลงค่าอุณหภูมิเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยอาศัยคุณลักษณะทางวัสดุศาสตร์ของโลหะสองชนิด ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวสามารถเชื่อมเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลอัตโนมัติได้โดยตรง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะใช้ เทอโมคัพเพิล Type K ซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-1250 องศาเซลเซียส โดยทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละหัววัดที่อุณหภูมิ 0 และ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.8 Thermocouple Type K

3.3 การเก็บข้อมูลการวิจัย

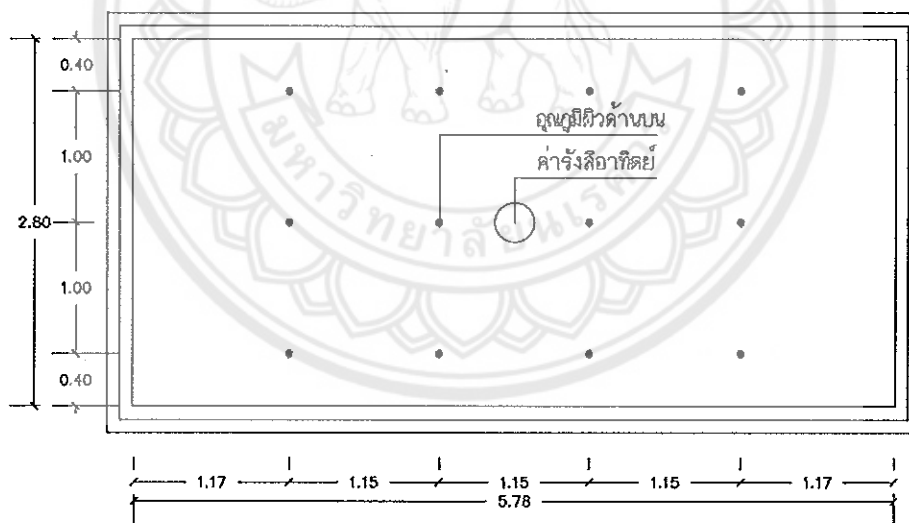
เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำความเย็นจากสวนบนหลังคามาใช้เพื่อการปรับเย็นในอาคารนั้น ในการศึกษาจะทำการจำลองประสิทธิภาพของระบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ก่อนด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้เพื่อการจำลองการไหลโดยวิธีการคำนวณทางอากาศพลศาสตร์ เพื่อหาลักษณะทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการนำความเย็นจากสวนหลังคามาใช้ เมื่อได้ผลจากการคำนวณและทราบถึงระยะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารทดลองแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณดังกล่าวมาใช้ในการกำหนดระยะต่างๆขององค์ประกอบอาคารทดลอง จากนั้นจึงทำการสร้างอาคารทดลองเพื่อเก็บข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลนั้นจะมุ่งเน้นรวบรวมข้อมูลด้านอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของชุดการทดลอง ค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศ ซึ่งในการเก็บข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เครื่องมือต่างๆดังต่อไปนี้

3.3.1 ศึกษาเพื่อกำหนดลักษณะทางกายภาพของอาคารทดลอง

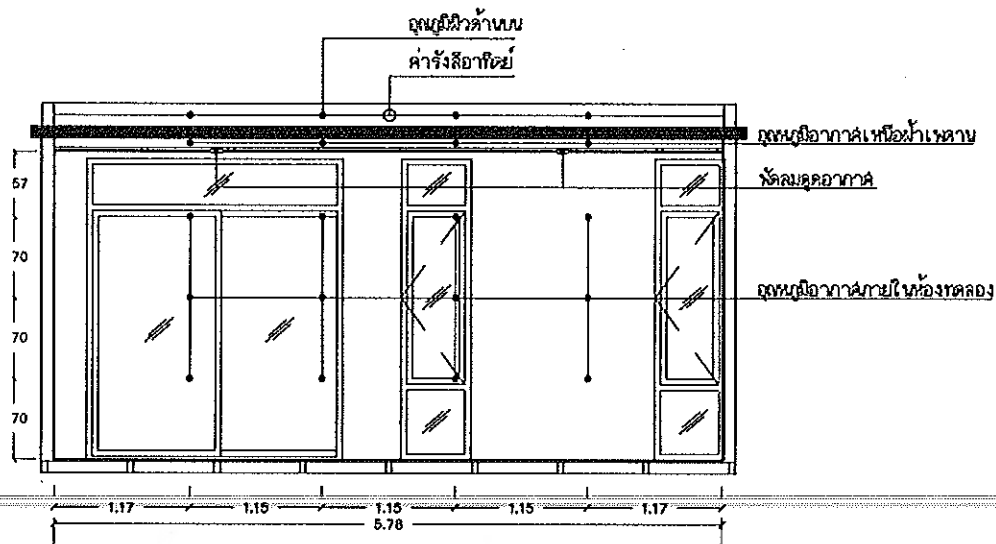
การกำหนดลักษณะทางกายภาพของอาคารทดลอง จะเน้นลักษณะทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการนำความเย็นจากสวนหลังคามาใช้ โดยการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณโดยอาศัยสมการทางอากาศพลศาสตร์ เพื่อหาลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมที่สุดของอาคารทดลอง ก่อนทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้รับจากการคำนวณ

3.3.2 สร้างอาคารทดลองเพื่อการเก็บผลการศึกษา

โดยอาคารดังกล่าวมีขนาดตามที่คำนวณได้ ซึ่งในการเก็บข้อมูลนั้นจะประกอบด้วยอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองเพื่อทราบถึงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในอาคารทดลอง ซึ่งในการเก็บข้อมูลด้านอุณหภูมิดังกล่าวจะมีการเก็บอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จำนวน 12 จุด (ดังแสดงในภาพที่ 3.9) และที่ระดับต่างๆ ทั้งหมด 5 ระดับ (ดังแสดงในภาพที่ 3.10) นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลค่ารังสีอาทิตย์และความเร็วลมในอาคารทดลอง



รูปที่ 3.9 มังตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.10 ผังตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือสำหรับการเก็บข้อมูล

3.3.3 เก็บข้อมูลจากอาคารทดลอง

ภายหลังจากที่ได้สร้างอาคารทดลองและทำการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเพื่อการเก็บข้อมูลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงมาถึงขั้นตอนการเก็บข้อมูล ในการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลตลอด 24 ชั่วโมงเพื่อทราบถึงอิทธิพลของสวนบนหลังคาที่มีต่ออุณหภูมิภายในอาคารในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งการเก็บข้อมูลจะทำการเก็บทุก 5 นาที

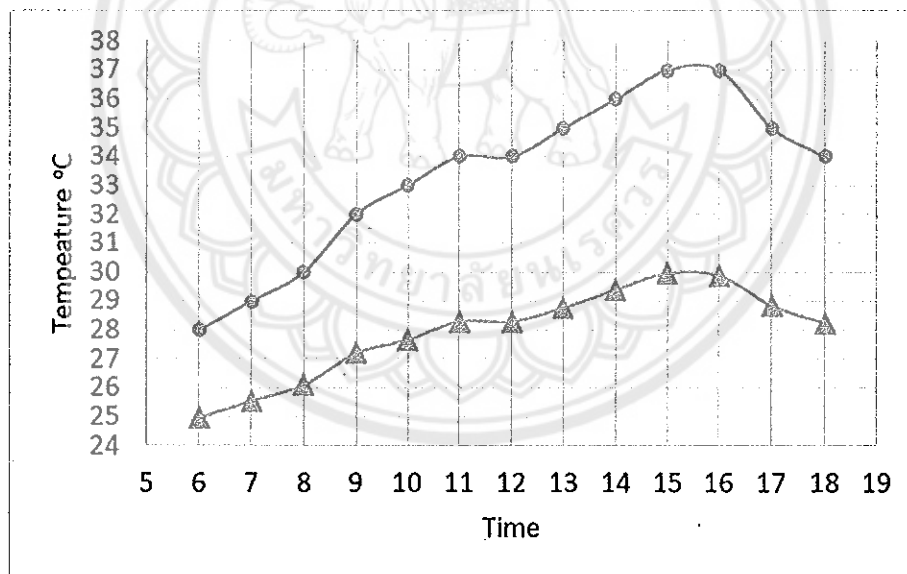
3.3.3 สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้รับจากการทดลอง

ผลที่ได้รับจากการทดลองเป็นข้อมูลสำคัญที่จะช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของระบบการนำความเย็นจากสวนหลังคามาดำเนินการปรับเย็นภายในอาคาร ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำความเย็นจากสวนหลังคามาดำเนินการปรับเย็นภายในอาคาร ทราบถึงประสิทธิภาพของการทำความเย็นภายในอาคาร โดยใช้สวนหลังคา และความรู้ดังกล่าวยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับอาคารโดยทั่วไปได้

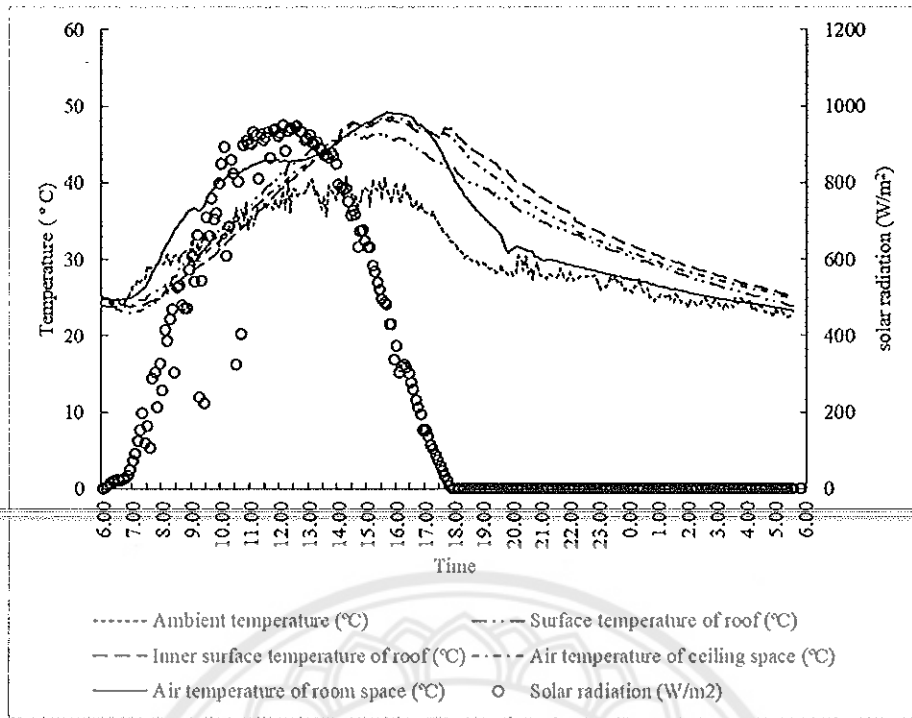
บทที่ 4
ผลการศึกษา

4.1 ผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS

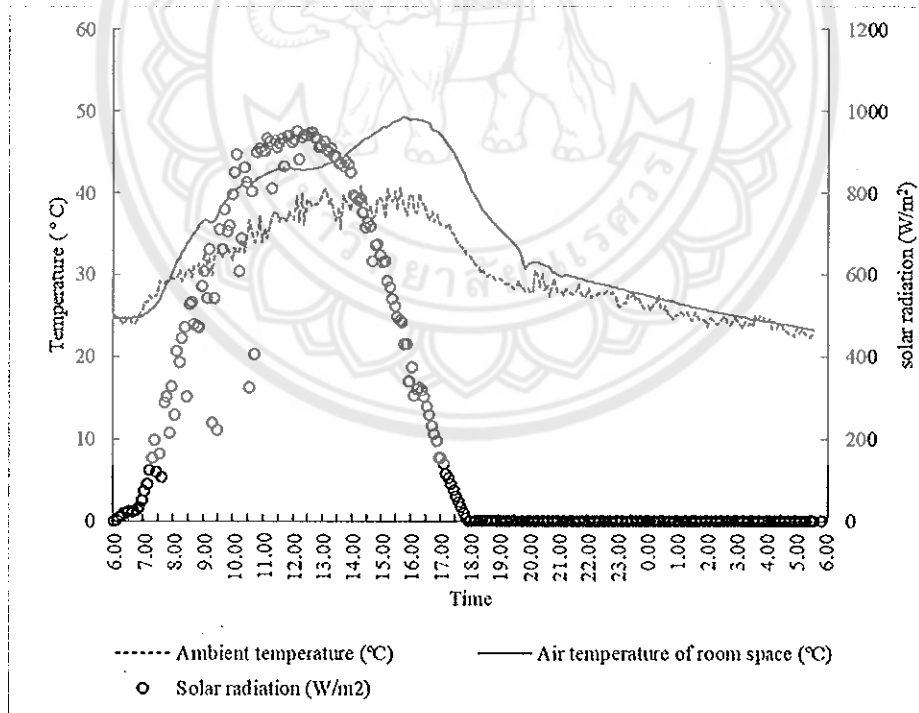
จากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS ซึ่งกำหนดเงื่อนไขให้อาคารทดสอบเป็นอาคารโครงสร้างเหล็ก ผนังภายนอกกรุด้วยไม้สำเร็จรูปหนา 10 มิลลิเมตร ผนังภายในกรุด้วยยิปซัมบอร์ดหนา 10 มิลลิเมตร ช่องว่างอากาศระหว่างผนังภายนอกและผนังภายใน 75 มิลลิเมตร ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดหนา 10 มิลลิเมตร ช่องว่างอากาศเหนือฝ้าเพดาน 200 มิลลิเมตร และความเร็วลมของพัดลมดูดอากาศ 1.5 – 2.5 เมตร/วินาที และกำหนดให้อุณหภูมิผิวด้านล่างของหลังคาคอนกรีต 20 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการคำนวณพบว่า อุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ตลอดช่วงเวลาที่ทำการคำนวณ โดยพบว่าขณะที่อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงสุดที่ 37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าสูงสุดที่ 30 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิอากาศภายในอาคารที่มีสวบนหลังคามีค่าอยู่ระหว่าง 24.97 องศาเซลเซียส และ 29.96 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 อุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศภายในห้อง



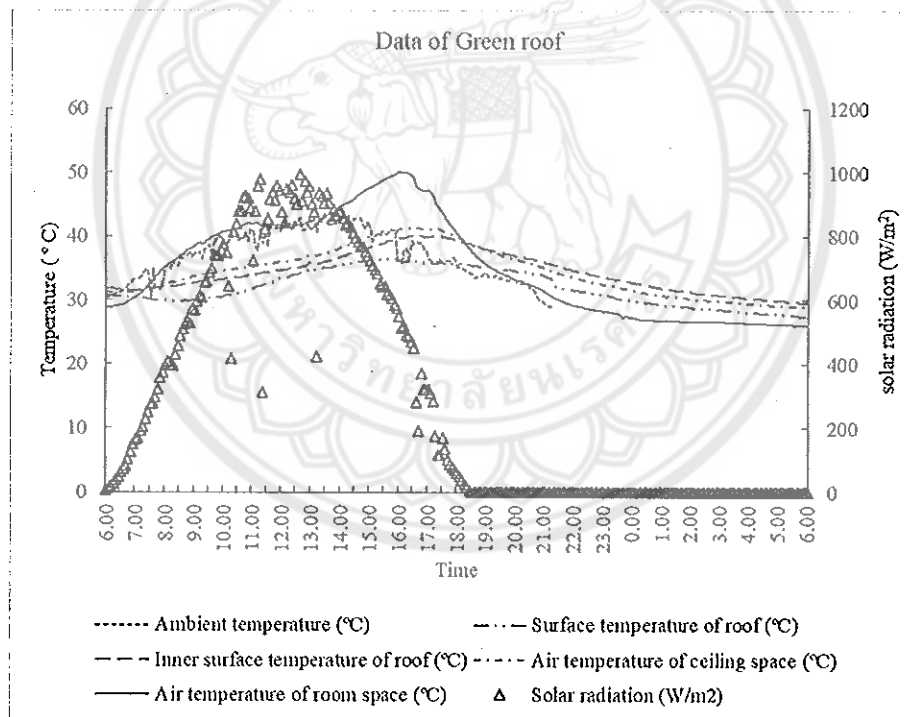
ภาพที่ 4.2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองของอาคารทดลองที่ไม่ปลูกพืชบนหลังคา

4.2 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา

จากภาพที่ 4.2 ซึ่งแสดงข้อมูลของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่า ช่วงเวลาบ่ายเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิในจุดต่างๆมีค่าสูงที่สุด โดยค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 39.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 46.57 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 48.18 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 48.56 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 49.18 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 34.14 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 37.50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 37.43 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 37.82 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 40.22 องศาเซลเซียส ขณะที่ช่วงเวลากลางคืนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 26.59 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 31.56 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 33.79 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 32.70 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 28.62 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในอาคารพบว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายในเกือบตลอดเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล



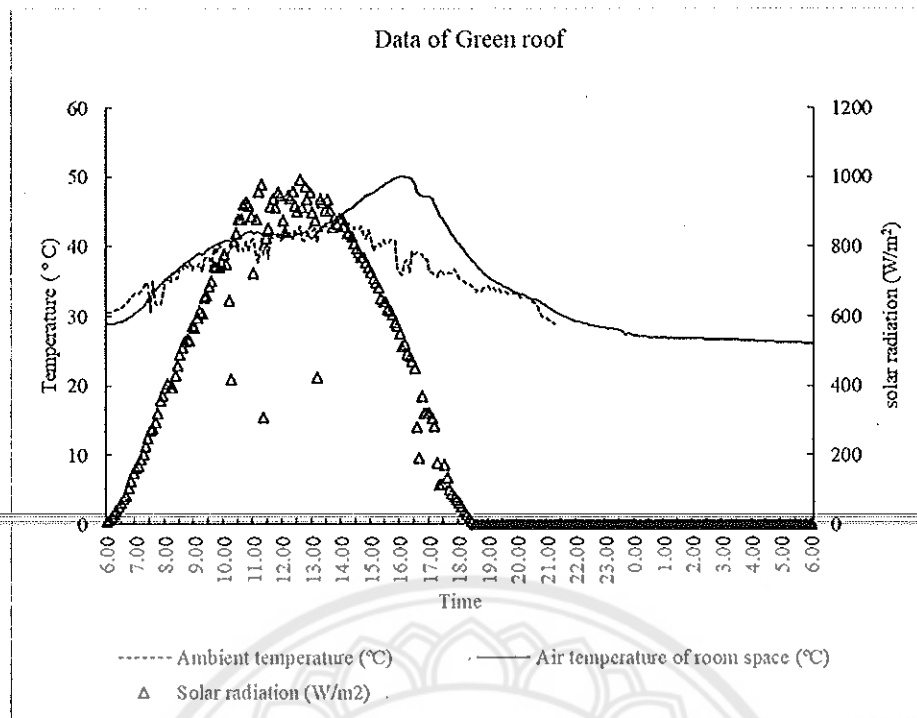
ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา

จ ๗
๒๓๙๒
ค ๑๒๒๓
๒๕๕๙



สำนักพิมพ์
๐ ๕ ๕๔. ๒๕๖๔

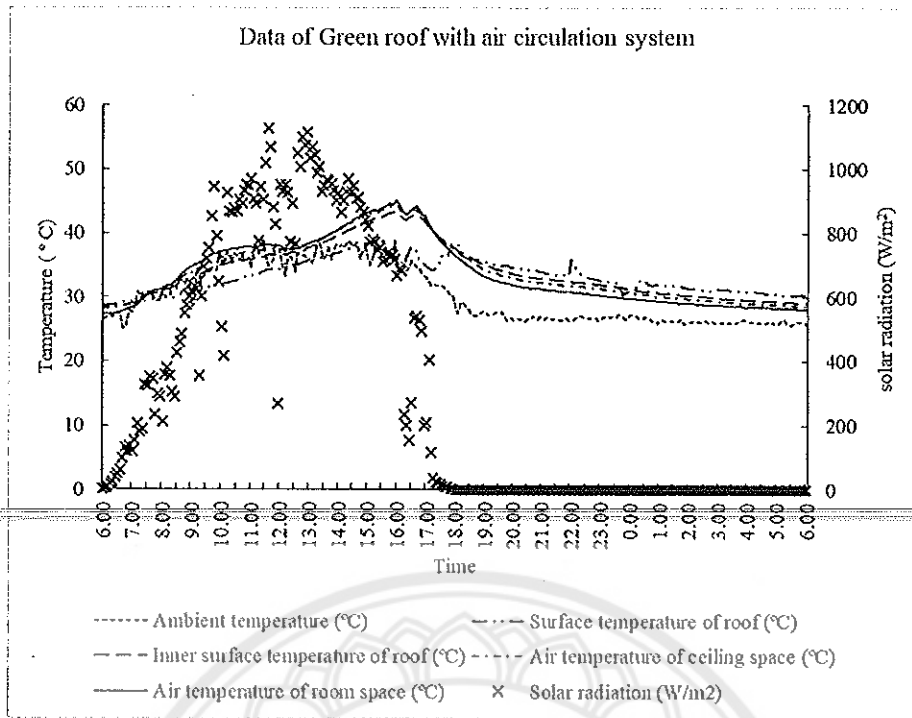
1034797



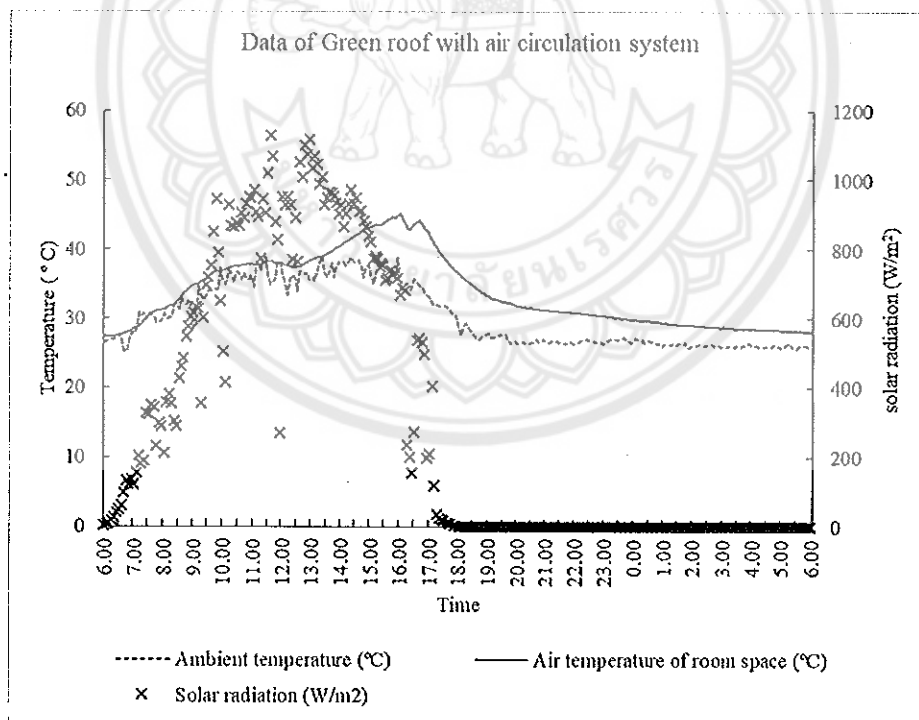
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคา

4.3 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคา

จากภาพที่ 4.3 ซึ่งแสดงข้อมูลของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่า ช่วงเวลาบ่ายเป็นเวลาที่อุณหภูมิในจุดต่างๆมีค่าสูงที่สุด โดยค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 43.40 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 36.53 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 40.12 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 41.28 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 50.06 องศาเซลเซียสค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 38.30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 33.13 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 35.36 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 36.35 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 41.11 องศาเซลเซียส ขณะที่ช่วงเวลากลางคืนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ - องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 31.03 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 33.60 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 32.76 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 29.39 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในอาคารพบว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายในเกือบตลอดเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล



ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการหมุนเวียนอากาศ



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับอุณหภูมิภายในอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการหมุนเวียนอากาศ

4.4 ผลการศึกษาอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชบนหลังคาและมีการหมุนเวียนอากาศ

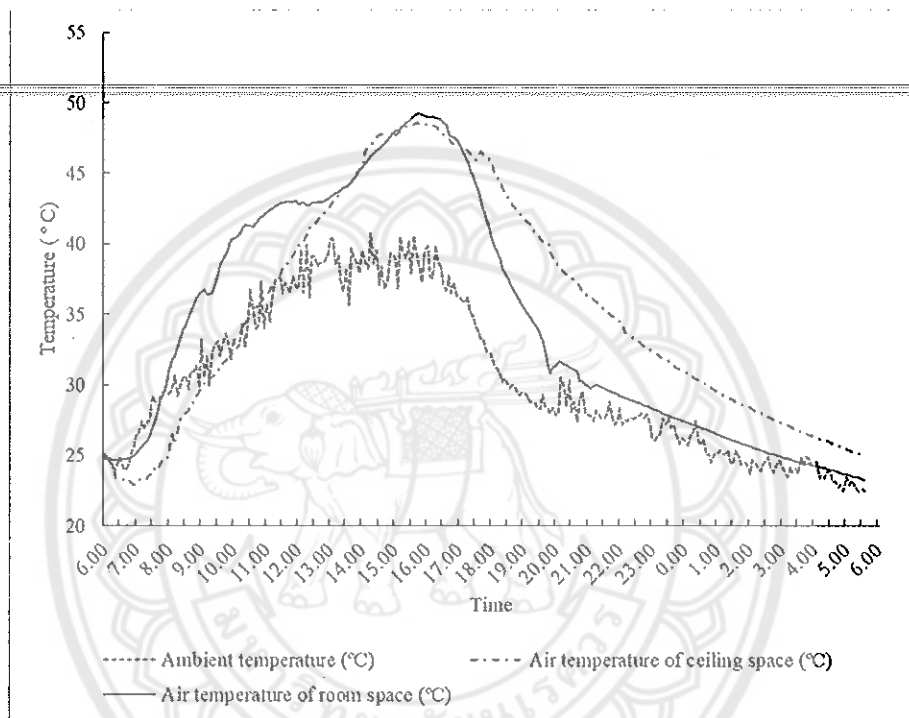
จากภาพที่ 4.4 ซึ่งแสดงข้อมูลของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืชบนหลังคา ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่า ช่วงเวลาบ่ายเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิในจุดต่างๆมีค่าสูงสุด โดยค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 38.80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 38.63 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 43.32 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 44.39 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 45.07 องศาเซลเซียส ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวันของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 33.94 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 33.86 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 36.41 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 37.07 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 37.28 องศาเซลเซียส ขณะที่ช่วงเวลากลางคืนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 26.74 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านบน 32.83 องศาเซลเซียส อุณหภูมิผิวคอนกรีตด้านล่าง 31.84 องศาเซลเซียส ช่องว่างอากาศเหนือฝ้า 31.27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศภายในห้อง 30.43 องศาเซลเซียส และจากการศึกษาเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศภายนอกกับภายในอาคารพบว่า อุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายในเกือบตลอดเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล



บทที่ 5

บทวิเคราะห์ผลการศึกษา

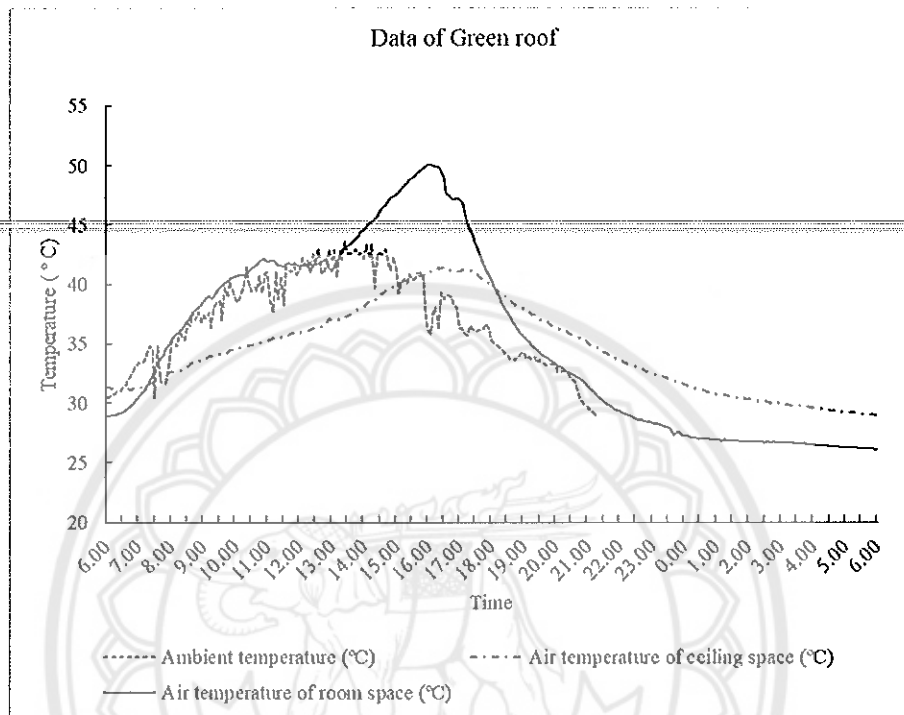
จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิต่างๆล้วนแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ในทุกกรณีศึกษา ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 4.2 – 4.4 และการส่งผ่านความร้อนดังกล่าวจะใช้เวลาในการส่งเข้าสู่ภายในอาคารดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละองค์ประกอบของอาคารทดสอบในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเป็นไปตามคุณสมบัติในการหน่วงความร้อนของวัสดุ



ภาพที่ 5.1 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่ไม่มีการปลูกพืช

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆของชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกหญ้าจะพบว่าอุณหภูมิอากาศจะมีค่าต่ำกว่าทุกจุดตลอดเวลาที่ทำการทดลองโดยอุณหภูมิบริเวณเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงสลับกับอุณหภูมิภายในห้องดังจะเห็นได้จากแผนภูมิว่าในช่วงเวลาเช้า อุณหภูมิภายในห้องจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและในช่วงบ่ายอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงกว่า จากตารางที่ 5.1 พบว่าช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย 34.14 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 37.82 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่า 40.22 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิภายในห้องมีค่าเฉลี่ย

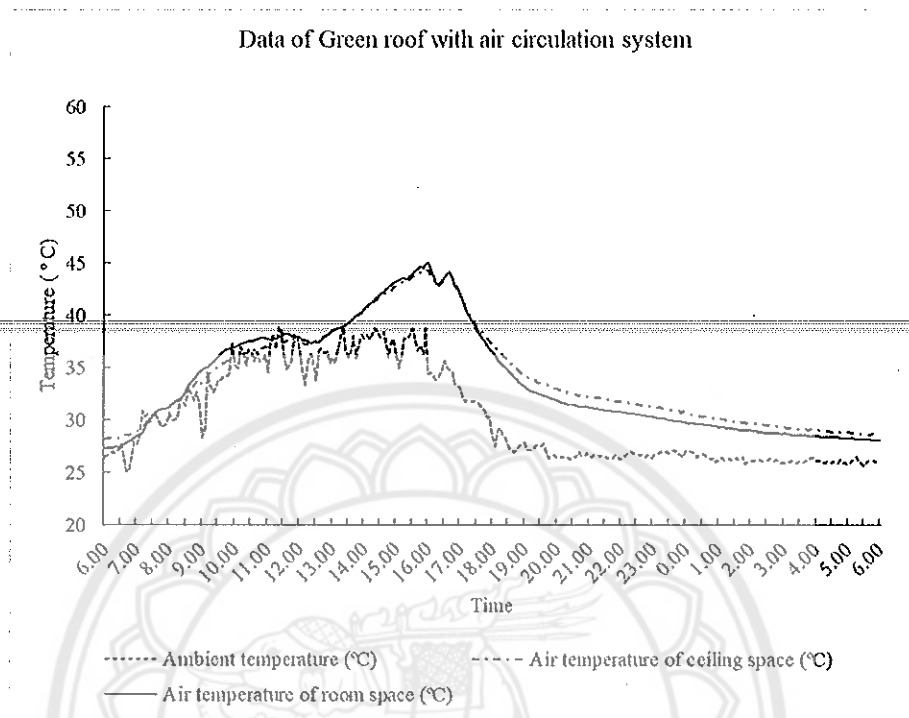
ที่สูงกว่าซึ่งอาจเป็นผลมาจากมีพื้นที่ผนังซึ่งรับแดดมากกว่าจึงส่งผลให้มีอุณหภูมิที่สูงกว่า ขณะที่ช่วงเวลากลางคืน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย 26.59 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 37.07 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่า 37.28 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศและใกล้เคียงกับอุณหภูมิช่องว่างเหนือฝ้าเพดาน



ภาพที่ 5.2 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืช

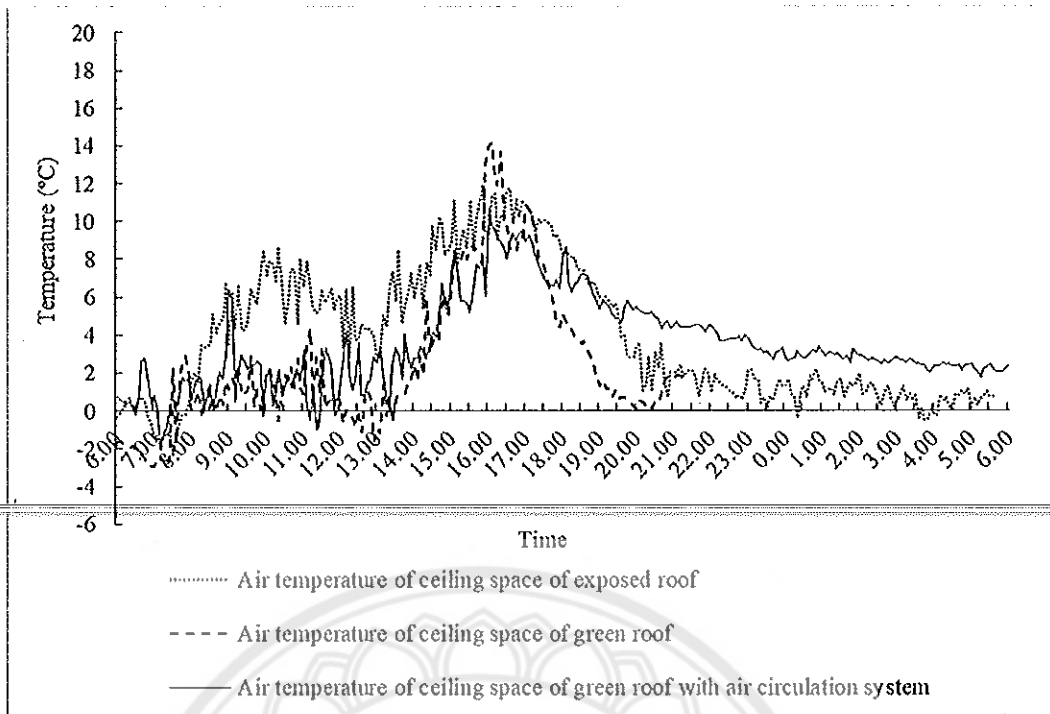
เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆของชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกหญ้าจะพบว่าอุณหภูมิอากาศจะมีค่าต่ำกว่าทุกจุดตลอดเวลาที่ทำการทดลองโดยอุณหภูมิบริเวณเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงสลับกับอุณหภูมิภายในห้องดังจะเห็นได้จากแผนภูมิว่าในช่วงเวลาเช้า อุณหภูมิภายในห้องจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและในช่วงบ่ายอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงกว่า จากตารางที่ 5.1 พบว่าช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย 38.3 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 37.07 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่า 37.28 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิภายในห้องมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน แต่ยังมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ขณะที่ช่วงเวลากลางคืน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย - องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 32.76 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิ

อากาศภายในห้องมีค่า 29.39 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือฝ้าเพดาน



ภาพที่ 5.3 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและอุณหภูมิห้องของอาคารทดลองที่มีการปลูกพืชและมีระบบหมุนเวียนอากาศ

เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงเวลาต่างๆของชุดการทดลองที่ไม่มีการปลูกหญ้าจะพบว่าอุณหภูมิอากาศจะมีค่าต่ำกว่าทุกจุดตลอดเวลาที่ทำการทดลองโดยอุณหภูมิบริเวณเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงสลับกับอุณหภูมิภายในห้องดังจะเห็นได้จากแผนภูมิว่าในช่วงเวลาเช้า อุณหภูมิภายในห้องจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานและในช่วงบ่ายอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานจะมีค่าสูงกว่า จากตารางที่ 5.1 พบว่าช่วงเวลากลางวัน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย 33.94 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 37.07 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่า 37.28 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพบว่าอุณหภูมิภายในห้องมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดาน แต่ยังมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ ขณะที่ช่วงเวลากลางคืน อุณหภูมิอากาศมีค่าเฉลี่ย 26.74 องศาเซลเซียส อุณหภูมิช่องว่างอากาศมีค่าเฉลี่ย 31.27 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่า 30.43 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิอากาศภายในห้องมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศเหนือฝ้าเพดาน



ภาพที่ 5.4 เปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิอากาศกับอุณหภูมิเหนือฝ้าเพดานของอาคารทดลองลักษณะต่างๆ

หากนำผลต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคารทดลองและอุณหภูมิอากาศเหนือฝ้าเพดานของอาคารทดลองลักษณะต่างๆจะพบว่าอาคารที่ไม่มีการปลูกพืชด้านบนจะมีความต่างของอุณหภูมิในช่วงเวลากลางวันมากกว่าชุดการทดลองอื่นซึ่งแสดงให้เห็นว่าความร้อนสามารถส่งผ่านเข้าสู่อาคารได้มากกว่าจึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในมีค่าสูง ขณะที่ช่วงเวลากลางคืนจะมีค่าต่ำกว่าซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการคายความร้อนได้ดีกว่าหลังคาที่มีการปลูกพืช ดังแสดงในภาพที่ 5.1 ขณะที่หลังคาที่มีการปลูกพืชซึ่งไม่มีระบบระบายอากาศจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าหลังคาที่มีการติดตั้งระบบระบายอากาศเนื่องจากหลังคาที่มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศจะมีการนำเอาอากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าจากภายในห้องไปหมุนเวียนกับอากาศที่เย็นกว่าบริเวณเหนือฝ้าเพดานจึงส่งผลทำให้ชุดการทดลองที่มีการติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศมีอุณหภูมิที่สูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่มีการหมุนเวียนอากาศ

ช่วงเวลา	รายละเอียด	อุณหภูมิ อากาศ	อุณหภูมิ ผิว ด้านบน	อุณหภูมิ ผิว ด้านล่าง	อุณหภูมิ ช่องว่าง อากาศ	อุณหภูมิ อากาศ ภายใน
เวลากลางวัน	หลังคาคอนกรีต	34.14	37.50	37.43	37.82	40.22
	หลังคาคอนกรีตที่มีการปลูกพืชคลุม	38.30	33.13	35.36	36.35	41.11
	หลังคาคอนกรีตที่มีการปลูกพืชคลุม พร้อมระบบหมุนเวียนอากาศ	33.94	33.86	36.41	37.07	37.28
เวลากลางคืน	หลังคาคอนกรีต	26.59	31.56	33.79	32.70	28.62
	หลังคาคอนกรีตที่มีการปลูกพืชคลุม	-	31.03	33.60	32.76	29.39
	หลังคาคอนกรีตที่มีการปลูกพืชคลุม พร้อมระบบหมุนเวียนอากาศ	26.74	32.83	31.84	31.27	30.43

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆของอาคารทดลองในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

จากตารางที่ 5.1 จะพบว่า หลังคาคอนกรีตที่ไม่มีการปลูกพืชจะมีความร้อนส่งผ่านมากกว่าหลังคาที่มีการปลูกพืช ดังจะเห็นได้จากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกกับอุณหภูมิอากาศภายในอาคารมีความต่างถึง 6 องศาเซลเซียส ขณะที่ในช่วงเวลากลางคืนมีความต่างเพียง 2 องศา หากมีการปลูกพืชไว้ด้านบนหลังคาพบว่ามีส่วนช่วยในการลดความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารได้เป็นอย่างมาก โดยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคารมีความต่าง 3 องศาเซลเซียสในช่วงเวลากลางวัน หากเพิ่มระบบหมุนเวียนอากาศเข้าไปจะพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศจะลดลงได้อีก 1 องศาเซลเซียส

จากข้อมูลที่ได้พบสามารถสรุปได้ว่าการนำความเย็นจากสวนหลังคามานำมาใช้ลดความร้อนภายในอาคารเป็นแนวทางที่สามารถเป็นไปได้และจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นหากสามารถสร้างความเย็นให้กับบริเวณพื้นผิวด้านบนของช่องว่างอากาศเหนือฝ้าเพดาน

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาแนวทางในการนำความเย็นจากสวนหลังคามานำใช้ในการปรับเย็นให้กับอาคารเป็นแนวทางที่สามารถเป็นไปได้ โดยอาคารที่จะมีการนำความเย็นจากสวนหลังคามานำใช้นั้นควรมีการคำนึงถึงแนวทางในการป้องกันความร้อนที่เข้าสู่อาคารจากทางด้านข้าง ซึ่งอาจทำได้โดยการติดตั้งฉนวนหรือการออกแบบอาคารให้มีการบังเงาที่ตีนนอกจากนั้นยังอาจพิจารณาเลือกพืชชนิดอื่นซึ่งมีการให้ร่มเงาที่ดีและการพิจารณาใช้ดินที่หนาขึ้นก็เป็นอีกองค์ประกอบหนึ่งที่สามารถช่วยสร้างความเย็นให้กับภายในอาคารได้

บรรณานุกรม

1. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, เครื่องปรับอากาศในบ้าน. กรุงเทพมหานคร :กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2548.

ตริงใจ บุรณสมภพ, การออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน. กรุงเทพมหานคร :อัมรินทร์พรินต์ติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2539.

2. ธนิต จินดาวณิก, เอกสารประกอบการสอน รายวิชา 2501494 ENERGY ARCH DESIGN, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

3. ธนิต จินดาวณิก, สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

4. ประพนธ์ วงษ์ท่าเรือ, การศึกษาสภาวะน่าสบายเชิงความร้อนของคนในอาคาร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

5. สมสิทธิ์ นิตยะ, การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น, กรุงเทพมหานคร, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

6. สุนทร บุญญาธิการ, เทคนิคการออกแบบบ้านประหยัดพลังงานเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีกว่า, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

7. สุนทร บุญญาธิการ และ ธนิต จินดาวณิก, รายงานการวิจัยการวิเคราะห์สภาวะน่าสบายและสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับอาคารสถาปัตยกรรมไทย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2536.

8. สำนักงานคณะกรรมการนโยบายแห่งชาติ, “สาระน่ารู้เรื่องการอนุรักษ์พลังงาน: การให้ความเย็นแก่อาคาร”, กรุงเทพฯ.

9. B. Bass, B. Baskaran, Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas, Institute for Research and Construction , NRCC-46737 Project number A020, CCAF Report B1046, Ottawa, Canada, National Research Council, 2003.

10. Devid H.F. Liu, Be'la G. Lipta'k, Environmental Engineers Hand Book 2 nd Edition, Lewis Publisher, New York, 1966.

11. E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in and urban canyon due to green wall and green roofs in diverse climates, Building and Environment 43 (2008) 480-493.

12. Jeffrey Ellis Aronin, Climate and Architecture, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1953.

13. Nyuk Hein Wong, Yu Chen, Chui Leng Ong and Angelia Sia, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical Environment, *Building and Environment* 38, 2003.
14. N.H. Wong, D.K.W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C.L. Ong and A. Sia, The effect of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Building and Environment* 35, 2003.
15. Norbert Lechner, *Heating, Cooling, Lighting Design Method for Architects*, John Willey and Sons, New York, 2001.
16. S. Onmura, M. Matsumoto and S. Hokoï, Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens, *Building and Environment* 33, 2001.
17. R. Kumar and S.C. Kaushik, Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings, *Building and Environment* 40, 2005, 1505-1511.
18. Robinette, Gray O, *Landscape Planing for Energy Conservation*, Princeton University Press, New Jersey, 1976.
19. S.W. Peck, C. Callaghan, B. Bass, M.E. Kuhn, Research Report: Greenback from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada, Ottawa, Canada, Canadian Mortgage and Housing Corporation (CMHC), 1999.
20. Victor Olgyay, *Design With Climate*, Princeton University Press, New Jersey, 1963.
21. Watson, D., FAIA; and Kenneth Lab, *Climatic Design*, McGraw – hill, 1983.
22. Wikimedia the free encyclopedia, 2012, Hanging Garden of Babylon, modified on January 2012, (online). Available:http://en.wikipedia.org/wiki/Hanging_Gardens_of_Babylon, 20 January 2012

ภาคผนวก



ข้อมูลชุดการทดลองหลังคาคอนกรีตเปลือย



Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
6.00	25.10	23.89	24.98	24.90	24.75	1.05	-0.35
6.05	24.80	23.83	24.88	24.82	24.73	3.55	-0.07
6.10	24.60	23.80	24.85	24.80	24.73	9.66	0.13
6.15	24.20	23.78	24.83	24.78	24.71	13.02	0.51
6.20	24.00	23.77	24.10	23.41	24.70	18.54	0.70
6.25	24.60	23.73	24.12	23.44	24.70	21.50	0.10
6.30	24.80	23.78	24.01	23.32	24.71	23.47	-0.09
6.35	24.10	23.75	23.97	23.30	24.71	22.35	0.61
6.40	24.00	23.76	23.94	23.23	24.75	24.39	0.75
6.45	24.40	23.77	23.95	23.28	24.80	27.42	0.40
6.50	25.10	23.87	23.84	23.08	24.86	34.65	-0.24
6.55	25.60	23.93	23.73	22.93	24.97	50.43	-0.63
7.00	26.60	24.18	23.83	23.09	25.15	73.90	-1.45
7.05	26.60	24.43	23.90	23.24	25.34	91.58	-1.26
7.10	27.40	24.69	23.89	23.24	25.58	124.52	-1.82
7.15	27.00	24.66	23.87	23.18	25.86	152.86	-1.14
7.20	27.40	24.63	24.00	23.41	26.03	197.50	-1.37
7.25	27.40	24.69	24.18	23.64	26.38	119.33	-1.02
7.30	29.20	25.22	24.27	23.62	26.90	164.56	-2.30
7.35	28.80	25.47	24.48	24.18	27.58	108.35	-1.22
7.40	28.90	25.51	24.55	24.03	28.32	288.36	-0.58
7.45	29.20	25.85	24.77	24.40	28.98	303.68	-0.22
7.50	29.50	25.94	24.95	24.72	29.30	214.27	-0.20
7.55	29.60	26.23	25.01	24.73	30.10	326.63	0.50
8.00	29.40	26.24	25.16	25.02	30.92	258.32	1.52
8.05	29.60	26.64	25.98	26.73	31.66	414.00	2.06
8.10	30.60	26.82	25.52	25.81	32.07	387.05	1.47
8.15	29.20	26.57	26.15	26.68	32.69	444.51	3.49
8.20	29.80	27.67	26.61	27.50	33.16	470.81	3.36
8.25	30.50	27.80	26.84	27.76	33.83	304.08	3.33
8.30	30.60	27.79	27.01	28.03	34.19	526.76	3.59
8.35	29.70	28.89	27.18	28.18	34.80	532.35	5.10
8.40	31.00	28.97	27.51	28.59	35.12	479.62	4.12
8.45	30.90	29.51	27.73	28.83	35.58	473.18	4.68
8.50	31.30	29.73	28.08	29.23	36.14	472.39	4.84
8.55	29.80	29.69	28.32	29.53	36.46	572.98	6.66
9.00	33.20	30.22	28.47	29.85	36.62	607.56	3.42

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
9.05	30.50	29.21	28.77	30.12	36.69	543.20	6.19
9.10	32.10	30.12	28.95	30.23	36.41	662.92	4.31
9.15	29.90	29.34	29.13	30.46	36.46	238.66	6.56
9.20	32.30	30.90	29.30	30.56	36.54	543.46	4.24
9.25	32.80	31.25	29.50	30.72	37.12	223.27	4.32
9.30	33.10	31.66	29.70	30.94	37.85	711.51	4.75
9.35	32.00	32.08	30.03	31.38	38.45	661.14	6.45
9.40	32.90	32.21	30.23	31.55	38.87	759.17	5.97
9.45	33.60	32.30	30.49	31.70	39.26	706.44	5.66
9.50	32.80	32.74	30.78	32.01	39.83	721.30	7.03
9.55	31.80	34.08	31.27	32.70	40.30	797.30	8.50
10.00	33.20	33.72	31.58	33.01	40.38	849.51	7.18
10.05	32.60	34.38	31.92	33.37	40.48	893.23	7.88
10.10	32.90	34.79	32.18	33.55	40.74	608.35	7.84
10.15	34.30	35.03	32.51	33.88	41.04	688.30	6.74
10.20	32.70	34.68	32.84	34.35	41.36	861.60	8.66
10.25	34.40	35.42	33.09	34.56	41.26	824.92	6.86
10.30	36.70	35.13	33.46	34.92	41.27	324.72	4.57
10.35	35.30	36.11	33.73	35.23	41.23	804.67	5.93
10.40	34.00	36.54	34.06	35.52	41.48	406.18	7.47
10.45	34.30	35.70	34.23	35.53	41.76	899.21	7.46
10.50	37.30	36.28	34.58	35.83	41.92	909.20	4.62
10.55	34.00	36.88	34.96	36.11	42.06	900.85	8.06
11.00	35.70	37.13	35.25	36.44	42.27	902.56	6.57
11.05	34.50	37.18	35.58	36.66	42.40	933.07	7.90
11.10	36.10	38.12	35.91	37.07	42.49	926.69	6.39
11.15	37.20	38.34	36.24	37.41	42.67	811.77	5.47
11.20	37.60	38.51	36.52	37.63	42.78	927.74	5.18
11.25	37.60	38.89	36.88	37.83	42.87	911.44	5.27
11.30	36.50	39.22	37.20	38.18	42.92	921.43	6.42
11.35	37.20	39.64	37.58	38.46	42.94	934.19	5.74
11.40	36.90	39.73	37.85	38.73	42.96	866.14	6.06
11.45	36.50	40.40	38.17	38.89	42.94	937.61	6.44
11.50	37.70	40.31	38.48	39.20	42.99	939.97	5.29
11.55	37.00	40.82	38.81	39.45	43.02	923.21	6.02
12.00	36.80	41.03	39.18	39.87	42.84	931.36	6.04
12.05	39.60	41.78	39.47	40.16	42.89	951.68	3.29

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
12.10	36.50	41.11	39.75	40.23	42.91	883.10	6.41
12.15	39.90	42.33	40.01	40.56	42.73	936.75	2.83
12.20	36.20	42.68	40.29	41.14	42.74	942.80	6.54
12.25	39.10	42.27	40.45	41.17	42.88	940.50	3.78
12.30	39.10	42.76	40.76	41.42	42.90	945.23	3.80
12.35	38.40	42.70	41.05	41.64	42.94	947.53	4.54
12.40	38.60	43.26	41.33	41.85	42.95	937.08	4.35
12.45	38.60	43.52	41.61	42.08	42.98	932.94	4.37
12.50	38.80	43.74	41.92	42.30	43.08	911.44	4.28
12.55	39.30	43.84	42.18	42.45	43.18	917.03	3.88
13.00	40.30	44.33	42.44	42.72	43.32	925.97	3.02
13.05	40.40	44.37	42.71	42.96	43.45	906.31	3.05
13.10	38.50	44.44	43.03	43.23	43.57	899.28	5.07
13.15	39.20	44.78	43.28	43.43	43.65	908.09	4.45
13.20	37.50	44.68	43.58	43.77	43.81	889.09	6.31
13.25	36.60	45.09	43.83	44.01	43.93	888.30	7.33
13.30	38.30	45.02	43.99	44.08	44.05	873.11	5.75
13.35	35.70	44.70	44.28	44.29	44.20	872.65	8.50
13.40	39.70	45.47	44.49	44.52	44.34	864.69	4.64
13.45	39.00	45.58	44.78	44.83	44.64	878.04	5.64
13.50	38.60	45.48	45.05	45.05	44.93	869.82	6.33
13.55	37.90	45.66	45.23	45.25	45.17	850.89	7.27
14.00	39.50	45.37	45.50	45.48	45.41	794.67	5.91
14.05	38.70	46.09	46.90	46.58	45.67	789.15	6.97
14.10	38.30	45.99	47.15	46.82	45.95	782.97	7.65
14.15	40.80	46.09	47.38	46.98	46.18	786.85	5.38
14.20	38.60	46.09	47.55	47.24	46.41	752.53	7.81
14.25	39.50	46.22	47.85	47.60	46.63	715.84	7.13
14.30	37.00	46.14	47.90	47.72	46.73	729.06	9.73
14.35	38.40	46.34	47.78	47.74	46.88	719.07	8.48
14.40	36.90	46.08	47.68	47.74	47.13	633.79	10.23
14.45	37.30	45.77	47.35	47.56	47.38	673.04	10.08
14.50	39.30	45.98	47.23	47.48	47.57	675.54	8.27
14.55	39.30	46.07	47.35	47.66	47.80	647.53	8.50
15.00	39.00	45.93	47.35	47.72	47.98	631.62	8.98
15.05	36.90	46.17	47.50	47.84	48.01	633.27	11.11
15.10	40.50	46.23	47.58	47.96	48.18	583.96	7.68

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
15.15	39.40	46.35	47.78	48.10	48.39	569.30	8.99
15.20	39.00	46.31	47.90	48.26	48.57	540.04	9.57
15.25	40.20	46.33	48.00	48.28	48.73	521.89	8.53
15.30	37.90	46.57	48.08	48.38	48.88	495.33	10.98
15.35	40.60	46.54	48.18	48.50	49.04	488.30	8.44
15.40	39.10	46.04	48.15	48.56	49.21	483.69	10.11
15.45	38.20	45.79	48.13	48.52	49.18	430.64	10.98
15.50	37.30	45.76	48.15	48.58	49.14	430.18	11.84
15.55	39.60	45.62	48.05	48.46	49.04	338.72	9.44
16.00	39.80	45.69	48.00	48.48	48.99	373.44	9.19
16.05	37.70	45.86	47.98	48.44	49.00	304.47	11.30
16.10	37.60	45.73	47.90	48.34	49.03	319.72	11.43
16.15	39.90	45.70	47.83	48.30	48.92	325.25	9.02
16.20	38.50	45.28	47.73	48.18	48.84	317.88	10.34
16.25	38.70	45.10	47.55	47.98	48.75	302.04	10.05
16.30	37.10	45.02	47.30	47.72	48.60	277.98	11.50
16.35	36.70	44.75	47.00	47.50	48.46	259.57	11.76
16.40	37.70	44.66	46.90	47.36	47.64	232.68	9.94
16.45	36.50	44.19	46.65	47.14	47.61	212.29	11.11
16.50	37.30	43.97	46.63	47.00	47.52	196.19	10.22
16.55	36.30	43.92	46.68	47.04	47.30	153.25	11.00
17.00	36.20	43.85	46.73	47.00	46.98	152.79	10.78
17.05	36.00	43.46	46.55	46.80	46.61	138.13	10.61
17.10	35.80	43.23	46.45	46.68	46.20	115.52	10.40
17.15	36.30	43.06	46.35	46.56	45.74	104.93	9.44
17.20	35.20	42.96	46.23	46.38	45.30	90.07	10.10
17.25	34.90	42.82	46.08	46.14	44.81	76.00	9.91
17.30	34.20	42.59	45.85	45.90	44.24	60.75	10.04
17.35	33.70	42.18	46.70	46.34	43.64	46.48	9.94
17.40	33.30	42.12	47.18	46.56	43.03	33.33	9.73
17.45	33.20	41.86	47.00	46.28	42.35	20.38	9.15
17.50	32.40	41.88	47.03	46.14	41.70	8.22	9.30
17.55	32.30	41.90	47.05	46.00	41.07	0.00	8.77
18.00	32.10	41.87	46.83	45.68	40.35	0.00	8.25
18.05	31.40	41.16	46.08	44.96	39.83	0.00	8.43
18.10	31.10	41.05	45.85	44.68	39.37	0.00	8.27
18.15	30.90	40.75	45.65	44.44	38.91	0.00	8.01

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
18.20	30.20	40.53	45.20	43.92	38.28	0.00	8.08
18.25	30.50	40.19	44.93	43.64	37.93	0.00	7.43
18.30	30.10	40.08	44.60	43.22	37.55	0.00	7.45
18.35	29.80	39.88	44.40	42.96	37.19	0.00	7.39
18.40	30.00	39.83	44.15	42.68	36.81	0.00	6.81
18.45	29.80	39.83	44.13	42.56	36.46	0.00	6.66
18.50	29.30	39.67	43.85	42.30	36.12	0.00	6.82
18.55	29.40	39.47	43.63	42.00	35.78	0.00	6.38
19.00	29.50	39.33	43.38	41.74	35.47	0.00	5.97
19.05	29.30	39.15	43.35	41.56	35.15	0.00	5.85
19.10	28.80	39.09	43.15	41.40	34.83	0.00	6.03
19.15	28.80	38.77	42.93	41.12	34.55	0.00	5.75
19.20	28.80	38.48	42.63	40.82	34.25	0.00	5.45
19.25	28.30	38.78	42.65	40.68	33.98	0.00	5.67
19.30	28.30	38.03	41.95	40.28	33.53	0.00	5.23
19.35	29.30	37.97	41.93	40.14	33.17	0.00	3.87
19.40	28.40	37.88	41.85	40.04	32.36	0.00	3.96
19.45	28.30	37.96	41.93	40.04	31.26	0.00	2.96
19.50	28.00	37.39	41.28	39.40	30.81	0.00	2.81
19.55	28.40	37.43	41.00	39.04	31.23	0.00	2.83
20.00	27.90	36.93	40.58	38.70	31.37	0.00	3.47
20.05	28.00	36.85	40.15	38.34	31.58	0.00	3.58
20.10	30.50	36.52	40.08	38.18	31.58	0.00	1.08
20.15	30.10	36.29	39.90	38.00	31.48	0.00	1.38
20.20	28.50	36.23	39.78	37.82	31.39	0.00	2.89
20.25	30.30	36.20	39.53	37.64	31.30	0.00	1.00
20.30	28.10	35.98	39.35	37.54	31.19	0.00	3.09
20.35	28.80	35.83	39.15	37.32	31.07	0.00	2.27
20.40	27.40	35.85	38.98	37.16	30.97	0.00	3.57
20.45	28.80	35.45	38.70	37.04	30.28	0.00	1.48
20.50	29.60	35.18	38.28	36.52	30.29	0.00	0.69
20.55	28.00	35.01	38.13	36.36	30.03	0.00	2.03
21.00	27.90	34.99	38.08	36.34	29.94	0.00	2.04
21.05	27.80	34.78	37.88	36.20	29.81	0.00	2.01
21.10	27.50	34.68	37.70	36.06	29.93	0.00	2.43
21.15	28.20	34.53	37.58	35.90	29.98	0.00	1.78
21.20	27.90	34.39	37.38	35.72	29.93	0.00	2.03

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
21.25	27.70	34.30	37.23	35.56	29.86	0.00	2.16
21.30	27.60	34.17	37.03	35.34	29.78	0.00	2.18
21.35	27.90	34.12	36.88	35.20	29.66	0.00	1.76
21.40	28.80	33.86	36.73	35.00	29.58	0.00	0.78
21.45	27.90	33.80	36.58	34.90	29.51	0.00	1.61
21.50	27.20	33.81	36.40	34.76	29.43	0.00	2.23
21.55	27.40	33.72	36.28	34.60	29.35	0.00	1.95
22.00	28.30	33.51	36.10	34.48	29.26	0.00	0.96
22.05	27.20	33.29	35.98	34.38	29.18	0.00	1.98
22.10	27.50	33.18	35.04	33.68	29.11	0.00	1.61
22.15	27.50	33.13	34.89	33.55	29.01	0.00	1.51
22.20	27.70	33.01	34.73	33.40	28.94	0.00	1.24
22.25	27.60	32.83	34.55	33.28	28.87	0.00	1.27
22.30	27.70	32.73	34.42	33.14	28.79	0.00	1.09
22.35	27.80	32.53	34.28	33.02	28.73	0.00	0.92
22.40	28.00	32.44	34.13	32.90	28.66	0.00	0.66
22.45	27.70	32.28	33.93	32.72	28.55	0.00	0.85
22.50	27.90	32.08	33.83	32.63	28.50	0.00	0.60
22.55	27.20	31.79	33.65	32.46	28.42	0.00	1.22
23.00	26.20	31.78	33.58	32.38	28.33	0.00	2.13
23.05	26.10	31.58	33.38	32.23	28.26	0.00	2.16
23.10	26.50	31.50	33.26	32.09	28.16	0.00	1.66
23.15	26.50	31.34	33.12	31.98	28.08	0.00	1.58
23.20	27.60	31.28	33.00	31.87	27.99	0.00	0.39
23.25	27.20	31.14	32.86	31.76	27.90	0.00	0.70
23.30	27.70	31.13	32.74	31.65	27.84	0.00	0.14
23.35	27.00	31.03	32.56	31.49	27.76	0.00	0.76
23.40	27.20	30.99	32.41	31.34	27.72	0.00	0.52

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
23.45	26.40	30.96	32.26	31.20	27.64	0.00	1.24
23.50	25.90	30.74	32.17	31.13	27.56	0.00	1.66
23.55	26.20	30.57	32.02	31.02	27.49	0.00	1.29
0.00	26.10	30.48	31.93	30.93	27.43	0.00	1.33
0.05	25.70	30.28	31.79	30.82	27.36	0.00	1.66
0.10	26.40	30.12	31.65	30.63	27.27	0.00	0.87
0.15	26.40	29.96	31.52	30.56	27.18	0.00	0.78
0.20	27.50	29.86	31.38	30.43	27.13	0.00	-0.37
0.25	26.00	29.76	31.27	30.36	27.06	0.00	1.06
0.30	25.70	29.80	31.15	30.23	26.99	0.00	1.29
0.35	26.20	29.68	31.03	30.13	26.92	0.00	0.72
0.40	25.00	29.58	30.88	29.99	26.84	0.00	1.84
0.45	25.10	29.45	30.80	29.91	26.77	0.00	1.67
0.50	24.50	29.37	30.64	29.76	26.70	0.00	2.20
0.55	25.10	29.15	30.56	29.66	26.63	0.00	1.53
1.00	25.10	29.16	30.45	29.58	26.50	0.00	1.40
1.05	25.40	29.03	30.28	29.43	26.42	0.00	1.02
1.10	25.20	29.00	30.13	29.31	26.34	0.00	1.14
1.15	25.10	28.81	30.05	29.23	26.28	0.00	1.18
1.20	25.40	28.64	29.93	29.11	26.23	0.00	0.82
1.25	24.60	28.51	29.82	29.02	26.12	0.00	1.52
1.30	24.40	28.41	29.73	28.94	26.08	0.00	1.68
1.35	25.40	28.31	29.63	28.83	26.03	0.00	0.63
1.40	24.90	28.18	29.53	28.73	25.96	0.00	1.06
1.45	24.40	28.04	29.38	28.63	25.90	0.00	1.50
1.50	24.50	28.02	29.33	28.57	25.83	0.00	1.33
1.55	24.30	27.86	29.21	28.46	25.75	0.00	1.45
2.00	23.70	27.69	29.13	28.41	25.66	0.00	1.96
2.05	24.70	27.68	29.03	28.32	25.58	0.00	0.88
2.10	24.50	27.55	28.88	28.15	25.52	0.00	1.02
2.15	24.10	27.42	28.81	28.12	25.45	0.00	1.35
2.20	23.90	27.33	28.70	28.01	25.41	0.00	1.51
2.25	24.30	27.17	28.59	27.93	25.34	0.00	1.04
2.30	24.70	27.14	28.50	27.86	25.26	0.00	0.56
2.35	24.90	27.08	28.38	27.70	25.18	0.00	0.28
2.40	24.10	27.01	28.28	27.66	25.12	0.00	1.02
2.45	23.80	26.85	28.18	27.53	25.08	0.00	1.28

ข้อมูลชุดการทดลองหลังคาคอนกรีตปลูกพืช



Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
6.00	30.50	30.76	31.88	31.31	28.87	6.64	-1.63
6.05	30.50	30.68	31.78	31.28	28.91	12.89	-1.59
6.10	30.70	30.67	31.77	31.25	28.94	20.71	-1.76
6.15	30.80	30.64	31.77	31.23	28.99	29.19	-1.81
6.20	31.00	30.57	31.71	31.20	29.06	39.38	-1.94
6.25	31.00	30.52	31.62	31.15	29.16	49.11	-1.84
6.30	31.30	30.58	31.63	31.13	29.26	61.87	-2.04
6.35	31.50	30.51	31.57	31.12	29.39	72.91	-2.11
6.40	31.90	30.50	31.58	31.18	29.56	81.13	-2.34
6.45	32.30	30.43	31.53	31.17	29.75	104.34	-2.55
6.50	32.80	30.43	31.54	31.23	29.97	125.38	-2.83
6.55	33.10	30.38	31.57	31.27	30.21	148.98	-2.89
7.00	33.40	30.36	31.53	31.28	30.47	162.72	-2.93
7.05	33.30	30.33	31.49	31.29	30.76	168.77	-2.54
7.10	33.50	30.32	31.54	31.43	31.06	188.63	-2.44
7.15	34.10	30.26	31.59	31.50	31.41	202.50	-2.69
7.20	34.80	30.25	31.63	31.63	31.86	226.76	-2.94
7.25	34.70	30.14	31.69	31.75	32.32	249.18	-2.38
7.30	30.50	30.06	31.73	31.88	32.78	272.58	2.28
7.35	34.90	30.00	31.83	32.04	33.27	276.73	-1.63
7.40	31.80	29.95	31.88	32.14	33.69	294.35	1.89
7.45	31.70	29.98	31.99	32.30	34.07	321.30	2.37
7.50	31.60	29.97	31.98	32.35	34.50	357.46	2.90
7.55	33.00	29.90	32.10	32.55	34.89	373.44	1.89
8.00	35.20	29.92	32.08	32.59	35.27	394.67	0.07
8.05	35.20	29.86	32.12	32.65	35.58	407.03	0.38
8.10	34.80	29.82	32.13	32.73	35.89	395.79	1.09
8.15	36.20	29.83	32.13	32.74	36.06	394.15	-0.14
8.20	35.40	29.85	32.21	32.82	36.32	429.72	0.92
8.25	35.40	29.83	32.25	32.93	36.62	457.73	1.22
8.30	36.70	29.79	32.34	33.10	36.93	488.43	0.23
8.35	36.50	29.85	32.48	33.28	37.25	508.42	0.75
8.40	37.60	29.89	32.52	33.35	37.58	525.84	-0.02

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
8.45	37.00	29.88	32.59	33.48	37.83	533.40	0.83
8.50	37.70	29.88	32.58	33.50	38.01	528.53	0.31
8.55	36.70	29.91	32.64	33.62	38.24	572.45	1.54
9.00	37.40	29.96	32.72	33.68	38.54	567.06	1.14
9.05	37.10	30.02	32.73	33.78	38.82	595.79	1.72
9.10	37.60	30.02	32.88	33.93	39.00	613.74	1.40
9.15	36.40	30.18	32.96	33.95	38.83	608.28	2.43
9.20	38.10	30.17	32.90	33.95	38.95	654.17	0.85
9.25	38.40	30.21	32.93	34.00	39.39	659.43	0.99
9.30	38.60	30.23	33.02	34.13	39.65	685.86	1.05
9.35	37.00	30.27	33.04	34.20	39.87	699.41	2.87
9.40	39.80	30.34	33.12	34.24	40.07	743.33	0.27
9.45	38.90	30.36	33.13	34.31	40.24	738.79	1.34
9.50	40.30	30.46	33.27	34.43	40.42	740.04	0.12
9.55	39.50	30.50	33.26	34.48	40.61	755.16	1.11
10.00	38.70	30.56	33.29	34.54	40.71	775.48	2.01
10.05	38.50	30.67	33.41	34.65	40.79	746.81	2.29
10.10	39.20	30.75	33.37	34.66	40.79	643.39	1.59
10.15	39.80	30.75	33.42	34.73	40.76	417.88	0.96
10.20	41.40	30.87	33.50	34.78	40.92	812.82	-0.48
10.25	40.20	30.92	33.58	34.87	41.09	838.33	0.89
10.30	39.40	31.06	33.53	34.84	41.30	877.45	1.90
10.35	39.80	31.17	33.61	34.93	41.53	877.84	1.73
10.40	39.40	31.27	33.62	34.99	41.69	921.10	2.29
10.45	40.70	31.37	33.71	35.03	41.94	925.97	1.24
10.50	39.30	31.49	33.82	35.18	42.07	917.49	2.77
10.55	40.90	31.70	33.93	35.26	42.08	886.85	1.18
11.00	41.00	31.79	33.99	35.27	41.91	722.75	0.91
11.05	38.50	31.92	34.00	35.36	42.04	877.58	3.54
11.10	37.70	32.11	34.16	35.48	42.04	957.07	4.34
11.15	41.10	32.21	34.14	35.48	41.82	977.38	0.72
11.20	38.80	32.22	34.24	35.48	41.59	309.73	2.79
11.25	40.60	32.39	34.27	35.56	41.58	821.43	0.98

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
11.30	38.30	32.50	34.33	35.61	41.52	852.60	3.22
11.35	41.50	32.65	34.34	35.64	41.64	915.98	0.14
11.40	41.20	32.82	34.39	35.76	41.72	938.26	0.52
11.45	41.10	33.01	34.55	35.90	41.71	911.90	0.61
11.50	41.50	33.08	34.58	35.89	41.72	955.56	0.22
11.55	40.80	33.32	34.66	35.99	41.70	944.97	0.90
12.00	41.20	33.32	34.63	35.94	41.52	874.23	0.32
12.05	42.20	33.50	34.75	35.94	41.56	841.16	-0.64
12.10	41.60	33.59	34.72	36.00	41.63	946.02	0.03
12.15	42.00	33.74	34.87	36.12	41.66	938.13	-0.34
12.20	41.50	33.82	34.96	36.16	41.09	957.59	-0.41
12.25	42.50	33.93	35.03	36.28	41.66	918.01	-0.84
12.30	41.70	34.03	35.08	36.32	41.71	899.28	0.01
12.35	42.90	34.17	35.13	36.33	41.79	991.78	-1.11
12.40	41.00	34.27	35.20	36.43	41.80	910.39	0.80
12.45	40.90	34.34	35.18	36.44	42.04	971.07	1.14
12.50	41.50	34.44	35.45	36.74	42.11	935.77	0.61
12.55	42.90	34.96	35.91	37.10	41.31	954.70	-1.59
13.00	42.10	34.70	35.91	37.03	41.18	898.55	-0.92
13.05	42.80	34.71	35.82	37.06	41.62	875.54	-1.18
13.10	40.60	34.71	35.63	36.94	41.94	422.68	1.34
13.15	42.80	34.81	35.77	37.07	42.54	933.27	-0.26
13.20	42.10	34.93	35.85	37.13	42.82	925.18	0.72
13.25	43.60	35.01	35.96	37.31	43.05	903.88	-0.55
13.30	42.60	35.10	36.04	37.38	43.27	933.73	0.67
13.35	42.60	35.14	36.16	37.45	43.45	903.22	0.85
13.40	42.70	35.15	36.23	37.56	43.60	853.58	0.90
13.45	42.90	35.16	36.36	37.74	43.83	884.35	0.93
13.50	42.50	35.25	36.48	37.92	44.12	863.51	1.62
13.55	42.70	35.40	36.56	38.03	44.38	879.36	1.68
14.00	42.20	35.52	36.75	38.13	44.57	879.42	2.37
14.05	43.30	35.57	36.87	38.36	44.93	857.73	1.63
14.10	42.20	35.65	37.01	38.54	45.13	836.03	2.93

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
14.15	43.40	35.67	37.19	38.70	45.27	841.16	1.87
14.20	39.70	35.72	37.22	38.70	45.47	827.81	5.77
14.25	42.70	35.85	37.44	38.88	45.76	809.53	3.06
14.30	42.60	35.94	37.57	39.17	46.14	793.43	3.54
14.35	42.50	36.04	37.78	39.26	46.48	782.18	3.98
14.40	42.90	36.07	37.80	39.39	46.66	767.98	3.76
14.45	41.60	36.03	37.95	39.53	47.03	767.92	5.43
14.50	41.20	36.07	38.06	39.62	47.36	752.53	6.16
14.55	42.30	36.17	38.20	39.88	47.43	739.97	5.13
15.00	41.20	36.23	38.28	40.03	47.60	724.46	6.40
15.05	39.30	36.18	38.38	40.00	47.74	706.64	8.44
15.10	40.20	36.29	38.52	40.16	48.08	695.00	7.88
15.15	40.40	36.36	38.63	40.28	48.32	682.97	7.92
15.20	40.10	36.37	38.76	40.38	48.59	650.36	8.49
15.25	40.80	36.40	38.86	40.40	48.77	641.81	7.97
15.30	40.40	36.42	38.99	40.45	48.97	642.80	8.57
15.35	40.40	36.52	39.20	40.65	49.14	617.69	8.74
15.40	40.90	36.53	39.26	40.70	49.39	614.66	8.49
15.45	40.90	36.43	39.28	40.68	49.57	605.06	8.67
15.50	40.90	36.42	39.29	40.74	49.72	582.77	8.82
15.55	37.00	36.22	39.44	40.84	49.94	573.11	12.94
16.00	36.10	36.20	39.68	41.08	50.06	551.08	13.96
16.05	35.90	36.20	39.70	41.12	50.03	513.94	14.13
16.10	37.90	36.02	39.80	41.18	50.00	519.59	12.10
16.15	38.00	36.11	39.84	41.23	49.89	490.60	11.89
16.20	36.20	36.07	40.00	41.30	49.85	484.29	13.65
16.25	39.30	36.01	40.02	41.34	49.56	469.56	10.26
16.30	38.80	36.11	40.13	41.41	48.86	450.49	10.06
16.35	39.10	35.95	40.10	41.34	47.69	281.26	8.59
16.40	39.00	35.99	40.12	41.28	47.45	190.27	8.45
16.45	38.90	35.95	39.97	41.10	47.24	369.43	8.34
16.50	38.10	35.93	39.94	41.10	47.16	320.18	9.06
16.55	38.10	35.93	39.94	41.12	47.19	320.84	9.09

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
17.00	36.30	35.81	39.88	41.10	47.12	319.86	10.82
17.05	36.30	35.78	39.93	41.16	46.86	306.84	10.56
17.10	35.90	35.74	40.01	41.17	46.12	283.83	10.22
17.15	35.70	35.73	40.09	41.19	45.17	175.74	9.47
17.20	36.50	35.80	40.03	41.14	44.50	114.86	8.00
17.25	36.20	35.81	39.98	40.98	44.05	116.57	7.85
17.30	36.00	35.81	39.94	40.85	43.50	169.95	7.50
17.35	36.10	35.74	39.88	40.73	42.88	134.19	6.78
17.40	36.10	35.76	39.76	40.53	42.24	99.21	6.14
17.45	36.10	35.75	39.69	40.42	41.73	88.76	5.63
17.50	36.70	35.73	39.57	40.25	41.22	79.88	4.52
17.55	36.30	35.75	39.43	40.07	40.76	70.81	4.46
18.00	35.20	35.73	39.35	39.91	40.31	60.82	5.11
18.05	35.10	35.66	39.23	39.73	39.86	49.90	4.76
18.10	34.90	35.55	39.08	39.50	39.39	37.48	4.49
18.15	34.70	35.52	38.95	39.33	38.90	26.17	4.20
18.20	34.50	35.51	38.90	39.18	38.46	15.25	3.96
18.25	34.20	35.49	38.76	38.99	38.04	7.10	3.84
18.30	34.10	35.44	38.68	38.85	37.63	0.20	3.53
18.35	33.60	35.35	38.52	38.58	37.24	0.00	3.64
18.40	33.70	35.35	38.46	38.48	36.85	0.00	3.15
18.45	33.60	35.30	38.33	38.29	36.49	0.00	2.89
18.50	33.90	35.23	38.21	38.13	36.15	0.00	2.25
18.55	34.10	35.18	38.08	37.98	35.88	0.00	1.78
19.00	34.30	35.21	38.09	37.93	35.60	0.00	1.30
19.05	33.70	35.25	37.94	37.73	35.32	0.00	1.62
19.10	33.90	35.08	37.84	37.59	35.09	0.00	1.19
19.15	33.70	34.99	37.73	37.44	34.87	0.00	1.17
19.20	33.90	34.99	37.71	37.40	34.66	0.00	0.76
19.25	33.40	34.93	37.57	37.18	34.47	0.00	1.07
19.30	33.60	34.88	37.47	37.05	34.27	0.00	0.67
19.35	33.40	34.80	37.38	36.98	34.08	0.00	0.67
19.40	33.20	34.81	37.27	36.83	33.91	0.00	0.71

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
19.45	33.10	34.80	37.24	36.77	33.77	0.00	0.67
19.50	33.20	34.71	37.13	36.62	33.59	0.00	0.39
19.55	33.20	34.60	37.08	36.56	33.43	0.00	0.23
20.00	33.20	34.54	36.93	36.39	33.28	0.00	0.08
20.05	32.60	34.47	36.84	36.29	33.13	0.00	0.53
20.10	32.60	34.51	36.82	36.20	33.04	0.00	0.44
20.15	32.60	34.44	36.74	36.13	32.89	0.00	0.29
20.20	32.60	34.45	36.65	36.01	32.63	0.00	0.03
20.25	32.40	34.36	36.52	35.88	32.53	0.00	0.13
20.30	32.00	34.28	36.48	35.80	32.44	0.00	0.44
20.35	31.90	34.16	36.40	35.70	32.33	0.00	0.43
20.40	31.30	34.21	36.36	35.62	32.19	0.00	0.89
20.45	30.50	34.09	36.27	35.48	32.04	0.00	1.54
20.50	30.00	34.00	36.09	35.28	31.86	0.00	1.86
20.55	29.80	33.93	36.13	35.24	31.62	0.00	1.82
21.00	29.60	33.87	35.98	35.06	31.40	0.00	1.80
21.05	29.30	33.69	35.83	34.87	31.16	0.00	1.86
21.10	29.10	33.60	35.72	34.71	30.92	0.00	1.82
21.15	29.00	33.57	35.65	34.59	30.68	0.00	1.68
21.20		32.43	35.60	34.62	30.45	0.00	
21.25		32.18	35.48	34.42	30.29	0.00	
21.30		32.06	35.30	34.23	30.09	0.00	
21.35		31.98	35.22	34.17	29.91	0.00	
21.40		31.89	35.12	34.00	29.76	0.00	
21.45		31.78	34.99	33.90	29.64	0.00	
21.50		31.71	34.90	33.80	29.50	0.00	
21.55		31.62	34.78	33.67	29.39	0.00	
22.00		31.58	34.69	33.56	29.27	0.00	
22.05		31.54	34.62	33.45	29.17	0.00	
22.10		31.44	34.48	33.33	29.04	0.00	
22.15		31.41	34.45	33.28	28.97	0.00	
22.20		31.37	34.33	33.18	28.87	0.00	
22.25		31.30	34.25	33.12	28.76	0.00	

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)
22.30		31.19	34.18	33.03	28.66	0.00
22.35		31.14	34.05	32.88	28.60	0.00
22.40		31.02	34.01	32.83	28.54	0.00
22.45		31.02	33.88	32.70	28.46	0.00
22.50		31.00	33.82	32.65	28.40	0.00
22.55		30.94	33.76	32.59	28.35	0.00
23.00		30.84	33.64	32.48	28.30	0.00
23.05		30.76	33.58	32.41	28.24	0.00
23.10		30.70	33.47	32.28	28.20	0.00
23.15		30.58	33.42	32.23	28.15	0.00
23.20		30.61	33.43	32.24	28.09	0.00
23.25		30.46	33.28	32.09	28.01	0.00
23.30		30.32	33.21	32.01	27.91	0.00
23.35		30.23	33.15	31.93	27.82	0.00
23.40		30.19	33.05	31.84	27.32	0.00
23.45		30.14	33.05	31.83	27.45	0.00
23.50		30.13	32.96	31.78	27.45	0.00
23.55		30.07	32.88	31.63	27.35	0.00
0.00		29.98	32.76	31.51	27.26	0.00
0.05		29.98	32.72	31.47	27.20	0.00
0.10		29.85	32.63	31.38	27.14	0.00
0.15		29.77	32.54	31.30	27.08	0.00
0.20		29.75	32.45	31.23	27.05	0.00
0.25		29.65	32.38	31.14	27.02	0.00
0.30		29.66	32.27	31.10	26.98	0.00
0.35		29.59	32.23	31.03	26.96	0.00
0.40		29.55	32.18	30.98	26.96	0.00
0.45		29.45	32.06	30.90	26.94	0.00
0.50		29.49	32.05	30.86	26.91	0.00
0.55		29.40	31.94	30.73	26.88	0.00
1.00		29.35	31.87	30.70	26.88	0.00
1.05		29.26	31.81	30.68	26.88	0.00
1.10		29.17	31.75	30.65	26.85	0.00

TR-TA

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)
1.15		29.21	31.76	30.67	26.86	0.00
1.20		29.21	31.67	30.60	26.85	0.00
1.25		29.19	31.67	30.58	26.83	0.00
1.30		29.16	31.59	30.52	26.80	0.00
1.35		29.12	31.57	30.50	26.80	0.00
1.40		29.10	31.49	30.41	26.78	0.00
1.45		29.00	31.47	30.43	26.74	0.00
1.50		28.98	31.43	30.36	26.75	0.00
1.55		28.98	31.38	30.32	26.75	0.00
2.00		28.95	31.29	30.29	26.72	0.00
2.05		28.88	31.25	30.28	26.72	0.00
2.10		28.80	31.19	30.18	26.72	0.00
2.15		28.78	31.12	30.13	26.72	0.00
2.20		28.84	31.10	30.11	26.72	0.00
2.25		28.77	31.06	30.08	26.71	0.00
2.30		28.72	31.08	30.09	26.69	0.00
2.35		28.70	30.99	30.04	26.70	0.00
2.40		28.71	30.94	30.01	26.66	0.00
2.45		28.64	30.90	29.97	26.69	0.00
2.50		28.60	30.85	29.93	26.69	0.00
2.55		28.59	30.89	29.98	26.66	0.00
3.00		28.55	30.80	29.89	26.66	0.00
3.05		28.51	30.75	29.84	26.66	0.00
3.10		28.48	30.68	29.77	26.65	0.00
3.15		28.38	30.69	29.80	26.63	0.00
3.20		28.40	30.65	29.74	26.61	0.00
3.25		28.34	30.64	29.76	26.60	0.00
3.30		28.34	30.61	29.75	26.60	0.00
3.35		28.34	30.55	29.70	26.55	0.00
3.40		28.27	30.52	29.65	26.53	0.00
3.45		28.23	30.45	29.60	26.54	0.00
3.50		28.19	30.46	29.61	26.49	0.00
3.55		28.16	30.35	29.53	26.47	0.00

TR-TA

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
4.00		28.15	30.41	29.56	26.46	0.00	
4.05		28.15	30.39	29.53	26.44	0.00	
4.10		28.12	30.33	29.50	26.40	0.00	
4.15		28.11	30.30	29.46	26.41	0.00	
4.20		28.04	30.27	29.43	26.39	0.00	
4.25		28.00	30.21	29.37	26.38	0.00	
4.30		28.01	30.18	29.34	26.34	0.00	
4.35		27.94	30.12	29.27	26.34	0.00	
4.40		27.91	30.11	29.28	26.31	0.00	
4.45		27.91	30.01	29.18	26.31	0.00	
4.50		27.90	30.01	29.22	26.27	0.00	
4.55		27.93	30.04	29.21	26.26	0.00	
5.00		27.84	30.00	29.21	26.24	0.00	
5.05		27.80	29.95	29.15	26.24	0.00	
5.10		27.81	29.95	29.17	26.22	0.00	
5.15		27.79	29.89	29.13	26.21	0.00	
5.20		27.76	29.87	29.11	26.20	0.00	
5.25		27.73	29.82	29.05	26.18	0.00	
5.30		27.68	29.82	29.05	26.18	0.00	
5.35		27.63	29.74	29.01	26.16	0.00	
5.40		27.62	29.75	28.98	26.16	0.00	
5.45		27.54	29.68	28.93	26.13	0.00	
5.50		27.53	29.69	28.97	26.13	0.00	
5.55		27.50	29.68	28.97	26.11	0.00	
6.00		27.45	29.66	28.91	26.10	0.00	

ข้อมูลชุดการทดลองผิวดอกนกรีดปลูกพืชพร้อมติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศ



Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
6:00	26.50	28.66	28.63	28.24	27.31	2.30	0.81
6:05	26.70	28.72	28.64	28.26	27.32	6.25	0.62
6:10	26.80	28.77	28.63	28.31	27.31	9.53	0.51
6:15	27.00	28.82	28.66	28.33	27.36	17.29	0.36
6:20	26.90	28.71	28.65	28.32	27.40	25.05	0.50
6:25	27.20	28.81	28.65	28.34	27.45	40.24	0.25
6:30	27.70	28.91	28.67	28.38	27.54	49.57	-0.16
6:35	26.80	28.98	28.76	28.54	27.67	60.62	0.87
6:40	25.20	29.16	28.76	28.58	27.85	98.36	2.65
6:45	25.20	29.11	28.77	28.60	27.99	131.69	2.79
6:50	26.60	29.13	28.85	28.68	28.09	120.18	1.49
6:55	27.90	29.17	28.85	28.78	28.25	134.19	0.35
7:00	27.60	29.28	29.00	28.96	28.46	121.24	0.86
7:05	28.50	29.82	29.10	29.11	28.60	153.58	0.10
7:10	30.80	29.04	29.21	29.20	28.75	204.93	-2.05
7:15	30.40	29.51	29.45	29.53	29.13	182.05	-1.27
7:20	30.60	30.64	29.78	29.98	29.68	189.22	-0.92
7:25	29.80	29.27	30.05	30.33	30.15	326.23	0.35
7:30	30.70	29.42	30.23	30.57	30.38	322.62	-0.32
7:35	30.60	29.44	30.40	30.76	30.72	350.62	0.12
7:40	30.10	29.66	30.57	30.94	30.90	345.10	0.80
7:45	29.30	29.74	30.65	31.03	31.05	233.20	1.75
7:50	29.50	29.72	30.71	31.11	31.06	297.90	1.56
7:55	29.50	30.02	30.83	31.23	31.17	290.66	1.67
8:00	30.70	31.48	30.92	31.36	31.26	213.48	0.56
8:05	30.00	29.95	31.15	31.58	31.54	358.32	1.54
8:10	30.10	29.83	31.16	31.61	31.77	380.08	1.67
8:15	30.10	29.78	31.25	31.75	31.84	355.88	1.74
8:20	32.10	29.83	31.44	31.96	32.01	304.08	-0.09
8:25	31.60	29.95	31.58	32.18	32.36	288.30	0.76
8:30	31.40	30.23	31.77	32.44	32.77	427.09	1.37
8:35	33.10	30.35	32.04	32.73	33.17	461.08	0.07
8:40	32.40	30.78	32.26	33.06	33.68	483.76	1.28

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
8.45	31.90	31.13	32.45	33.35	33.95	548.32	2.05
8.50	32.60	31.33	32.71	33.68	34.28	575.67	1.68
8.55	31.60	31.48	32.31	33.33	34.63	603.29	3.03
9.00	28.40	32.10	32.77	33.75	34.79	616.11	6.39
9.05	29.10	32.90	33.05	33.98	34.99	633.73	5.89
9.10	34.50	33.45	33.24	34.19	35.01	626.96	0.51
9.15	33.20	34.10	33.49	34.48	35.32	354.24	2.12
9.20	32.60	31.10	33.69	34.74	35.58	602.83	2.98
9.25	33.20	31.23	33.87	34.95	35.81	695.46	2.61
9.30	33.90	31.33	34.04	35.12	36.08	718.21	2.18
9.35	33.90	31.50	34.24	35.36	36.37	752.79	2.47
9.40	34.20	31.57	34.37	35.50	36.64	851.15	2.44
9.45	34.20	31.73	34.51	35.66	36.79	944.44	2.59
9.50	34.30	31.80	34.65	35.78	36.79	789.94	2.49
9.55	37.30	31.90	34.89	36.09	37.01	648.92	-0.29
10.00	35.20	31.97	35.02	36.17	37.01	505.59	1.81
10.05	35.00	32.10	35.05	36.22	37.15	415.52	2.15
10.10	37.00	32.13	35.15	36.31	37.27	928.14	0.27
10.15	36.50	32.30	35.32	36.45	37.36	867.39	0.86
10.20	35.30	32.37	35.31	36.43	37.46	864.43	2.16
10.25	36.70	32.47	35.42	36.62	37.52	877.58	0.82
10.30	36.50	32.53	35.53	36.65	37.59	867.39	1.09
10.35	35.70	32.80	35.55	36.70	37.63	905.98	1.93
10.40	36.50	32.87	35.60	36.74	37.70	892.04	1.20
10.45	35.70	33.00	35.74	36.86	37.79	931.76	2.09
10.50	35.70	33.23	35.83	36.93	37.83	950.10	2.13
10.55	36.20	33.30	35.84	36.98	37.86	947.27	1.66
11.00	34.50	33.33	35.85	36.94	37.77	970.94	3.27
11.05	37.20	33.30	35.99	37.00	37.74	908.48	0.54
11.10	38.20	33.40	36.05	37.09	37.73	893.29	-0.47
11.15	36.80	33.53	36.13	37.18	37.84	774.42	1.04
11.20	38.90	33.77	36.19	37.25	37.93	944.64	-0.97
11.25	38.80	33.93	36.34	37.41	38.03	906.05	-0.77

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
11.30	36.40	34.07	36.48	37.48	38.18	1018.54	1.78
11.35	34.90	34.23	36.57	37.54	38.22	1128.47	3.32
11.40	35.20	34.27	36.63	37.55	38.19	1068.90	2.99
11.45	35.60	34.27	36.58	37.53	38.02	880.54	2.42
11.50	38.20	34.27	36.58	37.48	37.97	827.22	-0.23
11.55	37.90	34.20	36.62	37.48	37.96	268.57	0.06
12.00	36.40	34.63	36.65	37.45	37.94	951.74	1.54
12.05	34.90	34.93	36.61	37.37	37.66	928.73	2.76
12.10	33.40	35.20	36.62	37.28	37.61	950.89	4.21
12.15	35.60	35.27	36.64	37.28	37.53	927.15	1.93
12.20	36.30	35.27	36.84	37.47	37.37	771.20	1.07
12.25	35.70	35.10	36.89	37.52	37.41	891.65	1.71
12.30	33.90	35.10	36.89	37.54	37.48	766.01	3.58
12.35	36.70	35.10	36.96	37.63	37.49	1050.23	0.79
12.40	36.80	35.23	37.15	37.82	37.68	1007.43	0.88
12.45	36.40	35.30	37.28	37.97	37.89	1099.87	1.49
12.50	36.50	35.47	37.45	38.14	38.07	1075.15	1.57
12.55	35.50	35.60	37.62	38.31	38.33	1116.90	2.83
13.00	36.00	35.73	37.73	38.53	38.53	1034.98	2.53
13.05	35.40	35.73	37.93	38.68	38.65	1068.44	3.25
13.10	36.80	35.80	38.04	38.75	38.80	1044.51	2.00
13.15	38.00	35.83	38.06	38.78	38.84	989.55	0.84
13.20	39.00	36.03	38.20	38.92	38.92	1007.17	-0.08
13.25	36.70	36.07	38.39	39.08	39.04	929.39	2.34
13.30	36.00	36.30	38.54	39.29	39.34	949.31	3.34
13.35	36.60	36.43	38.72	39.54	39.53	966.67	2.93
13.40	38.00	36.50	38.86	39.64	39.72	963.25	1.72
13.45	35.90	36.67	39.05	39.88	39.97	955.10	4.07
13.50	37.40	36.77	39.26	40.11	40.21	933.00	2.81
13.55	38.10	36.87	39.48	40.32	40.34	902.24	2.24
14.00	37.80	36.93	39.64	40.51	40.58	928.34	2.78
14.05	38.10	37.13	39.85	40.75	40.89	865.75	2.79
14.10	37.70	37.23	40.07	41.00	41.08	902.96	3.38

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
14.15	38.30	37.37	40.25	41.18	41.33	929.65	3.03
14.20	38.80	37.50	40.43	41.40	41.56	971.66	2.76
14.25	38.30	37.63	40.65	41.60	41.77	930.97	3.47
14.30	37.90	37.70	40.80	41.78	42.09	949.05	4.19
14.35	38.40	37.87	41.01	42.01	42.25	906.90	3.85
14.40	37.60	38.00	41.15	42.17	42.49	910.45	4.89
14.45	36.00	38.20	41.37	42.41	42.69	881.13	6.69
14.50	37.50	38.20	41.53	42.48	42.90	864.76	5.40
14.55	37.70	38.30	41.70	42.73	43.09	840.30	5.39
15.00	36.20	38.43	41.79	42.78	43.28	820.71	7.08
15.05	35.00	38.50	42.02	43.04	43.42	773.31	8.42
15.10	36.40	38.63	42.18	43.21	43.55	778.37	7.15
15.15	37.80	38.60	42.25	43.26	43.61	773.04	5.81
15.20	37.70	38.47	42.33	43.31	43.53	747.93	5.83
15.25	38.10	35.95	42.48	43.51	43.75	753.06	5.65
15.30	38.80	35.95	42.65	43.68	44.00	711.77	5.20
15.35	37.90	36.15	42.82	43.89	44.24	715.98	6.34
15.40	36.70	36.20	43.04	44.08	44.44	739.12	7.74
15.45	37.20	36.25	43.12	44.15	44.70	725.31	7.50
15.50	36.30	36.65	43.32	44.39	44.56	732.61	8.26
15.55	38.80	37.55	43.25	44.37	44.86	717.29	6.06
16.00	34.40	37.55	43.31	44.30	45.07	667.06	10.67
16.05	34.50	36.35	42.80	43.69	44.38	687.71	9.88
16.10	34.10	35.35	42.44	43.20	43.65	681.33	9.55
16.15	33.90	35.10	42.12	42.78	43.03	234.91	9.13
16.20	34.10	36.25	42.24	42.96	42.99	200.46	8.89
16.25	34.70	37.35	42.41	43.14	43.34	154.70	8.64
16.30	35.70	37.85	42.63	43.44	43.70	272.72	8.00
16.35	35.10	37.75	42.82	43.66	43.99	535.37	8.89
16.40	34.80	37.00	42.78	43.54	44.15	541.55	9.35
16.45	34.50	35.70	42.40	43.11	43.49	529.13	8.99
16.50	33.60	35.45	42.27	42.92	42.94	495.33	9.34
16.55	33.20	35.00	41.78	42.28	42.73	198.75	9.53

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
17.00	33.10	34.70	41.35	41.76	42.02	210.78	8.92
17.05	32.10	34.40	40.95	41.26	41.32	403.16	9.22
17.10	31.80	34.30	40.47	40.64	40.67	116.90	8.87
17.15	31.90	34.30	40.10	40.23	40.12	35.90	8.22
17.20	31.80	34.50	39.81	39.87	39.60	24.00	7.80
17.25	31.80	34.55	39.45	39.43	39.12	20.78	7.32
17.30	31.80	36.50	39.13	39.02	38.67	17.03	6.87
17.35	31.60	36.47	38.85	38.70	38.26	11.57	6.66
17.40	31.20	36.37	38.55	38.36	37.86	9.80	6.66
17.45	30.90	36.43	38.30	38.04	37.51	9.60	6.61
17.50	30.30	38.13	38.10	37.81	37.16	2.17	6.86
17.55	30.30	37.85	37.82	37.51	36.78	2.56	6.48
18.00	28.40	37.68	37.51	37.11	36.48	0.00	8.08
18.05	27.50	38.28	37.29	36.88	36.16	0.00	8.66
18.10	29.00	36.40	37.07	36.65	35.78	0.00	6.78
18.15	29.20	36.37	36.84	36.38	35.49	0.00	6.29
18.20	28.50	36.20	36.65	36.15	35.23	0.00	6.72
18.25	28.20	36.03	36.46	35.89	34.96	0.00	6.76
18.30	27.50	35.93	36.21	35.63	34.70	0.00	7.20
18.35	27.20	35.93	36.00	35.40	34.41	0.00	7.21
18.40	27.00	35.83	35.77	35.13	34.13	0.00	7.13
18.45	27.20	35.77	35.55	34.90	33.86	0.00	6.66
18.50	27.50	35.70	35.38	34.68	33.60	0.00	6.10
18.55	27.60	35.57	35.15	34.45	33.36	0.00	5.76
19.00	27.80	35.47	34.97	34.28	33.18	0.00	5.38
19.05	27.20	35.30	34.84	34.11	33.01	0.00	5.81
19.10	27.20	35.20	34.67	33.98	32.86	0.00	5.66
19.15	27.30	35.23	34.60	33.91	32.75	0.00	5.45
19.20	27.50	35.07	34.50	33.75	32.64	0.00	5.14
19.25	27.60	35.07	34.35	33.62	32.51	0.00	4.91
19.30	27.50	34.97	34.30	33.58	32.42	0.00	4.92
19.35	27.70	34.87	34.14	33.43	32.34	0.00	4.64
19.40	26.90	34.87	34.08	33.42	32.27	0.00	5.37

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
19.45	26.40	34.87	34.00	33.28	32.19	0.00	5.79
19.50	26.60	34.83	33.86	33.18	32.10	0.00	5.50
19.55	26.70	34.67	33.74	33.05	32.00	0.00	5.30
20.00	26.40	34.63	33.70	32.98	31.87	0.00	5.47
20.05	26.50	34.50	33.56	32.88	31.78	0.00	5.28
20.10	26.50	34.43	33.46	32.78	31.72	0.00	5.22
20.15	26.50	34.47	33.42	32.70	31.62	0.00	5.12
20.20	26.40	34.37	33.36	32.66	31.55	0.00	5.15
20.25	26.30	34.37	33.29	32.61	31.49	0.00	5.19
20.30	26.50	34.33	33.23	32.52	31.46	0.00	4.96
20.35	26.50	34.20	33.09	32.41	31.41	0.00	4.91
20.40	27.00	34.17	33.08	32.37	31.35	0.00	4.35
20.45	26.70	34.20	33.11	32.41	31.34	0.00	4.64
20.50	26.60	34.10	32.94	32.28	31.30	0.00	4.70
20.55	26.90	34.03	32.93	32.28	31.27	0.00	4.37
21.00	26.70	33.90	32.95	32.29	31.22	0.00	4.52
21.05	26.50	33.83	32.90	32.25	31.19	0.00	4.69
21.10	26.70	33.73	32.86	32.20	31.14	0.00	4.44
21.15	26.70	33.67	32.82	32.18	31.10	0.00	4.40
21.20	26.60	33.67	32.79	32.13	31.03	0.00	4.43
21.25	26.60	33.63	32.69	32.06	31.01	0.00	4.41
21.30	26.50	33.50	32.65	32.03	30.96	0.00	4.46
21.35	26.40	33.47	32.63	32.00	30.95	0.00	4.55
21.40	26.40	33.47	32.59	31.96	30.90	0.00	4.50
21.45	26.40	33.43	32.52	31.88	30.88	0.00	4.48
21.50	26.70	33.43	32.46	31.83	30.88	0.00	4.18
21.55	26.40	33.40	32.45	31.83	30.85	0.00	4.45
22.00	26.30	35.88	32.37	31.78	30.83	0.00	4.53
22.05	26.50	35.18	32.27	31.69	30.79	0.00	4.29
22.10	26.70	34.50	32.34	31.73	30.73	0.00	4.03
22.15	27.00	33.98	32.28	31.69	30.70	0.00	3.70
22.20	27.00	33.53	32.23	31.66	30.66	0.00	3.66
22.25	26.90	33.35	32.22	31.62	30.63	0.00	3.73

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
22.30	26.80	33.15	32.15	31.53	30.58	0.00	3.78
22.35	26.70	33.03	32.13	31.52	30.52	0.00	3.82
22.40	26.70	32.95	32.03	31.41	30.49	0.00	3.79
22.45	26.50	32.95	32.05	31.45	30.42	0.00	3.92
22.50	26.70	32.78	31.96	31.37	30.40	0.00	3.70
22.55	26.40	32.75	31.95	31.33	30.36	0.00	3.96
23.00	26.50	32.63	31.90	31.33	30.33	0.00	3.83
23.05	26.80	32.65	31.84	31.25	30.27	0.00	3.47
23.10	26.90	32.65	31.83	31.23	30.23	0.00	3.33
23.15	27.00	32.50	31.76	31.18	30.18	0.00	3.18
23.20	26.90	32.45	31.69	31.12	30.14	0.00	3.24
23.25	27.00	32.35	31.64	31.02	30.08	0.00	3.08
23.30	26.90	32.33	31.61	31.02	30.04	0.00	3.14
23.35	27.10	32.33	31.57	30.96	29.99	0.00	2.89
23.40	27.20	31.12	31.51	30.92	29.93	0.00	2.73
23.45	26.80	30.45	31.47	30.89	29.90	0.00	3.10
23.50	26.70	30.53	31.40	30.79	29.86	0.00	3.16
23.55	26.50	30.73	31.38	30.81	29.80	0.00	3.30
0.00	27.10	31.08	31.35	30.75	29.80	0.00	2.70
0.05	27.10	31.30	31.25	30.69	29.75	0.00	2.65
0.10	27.00	31.43	31.16	30.59	29.73	0.00	2.73
0.15	26.90	31.65	31.09	30.52	29.69	0.00	2.79
0.20	26.50	32.80	31.01	30.45	29.66	0.00	3.16
0.25	26.70	32.61	30.95	30.35	29.60	0.00	2.90
0.30	26.80	32.56	30.93	30.37	29.60	0.00	2.80
0.35	26.70	31.90	30.91	30.37	29.55	0.00	2.85
0.40	26.50	31.92	30.84	30.27	29.55	0.00	3.05
0.45	26.30	31.88	30.83	30.23	29.48	0.00	3.18
0.50	26.40	31.90	30.74	30.18	29.46	0.00	3.06
0.55	26.00	31.93	30.71	30.16	29.41	0.00	3.41
1.00	26.20	31.90	30.60	30.16	29.36	0.00	3.16
1.05	26.40	31.90	30.59	30.05	29.33	0.00	2.93
1.10	26.20	31.87	30.62	30.07	29.29	0.00	3.09

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
1.15	26.20	31.82	30.57	30.00	29.28	0.00	3.08
1.20	26.30	31.82	30.55	30.00	29.24	0.00	2.94
1.25	26.20	31.77	30.49	29.93	29.21	0.00	3.01
1.30	26.30	31.75	30.43	29.88	29.13	0.00	2.83
1.35	26.40	31.65	30.45	29.88	29.13	0.00	2.73
1.40	26.20	31.60	30.35	29.79	29.10	0.00	2.90
1.45	26.50	31.58	30.31	29.82	29.07	0.00	2.57
1.50	25.80	31.52	30.33	29.79	29.06	0.00	3.26
1.55	26.00	31.50	30.26	29.75	29.02	0.00	3.02
2.00	26.10	31.40	30.21	29.68	29.01	0.00	2.91
2.05	26.10	31.40	30.25	29.73	28.98	0.00	2.88
2.10	26.20	31.33	30.19	29.68	28.96	0.00	2.76
2.15	26.20	31.33	30.15	29.67	28.89	0.00	2.69
2.20	26.10	31.30	30.15	29.60	28.87	0.00	2.77
2.25	26.10	31.27	30.11	29.56	28.81	0.00	2.71
2.30	26.20	31.17	30.08	29.55	28.80	0.00	2.60
2.35	26.30	31.15	30.04	29.50	28.77	0.00	2.47
2.40	26.10	31.10	29.95	29.42	28.74	0.00	2.64
2.45	26.20	31.10	30.02	29.44	28.73	0.00	2.53
2.50	26.10	31.02	29.94	29.40	28.73	0.00	2.63
2.55	25.90	31.29	29.90	29.37	28.68	0.00	2.78
3.00	25.90	31.21	29.81	29.33	28.76	0.00	2.86
3.05	26.00	31.16	29.77	29.28	28.68	0.00	2.68
3.10	26.00	31.16	29.70	29.22	28.65	0.00	2.65
3.15	26.10	31.13	29.73	29.21	28.62	0.00	2.52
3.20	25.90	31.11	29.66	29.21	28.61	0.00	2.71
3.25	25.90	31.03	29.60	29.12	28.58	0.00	2.68
3.30	26.10	31.06	29.63	29.16	28.58	0.00	2.48
3.35	26.00	31.10	29.62	29.14	28.56	0.00	2.56
3.40	26.10	31.03	29.62	29.13	28.54	0.00	2.44
3.45	26.10	30.93	29.56	29.09	28.50	0.00	2.40
3.50	26.40	30.93	29.57	29.10	28.50	0.00	2.10
3.55	26.40	30.91	29.54	29.09	28.48	0.00	2.08

Time	Ambient temperature (°C)	Surface temperature of roof (°C)	Inner surface temperature of roof (°C)	Air temperature of ceiling space (°C)	Air temperature of room space (°C)	Solar radiation (W/m ²)	TR-TA
4.00	26.10	30.86	29.53	29.08	28.48	0.00	2.38
4.05	26.10	30.84	29.45	29.01	28.47	0.00	2.37
4.10	26.10	30.84	29.46	29.04	28.44	0.00	2.34
4.15	25.90	30.84	29.46	29.03	28.41	0.00	2.51
4.20	26.00	30.80	29.45	28.99	28.42	0.00	2.42
4.25	25.90	30.71	29.40	28.97	28.39	0.00	2.49
4.30	26.00	30.67	29.35	28.90	28.37	0.00	2.37
4.35	26.00	30.64	29.36	28.93	28.37	0.00	2.37
4.40	25.90	30.56	29.33	28.92	28.35	0.00	2.45
4.45	26.20	30.61	29.35	28.91	28.34	0.00	2.14
4.50	25.90	30.60	29.31	28.87	28.32	0.00	2.42
4.55	25.90	30.51	29.31	28.84	28.31	0.00	2.41
5.00	25.80	30.49	29.27	28.85	28.29	0.00	2.49
5.05	26.00	30.46	29.25	28.81	28.27	0.00	2.27
5.10	26.20	30.36	29.21	28.80	28.26	0.00	2.06
5.15	26.50	30.30	29.22	28.83	28.24	0.00	1.74
5.20	26.00	30.30	29.17	28.77	28.22	0.00	2.22
5.25	25.90	30.23	29.11	28.72	28.19	0.00	2.29
5.30	25.70	30.27	29.12	28.72	28.20	0.00	2.50
5.35	26.00	30.24	29.11	28.69	28.19	0.00	2.19
5.40	26.10	30.23	29.04	28.62	28.17	0.00	2.07
5.45	26.10	30.33	29.05	28.63	28.14	0.00	2.04
5.50	26.10	30.36	29.04	28.66	28.14	0.00	2.04
5.55	25.90	30.29	29.01	28.63	28.13	0.00	2.23
6.00	25.80	30.37	29.05	28.67	28.14	0.00	2.34

TG

TC

TD

0.05





ที่ ศธ 0519.10.18/พิเศษ16/2560

สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
114 สุขุมวิท 23 เขตวัฒนา กรุงเทพฯ

วันที่ 17 มีนาคม 2560

เรื่อง ผลการพิจารณาบทความวิชาการ

เรียน คุณ สิทธิพงษ์ เจริญพิทักษ์

วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา ถูกจัดอยู่ในฐานข้อมูลTCI กลุ่ม 1 จะทำการตีพิมพ์วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2561 ในการนี้กองบรรณาธิการวารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา ได้พิจารณาบทความ เรื่อง การศึกษาเชิงตัวเลขของระบบหมุนเวียนอากาศได้สวมหลังคาเพื่อการปรับอากาศด้วยวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ผู้เขียนบทความ สิทธิพงษ์ เจริญพิทักษ์ ขวัญชัย ไกรทอง และ ฉัฐพงศ์ เขียวน้อย

ผลการพิจารณาเป็นดังนี้

- รับไว้พิจารณา และนำเสนอต่อกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิต่อไป
- ผลการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิให้ผ่าน และได้ปรับปรุงแก้ไขตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ตามเกณฑ์มาตรฐาน TCI และมีมติให้ตีพิมพ์ได้ในวารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2561 หน้า 1 - 12
- ผลการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิให้ ไม่ผ่าน

จึงเรียนมาเพื่อ โปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(อาจารย์ ดร. โพรช์ วงศ์ยุทธไกร)

บรรณาธิการวารสารวิชาการสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

การศึกษาเชิงตัวเลขของระบบหมุนเวียนอากาศใต้สวนหลังคาเพื่อการปรับอากาศด้วย
วิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

NUMERICAL INVESTIGATION OF AN AIR CIRCULATION SYSTEM FOR AIR
CONDITIONING USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

สิทธิพงษ์ เพิ่มพิทักษ์^{1*}, ขวัญชัย ไกรทอง², ณัฐพงษ์ เขียวน้อย²
Sittipong Permpituck^{1*}, Kwanchai Kraitong², Nuttapong Khiaonoi²

¹ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹Department of Architecture, Faculty of Architecture, Naresuan University, Thailand.

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Thailand.

*Corresponding author, E-mail: sittipong107@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากสวนหลังคาแบบแผ่นเรียบเพื่อปรับอุณหภูมิอากาศภายในห้อง โดยใช้ระบบหมุนเวียนอากาศผ่านผิวเย็นด้านล่างของหลังคาที่ช่องว่างเหนือฝ้าเพดาน ที่ซึ่งการวิเคราะห์การไหลเวียนถูกทำด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยเป็นการวิเคราะห์ลักษณะการหมุนเวียนของอากาศในรูปแบบที่กำหนดขึ้นที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการกระจายอุณหภูมิภายในห้อง จากการศึกษาวิเคราะห์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าระบบหมุนเวียนอากาศที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถรักษาอุณหภูมิอากาศภายในห้องให้มีค่าน้อยกว่า 30 °C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกอยู่ที่ 37 °C โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในกับภายนอกสูงสุดเท่ากับ 8 °C

คำสำคัญ: สวนหลังคา พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ระบบหมุนเวียนอากาศ การปรับอากาศ

Abstract

This research aims to numerically study for utilization of the green roof on flat roof construction in order to regulate the air temperature in a room using an air circulation system through a cold lower surface of the flat roof located at a space above a ceiling. The numerical analysis was done using the method of Computational Fluid Dynamics, CFD, to investigate the effect of the designed air circulation pattern on the heat transfer and the temperature distribution in the room. For the numerical results, it was found that the designed air circulation system could keep the room temperature being less than 30 °C while the ambient temperature of 37 °C at the maximum difference of temperature between the inside and outside temperatures being 8 °C.

Keyword: Green roof, Computational Fluid Dynamics, Air circulation system, Air conditioning

สัญลักษณ์

F_f	=	องค์ประกอบของแรง	[N]
k	=	พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวล	$[m^2/s^2]$
P	=	ความดันเฉลี่ย	[Pa]
u	=	สัดส่วนความเร็ว	[N]
T	=	อุณหภูมิ	[K]
U, U_f	=	องค์ประกอบของความเร็ว	[m/s]
x, x_f	=	พิกัดในแนวแกน	[=]
ε	=	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์	$[m^2/s^3]$
ρ	=	ความหนาแน่น	$[kg/m^3]$
τ	=	ความเค้นเฉือน	$[N/m^2]$
μ	=	ความหนืด	[Pa.s]
μ_t	=	ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน	[Pa.s]
ω	=	อัตราการสูญเสียพลังงานจลน์จำเพาะ	$[s^{-1}]$

บทนำ

ในปัจจุบันอุณหภูมิอากาศภายนอกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปี ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศเพิ่มสูงขึ้น การใช้การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติ (Passive cooling) ถูกประยุกต์ใช้ในการปรับสภาวะอากาศร่วมกับระบบปรับอากาศในอาคารเพื่อลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน หลักการของการใช้การทำความเย็นโดยวิธีธรรมชาติทำได้โดยการปรับสภาวะของสิ่งแวดล้อมบริเวณรอบอาคารให้มีความเหมาะสม อาจทำได้โดยการเพิ่มร่มเงาบริเวณรอบอาคาร หรือออกแบบช่องลมเพื่อเพิ่มการหมุนเวียนของลมในอาคาร จากการศึกษางานวิจัยพบว่าการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและระบบระบายอากาศคิดเป็น 60% ของการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารทั้งหมด [1-2] โดยที่หลังคาของอาคารมีภาระความร้อนจากการแผ่รังสี และการนำความร้อนมากกว่าเปลือกอาคาร เนื่องจากบริเวณหลังคาจะรับความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนพบว่า บริเวณหลังคามีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนคิดเป็นสามเท่าของพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเปลือกอาคารทั้งสี่ด้าน ดังนั้นการลดภาระความร้อนที่ผ่านเข้ามาจากทางด้านหลังคาของอาคารจะสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำความเย็นได้เป็นอย่างมาก

การติดตั้งฉนวนความร้อนเหนือฝ้าเพดานเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการป้องกันความร้อนจากหลังคาเข้าสู่อาคาร เนื่องจากฉนวนกันความร้อนมีค่าความหน่วงความร้อน (Thermal lag) ต่ำ ส่งผลให้เกิดความผันผวนของอุณหภูมิในระหว่างวัน การเพิ่มค่าความหน่วงความร้อนให้กับฉนวนกันความร้อนเพื่อให้สามารถเก็บกักความร้อนได้ตลอดทั้งวัน สามารถทำได้โดยการเพิ่มชั้นความหนาของฉนวน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ราคาในการติดตั้งสูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงแนะนำให้ใช้สวนหลังคา (Green roof) ร่วมกับการใช้ฉนวนกันความร้อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคาร [3] เนื่องจากสวนหลังคาทำให้เกิดการเพิ่มการสะท้อนของรังสีความร้อนออกจากบริเวณหลังคา ทั้งนี้สวนหลังคายังมีประโยชน์ในการจัดการน้ำ เนื่องจากพื้นที่ในเมืองถูกปกคลุมไปด้วยอาคารน้ำซึมผ่านได้เพียง 5% ของปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา ซึ่งมักจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดน้ำท่วม

ในเวลาที่ไม่ฝนตกหนักเนื่องจากน้ำไม่สามารถระบายลงสู่ผิวดินได้ทัน ส่วนหลังคาช่วยจัดการน้ำฝนเพราะพืชที่ปกคลุมผิวดิน อยู่จะช่วยดูดซับน้ำไว้ได้มากกว่าหลังคาปกติ นอกจากนี้สวนหลังคายังช่วยเพิ่มร่มเงาให้กับเปลือกอาคารและปรับภูมิทัศน์ให้กับอาคารได้อีกด้วย [4-5]

สวนหลังคาใช้หลักการถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative cooling) และหลักการการถ่ายเทความร้อนด้วยความร้อนแฝง (Latent heat) จากหลังคาของอาคารสู่สิ่งแวดล้อม โดยประเภทของสวนหลังคาแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ สวนหลังคาแบบใช้สอย (Intensive green roof) ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 1,500-3,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร และสวนหลังคาแบบไม่ใช้สอย (Extensive green roof) ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 100-1,000 กิโลกรัม/ตารางเมตร ซึ่งสวนหลังคาประเภทนี้ต้องการการดูแลรักษาน้อยกว่าแบบแรก เนื่องจากใช้พืชพรรณขนาดเล็ก เช่น หญ้าหรือพืชคลุมดิน [5] อย่างไรก็ตามในการติดตั้งสวนหลังคาจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของพื้นหลังคา และรวมถึงวัสดุกันน้ำซึม ซึ่งเพื่อไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับหลังคา

ด้วยประโยชน์ของสวนหลังคาซึ่งสามารถลดภาวะความร้อนที่เข้าสู่อาคารที่นำไปสู่การลดพลังงานไฟฟ้าในอาคาร จึงพบงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของสวนหลังคาในการป้องกันภาวะความร้อนโดยใช้การสร้างแบบจำลองของสวนหลังคา และเก็บข้อมูลจากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาปัจจัยในการลดภาวะความร้อน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาใช้ร่วมกับแบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics model) แบบหนึ่งมิติเพื่อใช้ในการทำนายค่าการส่งถ่ายความร้อนซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์การใช้พลังงาน จากการทดลองการสร้างแบบจำลองสวนหลังคาขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 6 เมตร และสูง 3 เมตร ของ Permpituck and Namprakai [6] พบว่าที่ความหนาของชั้นดินเหนือหลังคา 20 เซนติเมตร ให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเพดานเท่ากับ 20 °C และสามารถลดค่าใช้จ่ายไฟฟ้ารายปีได้ประมาณ 37.11% เมื่อเทียบกับหลังคาปกติ โดยการเพิ่มความหนาชั้นดินของสวนหลังคามีผลต่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคาร นอกจากนี้ยังพบงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสวนหลังคา ได้แก่นงานนำเสนอโดย Wong et al. [7] ซึ่งพบว่าความชื้นที่เก็บสะสมในดินมีผลเป็นอย่างมากในการรักษาอุณหภูมิของหลังคาให้ต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศภายนอก ความชื้นในดินจะทำให้เกิดการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร และ Lazzarin et al. [8] ได้ศึกษาสวนหลังคาในสภาวะของดินที่มีความชื้นต่ำในการทดลองนี้ได้ติดตั้งสวนหลังคาไว้บนอาคารที่เพดานเป็นคอนกรีต และมีฉนวนกันความร้อนอยู่ใต้หลังคา ซึ่งพบว่าสวนหลังคาสามารถลดการรับความร้อน (Thermal gain) ได้ถึง 60% เมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพียงอย่างเดียว

การใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์แบบหนึ่งมิติในการทำนายการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของสวนหลังคา ซึ่งส่งผลต่อการลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายไฟฟ้าในอาคารนั้นมีข้อจำกัดเนื่องจากการใช้แบบจำลองทางอุณหพลศาสตร์แบบหนึ่งมิติไม่สามารถบ่งบอกถึงกระจายอุณหภูมิของเปลือกอาคารและการหมุนเวียนของอากาศภายในอาคาร ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถบ่งบอกถึงการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการไหลเวียนของอาคารรวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนของสวนหลังคา

Poptani [9] ได้ทำการใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อช่วยออกแบบสวนหลังคาของอาคารที่มีลักษณะเป็นอาคารเชิงพาณิชย์ในประเทศอินเดีย โดยใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk Simulation CFD ในการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของอาคารที่ติดตั้งสวนหลังคาและอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งสวนหลังคา ในการทดลองเชิงตัวเลขนี้ใช้อาคารขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 4 เมตร และสูง 3 เมตร โดยมีหน้าต่างสองบานอยู่ทางทิศใต้ และมีประตูอยู่ทางทิศเหนือ ความหนาของผนังและเพดานมีค่า 23 เซนติเมตร จากผลการทำนายการกระจายอุณหภูมิพบว่าอาคารที่ติดตั้งสวนหลังคาสามารถลดภาวะความร้อนที่เข้าสู่อาคาร โดยความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศภายนอกและภายในห้องมีค่า 4 °C Ahasan et al. [10] ได้ทำการวัดประสิทธิภาพ

เชิงความร้อนของสวนหลังคาโดยใช้ซอฟต์แวร์ FLUENT ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ชุดสมการใน
ทำนายของไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ในการทำนายการกระจายของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง CFD กับ
ข้อมูลการวัดจากการทดลองพบว่าข้อมูลอุณหภูมิจากแบบจำลอง CFD มีความแตกต่างจากการทดลองเพียง 1.7
% มากไปกว่านั้นงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลของสวนหลังคาในการปรับปรุงสภาวะอากาศในชุมชนโดยใช้การ
วิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำเสนอโดย Susana et al. [11] ที่ซึ่งทำการจำลองการไหลของ
อากาศรอบกลุ่มอาคาร จากการทดลองเชิงตัวเลขพบว่าอากาศบริเวณรอบอาคารหลังจากติดตั้งสวนหลังคาลดลง
0.1-2 °C โดยอุณหภูมิของอากาศที่ได้จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและเครื่องมือวัดมีความ
แตกต่างกันอยู่ที่ 1-15 % ด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4 % ค่าความผิดพลาดในการทำนายมาจาก
ผลของความชื้นในดิน

ในการปรับปรุงสภาวะอากาศนอกจากปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้นแล้ว การไหลเวียนของอากาศใน
อาคารเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการลดความร้อนที่ซึ่งเป็นสาเหตุของภาระสะสมเชื้อโรคในอาคาร จากการศึกษาวิจัย
ที่เกี่ยวข้องพบว่า การหมุนเวียนของอากาศภายในอาคารส่งผลต่อการสร้างสภาวะความสบาย (Thermal comfort)
รวมถึงเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน [12] ในกระบวนการพาความร้อนนั้นอุณหภูมิของอากาศจะลดลงเมื่ออากาศ
ไหลเวียนผ่านพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ และเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศให้สูงขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเท
ความร้อน หลักการดังกล่าวถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทำความเย็นในอาคารโดยการหมุนเวียนอากาศผ่านผิว
เย็น (Cold surface) เพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร ซึ่งถือเป็นทางเลือกในการปรับสภาวะอากาศแทนการใช้
เครื่องปรับอากาศ การปรับสภาวะอากาศในลักษณะนี้นอกจากจะทำความเย็นให้กับอาคารด้วยการพาความร้อน
แล้ว ยังลดการแผ่รังสีความร้อนของผู้อยู่อาศัยและสิ่งของในอาคารได้อีกด้วย [13] การออกแบบระบบการ
หมุนเวียนอากาศและการระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต้องอาศัยความเข้าใจในปรากฏการณ์การไหลของ
อากาศ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงคุณลักษณะการไหลรวมถึงรูปแบบการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน เพื่อสร้าง
สภาวะความสบายให้เกิดขึ้นในอาคารโดยใช้พลังงานไฟฟ้าที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามเพื่อให้เข้าใจถึง
ปรากฏการณ์การไหลของอากาศ คุณลักษณะการไหลรวมถึงรูปแบบการไหลที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน
แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถบ่งบอกถึงรูปแบบของการไหลและการกระจายตัว
ของอากาศได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การหมุนเวียนของอากาศในอาคาร [14-15]

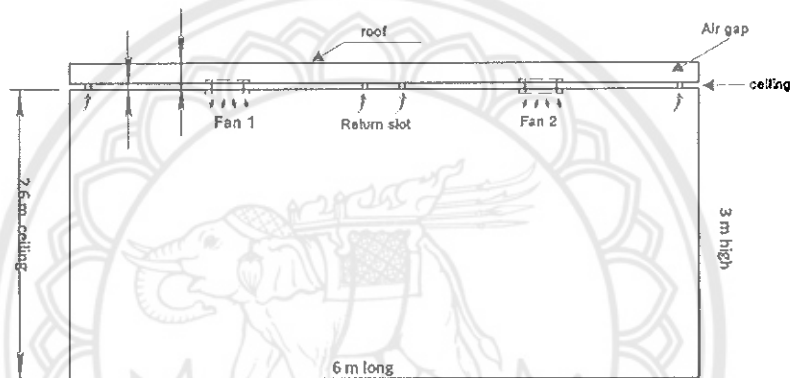
จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นพบว่า สวนหลังคามีสักยภาพในการลดภาระความร้อนเข้าสู่
อาคารผ่านทางหลังคา ส่งผลให้พื้นที่หลังคามีอุณหภูมิต่ำเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการปรับอากาศในอาคาร ดังนั้นใน
งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในปรับอุณหภูมิของอากาศภายในห้องโดยใช้ระบบหมุนเวียนอากาศผ่านผิวเย็นด้านล่างของ
พื้นที่หลังคาผ่านช่องว่างเหนือฝ้าเพดาน ซึ่งการวิเคราะห์การไหลเวียนจะถูกทำด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิง
คำนวณแบบ 3 มิติ ที่ถูกนำเสนอว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการทำนายถึงรูปแบบของการไหลและการ
กระจายตัวของอากาศ การวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบระบบปรับอากาศด้วยระบบ
หมุนเวียนอากาศร่วมกับสวนหลังคาที่มีประสิทธิผลต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากสวนหลังคาแบบแผ่นเรียบเพื่อปรับ
อุณหภูมิอากาศภายในห้องจากการใช้ระบบหมุนเวียนอากาศผ่านผิวเย็นด้านล่างของหลังคาที่ช่องว่างเหนือฝ้า
เพดาน โดยการวิเคราะห์การไหลเวียนของอากาศด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงลักษณะสวนหลังคาที่ทำการสร้างและทดสอบโดย Permpituck and Namprakai [6] ด้วยการเพิ่มระบบหมุนเวียนอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยช่องลม (Air space) เหนือฝ้า ดังแสดงในภาพที่ 1 พัดลมดูดอากาศจะทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศผ่านพื้นผิวเย็นบริเวณเพดานใต้สวนหลังคาทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลง โดยอากาศที่เย็นตัวไหลผ่านพัดลมเข้าสู่ห้อง และอากาศภายในห้องไหลผ่านช่องลมดูดกลับ (Return air slot) เพื่อไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่ผิวเย็นอีกครั้งหนึ่ง ลักษณะสวนหลังคาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด 3X6X3 เมตร ความสูงของฝ้ามีค่า 2.6 เมตร ขนาดของช่องลมดูดกลับเหนือฝ้ากว้าง 5 เซนติเมตร ฝ้ามีความหนา 9 มิลลิเมตร และฉนวนกันความร้อนเหนือฝ้ามีความหนา 75 มิลลิเมตร พัดลมระบายอากาศมีขนาดใบพัด 12 นิ้ว พัดลมทั้งสองมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 750 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ในการจำลองเชิงตัวเลขด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนี้กำหนดให้อุณหภูมิผิวของเพดานมีค่าคงที่ โดยอ้างอิงจากข้อมูลการทดสอบภาคสนามของ Permpituck and Namprakai [6] ซึ่งพบว่าเมื่อความหนาของชั้นดินเป็น 20 เซนติเมตร และอุณหภูมิของผิวของเพดานจะมีความแปรปรวนเล็กน้อยโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 20 °C



ภาพที่ 1 แสดงภาพตัดขวางของลักษณะแบบจำลองสวนหลังคาที่มีระบบหมุนเวียนอากาศ

ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหลรวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากของไหล เป้าหมายของการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ การศึกษา และการทำความเข้าใจในปรากฏการณ์ของไหลในขณะที่ของไหลมีการเคลื่อนที่ สมการหลัก (Governing equation) ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของของไหลถูกสร้างขึ้นโดยการอาศัยหลักการพื้นฐานทางฟิสิกส์ ซึ่งประกอบไปด้วย สมการการอนุรักษ์มวล สมการการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัม และสมการการอนุรักษ์พลังงาน [16] โดยสมการหลักของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีดังนี้

$$\text{สมการอนุรักษ์มวล : } \frac{Dr}{Dt} + r \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\text{สมการอนุรักษ์โมเมนตัม : } r \frac{\partial U_i}{Dt} + r U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + r g_i \quad (2)$$

$$\mu_r = \rho c_\mu \frac{k}{\omega} \quad (9)$$

ในการศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่นิยมสำหรับการจำลองการไหลในอุตสาหกรรม และมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ รวมถึงใช้เวลาในการคำนวณไม่มากนัก การวิเคราะห์กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติของสวนหลังคาที่มีระบบหมุนเวียนอากาศผ่านพื้นผิวเย็นดังนี้

1. เพดานใต้สวนหลังคามีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 °C
2. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากพื้นของอาคาร
3. ด้านกว้างของอาคารวางตัวอยู่ในทิศเหนือ และใต้ ส่วนด้านยาวของอาคารวางตัวอยู่ในทิศตะวันออกและตะวันตก

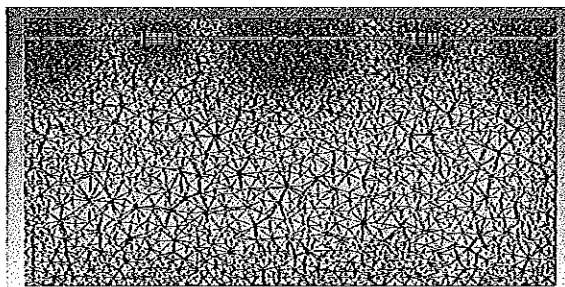
4. ผนังของอาคารทำมาจากอิฐฉาบเรียบ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนของอากาศภายนอกมีค่า 10 วัตต์ต่อตารางเมตรเคลวิน

5. ค่าภาระความร้อนของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ถูกคำนวณจากแบบจำลอง Solar loading model ในซอฟต์แวร์ ANSYS ซึ่งกำหนดรังสีตกกระทบของอาคารที่ ละติจูด 16.74342 และ ลองจิจูด 100.19669

6. ตัวแปรที่ใช้ในการกำหนดสภาวะขอบเขตของพัดลมระบายอากาศมีดังนี้ ความเร็วต่ำสุด และความเร็วสูงสุด อยู่ที่ 0 และ 2.85 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ค่าความแตกต่างของความดันของใบพัดพัดลมอยู่ที่ 20 ปาสคาล

7. ความร้อนที่เกิดจากพัดลมมีค่า 6 วัตต์

การจำลองอาคารที่คำนวณติดตั้งสวนหลังคาพร้อมกับระบบไหลเวียนอากาศนี้ได้ทำการจำลองสภาวะอากาศในวันที่ร้อนที่สุดของปี โดยใช้แบบจำลองของไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ร่วมกับแบบจำลองภาระความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ขนาดของช่องตาราง (Mesh) ที่ใช้ในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 3 มิติ คือ 3 เซนติเมตร และปรับความละเอียดของช่องตารางในบริเวณพัดลมและบริเวณช่องลมดูดกลับ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่าของความเร็ว และการกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าขนาดของตารางที่มีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณความเร็วและการกระจายอุณหภูมิในบริเวณพัดลมและช่องดูดลมกลับที่มีความแม่นยำในระดับหนึ่งและไม่ใช้เวลาในการคำนวณนานเกินไปคือ 2.5 มิลลิเมตร ในแบบจำลองนี้ใช้จุดในการคำนวณ (node) ทั้งหมด 336,062 จุด ในการจำลองแบบสามมิตินี้จะทำการคำนวณในแต่ละเงื่อนไขซ้ำ 1,000 รอบ และตรวจสอบเงื่อนไขการเข้าสู่สภาวะสมดุล โดยแสดงลักษณะของตารางในแบบจำลองวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบ 3 มิติของสวนหลังคาในภาพที่ 2



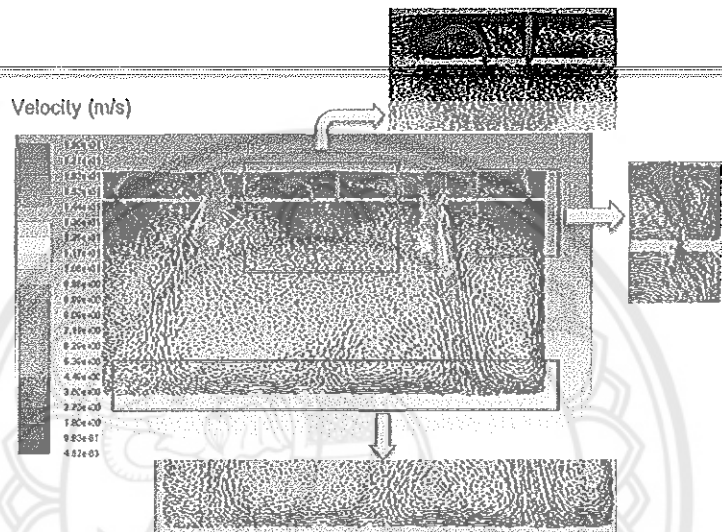
ภาพที่ 2 แสดงภาพตัดขวางของตารางในแบบจำลองสวนหลังคาที่มีระบบหมุนเวียนอากาศ

ผลการวิจัย

จากผลการจำลองเชิงตัวเลขแบบ 3 มิติของระบบการหมุนเวียนของอากาศในห้องใต้สวนหลังคาที่มีค่าอุณหภูมิที่ผิวล่างของเพดานใต้สวนหลังคาคงที่เท่ากับ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ รูปแบบการเคลื่อนที่และความเร็วของอากาศ รวมถึงค่าการกระจายอุณหภูมิในห้องได้ถูกนำเสนอและวิเคราะห์ดังนี้

1. รูปแบบการเคลื่อนที่ของอากาศ

ผลของการจำลองเชิงตัวเลขแสดงลักษณะการหมุนเวียนของอากาศในห้องใต้สวนหลังคาที่เวลา 15.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิอากาศภายนอกสูงที่สุดคือ $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมีลักษณะการไหลของอากาศดังแสดงในภาพที่ 3



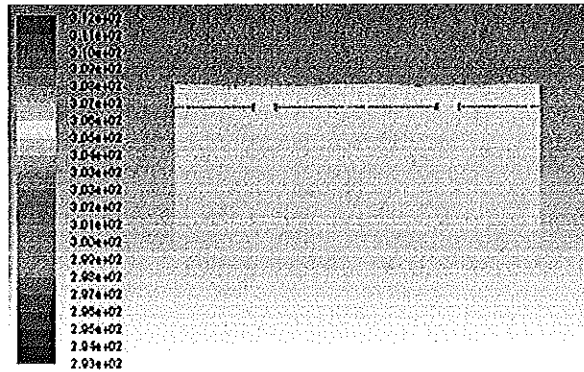
ภาพที่ 3 แสดงการกระจายตัวของอากาศในแบบจำลอง

อากาศในช่องลมเหนือฝ้ามีความเร็วประมาณ 0.8 เมตรต่อวินาที แลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวเย็นใต้เพดานซึ่งมีอุณหภูมิ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้อากาศในช่องลมมีอุณหภูมิลดลงประมาณ $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ อากาศที่ตำแหน่งบริเวณด้านหน้าของด้านตุ่ของพัดลมมีความเร็วเฉลี่ย 3 เมตรต่อวินาที และเมื่ออากาศผ่านพัดลมความเร็วเฉลี่ยของอากาศจะเพิ่มขึ้นเป็น 12 เมตรต่อวินาที อากาศที่มีความเร็วเคลื่อนที่มาพบกับอากาศภายในห้องที่อยู่นิ่ง รวมถึงวังชนกับพื้นผิวของอาคารทำให้เกิดลักษณะรูปแบบการหมุนตัว เกิดการผสมกันระหว่างอากาศภายในห้อง และการกระจายตัวของอากาศไปทั่วทั้งห้องทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะการกระจายตัวของอากาศเช่นนี้ มีการถ่ายเทโมเมนตัมสูง อากาศจะผสมกันทั่วทั้งห้อง การหมุนเวียนของอากาศในลักษณะนี้เรียกว่า การระบายอากาศแบบผสม (Mixing ventilation) [17]

2. การกระจายอุณหภูมิของอากาศ

จากผลการวิเคราะห์การไหลในแบบจำลองเชิงตัวเลขของห้องใต้สวนหลังคาติดตั้งระบบหมุนเวียนอากาศพบว่า อุณหภูมิภายในอาคารมีความแตกต่างจากอุณหภูมิภายนอกประมาณ $4\text{-}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลาเช้า และ $6\text{-}8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลาบ่ายและช่วงเย็น โดยแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในห้องในช่วงเวลา 7.00 น. 15.00 น. และ 18.00 น. ในภาพที่ 4-6 ตามลำดับ

Temperature (K)



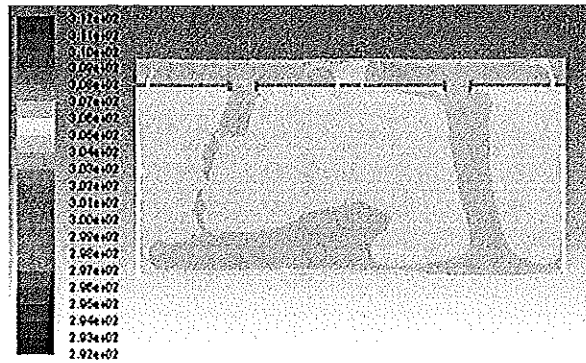
ภาพที่ 4 แสดงผลการทำนายการกระจายอุณหภูมิของอากาศในห้องใต้หลังคาในช่วงเวลา 7.00 น.

ในช่วงเวลาตอนเช้า ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ต่ำและอุณหภูมิกายนอกไม่สูงมากนัก การกระจายของอุณหภูมิของอากาศมีความใกล้เคียงกัน และมีความแตกต่างกันประมาณ 1-2 °C ดังแสดงในภาพที่ 4 จากการคำนวณความร้อนที่ผนังทั้ง 4 ด้านพบว่า ด้านทิศตะวันออกมีความร้อนสูงที่สุดอยู่ที่ 142 วัตต์ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศภายในอาคารที่เวลา 7.00 น คือ 24 °C ในขณะที่อุณหภูมิกายนอกมีค่าเท่ากับ 28 °C

ในช่วงเวลาบ่ายอุณหภูมิกายนอกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากภาวะความร้อนจากอากาศภายนอกที่ผ่านเข้ามาจากเปลือกเพดานและหลังคาของอาคารแล้ว ยังมีการปล่อยความร้อนที่สะสมไว้ในเปลือกอาคารเข้าสู่อาคาร รวมถึงเป็นช่วงเวลาที่ค่าความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ปัจจัยที่กล่าวมาในข้างต้น ส่งผลต่อความผันผวนของอุณหภูมิกายในห้อง จากภาพที่ 5 ซึ่งแสดงการกระจายอุณหภูมิของอากาศภายในห้องในช่วงเวลา 15.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อากาศภายนอกมีอุณหภูมิสูงสุด คือ 37 °C แบบจำลองสวนหลังคาที่มีระบบไหลเวียนอากาศสามารถรักษาอุณหภูมิของอากาศในห้องอยู่ที่ 29 °C ซึ่งมีความแตกต่างจากอุณหภูมิกายนอกถึง 8 °C แต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าอากาศภายในห้องมีความแปรปรวน และมีความต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดประมาณ 6 °C จากการคำนวณความร้อนที่ผนังทั้ง 4 ด้านพบว่าด้านทิศใต้มีความร้อนสูงที่สุดอยู่ที่ 489 วัตต์

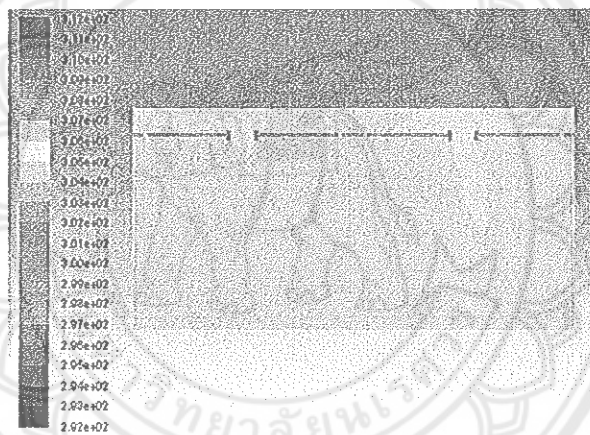
ช่วงเวลาเย็นการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเวลากลางวัน ประกอบกับอากาศภายนอกมีอุณหภูมิลดลง ทำให้ความแปรปรวนของอุณหภูมิลดลง ดังแสดงในภาพที่ 6 ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดของอากาศภายในห้องอยู่ที่ 3 °C ในช่วงเวลา 18.00 น. อากาศภายนอกมีอุณหภูมิ 34 °C อุณหภูมิของอากาศภายในแบบจำลองมีค่า 26 °C จากการคำนวณความร้อนที่ผนังทั้ง 4 ด้านพบว่าด้านทิศใต้มีความร้อนสูงที่สุดอยู่ที่ 258 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องจากเปลือกอาคารด้านทิศใต้ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดเวลาในช่วงกลางวันทำให้มีความร้อนสะสมในผนังทิศนี้มากกว่าทิศอื่นในช่วงเวลาตอนเย็น

Temperature (K)



ภาพที่ 5 แสดงผลการทำนายการกระจายอุณหภูมิของอากาศในห้องใต้สวนหลังคา
ในช่วงเวลา 15.00 น.

Temperature (K)



ภาพที่ 6 แสดงผลการทำนายการกระจายอุณหภูมิของอากาศในห้องใต้สวนหลังคา
ในช่วงเวลา 18.00 น.

สรุปและอภิปรายผล

สวนหลังคาสามารถลดภาวะความร้อนให้กับอาคารโดยอาศัยหลักการระเหยความร้อนของน้ำ ความชื้นที่เก็บสะสมไว้ในดิน จึงทำให้ผิวของเพดานด้านล่างของหลังคามีค่าคงที่ในตลอดทั้งวัน ในงานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการพาความร้อนผ่านพื้นผิวเย็นมาใช้ร่วมกับแบบจำลองสวนหลังคา เพื่อพัฒนาระบบทำความเย็นแบบทางเลือกโดยไม่ใช้ระบบปรับอากาศ การออกแบบระบบไหลเวียนอากาศในการวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การไหลเวียนที่สามารถทำให้อากาศที่ส่งผ่านพัดลม มีกระจายตัวได้ทั่วทั้งพื้นที่ของห้อง จากผลการจำลองการไหลเวียนอากาศพบว่ารูปแบบระบบการหมุนเวียนอากาศที่กำหนดขึ้นสามารถทำให้อากาศกระจายตัวได้ทั่วทั้งห้อง

จากผลของการจำลองสภาวะของอากาศภายนอกในสามช่วงเวลา พบว่าสวนหลังคาที่มีระบบหมุนเวียนอากาศสามารถรักษาอุณหภูมิในห้องให้แตกต่างจากอุณหภูมิภายนอกประมาณ 6 °C อุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยในห้องลมเหนือฝ้ามีค่าคงที่ตลอดทั้งวันอยู่ที่ 27 °C ที่ความเร็วประมาณ 1 เมตรต่อวินาที และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกตลอดทั้งวันไม่ส่งผลต่อรูปแบบการไหลรวมถึงความเร็วของอากาศที่ไหลเวียนภายในห้อง

อย่างไรก็ตามพบความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในห้องเกิดขึ้นในเวลาช่วงบ่าย และเย็น สาเหตุเนื่องจากภาวะความร้อนจากการเพิ่มขึ้นของอากาศภายนอก การปล่อยความร้อนที่สะสมไว้ในเปลือกอาคาร และความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ เนื่องจากสภาวะอากาศภายนอกที่ทำการทดลองมีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 37 °C อุณหภูมิอากาศภายในของแบบจำลองสูงสุดอยู่ที่ 29 °C อยู่เกินเส้นขอบเขตสูงสุดของสภาวะสุขสบาย (18-27 °C) อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิของอากาศภายนอกมีค่าไม่เกิน 35 °C แบบจำลองสวนหลังคานี้สามารถสร้างสภาวะสุขสบายได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยนเรศวร รหัสโครงการ R2559C028 ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] เฉลิมพล ถนอมกลาง, จตุวัฒน์ วโรตมพันธ์. (2556). การจำลองประสิทธิภาพของสวนหลังคาโมดูลาร์สำหรับอาคารในเขตร้อนชื้น. ใน Built Environment Research Associates Conference, ฉบับที่ 4, หน้า10-15.
- [2] ณัฐพล เตชพิชิตโชค, สุดาภรณ์ ฉิ่งลู่. (2556). อิทธิพลของสารเปลี่ยนสถานะที่มีผลต่อการลดความร้อนของช่องว่างใต้หลังคา. ใน Built Environment Research Associates Conference. ฉบับที่ 4. หน้า 25-30.
- [3] พุทธิพันธ์ สวัสดิ์รัตนธรร. (2550). การพัฒนาซอฟต์แวร์ช่วยวิเคราะห์ประเมินการถ่ายเทความร้อนรวมผ่านเปลือกอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. วิทยานิพนธ์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หน้า 8-17.
- [4] พชร เลิศปิติวัฒนา. (2558). การออกแบบสวนหลังคา. ในวารสารวิชาการ ศิลปะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ฉบับที่ 6. หน้า 19-34.
- [5] กนกวลี สุธีธร. (2548). หลังคาเขียว: ทางเลือกเพื่อการจัดการน้ำฝน. คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นเมื่อ 23 ตุลาคม 2559, จาก <http://www.land.arch.chula.ac.th/pdf/greenroof.pdf>.
- [6] Permpituck, S., Namprakai, P. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. *Renew Energy*, 40(1),: 98-103.
- [7] Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L.; & Sia, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4) :353-364.
- [8] Lazzarin, R. M., Castellotti, F.; & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*.37(2) :260-1267.

- [9] Poptani, H. (2014). Extensive Green Roofs: Potential for Thermal and Energy benefits in buildings in central India. In 30th International PLEA conference, V30. pp. 1-8.
- [10] Ahasan, T., Ahmed, S. F., Rasul, M. G., Khan, M. M. K.; & Azad, A. K. (2014). Performance Evaluation of Hybrid Green Roof System in a Subtropical Climate Using Fluent. Journal of Power and Energy Engineering. 2:113–119.
- [11] Alcazar, S. S., Olivieri, F.; & Neila, J. (2016). Urban Climate Green roofs: Experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean – continental climates. Urban Climate. 17:304–317.
-
- [12] Straube, J. (2007). Air Flow Control in Buildings. In Building Science Digests. V.14 pp. 18.
- [13] Hartwig M. Künzel, Klaus Sedlbauer. (2010). Air-Conditioning by Chilled Indoor Fountains Problem. In Fraunhofer. V37.
- [14] Susin, R.M., Lindner, G. A., Mendonca, K. C.; & Mariani, V. C. (2007). NUMERICAL ANALYSIS OF INDOOR AIR FLOW IN A ROOM VENTILATED BY A HORIZONTAL JET. In The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings, V6. pp. 28–31.
- [15] Hajdukiewicz, M., Geron, M.; & Keane, M. M. (2013). VALIDATED CFD STUDY OF INDOOR ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN A HIGHLY GLAZED , CROSS-VENTILATED MEETING ROOM. In 13th International Conference of the International Building Performance Simulation Association V13. pp. 30–37.
- [16] Anderson Jr, J.D. (2009). Computational Fluid Dynamics," in Computational Fluid Dynamics. Springer.
- [17] Awbi, H. B. (2015). Ventilation and Air Distribution Systems in Buildings. Frontiers Mechanical Engineering. 1:1–4.