

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความเป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว  
โดยวิธีการระเหยของน้ำ



นางสาวแสงทิพย์ นิรุตติรักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

STUDY OF HEAT TRANSFER AND FINANCIAL FEASIBILITY FOR ROOF BY  
EVAPORATIVE COOLING

Miss Saengtip Nirutterug



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและ ความเป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว โดยวิธีการ ระเหยของน้ำ
โดย	นางสาวแสงทิพย์ นิรุตติรักษ์
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร

---

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ธนิศ จินดาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ์)

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

แสงทิพย์ นิรุติรักษ์ : การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความ  
เป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว โดยวิธีการระเหยของน้ำ. (STUDY OF HEAT  
TRANSFER AND FINANCIAL FEASIBILITY FOR ROOF BY EVAPORATIVE  
COOLING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.อรุณจัน เศรษฐบุตร์, หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาเขียวชนิดต่างๆกับ  
หลังคาคอนกรีตซึ่งเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ โดยศึกษาประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความ  
ร้อนจากหลังคาของหลังคาเขียวที่มีการรดน้ำในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อหาค่าพลังงานรวมรายปี  
ของอาคารแต่ละประเภท โดยศึกษาจากค่าตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Heat  
transfer coefficient -U-value)

โดยการศึกษาโดยการวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง โดยมีหลังคาทั้งหมด  
4 ชนิดหลังคา คือ หลังคาคอนกรีตหนา 0.10 เมตร ซึ่งเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ หลังคาดินที่มี  
ความหนา 0.15 เมตร หลังคาหญ้าหน่อเล็ก ปลุกบนชั้นดินหนา 0.15 เมตร และหลังคาไม้เลื้อย  
ว่านเสน่ห์จันทร์เขียว ปลุกบนชั้นดินหนา 0.15 เมตร ซึ่งหลังคาดิน หลังคาหญ้า และหลังคาไม้  
เลื้อยนั้นจะทำการรดน้ำหลังคาใน 2 รูปแบบ คือ รดน้ำหลังคา 3 ช่วงเวลาต่อวัน คือเวลา 8.00 น.  
12.00 น. และ 17.00 น. และรดน้ำหลังคา 2 ช่วงเวลาต่อวัน คือเวลา 8.00 น. และ 17.00 น.  
โดยทำการวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิจากกล่องทดลองในตำแหน่งที่กำหนด เพื่อนำมาคำนวณหาค่า  
ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา (U-Value) จากนั้นนำค่าที่ได้นำมาจำลองด้วย  
โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในอาคารต้นแบบแต่ละประเภท ซึ่งมีค่าการใช้งานอ้างอิงกับการใช้งานจริง  
ตามประเภทอาคารนั้นๆเพื่อหาค่าพลังงานรวมรายปีในแต่ละกรณี และวิเคราะห์ความเป็นไปได้  
เชิงเศรษฐศาสตร์ โดยแบ่งเป็นอาคารที่มีวัสดุห่อหุ้มความร้อนใต้อาคาร และไม่มีวัสดุห่อหุ้มความ  
ร้อนใต้อาคาร เพื่อการหาแนวทางในการปรับปรุงอาคารให้เหมาะสมกับการใช้งานของแต่ละ  
ประเภทอาคาร

สรุปได้ว่า หลังคาเขียวมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนได้ดีกว่าหลังคา  
คอนกรีต แต่เมื่อจำลองการใช้พลังงานรวมในอาคารสำนักงาน และร้านค้า พบว่า หลังคาเขียวไม่มี  
ประสิทธิภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานรวมรายปีเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต ทั้งในกรณีที่ไม่มี  
วัสดุห่อหุ้มความร้อนใต้หลังคา และมีวัสดุห่อหุ้มความร้อนใต้หลังคา ดังนั้นเมื่อคำนวณวิเคราะห์  
ความเป็นไปได้ด้วยการประเมินทางการเงิน พบว่า การก่อสร้างหลังคาเขียวในกรณีอาคาร  
สำนักงานไม่มีความคุ้มค่าทางการเงิน

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5673358725 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: EVAPORATIVE COOLING / FINANCIAL FEASIBILITY / GREEN ROOF

SAENGTIP NIRUTTERUG: STUDY OF HEAT TRANSFER AND FINANCIAL FEASIBILITY FOR ROOF BY EVAPORATIVE COOLING. ADVISOR: ASST. PROF.ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., pp.

This thesis was set up to evaluate the benefits of green roofs compared with concrete roofs. This study focused on heat transfer through the green roof in different types of watering for annual energy consumption on two building types that are active at different times by using the heat transfer coefficient (U-value).

The experimental part used four experimental boxes. Each box had a different type of roof. There were concrete roofs (base case), soil roofs, grass roofs and vine roofs. Soil roofs, green roofs and vine roofs were watered with 4 litres each time. Watering patterns were divided in 2 types: the first is 3 times a day at 08.00, 12.00, 17.00, and the second is 2 times a day at 08.00 and 18.00. Thermal data were collected by setting up thermal sensors for calculating the heat transfer coefficient (U-Value). The results revealed that soil roof watering 3 times a day had the lowest U-value of 0.7 watt/square meter/kelvin. Then, the U-Value was calculated for the thermal conductivity (k) in order to qualify as roofing materials used in office buildings and stores that are simulated by a computer program with reference to actual usage for checking the annual energy consumption in each case and analysis of financial feasibility. The case studies are roofs with thermal mass and roofs without thermal mass to evaluate the efficiency in reducing the annual overall heat transfer in selected buildings compared with base case building.

The results showed that green roofs have efficiency in reducing the annual energy consumption compared to the case study in a low proportion. The total energy savings compared to the case study with the highest percentage of energy savings was the green roof with thermal mass in stores. This was 6.37 percent lower than the base case. For the financial feasibility aspect it was found that the construction costs of green roofs in office buildings and stores are not feasible in any case.

Department: Architecture

Student's Signature .....

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายจากผู้มีอุปการคุณทุกท่าน ดังต่อไปนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรถจัน เศรษฐบุตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยชี้แนะแนวทาง ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ อีกทั้งกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาร่วมสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รศ.ธนิต จินดาวณิก ประธานสอบวิทยานิพนธ์ รศ.พรพรรณชลัท สุริโยธิน ผศ. ดร.วราภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และดร.ณรงวิทย์ อารีมิตร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

ขอบพระคุณครอบครัววีรุตติรักษ์ ที่ช่วยจัดเตรียมอุปกรณ์ทดลองต่างๆ ทำให้พร้อมในการทำวิทยานิพนธ์ ที่ให้กำลังใจทุกครั้งที่ย้อดอย

ขอบพระคุณ เพื่อนๆ 5+1 ทุกคน ที่ช่วยเป็นกำลังใจ และชี้แนะแนวทางต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ นางสาวอภิชญา อธิคมบัณฑิตกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำแนวทางในส่วนของ การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณบริษัท แมกโนเลีย ควอลิตี้ ดีเวล็อปเม้นต์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ที่กรุณาสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญแผนภูมิ.....	ค
สารบัญตาราง.....	จ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 การถ่ายเทความร้อน.....	6
2.1.1 การนำความร้อน .....	6
2.1.2 การพาความร้อน .....	7
2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน .....	7
2.2 การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำ (evaporative cooling).....	8
2.3 การคายระเหย (evapotranspiration) .....	10
2.3.1 การคายน้ำของพืช .....	10
2.3.2 การระเหยของน้ำผ่านผิวดิน .....	10
2.3.3 การวัดประสิทธิภาพการคายระเหยของน้ำ .....	10
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายระเหยของน้ำ .....	11
2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา.....	11
2.5 แหล่งความร้อนที่เข้าสู่อาคาร .....	11
2.6 ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index: LAI).....	12

2.7 หลังคาเขียว (Green Roof).....	12
2.7.1 จุดกำเนิดของหลังคาเขียว.....	12
2.7.2 ประเภทของหลังคาเขียว .....	13
2.7.3 ประโยชน์ของหลังคาเขียว .....	14
2.7.4 ข้อจำกัดของหลังคาเขียว .....	15
2.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	20
3.1 แนวทางการวิจัย.....	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	20
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล .....	20
3.4 กำหนดตัวแปรในงานวิจัย .....	21
3.4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกล่องทดลอง .....	21
3.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 .....	21
3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย .....	21
3.5.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	21
3.5.2 กำหนดรูปแบบของหลังคาแต่ละประเภท .....	22
3.5.2.1 หลังคาที่เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ (baseline).....	22
3.5.2.2 หลังคาที่มีการรดน้ำหลังคา.....	23
3.5.3 การรดน้ำหลังคา.....	27
3.5.4 ทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละประเภทด้วยกล่องทดลอง .....	27
3.5.5 การคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (U-Value).....	30
3.5.5.1 พลังงานความร้อนที่เข้าสู่อาคารผ่านหลังคา .....	30
3.5.5.2 พลังงานความร้อนที่ระบายออกมาจากกล่องทดลองด้วยพัดลมระบายอากาศ .....	30
3.5.6 ศึกษาแบบของอาคารที่นำมาจำลองผลการใช้พลังงานรวมด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์.....	31
3.5.6.1 สำนักงาน .....	31



3.5.6.2 อาคารร้านค้า .....	34
3.5.7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานรวมในโปรแกรมคำนวณ VisualDOE4.0.....	36
3.5.7.1 โปรแกรม VisualDOE 4.0 .....	36
3.5.8 วิเคราะห์ผลการใช้พลังงานรวมและค่าไฟฟ้า.....	37
3.5.9 พิจารณาค่า Life Cycle Cost ของหลังคาเขียว .....	37
3.5.10 พิจารณาค่าน้ำสำหรับการรดน้ำหลังคาเขียว.....	38
3.5.11 พิจารณา ค่าบำรุงรักษา และค่าก่อสร้างเพิ่มเติม .....	38
3.5.12 พิจารณาความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ .....	38
3.5.12.1 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน.....	39
3.5.12.2 มูลค่าตลอดการใช้งาน 20ปี (Life cycle cost analysis-LCC).....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล .....	40
4.1 ผลการทดลองจากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง.....	40
4.1.1 แยกประเภทกรณีศึกษาของหลังคาเขียว โดยแบ่งตามชนิดของหลังคาและรูปแบบการรดน้ำหลังคาที่นำมาทดลอง .....	40
4.2 ผลการใช้พลังงานรวมจากการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0.....	51
4.2.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง .....	53
4.2.1.1 อาคารสำนักงาน.....	53
4.2.1.2 อาคารร้านค้า .....	56
4.2.1.1 หลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน .....	59
4.2.1.1.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน).....	59
4.2.1.1.2 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว).....	60
4.2.1.2 หลังคามีวัสดุหน่วงความร้อน.....	60
4.2.1.2.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน).....	60
4.2.1.2.2 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว).....	61
4.2.2 ภาวะการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมง.....	61

4.2.2.1 อาคารสำนักงาน.....	61
4.2.2.2 อาคารร้านค้า .....	64
4.2.2.1 อาคารสำนักงาน.....	68
4.2.2.2 อาคารร้านค้า .....	68
4.2.2.2.1 พิจารณาความแตกต่างระหว่างหลังคาที่มีและไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา.....	69
4.2.3 การจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมรายปี .....	69
4.2.3.1 การจำลองการใช้พลังงานรวมรายปีของอาคารสำนักงาน .....	69
4.2.3.2 การจำลองการใช้พลังงานรวมรายปีของอาคารร้านค้า.....	71
4.2.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	73
4.2.4.1 การวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของอาคารร้านค้าที่หลังคามีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา .....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	77
5.1 สรุปผลการวิจัยการศึกษาความสัมพันธ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความเป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว โดยวิธีการระเหยน้ำ .....	78
5.1.1 สรุปผลการวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง.....	78
5.1.1.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และค่าการนำความร้อนของหลังคาแต่ละชนิด .....	78
5.1.1.2 ผลการศึกษาความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีหลังคาที่มีจำนวนครั้งในการรดน้ำแตกต่างกัน .....	79
5.1.2 สรุปผลการใช้พลังงานรวมของอาคารแต่ละประเภท.....	79
5.1.2.1 อาคารสำนักงาน.....	79
5.1.2.1.1 หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา .....	79
5.1.2.1.2 หลังคามีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา.....	80
5.1.2.2 อาคารร้านค้า .....	81
5.1.2.2.1 หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา .....	81
5.1.2.2.2 หลังคามีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคา.....	81
5.1.2 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวในอาคารต้นแบบ .....	82
5.1.2.1 ค่าไฟฟ้ารวมรายปี .....	82

5.1.2.2 ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback period).....	83
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้.....	84
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป .....	84
รายการอ้างอิง .....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	88



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แผนผังการวิจัย.....	4
รูปที่ 2 รูปแสดงการถ่ายเทความร้อนภายในโมเลกุลของวัตถุ.....	6
รูปที่ 3 วัฏจักรของน้ำ.....	7
รูปที่ 4 การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก.....	8
รูปที่ 5 กระบวนการ Direct Evaporative Cooling.....	9
รูปที่ 6 กระบวนการ Indirect Evaporative Cooling.....	9
รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังภายในห้อง.....	11
รูปที่ 8 หลังคาแบบ Extensive green roof บริเวณหลังคาลานจอดรถในประเทศเยอรมัน.....	13
รูปที่ 9 หลังคาแบบ Intensive green roof.....	14
รูปที่ 10 ภาพแสดงส่วนประกอบของหลังคาเขียวที่นำมาเป็นวัสดุคลุมหลังคาคอนกรีต.....	18
รูปที่ 11 ภาพจำลองกล่องคอนกรีต (Baseline).....	22
รูปที่ 12 ภาพกล่องคอนกรีต (Baseline).....	23
รูปที่ 13 ภาพจำลองกล่องหลังคาดินหนา 0.15เมตร.....	24
รูปที่ 14 ภาพกล่องหลังคาดินหนา 0.15เมตร.....	24
รูปที่ 15 ภาพจำลองกล่องหลังคาหญ้า (หญ้านวลน้อย).....	25
รูปที่ 16 ภาพกล่องหลังคาหญ้า (หญ้านวลน้อย).....	25
รูปที่ 17 กล่องจำลองหลังคาไม้เลื้อย (ว่านเสน่ห์จันทร์เขียว).....	26
รูปที่ 18 กล่องหลังคาไม้เลื้อย (ว่านเสน่ห์จันทร์เขียว).....	26
รูปที่ 19 การวางตำแหน่งกล่องทดลองแต่ละกล่อง ณ บริเวณพื้นที่ที่ทำการทดลอง.....	27
รูปที่ 20 พัดลมดูดอากาศ.....	28
รูปที่ 21 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ.....	28
รูปที่ 22 Thermocouple Type K พร้อมสายเซนเซอร์.....	29
รูปที่ 23 ตำแหน่งที่ทำการเก็บข้อมูลของกล่องทดลอง.....	29
รูปที่ 24 รูปด้านและผังพื้นของอาคารสำนักงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษา.....	32
รูปที่ 25 ภาพสามมิติของอาคารสำนักงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษา.....	32
รูปที่ 26 รูปด้านและผังพื้นของอาคารร้านค้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา.....	34
รูปที่ 27 ภาพสามมิติของอาคารร้านค้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา.....	35
รูปที่ 28 แสดงลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคารสำนักงานต้นแบบที่สร้างแบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0.....	51

รูปที่ 29 แสดงลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคารร้านค้าต้นแบบที่สร้างแบบจำลองอาคารด้วย โปรแกรม VisualDOE4.0.....	52
---	----



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 1 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณความร้อนถ่ายเทจากหลังคาที่ลดลงในแต่ละประเภทของหลังคาเขียวที่มีความสูงของพืชต่างกัน (a) แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของหลังคาเขียวมีความสูงของพืชต่างกันเมื่อเทียบกับหลังคาที่นำมาเป็น Baseline (b).....	16
แผนภูมิที่ 2 แผนภูมิเส้นแสดงค่า Sensible Heat Flux รายชั่วโมงของหลังคาเขียวแต่ละประเภทที่มีค่าดัชนีใบ (LAI) ต่างกัน.....	17
แผนภูมิที่ 3 แผนภูมิแท่งแสดงการลดอุณหภูมิพื้นผิวของหลังคาเขียวแต่ละชนิด (a) แผนภูมิแสดงร้อยละของพลังงานที่ประหยัดได้จากหลังคาเขียวแต่ละชนิด (b).....	17
แผนภูมิที่ 4 แผนภูมิเส้นแสดงอุณหภูมิพื้นผิวของหลังคาแต่ละชนิด โดยที่ ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 12 สิงหาคม (a) ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 20 สิงหาคม (b).....	18
แผนภูมิที่ 5 แผนภูมิเส้นแสดงผลการคำนวณค่า Heat flux ของหลังคาแต่ละชนิด โดยที่ ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 12 สิงหาคม (a) ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 20 สิงหาคม (b).....	19
แผนภูมิที่ 6 แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของ Life cycle cost analysis.....	38
แผนภูมิที่ 7 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน .....	53
แผนภูมิที่ 8 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคามีวัสดุหน่วงความร้อน .....	54
แผนภูมิที่ 9 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน .....	55
แผนภูมิที่ 10 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคามีวัสดุหน่วงความร้อน .....	55
แผนภูมิที่ 11 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน .....	56
แผนภูมิที่ 12 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคามีวัสดุหน่วงความร้อน .....	56
แผนภูมิที่ 13 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน.....	57
แผนภูมิที่ 14 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคามีวัสดุหน่วงความร้อน.....	58

แผนภูมิที่ 15	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน .....	61
แผนภูมิที่ 16	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อน .....	62
แผนภูมิที่ 17	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน .....	63
แผนภูมิที่ 18	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อน .....	64
แผนภูมิที่ 19	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน .....	65
แผนภูมิที่ 20	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อน .....	65
แผนภูมิที่ 21	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน .....	66
แผนภูมิที่ 22	ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อน .....	67
แผนภูมิที่ 23	ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารสำนักงาน กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร .....	70
แผนภูมิที่ 24	ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารสำนักงาน กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร .....	70
แผนภูมิที่ 25	ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร .....	72
แผนภูมิที่ 26	ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร .....	72
แผนภูมิที่ 27	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคารร้านค้า กรณีหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา.....	76

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้งานของอาคารสำนักงานต้นแบบ .....	33
ตารางที่ 2 ข้อมูลการใช้งานของอาคารร้านค้าต้นแบบ .....	35
ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา ( $T_o-T_i$ ) และบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{outlet\ air}-T_{inlet\ air}$ ) ในช่วงเวลากลางวัน (6.00-18.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (18.00-6.00 น.) .....	42
ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยในหนึ่งวันบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา ( $T_o-T_i$ ) และบริเวณบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{outlet\ air}-T_{inlet\ air}$ ) .....	43
ตารางที่ 5 ตารางความสามารถลดอุณหภูมิของหลังคาแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต.....	44
ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient - U-value) ( $W/m^2k$ ).....	44
ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าความต้านทานความร้อน ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ).....	47
ตารางที่ 8 ตารางแสดงความหนาของหลังคาแต่ละชนิด .....	48
ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าการนำความร้อน (Conductivity-k) ( $W/m-K$ ) .....	48
ตารางที่ 10 สรุปค่าที่ได้จากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง.....	49
ตารางที่ 11 ผลความแตกต่างของการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน และ 2 ครั้งต่อวัน.....	50
ตารางที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer-U-value) ( $W/m^2-k$ ) และค่าผลการใช้พลังงานรวมต่อปี ( $kWh/m^2 \cdot year$ ) ของอาคารสำนักงาน .....	71
ตารางที่ 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer-U-value) ( $W/m^2-k$ ) และค่าผลการใช้พลังงานรวมต่อปี( $kWh/m^2 \cdot year$ ) ของอาคารร้านค้า .....	73
ตารางที่ 14 ตารางแสดงรายละเอียดค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคา .....	74
ตารางที่ 15 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า กรณีมีวัสดุหุ้มวงใต้หลังคา .....	75
ตารางที่ 16 สรุปค่าที่ได้จากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง.....	78
ตารางที่ 17 ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน และ 3 ครั้งต่อวัน.....	79
ตารางที่ 18 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร ( $kWh/m^2$ ) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารสำนักงาน....	79



ตารางที่ 19 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> ) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารสำนักงาน.....	80
ตารางที่ 20 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> ) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารร้านค้า.....	81
ตารางที่ 21 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> ) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารร้านค้า .....	81
ตารางที่ 22 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายต่อตารางเมตรของหลังคาแต่ละชนิด.....	83
ตารางที่ 23 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) (ปี) ของหลังคาแต่ละชนิดของอาคารร้านค้า.....	83



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมเริ่มส่งปัญหาให้กับสภาพแวดล้อมมากขึ้น เห็นได้จากปัญหาต่างๆที่เริ่มเกิดขึ้นมาอย่างเห็นได้ชัด เช่น เกาะความร้อน (Urban Heat Island) ซึ่งสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะนี้คือ การใช้วัสดุที่ทำให้เกิดการสะสมกันของความร้อนประกอบกับความร้อนที่ปล่อยออกจากอาคาร อีกทั้งการใช้พลังงานตามอาคารสถานที่ต่างๆซึ่งมีผลทำให้พื้นที่ในเมืองนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นที่นอกเมือง และอีกสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะนี้ มีผลมาจากการตัดไม้ทำลายป่า ทำให้พื้นที่สีเขียวลดลง ทั้งนี้มีผลมาจากการที่ประชากรเพิ่มมากขึ้น จึงต้องมีการบุกรุก ตัดไม้ทำลายป่า เพื่อเพิ่มพื้นที่เพื่อการอยู่อาศัยและดำรงชีพให้เพียงพอ ดังนั้นผู้คนจึงเริ่มหาวิธีที่จะลดอุณหภูมิโดยรอบที่สูงขึ้น โดยแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดอุณหภูมิได้คือการใช้วิธีการระเหยของน้ำ ซึ่งหนึ่งในวิธีนี้คือการสร้างพื้นที่สีเขียว ซึ่งถือเป็นการชดเชยพื้นที่ป่าไม้ที่เสียไป ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะสร้างพื้นที่สีเขียวบนหลังคา (Green Roofs) โดยจากการค้นคว้าเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของหลังคาแบบนี้นั้น พบว่า หลังคาเขียวมีคุณสมบัติที่ช่วยลดภาวะเกาะร้อน ลดอุณหภูมิพื้นผิวและอุณหภูมิโดยรอบของอาคาร อีกทั้งยังเป็นแหล่งพักพ่อนกช่วยให้อากาศบริสุทธิ์ ซึ่งคุณสมบัติของหลังคาเขียวต่อการช่วยลดอุณหภูมินี้ก็คือ พืชพรรณบนดินจะดูดซับพลังงานความร้อนและแสงอาทิตย์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาคายน้ำ (Evapotranspiration) ซึ่งหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสงนั้นคือน้ำที่ช่วยในการพาความร้อนออกจากหลังคา อีกทั้งการระเหยของน้ำในดินจากการรดน้ำต้นไม้ที่ช่วยพาความร้อนออกจากหลังคาได้อีกทางหนึ่ง ทำให้ช่วยลดอุณหภูมิหลังคาซึ่งส่งผลให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวหลังคาสู่อาคารเป็นไปได้น้อยลง ส่งผลให้การใช้พลังงานรวมในการปรับอากาศนั้นลดลง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาอาคารน้อยลงอีกด้วย

จะเห็นว่า หลังคาเขียวมีคุณสมบัติที่มีประโยชน์มากมายดังกล่าวนี้ออกมาแล้ว ในงานวิจัยชิ้นนี้ จึงมุ่งเน้นการหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหลังคาเขียวกับหลังคาที่เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ โดยมีการควบคุมชั่วโมงการรดน้ำหลังคา เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการระเหยของน้ำของวัสดุหลังคาประเภทต่างๆ อีกทั้งคำนวณค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าน้ำ ค่าไฟ และค่าบำรุงรักษา เพื่อการคำนวณความคุ้มค่าทางการเงิน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้หลังคาเขียวให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1. ตรวจสอบผลของการโอนถ่ายพลังงานของหลังคาเขียวเข้าสู่อาคาร
- 1.2.2. หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าความต้านทานความร้อนของหลังคาเขียว
- 1.2.3. ตรวจสอบการใช้พลังงานรายปีในอาคารประเภทต่างๆ เมื่อใช้หลังคาเป็นหลังคาเขียว เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางการเงิน

1.2.4. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้หลังคาเขียวให้เกิดประโยชน์ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเป็นการศึกษาความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาประเภทต่างๆที่มีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในอาคาร เพื่อคำนวณความคุ้มค่าทางการเงินของหลังคาที่ทำการวิจัย
- 1.3.2 ลักษณะของหลังคาที่ทำการวิจัย
  - ก. หลังคาคอนกรีต ความหนา 0.15 เมตร
  - ข. หลังคาดิน โดยมีการรดน้ำ ตามเวลาที่กำหนด
  - ค. หลังคาหญ้า ซึ่งในการวิจัยนี้ เลือกใช้หญ้านวลน้อย (Manila Grass) โดยมีการรดน้ำ ตามเวลาที่กำหนด
  - ง. หลังคาพืชขนาดเล็กที่มีความสูงไม่เกิน 0.30 เมตร ซึ่งในการวิจัยนี้ เลือกใช้ต้น วานเสนห์จันทร์เขียวซึ่งเป็นหลังคาไม้เลื้อย โดยมีการรดน้ำตามเวลาที่กำหนด
- 1.3.3 ศึกษาด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติการโดยการใช้กล่องทดลองที่มีขนาด 0.80x0.80x0.60 เมตรในการทำการวิจัย และใช้โปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อทำการจำลองปริมาณการใช้พลังงานรวมในอาคารแต่ละประเภทที่กำหนด
- 1.3.4 ศึกษาการใช้พลังงาน ในอาคารที่มีการปรับอากาศเท่านั้น
- 1.3.5 ในการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 นั้น จะทำการจำลองอาคารต้นแบบคือ
  - 1.3.5.1 สำนักงาน ซึ่งมีการใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00-18.00น. โดยมีเวลาทำการวันจันทร์ถึงเสาร์
  - 1.3.5.2 อาคารห้างสรรพสินค้า ซึ่งมีการใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00-22.00น. ทุกวัน
- 1.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความคุ้มค่าทางการเงิน โดยการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งด้านการก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานรวม และค่าบำรุงรักษา ตลอดอายุการใช้งานอาคาร
- 1.3.7 กำหนดอายุการใช้งานอาคารคือ 20 ปี และค่าไฟฟ้าในราคาเยุนิตละ 3 บาท

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อหาแนวทางการวิจัย
  - 1.4.1.1 สภาพแวดล้อมต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร
  - 1.4.1.2 การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร และคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้อง
    - ก. คุณสมบัติของหลังคาแต่ละประเภทที่มีผลต่อการระเหยของน้ำ
    - ข. ชั้น (Layers) ของวัสดุต่างๆที่นำมาเป็นหลังคา
    - ค. ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร (Heat Transfer)
    - ง. การระเหยของน้ำเพื่อพาความร้อนออกจากหลังคา

จ. ปริมาณการคายน้ำของพืชแต่ละชนิด

ฉ. ขนาดของใบของพืชแต่ละชนิดที่นำมาเป็นพืชปกคลุมหลังคา

1.4.1.3. ปริมาณน้ำที่รด ณ ช่วงเวลาต่างๆที่กำหนดไว้

1.4.1.4. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหลังคา

1.4.1.5. มูลค่าพลังงานรวมต่อปี และความคุ้มทุนทางการเงิน

1.4.2 การตั้งสมมติฐานในการวิจัย

หลังคาเขียวมีผลต่อการช่วยลดการใช้พลังงานรวมในอาคาร และช่วยให้สามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่รวมที่ใช้ภายในอาคาร ทำให้สามารถคืนทุนได้เร็วขึ้นกว่าหลังคาที่นำมาเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ

1.4.3. การกำหนดตัวแปรในการวิจัย

1.4.3.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกล่องทดลอง

1.4.3.1.1 ตัวแปรต้น ชนิดของวัสดุและพืชที่ปกคลุมหลังคา และประเภทของอาคาร

1.4.3.1.2 ตัวแปรตาม ความสามารถในการกักเก็บความร้อน ความสามารถในการต้านทานความร้อน อุณหภูมิที่ต่างกัน ณ จุดที่ทำการทดลอง ณ ช่วงเวลาต่างๆ และความสามารถในการระเหยของน้ำของหลังคาแต่ละชนิด

1.4.3.1.3 ตัวแปรควบคุม ความหนาของวัสดุคลุมหลังคา

1.4.3.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการจำลองด้วยโปรแกรมVisualDOE4.0

1.4.3.2.1 ตัวแปรต้น ประเภทของอาคารปรับอากาศ

1.4.3.2.2 ตัวแปรตาม อัตราการคืนทุน พลังงานที่ใช้ต่อปี สัดส่วนของประเภทพลังงานที่ใช้ต่อปี

1.4.3.2.3 ตัวแปรควบคุม – รูปร่างอาคาร

1.4.4 การศึกษาเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการช่วยลดการถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหยของน้ำของหลังคาแต่ละประเภท โดยการนำค่าอุณหภูมิแต่ละจุดที่ทำการเก็บข้อมูลมาเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์ตามแนวทางที่กำหนดเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity,  $k$ ) ของหลังคาแต่ละประเภท

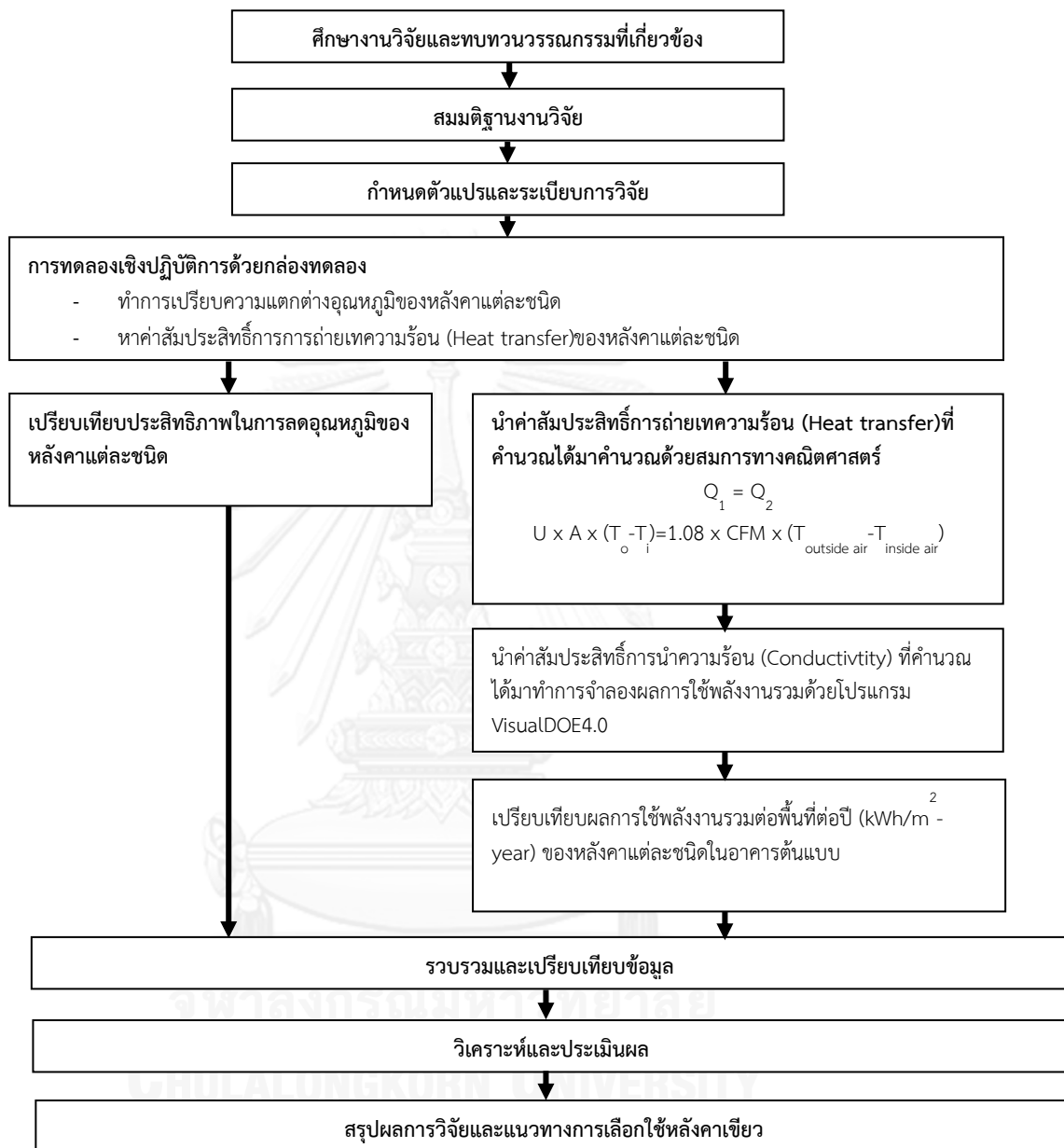
1.4.5 นำค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์มากำหนดคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละประเภทในโปรแกรมVisualDOE4.0 เพื่อจำลองผลการใช้พลังงานรวมในอาคารแต่ละประเภทที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

1.4.6 คำนวณค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาหลังคาแต่ละประเภท อีกทั้งค่าการใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานรวมภายในอาคารซึ่งกำหนดอายุการใช้งานอาคารเป็นระยะเวลา 20 ปี เพื่อนำมาหารระยะเวลาคืนทุนของค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการก่อสร้างหลังคาเขียว

1.4.7 ประเมินแนวทางการเลือกใช้หลังคาที่มีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้พลังงานรวมภายในอาคาร และค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาที่น้อยที่สุด

1.4.8 สรุปและเสนอแนวแนวทางในการใช้หลังคาเขียว

## แผนผังการวิจัย



รูปที่ 1 แผนผังการวิจัย

(ที่มา : ผู้วิจัย)

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ข้อดีและข้อเสีย ทั้งในแง่ของการใช้งาน และความคุ้มค่าทางการเงินของหลังคาเขียวเมื่อเทียบกับหลังคาประเภทอื่นๆ
- 1.5.2 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาเขียวที่มีพืชปกคลุมหลังคาต่างชนิดกัน ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการคำนวณค่าความร้อนสะสมของวัสดุต่อไป
- 1.5.3 ได้แนวทางในการเลือกใช้เลือกใช้ประเภทของหลังคาเขียวให้เหมาะสมกับสถานที่และอาคารที่เหมาะสม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนั้น มีทฤษฎีต่างๆ และงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนรวม และความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียว ดังนี้

#### 2.1 การถ่ายเทความร้อน

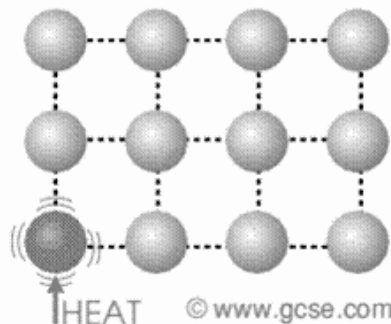
คือ การถ่ายเทของพลังงานสองจุด ที่มีพลังงานไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งรายละเอียดของการถ่ายเทความร้อนแต่ละประเภทยังสามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 2.1.1 การนำความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับของแข็งมากที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนประเภทนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปอีกโมเลกุลหนึ่ง ส่งผลให้โมเลกุลที่ได้รับพลังงานความร้อนนั้นมีการสั่นสะเทือน และเกิดการกระทบกันกับโมเลกุลข้างเคียง ทำให้ความร้อนส่งผ่านไป ซึ่งวัตถุตัวกลางนั้นจะไม่มีเคลื่อนไหวตามการถ่ายเทความร้อน

2.1.1.1 ตัวนำความร้อน คือวัตถุที่ยอมให้ความร้อนผ่านได้ ซึ่งวัตถุที่มีประสิทธิภาพในการนำความร้อนได้ดีที่สุดคือ โลหะต่างๆ เช่น เงิน ทอง ทองแดง เป็นต้น

2.1.1.2 ฉนวนความร้อน คือวัตถุที่ไม่ยอมให้ความร้อนผ่าน หรือความร้อนสามารถผ่านได้เล็กน้อย เช่น แก้ว ไม้ ยาง ผ้า

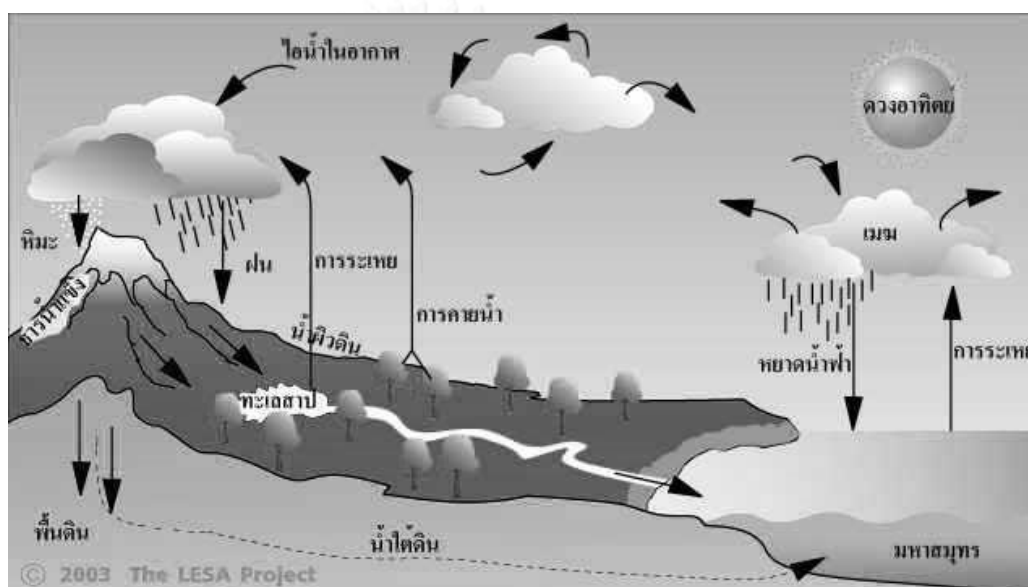


รูปที่ 2 รูปแสดงการถ่ายเทความร้อนภายในโมเลกุลของวัตถุ

ที่มา: <http://www.gcse.com/energy/conduction.htm>

### 2.1.2 การพาความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีสถานะเป็นของเหลวและแก๊สเท่านั้น เนื่องจากเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางแล้วตัวกลางที่ได้รับความร้อนจะเคลื่อนที่ไปด้วย ซึ่งการพาความร้อนนั้นส่วนใหญ่มักเกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น การระเหยของน้ำบนพื้นโลกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งหลักการของการระเหยของน้ำนี้ คือ เมื่อน้ำได้รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ส่งผลให้น้ำนั้นร้อน และเกิดการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง จึงเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ และลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ



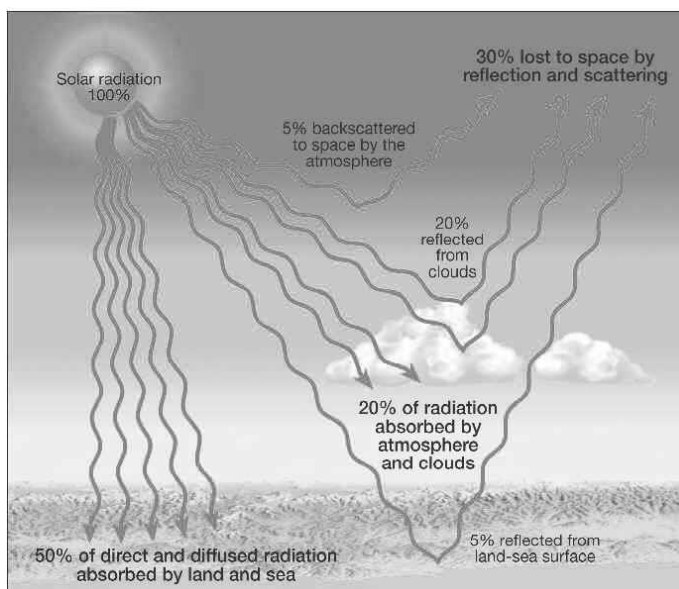
รูปที่ 3 วัฏจักรของน้ำ

ที่มา : [http://www.kanta.ac.th/media/sci/www.lesa.in.th/hydro/water\\_cycle/water\\_cycle.htm](http://www.kanta.ac.th/media/sci/www.lesa.in.th/hydro/water_cycle/water_cycle.htm)

### 2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

เป็นการถ่ายเทความร้อนทุกทิศทางที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงสามารถถ่ายเทความร้อนผ่านอวกาศได้ เช่น การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก วัตถุต่างๆสามารถดูดซับรังสีความร้อนได้ในปริมาณไม่เท่ากัน ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีความร้อนคือ สีผิวของวัตถุ ผิวของวัตถุ





รูปที่ 4 การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก

ที่มา : <http://www.kidsgeo.com/>

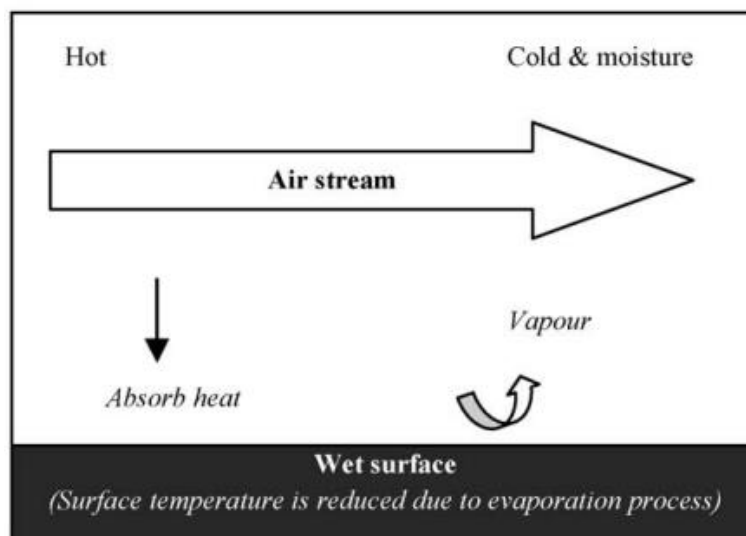
## 2.2 การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำ (evaporative cooling)

จากการศึกษาค้นคว้าของ Emad H. Amer ในปี 2005 เกี่ยวกับระบบปรับอากาศแบบธรรมชาติ (Passive Cooling) ที่มีประสิทธิภาพ พบว่า ระบบปรับอากาศแบบธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพที่สุดคือ การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำ (Evaporative Cooling) ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองได้ถึง 9.6 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอก

หลักการของการทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำนั้นคือการใช้การระเหยของน้ำเมื่อถูกความร้อน น้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำจากการดูดความร้อน และพาความร้อนออกจากหลังคา ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวหลังคาลดลง และปริมาณไอน้ำในอากาศมากขึ้น

ประเภทของการทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

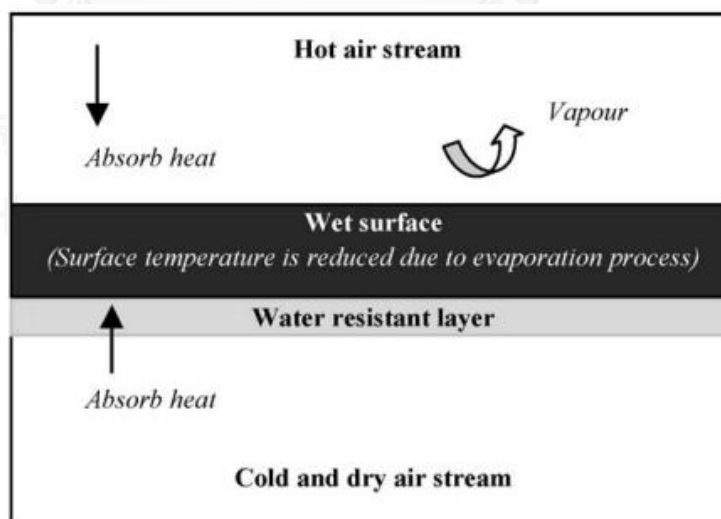
1. การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำโดยตรง (Direct Evaporative Cooling : DEC) เป็นการเปลี่ยนความร้อนสัมผัสของน้ำให้เป็นความร้อนแฝง ซึ่งส่งผลให้อากาศโดยรอบพื้นที่เย็นลงเนื่องจากการระเหยของน้ำเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 5 กระบวนการ Direct Evaporative Cooling

ที่มา : Chan Hoy-Yen, Riffat B. Saffa, Zhu Jie, 2010

2. การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำทางอ้อม (Indirect Evaporative Cooling : IEC) การทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำทางอ้อมนี้ต่างจากการทำความเย็นด้วยการระเหยของน้ำทางตรงคือ การทำความเย็นในรูปแบบนี้จะเกี่ยวข้องกับอากาศอีกส่วนหนึ่งซึ่งถูกแยกโดยกำแพงแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchange wall) โดยพื้นที่ที่เปียกจะรับความร้อนที่ส่งถ่ายผ่านพื้นที่อีกด้านที่แห้ง ทำให้ด้านที่แห้งนั้นมีอุณหภูมิพื้นผิวที่เย็นขึ้น



รูปที่ 6 กระบวนการ Indirect Evaporative Cooling

ที่มา : Chan Hoy-Yen, Riffat B. Saffa, Zhu Jie, 2010

## 2.3 การคายระเหย (evapotranspiration)

คือการรวมกันของสองกระบวนการที่ทำให้เกิดการระเหยของน้ำ ซึ่งคือการคายน้ำของพืช ผ่านปากใบ และการระเหยน้ำบริเวณพื้นผิวดิน (C. W. Thornthwaite, 1984) ซึ่งรายละเอียดของสองกระบวนการสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.3.1 การคายน้ำของพืช

โดยปกติหลักการทั่วไปของการคายน้ำของพืชนั้นคือ ในเวลากลางวันนั้นปากใบจะเปิดซึ่งมีสาเหตุมาจากเซลล์คุมที่อยู่ข้างใบ ทำให้เกิดการคายน้ำ ซึ่งสูญเสียน้ำออกมาในรูปแบบของการคายน้ำออกมาเป็นไอ และปากใบปิดในเวลากลางคืน ซึ่งการคายน้ำนั้น เป็นการสูญเสียน้ำที่คิดเป็นร้อยละ 80-90% ของการสูญเสียน้ำทั้งหมดของต้นไม้แต่ละต้น และการคายน้ำนั้นจะเกิดขึ้นที่บริเวณปากใบบริเวณใต้ใบมากที่สุด ซึ่งปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการคายน้ำ

1. ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น แสงสว่าง ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม อุณหภูมิอากาศโดยรอบ เป็นต้น
2. ปัจจัยจากลักษณะของพืช เช่น ลักษณะของใบ โครงสร้างลำต้น ชั้นคิวติเคิลของ พืช จำนวนใบ เป็นต้น

### 2.3.2 การระเหยของน้ำผ่านผิวดิน

เกิดจากการที่น้ำมีพลังงานความร้อนเพิ่ม ซึ่งทำให้เกิดการดูดกลืนความร้อน จึงทำให้น้ำที่แทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของดินเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊ส ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ

### 2.3.3 การวัดประสิทธิภาพการคายระเหยของน้ำ

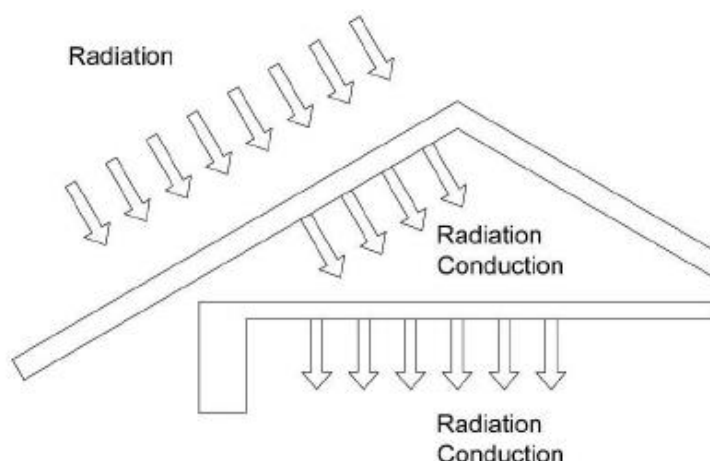
โดยทั่วไป วัดประสิทธิภาพการคายระเหยน้ำของพื้นที่ต่าง ๆ นั้น จะวัดจากค่าการคายน้ำรวมระเหยสูงสุด (potential evapotranspiration, PET) ซึ่งสามารถคำนวณจากค่าศักยภาพของการคายระเหยของน้ำด้วยการคำนวณโดยใช้สูตรการคำนวณของ C.W. Thornthwaite โดยเป็นการคำนวณจากจำนวนชั่วโมงที่มีแสงสว่าง เพื่อทำการประมาณประสิทธิภาพของการคายระเหยของน้ำ โดยผลการคำนวณจะเป็นค่าศักยภาพของการคายระเหยน้ำรายเดือน

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการคายระเหยของน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการคายระเหยของน้ำที่มีผลมากที่สุดคือรังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการระเหยของน้ำ และความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืช ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการคายระเหยน้ำ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ปริมาณน้ำในดิน และชนิดของดิน

## 2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา

หลังคานั้นเป็นส่วนประกอบของอาคารที่ได้รับความร้อนมากที่สุดในแต่ละวัน โดยการถ่ายเทความร้อนจากอากาศภายนอกสู่ภายในอาคารผ่านหลังคานั้น เริ่มจากการที่รังสีดวงอาทิตย์แผ่รังสีความร้อนผ่านชั้นอวกาศมายังโลก และเมื่อรังสีความร้อนเดินทางมาถึงหลังคา หลังคาจะดูดซับความร้อนไว้และถ่ายเทความร้อนผ่านผิวหลังคาด้านนอกสู่ผิวหลังคาด้านใน หลังจากนั้นความร้อนจะส่งถูกส่งผ่านไปยังช่องว่างระหว่างหลังคา (Attic) และถ่ายเทความร้อนต่อไปยังฝ้าเพดาน (Ceiling) และสุดท้ายรังสีความร้อนจะส่งไปยังพื้นที่ภายในห้อง ส่งผลให้อุณหภูมิของห้องมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 7 การถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังภายในห้อง

(ที่มา : พงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์, 2554)

## 2.5 แหล่งความร้อนที่เข้าสู่อาคาร

แหล่งความร้อนต่างๆที่เข้าสู่อาคารนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แหล่ง คือ

1. ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคาร (Internal Heat Gain) ซึ่งเป็นแหล่งความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าและอุปกรณ์แสงสว่างภายในอาคาร อีกทั้งความร้อนจากตัวผู้ที่ใช้สอยอาคาร โดยที่อาคารแต่ละประเภทจะมีปริมาณการใช้พลังงานในแต่ละที่ไม่เท่ากัน

2. ความร้อนที่เกิดขึ้นภายนอกอาคาร (External Heat Gain) ซึ่งแหล่งความร้อนที่มีสัดส่วนมากที่สุด คือ ความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งส่วนประกอบของอาคารที่สามารถถ่ายเทความร้อนจากบริเวณนอกอาคารสู่บริเวณในอาคาร คือ

2.1 ความร้อนจากช่องเปิด เช่น หน้าต่าง ประตู

2.2 ความร้อนจากผนัง และหลังคา

## 2.6 ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index: LAI)

ดัชนีพื้นที่ใบ เป็นการวัดค่าเชิงปริมาณซึ่งแสดงให้เห็นถึงจำนวนชั้นของใบที่ปกคลุมพื้นที่ในขณะที่ยังเจริญเติบโต ซึ่งสามารถแสดงได้โดยการหาสัดส่วนของพื้นที่ใบต่อพื้นที่ใบไม้ปกคลุมอยู่ (Beadle C.L., 1993) ซึ่งผู้ที่ใช้ทฤษฎีดัชนีพื้นที่ใบเป็นคนแรกคือ Watson ในปี 1952 โดยการนำค่าพื้นที่ใบที่ปกคลุมพื้นผิวหารด้วยพื้นที่ปลูกตัวอย่าง ดังสมการเบื้องต้นคือ

$$\text{ดัชนีพื้นที่ใบ} = \frac{\text{พื้นที่ใบ}}{\text{พื้นที่ปลูกตัวอย่าง}} \quad (\text{หน่วย : ตารางเมตรต่อตารางเมตร})$$

หากต้องการคำนวณหาดัชนีพื้นที่ใบด้วยการใช้เครื่องมือ สามารถใช้เครื่องมือ Licor LAI 2000 ซึ่งอาศัยหลักการการส่องผ่านของแสงจากยอดทรงพุ่มต้นไม้สู่ตัวดักจับแสงบริเวณตัวเครื่องเพื่อคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ใบ

## 2.7 หลังคาเขียว (Green Roof)

หลังคาเขียว คือ หลังคาที่มีจุดประสงค์หลักคือการช่วยป้องกันความร้อนผ่านเข้าสู่อาคารทางหลังคา โดยมีพืชพรรณต่างๆปลูกอยู่อยู่บนชั้นดิน ซึ่งหลังคาเขียวนั้น ในทางเทคโนโลยี หลังคาเขียวคือ สถาปัตยกรรมที่ใช้เทคโนโลยีและวัสดุก่อสร้างสมัยใหม่ที่มีคุณสมบัติในการช่วยลดอุณหภูมิและการใช้พลังงานรวมภายในอาคาร ถือเป็นลักษณะของลักษณะของสถาปัตยกรรมสีเขียว (Green Architecture) ที่ให้ความสำคัญถึงการออกแบบที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.7.1 จุดกำเนิดของหลังคาเขียว

หลังคาเขียวเกิดขึ้นจากสาเหตุที่ปัจจุบันพื้นที่ส่วนใหญ่ในเมืองมักเป็นพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ปลูกสร้างอาคาร ทำให้พื้นที่สีเขียวในเมืองค่อยๆลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่ต้องการสร้างพื้นที่สีเขียวเพิ่มขึ้น ซึ่งพื้นที่ที่สามารถเพิ่มพื้นที่สีเขียวได้คือพื้นที่ดาดฟ้าของอาคาร ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะสร้างหลังคาเขียวขึ้น โดยยุคสมัยแรกของหลังคาเขียวคือการนำกระถางต้นไม้มาวางบนพื้นที่หลังคา แต่ผลของการนำกระถางต้นไม้มาวางบริเวณ

พื้นที่ดาดฟ้านั้นมีผลในการช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสู่อาคารน้อย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบหลังคาเขียวโดยการก่อสร้างพื้นที่ดาดฟ้าเป็นพื้นที่ปลูกพืชพรรณต้นไม้ ซึ่งมีระบบการรดดูแลรักษาต้นไม้ เช่น การรดน้ำต้นไม้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดแนวคิดการก่อสร้างหลังคาเขียว คือ การลดลงของพื้นที่รับน้ำเนื่องจากการลดลงของพื้นที่สีเขียว ซึ่งทำให้เกิดน้ำขังอยู่บนพื้นที่ดาดแข็ง ทำให้น้ำไม่สามารถระบายได้

## 2.7.2 ประเภทของหลังคาเขียว

โดยหลังคาเขียวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Extensive Green Roof เป็นหลังคาเขียวที่ไม่สามารถเข้าไปใช้งานได้ โดยลักษณะของหลังคาเขียวชนิดนี้จะมีคุณสมบัติคือ น้ำหนักเบา ใช้เงินลงทุนน้อย ความหลากหลายของพืชที่ปลูกน้อย ต้องการการดูแลรักษาบ่อย โดยหลังคาชนิดนี้จะมีน้ำหนัก 1,500-3,000 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 8 หลังคาแบบ Extensive green roof บริเวณหลังคาลานจอดรถในประเทศเยอรมัน  
ที่มา : <http://greeningthecity.files.wordpress.com/2008/07/01-xeroflojapan1.jpg>

2. Intensive Green Roof คือหลังคาเขียวที่สามารถเข้าไปใช้งานบริเวณหลังคาได้ ลักษณะของหลังคาชนิดนี้คือ มีน้ำหนักมาก ใช้เงินลงทุนมาก ความหลากหลายของพืชมากกว่าหลังคาชนิด Extensive Roof และต้องการการบำรุงรักษามากกว่า



รูปที่ 9 หลังคาแบบ Intensive green roof

ที่มา : <http://www.thacityfarm.com/autopagev4/spaw2/uploads/images/green%20roof/intensive-green-roof1.jpg>

การเลือกใช้ประเภทของหลังคาเขียวนั้น ควรเลือกใช้หลังคาเขียวให้เหมาะสมกับโครงสร้างอาคาร จำนวนผู้ใช้สอย งบประมาณ ที่ตั้งอาคาร และการเลือกใช้พรรณไม้ที่จะทำมาปลูกบริเวณอาคารต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อม

### 2.7.3 ประโยชน์ของหลังคาเขียว

#### 1. ประหยัดพลังงาน

หลังคาเขียวช่วยลดการถ่ายเทความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์เข้าสู่อาคาร เนื่องจากหลังคาเขียวมีความชื้น ทำให้เกิดการคายระเหยของน้ำ (evaporative cooling) ซึ่งน้ำที่อยู่ภายในหลังคาเขียวจะช่วยพาความร้อนออกจากหลังคา ช่วยให้หลังคาเย็นขึ้น

#### 2. เป็นสิ่งป้องกันโครงสร้างหลังคา

หลังคาเขียวสามารถป้องกันความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งอาจส่งผลให้โครงสร้างหลังคาเกิดการแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิที่ผันผวนตลอดทั้งวัน

#### 3. เป็นฉนวนกันเสียง

ชั้นของดินบริเวณหลังคาเขียวช่วยเป็นฉนวนป้องกันเสียงที่มีความถี่สูง โดยมีงานวิจัยกล่าวว่าความหนาของชั้นดิน 12 เซนติเมตร สามารถลดความดังของเสียงได้ 40 เดซิเบล

#### 4. ป้องกันไฟ

หลังคาเขียวสามารถป้องกันการลามไฟหากเกิดไฟไหม้บริเวณหลังคา เนื่องจากความชื้นของดินสามารถช่วยลดโอกาสการลามไฟ แต่หากมีพืชที่มีกิ่งก้านแผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นที่หลังคา อาจทำให้เกิดการลามไฟ ดังนั้นจึงควรสร้างพื้นที่ที่รอบหลังคาที่ไม่มีคุณสมบัติการลามไฟล้อมรอบพื้นที่หลังคาเขียว ซึ่งควรมีความกว้างประมาณ 60 เซนติเมตรทุกๆ 40 เมตร รอบกรอบพื้นที่หลังคาเขียว หรือควรใช้พืชพรรณที่มีคุณสมบัติหน่วงเหนี่ยวไฟ เช่นพืชชนิด sedums ซึ่งเป็นพืชที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบหลัก หรือระบบหัวฉัตรต้นไม้ควรติดตั้งให้มีความต่อเนื่องกับระบบป้องกันอัคคีภัย

#### 2.7.4 ข้อจำกัดของหลังคาเขียว

หลังคาเขียวมีข้อจำกัดบางประการ คือ

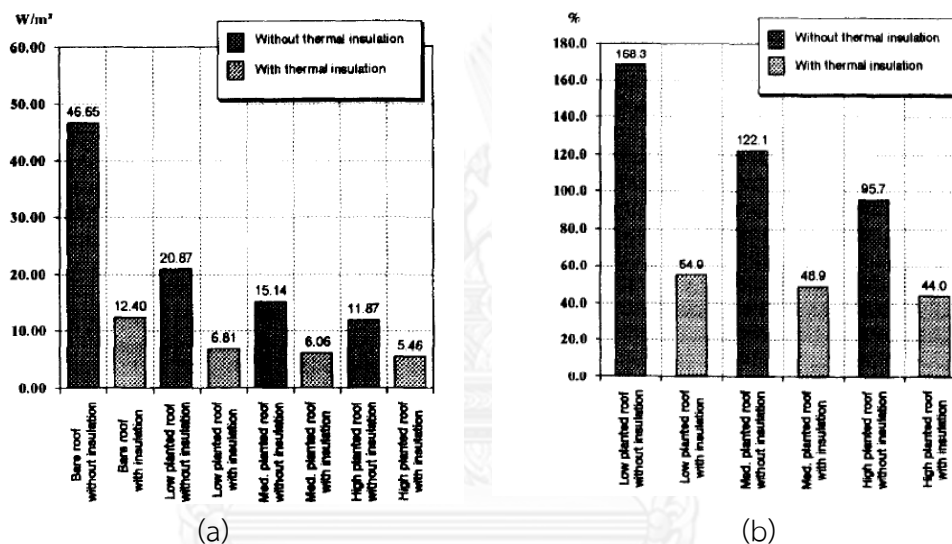
1. ควรเลือกชนิดของพืชปลูกคลุมหลังคาให้มีขนาดเหมาะสม ไม่มีรากชอนไชหรือมีโครงสร้างของพืชหล่นลงมาจากต้นสร้างความเสียหายให้แก่อาคารและผู้ใช้สอย ควรใช้พืชที่มีความทนทาน เนื่องจากพืชคลุมหลังคาจะโดนแดดเต็มที
2. ควรคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น ทำให้อุณหภูมิในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนมีความแตกต่างกันค่อนข้างเห็นได้ชัด อาจส่งผลให้น้ำเกิดการควบแน่น และการกลายเป็นหยดน้ำส่งผลต่อโครงสร้างอาคาร หรือความเร็วลม ณ บริเวณพื้นที่หลังคา ซึ่งหากหลังคาเขียวเป็นหลังคาที่ปลูกไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ หากมีลมพัดแรง อาจทำให้ชิ้นส่วนของพืชตกลงมาทำให้ผู้ใช้สอยพื้นที่ได้รับอันตรายได้
3. ควรคำนึงถึงน้ำหนักรวมของหลังคาเขียวโดยรวม เพื่อการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม ซึ่งบางครั้งอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องออกแบบโครงสร้างหลังคาให้รองรับน้ำหนักหลังคาเขียว หรือระบบการจัดการเกี่ยวกับการกันซึมของหลังคา เนื่องจากหลังคาเขียวนั้นต้องมีการรดน้ำตลอดเวลา หากระบบกันซึมไม่มีประสิทธิภาพพอ อาจเกิดปัญหาการรั่วซึมของน้ำสู่ภายในอาคารได้
4. ค่าก่อสร้างหลังคาเขียวใช้ค่าก่อสร้างมากกว่าหลังคาปกติค่อนข้างมาก ดังนั้นหากต้องการก่อสร้างหลังคาเขียว ควรศึกษาปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์และการใช้พลังงานรวม เพื่อออกแบบหลังคาเขียวมีประสิทธิภาพในการช่วยลดพลังงานรวมให้ได้มากที่สุด (กมลภัทร์ โรจนประดิษฐ์, 2552)



การศึกษาเกี่ยวกับหลังคาเขียวในประเทศไทยยังมีการค้นคว้าศึกษาเพิ่มเติมไม่มากนัก บางครั้งผลกระทบที่ตามมาอาจมีผลกระทบไม่ตรงกับข้อจำกัดต่างๆที่กำหนดมาข้างต้น

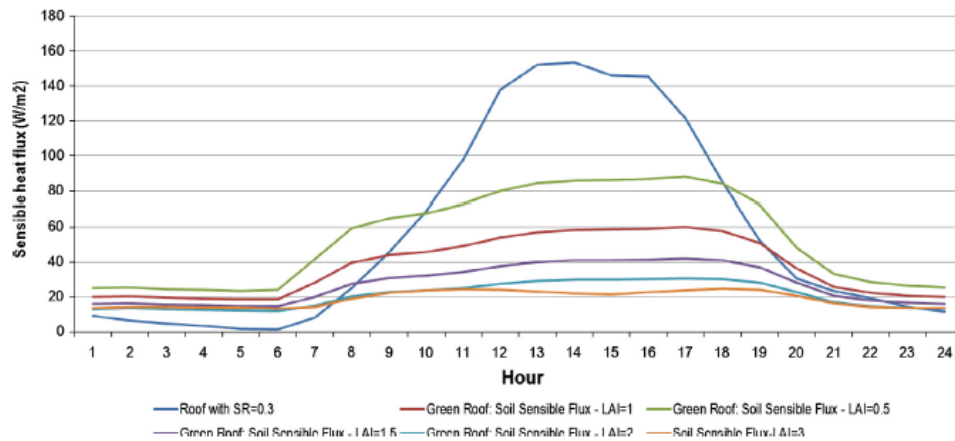
## 2.8 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทดลองวัดอุณหภูมิที่ลดลงของอาคาร ณ ประเทศกรีซ (The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece) (Ekaterini Eumorfopoulou & Dimitr Aravantinos, 1998) พบว่า หลังคาเขียวสามารถลดอุณหภูมิได้เฉลี่ยประมาณ 3 องศาเซลเซียส ในทุกความสูงของพืช ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิโดยรอบอาคารลดลง



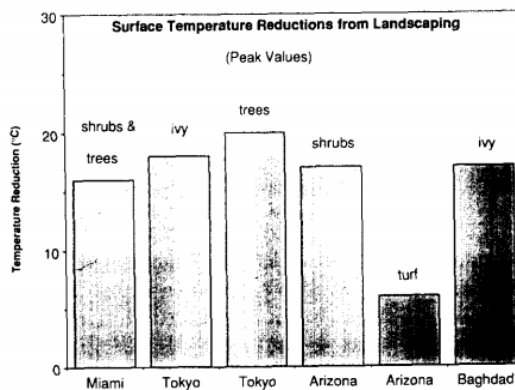
แผนภูมิที่ 1 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณความร้อนถ่ายเทจากหลังคาที่ลดลงในแต่ละประเภทของหลังคาเขียวที่มีความสูงของพืชต่างกัน (a) แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิของหลังคาเขียวมีความสูงของพืชต่างกันเมื่อเทียบกับหลังคาที่นำมาเป็น Baseline (b)

งานวิจัยหลังคาเขียวต่อการลดภาวะเกาะร้อนบริเวณอาคารสำนักงานในทวีปยุโรปในสภาพอากาศที่แปรเปลี่ยนได้ (Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions) (D. Kolokotsa, M. Santamouris, & S.C. Zerefos, 2013) ได้ศึกษาค่าปริมาณความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่สัมผัสได้ (Sensible Heat Flux) ของหลังคาเขียวประเภทต่างๆที่มีดัชนีใบต่างกัน โดยกำหนดให้ดัชนีใบมีค่าตั้งแต่ 1-2 โดยเมื่อพิจารณาค่า Sensible Heat Flux พบว่าค่า Sensible Heat Flux ลดลงโดยแปรผกผันกับค่าดัชนีใบ ซึ่งค่าที่ลดลงในแต่ละ case คิดเป็น 20-25%

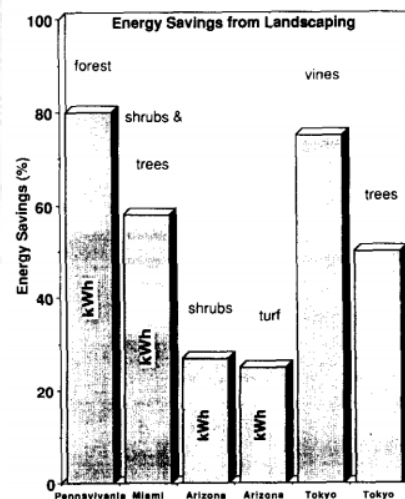


แผนภูมิที่ 2 แผนภูมิเส้นแสดงค่า Sensible Heat Flux รายชั่วโมงของหลังคาเขียวแต่ละประเภทที่มีค่าดัชนีใบ (LAI) ต่างกัน

การศึกษาวรรณกรรมเกี่ยวกับสถิติของการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศ ในกรณีของหลังคาเขียว (Strategic landscaping and air-conditioning savings: a literature review) (Mier AK, 1991) แสดงให้เห็นว่าการลดอุณหภูมิพื้นผิวของอาคารโดยการใช้หลังคาไม้พุ่ม ไม้ยืนต้น สามารถลดการใช้พลังงานเพื่อการปรับอากาศได้สูงสุดถึง 80% และค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 25-50%



(a)

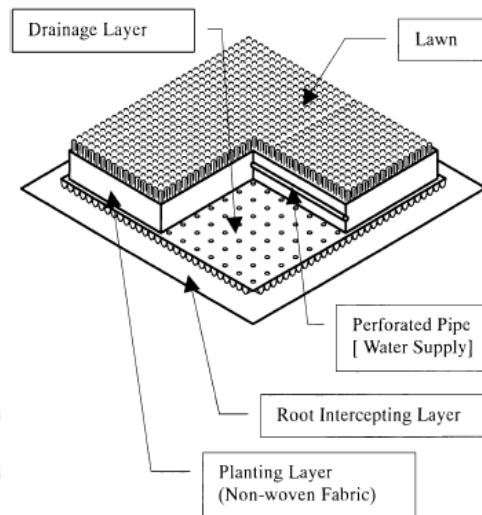


(b)

แผนภูมิที่ 3 แผนภูมิแท่งแสดงการลดอุณหภูมิพื้นผิวของหลังคาเขียวแต่ละชนิด (a) แผนภูมิแสดงร้อยละของพลังงานที่ประหยัดได้จากหลังคาเขียวแต่ละชนิด (b)

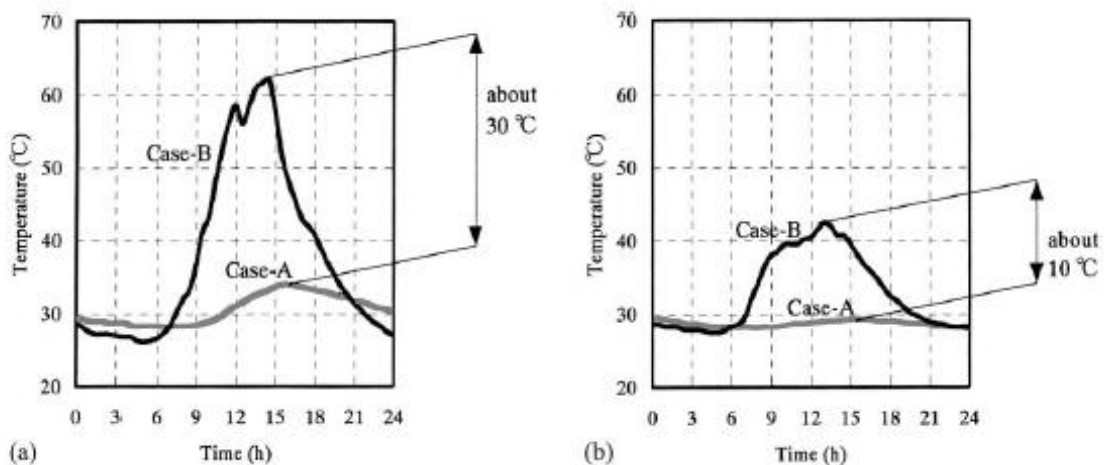
งานวิจัยประสิทธิภาพของการระเหยน้ำในหลังคาเขียว (Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens) (Onmura S, Matsumoto M, & Hokoi S, 2001) เป็นการ

เปรียบเทียบหลังคาคอนกรีตเปล่าเปลือย (กรณี A) เทียบกับหลังคาคอนกรีตที่มีการเพิ่มชั้นของหลังคาเขียว (กรณี B)

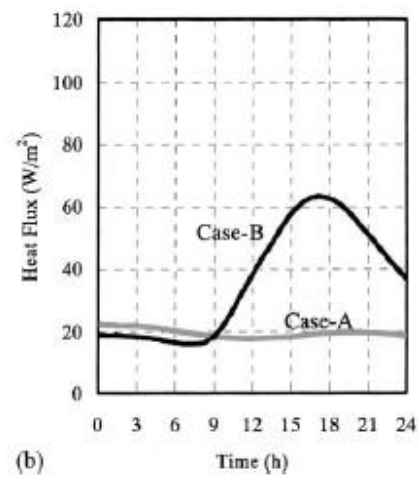
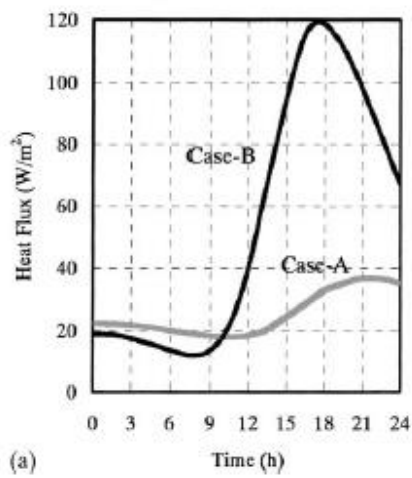


รูปที่ 10 ภาพแสดงส่วนประกอบของหลังคาเขียวที่นำมาเป็นวัสดุคุมหลังคาคอนกรีต

จากการทดลองเพื่อหาความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังคา และการคำนวณหาค่า Heat flux ของหลังคาทั้ง 2 กรณี พบว่า หลังคากรณี B สามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวหลังคา จาก 60 องศาเซลเซียสเหลือเพียง 30 องศาเซลเซียส และลดค่าปริมาณความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) ได้มาก เมื่อเทียบกับหลังคากรณี a



แผนภูมิที่ 4 แผนภูมิเส้นแสดงอุณหภูมิพื้นผิวของหลังคาแต่ละชนิด โดยที่ ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 12 สิงหาคม (a) ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 20 สิงหาคม (b)



แผนภูมิที่ 5 แผนภูมิเส้นแสดงผลการคำนวณค่า Heat flux ของหลังคาแต่ละชนิด โดยที่ ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 12 สิงหาคม (a) ทำการวัดอุณหภูมิหลังคา ณ วันที่ 20 สิงหาคม (b)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แนวทางการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการกันความร้อนของหลังคาเขียวแต่ละประเภทที่มีจำนวนครั้งในการรดน้ำต่างกัน โดยทำการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (transmission coefficient-U-value) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าการนำความร้อน (k) โดยการนำสูตรการคำนวณทางคณิตศาสตร์ และนำค่า k ที่ได้ของหลังคาเขียวแต่ละประเภทมาจำลองเป็นหลังคาแต่ละประเภทของอาคารที่มีช่วงเวลากการใช้สอยต่างกันด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 เพื่อหาผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี จากนั้นนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของหลังคาแต่ละประเภทต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี ( $\text{kWh/m}^2\text{-year}$ ) และทำการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยคำนวณค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้น และค่าบำรุงรักษาอาคารที่เพิ่มขึ้นในแต่ละกรณีศึกษา เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุนเชิงเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้และบำรุงรักษาหลังคาเขียวแต่ละประเภทให้เหมาะสมกับประเภทของอาคารแต่ละอาคารต่อไป

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

3.2.1 การวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลองประสิทธิภาพของหลังคาเขียวประเภทต่างๆ และทำการวัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆที่กำหนดไว้โดยใช้เครื่องมือ Thermocouple Type K พร้อมสายเซนเซอร์

3.2.2 การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม VisualDOE4.0 ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมง และค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารกรณีศึกษา ได้แก่ อาคารสำนักงาน และอาคารร้านค้า

#### 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลทางวิชาการด้วยการค้นคว้าจากแหล่งความรู้ต่างๆ เช่น ห้องสมุด อินเทอร์เน็ต และศึกษาวรรณกรรมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับหลังคาเขียว เพื่อกำหนดแนวทาง และรูปแบบที่เกี่ยวข้องกับหลังคาเขียว อีกทั้งศึกษาลักษณะพื้นฐานของอาคารแต่ละประเภทที่นำมาเป็นกรณีศึกษา เพื่อกำหนดค่าการใช้สอยต่างๆในโปรแกรมที่นำมาประมวลผลค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม

### 3.4 กำหนดตัวแปรในงานวิจัย

#### 3.4.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกล่องทดลอง

##### 3.4.1.1 ตัวแปรต้น

- ชนิดของวัสดุและพืชที่ปกคลุมหลังคา
- ประเภทของอาคาร
- ประเภทของอาคาร (รดน้ำหลังคา 3 ครั้งต่อวัน, รดน้ำหลังคา 2 ครั้งต่อวัน)

##### 3.4.1.2 ตัวแปรตาม

- ความสามารถในการการกักเก็บความร้อน
- ความสามารถในการต้านทานความร้อน
- อุณหภูมิที่ต่างกัน ณ จุดที่ทำการทดลอง ณ ช่วงเวลาต่างๆ
- ความสามารถในการระเหยของน้ำของหลังคาแต่ละชนิด

##### 3.4.1.3 ตัวแปรควบคุม

- ปริมาณน้ำที่รด
- ตำแหน่งและทิศทางของกล่องทดลอง

#### 3.4.2 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0

##### 3.4.2.1 ตัวแปรต้น

- ประเภทของอาคารปรับอากาศ

##### 3.4.2.2 ตัวแปรตาม

- อัตราการคืนทุน
- พลังงานไฟฟ้ารวมต่อปี
- สัดส่วนของประเภทพลังงานที่ใช้ต่อปี

##### 3.4.2.3 ตัวแปรควบคุม

- รูปร่างอาคาร
- เภมท์ที่นำมาใช้เป็นมาตรฐานในการวิเคราะห์

### 3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

#### 3.5.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

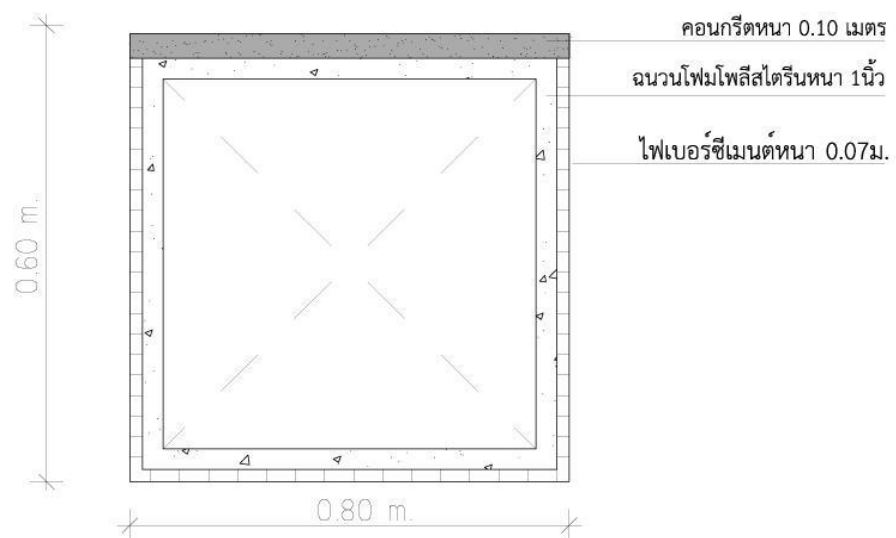
ศึกษาทฤษฎี แนวคิด และหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร ประเภทของการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร คุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คุณสมบัติของพืชแต่ละชนิดที่นำมาเป็นพืชคลุมหลังคา ปริมาณน้ำที่นำมารดหลังคาเขียว ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับหลังคาเขียว การคำนวณค่าไฟฟ้าและน้ำประปา แนวทางการบำรุงรักษาหลังคาเขียว และแนวทางการคำนวณระยะเวลาการคืนทุนของหลังคาแต่ละเขียวประเภท

### 3.5.2 กำหนดรูปแบบของหลังคาแต่ละประเภท

ในการศึกษาหาค่าการนำความร้อน (k) ของหลังคาแต่ละประเภท ซึ่งแบ่งหลังคาออกเป็น 2 รูปแบบหลัก คือ

#### 3.5.2.1 หลังคาที่เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ (baseline)

ในงานวิจัยนี้ใช้หลังคาคอนกรีตที่มีความหนา 0.10 เมตร เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความสามารถในการถ่ายเทความร้อนกับหลังคาประเภทอื่น



รูปที่ 11 ภาพจำลองกล่องคอนกรีต (Baseline)



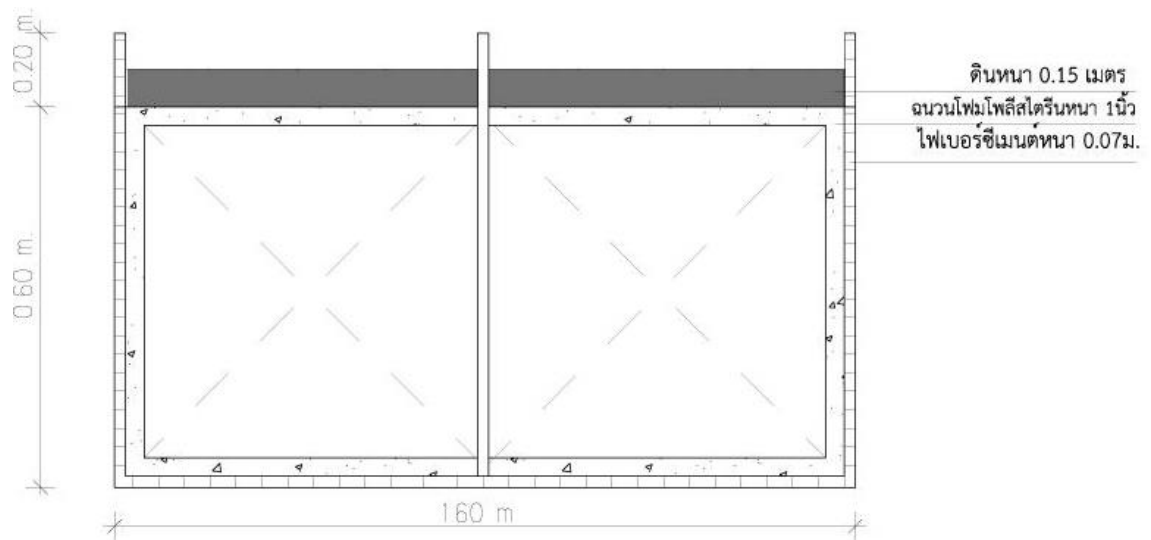
รูปที่ 12 ภาพกล่องคอนกรีต (Baseline)

### 3.5.2.2 หลังคาที่มีการรดน้ำหลังคา

หลังคาที่มีการรดน้ำหลังคามีทั้งหมด 3 ชนิดหลังคา ได้แก่ หลังคาดินที่มีความหนาชั้นดิน 0.15 เมตร และหลังคาเขียวปลูกบนชั้นดินหนา 0.15 เมตร โดยหลังคาเขียวจะแบ่งพืชพรรณที่ปลูกบนหลังคาเป็น 2 ลักษณะใบ คือ หลังคาหญ้า และหลังคาไม้เลื้อย ซึ่งจากงานทบทวนวิจัยเกี่ยวกับค่าดัชนีใบต่อความสามารถในการลดค่าการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย (Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions) (D. Kolokotsa et al., 2013) แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของพื้นที่ใบต่อการลดการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงได้เลือกหญ้ามะนิลา ซึ่งมีลักษณะใบที่เรียวยาว เป็นพืชปกคลุมหลังคาหญ้า และเลือกใช้ว่านเสน่ห์จันทร์เขียว ที่ลักษณะใบมีความกว้าง เป็นพืชปกคลุมหลังคาไม้เลื้อย เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาเขียวแต่ละชนิด



## 1. หลังคาดิน

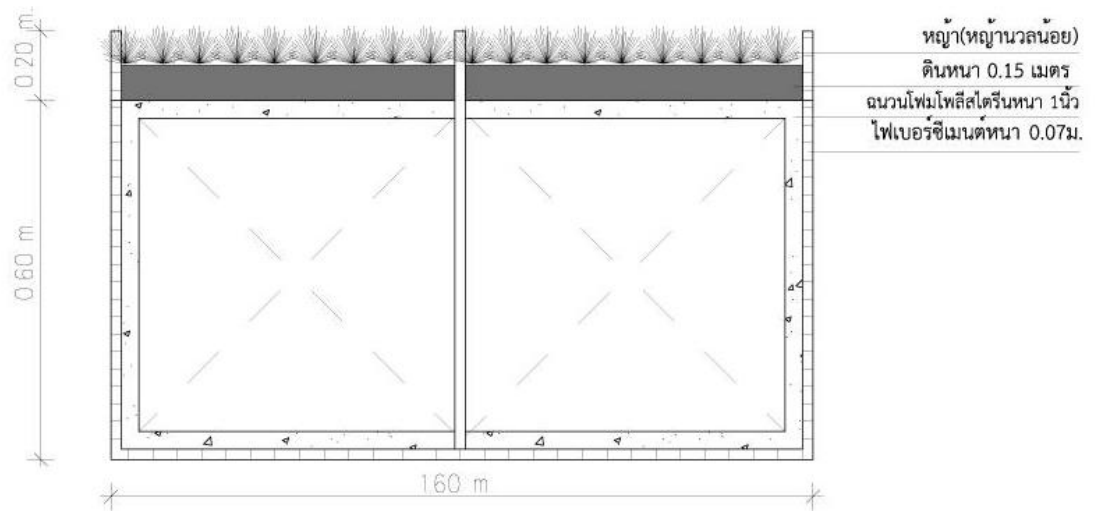


รูปที่ 13 ภาพจำลองกล่องหลังคาดินหนา 0.15เมตร



รูปที่ 14 ภาพกล่องหลังคาดินหนา 0.15เมตร

## 2. หลังคาหญ้า

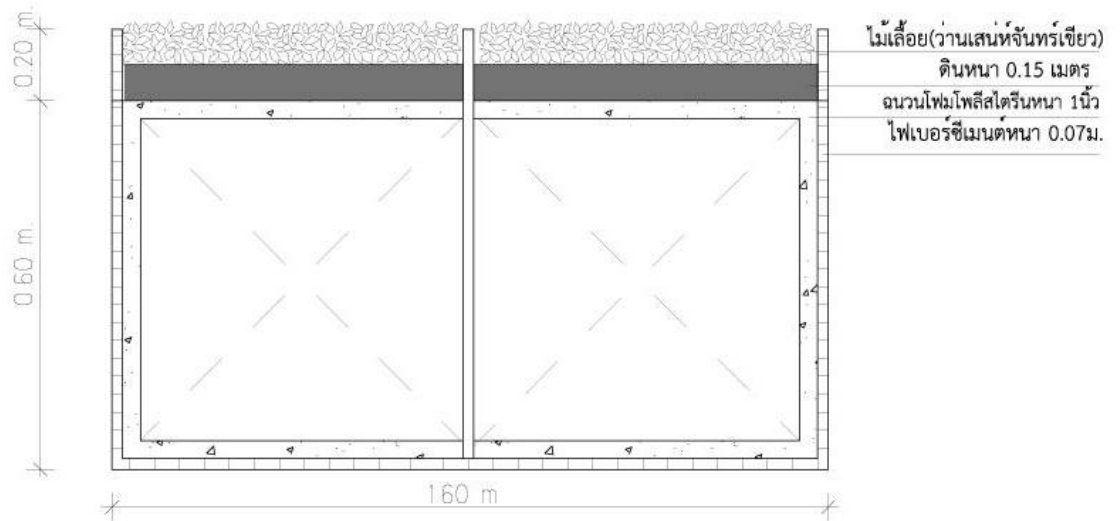


รูปที่ 15 ภาพจำลองกล่องหลังคาหญ้า (หญ้านวลน้อย)



รูปที่ 16 ภาพกล่องหลังคาหญ้า (หญ้านวลน้อย)

3. หลังคาไม้เลื้อยขนาดเล็ก ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกว่านเสนห์จันทร์เขียว  
เป็นพืชที่ปลูกบนหลังคา



รูปที่ 17 กล่องจำลองหลังคาไม้เลื้อย (ว่านเสนห์จันทร์เขียว)



รูปที่ 18 กล่องหลังคาไม้เลื้อย (ว่านเสนห์จันทร์เขียว)

### 3.5.3 การรดน้ำหลังคา

การรดน้ำหลังคาจะรดน้ำต้นไม้ครั้งละ 4 ลิตร ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการรดน้ำหลังคาในแต่ละครั้ง (บรรจง สมบูรณ์ชัย และทวี ตันหลี่, 2547)

โดยแบ่งการรดน้ำต้นไม้ออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

- การรดน้ำต้นไม้ 2 ครั้งต่อวัน คือ 8.00น. และ 17.00น.
- การรดน้ำต้นไม้ 3 ครั้งต่อวัน คือ 8.00น. 12.00น. 18.00น.

ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการรดน้ำหลังคาเขียวที่ส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้ารวมลดลงซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงานรวมลดลง



รูปที่ 19 การวางตำแหน่งกล่องทดลองแต่ละกล่อง ณ บริเวณพื้นที่ทำการทดลอง

### 3.5.4 ทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละประเภทด้วยกล่อง

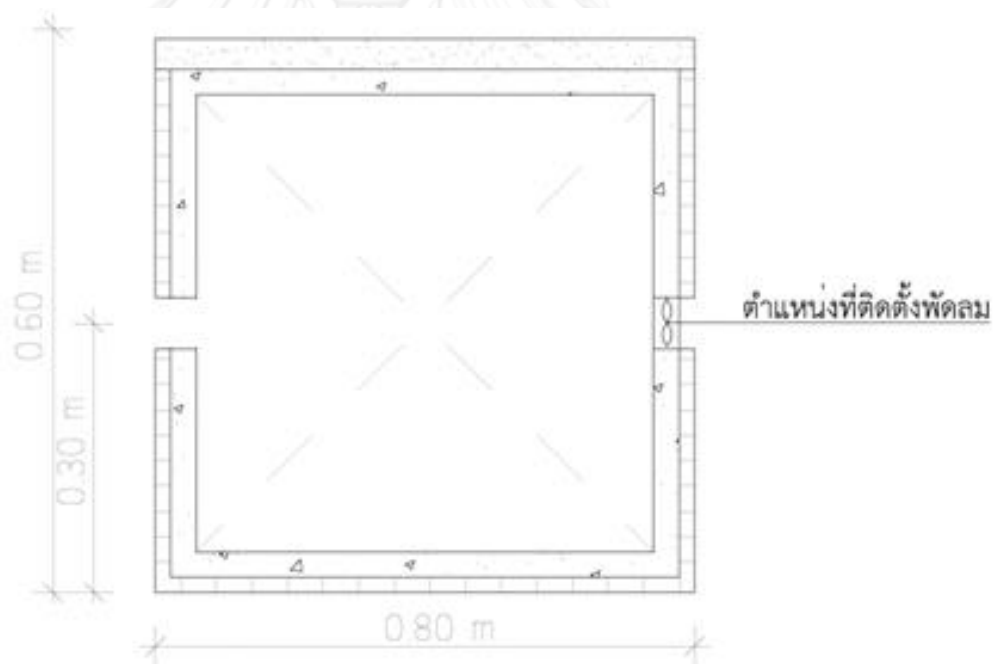
ทดลอง

ทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลองขนาด  $0.8 \times 0.8 \times 0.6$  เมตร ซึ่งผนังของกล่องทดลองทุกด้านยกเว้นหลังคาทำด้วยไฟเบอร์ซีเมนต์ และกรูฉนวนโฟมโพลีสไตรีนหนา 1 นิ้วเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งด้านหนึ่งของผนังเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว สูงจากพื้นกล่องทดลอง 0.30 เมตร เพื่อติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่มีอัตราการระบายอากาศ เท่ากับ 20.89 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที



รูปที่ 20 พัดลมดูดอากาศ

เจาะรูขนาดเท่าเดิมบริเวณผนังในฝั่งตรงข้ามของพัดลมดูดอากาศ โดยด้านที่ติดตั้งพัดลมดูดอากาศนั้นจะเป็นด้านที่ดูดอากาศออกจากกล่องทดลอง และด้านที่ไม่ได้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศเป็นด้านลมเข้า ซึ่งสามารถแสงแบบจำลองได้ดังภาพที่ 3.11



รูปที่ 21 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งพัดลมดูดอากาศ

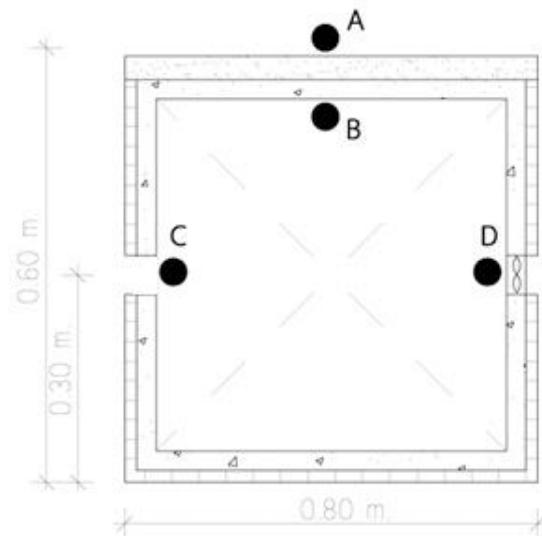
กล่องทดลองทุกกล่องจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส ทุกๆ 10 นาทีในแต่ละจุดที่กำหนดไว้เป็นเวลา 3 วัน 2 คืนโดยใช้เครื่องมือ Thermocouple Type K พร้อมสายเซนเซอร์



รูปที่ 22 Thermocouple Type K พร้อมสายเซนเซอร์

เก็บค่าอุณหภูมิ และนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้ไปคำนวณโดยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (U-Value) และนำไปหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (k) เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 ต่อไป

ตำแหน่งที่ทำการเก็บอุณหภูมิมีทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ



รูปที่ 23 ตำแหน่งที่ทำการเก็บอุณหภูมิของกล่องทดลอง

ซึ่ง	ตำแหน่ง A	คือ	บนหลังคา ( $T_o$ )
	ตำแหน่ง B	คือ	ใต้หลังคา ( $T_i$ )
	ตำแหน่ง C	คือ	ช่องลมเข้า ( $T_{inlet\ air}$ )

ตำแหน่ง D คือ ช่องลมออก ( $T_{\text{outlet air}}$ )

ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิที่เก็บได้แสดงผลในรูปของแผนภูมิเส้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเบื้องต้นของหลังคาแต่ละประเภท และแสดงผลในรูปแบบของตาราง เพื่อนำมาคำนวณด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน (U-Value) เพื่อนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 ต่อไป

### 3.5.5 การคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (U-Value)

หลังจากเก็บค่าอุณหภูมิในแต่ละจุดตามที่กำหนดไว้ นำค่าอุณหภูมิที่ได้มาเข้าสู่ตรรกศาสตร์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาพลังงานความร้อน โดยยึดหลักที่ว่า พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่กล่องทดลองโดยผ่านหลังคา เท่ากับพลังงานความร้อนที่ระบายออกด้วยพัดลมดูดอากาศออก ซึ่งสามารถเขียนรูปแบบของพลังงานความร้อนที่เข้าสู่อาคารในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

#### 3.5.5.1 พลังงานความร้อนที่เข้าสู่อาคารผ่านหลังคา คือ

$$Q_1 = U \cdot A \cdot (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

โดยที่	$Q_1$	คือ	พลังงานความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในกล่องทดลอง (BTU/hr)
	U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (BTU/hr·ft <sup>2</sup> ·°F)
	A	คือ	พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งหมายถึง พื้นที่หลังคาบริเวณกล่องทดลอง(ft <sup>2</sup> )
	$T_{\text{out}}$	คือ	พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งหมายถึง พื้นที่บนหลังคา (°F)
	$T_{\text{in}}$	คือ	พื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งหมายถึง พื้นที่ใต้หลังคา (°F)

#### 3.5.5.2 พลังงานความร้อนที่ระบายออกมาจากกล่องทดลองด้วยพัดลมระบายอากาศ

$$Q_2 = 1.08 \cdot \text{CFM} \cdot (T_{\text{outlet}} - T_{\text{inlet}}) \quad (4)$$

โดยที่	$Q_2$	คือ	พลังงานความร้อนระบายออกจากกล่องทดลองด้วยพัดลมระบายอากาศ (BTU/hr)
	CFM	คือ	ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลอง ที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศ (ft <sup>3</sup> /minute)

$T_{inlet\ air}$  คือ อุณหภูมิวัด ณ ช่องอากาศเข้า (°F)

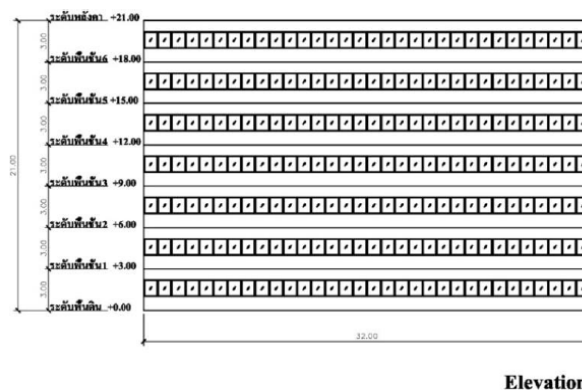
$T_{outlet\ air}$  คือ อุณหภูมิวัด ณ ช่องอากาศออก (°F)

### 3.5.6 ศึกษารูปแบบของอาคารที่นำมาจำลองผลการใช้พลังงานรวมด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

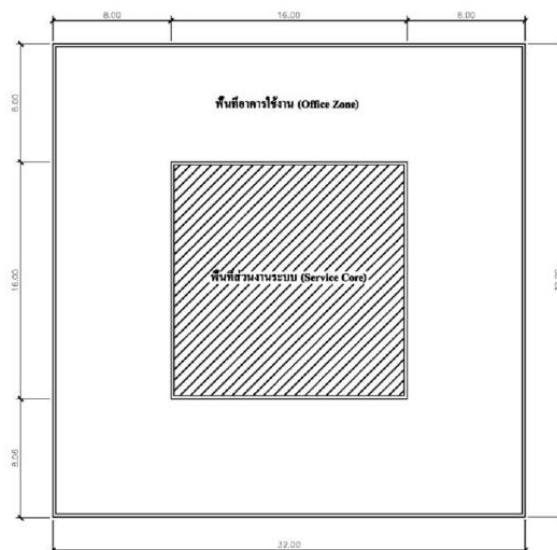
จากการศึกษาทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับลักษณะอาคารที่ต้องการจำลองการใช้พลังงานรวมภายในอาคาร พบว่าจากรวบรวม A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. (Sittipong Permpituck & Pichai Namprakai, 2012) ได้แสดงลักษณะอาคารต้นแบบ (Reference Building) ของอาคารประเภทต่างๆ โดยแนวทางในการจำลองผลการใช้พลังงานรวมของอาคารแต่ละประเภทซึ่งมีหลังคาต่างประเภทกันนั้นจะนำข้อมูลอาคารในเบื้องต้นมาทำการวิเคราะห์ และตัดแปลงข้อมูลให้เหมาะสมกับการใช้งานอาคารในปัจจุบัน เพื่อนำมารอกข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับลักษณะและรูปแบบการใช้งานอาคารลงในโปรแกรม VisualDOE4.0 เพื่อทำการหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารแต่ละประเภท ซึ่งลักษณะของอาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษามี 2 ประเภท ซึ่งคืออาคารสำนักงาน และอาคารร้านค้า ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

#### 3.5.6.1 สำนักงาน

อาคารสำนักงานต้นแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยการจัดทำค่ามาตรฐานการปล่อยก๊าซคาร์บอนต่อหัวของผู้ใช้อาคารในประเทศไทยด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA)

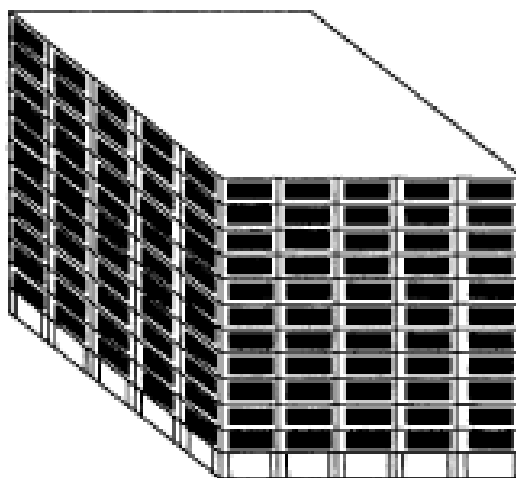






Ground floor plan

รูปที่ 24 รูปด้านและผังพื้นของอาคารสำนักงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษา  
(ที่มา : อภิษฎา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555)



รูปที่ 25 ภาพสามมิติของอาคารสำนักงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษา  
(ที่มา : A technical review of energy conservation programs  
for commercial and government buildings in Thailand, 2003)

ลักษณะอาคารเป็นอาคาร 7 ชั้น ความสูงไม่เกิน 23 เมตร ซึ่งสามารถพบเห็นได้  
ทั่วไปในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (อรรถนัย เศรษฐบุตร์, 2549a) ซึ่งรายละเอียดการใช้  
งานอาคารเป็นดังนี้

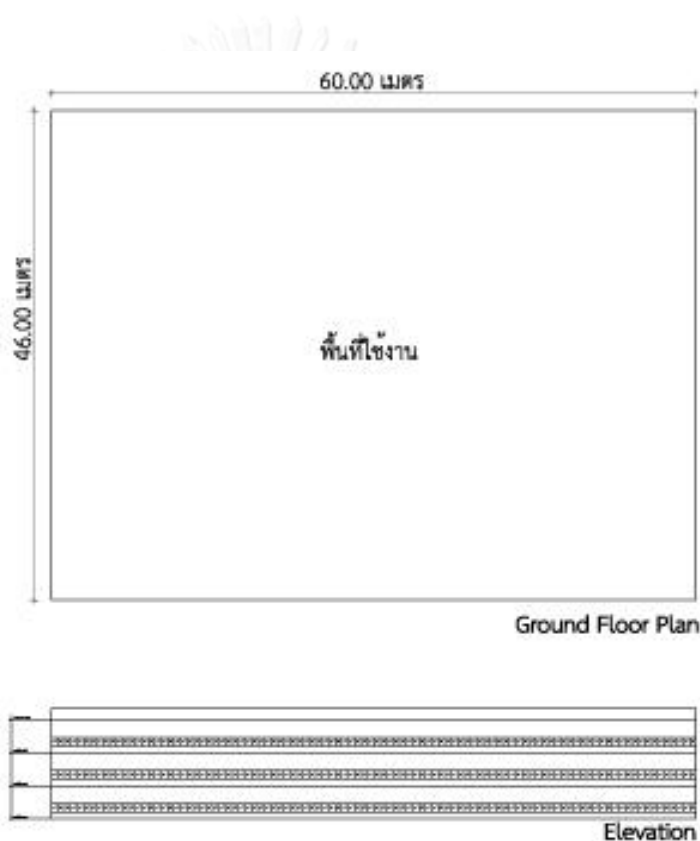
ตารางที่ 1 ข้อมูลการใช้งานของอาคารสำนักงานต้นแบบ

(อภิขญา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555)

ข้อมูลการใช้งานอาคารสำนักงาน		
จำนวนชั้น	7	
ขนาดพื้นที่ใช้งาน (ตารางเมตร)	พื้นที่สำนักงาน	พื้นที่งานระบบ
	5,376	1,792
รวมพื้นที่	7,168	
พื้นที่ปรับอากาศ (ตารางเมตร)	5,376	-
ระยะเวลาใช้เครื่องปรับอากาศ	7.00-19.00 น.	
วันทำการ	วันจันทร์-เสาร์ เวลา 8.00-19.00	
พื้นที่หลังคา (ตารางเมตร)	1,024	
WWR (Window to wall ratio)	40%	
WWR ในแต่ละทิศ	40%	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตารางเมตร)	1,075	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ (ตารางเมตร)	1,618	
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตารางเมตรต่อคน)	7	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EQD (W/m <sup>2</sup> )	15.9	
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (W/m <sup>2</sup> )	15.9	
ชนิดระบบปรับอากาศ	Residential system	

### 3.5.6.2 อาคารร้านค้า

อาคารร้านค้าต้นแบบดัดแปลงมาจากการวิจัย A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings of Thailand (Surapong Chirattananon & Juntakan Taweekun, 2003) ซึ่งอาคารต้นแบบในงานวิจัยได้ทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ DOE-2 โดยเป็นอาคารประเภทที่ใช้ระบบปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง



รูปที่ 26 รูปด้านและผังพื้นของอาคารร้านค้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา  
(ที่มา : ผู้วิจัย)



รูปที่ 27 ภาพสามมิติของอาคารร้านค้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

(ที่มา : A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand, 2003)

ลักษณะอาคารเป็นอาคาร 3 ชั้น ซึ่งมีความสูงอาคารจากพื้นจนถึงหลังคา 9.3 เมตร ซึ่งรายละเอียดการใช้งานอาคารเป็นดังนี้

ตารางที่ 2 ข้อมูลการใช้งานของอาคารร้านค้าต้นแบบ

(อภิชญา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555)

ข้อมูลการใช้งานอาคารร้านค้า	
จำนวนชั้น	3
ขนาดพื้นที่ใช้งาน (ตารางเมตร)	8,280
พื้นที่ปรับอากาศ (ตารางเมตร)	8,280
ระยะเวลาใช้เครื่องปรับอากาศ	24 ชั่วโมง
วันทำการ	ทุกวัน เวลา 10.00-22.00
พื้นที่หลังคารวม (ตารางเมตร)	2,760
WWR (Window to wall ratio)	38%
WWR ในแต่ละทิศ	38%
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด (ตารางเมตร)	1,208
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ (ตารางเมตร)	1,972
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตารางเมตรต่อคน)	20
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EQD ( $W/m^2$ )	17.48
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD ( $W/m^2$ )	25.05
ชนิดระบบปรับอากาศ	Constant air column system
Sensible heat gain per occupant (W)	73
Latent heat gain per occupant (W)	59

### 3.5.7 เปรียบเทียบการใช้พลังงานรวมในโปรแกรมคำนวณ VisualDOE4.0

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองการใช้งานอาคารจริงโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.0 ซึ่งอาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษาดังกล่าวข้างต้น จะนำค่าการนำความร้อนที่คำนวณได้นำมากำหนดค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหลังคาแต่ละประเภท เพื่อทำการจำลองค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร และคำนวณค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้พลังงานรวมของอาคารแต่ละประเภทที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

#### 3.5.7.1 โปรแกรม VisualDOE 4.0

โปรแกรม VisualDOE 4.0 คือ โปรแกรมที่ได้รับการยอมรับจากนักวิจัยที่นำมาใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับพลังงาน ซึ่งพัฒนาโดย Lawrence Berkley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยพัฒนาเกี่ยวกับกฎหมายสิ่งแวดล้อมของอาคารทั่วโลก ซึ่งอาศัยฐานข้อมูลสภาพอากาศรายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยา (ประวิตร กิตติชาญธีระ, 2553) ซึ่งองค์ประกอบหลักของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) Load (2) System (3) Plant (4) Economic

โดยโปรแกรมจะคำนวณภาระการทำความเย็นจากปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง คือ ปัจจัยภายนอกอาคาร เช่น การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ การนำความร้อนจากผนังภายใน และปัจจัยภายในอาคาร เช่น ความร้อนจากเครื่องใช้ไฟฟ้า ความร้อนจากโคมไฟแสงสว่างภายในอาคาร ซึ่งค่าภาระการทำความเย็นเมื่อคำนวณได้แล้วสามารถนำมาคำนวณมูลค่าพลังงาน เพื่อการเลือกใช้เครื่องปรับอากาศได้อย่างเหมาะสม (อรรถน์ เศรษฐบุตร, 2549b)

จากการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้ จะใช้ไฟล์ข้อมูลสภาพอากาศของกรุงเทพฯ ซึ่งจัดทำโดยภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ถูกจัดให้อยู่ในรูปแบบ TMY (สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, 2542) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลอากาศตลอดหนึ่งปี ได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature) อุณหภูมิหยดน้ำค้าง (dew point temperature) ความเร็วลม ทิศทางลม ความกดอากาศ ค่าการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ (อรรถน์ เศรษฐบุตร, 2549b)

### 3.5.8 วิเคราะห์ผลการใช้พลังงานรวมและค่าไฟฟ้า

วิเคราะห์ผลการใช้พลังงานรวมต่อตารางเมตรภายในระยะเวลาหนึ่งปี ( $\text{kWh/m}^2\text{-year}$ ) จากการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 ของอาคารต้นแบบที่นำมาเป็นกรณีศึกษา โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างหลังคา 7 ประเภท คือ

- ก. หลังคาคอนกรีต
- ข. หลังคาดินที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน
- ค. หลังคาดินที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน
- ง. หลังคาหญ้าที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน
- จ. หลังคาหญ้าที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน
- ฉ. หลังคาไม้เลื้อยที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน
- ช. หลังคาไม้เลื้อยที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน

ทำการบันทึกค่าไฟฟ้าของอาคารแต่ละประเภทที่มีหลังคาต่างรูปแบบกัน เพื่อนำมาคำนวณค่าความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

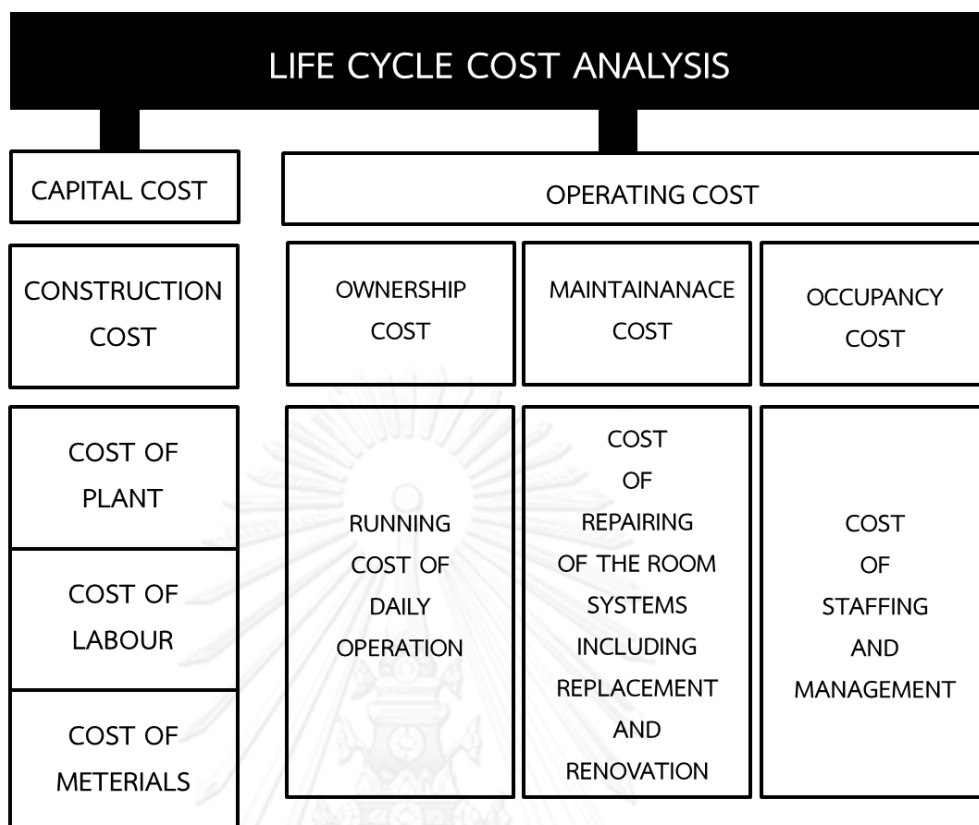
### 3.5.9 พิจารณาค่า Life Cycle Cost ของหลังคาเขียว

ประเมินผลการออกแบบอาคารเพื่อการตัดสินใจในการลงทุน โดยการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานอาคาร ซึ่ง LCC นั้นสามารถแบ่งค่าใช้จ่ายได้เป็น 2 ส่วนเบื้องต้น คือ

1. Capital Cost – ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง
2. Operation Cost – ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาและดำเนินการ  
(วิเศษศักดิ์ สุริยาศรี, 2555)

ซึ่งแผนผังของ LCC นั้นสามารถแสดงได้ดังแผนภูมิที่ 3.1

CHULALONGKORN UNIVERSITY



แผนภูมิที่ 6 แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของ Life cycle cost analysis

(Lui Shiu Ting Elsa, 2008)

### 3.5.10 พิจารณาค่าน้ำสำหรับการรดน้ำหลังคาเขียว

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการรดน้ำต้นไม้ในแต่ละรูปแบบการรดน้ำหลังคาเขียว ซึ่งมีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน และ 2 ครั้งต่อวัน เพื่อนำมาคำนวณค่าน้ำ โดยใช้ค่าน้ำในอัตราลิตรละ 15.81 บาท (ที่มา : การประปานครหลวง)

### 3.5.11 พิจารณา ค่าบำรุงรักษา และค่าก่อสร้างเพิ่มเติม

คำนวณค่าก่อสร้างหลังคาเขียว โดยราคานี้เป็นค่าก่อสร้างหลังคาเขียวโดยประมาณ ซึ่งคำนวณค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียว (ที่มา : ชุมแสง นิรุตติรักษ์, สัมภาษณ์, 2557) โดยคิดค่าดูแลรักษาหลังคาเขียวที่ 500 บาทต่อตารางเมตร

### 3.5.12 พิจารณาความคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์

ทำการวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ โดยกำหนดให้อาคารมีอายุการใช้งาน (Life Cycle Cost) 20 ปี และมีค่าอัตราคิดลดที่ 7.5%

### 3.5.12.1 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากหลังคาเขียว (Additional Cost) ต่อค่าใช้จ่ายพลังงานรวมที่สามารถประหยัดได้ (Saving) ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้คือ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินจ่ายลงทุนสุทธิ(Total investment)}}{\text{ต้นทุนที่ประหยัดพลังงานได้ต่อปี (Annual energy cost saving)}} \quad (5)$$

### 3.5.12.2 มูลค่าตลอดการใช้งาน 20ปี (Life cycle cost analysis-LCC)

เป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นตลอดอายุการใช้งานของอาคาร โดยมีค่าใช้จ่ายคือ ค่าก่อสร้าง ค่าบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับพลังงาน ทั้งนี้เพิ่มเปรียบเทียบมูลค่ารวมของหลังคาแต่ละประเภท เพื่อเลือกแนวทางที่มีความคุ้มค่าในการลงทุนที่สุด

การกำหนดมูลค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปรับปรุงอาคารของหลังคาเขียวแต่ละประเภท

- กำหนดให้ค่าก่อสร้างหลังคาคอนกรีต ซึ่งเป็นBaseline มูลค่าการก่อสร้าง ตารางเมตรละ 1,200 บาท
- การกำหนดมูลค่าเงินต้นทุนของหลังคาเขียวนั้น ค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้
  1. ค่าก่อสร้างหลังคาเขียว – ตารางเมตรละ 3,000 บาท
  2. ค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียวตลอดอายุการใช้งาน – ตารางเมตรละ 500 บาทต่อปี
  3. ค่าน้ำสำหรับรดน้ำหลังคาหญ้า – 15.81บาทต่อหน่วย



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทดลองการวัดประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละประเภท โดยผลการทดลองจะแบ่งเป็น 3 หัวข้อหลัก คือ

- 4.1 ผลการทดลองจากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง
- 4.2 ผลการจำลองการใช้พลังงานรวมด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0
- 4.3 การคำนวณและการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

#### 4.1 ผลการทดลองจากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง

##### 4.1.1 แยกประเภทกรณีศึกษาของหลังคาเขียว โดยแบ่งตามชนิดของหลังคาและรูปแบบการรดน้ำหลังคาที่นำมาทดลอง

จากกรณีศึกษา สามารถแยกประเภทของกรณีศึกษาได้ดังนี้

1. หลังคาคอนกรีต หนา 0.10 เมตร ซึ่งไม่มีการรดน้ำบนหลังคา
2. หลังคาดินที่มีความหนาของชั้นดิน 0.15 เมตร วางบนแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์หนา 0.07 เมตร
3. หลังคาหญ้าซึ่งใช้เวลาน้อยปลูกคลุมหลังคาบนชั้นดินหนา 0.15 เมตร วางบนแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์หนา 0.07 เมตร
4. หลังคาไม้เลื้อยซึ่งใช้เวลานั้นห้จันทร์เขียวปลูกคลุมหลังคาบนชั้นดินหนา 0.15 เมตร วางบนแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์หนา 0.07 เมตร

โดยหลังคาดิน หลังคาหญ้า และหลังคาไม้เลื้อยมีการรดน้ำหลังคา 2 รูปแบบ คือ

1. รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน คือเวลา 8.00น., 12.00น. และ 17.00 น.
2. รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน คือเวลา 8.00น. และ 17.00น.

และทำการเก็บค่าอุณหภูมิ ณ บริเวณตำแหน่งที่กำหนดไว้ เพื่อนำมาคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าปริมาณการมาการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer-Q) จากสมการ

$$Q_1 = U \cdot A \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

โดยที่	$Q_1$	คือ	พลังงานความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในกล่องทดลอง (BTU/hr)
	$U$	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (BTU/hr·ft <sup>2</sup> ·°F)
	$A$	คือ	พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อน ซึ่งหมายถึง พื้นที่หลังคา บริเวณกล่องทดลอง (ft <sup>2</sup> )
	$T_{out}$	คือ	พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ซึ่งหมายถึง พื้นที่บนหลังคา (°F)
	$T_{in}$	คือ	พื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งหมายถึง พื้นที่ใต้หลังคา (°F)

$$Q_2 = 1.08 \cdot CFM \cdot (T_{outlet} - T_{inlet}) \quad (4)$$

โดยที่	$Q_2$	คือ	พลังงานความร้อนระบายออกจากภายในกล่องทดลองด้วยพัดลมระบายอากาศ (BTU/hr)
	CFM	คือ	ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลอง ที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศ (ft <sup>3</sup> /minute)
	$T_{inlet \text{ air}}$	คือ	อุณหภูมิวัด ณ ช่องอากาศเข้า (°F)
	$T_{outlet \text{ air}}$	คือ	อุณหภูมิวัด ณ ช่องอากาศออก (°F)

ซึ่งพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่กล่องทดลองโดยผ่านหลังคา เท่ากับพลังงานความร้อนที่ระบายออกด้วยพัดลมดูดอากาศออก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$Q_1 = Q_2 \quad (6)$$

ซึ่งหลังจากการเก็บค่าอุณหภูมิต่างๆที่กำหนดไว้ โดยทำการเก็บค่าอุณหภูมิบริเวณตำแหน่งต่างเป็นเวลา 3 วัน คือตั้งแต่วันที่ 3-5 กุมภาพันธ์ 2557 และนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากอุณหภูมิบนหลังคาและอุณหภูมิใต้หลังคา ( $T_o - T_i$ ) และหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{outlet \text{ air}} - T_{inlet \text{ air}}$ ) ซึ่งแสดงผลได้ดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา ( $T_o-T_i$ ) และบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{outlet\ air}-T_{inlet\ air}$ ) ในช่วงเวลากลางวัน (6.00-18.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (18.00-6.00 น.)

		หลังคา คอนกรีต (Baseline) (°C)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
			รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน (°C)	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน (°C)	รดน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน (°C)	รดน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน (°C)	รดน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน (°C)	รดน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน (°C)
ความแตกต่าง ของอุณหภูมิ ระหว่าง อุณหภูมิบน หลังคาและ อุณหภูมิใต้ หลังคา ( $T_o-T_i$ ) (°C)	กลางวัน (6.00-18.00 น.)	7.26	2.84	3.00	5.98	6.38	5.82	5.15
	กลางคืน (18.00-6.00 น.)	0.96	0.77	0.72	1.12	1.05	1.72	1.78
ความแตกต่าง อุณหภูมิ ระหว่างช่อง ลมเข้าและช่อง ลมออก ( $T_{outside\ air}-T_{inside\ air}$ ) (°C)	กลางวัน (6.00-18.00 น.)	5.59	1.60	1.33	1.57	1.51	2.47	2.10
	กลางคืน (18.00-6.00 น.)	0.67	0.32	0.60	0.22	0.22	0.46	0.44

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา ( $T_o-T_i$ ) จะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลากลางวัน หลังคาคอนกรีตจะมีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคามากที่สุด เนื่องจากคุณสมบัติของความสามารถในการจุความร้อนของคอนกรีตมีค่ามากที่สุด ส่งผลให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างอุณหภูมิของหลังคาเขียวทั้งสองประเภท พบว่ามีค่ามากถัดมาจากหลังคาคอนกรีต แต่หากเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างอุณหภูมิของดินแล้ว พบว่ามีค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคาน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความจุความร้อนที่ต่ำกว่า แต่ที่หลังคาเขียวนั้นมีความจุความร้อนสูง ทั้งนี้มีสาเหตุจาก หลังคาเขียวนั้น นอกจากมีการระเหยน้ำแล้ว หลังคาเขียวยังมีร่มเงาจากใบ และการคายน้ำของพืช เป็นเหมือนฉนวนในการป้องกันความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ จึงส่งผลให้ความแตกต่างอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาดินที่ไม่มีพืชพรรณปกคลุมหลังคา แต่ในช่วงเวลากลางคืน ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคาของหลังคาจะมีค่าความแตกต่างน้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วงเวลากลางคืนไม่มีรังสีดวงอาทิตย์

ส่งผลให้ค่าความแตกต่างระหว่างพื้นผิวบนหลังคา และได้หลังคาที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ  
น้อย

เมื่อพิจารณาความแตกต่างบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}$ )  
จะเห็นได้ว่า ในช่วงกลางวันนั้น หลังคาคอนกรีตมีผลต่างอุณหภูมิมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึง  
ความสามารถในการนำความร้อนของคอนกรีตที่มีค่ามากที่สุด จึงทำให้ผลความแตกต่าง  
ระหว่างอุณหภูมิมียุทธศาสตร์มากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาหลังคาประเภทอื่นแล้วพบว่า หลังคาดิน และ  
หลังคาเขียวทั้งสองประเภทมีความแตกต่างอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าหลังคา  
คอนกรีต เนื่องจากหลังคาเหล่านี้มีกระบวนการระเหยน้ำบริเวณหลังคา ทำให้ความร้อนส่วน  
หนึ่งถูกระเหยออกไป ทำให้มีปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านเข้ามาสู่ภายในอาคารมีปริมาณน้อย  
กว่า ทำให้ความแตกต่างบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออกมีค่าน้อยกว่าหลังคาคอนกรีต และ  
ในช่วงเวลากลางคืน ความแตกต่างของอุณหภูมิของหลังคาทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อนำความแตกต่างอุณหภูมิบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา และบริเวณช่องลมเข้า  
และช่องลมออกทั้งวันมาเฉลี่ยเป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิรวมของหลังคาแต่ละประเภท  
สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยในหนึ่งวันบริเวณบนหลังคาและใต้หลังคา ( $T_o - T_i$ ) และ  
บริเวณบริเวณช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}$ )

	หลังคาคอนกรีต (Baseline) (°C)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)
		ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างอุณหภูมิบนหลังคาและ อุณหภูมิใต้หลังคา ( $T_o - T_i$ ) (°C)	4.21	1.80	1.88	3.57	3.78
ความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างช่องลมเข้า และช่องลมออก ( $T_{\text{outside air}} - T_{\text{inside air}}$ ) (°C)	3.15	0.94	0.96	0.91	0.89	1.50	1.30

เมื่อนำค่าความแตกต่างอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งเฉลี่ย พบว่า หลังคาคอนกรีตมีความ  
แตกต่างของอุณหภูมิมากที่สุด และหลังคาหญ้าที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวันมีค่าต่ำที่สุด และ  
เมื่อพิจารณาความสามารถลดอุณหภูมิของหลังคาแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต  
สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางความสามารถลดอุณหภูมิของหลังคาแต่ละชนิดเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต

	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
	รดน้ำ 3 ครั้ง (°c)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°c)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°c)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°c)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°c)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°c)
ความแตกต่างของอุณหภูมิ พื้นผิวหลังคา เมื่อเทียบกับ หลังคาคอนกรีต (Baseline) (°c)	4.12	4.28	2.84	2.95	4.07	4.12

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าจากงานวิจัยประสิทธิภาพของการระเหยน้ำใน  
หลังคาเขียว (Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens)  
(Onmura S et al., 2001) พบว่า หลังคาเขียวสามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวหลังคาได้สูงสุดเมื่อ  
เทียบกับหลังคาที่เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบได้ถึง 30 องศาเซลเซียส แต่ในงานวิจัยนี้  
สามารถลดอุณหภูมิได้สูงสุด 4 องศาเซลเซียส ทั้งนี้สาเหตุเป็นเพราะภูมิอากาศพื้นถิ่นใน  
เมืองไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น ทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดใกล้เคียงกัน จึง  
ส่งผลให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังคาน้อย

นำค่าความแตกต่างอุณหภูมิแต่ละจุดมาคำนวณตามสมการ (6) เพื่อหาค่า U-Value  
ผลการคำนวณเป็นดังนี้

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient - U-value) (W/m<sup>2</sup>k)

	หลังคาคอนกรีต (Baseline)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer- U-value) (W/m <sup>2</sup> k)	3.08	1.72	1.67	0.70	0.77	1.27	1.21

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง จากความหมายของค่า  
U-Value คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ  
ภายในและอุณหภูมิภายนอก ซึ่งค่า U-Value ในการทดลองนี้คือความสามารถในการถ่ายเท  
ความร้อนของหลังคาแต่ละชนิด ซึ่งหลังคาคอนกรีต เป็นหลังคาที่มีค่า U-Value มากที่สุด  
แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าความ  
แตกต่างอุณหภูมิระหว่างช่องลมเข้าและช่องลมออกของหลังคาคอนกรีตที่มีค่ามากที่สุด  
เช่นกัน

แต่เมื่อพิจารณาค่า U-Value ของหลังคา 3 ประเภทที่เหลือ พบว่ามีค่า U-Value ที่  
แตกต่างจากหลังคาคอนกรีตมาก ทั้งนี้เนื่องจากหลังคาทั้ง 3 ประเภทมีการรดน้ำหลังคา ซึ่ง

สามารถพาความร้อนจากหลังคากระเหยออกกลายเป็นไอ (Evaporation) ส่งผลให้ค่า U-Value ต่ำกว่าหลังคาคอนกรีต สอดคล้องกับค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างช่องลมเข้าและช่องลมออกของหลังคาแต่ละชนิด ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

หลังคาดิน เมื่อพิจารณาหลังคาดินที่มีค่า U-Value เป็นอันดับสองรองจากหลังคาคอนกรีต

○ จำนวนครั้งในการรดน้ำ

จะเห็นได้ว่า จำนวนครั้งในการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวันนั้นมีค่า U-Value สูงกว่าการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน ทั้งนี้เป็นเพราะการรดน้ำต้นไม้ 2 ครั้งต่อวันนั้นปริมาณน้ำที่รดจะมีปริมาณที่เหมาะสมมากกว่า จึงทำให้น้ำเกิดการระเหย(Evaporation) พาความร้อนออกจากหลังคาดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการรดน้ำต้นไม้ 3 ครั้งต่อวัน ซึ่งการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวันนั้นปริมาณอาจมากเกินไป จึงทำให้เกิดน้ำขังอยู่บริเวณหลังคามากกว่าการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน ดังนั้น หลังคาเขียวที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน จึงมีค่าการนำความร้อนดีกว่าหลังคาดินที่มีการรดน้ำหลังคา 2 ครั้งต่อวัน

หลังคาไม้เลื้อยเป็นหลังคาที่มีค่า U-Value เป็นอันดับสามรองจากหลังคาดิน เนื่องจากว่าสวนแห่งจันทร์เขียวนั้น มีพื้นที่ใบที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับหลังคาหญ้า จึงทำให้มีร่มเงาช่วยในการบังรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังหลังคา อีกทั้งมีการระเหยของน้ำที่รดลงหลังคา และการคายน้ำของพืช ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพาความร้อนของหลังคาด้วยการระเหยเป็นไอ

○ จำนวนครั้งในการรดน้ำ

จะเห็นว่าจำนวนครั้งในการรดน้ำการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวันจะมีค่า U-Value น้อยกว่าการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวันเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้สาเหตุเป็นเพราะปริมาณน้ำที่รดนั้น การรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน อาจมีปริมาณน้ำที่มากเกินไปจนความจำเป็น จึงทำให้เกิดน้ำขังในดิน ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนได้ดีกว่าหลังคาที่รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน ทำให้ประสิทธิภาพในการระเหยน้ำของน้ำในช่องว่างภายในดินต่ำกว่าการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวันซึ่งมีค่า U-Value มีค่าน้อยกว่า

หลังคาหญ้าเป็นหลังคาที่มีค่า U-Value ต่ำที่สุด เนื่องจากหลังคาหญ้านั้น ถึงแม้ว่าวางบนดินที่มีความหนาเท่ากับหลังคาดิน (0.15 เมตร) แต่หญ้ามีย่านใบและจำนวนต้นมากกว่าหลังคาไม้เลื้อย จึงทำให้มีการคายน้ำมากกว่าหลังคาไม้เลื้อย

ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการพาความร้อนออกจากหลังคาด้วยการระเหยเป็นไอน้ำมากกว่า

○ จำนวนครั้งในการรดน้ำ

จากการคำนวณ พบว่า การรดน้ำหลังคาหญ้า 2 ครั้งต่อวันมีค่า U-Value มากกว่าการรดน้ำหลังคาหญ้า 3 ครั้งต่อวัน ทั้งนี้ สาเหตุเป็นเพราะจำนวนต้นของหญ้าต่อพื้นที่หลังคานั้น มีจำนวนมาก ทำให้ความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงของหญ้ามักเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การรดน้ำ 2 ครั้งต่อวันย่อมมีปริมาณน้ำที่ขังอยู่ในดินน้อยกว่าการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน ส่งผลให้ค่าการนำความร้อนของหลังคาลดต่ำกว่า จึงทำให้ค่า U-Value ของหลังคาดินที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อวันมีค่ามากกว่าการรดน้ำต้นไม้ 3 ครั้งต่อวัน

เมื่อพิจารณาค่า U-value พบว่า จากงานวิจัย The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand (Sittipong Permpituck & Pichai Namprakai, 2012) ซึ่งทำการทดลองในช่วงฤดูร้อน (มกราคม – มิถุนายน 2550) พบว่า ค่า U-value ของหลังคาหญ้าที่มีประสิทธิภาพที่สุดมีค่า U-value อยู่ที่  $0.95 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวิจัยในช่วงฤดูหนาว (ธันวาคม 2556) ค่า U-value ของหลังคาหญ้าที่มีประสิทธิภาพที่สุด มีค่า  $0.70 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า การระเหยน้ำของหลังคาหญ้าในประเทศไทยนั้น จะมีประสิทธิภาพมากกว่าในช่วงฤดูหนาวของเมืองไทย เนื่องจากปริมาณความร้อนในการทำให้เกิดการระเหยน้ำบริเวณพื้นผิวหลังคาในฤดูหนาวมีความเหมาะสมมากกว่าในฤดูร้อน

ค่า U-Value ที่ได้จากการคำนวณ นำมาหาค่าการนำความร้อน (Conductivity -k) เพื่อนำค่าที่ได้มาป้อนข้อมูลคุณสมบัติหลังคาในโปรแกรม VisualDOE4.0 จากสมการ

$$U = \frac{1}{R_{\text{ฟิล์มอากาศภายนอกหลังคา}} + R_{\text{หลังคา}} + R_{\text{ฟิล์มอากาศภายในหลังคา}}}$$

โดยที่

$$R_{\text{หลังคา}} = \text{ค่าความต้านทานความร้อน (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$$

ซึ่งค่าความต้านทานอากาศฟิล์มอากาศภายนอกและภายใน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) กำหนดให้

$$R_{\text{ฟิล์มอากาศภายนอกหลังคา}} = 0.055 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$$

$$R_{\text{ฟิล์มอากาศภายในหลังคา}} = 0.162 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$$

ค่าความต้านทานความร้อน (R) นั้นเป็นค่าที่แสดงถึงความต้านทานการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคาร ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนนั้นเป็นส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนั้น หลังคาที่มีค่า U-Value มาก จะมีค่า R น้อย ซึ่งแสดงผลการคำนวณได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าความต้านทานความร้อน ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

	หลังคาคอนกรีต (Baseline)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง
ค่าความต้านทานความร้อนของ หลังคา ( $R_{\text{หลังคา}}$ ) ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )	0.11	0.36	0.38	1.21	1.08	0.57	0.61

และเมื่อนำค่า  $R_{\text{หลังคา}}$  มาคำนวณต่อเพื่อหาค่า k เพื่อนำไปกรอกคุณสมบัติของหลังคาประเภทต่างๆในโปรแกรม VisualDOE 4.0 ซึ่งแนวทางการคำนวณหาค่า k เป็นไปตามสมการ

$$R_{\text{หลังคา}} = \frac{\Delta x}{k}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad k = \frac{\Delta x}{R_{\text{หลังคา}}}$$

โดยที่

$\Delta x$  = ความหนาของหลังคา (เมตร)

k = ค่าการนำความร้อน (W/m-K)

ซึ่งส่วนประกอบของหลังคาและความหนาของหลังคาแต่ละประเภท แสดงในตารางที่ 8 และผลการคำนวณค่า k แสดงในตารางที่ 9



ตารางที่ 8 ตารางแสดงความหนาของหลังคาแต่ละชนิด

ชนิดหลังคา	ความหนาพื้นหลังคา	ความหนาดิน	ความหนาพีชคลุมหลังคา	ความหนารวม
หลังคาคอนกรีต	0.10	-	-	0.10
หลังคาดิน	0.07	0.15	-	0.22
หลังคาหญ้า	0.07	0.15	0.025	0.18
หลังคาไม้เลื้อย	0.07	0.15	0.30	0.52

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าการนำความร้อน (Conductivity-k) (W/m-K)

	หลังคา คอนกรีต (Baseline)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง
ค่าการนำความร้อน (Conductivity-k) (W/m-K)	1.39	0.41	0.39	0.12	0.14	0.26	0.25

จากผลการคำนวณค่า  $k$  นั้น พบว่าหลังคาคอนกรีตมีค่า  $k$  มากที่สุดคือ 1.39 W/m-k และหลังคาหญ้าที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวันมีค่า  $k$  ที่น้อยที่สุดคือ 0.12 W/m-k ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณค่า U-Value เพราะค่า  $k$  นั้นแปรผันตรงกับค่า U-Value ( $k \propto U$ -Value) ซึ่งค่า U-Value เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการนำความร้อนเข้าสู่อาคารของหลังคา และค่า  $k$  คือค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของวัสดุต่อหนึ่งหน่วยความหนา 1 เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า U-Value และค่า  $k$  มีความสอดคล้องกัน

หลังจากการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแล้ว จะทำค่าที่ได้ไปจำลองคุณสมบัติของหลังคาเขียวเพื่อหาค่าการใช้พลังงานรวมของหลังคาแต่ละประเภทในอาคารต้นแบบที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ 10 สรุปค่าที่ได้จากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง

	หลังคา คอนกรีต (Baseline) (°C)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)
ความแตกต่างของอุณหภูมิ ระหว่างอุณหภูมิตั้งหลังคาและ อุณหภูมิใต้หลังคา ( $T_o - T_i$ )	4.21	1.8	1.88	3.57	3.78	3.85	3.52
ความแตกต่างอุณหภูมิ ระหว่างช่องลมเข้า และช่องลมออก ( $T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}$ )	3.15	0.94	0.96	0.91	0.89	1.50	1.30
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient- U-value) ( $W/m^2K$ )	3.08	1.72	1.67	0.7	0.77	1.27	1.21
ค่าความต้านทานความร้อน ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )	0.11	0.36	0.38	1.21	1.08	0.57	0.61
ค่าการนำความร้อน (Conductivity-k) ( $W/m-K$ )	1.39	0.41	0.39	0.12	0.14	0.26	0.25

จากตารางที่ 10 จากค่าการนำความร้อน จะเห็นว่า ค่าการนำความร้อนของหลังคา  
คอนกรีต มีค่าสูงกว่าหลังคาดิน หลังคาไม้เลื้อย และหลังคาหญ้ามามาก ทั้งนี้เป็นเพราะผลจาก  
ร่มเงาของใบไม้ การรดน้ำต้นไม้ และการคายน้ำของพืช ซึ่งเปรียบเสมือนฉนวนกันความร้อน  
อีกทั้งน้ำจากการรดน้ำหลังคาเขียวนั้นช่วยพาความร้อนออกจากหลังคา ทำให้ปริมาณความ  
ร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นผิวหลังคาเข้าสู่อาคารมีค่าน้อยลง

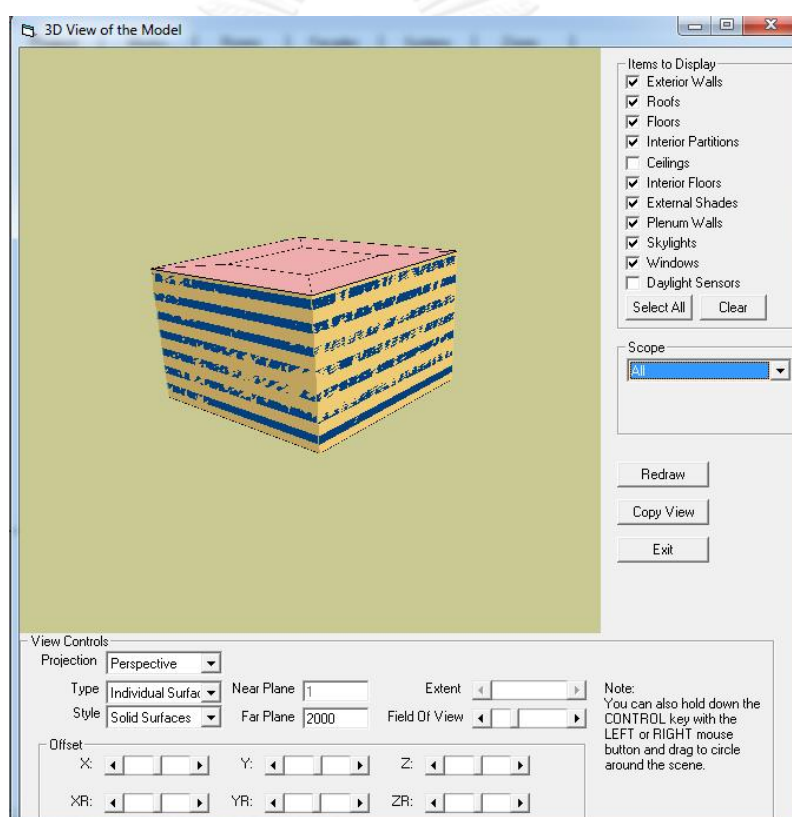
ตารางที่ 11 ผลความแตกต่างของการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน และ 2 ครั้งต่อวัน

หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	ความ แตกต่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer-U-value) ( $W/m^2k$ )	1.72	1.67	0.05
ค่าความต้านทานความร้อน (Resistance-R) ( $m^2\cdot^{\circ}C/W$ )	0.36	0.38	-0.02
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity-k) ( $W/m-K$ )	0.41	0.39	0.02
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	ความ แตกต่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer-U-value) ( $W/m^2k$ )	0.7	0.77	-0.07
ค่าความต้านทานความร้อน (Resistance-R) ( $m^2\cdot^{\circ}C/W$ )	1.21	1.08	0.13
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity-k) ( $W/m-K$ )	0.12	0.14	-0.02
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้ง	รดน้ำ 2 ครั้ง	ความ แตกต่าง
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer-U-value) ( $W/m^2k$ )	1.27	1.21	0.06
ค่าความต้านทานความร้อน (Resistance-R) ( $m^2\cdot^{\circ}C/W$ )	0.57	0.61	-0.04
ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Conductivity-k) ( $W/m-K$ )	0.26	0.25	0.05

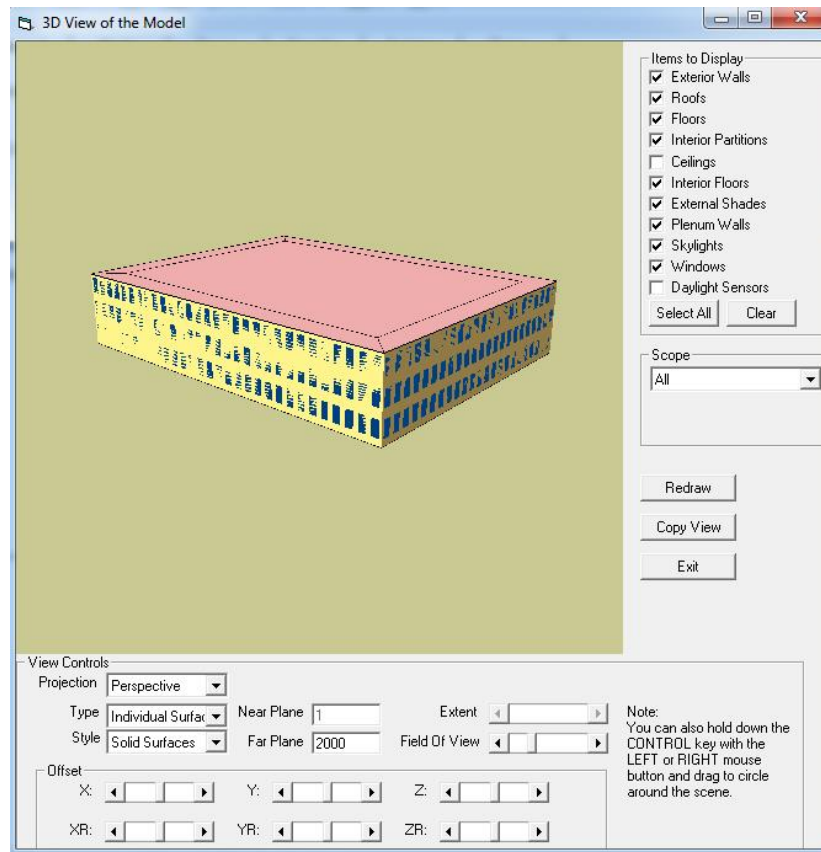
เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งในการรดน้ำหลังคา เมื่อพิจารณาจากค่า U-value และค่า k จากตารางที่ 11 พบว่า การรดน้ำหลังคา 3 ครั้งต่อวัน และการรดน้ำหลังคา 2 ครั้งไม่มีนัยสำคัญต่อค่าการถ่ายเทความร้อนในหลังคาทั้ง 3 ประเภท

#### 4.2 ผลการใช้พลังงานรวมจากการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0

ค่า  $k$  ที่ได้จากการคำนวณจากการจำลองด้วยกล่องทดลอง นำมากรอกค่าคุณสมบัติของ หลังคาแต่ละประเภท ซึ่งทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา ดังนั้น ในแต่ละประเภทหลังคาจะแบ่งกรณีศึกษาย่อยเป็น หลังคาที่ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา และหลังคาที่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา เพื่อเป็นแบบจำลองหลังคาของอาคารต้นแบบ 2 ประเภท คือ อาคารสำนักงาน ซึ่งเป็นอาคารที่มีการปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน และอาคารร้านค้า ซึ่งเป็นอาคารที่มีการปรับอากาศทั้งกลางวันถึงกลางคืน เพื่อนำมาหาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร (kWh/year)



รูปที่ 28 แสดงลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคารสำนักงานต้นแบบที่สร้างแบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0



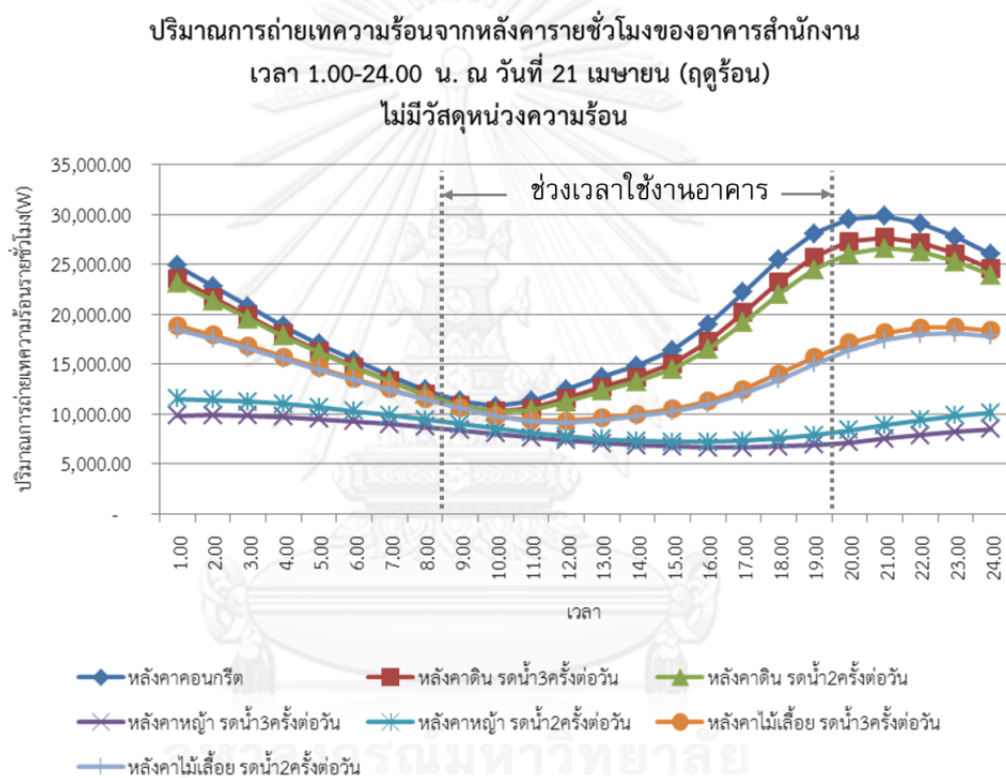
รูปที่ 29 แสดงลักษณะทางสถาปัตยกรรมของอาคารร้านค้าต้นแบบที่สร้างแบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0

#### 4.2.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง

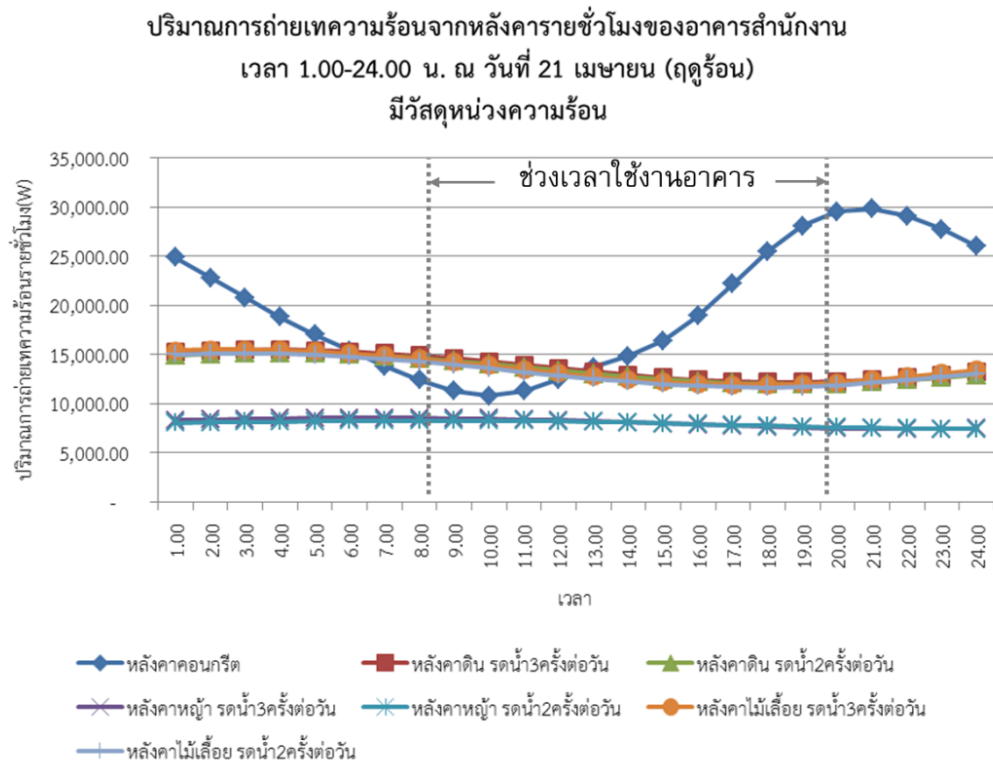
เมื่อนำแผนภูมิผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของหลังคาแต่ละประเภททั้งหมดมาเปรียบเทียบ สามารถแสดงผลได้ดังนี้

##### 4.2.1.1 อาคารสำนักงาน

ผลการจำลองปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00 - 24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน)



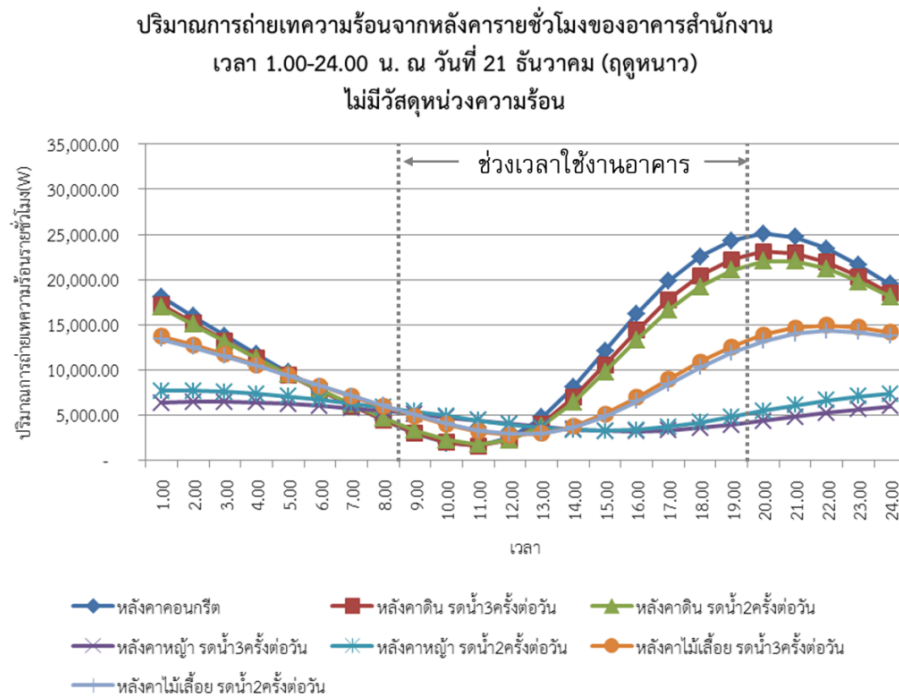
แผนภูมิที่ 7 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อน



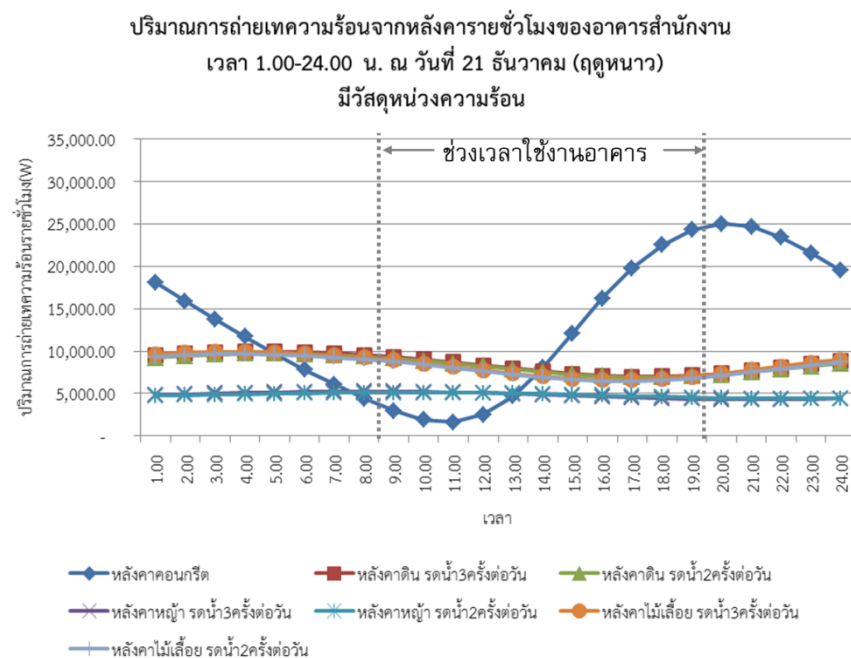
แผนภูมิที่ 8 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคามีวัสดุผนังความร้อน

ผลการจำลองปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00 - 24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



แผนภูมิที่ 9 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุผนังความร้อน

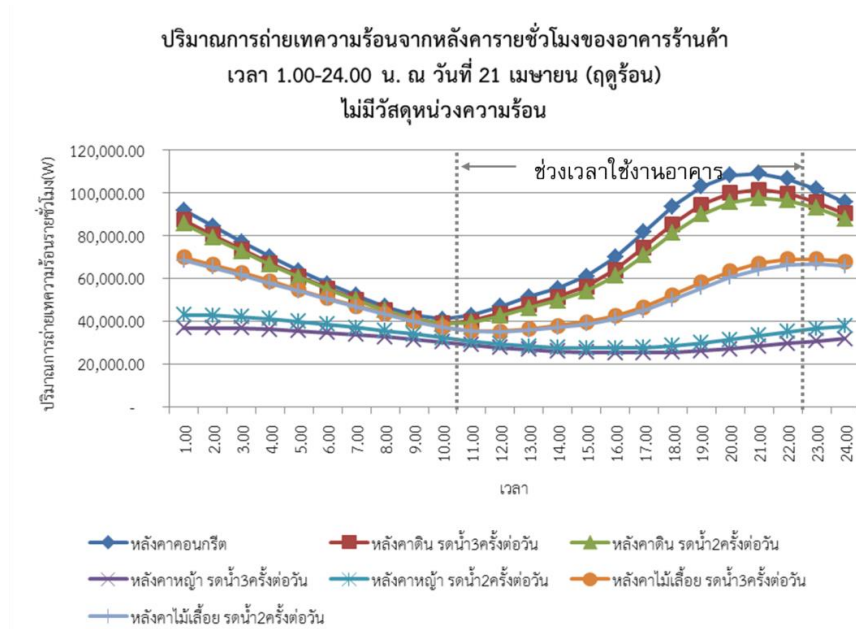


แผนภูมิที่ 10 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคามีวัสดุผนังความร้อน

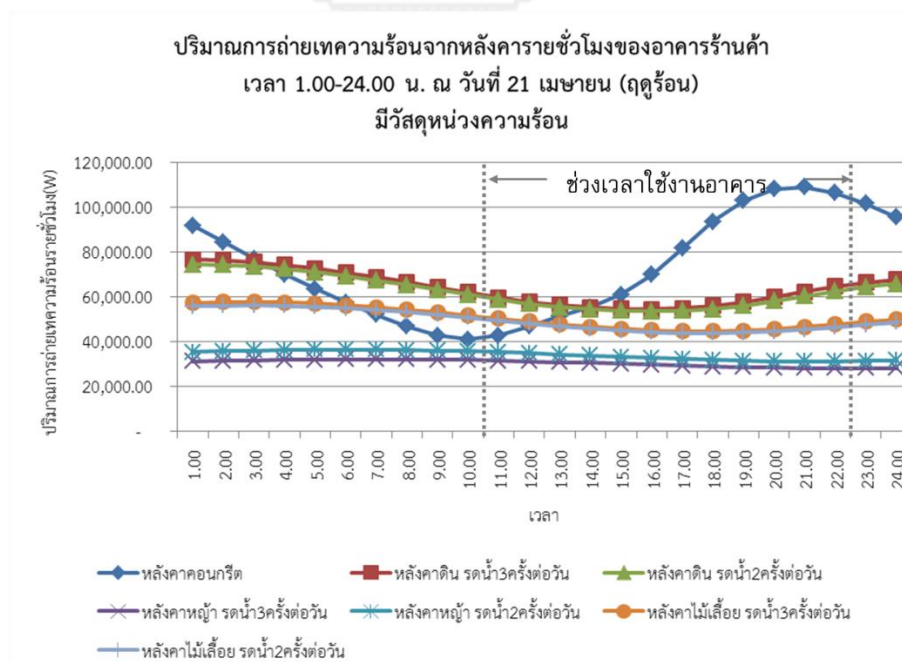


#### 4.2.1.2 อาคารร้านค้า

ผลการจำลองปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00 - 24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน)

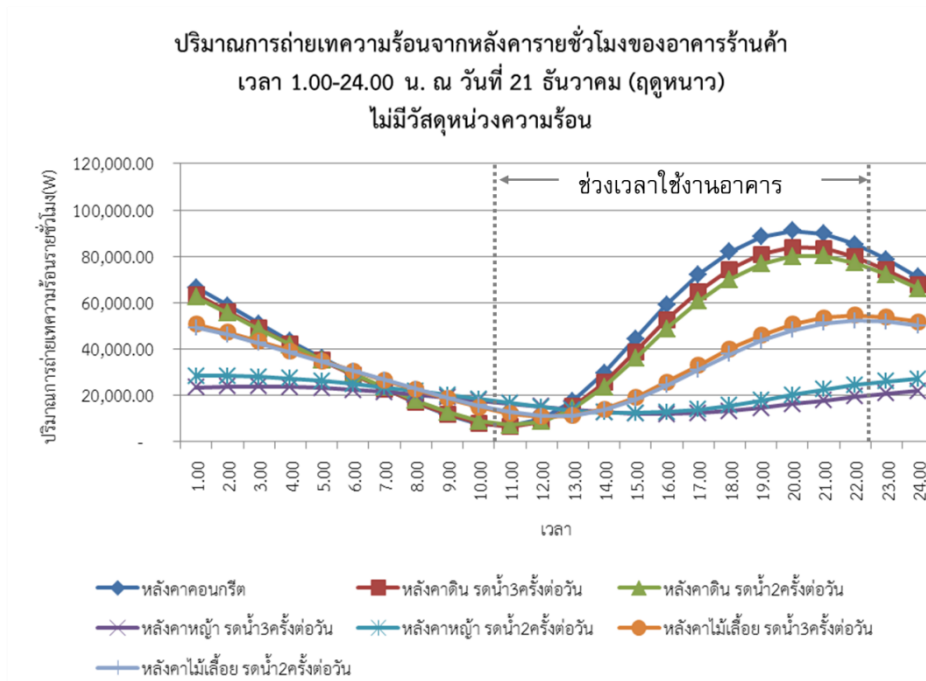


แผนภูมิที่ 11 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน

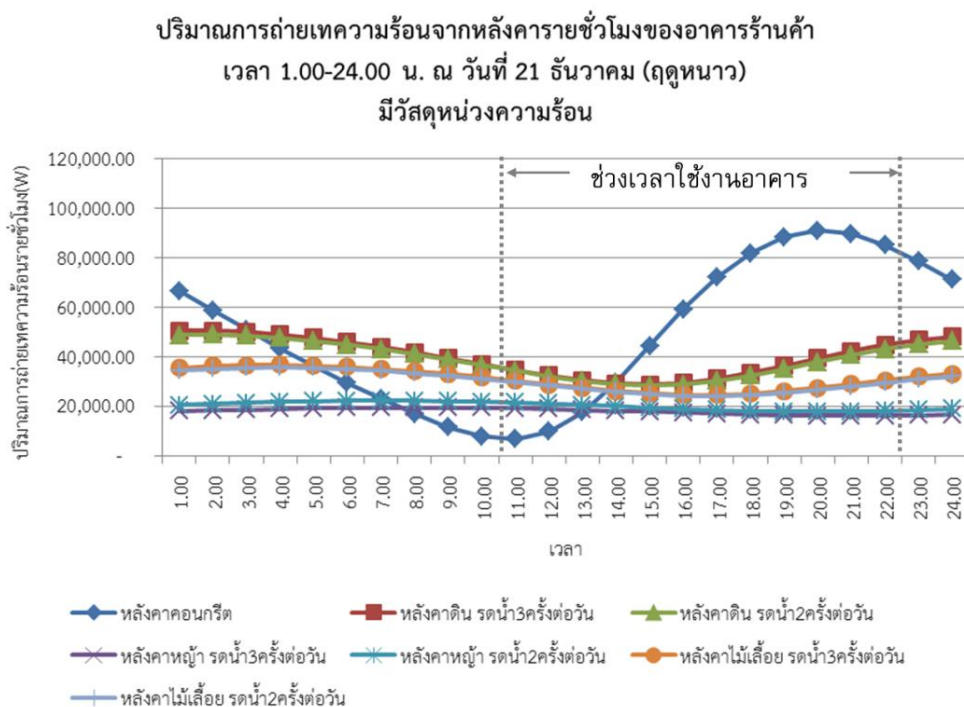


แผนภูมิที่ 12 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อน

ผลการจำลองปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคารายชั่วโมง  
ของอาคารร้านค้า เวลา 1.00 - 24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว)



แผนภูมิที่ 13 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อน



แผนภูมิที่ 14 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อน

จากผลการจำลองปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารสำนักงานและอาคารร้านค้า มีลักษณะคล้ายกัน แต่เมื่อพิจารณาความผันผวนของปริมาณการถ่ายเทความร้อนระหว่างหลังคาดิน และหลังคาเขียว นำมาเทียบกับหลังคาที่เป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ คือ หลังคาคอนกรีตหนา 0.10 เมตร พบว่า พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากหลังคาดิน และหลังคาเขียวนั้น มีการระเหยน้ำจากการรดน้ำ หลังคาช่วยในการพาความร้อนออกจากหลังคาไปส่วนหนึ่ง ทำให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารมีปริมาณน้อยกว่าหลังคาคอนกรีตที่ไม่มีการระเหยน้ำ ซึ่งเมื่อหลังคาเริ่มมีการปล่อยความร้อนที่กักเก็บไว้ในชั้นหลังคาออกสู่อาคารในช่วงบ่าย ทำให้หลังคาคอนกรีตมีปริมาณความร้อนเข้าสู่อาคารมากที่สุด สอดคล้องกับการผันผวนของปริมาณการถ่ายเทความร้อน

และเมื่อพิจารณาความผันผวนของปริมาณการถ่ายเทความร้อนระหว่างกรณีหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนเปรียบเทียบกับหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา พบว่าการมีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคานั้น เปรียบเสมือนการเพิ่มค่าความจุความร้อนให้แก่หลังคา เมื่อความร้อนถ่ายเทผ่านหลังคาแล้วเข้าสู่ชั้นของวัสดุหุ้มความร้อน วัสดุหุ้ม

ความร้อนจึงกักเก็บความร้อนไว้ มีผลทำให้ความผันผวนของปริมาณการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีวัสดุหน่วงความร้อนข้างใต้อย่างเห็นได้ชัด โดยรายละเอียดของหลังคาแต่ละประเภทสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 4.2.1.1 หลังคาไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน

4.2.1.1.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน)

ภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของหลังคาที่ไม่มีวัสดุหน่วงความร้อน พบว่า อาคารทั้งสองประเภท ในช่วงเวลาเช้า (7.00-12.00 น.) หลังคาทุกชนิดมีปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาในปริมาณที่ใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อหลังเวลา 12.00 น. เป็นต้นไป หลังคาแต่ละประเภทเริ่มมีปริมาณความร้อนที่ได้รับจากหลังคาสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในช่วงเวลากลางคืนนั้น หลังคาแต่ละประเภทจะมีค่าการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากหลังคาในปริมาณที่มากที่สุด เรียงลำดับดังนี้คือ หลังคาคอนกรีต หลังคาดิน หลังคาไม้เลื้อย และหลังคาหญ้า ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน สาเหตุที่ในช่วงเวลากลางคืนนั้นปล่อยความร้อนออกมาจากหลังคามากกว่าช่วงเวลาอื่น เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นมวลสะสมความร้อน (Thermal Mass) ของหลังคาแต่ละประเภท ที่ในเวลาช่วงกลางวันนั้น หลังคาจะกักเก็บความร้อนไว้ในวัสดุ และปล่อยความร้อนออกมาในช่วงเวลากลางคืน

หลังคาคอนกรีต เป็นหลังคาที่ไม่มีการระเหยน้ำเพื่อพาความร้อนออกจากหลังคา จึงทำให้ปริมาณความร้อนสะสมในคอนกรีตมาปริมาณมากที่สุด

หลังคาดิน และหลังคาเขียวทั้งสองประเภท ซึ่งคือหลังคาไม้เลื้อย และหลังคาหญ้ามียุทธศาสตร์การถ่ายเทความร้อนจากหลังคาต่ำกว่าหลังคาคอนกรีต เพราะหลังคาเขียวมีร่มเงาของใบไม้ที่ช่วยป้องกันความร้อนเพิ่มนอกจากการระเหยน้ำจากการรดน้ำหลังคา จึงทำให้มีปริมาณความร้อนต่ำกว่าหลังคาคอนกรีต

เมื่อพิจารณาลำดับปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา จะเห็นว่าหลังคาคอนกรีตมีค่าการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสูงสุด ซึ่งมีผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คอนกรีตมีค่ามากที่สุด ทำให้มี

คุณสมบัตินำความร้อนได้มากที่สุด และหลังคาอีกสามประเภทเมื่อเรียงลำดับปริมาณการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของหลังคาแต่ละชนิด คือ หลังคาดิน หลังคาไม้เลื้อย และหลังคาหญ้า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

4.2.1.1.2 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว)

ฤดูหนาวนั้นมีอุณหภูมิอากาศต่ำกว่าฤดูร้อน ในช่วงเช้า (8.00-12.00 น.) อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำกว่าภายในอาคาร ดังนั้นอาคารจึงสูญเสียความร้อน (Heat loss) จากภายในอาคารสู่ภายนอกอาคาร ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสามารถเรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ หลังคาหญ้า หลังคาไม้พุ่ม หลังคาดิน และหลังคาคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $k$  จึงทำให้ปริมาณความร้อนมีลักษณะตรงกันข้ามกับฤดูร้อน เพราะหลังคาทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากภายในอาคารสู่ภายนอก แต่เมื่อหลังจากเวลา 12.00 น.แล้ว หลังคาเริ่มได้รับความร้อนจากอากาศภายนอกเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จึงทำให้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาในฤดูร้อน

#### 4.2.1.2 หลังคามีวัสดุหุ้มความร้อน

4.2.1.2.1 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน)

ภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาที่ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน พบว่า อาคารทั้งสองประเภท ในช่วงเวลาเช้า (7.00-12.00 น.) หลังคาคอนกรีตจะมีปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาต่ำกว่า เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืน หลังคาคอนกรีตได้ปล่อยความร้อนที่กักเก็บไว้จากหลังคาสู่ภายในอาคารในช่วงเวลากลางคืน จึงส่งผลให้ในช่วงเวลากลางวันคอนกรีตจึงมีความสามารถในการกักเก็บความร้อนได้มาก แต่หลังคาดินและหลังคาเขียวทั้งสองประเภทยังมีความร้อนสะสมอยู่ภายในวัสดุหุ้มความร้อน จึงส่งผลให้ปริมาณการถ่ายเทความร้อนของหลังคาดังกล่าวมีค่ามากกว่า เมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต

#### 4.2.1.2.2 การถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมง ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว)

ในฤดูหนาว การถ่ายเทความร้อนจากหลังคาที่มีวัสดุหุ้มความร้อนมีลักษณะคล้ายคลึงกับการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาที่ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน แต่ในช่วงเช้า (7.00-12.00 น.) หลังคาคอนกรีตจะมีปริมาณความร้อนต่ำที่สุด เนื่องจาก Heat Loss ในฤดูหนาว ซึ่งคล้ายกับกรณีการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคากรณีที่ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนได้

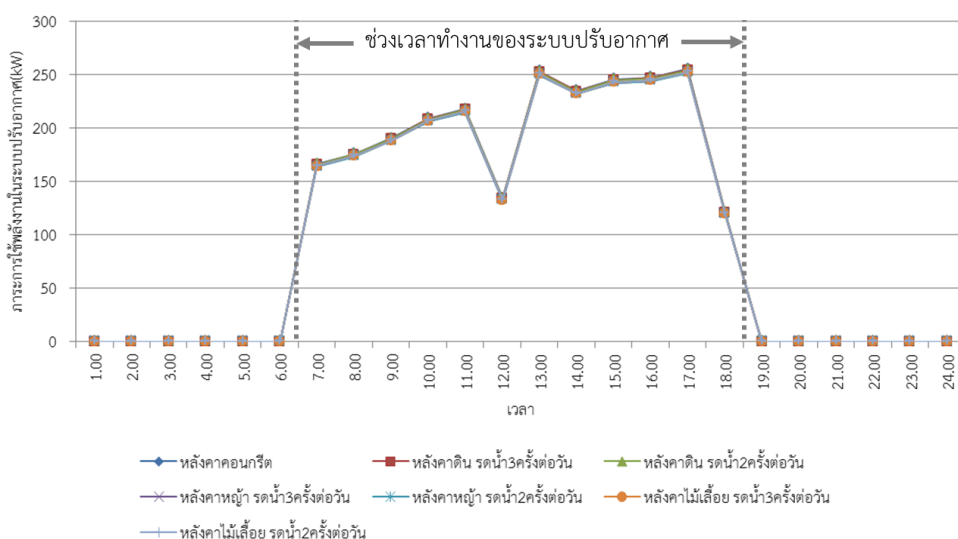
### 4.2.2 การการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมง

เมื่อนำแผนภูมิผลการจำลองการการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษาทั้งหมดมาเปรียบเทียบ สามารถแสดงผลได้ดังนี้

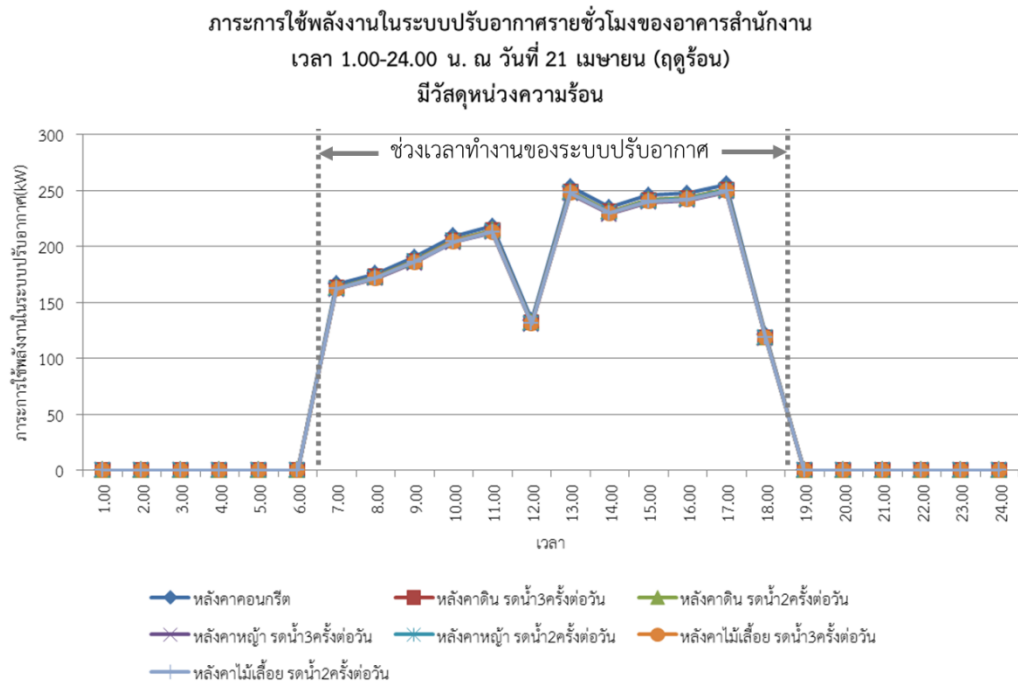
#### 4.2.2.1 อาคารสำนักงาน

การการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงานรายชั่วโมงในฤดูร้อน (21 เมษายน)

การการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน  
เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน)  
ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน

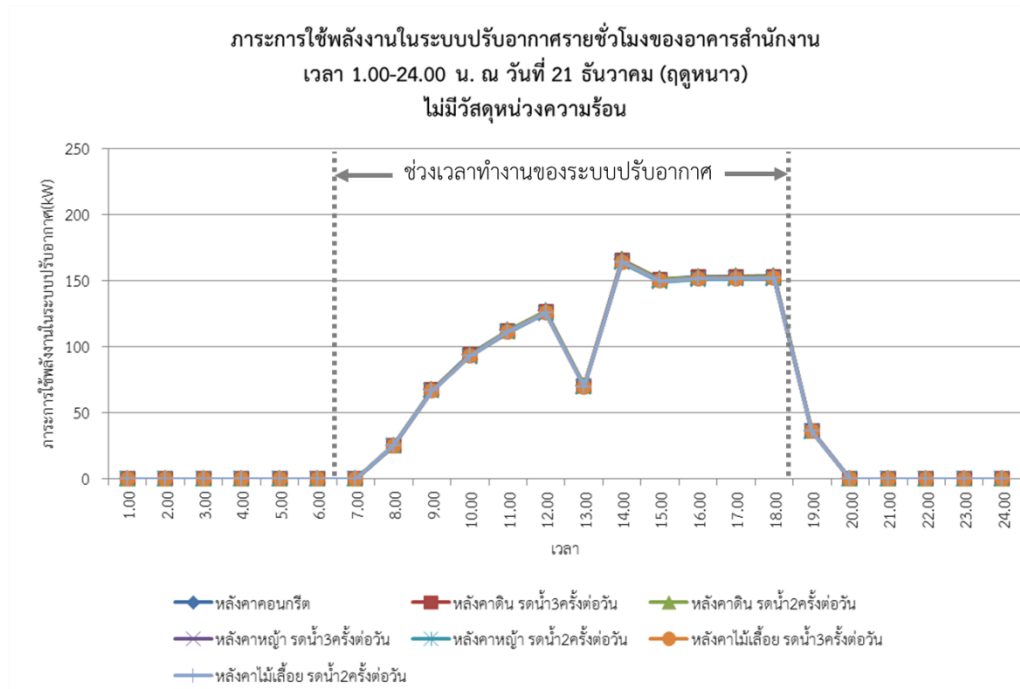


แผนภูมิที่ 15 การการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน



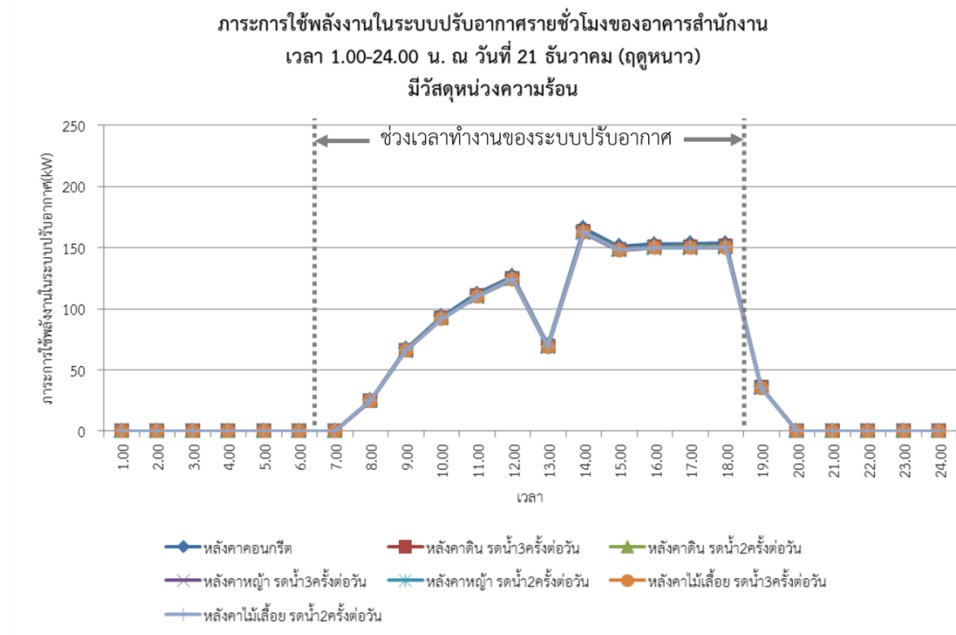
แผนภูมิที่ 16 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีมีวัสดุหน่วงความร้อน

ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงานราย  
ชั่วโมงในฤดูหนาว (21 ธันวาคม)



แผนภูมิที่ 17 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน

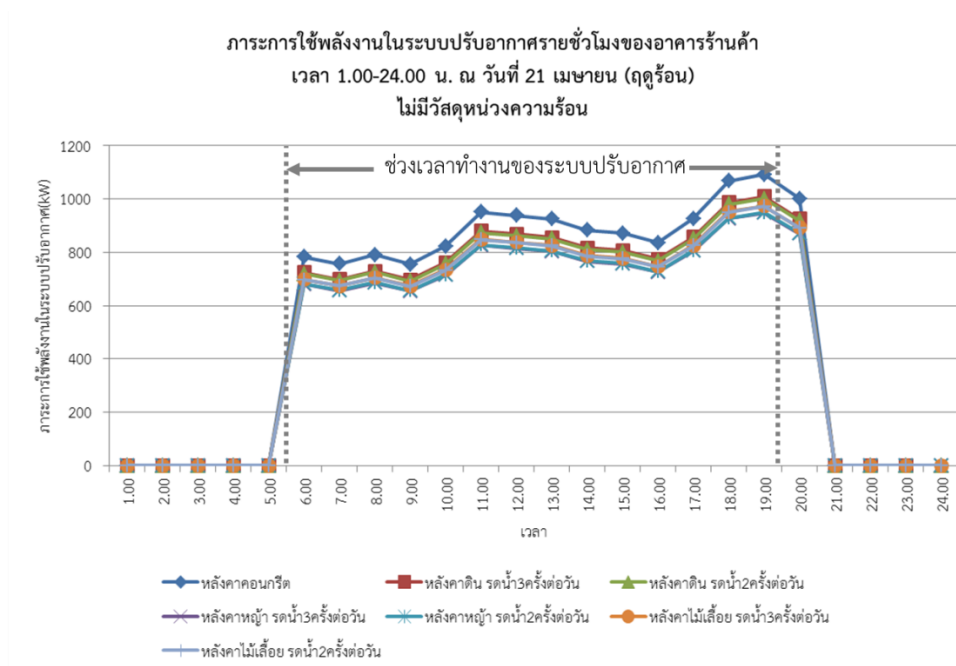




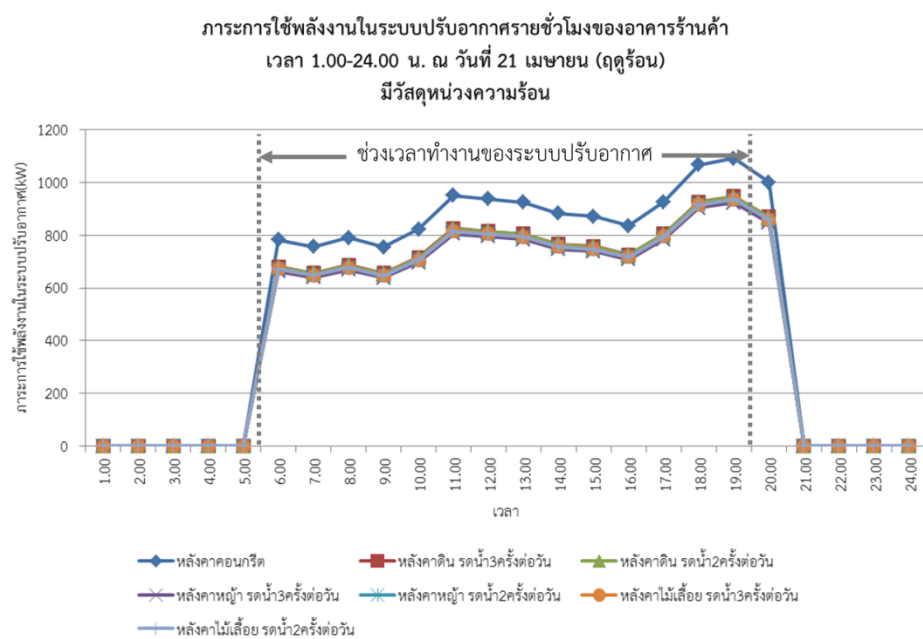
แผนภูมิที่ 18 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีมีวัสดุหุ้มวงความร้อน

#### 4.2.2.2 อาคารร้านค้า

ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้ารายชั่วโมงในฤดูร้อน (21 เมษายน)

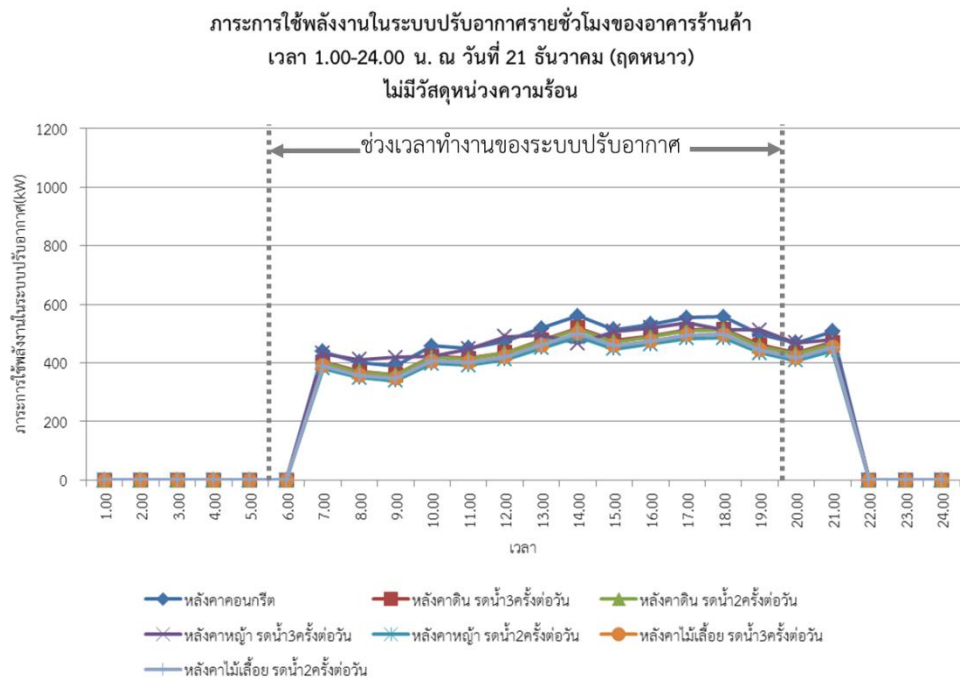


แผนภูมิที่ 19 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีไม่มีวัสดุหน้าต่างความร้อน

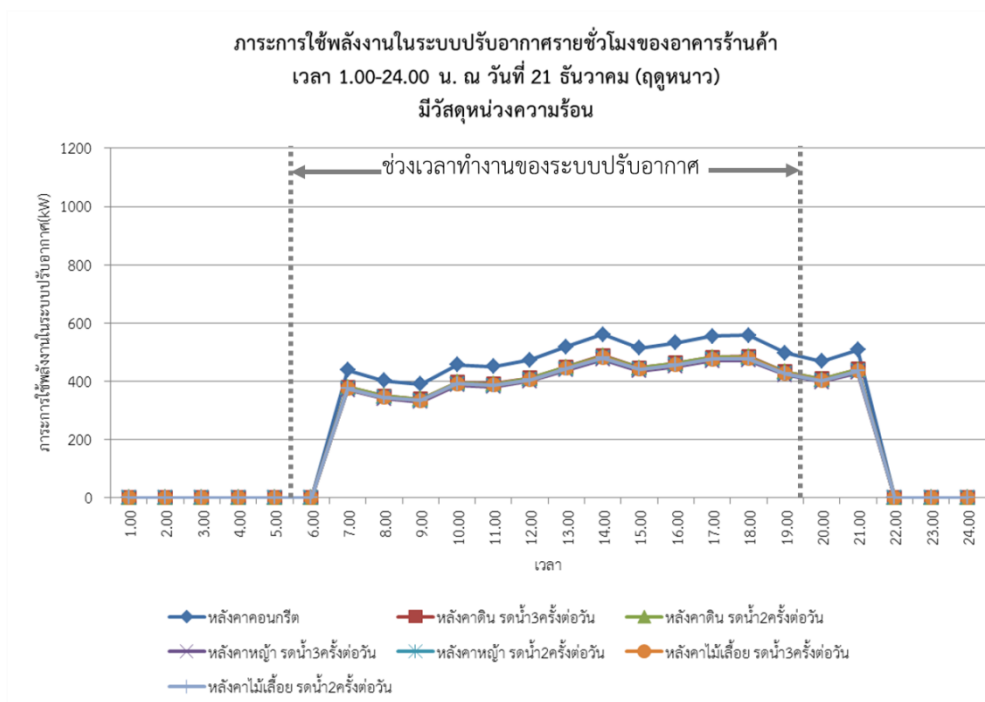


แผนภูมิที่ 20 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน (ฤดูร้อน) กรณีมีวัสดุหน้าต่างความร้อน

ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้าราย  
ชั่วโมงในฤดูหนาว (21 ธันวาคม)



แผนภูมิที่ 21 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน



แผนภูมิที่ 22 ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า เวลา 1.00-24.00 น. ณ วันที่ 21 ธันวาคม (ฤดูหนาว) กรณีมีวัสดุหน่วงความร้อน

จากผลการจำลอง ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงานและอาคารร้านค้า เมื่อพิจารณาภาพรวมของแผนภูมิทั้งหมด พบว่า ฤดูร้อน และฤดูหนาวนั้น ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีแนวโน้มคล้ายกัน และเมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคารสำนักงานของอาคารที่มีหลังคาแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าจะมีวัสดุหน่วงความร้อนได้หลังคาหรือไม่ก็ตาม แต่อาคารร้านค้านั้นมีความแตกต่างของภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศอย่างชัดเจน เนื่องจากสัดส่วนของพื้นที่หลังคาของอาคารสำนักงานต่อพื้นที่ของผนังทั้งหมดของอาคาร มีค่าน้อย เมื่อเทียบกับอาคารร้านค้า ดังนั้น ผลของการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาที่มีผลต่อภาระการทำความเย็นของอาคารจึงมีผลน้อยกว่าอาคารร้านค้า ซึ่งมีสัดส่วนดังกล่าวมากกว่า

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาส่งผลต่อภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคารแต่ละประเภทในฤดูต่างๆ สามารถแสดงรายละเอียดได้ ดังนี้

#### 4.2.2.1 อาคารสำนักงาน

ระบบปรับอากาศในอาคารสำนักงานเริ่มทำงานช่วงเวลาประมาณ 6.00 น. ซึ่งหลังจากเปิดใช้งานระบบปรับอากาศ จนกระทั่งในช่วงเวลาประมาณ 12.00-13.00 น. นั้น ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีค่าการใช้น้ำต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่นๆ ทั้งนี้เป็นเพราะ เมื่อพิจารณาปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคารายชั่วโมงของอาคารทั้งสองประเภท พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาต่ำที่สุด ดังนั้นจึงส่งผลให้ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีค่าต่ำที่สุดเช่นกัน และเมื่อหลังจากเวลา 13.00 เป็นต้นไป ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากปริมาณความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเริ่มมีปริมาณมากขึ้น จนเมื่อถึงเวลา 17.00 น. จึงมีการปิดการใช้งานระบบปรับอากาศภายในอาคาร

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศในหน้าฤดูร้อน และฤดูหนาว พบว่า ในช่วงเวลาเช้า ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศในฤดูหนาวมีค่าที่มีความแตกต่างของช่วงเวลาก่อนเปิดการใช้งานต่ำกว่าฤดูร้อน เพราะในฤดูหนาวอุณหภูมิภายในอาคารมีค่าต่ำกว่าเนื่องจากเกิด Heat loss บริเวณเปลือกอาคาร ทำให้มีภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศน้อยกว่าในฤดูร้อน แต่หลังจากช่วงเวลา 13.00 น. ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีแนวโน้มคล้ายกับฤดูร้อน เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จึงทำให้ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาในฤดูร้อน

#### 4.2.2.2 อาคารร้านค้า

เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคารร้านค้า พบว่าในฤดูร้อน หลังคาคอนกรีตในอาคารร้านค้ามีความแตกต่างของภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศเมื่อเทียบกับหลังคาชนิดอื่นอย่างชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติการนำความร้อนของคอนกรีต ที่มีค่ามากเมื่อเทียบกับหลังคาชนิดอื่น จึงส่งผลให้ภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศในกรณีของหลังคาคอนกรีตมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับหลังคาชนิดอื่นๆ แต่ในฤดูหนาวภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของหลังคาคอนกรีตไม่มีค่าแตกต่างมากเมื่อเทียบกับหลังคาชนิดอื่น เนื่องจากในฤดูหนาว อากาศโดยรอบมีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้

ประสิทธิภาพในการนำความร้อนของหลังคาต่ำลงเช่นกัน จึงทำให้ค่าความแตกต่างของภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศมีค่าไม่แตกต่างกันมาก

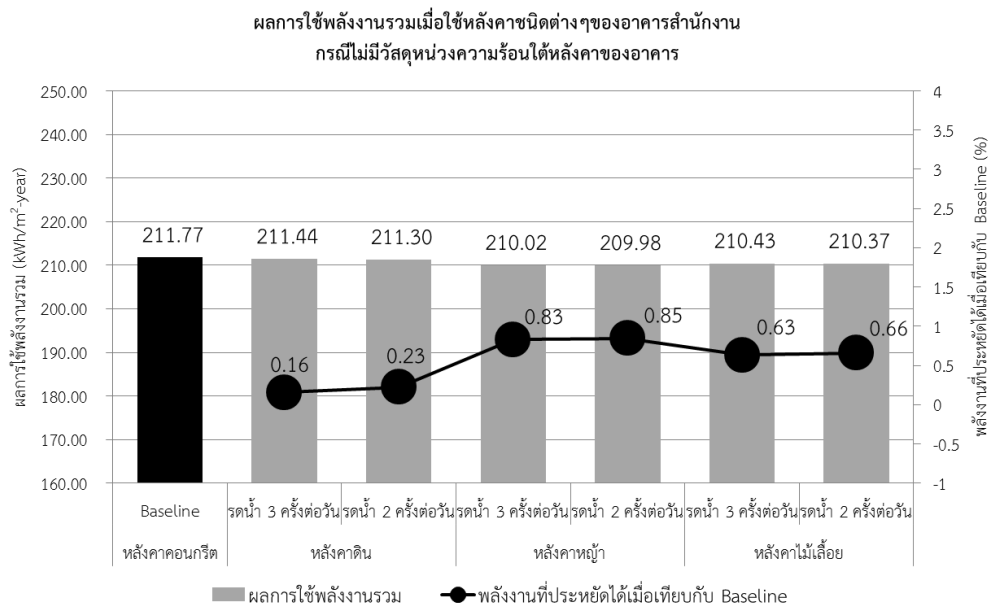
#### 4.2.2.2.1 พิจารณาความแตกต่างระหว่างหลังคาที่มีและไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา

การมีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคานั้น เปรียบเสมือนการเพิ่มค่าความจุความร้อนให้แก่หลังคา ความร้อนจึงถูกกักเก็บไว้ ทำให้พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาจากหลังคามีความผันผวนต่ำ ดังนั้น ในฤดูร้อนภาระการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศของอาคารจึงมีค่าต่ำลง เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน แต่ในฤดูหนาว อุณหภูมิโดยรอบต่ำ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศภายนอกสู่หลังคาจึงต่ำ ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุหุ้มความร้อนต่ำกว่าฤดูร้อน

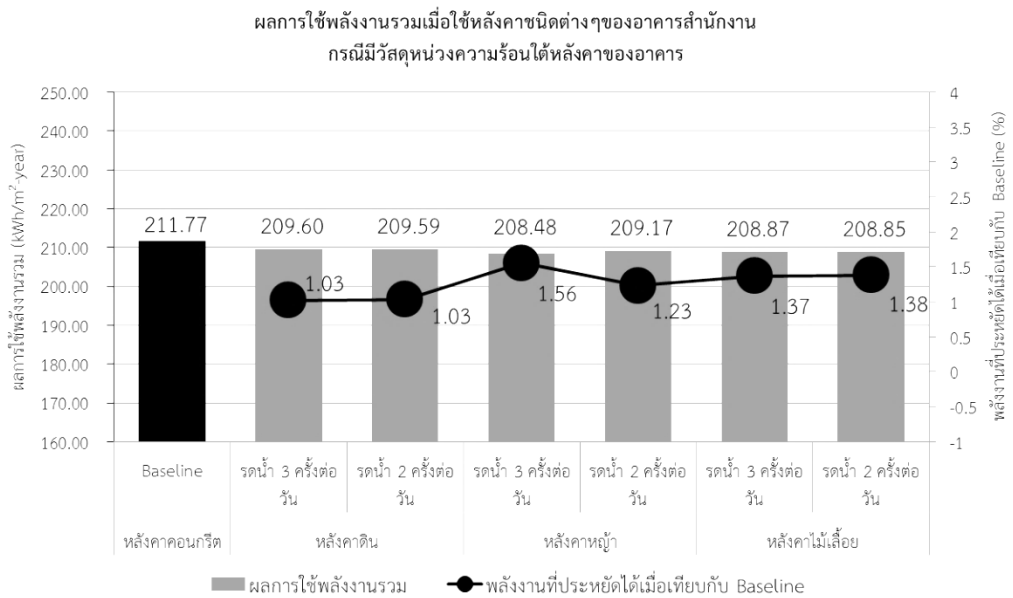
### 4.2.3 การจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมรายปี

#### 4.2.3.1 การจำลองการใช้พลังงานรวมรายปีของอาคารสำนักงาน

จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารสำนักงานของหลังคาประเภทต่างๆที่ระบบหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนและหลังคาที่มีวัสดุหุ้มความร้อนเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline ซึ่งคือหลังคาคอนกรีต ผลการจำลองเป็นดังนี้



แผนภูมิที่ 23 ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารสำนักงาน กรณีไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร



แผนภูมิที่ 24 ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารสำนักงาน กรณีมีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคาร

ตารางที่ 12 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer-U-value) ( $W/m^2 \cdot k$ ) และค่าผลการใช้พลังงานรวมต่อปี ( $kWh/m^2 \cdot year$ ) ของอาคารสำนักงาน

	หลังคา คอนกรีต (Baseline)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน	รดน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน	รดน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient- U-value) ( $W/m^2 \cdot k$ )	3.08	1.72	1.67	0.7	0.77	1.27	1.21
ผลการใช้พลังงานรวม (หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน) ( $kWh/m^2 \cdot year$ )	211.77	211.44	211.30	210.02	209.98	210.43	210.37
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)		0.16	0.23	0.83	0.85	0.63	0.66
ผลการใช้พลังงานรวม (หลังคามีวัสดุหุ้มความร้อน) ( $kWh/m^2 \cdot year$ )	211.77	209.60	209.59	208.48	209.17	208.87	208.85
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)		1.03	1.03	1.56	1.23	1.37	1.38

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า หลังคาเขียวนั้นไม่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดการใช้พลังงานรวมของอาคารสำนักงานถึงแม้ว่าจะมีวัสดุหุ้มความร้อนหรือไม่ก็ตาม ทั้งนี้เป็นเพราะอาคารสำนักงานนั้นมีช่วงเวลาการใช้สอยอาคารอยู่ในช่วงเวลา 8.00 -19.00 น. ซึ่งช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาที่หลังคานั้นยังมีคุณสมบัติการหุ้มความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาคอนกรีต ส่งผลให้ภาระในการปรับอากาศต่ำ ดังนั้น การใช้พลังงานรวมของหลังคาคอนกรีตในช่วงเวลาที่ใช้งานต่ำที่สุด

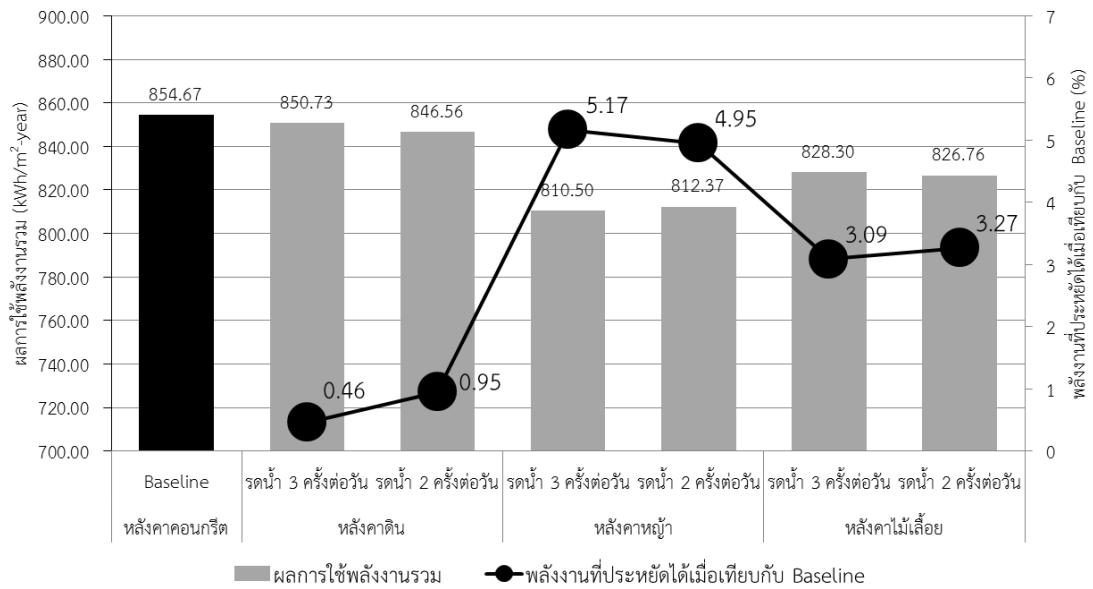
ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานรวมของสำนักงานแล้ว พบว่าไม่มีความแตกต่างกันนัก หากใช้หลังคาเขียวในอาคารสำนักงาน

#### 4.2.3.2 การจำลองการใช้พลังงานรวมรายปีของอาคารร้านค้า

จำลองการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคารร้านค้าที่มีหลังคาประเภทต่างๆ ที่ระบบหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนและหลังคาที่มีวัสดุหุ้มความร้อนเพื่อเปรียบเทียบสัดส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับBaseline ซึ่งคือหลังคาคอนกรีต ผลการจำลองเป็นดังนี้

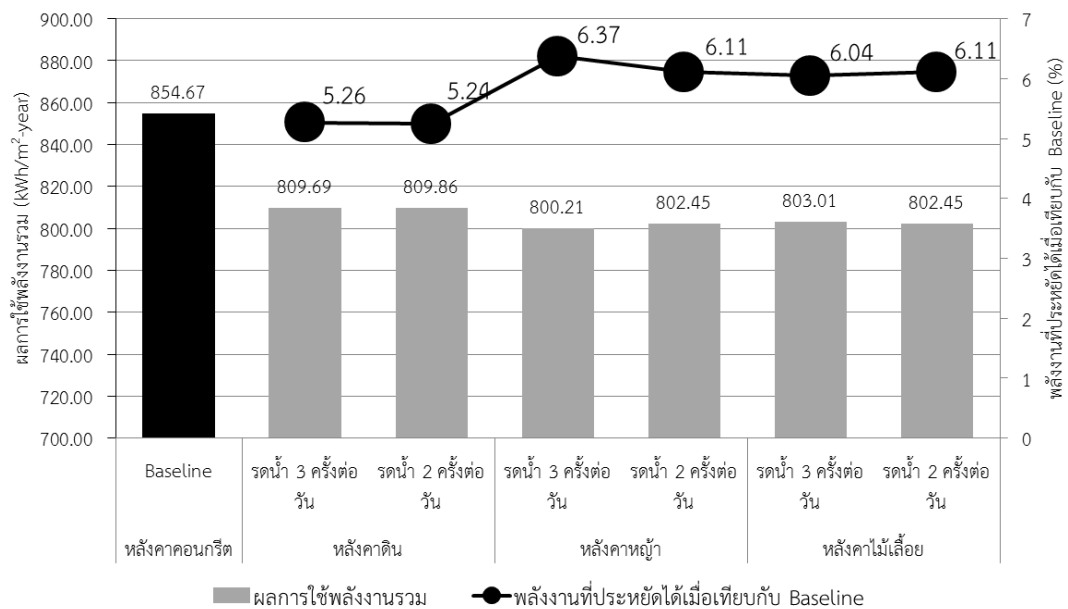


ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า  
กรณีไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคาของอาคาร



แผนภูมิที่ 25 ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า กรณีไม่มีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคาของอาคาร

ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า  
กรณีมีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคาของอาคาร



แผนภูมิที่ 26 ผลการใช้พลังงานรวมเมื่อใช้หลังคาชนิดต่างๆของอาคารร้านค้า กรณีมีวัสดุหุ้มวงความร้อนใต้หลังคาของอาคาร

ตารางที่ 13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(Heat transfer-U-value) ( $W/m^2 \cdot k$ ) และค่าผลการใช้พลังงานรวมต่อปี( $kWh/m^2 \cdot year$ ) ของอาคารร้านค้า

	หลังคา คอนกรีต (Baseline)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รตน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน	รตน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน	รตน้ำ 3 ครั้งต่อ วัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อ วัน
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient- U-value) ( $W/m^2 \cdot k$ )	3.08	1.72	1.67	0.7	0.77	1.27	1.21
ผลการใช้พลังงานรวม (หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อน) ( $kWh/m^2 \cdot year$ )	850.73	850.73	846.56	810.50	812.37	828.30	826.76
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)		0.46	0.95	5.17	4.95	3.09	3.27
ผลการใช้พลังงานรวม (หลังคามีวัสดุหุ้มความร้อน) ( $kWh/m^2 \cdot year$ )	850.73	287.92	288.02	290.81	290.59	289.53	289.64
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)		5.26	5.24	6.37	6.11	6.04	6.11

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า หลังคาดิน และหลังคาเขียวทั้งสองประเภทนั้นสามารถช่วยลดปริมาณความร้อนได้ใน ทั้งนี้เพราะเนื่องจากอาคารร้านค้ามีช่วงเวลาการใช้งานที่นานกว่าเมื่อเทียบกับอาคารสำนักงาน (10.00 - 22.00 น.) ซึ่งช่วงเวลาการใช้งานของอาคารร้านค้านั้นครอบคลุมไปถึงช่วงเวลาที่หลังคาเริ่มปล่อยความร้อนที่กักเก็บไว้ในช่วงเวลากลางคืน หลังคาคอนกรีตมีปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากหลังคามากที่สุด ถัดมาคือ หลังคาดิน หลังคาไม้เลื้อย และหลังคาหญ้า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการใช้พลังงานรวมต่อพื้นที่ของอาคารร้านค้า

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างพลังงานรวมต่อตารางเมตรของหลังคาที่มีและไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนได้หลังคา พบว่า พลังงานรวมต่อพื้นที่ของหลังคาที่มีวัสดุหุ้มความร้อนมีผลการใช้พลังงานต่อตารางเมตรลดลง เมื่อเทียบกับพลังงานรวมต่อพื้นที่ของหลังคาที่ไม่มีวัสดุหุ้มได้หลังคา ทั้งนี้เป็นผลมาจากคุณสมบัติของความจุความร้อนที่เพิ่มขึ้น

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการเลือกใช้หลังคาเขียวในอาคาร โดยกำหนดให้อาคารมีอายุการใช้งานอาคาร 20 ปี (Life cycle cost analysis-LCC) โดยพิจารณา โดยมีอาคารที่มีหลังคาเป็นหลังคาคอนกรีตเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ โดยนำค่า

ไฟฟ้ารวมรายปี ค่าบำรุงรักษาตลอด 20 ปี และค่าก่อสร้างเพิ่มเติมของหลังคาเขียว มาทำการวิเคราะห์หาอัตราคืนทุน (Payback Period-PB เพื่อพิจารณาเพื่อการตัดสินใจในเลือกใช้หลังคาเขียวต่อไป

ซึ่งการหามูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ดังกล่าวนี้ ทำการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีของอาคารร้านที่มีวัสดุผนังความร้อนเท่ากัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาพลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline แล้วพบว่า หลังคาบ้านค้าที่มีวัสดุผนังความร้อนข้างใต้ มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานมากที่สุด เมื่อเทียบกับหลังคาประเภทอื่น ดังนั้น ในการคำนวณค่าความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะมุ่งเน้นในส่วนของอาคารร้านค้าที่มีวัสดุผนังความร้อนใต้หลังคา

โดยกำหนดให้เงินจ่ายลงทุนสุทธิในการก่อสร้างหลังคาคอนกรีต และหลังคาเขียวมีรายละเอียดของค่าก่อสร้าง และค่าบำรุงรักษา ดังนี้

ตารางที่ 14 ตารางแสดงรายละเอียดค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคา

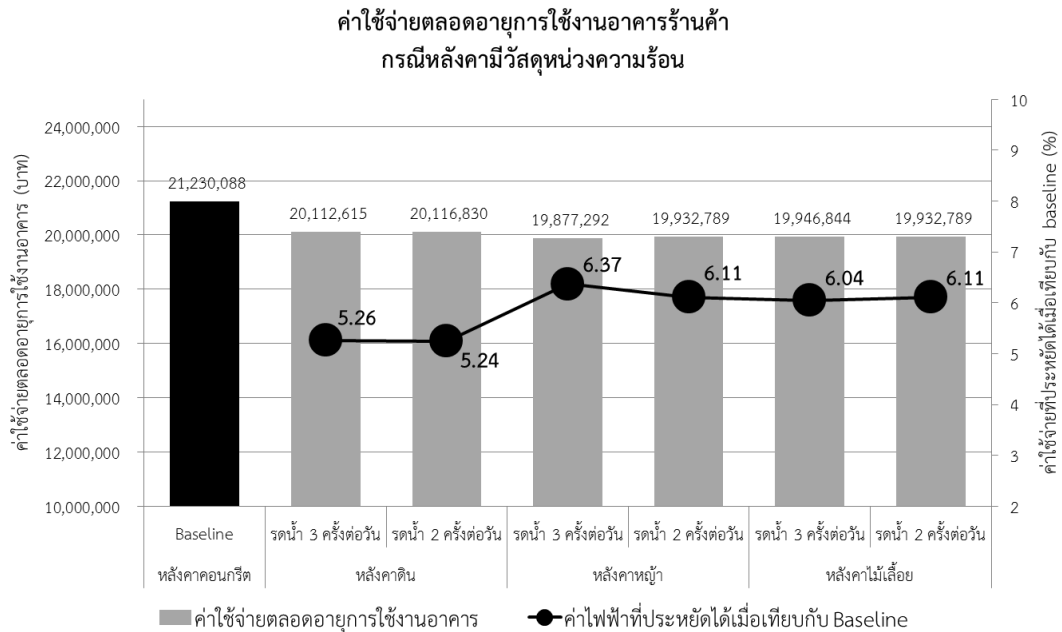
ค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคา	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ค่าก่อสร้างหลังคาคอนกรีต (บาท/ตารางเมตร)	1,200
ค่าก่อสร้างหลังคาเขียว (บาท/ตารางเมตร)	3,000
ค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียวตลอดอายุการใช้งาน (บาท/ตารางเมตร)	500
ค่าน้ำสำหรับการรดน้ำหลังคาเขียว (บาท/ลูกบาศก์เมตร)	15.81
<b>รวมค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคาคอนกรีตต่อตารางเมตร</b>	<b>1,200</b>
<b>รวมค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียวต่อตารางเมตร</b>	<b>3,500</b>

#### 4.2.4.1 การวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ของอาคารร้านค้าที่หลังคามีวัสดุผนังความร้อนใต้หลังคา

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคารสำนักงาน (20 ปี) กรณีหลังคาไม่มีวัสดุผนังความร้อนใต้หลังคา สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 15 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า กรณีมีวัสดุหมุนวงใต้หลังคา

	หลังคาคอนกรีต Baseline	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รตน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	รตน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	รตน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	รตน้ำ 2 ครั้งต่อวัน
พลังงานรวมต่อปี (kWh/year)	1,517,996	1,502,434	1,502,315	1,494,366	1,499,320	1,497,158	1,497,030
ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (บาท)							
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	21,230,088	20,112,615	20,116,830	19,877,292	19,932,789	19,946,844	19,932,789
ค่าใช้จ่าย การก่อสร้างหลังคา (บาท)	3,312,000	8,280,000	8,280,000	8,280,000	8,280,000	8,280,000	8,280,000
ค่าน้ำต่อปี (บาท)	-	188,506	125,671	188,506	125,671	188,506	125,671
ค่าบำรุงรักษา (บาท)	-	1,380,000	1,380,000	1,380,000	1,380,000	1,380,000	1,380,000
รวมค่าใช้จ่าย ตลอดอายุ การใช้งาน (บาท)	24,542,088	29,961,121	29,902,501	29,725,798	29,718,460	29,795,350	29,718,460
ค่าไฟฟ้าที่ลดลงเมื่อ เทียบกับ Baseline (บาท)	-	1,117,473	1,113,258	1,352,796	1,297,299	1,283,244	1,297,299
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		27	27	22	23	23	23



แผนภูมิที่ 27 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคารร้านค้า กรณีหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนได้  
หลังคา

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า กับค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ พบว่า ระยะเวลาคืนทุนของหลังคาดินที่มีการรตน้ำ 3 ครั้งต่อวัน มีระยะเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 22 ปี ซึ่งถือว่าไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่หากมองในแง่การลดใช้พลังงานและสิ่งแวดล้อมระดับเมือง หลังคาเขียวยังคงเป็นอาคารที่มีประโยชน์ในแง่ของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การลดภาวะเกาะร้อน การเพิ่มพื้นที่สีเขียวและกักซอกกักเงิน เป็นต้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความเป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว โดยวิธีการระเหยน้ำ โดยเป็นการจำลองค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยการจำลองกล่องทดลองที่มีหลังคาเป็นหลังคาชนิดต่างๆ คือ หลังคาคอนกรีต ซึ่งเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ (Baseline) หลังคาดิน หลังคาหญ้า และหลังคาไม้เลื้อย ที่มีการรดน้ำหลังคา 2 รูปแบบ และนำค่าการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาที่ได้จากการทดลองนำมาคำนวณเพื่อหาพลังงานความร้อนรายปีด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ VisualDOE4.0 จากการอภิปรายผลการทดลองในบทที่ 4 พบว่าหลังคาเขียวที่มีวัสดุหุ้มความร้อนนั้นจะมีประสิทธิภาพในการช่วยลดพลังงานความร้อนรายปีและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดในอาคารร้านค้า โดยการอภิปรายผลการทดลองนั้นแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. สรุปผลการวิจัยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียว โดยวิธีการระเหยน้ำ
2. ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้
3. ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

## 5.1 สรุปผลการวิจัยการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและความเป็นไปได้ทางการเงินของหลังคาเขียว โดยวิธีการระเหยน้ำ

### 5.1.1 สรุปผลการวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง

#### 5.1.1.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อน และค่าการนำความร้อนของหลังคาแต่ละชนิด

ตารางที่ 16 สรุปค่าที่ได้จากการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง

	หลังคา คอนกรีต (Baseline) (°C)	หลังคาดิน		หลังคาหญ้า		หลังคาไม้เลื้อย	
		รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 3 ครั้ง (°C)	รดน้ำ 2 ครั้ง (°C)
ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิบนหลังคาและอุณหภูมิใต้หลังคา ( $T_o - T_i$ )	4.21	1.8	1.88	4.21	3.78	3.85	3.52
ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างช่องลมเข้าและช่องลมออก ( $T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}$ )	3.15	0.94	0.96	0.91	0.89	1.50	1.30
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer-U-value) ( $\text{W/m}^2\text{k}$ )	3.08	1.72	1.67	0.7	0.77	1.27	1.21
ค่าความต้านทานความร้อนของหลังคา ( $\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$ )	0.11	0.36	0.38	1.21	1.08	0.57	0.61
ค่าการนำความร้อน (Conductivity-k) ( $\text{W/m-K}$ )	1.39	0.41	0.39	0.12	0.14	0.26	0.25

ผลการวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลองเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาประเภทต่างๆที่มีรูปแบบการรดน้ำที่ต่างกัน พบว่า การถ่ายเทความร้อนนั้น หลังคาคอนกรีตมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด และมีคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อนมากที่สุดเนื่องจากความหนาแน่นของวัสดุ และหลังคาที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำที่สุดคือหลังคาหญ้าที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน ซึ่งมีค่า U-value เท่ากับ  $0.7 \text{ W/m}^2\text{k}$  ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณความร้อนจากบริเวณภายนอก เมื่อถ่ายเทเข้าสู่หลังคา จะมีการคายน้ำของพืชและการระเหยน้ำของดินซึ่งเปรียบเสมือนเป็นฉนวนกันความร้อน ทำให้ปริมาณความร้อนที่เข้ามาสู่หลังคานั้นมี

ปริมาณน้อย ส่งผลให้ค่าถ่ายเทความร้อนน้อย ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าหลังคา  
หุ้มที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวันนั้นมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนดีที่สุด

### 5.1.1.2 ผลการศึกษาความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนใน กรณีหลังคาที่มีจำนวนครั้งในการรดน้ำแตกต่างกัน

ตารางที่ 17 ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่มีการรดน้ำ 2 ครั้งต่อ  
วัน และ 3 ครั้งต่อวัน

	หลังคาดิน	หลังคาหญ้า	หลังคาไม้เลื้อย
ความแตกต่างของ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer- U-value) ( $W/m^2k$ )	0.05	0.07	0.06

พิจารณาเมื่อพิจารณาจำนวนครั้งในการรดน้ำหลังคา พบว่า การรดน้ำ  
หลังคา 3 ครั้งต่อวัน และการรดน้ำหลังคา 2 ครั้งมีความแตกต่างของค่า U-value  
น้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า จำนวนครั้งในการรดน้ำไม่มีผลทำให้  
ประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาต่ำลง

### 5.1.2 สรุปผลการใช้พลังงานรวมของอาคารแต่ละประเภท

จากการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 เพื่อทำการจำลองพลังงานรวมของ  
อาคารต้นแบบแต่ละอาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษา โดยผลการจำลองค่าพลังงานรวมในแต่ละ  
กรณีศึกษาเป็นดังนี้

#### 5.1.2.1 อาคารสำนักงาน

##### 5.1.2.1.1 หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา

ตารางที่ 18 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร ( $kWh/m^2$ ) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้  
เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารสำนักงาน

ชนิดหลังคา	จำนวนครั้งในการรดน้ำ หลังคา	พลังงานรวมต่อ หนึ่งตารางเมตร ( $kWh/m^2$ )	พลังงานรวมที่ประหยัด ได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)



หลังคาคอนกรีต (Baseline)		211.77	
หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	211.44	0.16
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	211.30	0.23
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	210.02	0.83
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	209.98	0.85
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	210.43	0.63
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	210.37	0.66

#### 5.1.2.1.2 หลังคามีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคา

ตารางที่ 19 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m<sup>2</sup>) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคามีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารสำนักงาน

ชนิดหลังคา	จำนวนครั้งในการรดน้ำหลังคา	พลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> )	พลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)
หลังคาคอนกรีต (Baseline)		211.77	
หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	209.60	1.03
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	209.59	1.03
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	208.48	1.56
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	209.17	1.23
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	208.87	1.37
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	208.85	1.38

จากผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าการใช้หลังคาเขียวในอาคารสำนักงานนั้นมีผลการประหยัดพลังงานน้อยมากเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีต ซึ่งเป็นกรณีศึกษาเนื่องจากชั่วโมงการใช้งานของอาคารสำนักงานนั้น ยังอยู่ในช่วงที่หลังคาคอนกรีตยังมีการหน่วงความร้อนที่ถ่ายเทจากหลังคาเข้าสู่อาคาร จึงทำให้ภาระในการทำงานของระบบปรับอากาศยังน้อย เนื่องจากปริมาณความร้อนถ่ายเทเข้ามาน้อย จึงทำให้การใช้พลังงานรวมต่อพื้นที่ของอาคารสำนักงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก

### 5.1.1.2 อาคารร้านค้า

#### 5.1.1.2.1 หลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา

ตารางที่ 20 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m<sup>2</sup>) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคาไม่มีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารร้านค้า

ชนิดหลังคา	จำนวนครั้งในการรดน้ำหลังคา	พลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> )	พลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)
หลังคาคอนกรีต (Baseline)		854.67	
หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	850.73	0.46
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	846.56	0.95
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	810.50	5.17
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	812.37	4.95
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	828.30	3.09
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	826.76	3.27

#### 5.1.1.2.2 หลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคา

ตารางที่ 21 ตารางแสดงพลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m<sup>2</sup>) และพลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%) ของหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคากรณีอาคารร้านค้า

ชนิดหลังคา	จำนวนครั้งในการรดน้ำหลังคา	พลังงานรวมต่อหนึ่งตารางเมตร (kWh/m <sup>2</sup> )	พลังงานรวมที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Baseline (%)
หลังคาคอนกรีต (Baseline)			
หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	809.69	5.26
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	809.86	5.24
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	800.21	6.37
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	802.45	6.11
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	803.01	6.04

รตน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	802.45	6.11
---------------------	--------	------

จากผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าหลังคาเขียวในอาคารร้านค้านั้นมีผลในการช่วยประหยัดพลังงานรวมเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตซึ่งเป็นกรณีศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งเมื่อพิจารณาพลังงานรวมในกรณีของหลังคาที่มีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคา และหลังคาที่ไม่มีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคา พบว่า หลังคาที่มีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคาสามารถประหยัดพลังงานได้มากกว่าหลังคาที่ไม่มีวัสดุหน่วงความร้อนใต้หลังคาทั้งสองรูปแบบอาคารที่นำมาเป็นกรณีศึกษา เนื่องจากชั่วโมงการใช้งานของอาคารร้านค้ามีระยะเวลาที่ยาวนานกว่าในช่วงกลางคืน ซึ่งวัสดุหน่วงความร้อนหลังคาเริ่มมีการปล่อยความร้อนที่กักเก็บไว้สู่ตัวอาคาร ซึ่งความร้อนที่ถ่ายเทจากหลังคานั้น หลังคาเขียวจะมีการคายความร้อนและการระเหยน้ำจากน้ำในดินที่รดช่วยพาความร้อนที่ถ่ายเทสู่หลังคาออกโดยการพาความร้อนออกไป ดังนั้นความร้อนที่สะสมในวัสดุหน่วงความร้อนในช่วงเวลากลางวันของหลังคาเขียวเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตจึงมีปริมาณน้อยกว่า และในเวลากลางคืนจึงมีปริมาณความร้อนน้อยกว่าหลังคาคอนกรีต ดังนั้น จึงส่งผลกับภาระการทำความเย็นในอาคารอย่างชัดเจน

## 5.1.2 ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของหลังคาเขียวในอาคารต้นแบบ

### 5.1.2.1 ค่าไฟฟ้ารวมรายปี

ผลจากค่าพลังงานรวมต่อปีของหลังคาแต่ละชนิดในอาคารสำนักงาน และอาคารร้านค้า หากกรณีศึกษาใดมีการใช้พลังงานรวมต่อปีมากย่อมส่งผลถึงค่าไฟฟ้าต่อปีที่มากขึ้นด้วย จากกรณีของอาคารสำนักงาน จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างของพลังงานรวมเมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตนั้นมีค่าความแตกต่างน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่เมื่อพิจารณาพลังงานรวมที่สามารถประหยัดได้เมื่อเทียบกับหลังคาคอนกรีตในอาคารร้านค้าแล้ว พบว่ามีค่าความแตกต่างของพลังงานรวมอยู่ในระดับที่ชัดเจน และเมื่อนำมาคำนวณค่าไฟฟ้ารายปีแล้ว พบว่ามีค่าไฟฟ้ารายปีประหยัดกว่าหลังคาคอนกรีต

### 5.1.2.2 ระยะเวลาคืนทุนของโครงการ (Payback period)

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง และค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียว เมื่อนำค่าใช้จ่ายต่างๆที่เกี่ยวข้องมาคำนวณ สามารถสรุปค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องดัง แสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 22 ตารางแสดงค่าใช้จ่ายต่อตารางเมตรของหลังคาแต่ละชนิด

ค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคาต่อตารางเมตร	ค่าใช้จ่าย (บาท/ตารางเมตร)
ค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคาคอนกรีต	1,200
ค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาหลังคาเขียว	3,500

เมื่อทำการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของโครงการ ซึ่งคำนวณจากสัดส่วน ค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการโดยวิธี Life cycle cost analysis ต่อค่าไฟฟ้าที่สามารถประหยัดได้ พบว่า หลังคาเขียวที่มีการรดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน โดยที่มีหลังคามีวัสดุหุ้มความร้อนใต้หลังคาของอาคารร้านค้าสามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดคือ 22 ปี

ตารางที่ 23 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) (ปี) ของหลังคาแต่ละชนิดของอาคารร้านค้า

ชนิดหลังคา	จำนวนครั้งในการรดน้ำ หลังคา	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
หลังคาคอนกรีต (Baseline)		
หลังคาดิน	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	27
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	27
หลังคาหญ้า	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	22
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	23
หลังคาไม้เลื้อย	รดน้ำ 3 ครั้งต่อวัน	23
	รดน้ำ 2 ครั้งต่อวัน	23

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้

ผลการวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นแนวทางในการเลือกใช้หลังคาเขียวบนอาคารประเภทต่างๆ เพื่อให้สามารถคืนทุนค่าก่อสร้างเพิ่มเติมจากการก่อสร้างหลังคาเขียวได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม แต่ในการใช้จริงต้องปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรบางตัวเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

1. การวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการใช้พลังงานรวมของอาคารเพียงสองประเภทคือ อาคารสำนักงาน และอาคารร้านค้า ควรทำการเปรียบเทียบอาคารประเภทอื่น เนื่องจากรายละเอียดเกี่ยวกับการใช้งานของอาคารแต่ละประเภทจะมีรูปแบบไม่เหมือนกัน
2. ควรเปรียบเทียบกับการใช้งานจริงในแต่ละอาคาร เพราะงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าการใช้งานอาคารเบื้องต้นเท่านั้น

## รายการอ้างอิง

- AK, Mier. (1991). Strategic landscaping and air-conditioning savings: a literature review. *Energy Buildings*, 79-86.
- C.L., Beadle. (1993). *Growth analysis*. In (Hall, D.O. et al. Ed.) *Photosynthesis and Production in the Changing Environment: A Field and Laboratory Manual*. London: Chapman & Hall.
- D. Kolokotsa, M. Santamouris, and Zerefos, S.C. (2013). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy*, 95, 118-130.
- Ekaterini Eumorfopoulou, and Dimitr Aravantinos. (1998). The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and building*, 27, 29-36.
- Elsa, Lui Shiu Ting. (2008). *Life Cycle Assessment of Green Roof System in Hong Kong*. Master of Science in Environmental Management. The University of Hong Kong.
- Onmura S, Matsumoto M, and S, Hokoi. (2001). Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Building Environment*, 36, 53-66.
- Sittipong Permpituck, and Pichai Namprakai. (2012). The energy consumption performance of roof lawn gardens in Thailand. *Renewable Energy*, 40, 98-103.
- Surapong Chirarattananon, and Juntakan Taweekun. (2003). A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. *Energy Conversion and Management*, 44, 743-762.
- Thorntwaite, C. W. (1984). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- เศรษฐบุต, อรรถน. (2549a). การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี *Life cycle assessment (LCA)* โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. กรุงเทพมหานคร: โครงการส่งเสริมการทำวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษก.
- กมลภัทร์ โรจนประดิษฐ์. (2552). การออกแบบสวนหลังคาโดยใช้หลักการออกแบบภูมิทัศน์เพื่อการบำบัดจิตใจ. มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- บรรจง สมบูรณ์ชัย และ ทวี ต้นหลี่. (2547). การให้น้ำสนามหญ้า. เข้าถึงจาก [http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/section2/la445/publication/Publication1\\_files/page0026.htm](http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning47/section2/la445/publication/Publication1_files/page0026.htm)
- ประวีตร กิตติชาญธีระ. (2553). ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์กันแดดแบบผนัง 2 ชั้น : กรณีศึกษาอาคารพักอาศัยเขตกรุงเทพมหานคร. ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วิเศษศักดิ์ สุริยาศรี. (2555). ความคุ้มทุนของหลังคาเขียวต่อการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าสำหรับการปรับอากาศในอาคารพาณิชย์ในจังหวัดเชียงใหม่. สถาปัตยกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. (2542). ข้อมูลภูมิอากาศมาตรฐานสำหรับใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายการใช้พลังงานของอาคาร ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิษฎา อธิคมบัณฑิตกุล. (2555). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุหลังคาที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและฉนวนความร้อนทั่วไป. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรรถจัน เศรษฐบุตร์. (2549b). การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารทาว์นเฮ้าส์. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 5, 30-52.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวแสงทิพย์ นิรุติรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม ในภาคต้นการศึกษา 2556



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY