ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารสีขาวที่เคลือบสีเทอร์โมโครมิก

นายณรัฐ ข้องม่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY PERFORMANCE OF THERNOCHROMIC COATING ON WHITE ROOF

Mr. Narat Kongmuong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารสีขาวที่เคลือบสีเทอร์โมโครมิก
โดย	นายณรัฐ ข้องม่วง
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. พันธุดา พุฒิไพโรจน์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ณรัฐ ข้องม่วง : ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหลังคาอาคารสีขาวที่เคลือบสีเทอร์โมโครมิก (ENERGY PERFORMANCE OF THERNOCHROMIC COATING ON WHITE ROOF) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร, 79 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและการประหยัดพลังงานของหลังคาเมทัลชีทโดยใช้สีขาวชนิดป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิก และฉนวนป้องกันความร้อน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนการทดลองคุณสมบัติของวัสดุหลังคาโดยการใช้กล่องทดลองกับสภาพภูมิอากาศจริง การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และ การศึกษาความคุ้มทุนในด้านการลงทุน

ผลการทดลองพบว่า วัสดุหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ส่งผลให้หลังคามีค่าความต้านทานความร้อนสูงที่สุด โดยหลังคาที่ใช้สีขาว+ฉนวนใยแก้ว และ สีขาวเคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิก+ฉนวนใยแก้ว นั้นมีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกัน รองลงมาคือหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน พบว่าทั้งหลังคาที่เคลือบสีขาว และ สีขาว+สีเทอร์โมโครมิก มีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกัน โดยหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุดคือหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี

จากการศึกษาอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ในอาคารที่มีการใช้งานเฉพาะในเวลากลางคืน พบว่าการใช้หลังคาเมทัลชีทสีขาวเคลือบสีเทอร์โมโครมิกและไม่ติดฉนวนนั้นช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้ถึง 7% เมื่อเทียบกับหลังคาที่ติดฉนวนและเคลือบสีขาวธรรมดา ในขณะที่การติดฉนวนนั้นเหมาะสมกับอาคารที่เน้นใช้งานเฉพาะเวลากลางวันเป็นหลัก โดยสามารถลดการใช้พลังงานได้ 15 – 30 % เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ติดฉนวน และในอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศ 24 ชั่วโมง การใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาวและติดฉนวน ช่วยลดการใช้พลังงานไฟได้เพียง 1 – 2 % เมื่อเทียบกับหลังคาที่เคลือบสีขาวและติดฉนวน และในด้านความคุ้มทุน พบว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาวช่วยลดค่าไฟที่ใช้ภายในอาคารที่มีระยะเวลาการใช้งานในเวลากลางคืน 7 % กึ่งกลางวันกลางคืน และอาคารที่ใช้งาน 24 ชั่วโมง ได้ 2 – 3 % และมีระยะเวลาคืนทุนมากกว่าการใช้สีขาวธรรมดา 2 – 3 ปี เนื่องจากสีเทอร์โมโครมิกมีราคาสูงมากในปัจจุบันเมื่อเทียบกับสีขาวธรรมดา

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2558

5773559625 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: THERMOCHROMIC COATING / HEAT REFLECTING COLOR / METALSHEET ROOF / ENERGY SIMULATION

NARAT KONGMUONG: ENERGY PERFORMANCE OF THERNOCHROMIC COATING ON WHITE ROOF. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 79 pp.

This research aims to study and compare the performance of heat protection and energy saving of the roof metal sheet roof by using heat protection color, thermochromic color, insulation. All roof samples were analyzed by measuring the temperatures of air in the test boxes placed in the outdoor. The thermal properties retrieved from the experimental boxes were input into VisualDoe 4.1 in order to simulate energy consumption and then calculate economic feasibility.

The measurement data indicate that the roof installed with 2-inch fiberglass insulation has highest thermal resistance. There is no significant difference between the performance of the roof coated with either white paint or thermochromic paint if the roof is already insulated with fiberglass insulation.

From the simulations of buildings with nighttime only Air-conditioning, white, uninsulated metal roof coated with thermochromic materials help save energy by 7%. Roof insulation is found to be useful only for buildings with daytime only air-conditioning as it can save energy by 15-30%. For buildings with 24-hours Air-conditioning, applying Thermochromic on insulated roof can help save energy by only 1-2% In terms of economics, Thermochromic has a payback period of 2-3 years compared with regular white paint.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Architecture	Student's Signature	.....
Field of Study:	Architecture	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2015		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา แนะนำและสอนในทุกเรื่องที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอบคุณท่านอาจารย์ในภาควิชานิเวศสถาปัตย์ รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.พันธุดา พุฒิไพโรจน์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการภายนอกในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงเจ้าหน้าที่ห้องภาคสาขาสถาปัตยกรรม ทุกท่านที่ให้ความสะดวกด้านอำนวยการและประสานงาน ในการทำวิทยานิพนธ์ให้ผู้เขียนตลอดมาตลอดจนค้นคว้าหาข้อมูลในการจัดทำวิทยานิพนธ์ของผู้เขียนครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนตั๊ก ครอบครัวเสือแก้วน้อย แม่ใหญ่ ลุง ป้า ครอบครัวศรีจันทร์ ที่ช่วยเหลือสถานที่ทดลอง ที่พักอาศัย ตลอดจนการช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆอย่างมากในการทดลองวิทยานิพนธ์

ขอบคุณเพื่อนๆ Solution 51 และเพื่อนๆที่เกี่ยวข้อง และเพื่อนร่วมรุ่นและพี่ๆ IDEA ที่ได้ให้กำลังใจ ช่วยเหลือในด้านต่างๆ สุดท้ายคือ มารดา น้อง และครอบครัวที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอดตั้งแต่ต้นในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฐ

สารบัญแผนภูมิ ..... ฑ

สารบัญแผนภูมิ ..... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 2

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน 7

2.1.1 การนำความร้อน (Conduction) 7

2.1.2 การพาความร้อน (Convection) 8

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) 8

2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร 9

2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) 10

2.2.2 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance) 11

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U - value) 11
2.2.4 คุณสมบัติการแผ่รังสีของพื้นผิว 11
2.2.5 การแผ่รังสีจากวัสดุในช่วงคลื่นยาว (Longwave Radiation) 13
2.3 การป้องกันความร้อนทางหลังคา 14
2.3.1 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation) 14
2.4 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อน 14
2.5 สีเทอร์โมโครมิก 15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย 19
3.1 แนวทางการวิจัย 19
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 19
3.3 การรวบรวมข้อมูล 19
3.4 ตัวแปรในการวิจัย 20
3.4.1 ตัวแปรต้น 20
3.4.2 ตัวแปรตาม 20
3.4.3 ตัวแปรควบคุม 20
3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 21
3.5.1 การศึกษาทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21
3.5.2 การกำหนดรูปแบบของวัสดุกันความร้อนที่นำมาใช้กับหลังคาเมทัลชีท 21
3.5.3 ทำการรวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารที่ใช้จำลองผลการใช้พลังงาน 22
3.5.4 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุกันความร้อน ในโปรแกรมคำนวณ VisualDOE 4.1 25
3.5.5 การพิจารณาด้านความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ 33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล 34
4.1 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล จากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง 34
4.1.1 หลังคาประเภทต่างๆที่ใช้ในการทดลอง 35
4.1.2 ผลการศึกษาเรื่องสีและฉนวนกันความร้อนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุหลังคาเมทัลชีท 36
4.1.3 ผลการศึกษาเรื่องสีและฉนวนกันความร้อนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิภายใน – ภายนอกกล่องทดลอง 42
4.1.4 ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ที่คำนวนได้จากกล่องทดลอง 43
4.2 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากจำลองอาคารโดยใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 45
4.2.1 อาคารพักอาศัย 45
4.2.2 อาคารสำนักงาน 49
4.2.3 อาคารร้านค้า 52
4.2.4 อาคารโรงพยาบาล 55
4.3 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ 58
4.3.1 อาคารพักอาศัย 59
4.3.2 อาคารสำนักงาน 61
4.3.3 อาคารร้านค้า 63
4.3.4 อาคารโรงพยาบาล 65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 68
5.1 ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน 68
5.2 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานในอาคารประเภทต่างๆ 69
5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป 74
รายการอ้างอิง 75

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงรายการวัสดุตามระดับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ 12

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลอาคารที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าการใช้พลังงาน..... 32

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) ของหลังคาประเภทต่างๆที่ได้จากการทดลอง 45

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ 47

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ 50

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ 53

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ..... 56

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของบ้านพักอาศัย (Payback Period) 59

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period)..... 62

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้า (Payback Period) 64

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารโรงพยาบาล (Payback Period)..... 67

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ที่หาได้จากกล่องทดลอง 68

ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารบ้านพักอาศัย 69

ตารางที่ 5.3 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารสำนักงาน..... 70

ตารางที่ 5.4 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารร้านค้า 71

ตารางที่ 5.5 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารโรงพยาบาล 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนการวิจัย 5

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานสีเทอร์โมโครมิก 16

ภาพที่ 3.1 แปลนอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ 22

ภาพที่ 3.2 รูปด้านอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ 23

ภาพที่ 3.3 อาคารสำนักงานต้นแบบ 23

ภาพที่ 3.4 อาคารโรงพยาบาล (c) และอาคารร้านค้าต้นแบบ (d) 24

ภาพที่ 3.5 รูปแบบโปรแกรม VisualDOE 4.1 25

ภาพที่ 3.6 ฟังก์ชันสำหรับการป้อนข้อมูลรายละเอียดวัสดุหลังคาในโปรแกรม VisualDOE 4.1 26

ภาพที่ 3.7 กล่องที่ใช้ในการทดลอง 27

ภาพที่ 3.8 สีป้องกันความร้อนสีขาว Beger Cool UV Shield (ก) สีเทอร์โม-โครมิกสีดำ 32 °C และน้ำยาอะคริลิค (Binder) (ข) 28

ภาพที่ 4.1 สถานที่ทดลองและการศึกษาด้วยกล่องทดลอง 34

ภาพที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนสีของแผ่นหลังคาวัสดุเมทัลชีทที่เคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิกที่ 26 °C (ก), 30 °C (ข) และ 42 °C (ค) 35

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 3.1 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางวัน 28
แผนภูมิที่ 3.2 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางคืน..... 29
แผนภูมิที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอุณภูมิจากกล่องทดลอง 30
แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิพื้นผิวบนของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ 36
แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิพื้นผิวล่างของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ 37
แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี (Basecase)..... 38
แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว (White).. 39
แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก (White + Thermochromic) 39
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation) 40
แผนภูมิที่ 4.7 พื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation) 40
แผนภูมิที่ 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบน – ล่างของหลังคาแบบต่างๆ 41
แผนภูมิที่ 4.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet) ของกล่องที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ..... 42
แผนภูมิที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า – ออกของกล่องทดลอง 43
แผนภูมิที่ 4.11 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ . 46
แผนภูมิที่ 4.12 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 22.00 น. – 6.00 น.ของบ้านพักอาศัย 48
แผนภูมิที่ 4.13 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของบ้านพักอาศัย 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แผนภูมิที่ 4.14 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ..... 49

แผนภูมิที่ 4.15 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 8.00 น. – 20.00 น. ของอาคารสำนักงาน..... 51

แผนภูมิที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน 51

แผนภูมิที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ 52

แผนภูมิที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 10.00 น. – 22.00 น. ของอาคารร้านค้า 54

แผนภูมิที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า..... 54

แผนภูมิที่ 4.20 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ . 55

แผนภูมิที่ 4.21 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 7.00 น. – 18.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล 57

แผนภูมิที่ 4.22 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 19.00 น. – 6.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล 57

แผนภูมิที่ 4.23 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล 58

แผนภูมิที่ 4.24 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของบ้านพักอาศัย 60

แผนภูมิที่ 4.25 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารสำนักงาน..... 61

แผนภูมิที่ 4.26 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารร้านค้า 65

แผนภูมิที่ 4.27 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารโรงพยาบาล..... 66

Chulalongkorn University

สารบัญแผนภูมิ

แผนภูมิที่ 3.1 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางวัน..... 28
แผนภูมิที่ 3.2 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางคืน..... 29
แผนภูมิที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอุณภูมิจากกล่องทดลอง..... 30
แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิพื้นผิวบนของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ..... 36
แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิพื้นผิวล่างของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ..... 37
แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี (Basecase)..... 38
แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว (White).. 39
แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก (White + Thermochromic) 39
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation) 40
แผนภูมิที่ 4.7 พื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation)..... 40
แผนภูมิที่ 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบน – ล่างของหลังคาแบบต่างๆ 41
แผนภูมิที่ 4.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet) ของกล่องที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ..... 42
แผนภูมิที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า – ออกของกล่องทดลอง 43
แผนภูมิที่ 4.11 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ . 46
แผนภูมิที่ 4.12 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 22.00 น. – 6.00 น.ของบ้านพักอาศัย 48
แผนภูมิที่ 4.13 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของบ้านพักอาศัย 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แผนภูมิที่ 4.14 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ..... 49

แผนภูมิที่ 4.15 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 8.00 น. – 20.00 น. ของอาคารสำนักงาน..... 51

แผนภูมิที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน 51

แผนภูมิที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ 52

แผนภูมิที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 10.00 น. – 22.00 น. ของอาคารร้านค้า 54

แผนภูมิที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า..... 54

แผนภูมิที่ 4.20 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ . 55

แผนภูมิที่ 4.21 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 7.00 น. – 18.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล 57

แผนภูมิที่ 4.22 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 19.00 น. – 6.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล 57

แผนภูมิที่ 4.23 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล 58

แผนภูมิที่ 4.24 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของบ้านพักอาศัย 60

แผนภูมิที่ 4.25 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารสำนักงาน..... 61

แผนภูมิที่ 4.26 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารร้านค้า 65

แผนภูมิที่ 4.27 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารโรงพยาบาล..... 66

Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพภูมิอากาศที่แปรปรวน ที่ส่งผลมาจากการที่สิ่งแวดล้อมถูกทำลายและการใช้ทรัพยากรที่สิ้นเปลืองของมนุษย์ การใช้ทรัพยากรที่ไม่สามารถทดแทนได้ (Non-renewable energy) ส่งผลให้เกิดวิกฤติการด้านการใช้พลังงานในทั่วโลกรวมถึงประเทศไทย

พลังงานที่มีการใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ภายในอาคาร ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักในการอยู่อาศัยของมนุษย์ การใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารส่วนใหญ่เป็นการใช้ปรับสภาวะอากาศภายในโดยการใช้เครื่องปรับอากาศ โดยความร้อนจากภายนอกอาคาร อย่างรังสีอาทิตย์นั้นส่งผลโดยตรงต่อภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ การเลือกใช้วัสดุเปลือกอาคารจึงมีความสำคัญในการลดภาระการใช้พลังงานหลักของอาคาร

หลังคาเป็นส่วนประกอบของอาคารที่ได้รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์โดยตรงและแทบตลอดทั้งวัน การศึกษาประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของวัสดุหลังคา โดยการเลือกใช้ประเภทของวัสดุและเทคนิคการป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาจึงมีความจำเป็นที่จะช่วยให้ลดความร้อนภายในอาคาร อีกทั้งยังส่งผลต่อภาระการทำความเย็นของระบบปรับอากาศและสภาวะน่าสบายภายของผู้ใช้อาคาร

ปัจจุบัน ในอาคารที่มีขนาดใหญ่ ที่ต้องการพื้นที่ในการปฏิบัติงาน ทำให้โครงสร้างต้องมีช่วงเสาที่กว้าง ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ในการมุงหลังคาคือวัสดุที่มีขนาดเบาเป็นหลัก คือประเภทหลังคาโลหะเคลือบสังกะสี หรือ เมทัลชีท (Metal Sheet) เนื่องด้วยคุณสมบัติ ที่เหนียว แข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี ติดตั้งง่าย ดัดโค้งได้ มีหลากหลายสี และมีราคาถูก และในปัจจุบันมีการใช้งานในอาคารต่างๆมากขึ้น เช่นอาคารพักอาศัย อาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ ฯลฯ แต่ด้วยการที่เป็นหลังคาโลหะและมีมวลสารน้อย ทำให้ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนนั้นน้อยกว่าวัสดุที่มีมวลสารมาก เช่น กระเบื้องซีเมนต์ จึงได้มีการใช้เทคนิคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน เช่น การใช้สีเคลือบเพื่อสะท้อนความร้อนหรือการใช้ฉนวนป้องกันความร้อน

การศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการใช้สีเทอร์โมโครมิกที่เปลี่ยนสีได้ตามอุณหภูมิ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันรังสีความร้อน โดยนำมาใช้กับวัสดุที่มีมวลสารน้อยอย่างโลหะเคลือบสังกะสี เป็นการลดปัญหาการแผ่รังสีความร้อนในตอนกลางวันและศึกษา

ประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน เพื่อให้ทราบว่าการใช้สีขาวป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิก และฉนวนป้องกันความร้อน วัสดุใดจะสามารถช่วยลดความร้อนภายในอาคารที่มีช่วงระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกัน รวมถึงการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร และหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งผลของการศึกษาจะทำให้เห็นแนวทางในการใช้วัสดุและสีป้องกันความร้อนได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันและการคายความร้อนของหลังคาเมทัลชีทโดยใช้สีขาวชนิดป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิก และฉนวนป้องกันความร้อน

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและความคุ้มทุนในการใช้สีขาวชนิดป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิก และฉนวนป้องกันความร้อนบนกับหลังคาเมทัลชีท

1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเปรียบเทียบการเลือกใช้โทนสี ชนิดของสี การใช้สีเทอร์โมโครมิกกับวัสดุอาคาร และการใช้ฉนวนกันความร้อนกับหลังคาเมทัลชีท

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิและการส่งผลต่อการใช้พลังงานภายในอาคาร

1.3.2 ทำการศึกษาและทดลองโดยใช้กล่องทดลองในสภาพอากาศจริงของประเทศไทยและนำผลที่ได้มาเทียบค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุหลังคา

1.3.3 ศึกษาเฉพาะสีที่ส่งผลต่อความร้อนที่เข้ามา ส่วนเรื่องความหนาของสีที่มีผลต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารจะไม่ได้ทำการศึกษา

1.3.4 ศึกษาเฉพาะแผ่นหลังคาเมทัลชีทที่เป็นชนิดแผ่นเรียบเท่านั้น

1.3.6 ไม่ได้ทำการศึกษาเรื่องของอายุการใช้งานของสีเทอร์โมโครมิกและความสกปรกของหลังคาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันและระบายความร้อนจากหลังคา

1.3.5 ศึกษาการทดลองเชิงปฏิบัติด้วยกล่องทดลองและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Visual DOE 4.1 เพื่อจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้า

1.3.6 การวัดการใช้พลังงานจะอยู่ในกรอบของการใช้เครื่องปรับอากาศ และพัดลมเท่านั้น ส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานภายในอาคารจะไม่ทำการศึกษา

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

1.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีและปัจจัยการถ่ายเทความร้อน

1.4.1.2 ศึกษาแนวทางการใช้วัสดุและสีป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคา

1.4.1.3 ศึกษาระเบียบวิธีวิจัย

1.4.2 ตั้งสมมติฐานในการวิจัย

การป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาด้วยการใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาวนั้นทำให้หลังคามีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนใกล้เคียงกับการใช้สีขาวธรรมดา และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายความร้อนออกจากอาคารในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งส่งผลต่อการใช้พลังงานภายในอาคารที่มีการใช้งานระบบปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

1.4.3 กำหนดตัวแปรในการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4.3.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ สีขาว สีเทอร์โมโครมิก ฉนวนป้องกันความร้อน อุณหภูมิ อากาศ รังสีอาทิตย์ แบบจำลองอาคารที่มีช่วงเวลาการใช้เครื่องปรับอากาศแตกต่างกัน

1.4.3.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง ค่าความต้านทานความร้อน ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแบบจำลอง และผลการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.-year)

1.4.3.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่ วัสดุหลังคาเมทัลชีทขนาด 30x30 ซ.ม. หนา 0.47 มม.และ รายละเอียดอื่นๆของวัสดุในแบบจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1

1.4.4 ทำการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่เคลือบด้วยสีแต่ละประเภท และนำอุณหภูมิที่ได้จากจุดต่างๆในกล่องทดลองมาเข้าสมการเพื่อหาค่าความต้านทานความร้อนของหลังคาประเภทต่างๆ

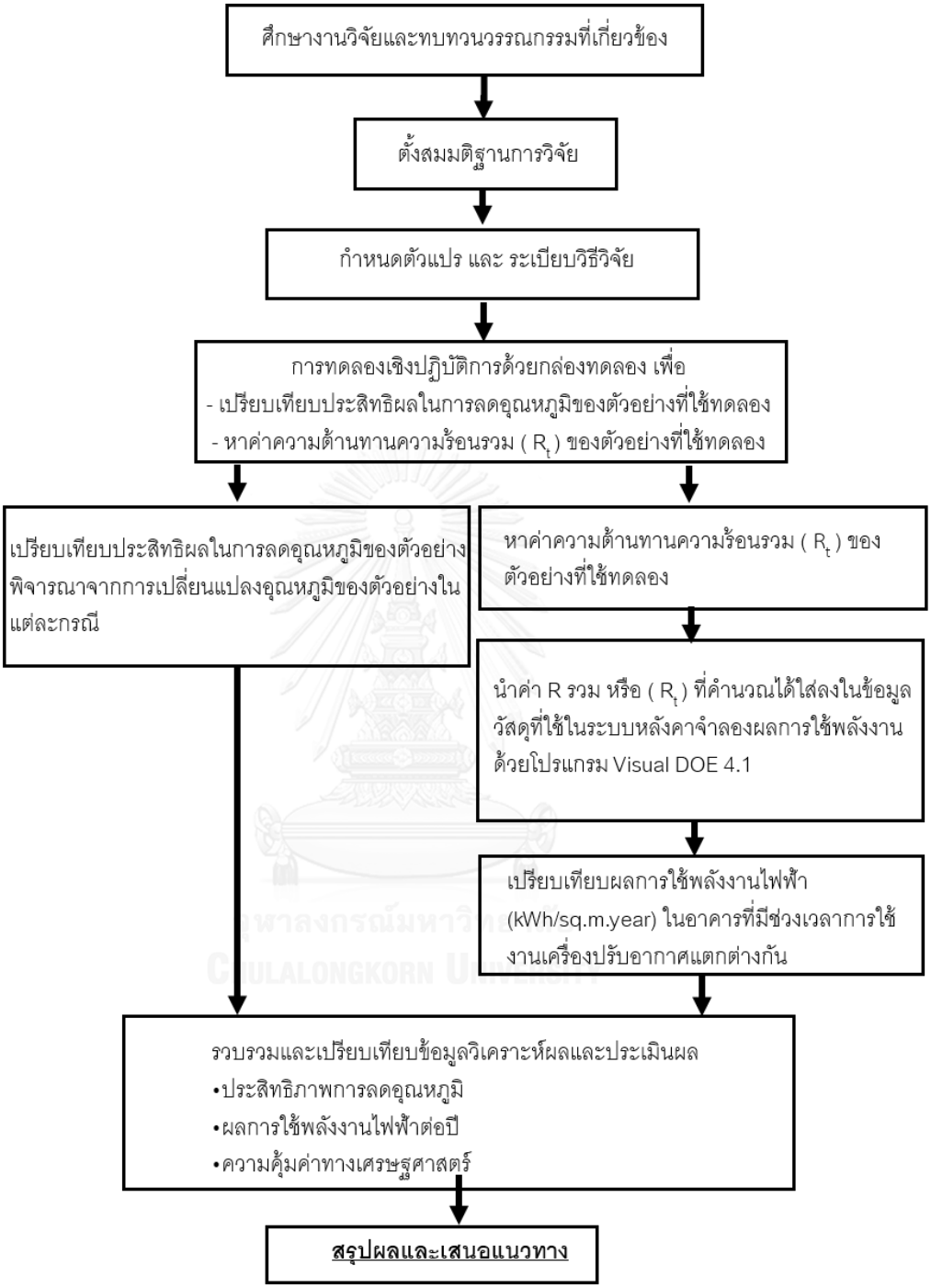
1.4.5 ทำการจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้ค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทดลองเชิงปฏิบัติการ เป็นข้อมูลของวัสดุหลังคาแต่ละประเภท เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้า

1.4.6 คำนวณค่าใช้จ่ายในการลงทุนและค่าไฟที่สามารถประหยัดได้ พร้อมหาระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period)

1.4.7 สรุปผล และเสนอแนะแนวทางการใช้สีและวัสดุกันความร้อนของหลังคาเมทัลชีท

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แผนผังงานวิจัย



ภาพที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของการใช้ สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาว และการใช้ฉนวนป้องกันความร้อน

1.6.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาว และการใช้ฉนวนป้องกันความร้อน

1.6.3 ทราบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้สีเทอร์โมโครมิก

1.6.4 เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาใช้เป็นข้อมูลประกอบในการตัดสินใจเปรียบเทียบการเลือกใช้โทนสี ชนิดของสี การใช้สีเทอร์โมโครมิกกับวัสดุอาคารอื่นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากวัตถุประสงค์การวิจัย สามารถกำหนดวิธีการศึกษาทฤษฎี แนวคิด และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวเรื่องต่อไปนี้

- คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน
- การป้องกันความร้อนผ่านเปลือกอาคาร
- การป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคา
- คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อน
- คุณสมบัติของสีเทอร์โมโครมิก

2.1 **คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน**

คุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อน โดยปรกติหลังงานความร้อนจะเคลื่อนที่จากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยจะมีรูปแบบการถ่ายเทความร้อน แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

2.1.1 **การนำความร้อน** (Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในของวัตถุ เกิดจากการสัมผัสของเนื้อวัสดุ การถ่ายเทความร้อนส่งต่อสู่โมเลกุลข้างเคียง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนเกิดขึ้น การนำความร้อนมีสมการในการคำนวณ ดังนี้ (Meyer W. T., 1979)

$$Q = U * A * (Ti - To)$$

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเข้ามา

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U – Value) (Btu/h.*ft*°F)

A = พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (ft^2)

Ti = อุณหภูมิที่สูงกว่า (°F)

To = อุณหภูมิที่ต่ำกว่า (°F)

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นปัจจัยในการนาความร้อนเข้าสู่อาคาร ในการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างจึงควรพิจารณาวัสดุที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำเพื่อหน่วงความร้อนให้เข้าสู่พื้นที่ภายในให้น้อยที่สุด

2.1.2 **การพาความร้อน** (Convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่อาศัยการเคลื่อนที่ของตัวกลางเช่น พวกของไหล (fluid) และ ก๊าซ (gas) เมื่อของไหลสัมผัสวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานในลักษณะการพาความร้อน ซึ่งมีสมการในการคำนวณ ดังนี้ (Meyer W. T., 1979)

$$Q = h * A * (Ta - Ts)$$

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อนที่ถ่านเทผ่านเข้ามา (Btu/h)

h = สัมประสิทธิ์การถ่านเทความร้อน ของฟิล์มอากาศบริเวณที่ของไหลผ่าน ที่ (Btu/h.*ft^2*°F)

A = พื้นที่ของผิววัสดุ บริเวณที่ของไหลผ่าน (ft^2)

Ta = อุณหภูมิอากาศ (°F)

Ts = อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ (°F)

2.1.3 **การแผ่รังสีความร้อน** (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นปรากฏการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยสเปกตรัมการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ที่เปล่งออกจากพื้นผิววัสดุ โดยการแผ่รังสีความร้อนจะแผ่กระจายออกทุกทิศทาง วัสดุที่แผ่รังสีออกมาโดยไม่ได้รับรังสีความร้อนจากวัตถุอื่น อุณหภูมิของวัสดุนั้นจะลดลง แต่ถ้าวัสดุได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุอื่นๆ มากกว่าการแผ่รังสีความร้อนของตัวมันเอง อุณหภูมิของวัสดุนั้นก็จะเพิ่มขึ้น การแผ่รังสีความร้อน มีสมการในการคำนวณดังนี้ (Meyer W. T., 1979)

$$Q = \delta * \varepsilon * A * (T1 - T2)$$

เมื่อ Q = ปริมาณพลังงานความร้อน (Btu/h)

δ = ค่าคงที่ของ Stefan – Boitzmann = 1.7135 x 10-9 (Btu/h.*ft^2*°F)

ε = ค่าการคายรังสีความร้อนของผิววัสดุ

A = พื้นที่ของผิววัสดุ บริเวณที่แผ่รังสี (ft^2)

T1 = อุณหภูมิผิววัสดุ ที่แผ่รังสี (°F)

T2 = อุณหภูมิที่ได้รับการแผ่รังสี (°F)

เมื่อวัตถุใดๆ ได้รับการแผ่รังสีความร้อน วัสดุนั้นจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่ที่ว่ารังสีความร้อนที่ตกกระทบทั้งหมดนั้นได้ถูก สะท้อนรังสี (Reflectance:ρ) และรังสีที่ถูกส่งผ่าน (Transmittance:τ) ไปมากน้อยเพียงใด ส่วนรังสีความร้อนที่เหลือจะถูกดูดกลืนรังสี (Absorptance:α) เข้าสู่เนื้อวัตถุ ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ทำให้วัสดุนั้นๆมีอุณหภูมิสูงขึ้น สามารถเขียนเป็นสมการได้

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

ρ = ค่าการสะท้อนรังสีความร้อน

α = ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อน

τ = ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน

จากสมการดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าวัสดุทึบแสง (Opaqua Material) จะไม่มีรังสีที่ถูกส่งผ่าน (Transmittance:τ) ดังนั้นจะได้สมการดังนี้ $\rho + \alpha = 1$

ส่วนวัสดุที่โปร่งแสงที่รังสีความร้อนสามารถส่องผ่าน (Transparent of Translucent Material) ได้สมการดังนี้ $\rho + \alpha + \tau = 1$

2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร

ถ้าการถ่ายเทความร้อนมีทิศทางจากด้านล่างสู่ด้านบน (เมื่ออุณหภูมิผิววัสดุภายในอาคารสูงกว่าอุณหภูมิผิววัสดุมุงหลังคา) จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนในช่องอากาศของหลังคา เนื่องจากการลอยตัวของโมเลกุลอากาศที่ร้อน และ การแทนที่ของโมเลกุลอากาศที่เย็นกว่า และ เกิดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี โดยจะเป็นการถ่ายเทพลังงาน ความร้อนทะลุผ่านช่องว่าง ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง

และเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนจากด้านบนสู่ด้านล่าง (เช่น เมื่ออุณหภูมิผิววัสดุภายนอกอาคารสูงกว่าอุณหภูมิผิวภายในอาคาร) ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากพื้นผิวที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง ส่วนการพาความร้อนแทบจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากการลอยตัวของโมเลกุลอากาศที่ร้อนกว่าด้านบนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าโมเลกุลอากาศที่เย็นกว่าด้านล่าง จึงไม่มีการไหลเวียนโมเลกุลอากาศดังกล่าว

ระบบเปลือกอาคาร คือส่วนของอาคารที่สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคาร แบ่งเป็นส่วนทึบแสงและส่วนโปร่งแสง ระบบเปลือกอาคารที่ดีควรสามารถลดปริมาณความร้อนและความชื้นที่เข้าสู่อาคาร ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเปลือกอาคารหลังคาเมทัลชีทซึ่งทึบแสง โดยมีสมการในการคำนวณ ดังนี้ (ASHRAE, 1997)

$$Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2.^{\circ}C$)

A คือ พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)

T_o คือ อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า (°C)

T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า (°C)

หรือ $Q = U \cdot A \cdot CLTD$

เมื่อ Q คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2.^{\circ}C$)

CLTD คือ ภาระความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า

(Cooling Load Temperature - °C)

สูตร $Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$ ใช้ในการคำนวณเมื่อ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและอุณหภูมิภายในอาคารมีความคงที่ สาหรับสูตร $Q = U \cdot A \cdot CLTD$ ใช้ในการคำนวณเมื่อ ต้องการค่าปริมาณความร้อนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยค่า CLTD คือค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ซึ่งไม่คงที่เพราะอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม เช่น ตำแหน่งที่ตั้งอาคาร เวลา ฤดูกาล อิทธิพลของมวลสาร อิทธิพลของแสงแดด สภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.2.1 **ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน** (Thermal Conductivity)

ค่าสัมประสิทธ์การนำความร้อนคือค่าคุณสมบัติที่ระบุถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท หาได้จากอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านหน้าตัดพื้นผิววัสดุสองด้านที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เรียกว่า ค่า K (K-value) มีหน่วย คือ W/m. ◦C หรือ Btu/hr·ft·°F

2.2.2 **ค่าความต้านทานความร้อน** (Thermal resistance)

ค่าความต้านทานความร้อน หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความหนาวัสดุที่ความร้อนไหลผ่านกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (K-value) บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานความร้อนของวัสดุ เรียกว่า ค่า R (R-value) วัสดุใดที่มีค่า R สูง แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนมาก มีหน่วยคือ $m^2.^{\circ}C/W$ หรือ $(h \bullet ft^2 \bullet {}^{\circ}F)/Btu$ คำนวณได้จากสูตร

$$R = \Delta X/k$$

เมื่อ R = ค่าการต้านทานความร้อน ($m^2.^{\circ}C/W$)

ΔX = ความหนาของวัสดุที่นามาพิจารณา

k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m^2.^{\circ}C$)

2.2.3 **ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม** (U - value)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม หาได้จากผลรวมของอัตราส่วนผกผันของค่าความต้านทานความร้อนรวม ซึ่งรวมค่า R value ของวัสดุทั้งหมดที่มาประกอบกันเป็นเปลือกอาคารทั้งในกรณีผนังหรือหลังคา นับตั้งแต่ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศชั้นนอกสุดของเปลือกอาคาร วัสดุฉาบภายนอก วัสดุประกอบผนังหรือหลังคา ช่องอากาศภายในผนังหรือหลังคา วัสดุภายใน ไปจนถึง ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศชั้นใน ดังนี้

$$U = \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \ldots + \frac{1}{Rn}$$

เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($W/m^2.^{\circ}C$)

R_n คือ ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ลำดับที่ n

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ ($m^2.^{\circ}C/W$)

2.2.4 **คุณสมบัติการแผ่รังสีของพื้นผิว**

รังสีความร้อนในธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

- รังสีความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) หรือรังสีคลื่นสั้น
- รังสีความร้อนจากผิววัสดุ หรือ รังสีคลื่นยาว (Longwave - Radiation)

วัตถุต่างๆบนโลกเมื่อได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นสั้น ผิววัสดุจะสะท้อนรังสี (Reflectance - ρ) หรือ ถ้าเป็นวัสดุโปร่งแสง จะมีการส่งผ่านรังสี (Transmittance – τ) ส่วนรังสีความร้อนที่เหลือจะถูกดูดกลืน (Apsorptance - α) เข้าสู่เนื้อวัตถุ ดังสมการ $\rho + \alpha + \tau = 1$ ซึ่งการดูดกลืนรังสีเป็นตัวแปรหลักที่ทาให้วัสดุนั้นๆมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด โดยค่าการดูดกลืนรังสีหาได้จาก

$$\alpha \quad \text{= รังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorped Radiation)}$$
$$\rho \quad \text{รังสีที่ตกกระทบ (Incident Radiation)}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงรายการวัสดุตามระดับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ (กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน, 2543)

ประเภทผิววัสดุที่ใช้ด้านนอก	วัสดุ	สีที่ใช้ทาภายนอก
1. วัสดุผิวสะท้อนแสง (0< < 0.2)	- ผิววัสดุฉาบด้วยดีบุก - แผ่นอลูมิเนียม - แผ่นสะท้อนแสงทำด้วยอลูมิเนียม	- สีสะท้อนแสง
2.วัสดุที่มีผิวสีอ่อน (0.2< < 0.4)	- อิฐเคลือบเป็นมันสีขาว -เหล็กชุบสังกะสีสีขาว	-แลคเกอร์สีขาว - สีน้ำเงิน -สีขาวเป็นเงา
3. วัสดุที่มีผิวปานกลาง (0.4< < 0.6)	- วัสดุทาสีอลูมิเนียม - หลังคาอิฐสีขาว - อิฐสีเหลืองอ่อน - หินอ่อนสีขาว - กรวดล้างสีขาว	-สีเขียวอ่อน - สีน้ำเงินปานกลาง -สีเหลืองปานกลาง - สีส้มปานกลาง - สีเขียวปานกลาง
4. วัสดุมีผิวสีค่อนข้างเข้ม (0.6< < 0.8)	- คอนกรีตไม่ทาสี - ไม้ผิวเรียบ - แผ่นซีเมนต์แอสเบสตอส -หินล้างสีเทา	- สีแดง -สีน้ำเงิน - สีเทาอ่อน -สีสนิมปานกลาง
5. วัสดุที่มีผิวสีเข้ม	-วัสดุที่ลาดด้วยผิวยางมะตอย -คอนกรีตสีน้ำตาล -วัสดุมุงหลังคาสีเทาแกมสีน้ำเงิน -อิฐสีแดง -อิฐแสตฟฟอร์ดสีน้ำเงิน -คอนกรีตสีดำ	- สีน้ำเงินแก่หรือสีเขียวแก่ - สีน้ำตาล - สีโอลีฟเข้ม -สีดำ -สีเทาแก่ -สีดำธรรมชาติ -สีดำเรียบมาก

2.2.5 **การแผ่รังสีจากวัสดุในช่วงคลื่นยาว** (Longwave Radiation)

วัตถุทึบแสงต่างๆบนโลก เมื่อได้รับการแผ่รังสีความร้อนคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ จะดูดกลืนรังสีดังกล่าวไว้ และคายรังสีความร้อนออกมาในช่วงคลื่นยาว (Longwave Radiation) ซึ่งจะมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 3 μm ขึ้นไป ลักษณะการคายรังสีในช่วงคลื่นยาวนี้ ไม่สามารถผ่านทะลุกระจกได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) เกิดการสะสมความร้อนในอาคาร โดยค่าการคายรังสีความร้อนช่วงคลื่นยาวหาได้จาก

$$\varepsilon \quad \frac{= \text{ปริมาณการแผ่รังสีจากผิววัสดุ (Radiation from material)}}{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากวัตถุดำในอุดมคติ (Radiation from blackbody)}}$$

วัตถุดำในอุดมคติ (Black body) เป็นวัสดุในอุดมคติที่สามารถคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ (Perfect Emitted =1) ค่าการแผ่รังสีความร้อน ของวัตถุใดๆซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนกับวัตถุดำในอุดมคติดังกล่าว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 เสมอ หากยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่าใด หมายความว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติในการคายหรือแผ่รังสีความร้อนในปริมาณมาก

การแผ่รังสีความร้อนช่วงคลื่นยาว สามารถแบ่งออกตามประเภทของวัสดุต่างๆได้ดังนี้

1. วัสดุธรรมชาติประเภทอโลหะ มีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ตั้งแต่ 0.85 ขึ้นไป
2. วัสดุโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

- โลหะเคลือบผิว เช่น วัสดุหลังคาโลหะเคลือบสี เป็นต้น จะมีค่าการคายรังสีความร้อนค่อนข้างสูง ประมาณ 0.85 ขึ้นไป
- โลหะไม่เคลือบผิว เช่น อลูมีเนียมฟอยล์ สังกะสี ทองเหลือง ทองแดง จะมีค่าการคายความร้อนต่ำ มักมีค่าการคายความร้อนน้อยกว่า 0.5 ลงไป

ลักษณะของพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการดูดซับรังสีและการแผ่รังสีแตกต่างออกไป แนวคิดที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ได้แก่สมการดังนี้

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

เมื่อ ρ = ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนจากพื้นผิว (Reflectivity)

α = ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorptivity)

τ = ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน (Transmissivity)

2.3 การป้องกันความร้อนทางหลังคา

2.3.1 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)

- การสร้างความเย็นโดยการพาความร้อน (Convection Cooling)

เป็นแนวทางสร้างความเย็นแก่อาคารโดยการนำความเย็นจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในอาคาร เข้ามาแทนที่โดยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารออกไป เมื่อนำหลักการพาความร้อนมาประยุกต์ใช้กับหลังคา จะช่วยลดอุณหภูมิภายในช่องหลังคา และลดอุณหภูมิของผิวของวัสดุภายในช่องหลังคาได้ โดยเฉพาะช่วงเวลากลางวันซึ่งภายใต้ช่องหลังคาจะมีอุณหภูมิสูงมาก

- การคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Night sky Radiation)

ชั้นบรรยากาศท้องฟ้า โดยเฉพาะชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นแหล่งความเย็นที่สำคัญ ที่ทาให้วัตถุต่างๆบนโลกสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน สังเกตได้จากปรากฏการณ์ที่พื้นผิวของวัสดุบางชนิดมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศในช่วงกลางคืน ในบางครั้งอุณหภูมิผิวของวัตถุอาจลดต่ำลงมากกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ทำให้เกิดปรากฏการณ์มีน้ำค้างเกาะอยู่ตามยอดหญ้า หรือรถยนต์ ในช่วงเวลากลางคืน

สภาพท้องฟ้าดังกล่าวเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซึมรังสีความร้อนและการคายความร้อนมีความแปรปรวนได้ สังเกตได้จาก ในเวลากลางวันซึ่งแหล่งความร้อนเกิดจากดวงอาทิตย์ วันที่มีฝุ่นละออง มีเมฆมาก หรือ ครึ้มฝน (Overcast Sky) ความร้อนจากดวงอาทิตย์จะส่งผ่านมายังผิวโลกน้อยกว่าวันที่ฟ้าโปร่ง (Clear sky) ในทางกลับกัน ช่วงกลางคืน ความร้อนที่ถูกสะสมในวัสดุต่างๆบนผิวโลกจะคายรังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า เพื่อรักษาสมดุลทางอุณหภูมิแก่พื้นผิวโลก และหากในช่วงเวลานี้มีฝุ่นละออง มีเมฆมาก หรือท้องฟ้าอยู่ในสภาพครึ้มฝน การคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าก็จะมีประสิทธิภาพน้อยลง

ค่าการคายความร้อนในช่วงคลื่นยาว (Long Wave Radiation) เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในช่วงเวลากลางคืน วัสดุที่มีค่าการคายรังสีความร้อนสูง จะมีความสามารถในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าสูง ในทางกลับกัน วัสดุที่มีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ จะมีความสามารถในการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าต่ำ เช่น อลูมีเนียมฟอยล์ เป็นต้น

2.4 คุณสมบัติของฉนวนป้องกันความร้อน

ฉนวนกันความร้อน คือวัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อน ไม่ให้ถูกส่งผ่านไปได้โดยง่าย ฉนวนต้านทานความร้อน เป็นลักษณะของฉนวนกันความร้อนที่ประกอบด้วยโพรงช่อง

เล็กๆ และ ช่องอากาศภายในวัสดุที่เป็นแบบปิดทึบ (Totally Enclosed) ช่องเล็กเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากเกล็ด (Flakes) หรือ เส้นใย (Fibers) ปมแข็ง (Nodules of Solid) หรือเซลล์ของตัววัตถุเอง

โพรงอากาศภายในฉนวนมวลสารเป็นตัวการทำให้เกิดกลไกต้านการไหลของอากาศหรือก๊าซ ทำให้ความร้อนส่วนใหญ่ไม่สามารถถูกส่งผ่านจากด้านหนึ่งของวัสดุไปยังอีกด้านหนึ่งได้ เมื่อพิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในวัสดุฉนวนที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่ง สภาพการนำความร้อนจะลดลงได้ เนื่องจากการพาความร้อนโดยช่องว่างอากาศในฉนวนนั้นลดลง เพราะการลดขนาดของช่องอากาศระหว่างเส้นใยของเซลล์วัสดุซึ่งทาให้อากาศภายในฉนวนหยุดนิ่งจนมีสภาพเป็นตัวกันการถ่ายเทความร้อนได้อย่างดี (วิกรม จำนงค์จิตต์, 2545)

เมื่อความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การแผ่รังสีถ่ายทอดระหว่างเส้นใยและพื้นผิวสู่พื้นผิวจะลดลง ทาให้สภาพการนำความร้อนปรากฏลดลงด้วย จนกระทั่งเมื่อเส้นใย หรือ เซลล์ เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในวัสดุจนถึงจุดที่การแผ่รังสีลดลง สภาพการนำความร้อนปรากฏจะมากขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การใช้ฉนวนมวลสารนั้นจะมีค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตฉนวนกันความร้อนแต่ละประเภทที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น ฉนวนกันความร้อนที่ดี จึงควรเป็นฉนวนที่มีค่าสภาพการนำความร้อนปรากฏต่ำสุด

ดังนั้นควรพิจารณาเลือกใช้ฉนวนมวลสารที่มีค่าความต้านทานความร้อน (R - value) สูง ฉนวนมวลสารกันความร้อนสามารถติดตั้งได้ทั้งตำแหน่งใต้หลังคา(ขนานกับโครงหลังคา) และติดตั้งบนฝ้าเพดาน แต่การติดตั้งแบบหลังสามารถป้องกันความร้อนลงสู่พื้นที่ใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากกว่า (จญาดา บุณยเกียรติ, 2537)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 **สีเทอร์โมโครมิก**

สารเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) เป็นสารที่มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนไป โดยทั่วไปสารเทอร์โมโครมิกมี 2 ประเภทคือ ผลึกเหลว (Liquid Crystal) และสารลูโคดาย (Leuco dye) (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2553)

โทนสีที่ปรากฏของผลึกเหลวขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโครงสร้างผลึกที่สะท้อนความยาวคลื่นแสงออกไป เมื่อผลึกเหลวมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปจะทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นในโครงสร้างผลึกเหลวเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นแสง โดยทั้งนี้ผลึกเหลวสามารถเปลี่ยนสีอย่างต่อเนื่องจากสีดำเป็นสารมีสี และเปลี่ยนกลับมาเป็นสีดำอีกครั้งตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ผลึกเหลวมักใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการบอกการเปลี่ยนแปลงด้วยสีอย่างแม่นยำ เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิห้อง อุณหภูมิตู้เย็น โดยเมื่อต้องการประยุกต์ใช้ผลึกเหลวกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ

ที่เปลี่ยนสีได้ตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ผลึกเหลวจะถูกบรรจุในไมโครแคปซูลทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ไมโครเมตร แล้วไมโครแคปซูลนับพันล้านแคปซูลจะถูกผสมรวมกับอะคริลิก (acrylic) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการยึดติดกับวัสดุต่างๆ ในการนำไปประยุกต์ใช้ เช่น กระดาษ ผ้า พลาสติก

ลูโคดาย สามารถเปลี่ยนสีเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลสามารถเปลี่ยนแปลงได้ 2 แบบคือ แบบมีสี และแบบไม่มีสี โดยขณะที่สารลูโคดายมีอุณหภูมิต่ำ สารลูโคดายจะแสดงสีเฉพาะตัวปรากฏออกมา ในขณะที่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง สีของสารลูโคดายจะหายไปกลายเป็นสารไม่มีสี สารลูโคดายนิยมใช้กับอุปกรณ์แสดงผลที่ไม่ต้องการความถูกต้องแม่นยำ เช่น ของเล่น แก้วน้ำเปลี่ยนสี เนื่องจากสารลูโคดายมีค่าอุณหภูมิที่ทำให้สารเปลี่ยนสีเป็นช่วงกว้างประมาณ 3-10 องศาเซลเซียส ต่างจากผลึกเหลวที่มีค่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนสีเฉพาะ ดังนั้นสารลูโคดายจึงมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้ากว่าและไม่เที่ยงตรงเท่าผลึกเหลว สารลูโคดายต้องบรรจุในไมโครแคปซูลเช่นเดียวกับผลึกเหลว และนำไปผสมกับสารอื่นที่ทำหน้าที่ยึดเกาะบนผิววัสดุ

ผลิตภัณฑ์ที่นำสารเทอร์โมโครมิกมาประยุกต์ใช้ เช่นขวดนมมีรูปเด็กยิ้มสีเขียวเมื่อน้ำต้มสุกที่ใช้ชงนมมีอุณหภูมิระหว่าง 36-38 องศาเซลเซียส ในขณะที่เมื่อน้ำร้อนเกิน 45 องศาเซลเซียสจะปรากฏรูปเด็กร้องไห้สีแดงแทนผนังเปลี่ยนลวดลาย เมื่อวางมือหรืออวัยวะอื่นของร่างกายลงบนผนังสักครู่ สีของบริเวณที่สัมผัสจะเปลี่ยนไป ทำให้เกิดลวดลายใหม่ขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้กับการตกแต่งสินค้าต่างๆ อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ เช่น แผ่นวัดอุณหภูมิร่างกาย แผ่นวัดอุณหภูมิผิวของอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า กระดาษความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่บ่งชี้ความร้อนหรือความเย็น เช่น อุปกรณ์และภาชนะสำหรับอาหารและเครื่องดื่ม องค์ประกอบในเครื่องสำอางค์ ของเล่น เม็ดสีสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติก สิ่งทอ และกระดาษ เป็นต้น

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการใช้งานสีเทอร์โมโครมิก (บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์, 2553)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาเรื่องมวลสารของวัสดุ ที่ส่งผลต่อความร้อนที่เข้ามาในอาคารพบว่า วัสดุที่มีมวลสารน้อยและค่าการนำความร้อนสูง จะมีอุณหภูมิผิวสูงกว่าอุณหภูมิอากาศในเวลากลางวัน และอุณหภูมิลดได้ต่ำกว่าปกติในเวลากลางคืน และการใช้ฉนวนกันความร้อนนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับวัสดุมวลสารน้อย โดยสามารถลดอุณหภูมิที่เข้าสู่อาคารได้มากกว่าวัสดุที่ไม่มีการใช้ฉนวนป้องกันความร้อน แต่ทำให้ความร้อนระบายออกจากอาคารได้ช้าในเวลากลางคืน (จญาดา บุณยเกียรติ, 2537) ซึ่งเปรียบเทียบได้กับวัสดุหลังคาที่มีมวลสารมากหรือมีค่าการนำความร้อนต่ำ ที่สามารถป้องกันความร้อนได้มากที่สุดในเวลากลางวัน แต่ในเวลากลางคืนช่องหลังคาที่ใช้วัสดุหลังคาที่มีมวลสารน้อย กลับวัดค่าอุณหภูมิได้ต่ำกว่าช่องหลังคาที่มีวัสดุมวลสารมากและยังต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกอีกด้วย (อภิทัช พรหมสิริแสง, 2544)

การป้องกันความร้อนโดยการใช้สีพบว่าสีนั้นมีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของอากาศภายในห้องโดยการใช้สีอ่อนจะทำให้อุณหภูมิภายในลดลงในช่วงเวลากลางวันเมื่อเปรียบเทียบกับสีโทน (ยิ่งสวัสดิ์ ไชยกุล, 2556) และพบว่าการใช้สีบนวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง เช่น หลังคาโลหะการเคลือบหลังคาโลหะด้วยสีอ่อน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อนได้ดีกว่าการเคลือบสีเข้ม ในขณะที่การเคลือบด้วยสีเข้ม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายรังสีความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Night sky radiation) ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลงได้ดีกว่าการเคลือบด้วยสีอ่อน (อภิทัช พรหมสิริแสง, 2544)

การศึกษาเรื่องสีกับการป้องกันความร้อนมีผู้วิจัยที่ศึกษาเรื่องสีที่เปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ซึ่งสีกลุ่มนี้เรียกว่าสีเทอร์โมโครมิก (Thermochromic) พบว่าผลจากการเปลี่ยนสีของวัสดุเปลือกอาคารทำให้มีผลต่อการป้องกันความร้อนโดยการที่สีเปลี่ยนจากสีเข้มเป็นสีอ่อนลงในขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีประสิทธิภาพการสะท้อนความร้อนมากยิ่งขึ้น (Azari & Bierman, 2008), (Watts et al., 2007), (Ma, Zhang, Zhu, & Wu, 2002)

การใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนวัสดุเปลือกอาคาร สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในฤดูร้อนจากการสะท้อนความร้อนของสีที่เปลี่ยนเป็นสีโทนอ่อนและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนความร้อนเพื่อเพิ่มความอบอุ่นให้กับอาคารช่วงฤดูหนาวในช่วงที่เป็นสีโทนเข้ม (Zheng, Xu, Shen, & Yang, 2015),

การนำสีเทอร์โมโครมิกชนิดที่เป็นสีโทนเข้ม (Color Phase) และเปลี่ยนเป็นสีใส (Colorless Phase) ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น มาเคลือบลงบนวัสดุสีขาว พบว่าในขณะที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเปลี่ยนสี ของสีเทอร์โมโครมิก พื้นผิวจะยังคงสีเข้ม ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสี

ความร้อนยังคงเดิม และในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดเปลี่ยนสีของเทอร์โมโครมิก พื้นผิวจะมีการเปลี่ยนสีใสเห็นสีอ่อนของวัสดุ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสะท้อนรังสีความร้อนเพิ่มมากยิ่งขึ้น (Ma, Zhang, & Wu, 2000), (Neves, 2001), (A., Santamouris, & Akbari, 2007)

จะเห็นได้ว่าการใช้วัสดุที่มีมวลสารมากและการใช้ฉนวนป้องกันความร้อนที่หลังคานั้นเหมาะสมกับอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวันเป็นหลักเนื่องจากช่วยหน่วงความร้อนของรังสีอาทิตย์จากภายนอก (Akbari, Konopacki, & Pomerantz, 1999) แต่ทำให้มีการคายความร้อนออกได้ยากในเวลากลางคืน ในขณะที่วัสดุที่มีมวลสารน้อย และไม่มีฉนวนนั้น เหมาะสมกับอาคารที่ใช้งานในเวลากลางคืน เนื่องจากประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนในตอนกลางวัน นั้นต่ำกว่าการใช้วัสดุที่มีมวลสารมากหรือมีการใช้ฉนวนป้องกันความร้อน แต่มีประสิทธิภาพการคายความร้อนออกจากอาคารในช่วงเวลากลางคืนได้ดี การใช้สีทาวัสดุ ยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะท้อน การดูดกลืน และระบายความร้อน โดยที่การใช้สีอ่อนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสะท้อนความร้อนได้ดียิ่งขึ้นในเวลากลางวัน และการใช้สีเข้มจะช่วยให้ประสิทธิภาพการคายความร้อนได้ดีในเวลากลางคืน

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สมมติฐานได้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกที่สามารถเปลี่ยนสีได้ตามอุณหภูมิโดยเลือกประเภทและอุณหภูมิของสีเทอร์โมโครมิกที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย และประเภทของสีเทอร์โมโครมิกให้สามารถเปลี่ยนจากเข้มเป็นสีอ่อนในตอนกลางวัน และกลับมาเป็นสีเข้มในตอนกลางคืน จะสามารถช่วยให้วัสดุหลังคาสะท้อนรังสีอาทิตย์ได้ดียิ่งขึ้นในตอนกลางวัน และคายความร้อนจากภายในอาคารคืนสู่ท้องฟ้าได้ดียิ่งขึ้นในตอนกลางคืน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 แนวทางการวิจัย

งานวิจัยศึกษาผลจากการใช้สีป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิกและฉนวนป้องกันความร้อนบนหลังคาเมทัลชีท ในอาคารประเภทต่างๆที่มีระยะเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 และนำค่าคุณสมบัติของการใช้วัสดุกันความร้อนเช่น ค่าความต้านทานความร้อน (R – Value/R_t) หรือค่าการนำความร้อน (U-Value) ค่าการแผ่รังสีของผิววัสดุ (Emissivity) และค่ารังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorptance) จากผลการใช้สีป้องกันความร้อนและการเปลี่ยนสีของสีเทอร์โมโครมิก โดยค่าความต้านทานความร้อนและค่าการนำความร้อนนั้นหาได้จากการนำอุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองที่แทนระบบหลังคาที่ได้รับความร้อน มาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ ป้อนเป็นข้อมูลของระบบหลังคา จากนั้นให้โปรแกรมคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี (Electric end use) แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี (kWh/sq.m.-year) และคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงของสีและวัสดุที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง และการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 อาคารที่นำมาจำลองได้แก่ บ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน อาคารร้านค้า และอาคารโรงพยาบาล

3.3 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลเพื่อกำหนดตัวแปรจากเอกสารทางวิชาการ ข้อมูลจากกฎหมายด้านการอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ข้อมูลด้านพลังงานและวัสดุก่อสร้างจากองค์กรต่างประเทศที่ได้มาตรฐานสากล ได้แก่ ASTM – American Society of Testing and Material และ ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineer

3.4 ตัวแปรในการวิจัย

3.4.1 ตัวแปรต้น

3.4.1.1 วัสดุกันความร้อน

- สีทาภายนอกสีขาว Beger Cool UV Sheild
- สีเทอร์โมโครมิกสีดำ เปลี่ยนเป็นสีใสที่อุณหภูมิ 32 °C (Transperent phrase)
- ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ความหนาแน่น 12 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

3.4.1.1 แบบจำลองอาคารที่มีเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศแตกต่างกัน

- บ้านพักอาศัย (ใช้งานเฉพาะเวลากลางคืน)
- อาคารสำนักงาน (ใช้งานเฉพาะเวลากลางวัน)
- อาคารร้านค้า (ใช้งานกึ่งกลางวัน (8 ชั่วโมง) กลางคืน (4 ชั่วโมง)
- อาคารโรงพยาบาล (ใช้งานตลอด 24 ชั่วโมง)

3.4.2 ตัวแปรตาม

3.4.2.1 อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง

3.4.2.2 ค่าความต้านทานความร้อน

3.4.2.3 ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานไฟฟ้าของแบบจำลอง

- ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของอาคาร (Electric end use - (kWh/sq.m.-year)
- ผลการใช้พลังงานในการทำความเย็นรายชั่วโมง (Hourly data of cooling energy - kW)

3.4.3 ตัวแปรควบคุม

3.4.3.1 วัสดุหลังคาเมทัลชีทขนาด 30 x 30 ซม. ความหนา 0.47 มม.

3.4.3.2 รายละเอียดอื่นๆสำหรับวัสดุที่ใช้ประกอบอาคารในแบบจำลองอาคารแต่ละประเภทสำหรับโปรแกรม VisualDOE4.1

3.4.3.3 สภาพภูมิอากาศขณะทำการทดลอง

3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.5.1 การศึกษาทฤษฎี แนวคิด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5.1.1 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเปลือกอาคาร รูปแบบของวัสดุกันความร้อนและคุณสมบัติในการกันความร้อน

3.5.1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนโดยการใช้สีป้องกันความร้อน สีเทอร์โมโครมิก และฉนวนป้องกันความร้อน

3.5.1.3 ศึกษาวิธีการติดตั้ง การผสมสีและการทาสีบนวัสดุหลังคาตามมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับหรือการอ้างอิงตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5.1.4 รวบรวมข้อมูลประเภทอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จากบทความวิชาการ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปเงื่อนไข การใช้งานอาคาร การใช้พลังงานไฟฟ้า เวลาปิด – เปิดระบบปรับอากาศ วัสดุผนังและช่องเปิดอาคาร และอื่นๆ แล้วนำมาเป็นอาคารต้นแบบในการจำลองและคำนวณผลการใช้พลังงานในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลังคาที่มีการใช้สีและวัสดุกันความร้อนที่แตกต่างกัน

3.5.1.5 ศึกษาการใช้กล่องทดลอง และสมการทางคณิตศาสตร์ ในการหาค่าคุณสมบัติของหลังคาที่ใช้วัสดุแบบต่างๆ เพื่อนำมาประกอบการคำนวณค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในโปรแกรม Visual DOE 4.1

3.5.1.6 ศึกษาวิธีคิดค่าความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัย

3.5.2 การกำหนดรูปแบบของวัสดุกันความร้อนที่นำมาใช้กับหลังคาเมทัลชีท

ในการทดลองได้กำหนดหลังคาที่ใช้วัสดุที่แตกต่างกันจำนวน 5 แบบคือ

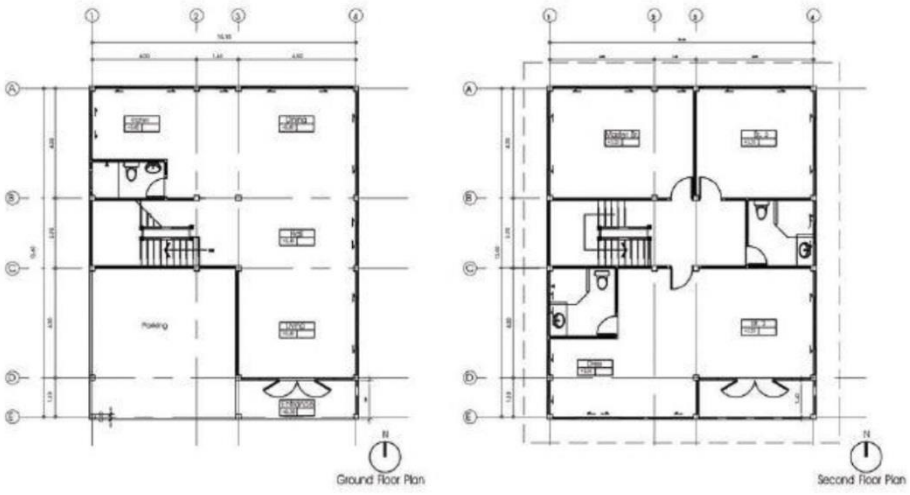
1. หลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสีและไม่ใส่ฉนวน (Basebase)
2. หลังคาเมทัลชีททาสีขาว (White) Beger Cool UV Sheild
3. หลังคาเมทัลชีททาสีขาวและเคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิก (White + Thermochromic)
4. หลังคาเมทัลชีททาสีขาวและติดตั้งฉนวนใยแก้ว (White + Ins.)
5. หลังคาเมทัลชีททาสีขาวและเคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิกและติดตั้งฉนวนใยแก้ว (White + Thermochromic + Ins.

3.5.3 ทำการรวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารที่ใช้จำลองผลการใช้พลังงาน

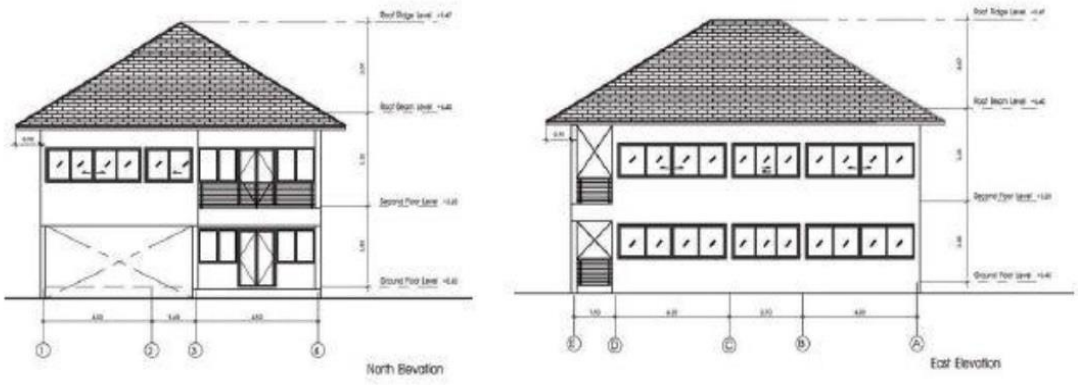
การวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารจากเอกสารทางวิชาการ ศึกษาลักษณะอาคารซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทยมาเป็นอาคารต้นแบบ (Reference Building) ในการจำลองผลการใช้พลังงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังคา และนำข้อมูลมาวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขให้เหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบัน โดยข้อมูลที่ป้อนลงใน VisualDOE4.1 ได้แก่ ระยะเวลาการเปิด – ปิดเครื่องปรับอากาศในแต่ละวัน อุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ประเภทและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ ความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์และแสงสว่างในแต่ละประเภทอาคาร ตลอดจนตารางเวลาการใช้อาคารและความหนาแน่นของผู้ใช้ต่อพื้นที่อาคาร โดยทำการศึกษาอาคาร 4 ประเภท ดังนี้

3.5.3.1 บ้านพักอาศัย

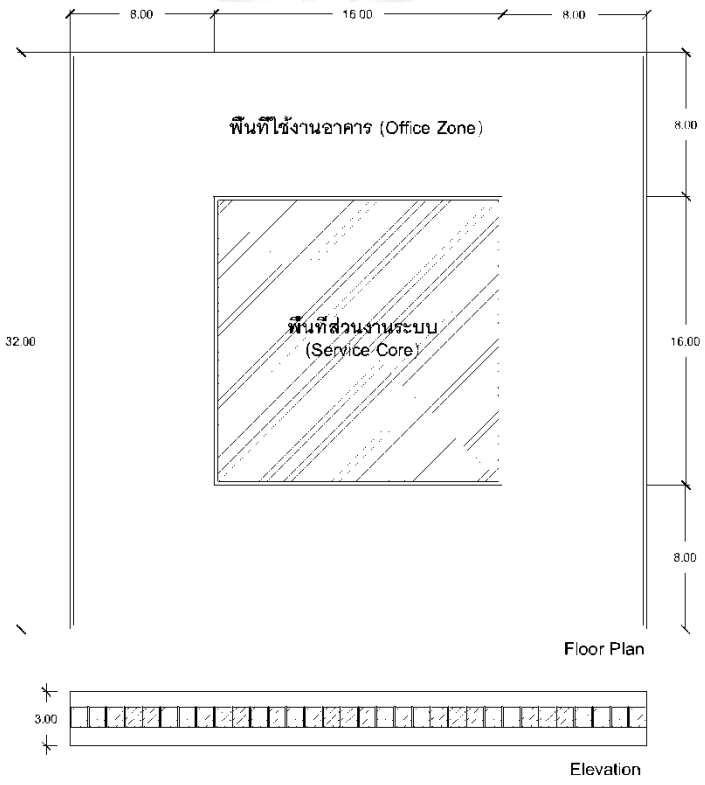
บ้านพักอาศัยต้นแบบจากงานวิจัยการพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว (อรรจน์ เศรษฐบุตร, 2549)



ภาพที่ 3.1 แปลนอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ



ภาพที่ 3.2 รูปด้านอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ



ภาพที่ 3.3 อาคารสำนักงานต้นแบบ

3.5.3.2 อาคารสำนักงาน

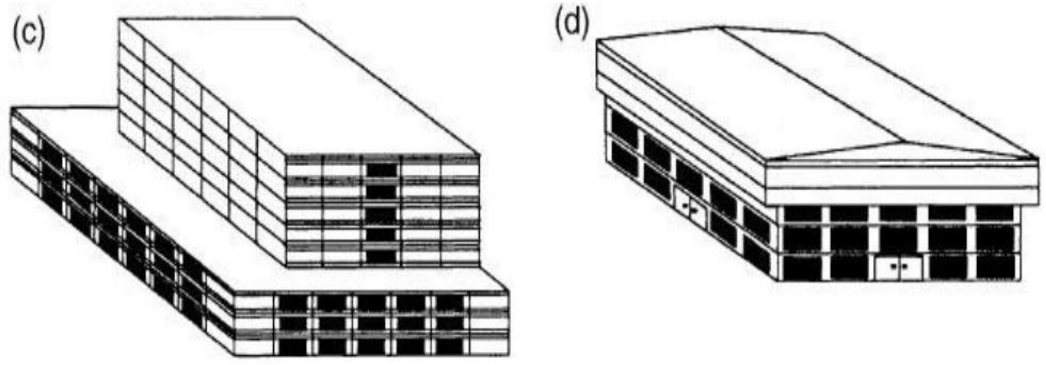
อาคารสำนักงานต้นแบบ ได้ตัวอย่างจากงานวิจัยการจัดทำมาตรฐานค่าการปลอยก๊าซเรือนกระจกต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทยด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นอาคารที่มีพื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร มีความสูงไม่เกิน 7 ชั้น มีความสูงไม่เกิน 23 เมตร ซึ่งมีจำนวนมากในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (อรรจน์ เศรษฐบุตร, 2552) โดยในงานวิจัยนี้เลือกอาคารสำนักงานขนาดกลางคือมีจำนวน 1 ชั้น เพื่อใช้เป็นอาคารต้นแบบแทนอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน

3.5.3.3 อาคารร้านค้า

อาคารร้านค้าใช้สำหรับจำลองผลการใช้พลังงานสำหรับอาคารที่มีระยะเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันต่อเนื่องถึงเวลากลางคืน (11.00 น. – 23.00 น.) โดยมีลักษณะช่องเปิดอาคารเหมือนห้างสรรพสินค้า โดยได้อาคารต้นแบบจากงานวิจัยต้นฉบับเดียวกับอาคารโรงพยาบาล

3.5.3.4 อาคารโรงพยาบาล

อาคารโรงพยาบาลตัวอย่าง ใช้เป็นต้นแบบสำหรับจำลองการใช้พลังงานของอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ได้จากงานวิจัย The technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand (Chirattanon & Taweekun, 2003) ซึ่งมีการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของการใช้งานอาคารแต่ละประเภททั้งภาครัฐและเอกชน เป็นอาคารต้นแบบสำหรับจำลองการใช้พลังงานโปรแกรม DOE -2 เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงานในประเทศไทย



ภาพที่ 3.4 อาคารโรงพยาบาล (c) และอาคารร้านค้าต้นแบบ (d) (ที่มา : S.Chirarattananon, 2003)

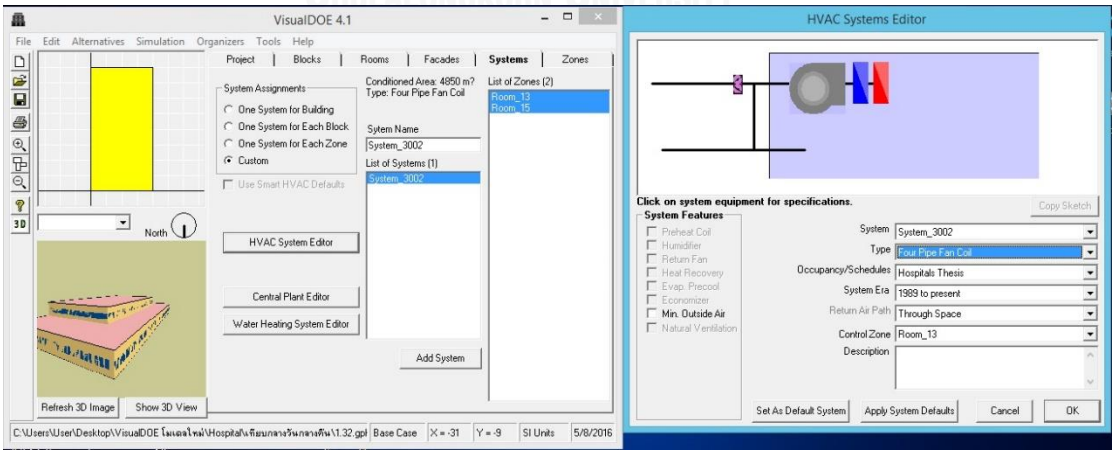
3.5.4 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุกันความร้อนในโปรแกรมคำนวณ VisualDOE 4.1

งานวิจัยชิ้นนี้เน้นการศึกษาจำลองสถานการณ์จริง ใช้อาคารต้นแบบทั้ง 4 ประเภทอ้างอิงผลการใช้พลังงาน โดยป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุหลังคาทั้ง 5 กรณี แล้วจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านทางหลังคา แนะทำผลที่ได้มาเปรียบเทียบต่อไป

3.5.4.1 โปรแกรม VisualDOE 4.1

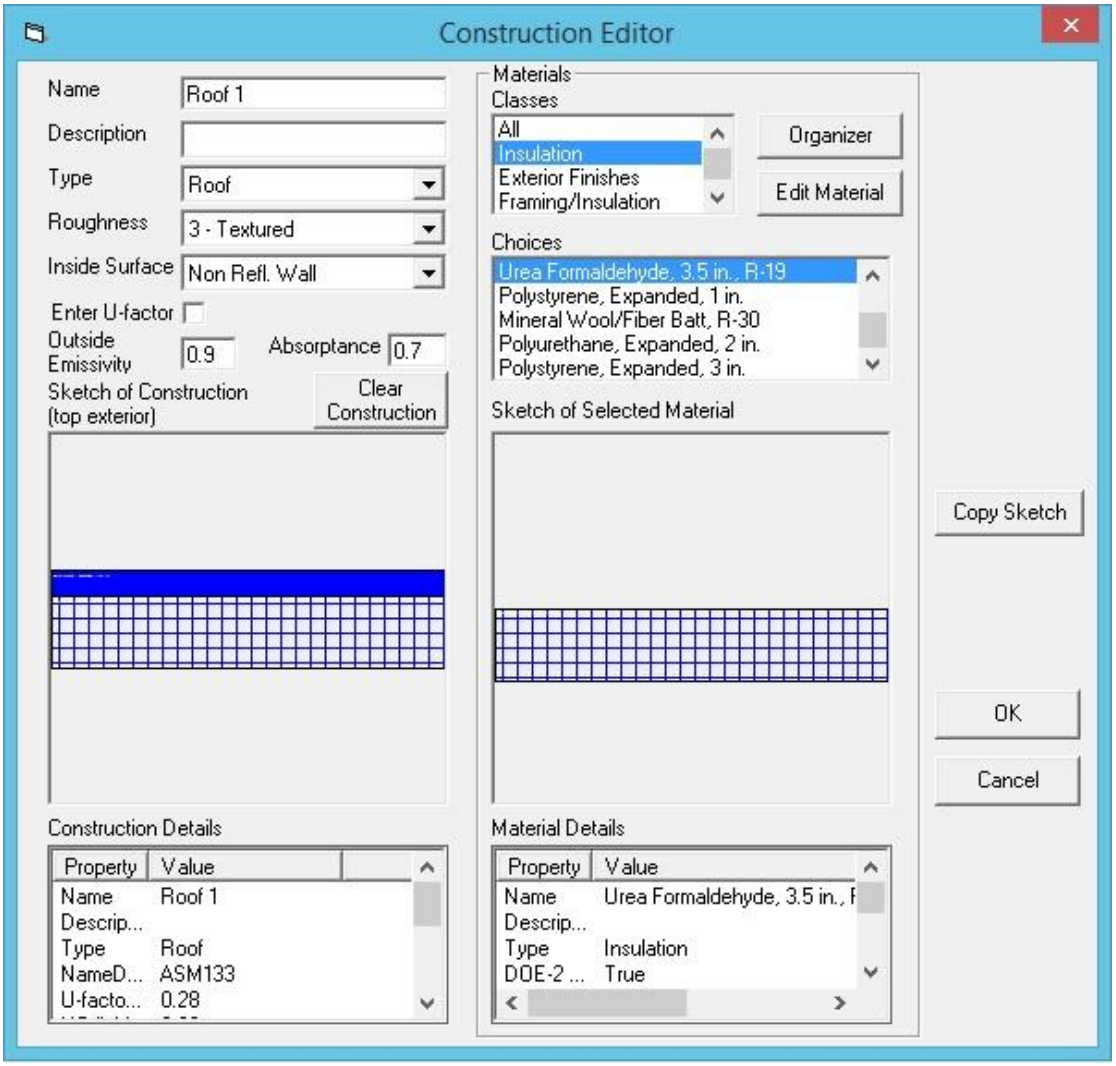
เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็นในอาคาร โดย Lawrence Berkeley Laboratory ประเทศ เป็นเครื่องมือในการช่วยพัฒนาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับกฎหมายในการอนุรักษณ์พลังงานในหลายประเทศทั่วโลก สามารถคำนวณผลการใช้พลังงานแยกตามประเภทได้ละเอียดถึงรายชั่วโมงในหนึ่งปี โดยอาศัยฐานข้อมูลทางสภาพอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยา องค์ประกอบหลักในการจำลองผลการใช้พลังงานของ Visual DOE 4.1 แบ่งออกเป็น (1) COOLING LOAD (2) SYSTEM (3) PLANT และ (4) ECONOMICS ซึ่งใช้คำนวณรายจ่ายอันเกิดจากการใช้พลังงาน

การคำนวณการใช้พลังงานและภาระในการทำความเย็นอาศัยปัจจัยทั้งภายนอกและภายในอาคาร ปัจจัยภายนอกอาคารได้แก่ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกสู่เปลือกอาคารที่เป็นทั้งผนังและหลังคา อิทธิพลจากการแผ่รังสีอาทิตย์ การรั่วซึมของอากาศ ส่วนปัจจัยภายในนั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลการใช้งานภายในอาคาร ความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและแสงสว่าง ความร้อนจากความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ เป็นต้น



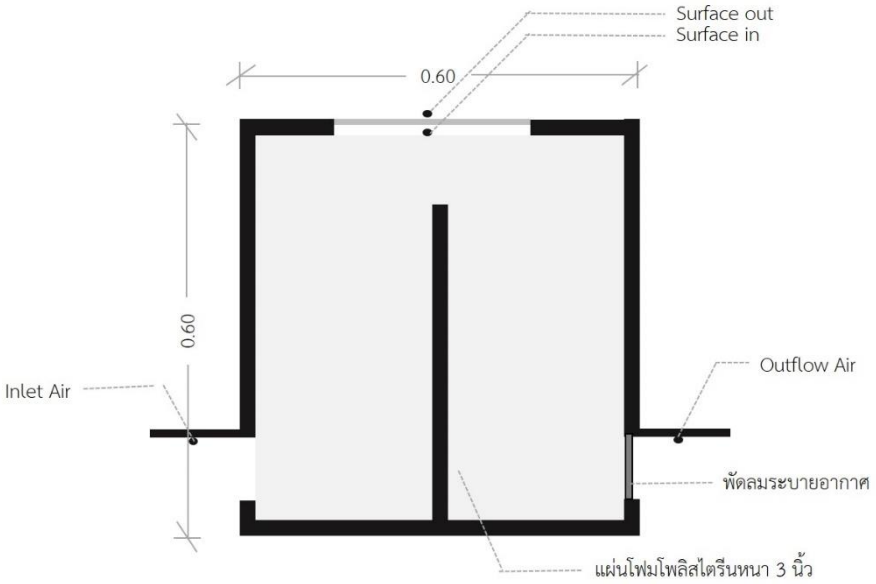
ภาพที่ 3.5 รูปแบบโปรแกรม VisualDOE 4.1

งานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังคาที่ใช้วัสดุความร้อนที่มีค่าคุณสมบัติแตกต่างกัน การจำลองอาคารของโปรแกรม VisualDOE 4.1 มีวิธีสร้างทางเลือกของเปลือกอาคารและวัสดุกันความร้อน โดยการป้อนค่าคุณสมบัติในการนำความร้อน ได้แก่ การใช้วิธีใส่ค่าความต้านทานความร้อน (R-value) ค่าการแผ่รังสีของผิววัสดุ (Emissivity) ค่ารังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorptance) และค่าความหนาของวัสดุ แล้วนำมาประกอบกันเป็นเปลือกอาคารในส่วนหลังคาที่ต้องการ



ภาพที่ 3.6 ฟังก์ชันสำหรับการป้อนข้อมูลรายละเอียดวัสดุหลังคาในโปรแกรม VisualDOE 4.1

3.5.4.1 การใช้กล่องทดลองและสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t) ของหลังคาที่ใช้วัสดุแบบต่างๆ



ภาพที่ 3.7 กล่องที่ใช้ในการทดลอง

กล่องทดลองทำจากโฟมโพลีสไตรีนความหนาแน่น 77 ปอนด์/ตารางนิ้ว หนา 3 นิ้ว ขนาดกล่อง 0.60 x 0.60 x 0.60 เมตร เจาะช่องอากาศเข้า (Inlet) และช่องอากาศออก (Outflow) ติดพัดลมระบายอากาศที่มีค่าปริมาณการไหลของอากาศ (CFM) เท่ากับ 18.67 CFM (ft^3/minute) ด้านบนสุดของกล่องเว้นที่ว่างสำหรับวัสดุหลังคา 0.30 เมตร เพื่อศึกษาค่าความแตกต่างของอากาศเข้าและออกจากกล่อง และใช้เครื่องมือเก็บข้อมูลอุณหภูมิ Channel Temperature DATA Logger เก็บข้อมูลทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.5.4.2 การเตรียมสีและการเลือกใช้สีเทอร์โมโครมิก

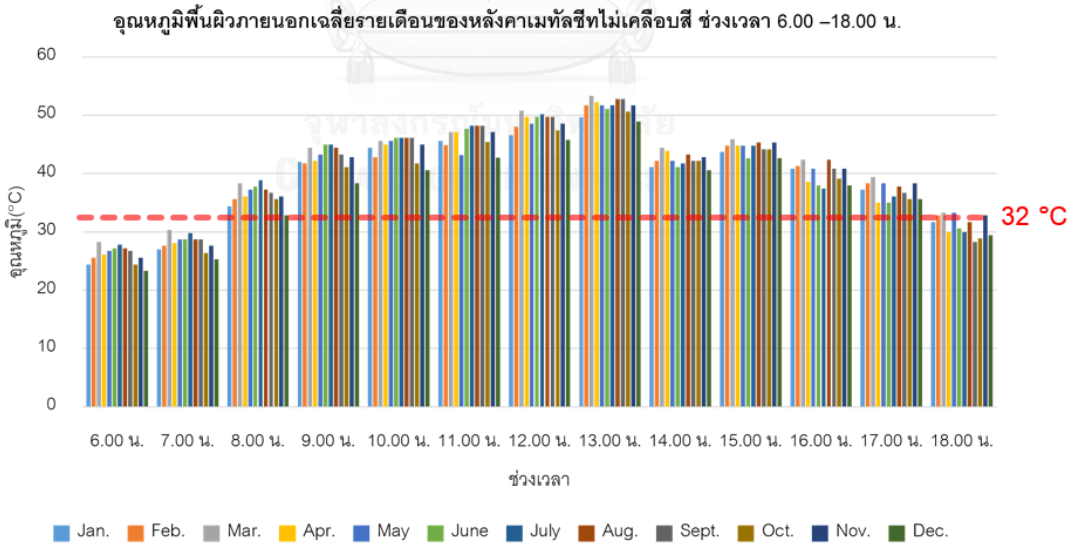
สีที่ใช้ในการทดลอง เป็นสีชนิดป้องกันความร้อนที่หาซื้อได้ทั่วไปคือ สีทาภายนอกสีขาว Beger Cool UV Sheild (ยิ่งสวัสดิ์ ไชยกุล, 2556) สีเทอร์โมโครมิกสีดำ 32 °C ดังแสดงในภาพที่ 2 และฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้ว (ความหนาแน่น 12 kg/m^3)

(ก) (ข)

ภาพที่ 3.8 สีป้องกันความร้อนสีขาว Beger Cool UV Shield (ก) สีเทอร์โม-โครมิกสีดำ 32 °C และน้ำยาอะคริลิค (Binder) (ข)

3.5.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมสีเทอร์โมโครมิก

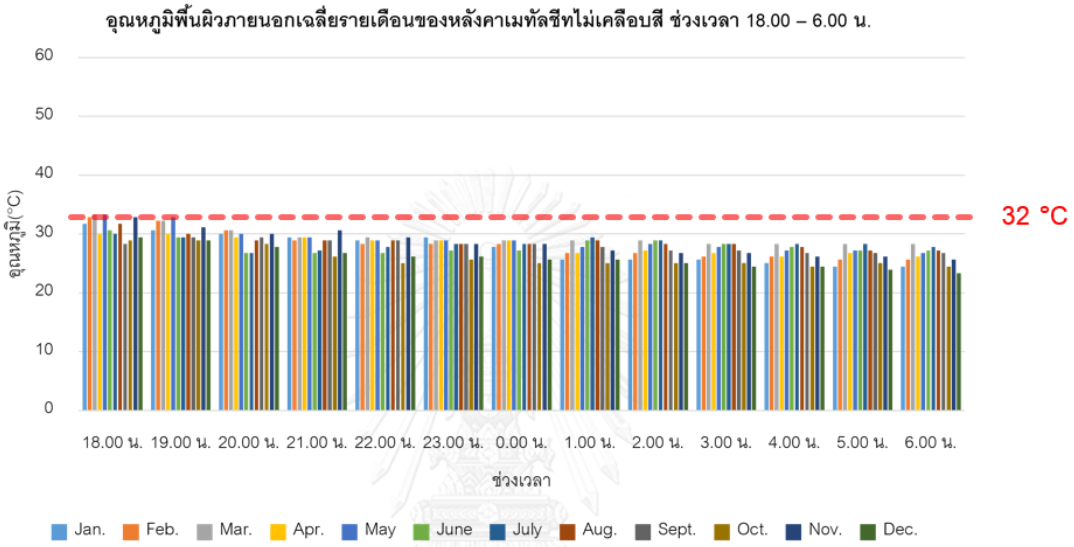
เนื่องจากสีเทอร์โมโครมิกมีอุณหภูมิของจุดเปลี่ยนสี (Color/Colorless Phase) ที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับผู้สร้างและสภาพภูมิอากาศที่เหมาะสมของประเทศนั้นๆ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาอุณหภูมิผิวของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสีตลอดปีของประเทศไทย โดยการใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 จำลองสภาพอากาศตลอดทั้งปี เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกอุณหภูมิของสีเทอร์โมโครมิกที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทดลองในภูมิอากาศในประเทศไทย



แผนภูมิที่ 3.1 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางวัน

ผลการศึกษาพบว่าในช่วงเวลากลางวัน (6.00 – 18.00 น.) พื้นผิวหลังคาเมทัลชีทมีอุณหภูมิโดยประมาณ 26 – 53 °C และช่วงที่หลังคาได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์มากขึ้นส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิสูงเกิน 40 °C ดังแผนภูมิที่ 3.1

ในช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิผิวนั้นลดลงเรื่อยๆตามช่วงเวลา โดยมีอุณหภูมิประมาณ 25 – 32 °C และส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน คือต่ำกว่า 30 °C ดังแผนภูมิที่ 3.2

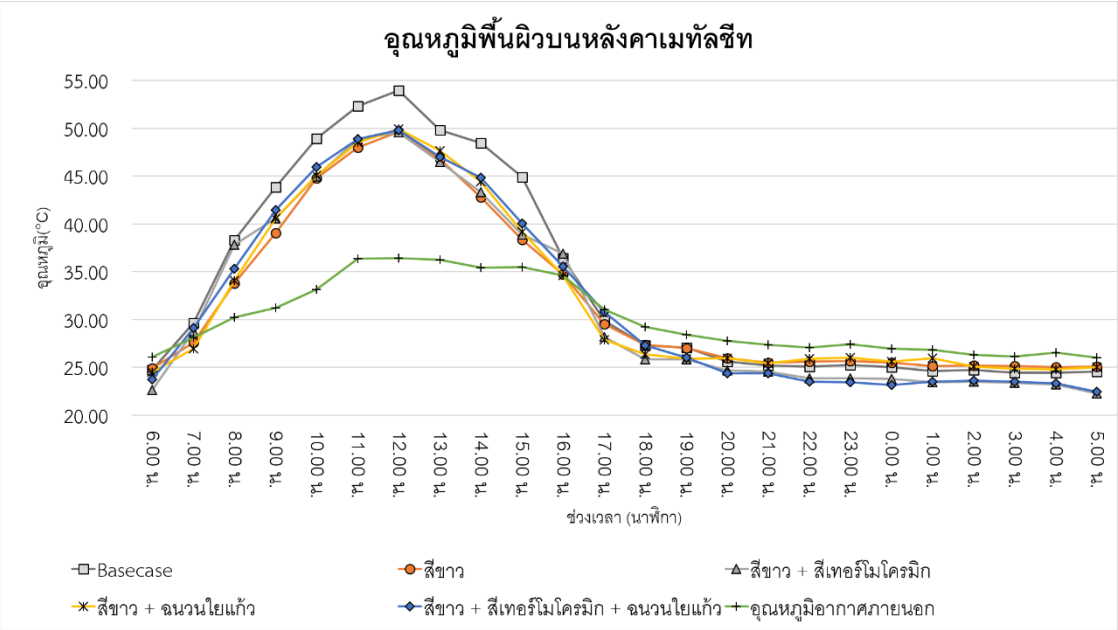


แผนภูมิที่ 3.2 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอกของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี ช่วงกลางคืน

ดังนั้นจึงเลือกใช้สีเทอร์โมโครมิกสี โดยเลือกที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนเป็นสีใสเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 32 °C (Colorless Phase) นำมาผสมกับน้ำยาอะคริลิคใส (Acrylic transperent base) ในอัตราส่วน 3 : 10 ใช้การคนด้วยแท่งกวนสารละลาย โดยสังเกตให้สีผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.4.2.2 ขั้นตอนการทาสี

นำสีขาวและสีเทอร์โมโครมิกที่ผสมแล้วทาลงบนตัวอย่างที่ใช้ทดลองโดยใช้แปรงทาสีด้วยมือโดยกำหนดปริมาตรประมาณ 50 ml ต่อ 1 m^2 โดยทาให้หมดต่อ 1 แผ่นทดลอง (Ma et al., 2000) หลังจากทาสีแล้ว ทิ้งไว้ให้แห้งสนิทในอุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง



แผนภูมิที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอุณภูมิจากกล่องทดลอง

ทำการทดลองในพื้นที่โล่งแจ้งโดยไม่มีเงาจากสิ่งปลูกสร้างหรือต้นไม้มาบัง และตั้งกล่องทุกๆกล่องทดลองไว้ 24 ชั่วโมง พร้อมทำการวัดค่าอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุดคือ อุณหภูมิอากาศ, อุณหภูมิจากภายในกล่องที่ปล่อยออกมาผ่านทางพัดลมดูดอากาศ อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของวัสดุหลังคา อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของวัสดุหลังคาจากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าความต้านทานความร้อนเฉลี่ย โดยหาค่าปริมาณความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่กล่องทดลองผ่านหลังคา (Q_1) และพลังงานความร้อนที่พัดลมระบายอากาศไหลเวียนออกจากกล่อง (Q_2)

$$Q_1 = U \times A \times (T_o - T_i) \qquad (1)$$

Q_1 คือ ปริมาณความร้อนของรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่กล่องทดลอง (Btu/h)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (Btu/hr.ft.$^\circ$F)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเปลือกอาคาร (ในที่นี้คือพื้นที่หลังคาที่ใช้ทดลอง) (ft^2)

T_o คือ อุณหภูมิที่สูงกว่าหรืออุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดของหลังคา ($^\circ$F)

T_i คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าหรืออุณหภูมิผิวชั้นในสุดของหลังคา ($^\circ$F)

$$Q_2 = CFM \times 1.08 \times (T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air}) \qquad (2)$$

CFM คือ ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากการใช้พัดลมระบายอากาศ (ft^2/minute)

1.08 คือ ค่าคงที่

$T_{outlet\ air}$ คือ อุณหภูมิที่วัด ณ ช่องอากาศออก – อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^{\circ}F$)

$T_{inlet\ air}$ คือ อุณหภูมิที่วัด ณ ทางระบายอากาศเข้า ($^{\circ}F$)

$$Q_1 = Q_2 \qquad (3)$$

$$U \times A \times (T_o - T_i) = CFM \times 1.08 \times (T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air})$$

เมื่อเข้าสมการแล้วจะทราบค่า U ซึ่งอัตราส่วนผกผันของค่า U จะเท่ากันค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) จากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้ในการป้อนข้อมูลของหลังคาสำหรับอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE 4.1 ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5.4.2 การตั้งค่าสภาวะการใช้งานของอาคารต้นแบบในโปรแกรม

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลอาคารที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าการใช้พลังงาน

ข้อมูลอาคารที่ใช้ในการคำนวณหาค่าการใช้พลังงานโดยใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1				
	บ้านพักอาศัย	อาคารสำนักงาน	อาคารร้านค้า	อาคารโรงพยาบาล
จำนวนชั้น	2	1	3	8
พื้นที่เปิดรับอาคารส่วนที่ทึบ (m^2)	184	231	4033	1416
พื้นที่ช่องเปิดอาคาร (m^2)	78	154	1210	425
พื้นที่หลังคารวม (m^2)	130	1024	2760	3200
พื้นที่ใช้สอยรวม (m^2)	218	1024	8400	4850
พื้นที่ไม่ปรับอากาศ	98	256		
พื้นที่ปรับอากาศ	120	768	8400	4850
สัดส่วนระหว่างช่องเปิดและผนังทึบ, WWR	30%	40%	46%	30%
สัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก, SC	0.95(6mmใส)	0.65 (6mmเขียว)	0.95(6mmใส)	0.65(6mmเขียว)
ระบบปรับอากาศ	Residential System	Package variable air volumn	Fan coil	Fan coil
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง, LPD(W/m^2)	7.5	15.9	25.05	10.67
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า, EPD(W/m^2)	8.6	15.9	17.48	3.36
จำนวนผู้ใช้งานอาคาร (person/1 m^2)	4	7	20	10
จำนวนวันที่ใช้งานอาคาร	7	5	7	7
ช่วงเวลาการใช้งาน	8 ชั่วโมง (22.00 - 6.00น.)	12 ชั่วโมง (8.00 - 20.00น.)	12 ชั่วโมง (10.00 - 22.00น.)	24 ชั่วโมง

3.5.5 การพิจารณาด้านความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period Analysis)

3.5.5.1 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period – PB)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ (Total investment)}}{\text{ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี (Annual energy cost saving)}}$$

โดยนำข้อมูลการใช้พลังงานและจำนวนค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ามาเปรียบเทียบความคุ้มทุน และอัตราการประหยัดค่าไฟเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคา Basecase และทำการสรุปผล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการรวบรวมผลทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

- ผลการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล จากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง
- ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากจำลองอาคารโดยใช้โปรแกรม VisualDOE 4.1
- การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

4.1 ผลการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูล จากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง

ภาพที่ 4.1 สถานที่ทดลองและการศึกษาด้วยกล่องทดลอง

สถานที่ทดลองตั้งอยู่บริเวณเขตหนอกจอก กรุงเทพมหานคร ทำการตั้งกล่องทดลองในสถานที่โล่งแจ้ง ปราศจากร่มเงารอบด้าน วันที่เลือกทำการทดลองอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม มีอากาศปลอดโปร่ง ไม่มีเมฆและแดดจัด มีการเก็บข้อมูลโดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 24 ชม. โดยบันทึกอุณภูมิทั้งหมด 4 จุดคือ บริเวณพื้นผิวหลังคาภายนอก (Outer

Surface) และภายในของวัสดุหลังคา (Inner Surface), อุณหภูมิในกล่องทดลอง (Outlet), อุณหภูมิอากาศภายนอกกล่องทดลอง (Inlet) โดยนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบหลังคา(R_t) ตามสมการ

$$Q_1 = Q_2$$

$$U \bullet A \bullet (T_o - T_i) = CFM \bullet 1.08 \bullet (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}) \ (^{\circ}F/\ ft^3/\ minute)$$

4.1.1 หลังคาประเภทต่าง ๆที่ใช้ในการทดลอง

กล่องทดลองที่ 1 : เมทัลชีทไม่เคลือบสี (Base case)

กล่องทดลองที่ 2 : เมทัลชีททาสีขาว (White)

กล่องทดลองที่ 3 : เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก (White + Thermochromic)

กล่องทดลองที่ 4 : เมทัลชีททาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation)

กล่องทดลองที่ 5 : เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว (White + Thermochromic + Insulation)

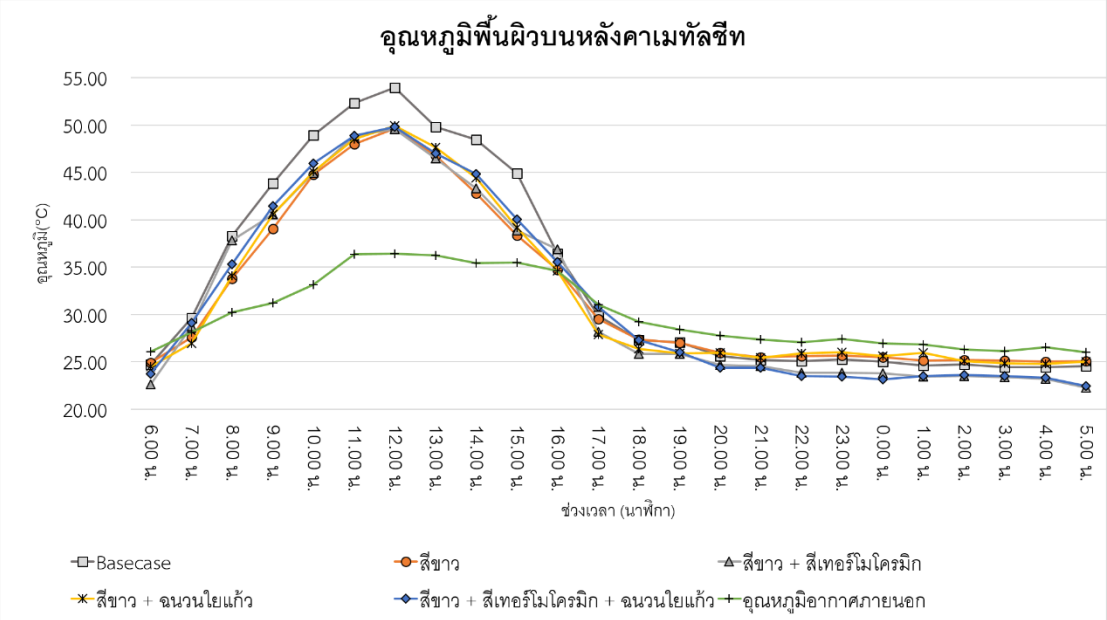
การศึกษาการเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิของแผ่นหลังคาโลหะเคลือบสังกะสี พบว่าสีจะเริ่มมีการเปลี่ยนตามอุณหภูมิในช่วงเช้าตรู่ ในเวลาที่มีแดดออกและอุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 27 °C เป็นต้นไปและเปลี่ยนไปเป็นสีอ่อนสุดในขณะที่อุณหภูมิ 42 °C ดังภาพที่ 4

26 °C (ก) 30 °C (ข) 42 °C (ค)

ภาพที่ 4.2 แสดงการเปลี่ยนสีของแผ่นหลังคาวัสดุเมทัลชีทที่เคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิกที่ 26 °C (ก), 30 °C (ข) และ 42 °C (ค)

4.1.2 ผลการศึกษาเรื่องสีและฉนวนกันความร้อนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุหลังคาเมทัลชีท

4.1.2.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวบนหลังคาเมทัลชีทกับอุณหภูมิอากาศภายนอก



แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิพื้นผิวบนของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ

ช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงเวลากลางวัน วัสดุหลังคาจะได้รับการแผ่รังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิผิวหลังคาสูงขึ้นจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorptance) และถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) เข้าสู่เนื้อวัสดุหลังคา การทาสีขาวชนิดป้องกันความร้อน ส่งผลให้อุณหภูมิผิวหลังคานั้นต่ำกว่าหลังคาไม่เคลือบสีถึง 4.35 °C

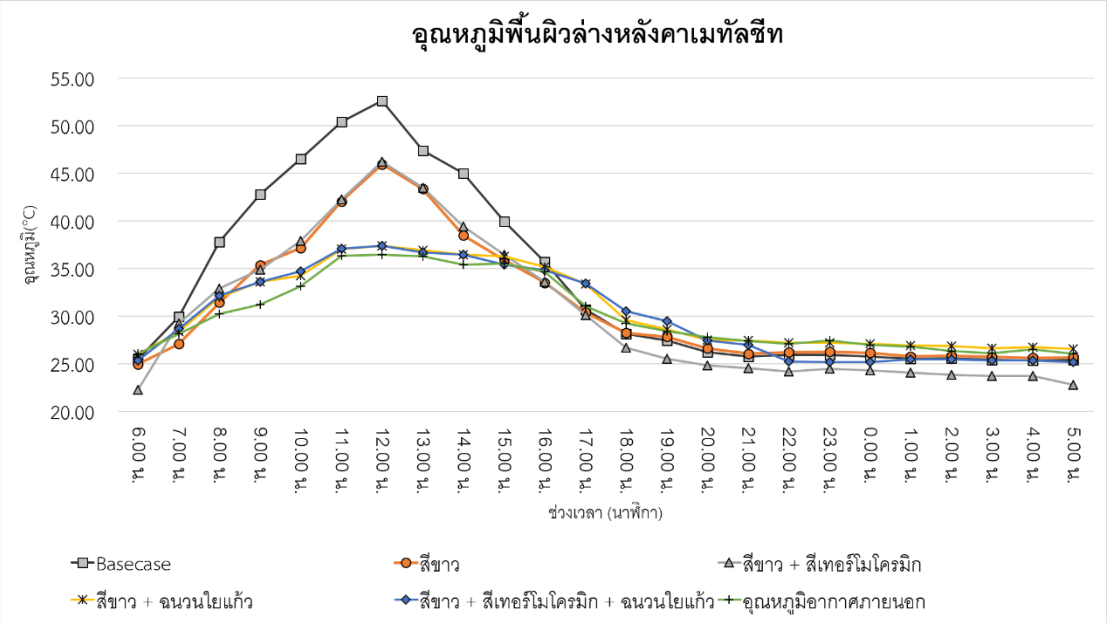
การใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำเคลือบบนสีขาว ทำให้อุณหภูมิในตอนเช้าสูงกว่าการใช้สีขาวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผิวหลังคายังคงเป็นสีดำ แต่เมื่อพื้นผิวของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกมีอุณหภูมิใกล้เคียงและสูงกว่า 32 °C (Colorless phase) สีเทอร์โมโครมิกจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีใสจนเห็นพื้นสีขาวด้านล่าง อุณหภูมิสูงสุดผิวบนของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงใกล้เคียงกับหลังคาที่ทาสีขาว โดยมีความต่างกันเพียง 0.93 °C และมีอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาที่ไม่เคลือบสี 3.42 °C

การใช้ฉนวนใยแก้วกับหลังคาเมทัลชีทที่เคลือบสีขาวและสีขาว+เทอร์โมโครมิก นั้นพบว่าส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวบนหลังคาเพียงเล็กน้อยเนื่องจากวัสดุฟอยล์ห่อหุ้มฉนวนมีการสะท้อนความร้อนขึ้นมายังหลังคา โดยมีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาแบบไม่ติดฉนวน 0.5 - 1 °C

ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงเวลากลางคืนวัสดุมุงหลังคาจะเริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (Nightsky Radiation) ทำให้อุณหภูมิผิววัสดุมุงหลังคาเริ่มต่ำลง สีเทอร์โมโครมิกได้เปลี่ยนสีกลับมาเป็นสีดำ เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่า 32 °C (Color Phase) ส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดของผิวบนหลังคาลดลงได้มากกว่าการเคลือบสีขาวธรรมดาถึง 2.78 °C และหลังคาไม่เคลือบสี 1.55 °C ตามลำดับ โดยหลังคาที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วนั้น จะมีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาที่ไม่มีฉนวนใยแก้วเพียงเล็กน้อย ซึ่งหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน ใยแก้วจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาที่ทาสีขาว+ฉนวนใยแก้ว 2.56 °C ดังที่เห็นได้จากแผนภูมิที่ 4.1

4.1.2.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวล่างหลังคากับอุณหภูมิอากาศภายนอก



แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิพื้นผิวล่างของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ

ช่วงเวลากลางวัน

ในช่วงเวลากลางวัน เมื่อวัสดุหลังคาได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิผิวหลังคาสูงขึ้น ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิด้านล่างหลังคา การทาสีขาวชนิดป้องกันความร้อนนั้นทำหน้าที่ช่วยสะท้อนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้อุณหภูมิผิวล่างหลังคานั้นต่ำกว่าหลังคาไม่เคลือบสีถึง 6.66 °C

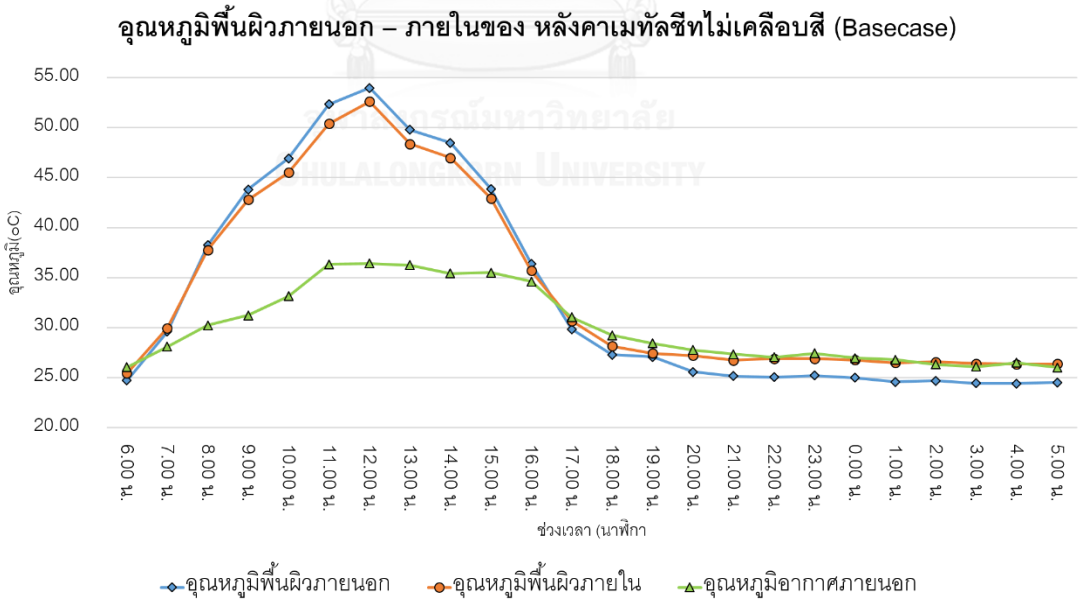
การใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำเคลือบบนสีขาว ทำให้อุณหภูมิในตอนเช้าสูงกว่าการใช้สีขาว เนื่องจากผิวหลังคายังคงเป็นสีดำ แต่เมื่อพื้นผิวของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกมีอุณหภูมิ

ใกล้เคียงและสูงกว่า 32 °C (Colorless phase) สีเทอร์โมโครมิกจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีใสจนเห็นพื้นสีขาวด้านล่าง อุณหภูมิสูงสุดผิวล่างของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงใกล้เคียงกับหลังคาที่ทาสีขาว โดยมีความต่างกันเพียง 0.29 °C และมีอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาที่ไม่เคลือบสี 6.37 °C การใช้ฉนวนใยแก้วกับหลังคาเมทัลชีทที่เคลือบสีขาวและสีขาว+เทอร์โมโครมิก นั้นพบว่าส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวล่างอย่างมาก เนื่องจากตัวฉนวนใยแก้วทำหน้าที่ป้องกันความร้อนได้ดี ทำให้อุณหภูมิผิวล่างของหลังคาต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน 8 – 9 °C

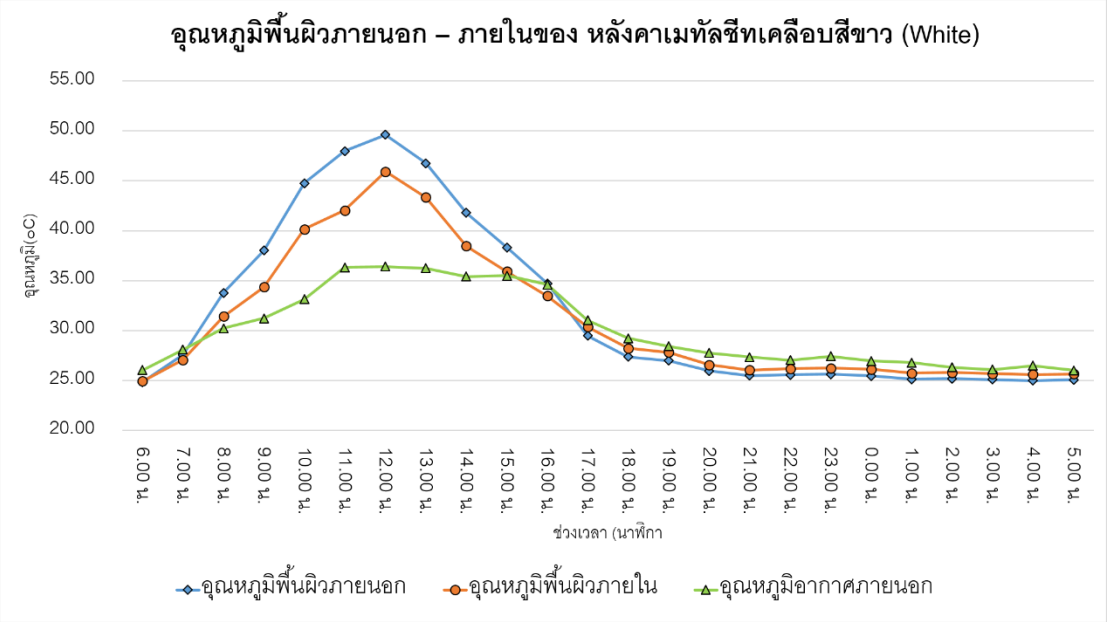
ช่วงเวลากลางคืน

ในช่วงเวลากลางคืนวัสดุมุงหลังคาจะเริ่มคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (Nightsky Radiation) ทำให้อุณหภูมิผิววัสดุมุงหลังคาเริ่มต่ำลง ซึ่งส่งผลต่ออุณหภูมิผิวล่างหลังคา ในเวลากลางคืน สีเทอร์โมโครมิกได้เปลี่ยนสีกลับมาเป็นสีดำเนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวต่ำกว่า 32 °C (Color Phase) โดยส่งผลให้อุณหภูมิผิวล่างต่ำกว่าการเคลือบสีขาวธรรมดาถึง 2.89 °C และหลังคาไม่เคลือบสี 2.6 °C ด้านอุณหภูมิผิวล่างหลังคาที่มีการติดตั้งฉนวนใยแก้วนั้น จะมีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคาที่ไม่มีฉนวนใยแก้ว 2.5 - 3.7 °C เนื่องจากฉนวนนั้นลดประสิทธิภาพการคายความร้อนขึ้นสู่ท้องฟ้าผ่านหลังคาเมทัลชีท และการใช้สีเทอร์โมโครมิกนั้นช่วยลดอุณหภูมิผิวล่างได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังที่เห็นได้จากแผนภูมิที่ 4.2

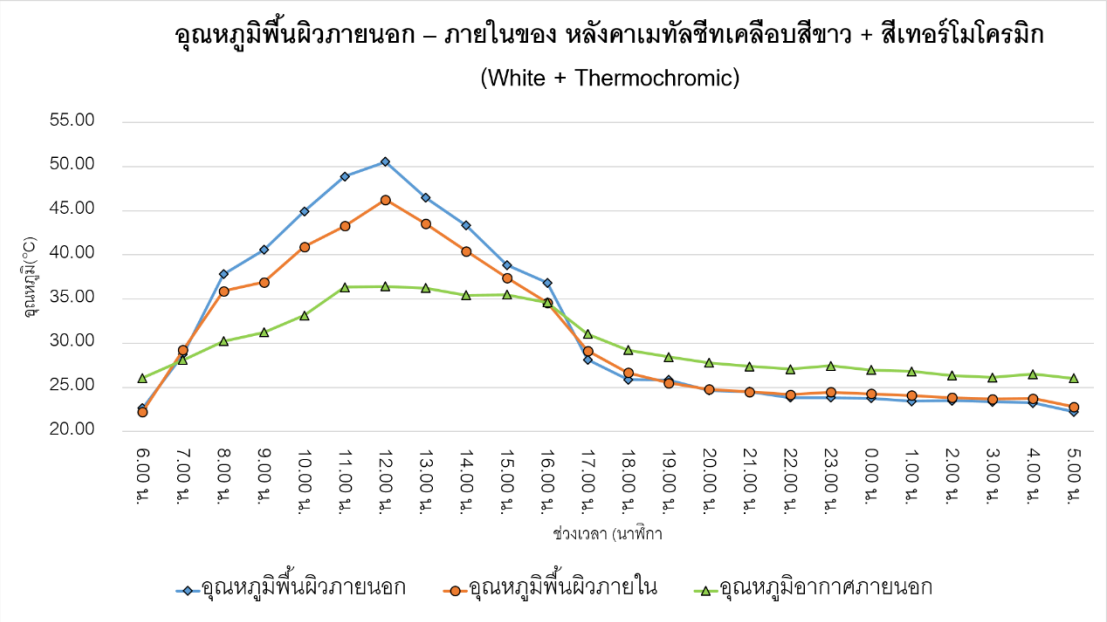
4.1.2.3 การเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวบน - ล่างหลังคา



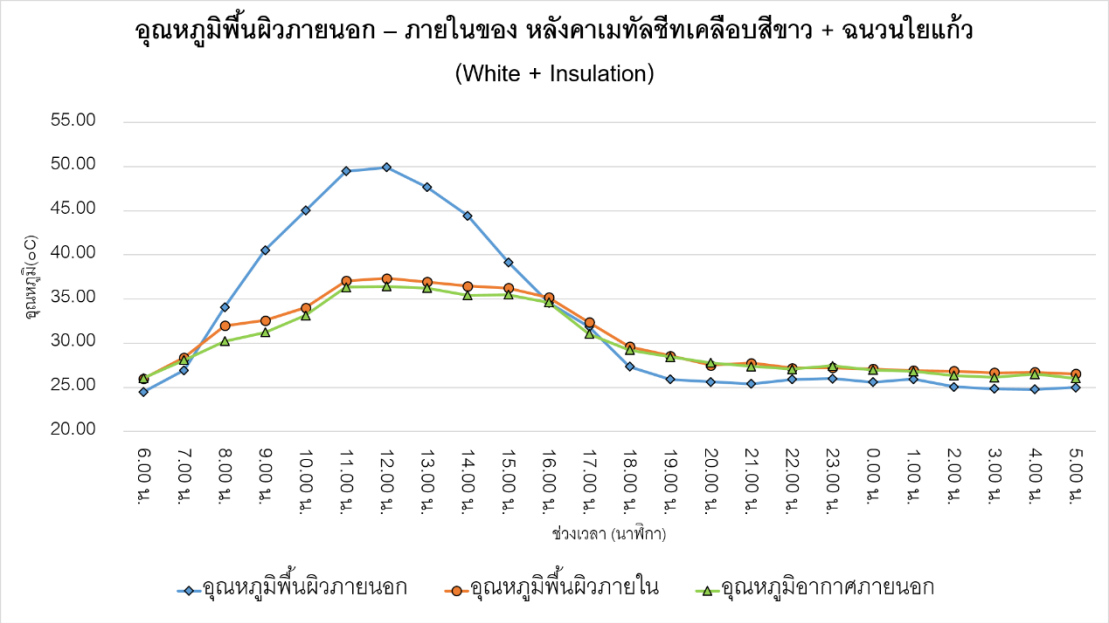
แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี (Basecase)



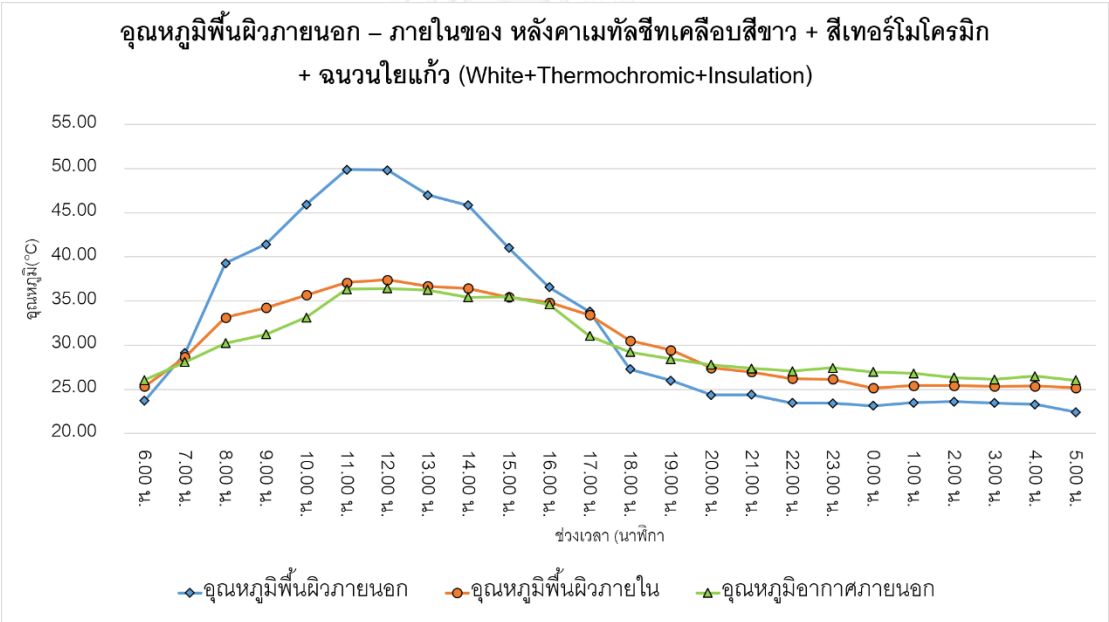
แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว (White)



แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก (White + Thermochromic)



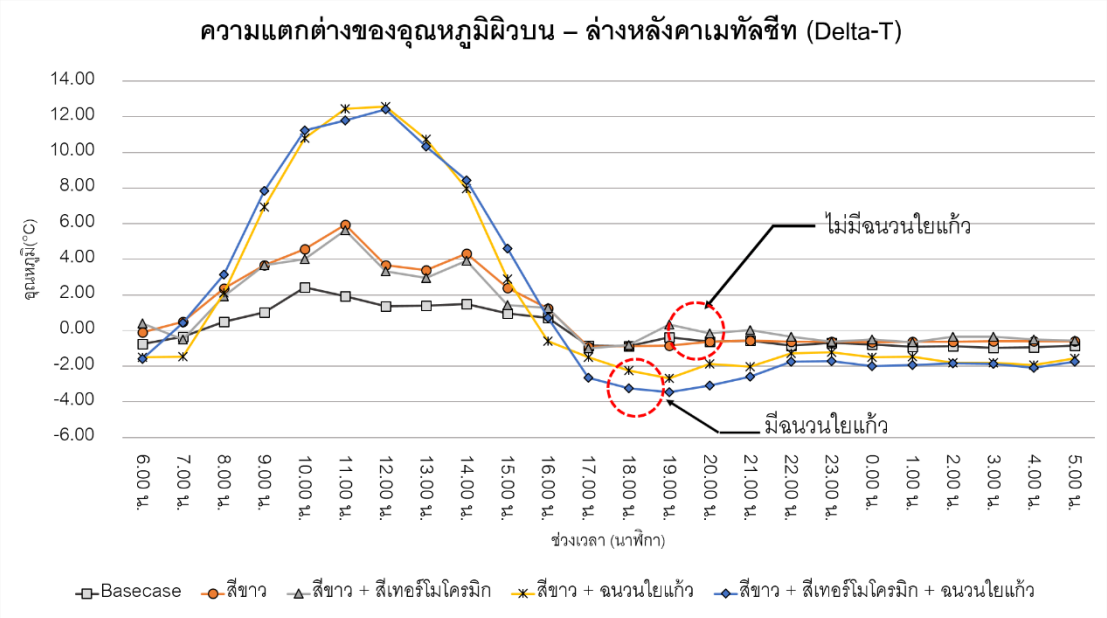
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิพื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation)



แผนภูมิที่ 4.7 พื้นผิวภายนอก – ภายในของหลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว (White + Insulation)

จากแผนภูมิที่ 4.4 – 4.8 แสดงให้เห็นความแตกต่างของอุณภูมิผิวบน – ล่างของหลังคาเมทัลชีทแบบต่างๆ โดยในช่วงเวลากลางวันหลังคาที่ไม่เคลือบสี จะมีความแตกต่างของอุณภูมิผิวบน – ล่างหลังคาน้อยที่สุด หลังคาที่มีการเคลือบสีขาวและสีเทอร์โมโครมิก ช่วยให้ลดอุณหภูมิที่เข้ามาผ่านหลังคาสู่ผิวล่าง โดยสามารถลดได้ 5 – 6 °C และการใช้ฉนวนใยแก้วกับหลังคาที่ทาสีขาวและสีเทอร์โมโครมิก ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการลดความร้อนจากอุณหภูมิผิวบนได้ดีที่สุด โดยสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 10 – 12 °C

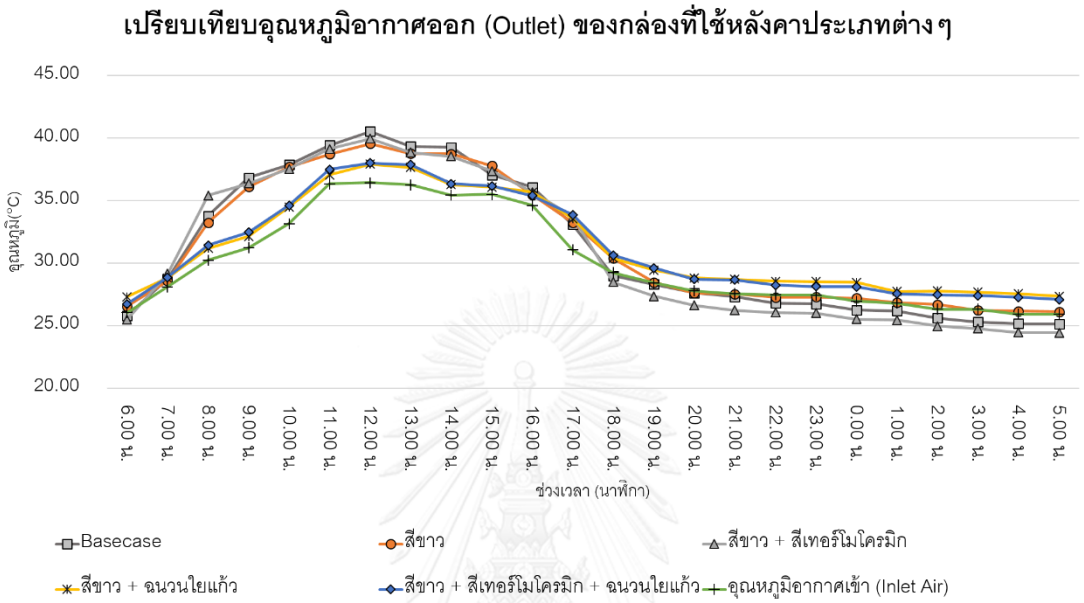
ในช่วงเวลากลางคืนความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบน – ล่างของหลังคาแบบที่ไม่มีฉนวนใยแก้วจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิค่อนข้างน้อย เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนมีการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคา ทำให้อุณหภูมิหลังคาต่ำลงกว่าอุณหภูมิอากาศ การคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าทำให้อุณหภูมิล่างหลังคาลดลงต่ำตามไปด้วย ด้านการใช้ฉนวนใยแก้วส่งผลให้อุณหภูมิผิวบน – ล่างมีความแตกต่างกันสูง เนื่องจากฉนวนจะทำให้ประสิทธิภาพการคายความร้อนของหลังคาลดลง ทำให้อุณหภูมิผิวล่างหลังคาลดลงได้ช้าในช่วงเวลากลางคืน ดังแผนภูมิที่ 4.9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบน – ล่าง (Delta –T) ของหลังคาประเภทต่างๆ



แผนภูมิที่ 4.8 ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวบน – ล่างของหลังคาแบบต่างๆ

4.1.3 ผลการศึกษาเรื่องสีและฉนวนกันความร้อนที่ส่งผลต่ออุณหภูมิภายใน – ภายนอกกล่องทดลอง

4.1.3.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก(Outlet)ของกล่องทดลองที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ



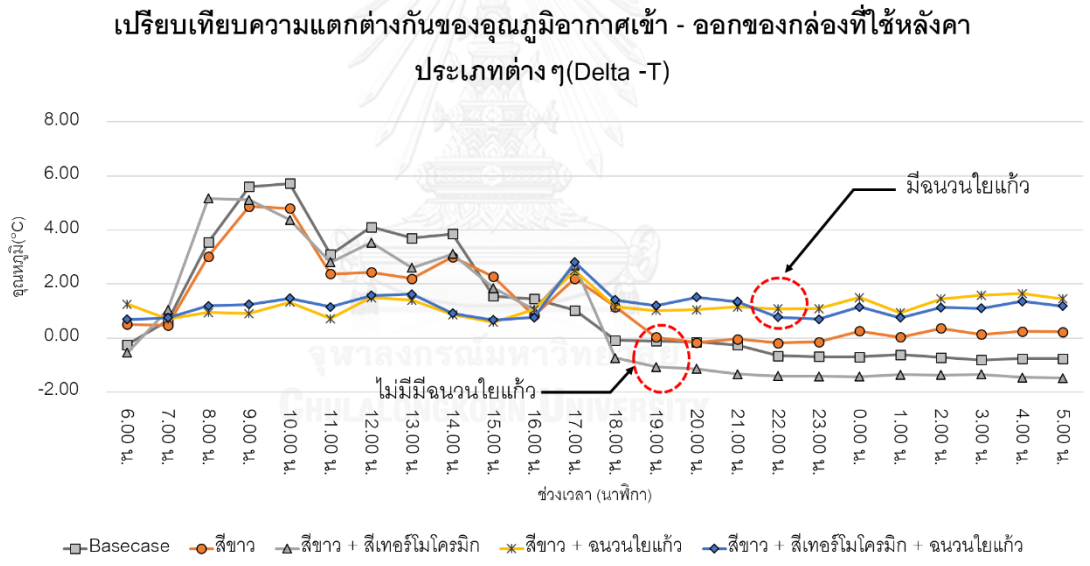
แผนภูมิที่ 4.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศออก (Outlet) ของกล่องที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

จากแผนภูมิที่ 4.10 ผลจากการวัดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองพบว่าอุณหภูมิผิวล่างของหลังคาได้ส่งผลโดยตรงมายังอุณหภูมิภายในกล่อง ในช่วงเวลากลางวัน การทาสีขาวชนิดป้องกันความร้อนนั้นทำหน้าที่ช่วยสะท้อนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ส่งผลให้อุณหภูมิในกล่องต่ำกว่าหลังคาไม่เคลือบสีประมาณ 1 - 2 °C

การใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำเคลือบบนสีขาว ทำให้อุณหภูมิภายในกล่องช่วงตอนเช้าสูงกว่าการใช้สีขาวเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผิวหลังคายังคงเป็นสีดำ แต่เมื่อพื้นผิวของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกมีอุณหภูมิใกล้เคียงและสูงกว่า 32 °C (Colorless phase) สีเทอร์โมโครมิกจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีใสจนเห็นพื้นสีขาวด้านล่าง อุณหภูมิภายในกล่องของหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงใกล้เคียงกับหลังคาที่ทาสีขาว โดยมีความต่างกันเพียง 0.5 °C และมีอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาที่ไม่เคลือบสี 1-2 °C และการใช้ฉนวนใยแก้วกับหลังคาเมทัลชีทที่เคลือบสีขาวและสีขาว+เทอร์โมโครมิก นั้นพบว่าส่งผลต่ออุณหภูมิภายในกล่องอย่างมาก เนื่องจากตัวฉนวนใยแก้วทำหน้าที่ป้องกันความร้อนได้ดี ทำให้อุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน 2-3 °C

ในช่วงเวลากลางคืนมีการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคา ทำให้อุณหภูมิหลังคาต่ำลงกว่าอุณหภูมิอากาศ การคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าทำให้อุณหภูมิล่างหลังคาลดลงต่ำตามไปด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายในกล่องทดลอง การใช้สีเทอร์โมโครมิกส่งผลให้อุณหภูมิผิวของวัสดุลดลงต่ำกว่าหลังคาอื่นๆ ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท ส่งผลให้มีการคายความร้อนออกจากกล่องได้มากขึ้น อุณหภูมิภายในกล่องจึงต่ำที่สุด หลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสีนั้นมีสีเข้มกว่าหลังคาเคลือบสีขาว จึงมีอุณภูมิใต้หลังคาที่ต่ำกว่าเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้อุณหภูมิภายในกล่องต่ำกว่าเช่นเดียวกัน

การใช้ฉนวนใยแก้วส่งผลให้อุณหภูมิภายในกล่องสูงกว่ากล่องที่ไม่มีการใช้ฉนวน เนื่องจากฉนวนจะทำให้ประสิทธิภาพการคายความร้อนของหลังคาลดลง ทำให้อุณหภูมิผิวล่างหลังคาลดลงได้ช้าในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับอุณหภูมิภายในกล่อง ดังแผนภูมิที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน – ภายนอกกล่องทดลอง (Delta –T)



แผนภูมิที่ 4.10 เปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศเข้า – ออกของกล่องทดลอง

4.1.4 ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ที่คำนวนได้จากกล่องทดลอง

ผลจากการวัดอุณหภูมิทำให้สามารถทราบค่าการต้านทานความร้อน (R_t) ได้จากการคำนวณ เข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า R_t เฉลี่ยโดยยึดหลักว่า ในภาวะคงที่พลังงานความร้อนของดวงอาทิตย์ ที่เข้าสู่กล่องทดลองผ่านระบบหลังคา (Q_1) จะมีความสมดุลกับพลังงานความร้อนที่ใช้พัดลมระบายอากาศไหลพัดเวียนออกจากกล่อง (Q_2) ดังนี้

$$Q_1 = U \cdot A \cdot (T_o - T_i) \quad (1)$$

Q_1 คือ ปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์เข้าสู่กล่องทดลอง (Btu/h)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (Btu/hr·ft·°F)

A คือ พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน ในที่นี้คือ
พื้นที่หลังคาที่ใช้ในกล่องทดลอง (ft^2)

T_o คือ อุณหภูมิที่สูงกว่า (°F) หรืออุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดของหลังคา

T_i คือ อุณหภูมิที่ต่ากว่า (°F)

ในที่นี้คืออุณหภูมิผิวชั้นในสุดของหลังคาเองหรือผิววัสดุกันความร้อน

$$Q_2 = CFM \cdot 1.08 \cdot (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}}) \quad (2)$$

CFM คือปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจาก
พัดลมระบายอากาศที่ใช้ (CFM = 18.64 ft^3/minute)

1.08 คือ ค่าคงที่

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

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

$$Q_1 = Q_2 \quad (3)$$

$$U \cdot A \cdot (T_o - T_i) = CFM \cdot 1.08 \cdot (T_{\text{outlet air}} - T_{\text{inlet air}})$$

เมื่อเข้าสมการแล้ว จะทราบค่า U ซึ่งอัตราส่วนผกผันของค่า U จะเท่ากับค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t)

จากตารางที่ 4.1 หลังคาที่เคลือบด้วยสีขาว และหลังคาที่เคลือบด้วยสีขาว + สีเทอร์โมโครมิกที่มีการใช้ฉนวน มีค่า R_t ที่ใกล้เคียงกันและสูงที่สุด รองลงมาคือหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน คือหลังคาที่เคลือบสีขาวและเคลือบสีขาว + เทอร์โมโครมิก โดยหลังคาที่ไม่มีการเคลือบสีนั้นได้ค่า R_t ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน ตามกราฟแสดงอุณหภูมิที่ได้กล่าวมาข้างต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) ของหลังคาประเภทต่างๆที่ได้จากการทดลอง

	ค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t – sq.m.K/W) ของหลังคาประเภทต่างๆ				
	เมทัลชีทไม่เคลือบสี	เมทัลชีททาสีขาว	เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก	เมทัลชีททาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว	เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว
อุณหภูมิพื้นผิวบน (To – °F)	129.1	121.3	123	119.3	120.1
อุณหภูมิพื้นผิวล่าง (Ti – °F)	126.7	112.6	113.8	98.7	98.8
อุณหภูมิอากาศเข้า (T_{inlet} – °F)	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6
อุณหภูมิอากาศออก (T_{outlet} – °F)	103	100.8	101.1	99.6	100.2
To - Ti	2.4	8.7	9.2	20.6	21.3
Toutlet - Tinlet	5.4	3.4	3.5	2.2	2.2
U	45.2	7.87	7.66	2.15	2.07
Rt	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46

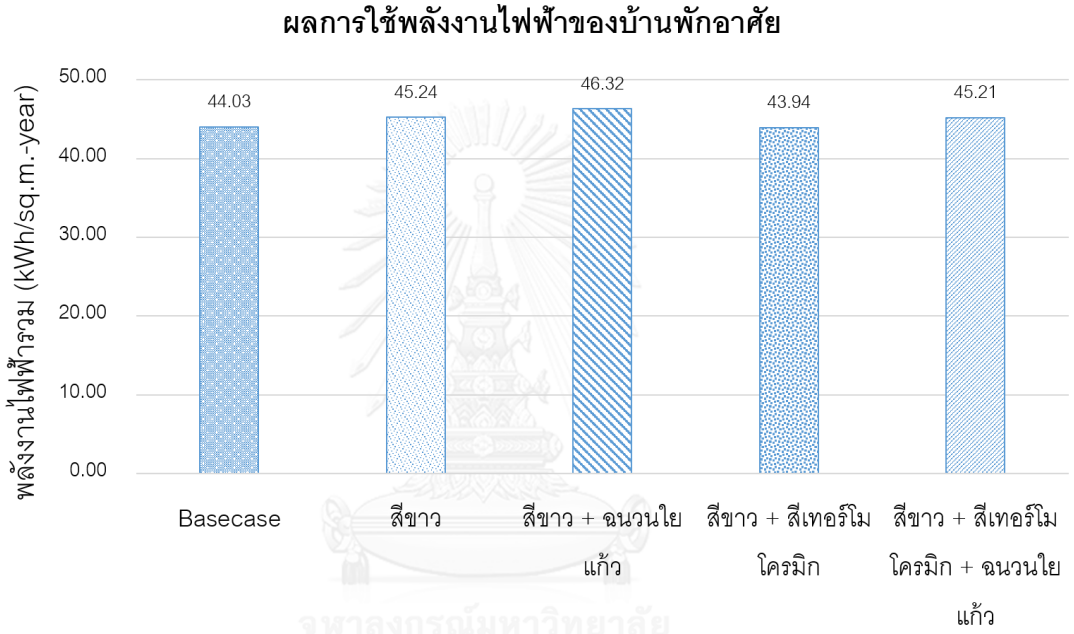
4.2 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากจำลองอาคารโดยใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1

นำค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) ที่คำนวณได้จากการศึกษาด้วยกล่องทดลองมาใส่เป็นข้อมูลของหลังคาอาคาร 5 รูปแบบ ในอาคารต้นแบบ 4 ประเภท คือ อาคารบ้านพักอาศัย (ใช้เครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางคืน) อาคารสำนักงาน (ใช้เครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน) อาคารร้านค้า(ใช้เครื่องปรับอากาศกึ่งกลางวันกึ่งกลางคืน) อาคารโรงพยาบาล (ใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง) โดยพิจารณาผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ภายในหนึ่งปี (kWh/sq.m-year) ดังนี้

4.2.1 อาคารพักอาศัย

อาคารต้นแบบเป็นอาคารหลังคาทรงปั้นหยา ทำการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉพาะความต้านทานความร้อน (R_t) ที่ได้จากการคำนวณจากผลการทดลองกล่องทดลอง โดยชุดหลังคาที่ใช้สำหรับจำลองผลคือ หลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี หลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว หลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก หลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว+ฉนวนใยแก้ว หลังคาเมทัลชีทเคลือบสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว

ทำการจำลองการใช้พลังงานโดยใช้ค่าคุณสมบัติการกันความร้อนของหลังคาทั้ง 6 แบบ โดยในช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่สีขาวแทนด้วยค่า 0.3 และหลังคาไม่เคลือบสีเท่ากับ 0.5 และในช่วงเวลากลางคืนเมื่อหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนเป็นสีดำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาจะเท่ากับ 0.9 (กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน, 2543)



แผนภูมิที่ 4.11 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

ผลจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของบ้านพักอาศัยจากการใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืนเพียงอย่างเดียว พบว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว จะใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลังคาที่มีการใช้ฉนวน เนื่องจากบ้านพักอาศัย เน้นการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน ทำให้การใช้ฉนวนนั้นลดประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (Nightsky radiation) โดยหลังคาที่มีการใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำและหลังคาไม่เคลือบสีซึ่งมีสีเทา ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายความร้อนคือสู่ท้องฟ้า ตามทฤษฎีของวัสดุดำในอุดมคติ (Blackbody) ซึ่งเป็นวัสดุในอุดมคติที่สามารถคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ (Perfect Emitted)

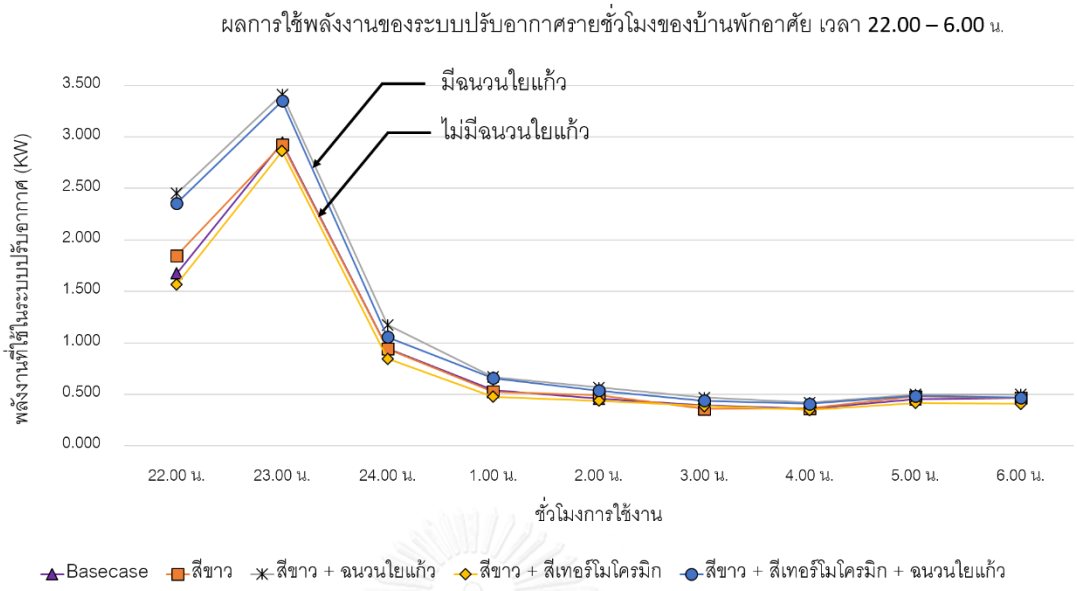
ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารบ้านพักอาศัย (kWh/sq.m.-year)				
	Basecase	สีขาว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก	สีขาว + ฉนวนใยแก้ว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว
R_t (sq.m. K/W)	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46
kWh/sq.m.-year	44.03	45.24	46.32	43.94	45.21
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		- 2.67	-4.94	0.2	-2.61

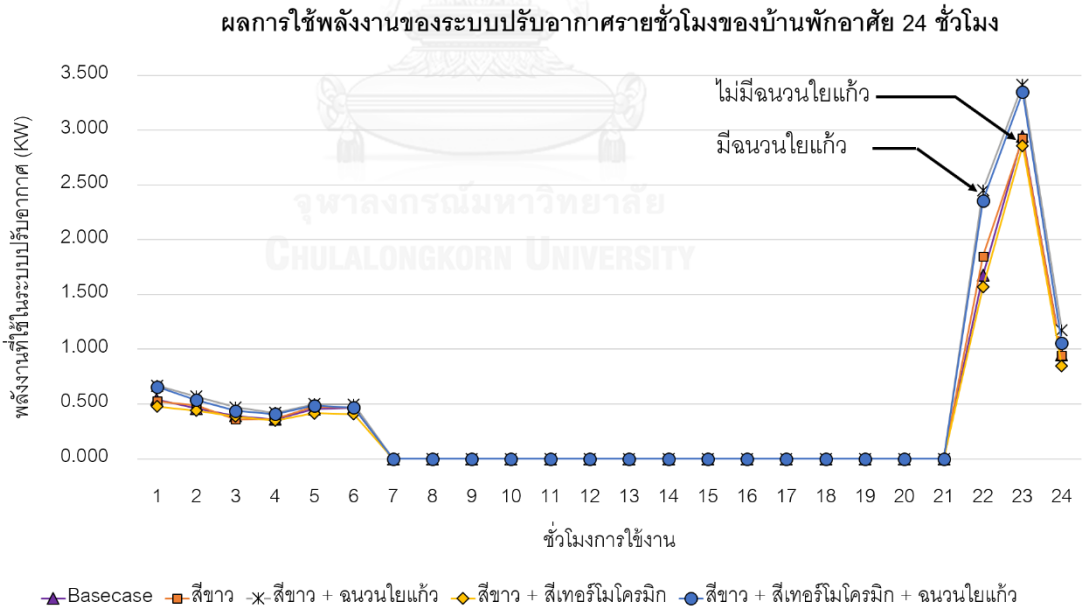
เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของบ้านพักอาศัยที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานความร้อนไม่ได้ส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากบ้านพักอาศัยมีการใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเน้นประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (Nightsky radiation) ที่จะส่งผลต่อภาวะการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัย

จากแผนภูมิที่ 4.13 และ แผนภูมิที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงในเวลากลางคืน จะเห็นได้ว่าเวลากลางคืนเป็นช่วงที่เปลือกอาคารเริ่มระบายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก การใช้พลังงานทำความเย็นจะสูงในช่วงแรกที่มีการเปิดเครื่องปรับอากาศโดยการใช้ฉนวนนั้นจะมีการใช้พลังงานการทำความเย็นสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้สีและวัสดุหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงในอาคารที่เน้นการใช้งานในเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่ อาจทำให้ความร้อนที่เข้ามาในช่วงเวลากลางวันระบายออกได้ช้าในเวลากลางคืน ซึ่งเป็นภาระต่อระบบการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศมากขึ้น และจากผลการจำลองการใช้พลังงานของบ้านพักอาศัยก็พบว่า หลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนนั้นใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำที่สุด

อย่างไรก็ตาม อาคารพักอาศัยต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย เป็นอาคารที่ใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน ซึ่งเป็นห้องนอน ยังมีห้องที่ใช้งานในเวลากลางวัน เช่นห้องรับแขก หรือห้องที่อยู่ในชั้นล่าง การเปิดใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางวันบริเวณด้านล่างของบ้านจึงส่งผลต่อหลังคาน้อยมาก ถ้ามีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในพื้นที่ด้านบนที่ติดกับหลังคา การใช้ฉนวนกันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง อาจเป็นวิธีที่กันความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานมากกว่า



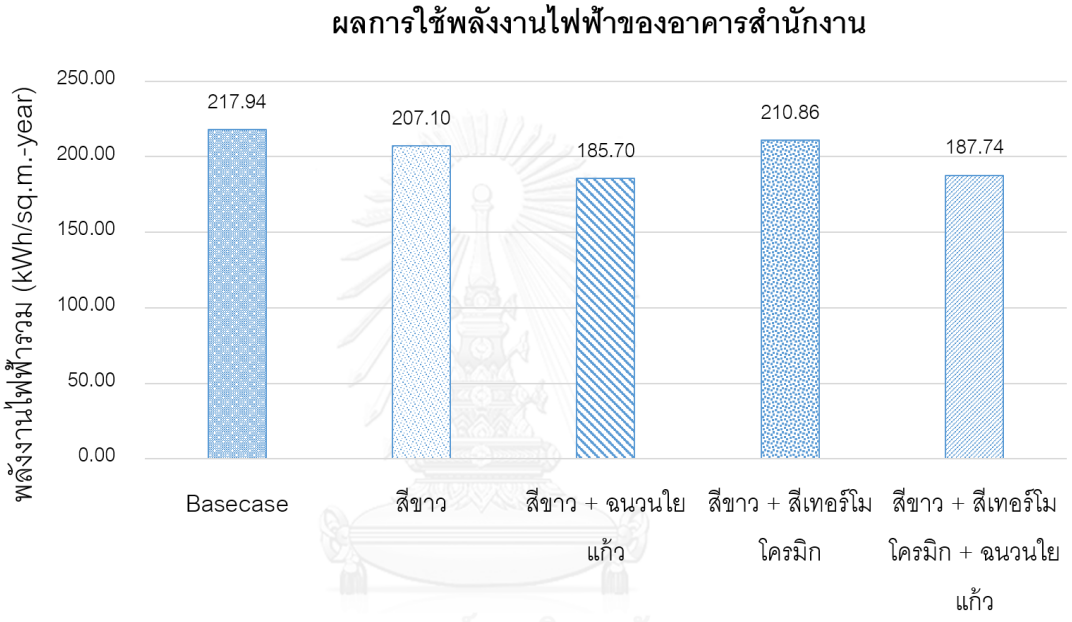
แผนภูมิที่ 4.12 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 22.00 น. – 6.00 น.ของบ้านพักอาศัย



แผนภูมิที่ 4.13 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของบ้านพักอาศัย

4.2.2 อาคารสำนักงาน

อาคารสำนักงาน ทำการจำลองการใช้พลังงานโดยใช้ค่าคุณสมบัติการกันความร้อนของหลังคาทั้ง 6 แบบ โดยในช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่สีขาวแทนด้วยค่า 0.3 และหลังคาไม่เคลือบสีเท่ากับ 0.5 และในช่วงเวลากลางคืนเมื่อหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนเป็นสีดำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาจะเท่ากับ 0.9 (กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน, 2543)



แผนภูมิที่ 4.14 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

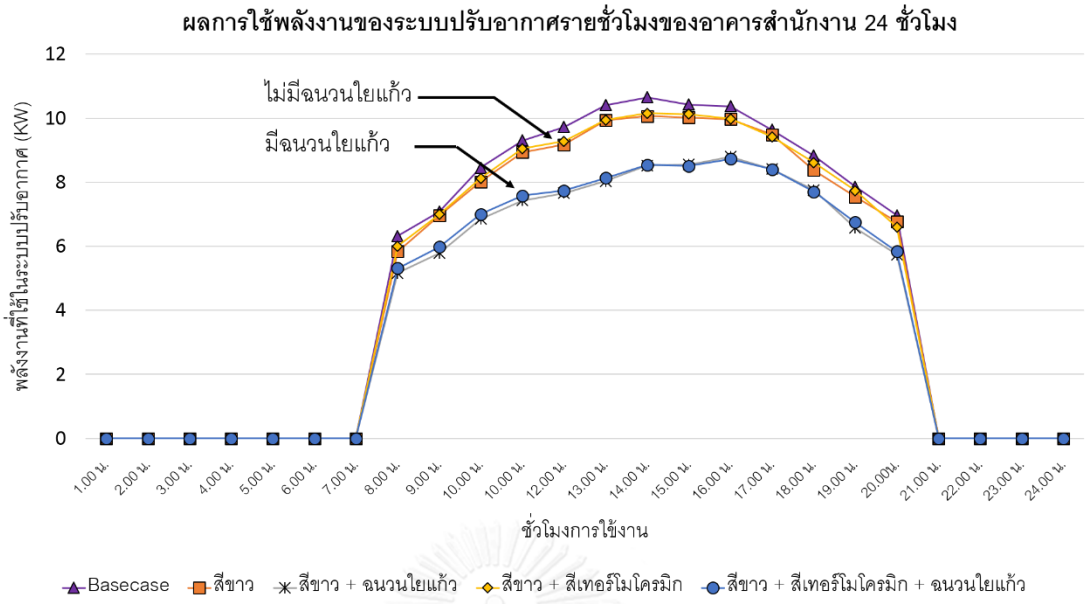
ผลจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงานจากการใช้เครื่องปรับอากาศในเวลาวันเป็นส่วนใหญ่ พบว่าหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว จะใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน เนื่องจากอาคารสำนักงาน เน้นการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางวัน ทำให้ค่าความต้านทานความร้อนนั้นมีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยหลังคาที่มีการใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำหลังจากเปลี่ยนสีเป็นสีใสจนเห็นสีขาวรองพื้น (Colorless phase) พบว่ามีค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกับการใช้สีขาวเพียงอย่างเดียว ทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

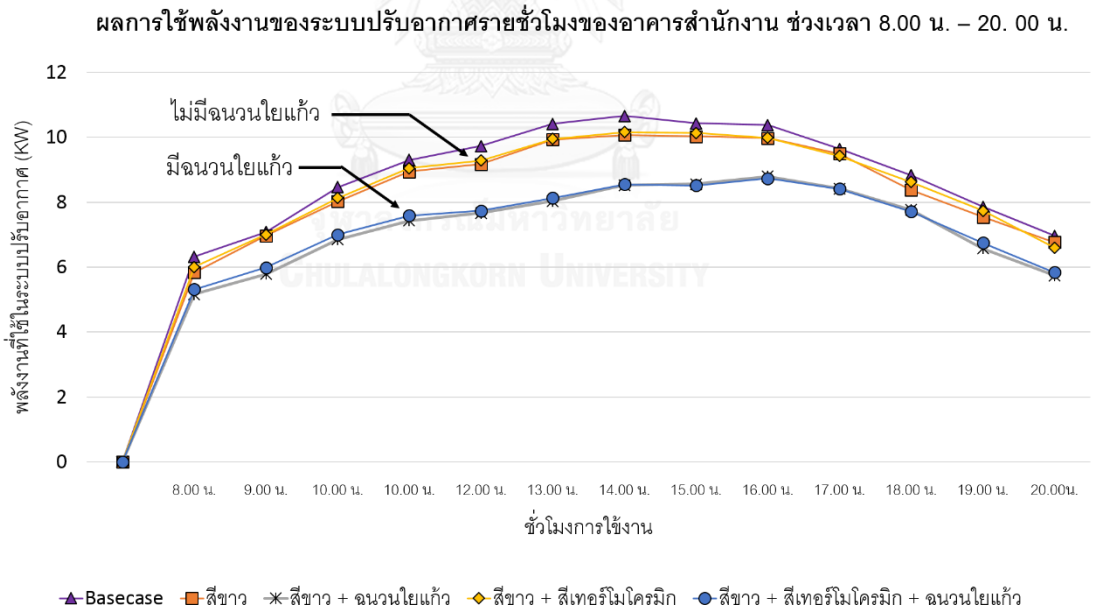
	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน (kWh/sq.m.-year)				
	Basecase	สีขาว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก	สีขาว + ฉนวนใยแก้ว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว
R_t (sq.m. K/W)	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46
kWh/sq.m.-year	217.94	207.10	210.86	185.70	187.74
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		5.23	3.36	17.36	16.08

เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารสำนักงานที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานความร้อนส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากอาคารสำนักงานเน้นการใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางวันเป็นหลัก

จากแผนภูมิที่ 4.16 และ แผนภูมิที่ 4.17 ซึ่งเป็นผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารสำนักงาน จะเห็นได้ว่า การใช้พลังงานทำความเย็นจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารจากอุณภูมิที่สูงขึ้นของอากาศ โดยการติดตั้งฉนวนนั้นช่วยทำให้การใช้พลังงานการทำความเย็นต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้สีและระบบหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง นั้นช่วยลดภาระต่อระบบการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ และจากผลการจำลองการใช้พลังงานของอาคารสำนักงานก็พบว่า หลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนนั้นใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ซึ่งคือหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วเคลือบสีขาวและสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก สามารถช่วยให้ประหยัดการใช้พลังงานได้ถึง 17.36 % และ 16.08 % และในหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน แต่ใช้เพียงสีเคลือบ คือหลังคาสีขาว และสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก พบว่าช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 5.23 % และ 3.36 % เมื่อเทียบกันกับ Basecase



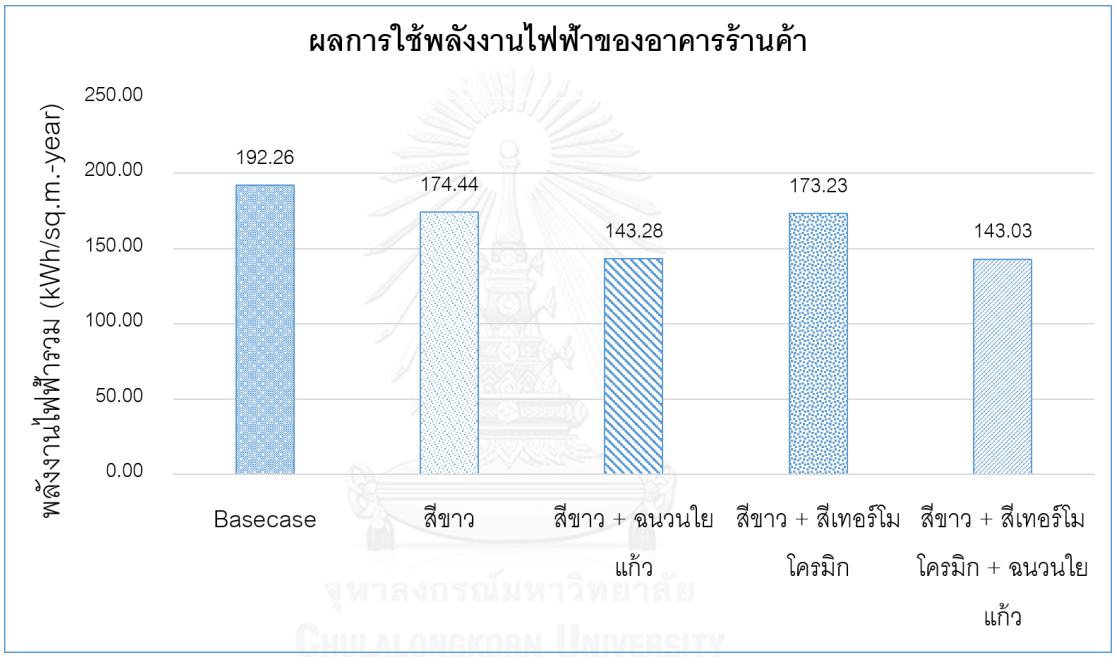
แผนภูมิที่ 4.15 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 8.00 น. – 20.00 น. ของอาคารสำนักงาน



แผนภูมิที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน

4.2.3 อาคารร้านค้า

อาคารร้านค้าทำการจำลองการใช้พลังงานโดยใช้ค่าคุณสมบัติการกันความร้อนของหลังคาทั้ง 6 แบบ โดยช่วงเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศคือ 10.00 – 22.00 น. ในช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่สีขาวแทนด้วยค่า 0.3 และหลังคาไม่เคลือบสีเท่ากับ 0.5 และในช่วงเวลากลางคืนเมื่อหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนเป็นสีดำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาจะเท่ากับ 0.9 (กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน, 2543)



แผนภูมิที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

ผลจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศในกึ่งเวลากลางกึ่งเวลากลางคืน พบว่าหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว ยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน เนื่องจากอาคารร้านค้า มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางวันยาวนานกว่าในเวลากลางคืน การใช้สีเทอร์โมโครมิกสีดำหลังจากเปลี่ยนสีเป็นสีใสจนเห็นสีขาวรองพื้น (Colorless phase) พบว่ามีค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกับการใช้สีขาวเพียงและทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน โดยสีเทอร์โมโครมิกช่วยลดการใช้พลังงานจากภาระการทำงานเครื่องปรับอากาศในตอนกลางคืน ทำให้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำกว่าการใช้สีขาวเพียง หรือ สีขาว + ฉนวน เล็กน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

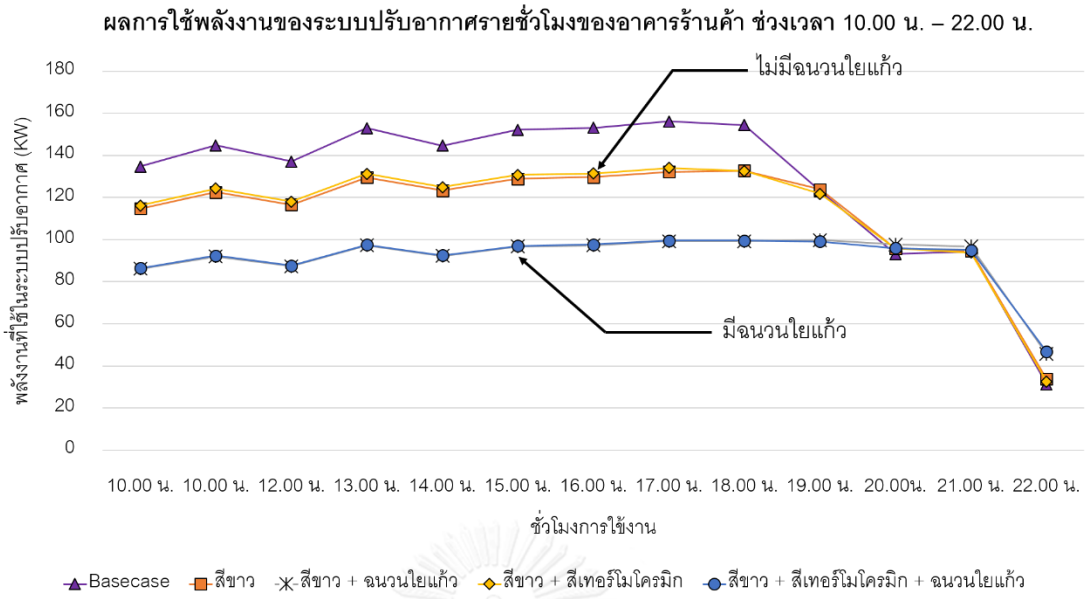
ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า (kWh/sq.m.-year)				
	Basecase	สีขาว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก	สีขาว + ฉนวนใยแก้ว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว
R_t (sq.m. K/W)	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46
kWh/sq.m.-year	192.26	173.44	174.23	143.28	143.03
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		10.26	10.98	34.2	34.42

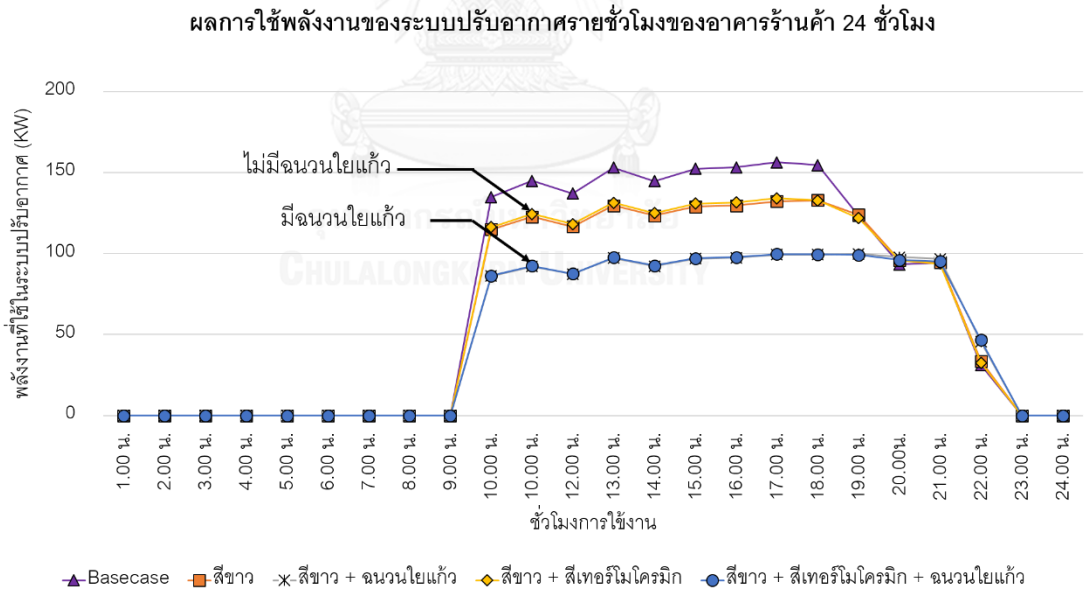
เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานความร้อนส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า แม้ว่าอาคารร้านค้าจะมีการใช้งานทั้งกลางวันและกลางคืน แต่ในช่วงระยะเวลากลางวันนั้นยาวนานกว่ากลางคืน ภาระการทำความเย็นของเครื่องทำความเย็นจึงสูง

จากแผนภูมิที่ 4.19 และ แผนภูมิที่ 4.20 ซึ่งเป็นผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารร้านค้า จะเห็นได้ว่า การใช้พลังงานทำความเย็นจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารจากอุณภูมิที่สูงขึ้นของอากาศ โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนนั้นจะมีการใช้พลังงานการทำความเย็นต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้สีและวัสดุหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง นั้นช่วยลดภาระต่อระบบการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ และจากผลการจำลองการใช้พลังงานของอาคารร้านค้าพบว่า หลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนนั้นใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ซึ่งคือหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วเคลือบสีขาวและสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวนใยแก้ว สามารถช่วยให้ประหยัดการใช้พลังงานได้ถึง 34.42 % และ 34.2 % และในหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน โดยใช้เพียงสีเคลือบ คือหลังคาสีขาว และสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก พบว่าช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 10.26 % 10.98 % ตามลำดับเมื่เปรียบเทียบกับ Basecase

จะเห็นได้ว่า สีเทอร์โมโครมิก มีส่วนช่วยในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในตอนกลางคืนได้ 0.3 – 0.7 % เมื่อเทียบกับการใช้สีขาวเพียงอย่างเดียว แต่กรณีของอาคารร้านค้าที่มีการใช้งานกลางคืนสั้นกว่าในเวลากลางวัน การใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงแสดงประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร



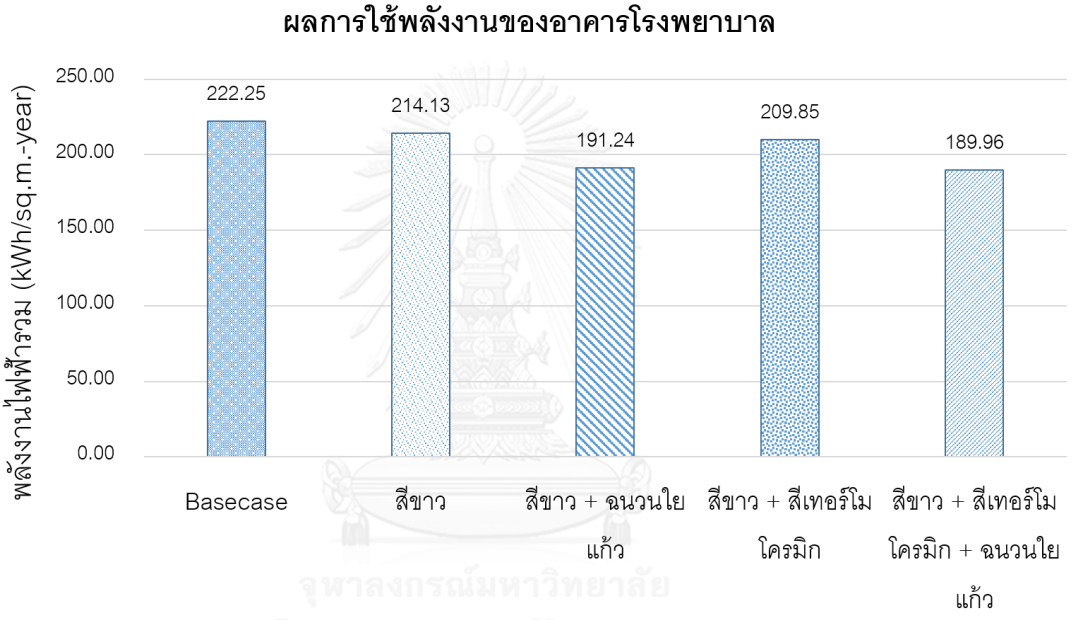
แผนภูมิที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 10.00 น. – 22.00 น. ของอาคารร้านค้า



แผนภูมิที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า

4.2.4 อาคารโรงพยาบาล

อาคารโรงพยาบาลทำการจำลองการใช้พลังงานโดยใช้ค่าคุณสมบัติการกันความร้อนของหลังคาทั้ง 6 แบบ โดยช่วงเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศ 24 ชั่วโมง ในช่วงเวลากลางวัน ตั้งค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาที่สีขาวแทนด้วยค่า 0.3 และหลังคาไม่เคลือบสีเท่ากับ 0.5 และในช่วงเวลากลางคืนเมื่อหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนเป็นสีดำ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของหลังคาจะเท่ากับ 0.9 (กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน , 2543)



แผนภูมิที่ 4.20 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

ผลจากการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาลจากการใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมงและไม่มีวันหยุด พบว่าหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว ยังคงใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว + สีเทอร์โมโครมิกนั้นมีการใช้พลังงานต่ำกว่าสีขาว + ฉนวนใยแก้ว เช่นเดียวกันกับหลังคาที่เคลือบสีขาวเพียงอย่างเดียว โดยหลังคาที่ใช้สีเทอร์โมโครมิก ใช้พลังงานต่ำกว่าหลังคาที่ทาสีขาวเพียงอย่างเดียว โดยสีเทอร์โมโครมิกนั้นช่วยลดการใช้พลังงานจากภาระการทำงานเครื่องปรับอากาศในตอนกลางคืนได้เล็กน้อยจากหลังคาที่มีและไม่มีฉนวนกันความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ

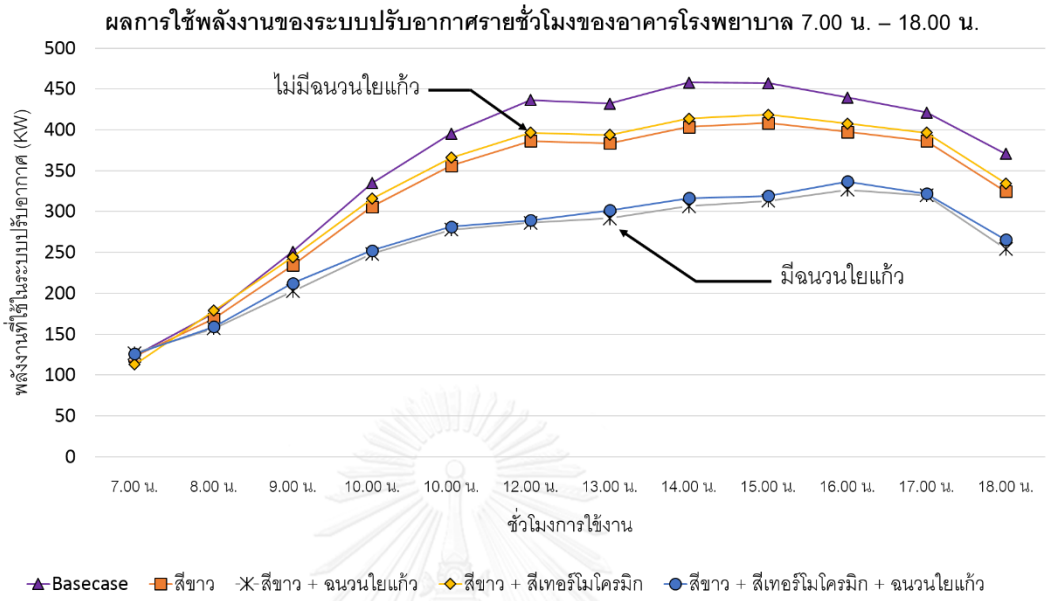
	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล (kWh/sq.m.-year)				
	Basecase	สีขาว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก	สีขาว + ฉนวนใยแก้ว	สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว
R_t (sq.m. K/W)	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46
kWh/sq.m.-year	222.25	214.13	209.85	191.24	189.96
พลังงานที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		3.79	5.9	16.22	17.00

เมื่อพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) และผลการใช้พลังงานรวมของอาคารโรงพยาบาลที่ใช้หลังคาประเภทต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานความร้อนและการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าต่างส่งผลต่อการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากอาคารโรงพยาบาลมีการใช้งาน 24 ชั่วโมง แต่เนื่องด้วยในช่วงเวลากลางวันมีการใช้งานทั้งในส่วนของพลังงานทำความเย็นและการใช้งานภายในโรงพยาบาล เช่นการตรวจรักษาคนไข้ ทำให้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวันมากกว่าในเวลากลางคืน ประสิทธิภาพการใช้หลังคาติดฉนวนใยแก้วจึงทำให้มีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าหลังคาแบบไม่มีฉนวน โดยการใช้สีเทอร์โมโครมิกส่งผลให้อาคารมีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งประสิทธิผลของสีเทอร์โมโครมิกจะชัดเจนในหลังคาที่ใช้เฉพาะการเคลือบสีจากผลของการแผ่รังสีคืนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Night sky radation)

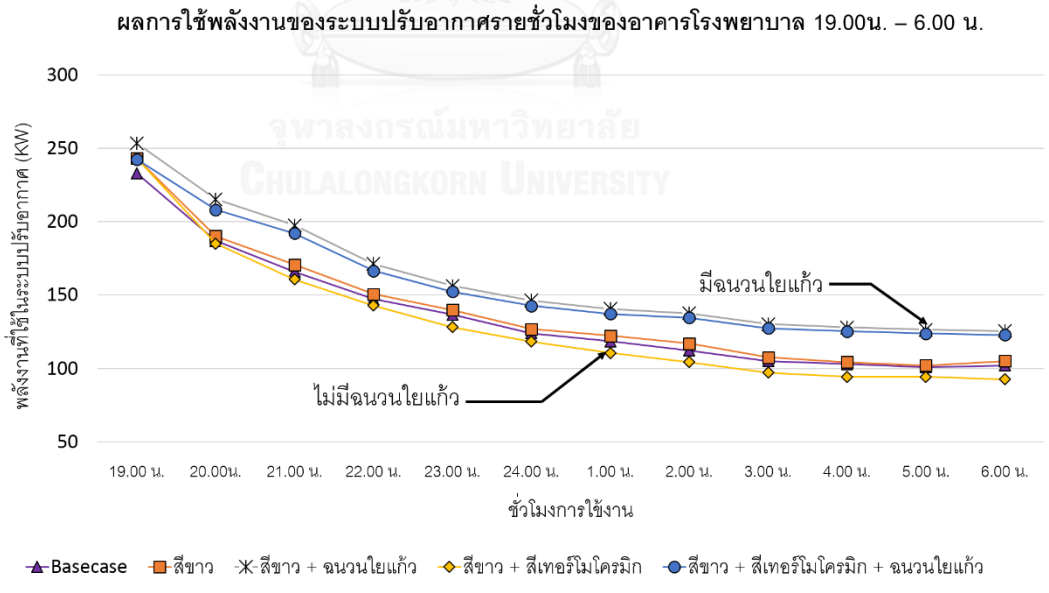
จากแผนภูมิที่ 4.22 - 4.24 ซึ่งเป็นผลการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงของอาคารโรงพยาบาล จะเห็นได้ว่า การใช้พลังงานทำความเย็นจะสูงขึ้นเรื่อยๆตามความร้อนที่เข้ามาภายในอาคารจากอุณภูมิที่สูงขึ้นของอากาศ โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนนั้นจะมีการใช้พลังงานการทำความเย็นต่ำที่สุดในช่วงเวลากลางวัน แต่ในช่วงเวลากลางคืนการใช้พลังงานการทำความเย็นของหลังคาที่ไม่มีฉนวนจะต่ำกว่า

สรุปผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนนั้นใช้พลังงานไฟฟ้ารวมสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ซึ่งหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วเคลือบสีขาวและสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวนใยแก้ว สามารถช่วยให้ประหยัดการใช้พลังงานได้ถึง 16.22 % และ 17 % และในหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน โดยใช้เพียงสีเคลือบ คือหลังคาสีขาว และสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก พบว่าช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 3.79 % และ 5.9 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase โดยสีเทอร์โมโครมิกนั้นมีส่วนช่วยในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า

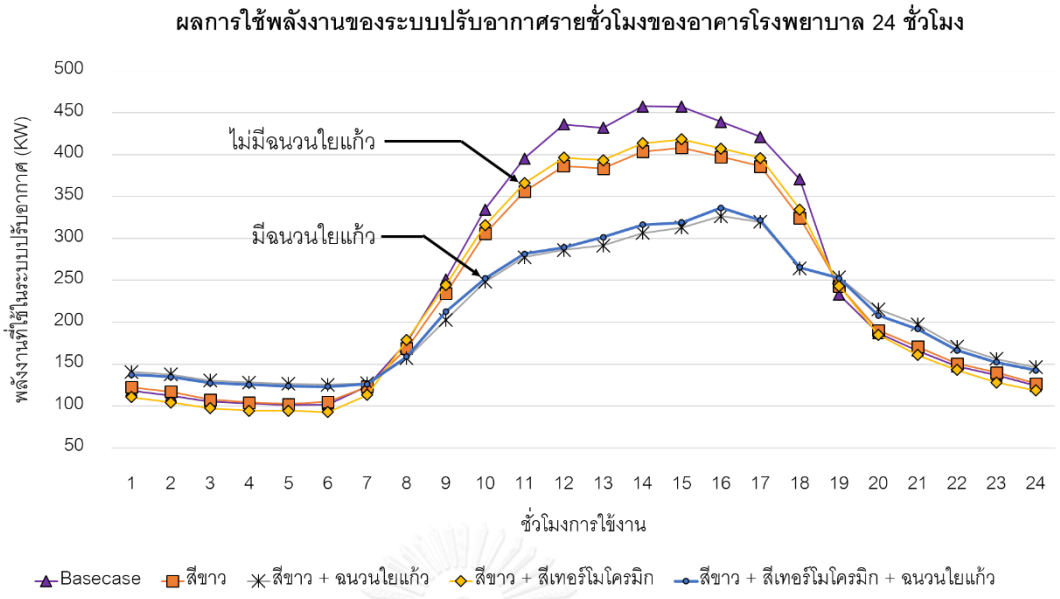
ของอาคารโรงพยาบาลในตอนกลางคืนได้ประมาณ 2 % เมื่อเทียบกับการใช้สีขาวเพียงอย่างเดียว



แผนภูมิที่ 4.21 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 7.00 น. – 18.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล



แผนภูมิที่ 4.22 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วงเวลา 19.00 น. – 6.00 น. ของอาคารโรงพยาบาล



แผนภูมิที่ 4.23 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศในช่วง 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล

4.3 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ จะเน้นพิจารณาจากผลการประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานไฟฟ้าความระยะความคุ้นทุน (Payback Period) เป็นหลัก ซึ่งคิดจากต้นทุนของวัสดุกันความร้อน ต้นทุนในการติดตั้งวัสดุต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งานจริงของหลังคาประเภทต่างๆ

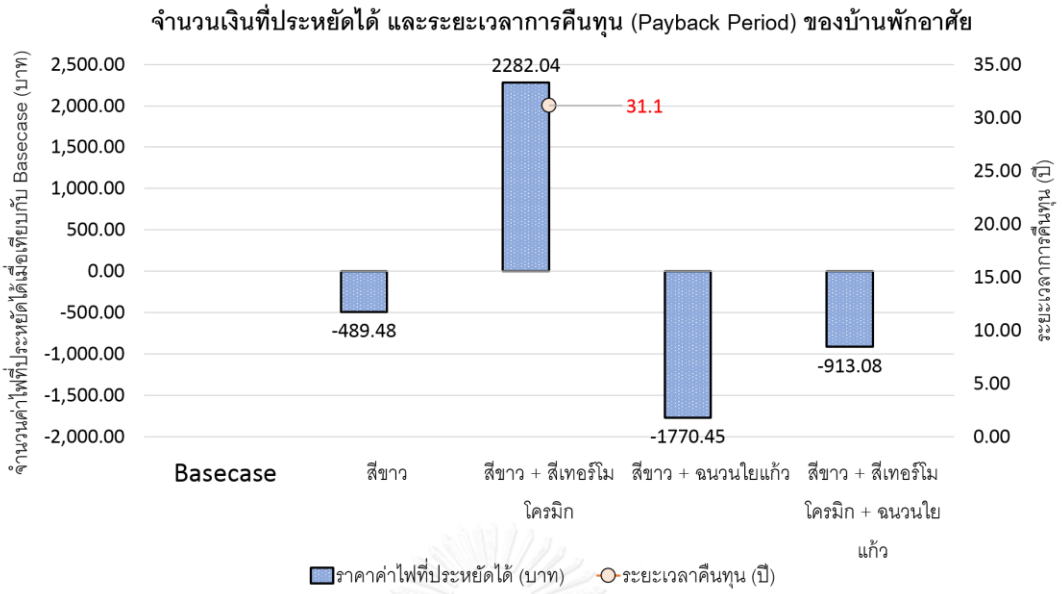
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.1 อาคารพักอาศัย

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของบ้านพักอาศัย (Payback Period)

	การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของบ้านพักอาศัย				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	7705.6	7816.3	7189.5	8106	7912.1
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	34,072	34,561	31,790	35,842	34,985
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน					
1) ราคาเมทัลชีทขนาด 0.47 มม. ต่อตารางเมตร (บาท)	300	300	300	300	300
2) ราคาสีขาว Beger Cool UV Shield ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		226	226	226	226
3) ราคาสีเทอร์โมโครมิกสีดำ ต่อ 1 แกลลอน (บาท)			3238		3238
4) ราคาสีรองพื้นเหล็ก Grey Primer TOA ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		90	90	90	90
5) ราคาฉนวนไยแก้วหนา 3 นิ้ว ต่อตารางเมตร (บาท)				135	135
6) ค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อตารางเมตร	50	80	110	110	140
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตารางเมตร)	130	130	130	130	130
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุรวม	46,630	50,980	71,070	72,430	97,040
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุที่มากกว่า Basecase (บาท)		4,350	24,440	25,800	50,410
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้ (บาท)		**-489**	**2,282**	**-1,770**	**-913**
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)			**19**		
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)			**7.2**		
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)			**31**		

หมายเหตุ : สีแต่ละชนิดสามารถใช้ทาได้ประมาณ 30 ตารางเมตร ต่อ 1 แกลลอน



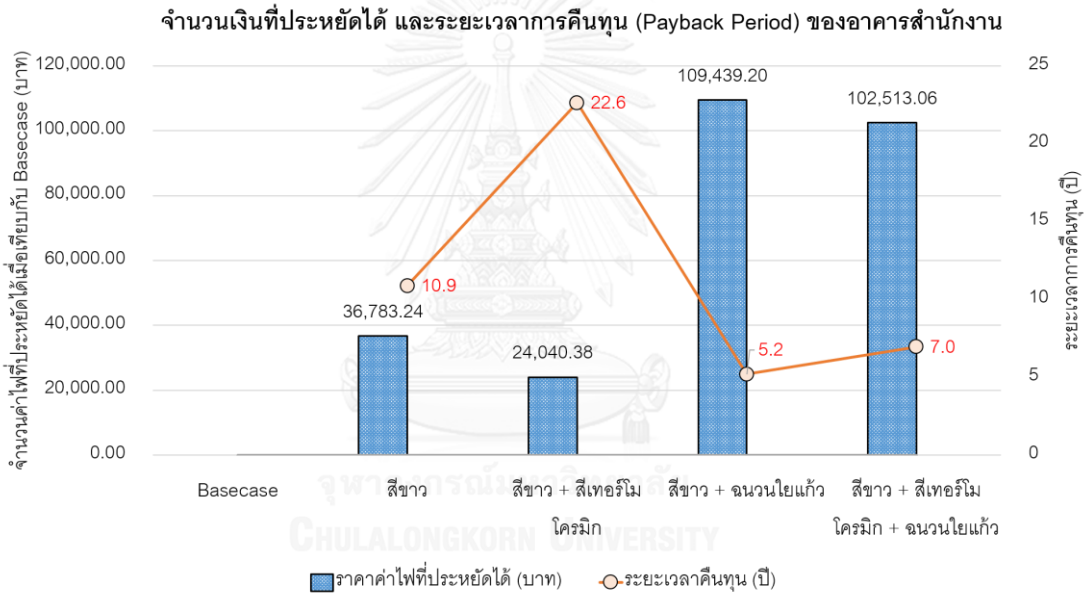
แผนภูมิที่ 4.24 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของบ้านพักอาศัย

จากตารางที่ 4.6 และแผนภูมิที่ 4.25 พบว่าการใช้หลังคาที่สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุดคือ 7,189.5 kWh คิดเป็นค่าไฟ 31,789 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase พบว่าการสีขาว, สีขาว + ฉนวนใยแก้ว, และสีขาว + สีเทอ์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบผิว Basecase เนื่องจากบ้านพักอาศัยเน้นการใช้เครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเน้นประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้า (Night sky radiation) หลังคาที่มีสีเข้มทำให้มีค่าการคายรังสีคืนสู่ท้องฟ้าสูงกว่าหลังคาที่ใช้สีขาว ซึ่งส่งผลต่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของบ้านพักอาศัย

แม้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกจะช่วยลดภาระการทำความเย็นและลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมภายในบ้านพักอาศัยและสามารถประหยัดค่าไฟได้ 2,282 บาท / ปี แต่เมื่อนำมาหาความคุ้มทุนแล้ว การใช้สีเทอร์โมโครมิก มีระยะเวลาการคืนทุนที่นานมาก คือประมาณ 31 ปี เนื่องจากค่าใช้จ่ายและราคาของสีเทอร์โมโครมิก ยังคงมีราคาที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีขาวปกติธรรมดา

4.3.2 อาคารสำนักงาน

จากตารางที่ 4.7 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในอาคารสำนักงาน ซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันเป็นหลัก พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด และเปรียบเทียบกับ Basecase พบว่าหลังคาทุกแบบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า Basecase เนื่องจากการใช้สีขาว,ฉนวนใยแก้ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้วคือ หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และ หลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีประสิทธิภาพการลดค่าไฟสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase คือ 17.4 % และ 16.1 % ตามลำดับ รองลงมาคือ หลังคาที่เคลือบสีเพียงอย่างเดียวคือ หลังคาสีขาว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก ซึ่งประหยัดกว่า Basecase 5.2 % และ 3.4 % ตามลำดับ



แผนภูมิที่ 4.25 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารสำนักงาน

จากแผนภูมิที่ 4.26 ด้านความคุ้มทุนของอาคารสำนักงาน พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 5.2 ปี ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะใกล้เคียงกับการใช้สีขาว + ฉนวน แต่เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า ระยะเวลาการคืนทุนจึงยาวนานกว่าคือประมาณ 7 ปี รองลงมาคือหลังคาแบบไม่มีฉนวนคือหลังคาสีขาว 10.9 ปี และสีขาว + สีเทอร์โมโครมิกซึ่งมีระยะคืนทุนนานถึง 22.6 ปี

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period)

	การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารสำนักงาน				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	167,378	159,056	161,939	142,618	144,185
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	739,811	703,028	715,770	630,372	637,298
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน					
1) ราคาเมทัลชีทขนาด 0.47 มม. ต่อตารางเมตร (บาท)	300	300	300	300	300
2) ราคาสีขาว Beger Cool UV Shield ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		226	226	226	226
3) ราคาสีเทอร์โมโครมิกสีดำ ต่อ 1 แกลลอน (บาท)			3238		3238
4) ราคาสีรองพื้นเหล็ก Grey Primer TOA ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		90	90	90	90
5) ราคาฉนวนไยแก้วหนา 3 นิ้ว ต่อตารางเมตร (บาท)				135	135
6) ค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อตารางเมตร	50	80	110	110	140
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตารางเมตร)	1024	1024	1024	1024	1024
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุรวม	358,400	400,180	544,230	569,140	713,190
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุที่มากกว่า Basecase (บาท)		41,780	185,830	210,740	354,790
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้ (บาท)		**36,783**	**24,040**	**109,439**	**102,513**
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		**47.9**	**31.3**	**142.5**	**133.5**
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		**5.2**	**3.4**	**17.4**	**16.1**
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		**10.9**	**22.6**	**5.2**	**7.0**

หมายเหตุ : สีแต่ละชนิดสามารถใช้ทาได้ประมาณ 30 ตารางเมตร ต่อ 1 แกลลอน

4.3.3 อาคารร้านค้า

จากตารางที่ 4.8 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในอาคารร้านค้า ซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศกึ่งกลางวันกึ่งกลางคืน พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด และเปรียบเทียบกับ Basecase พบว่าหลังคาทุกแบบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า Basecase เนื่องจากการใช้สีขาว,ฉนวนใยแก้ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้วคือ หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และ หลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีประสิทธิภาพการลดค่าไฟสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase คือ 34.2 % และ 34.4 % ตามลำดับ รองลงมาคือ หลังคาที่เคลือบสีเพียงอย่างเดียวคือ หลังคาสีขาว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก ซึ่งประหยัดกว่า Basecase 10.2 % 11 % ตามลำดับ

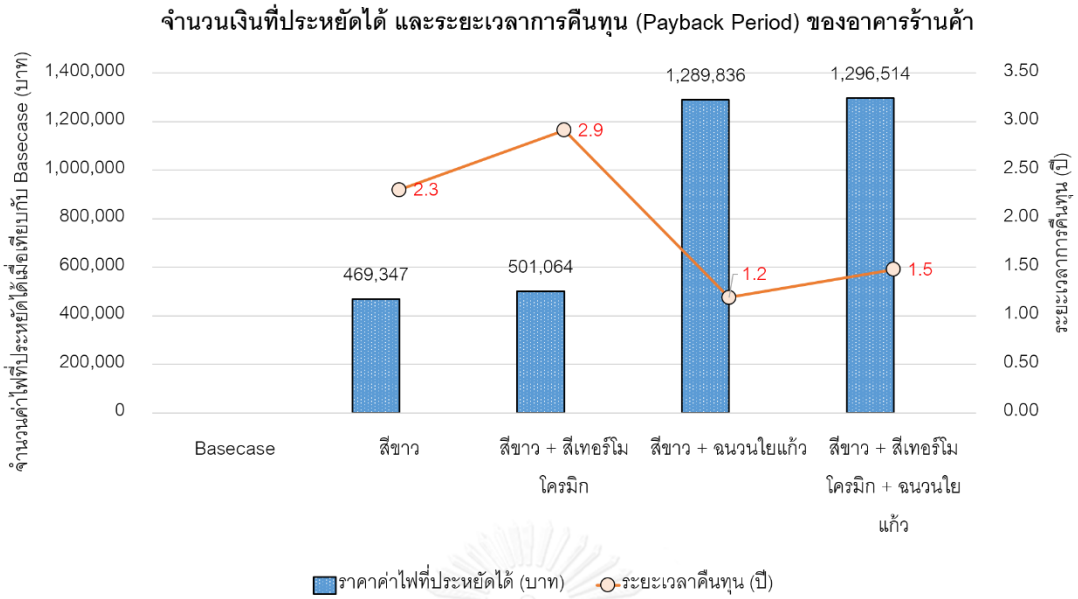
จะสังเกตได้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกสามารถช่วยลดการใช้พลังงานรวมได้เล็กน้อย จากการที่อาคารร้านค้ามีการใช้งานในตอนกลางคืนส่วนหนึ่ง ทำให้ช่วยลดภาระการทำความเย็นในตอนกลางคืนได้เล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วการใช้ฉนวน ยังคงช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่า เนื่องจากอาคารมีช่วงเวลาการใช้งานกลางวันยาวกว่ากลางคืน การใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงจึงมีความจำเป็นมากกว่า

และจากแผนภูมิที่ 4.27 ด้านความคุ้มทุนของอาคารร้านค้า พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 1.2 ปี ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะใกล้เคียงกับการใช้สีขาว + ฉนวนใยแก้ว เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า แต่ด้วยค่าการลงทุนที่สูงอยู่แล้วของหลังคาเมทัลชีทในพื้นที่ขนาดใหญ่ อัตราส่วนการใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงเป็นแค่ 15 % ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด ทำให้โดยรวมแล้วระยะเวลาการคืนทุนยาวนานกว่าเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 1.5 ปี รองลงมาคือหลังคาแบบไม่มีฉนวนคือหลังคาสีขาว 2.3 ปี และสีขาว + สีเทอร์โมโครมิกซึ่งมีระยะคืนทุน 2.9 ปี

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารร้านค้า (Payback Period)

	การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารร้านค้า				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	1,614,992	1,465,280	1,455,163	1,203,561	1,201,431
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	5,063,000	4,593,653	4,561,936	3,773,164	3,766,486
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน					
1) ราคาเมทัลชีทขนาด 0.47 มม. ต่อตารางเมตร (บาท)	300	300	300	300	300
2) ราคาสีขาว Beger Cool UV Shield ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		226	226	226	226
3) ราคาสีเทอร์โมโครมิกสีดำ ต่อ 1 แกลลอน (บาท)			3238		3238
4) ราคาสีรองพื้นเหล็ก Grey Primer TOA ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		90	90	90	90
5) ราคาฉนวนไยแก้วหนา 3 นิ้ว ต่อตารางเมตร (บาท)				135	135
6) ค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อตารางเมตร	50	80	110	110	140
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตารางเมตร)	2760	2760	2760	2760	2760
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุรวม	966,000	1,077,872	1,458,568	1,533,272	1,913,968
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุที่มากกว่า Basecase (บาท)		111,872	492,568	567,272	947,968
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้ (บาท)		**469,347**	**501,064**	**1,289,836**	**1,296,514**
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		**55.9**	**59.7**	**153.6**	**154.3**
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		**10.2**	**11.0**	**34.2**	**34.4**
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		**2.3**	**2.9**	**1.2**	**1.5**

หมายเหตุ : สีแต่ละชนิดสามารถใช้ทาได้ประมาณ 30 ตารางเมตร ต่อ 1 แกลลอน



แผนภูมิที่ 4.26 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารร้านค้า

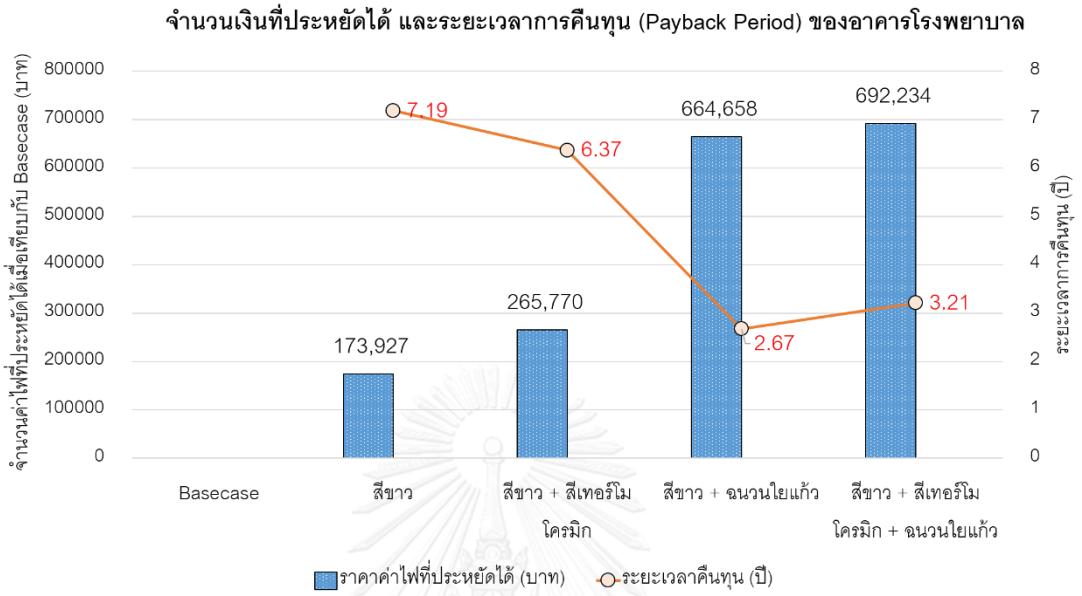
4.3.4 อาคารโรงพยาบาล

ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในอาคารโรงพยาบาล ซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด โดยหลังคาที่ใช้สีขาว + เทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้วจะใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำกว่าการใช้ สีขาว + ฉนวนใยแก้วเพียงเล็กน้อย จากประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคาเทอร์โมโครมิก เนื่องจากอาคารมีการใช้งานในเวลากลางคืน

การใช้สีขาว,ฉนวนใยแก้ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนจากรังสีอาทิตย์และค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้วคือ หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และ หลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีประสิทธิภาพการลดค่าไฟสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase คือ 16.2 % และ 17 % ตามลำดับ รองลงมาคือ หลังคาที่เคลือบสีเพียงอย่างเดียวคือ หลังคาสีขาว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก ซึ่งประหยัดกว่า Basecase 3.9 % 5.8 % ตามลำดับ

จะสังเกตได้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกสามารถช่วยลดการใช้พลังงานรวมได้เล็กน้อย จากการที่อาคารโรงพยาบาล ซึ่งมีการใช้งานในตอนกลางคืนด้วย ทำให้ช่วยลดภาระการทำความเย็นในตอนกลางคืนได้เล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วการใช้ฉนวน ยังคงช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่า

การไม่มีฉนวน เนื่องจากอัตราการป้องกันความร้อนในตอนกลางวันนั้นช่วยลดภาระการทำความเย็นได้สูงกว่าประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าในตอนกลางคืน



แผนภูมิที่ 4.27 แสดงจำนวนเงินที่ประหยัดได้จาก Basecase และระยะเวลาการคืนทุน (Payback Period) ของอาคารโรงพยาบาล

ด้านความคุ้มทุนของอาคารโรงพยาบาล พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 2.67 ปี และ 3.21 ปีตามลำดับ ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะสูงกว่าการใช้สีขาว + ฉนวนใยแก้ว ประมาณ 4% เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า แต่ด้วยค่าการลงทุนที่สูงอยู่แล้วของหลังคาเมทัลชีทในพื้นที่ขนาดใหญ่ อัตราส่วนการใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงเป็นแค่ 15 % ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด ทำให้โดยรวมแล้วระยะเวลาการคืนทุนยาวนานกว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 0.5 ปี

ด้านการใช้หลังคาแบบไม่มีฉนวน คือหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก นั้นมีจำนวนเงินที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase สูงกว่าหลังคาสีขาวธรรมดาถึง 35% เนื่องจากอาคารโรงพยาบาลมีการใช้งานในเวลากลางคืน ทำให้สามารถใช้ประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคาเทอร์โมโครมิกสีดำได้อย่างเต็มที่ โดยพบว่าระยะเวลาการคืนทุนของสีขาว+สี

เทอร์โมโครมิกนั้นสั้นกว่าการใช้สีขาวธรรมดาคือ 6.4 ปี โดยหลังคาสีขาวนั้นมีระยะการคืนทุน 7.2 ปี ตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารโรงพยาบาล(Payback Period)

	การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารโรงพยาบาล				
	Basecase	White	White+TM	White + Ins.	White+TM Ins.
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	1,077,897	1,038,547	1,017,768	927,522	921,283
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	4,764,305	4,590,378	4,498,535	4,099,647	4,072,071
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน					
1) ราคาเมทัลชีทขนาด 0.47 มม. ต่อตารางเมตร (บาท)	300	300	300	300	300
2) ราคาสีขาว Beger Cool UV Shield ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		226	226	226	226
3) ราคาสีเทอร์โมโครมิกสีดำ ต่อ 1 แกลลอน (บาท)			3238		3238
4) ราคาสีรองพื้นเหล็ก Grey Primer TOA ต่อ 1 แกลลอน (บาท)		90	90	90	90
5) ราคาฉนวนไยแก้วหนา 3 นิ้ว ต่อตารางเมตร (บาท)				135	135
6) ค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อตารางเมตร	50	80	110	110	140
พื้นที่ในการติดตั้งวัสดุ (ตารางเมตร)	3200	3200	3200	3200	3200
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุรวม	1,120,000	1,249,812	1,692,278	1,777,812	2,220,278
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้ (บาท)		**173,927**	**265,770**	**664,658**	**692,234**
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		**35.9**	**54.8**	**137.0**	**142.7**
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		**3.8**	**5.9**	**16.2**	**17.0**
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		**7.2**	**6.4**	**2.7**	**3.2**

หมายเหตุ : สีแต่ละชนิดสามารถใช้ทาได้ประมาณ 30 ตารางเมตร ต่อ 1 แกลลอน

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองเพื่อหาค่าความต้านทานความร้อน ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน และ ผลการคำนวณความคุ้มทุน ของอาคารที่ใช้วัสดุหลังคาที่กำหนดไว้ในการทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อน

วัสดุหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นมวลสารกันความร้อน ทำให้หลังคามีค่าความต้านทานความร้อนสูงที่สุด โดยหลังคาที่ใช้สีขาว+ฉนวนใยแก้ว และ สีขาวเคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิก+ฉนวนใยแก้ว นั้นมีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกัน รองลงมาคือหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวน คือใช้สีเคลือบเพียงอย่างเดียว พบว่าทั้งหลังคาที่เคลือบสีขาว และ สีขาวเคลือบด้วยสีเทอร์โมโครมิก มีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนและค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกัน เนื่องจากสีเทอร์โมโครมิกเปลี่ยนเป็นสีใส ในช่วงเวลากลางวัน โดยหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุดคือหลังคาเมทัลชีทไม่เคลือบสี (Basecase)

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ที่หาได้จากกล่องทดลอง

	เมทัลชีทไม่เคลือบสี (Basecase)	เมทัลชีททาสีขาว (White)	เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก (White+TC)	เมทัลชีททาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว (White + Ins.)	เมทัลชีททาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว (White+TC Ins.)
อุณหภูมิพื้นผิวบน (To – °C)	53.97	49.62	49.55	49.92	49.82
อุณหภูมิพื้นผิวล่าง (Ti – °C)	52.60	45.94	46.23	37.35	37.40
อุณหภูมิอากาศเข้า (T_{inlet} – °C)	36.47	36.46	36.48	36.5	36.45
อุณหภูมิอากาศออก (T_{outlet} – °C)	40.53	39.54	39.95	37.92	37.99
To - Ti	2.4	8.7	9.2	20.6	21.3
Toutlet - Tinlet	5.4	3.4	3.5	2.2	2.2
U (m^2.°C/W)	45.2	7.87	7.66	2.15	2.07
Rt (W/m^2.°C)	0.02	0.13	0.13	0.46	0.46

5.2 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานในอาคารประเภทต่าง ๆ

บ้านพักอาศัย

เมื่อนำค่าความต้านทานความร้อนรวมมาเป็นข้อมูลคุณสมบัติหลังคาในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ในอาคารพักอาศัยซึ่งเป็นอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางคืนเท่านั้น พบว่าวิธีการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนสะสมในช่วงเวลากลางวัน ทำให้หลังคาที่มีการใช้ฉนวนมีการระบายออกจากอาคารได้ช้าลง ซึ่งเป็นการเพิ่มภาระการทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ โดยหลังคาที่มีการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว นั้นมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปีสูงสุด รองลงมาคือหลังคาสีขาว + สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว เนื่องจากการใช้สีเทอร์โมโครมิกนั้นช่วยในการคายรังสีความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าในตอนกลางคืนจากการเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท แต่เนื่องด้วยมีฉนวนมากั้น ทำให้สีเทอร์โมโครมิกแสดงประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่ เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่มีการใช้ฉนวนใยแก้ว ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำกว่า โดยการใช้หลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก มีการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืน หลังคาเมทัลชีท และ สีเทอร์โมโครมิกสีดำ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าได้ดี ทำให้อุณหภูมิห้องในตอนกลางคืนลดลง ซึ่งส่งผลให้การใช้เครื่องปรับอากาศทำงานไม่หนักจนเกินไป

มีข้อสังเกตเพิ่มเติมในกรณีของบ้านพักอาศัย ซึ่งส่วนใหญ่ใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลากลางคืนมีแค่ด้านบนบริเวณห้องนอนที่ติดหลังคาเท่านั้น การใช้วัสดุกันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำ หรือ เป็นมวลสารน้อย จึงทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดี แต่ถ้าพื้นที่ส่วนที่ติดกับหลังคา มีการใช้งานในช่วงเวลากลางวันด้วย การใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงและวัสดุที่มีมวลสารมาก อาจช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากกว่า

ตารางที่ 5.2 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารบ้านพักอาศัย

	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของบ้านพักอาศัย				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		-4	19.0	-14	-7
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		-1.4	7.2	-4.9	-2.6
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		-	31.1	-	-

จากตารางที่ 5.2 แม้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกจะช่วยลดภาระการทำความเย็นและลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมภายในบ้านพักอาศัยและสามารถประหยัดค่าไฟได้ 19 บาท/ตรม./ ปี แต่เมื่อนำมาหาความคุ้มทุนแล้ว การใช้สีเทอร์โมโครมิก มีระยะเวลาการคืนทุนที่นานมาก คือประมาณ 31 ปี เนื่องจากค่าใช้จ่ายและราคาของสีเทอร์โมโครมิก ยังคงมีราคาที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สีขาวปกติธรรมดา

อาคารสำนักงาน

เมื่อนำค่าความต้านทานความร้อนรวมมาเป็นข้อมูลคุณสมบัติหลังคาในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ในอาคารสำนักงานซึ่งเป็นอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน พบว่าวิธีการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการใช้ฉนวนใยแก้ว ช่วยหน่วงและป้องกันความร้อนจากภายนอกอาคาร ทำให้ลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ รองลงมาคือการใช้สีป้องกันความร้อน คือสีขาว และสีเทอร์โมโครมิก ที่มีประสิทธิภาพและค่าความต้านทานความร้อนใกล้เคียงกัน และทั้งสองมีประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำกว่าเมทัลชีทไม่เคลือบสี

ตารางที่ 5.3 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารสำนักงาน

	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารสำนักงาน				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		47	31	142	133
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		5.23	3.36	17.36	16.09
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		10.8	22.6	5.2	6.9

จากตารางที่ 5.3 การใช้ฉนวนสามารถประหยัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าได้สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับหลังคาที่ไม่มีฉนวน พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 5.2 ปี ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะใกล้เคียงกับการใช้สีขาว + ฉนวน แต่เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า ระยะเวลาการคืนทุนจึงยาวนานกว่าคือประมาณ 7 ปี รองลงมาคือหลังคาแบบไม่มีฉนวนคือหลังคาสีขาว 10.9 ปี และ สีขาว + สีเทอร์โมโครมิกซึ่งมีระยะคืนทุนนานถึง 22.6 ปี

อาคารร้านค้า

อาคารร้านค้า ซึ่งใช้เครื่องปรับอากาศกึ่งกลางวันกึ่งกลางคืน พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด และเปรียบเทียบกับ Basecase พบว่าหลังคาทุกแบบใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า Basecase เนื่องจากการใช้สีขาว,ฉนวนใยแก้ว ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น โดยหลังคาที่มีการใช้ฉนวนใยแก้วคือ หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และ หลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีประสิทธิภาพการลดค่าไฟสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase รองลงมาคือหลังคาที่เคลือบสีเพียงอย่างเดียว คือ หลังคาสีขาว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก

จะสังเกตได้ว่าการใช้สีเทอร์โมโครมิกสามารถช่วยลดการใช้พลังงานรวมได้เล็กน้อย จากการที่อาคารร้านค้ามีการใช้งานในตอนกลางคืนส่วนหนึ่ง ทำให้ช่วยลดภาระการทำความเย็นในตอนกลางคืนได้เล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วการใช้ฉนวน ยังคงช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่า เนื่องจากอาคารมีช่วงเวลาการใช้งานกลางวันยาวกว่ากลางคืน การใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงจึงมีความจำเป็นมากกว่า

ตารางที่ 5.4 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารร้านค้า

	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารร้านค้า				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		56	60	154	154
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		10	11	34	34
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		2.3	2.9	1.2	1.5

ด้านความคุ้มทุนของอาคารร้านค้า พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 1.2 ปี ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะใกล้เคียงกับการใช้สีขาว + ฉนวนใยแก้ว เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า แต่ด้วยค่าการลงทุนที่สูงอยู่แล้วของหลังคาเมทัลชีทในพื้นที่ขนาดใหญ่ อัตราส่วนการใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงเป็นแค่ 15 % ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด ทำให้โดยรวมแล้วระยะเวลาการคืนทุนยาวนานกว่าเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 1.5 ปี รองลงมาคือหลังคาแบบไม่มีฉนวนคือหลังคาสีขาว 2.3 ปี และ สีขาว + สีเทอร์โมโครมิก ซึ่งมีระยะคืนทุน 2.9 ปี

อาคารโรงพยาบาล

ความคุ้มทุนของอาคารโรงพยาบาล พบว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนใยแก้ว และหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก + ฉนวนใยแก้ว มีช่วงเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือ 2.67 ปี และ 3.21 ปี ตามลำดับ ในส่วนของหลังคาสีขาว+สีเทอร์โมโครมิก+ฉนวน แม้ว่าราคาค่าไฟที่ประหยัดได้จะสูงกว่าการใช้สีขาว + ฉนวนใยแก้ว ประมาณ 4% เนื่องจากราคาของสีเทอร์โมโครมิกมีราคาแพงกว่ามาก ทำให้ค่าใช้จ่ายรวมในการลงทุนสูงกว่า แต่ด้วยค่าการลงทุนที่สูงอยู่แล้วของหลังคาเมทัลชีทในพื้นที่ขนาดใหญ่ อัตราส่วนการใช้สีเทอร์โมโครมิกจึงเป็นแค่ 15 % ของค่าใช้จ่ายในการลงทุนทั้งหมด ทำให้โดยรวมแล้วระยะเวลาการคืนทุนยาวนานกว่าการใช้หลังคาสีขาว + ฉนวนเพียงเล็กน้อยคือประมาณ 0.5 ปี

ด้านการใช้หลังคาแบบไม่มีฉนวน คือหลังคาสีขาว + เทอร์โมโครมิก นั้นมีจำนวนเงินที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase สูงกว่าหลังคาสีขาวธรรมดาถึง 35% เนื่องจากอาคารโรงพยาบาลมีการใช้งานในเวลากลางคืน ทำให้สามารถใช้ประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคาเทอร์โมโครมิกสีดำได้อย่างเต็มที่ โดยพบว่าระยะเวลาการคืนทุนของสีขาว+สีเทอร์โมโครมิกนั้นสั้นกว่าการใช้สีขาวธรรมดาคือ 6.4 ปี โดยหลังคาสีขาวนั้นมีระยะการคืนทุน 7.2 ปี ตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ระยะเวลาคืนทุนและค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Basecase ของอาคารโรงพยาบาล

	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ของอาคารโรงพยาบาล				
	Basecase	White	White+TC	White + Ins.	White+TC Ins.
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้/ตารางเมตร (บาท)		36	32	79	82
ค่าไฟที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Basecase (%)		4	6	16	17
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		7.2	6.4	2.7	3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการผลการวิจัยพบว่าสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาเรื่องมวลสารของวัสดุของ จญาดา บุณยเกียรติ (2537) คือการใช้หลังคาเมทัลชีทที่เป็นวัสดุที่มีมวลสารต่ำในช่วงเวลากลางวันจึงจำเป็นต้องมีการติดฉนวนใยแก้วเพิ่มมวลสารของวัสดุ เพื่อช่วยหน่วงความร้อนที่เข้ามา แต่ในเวลากลางคืนช่องหลังคาของหลังคาเมทัลชีทที่มีมวลสารต่ำ กลับวัดค่าอุณหภูมิได้ต่ำกว่าช่องหลังคาที่มีการติดฉนวนใยแก้ว และยังต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอกอีกด้วย ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ อภิทัช พรหมสิริแสง (2544)

การป้องกันความร้อนโดยการใช้สีเทอร์โมโครมิกเคลือบบนสีขาว ช่วยให้หลังคามีประสิทธิภาพการสะท้อนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับสีขาวปกติ และผลจากการเปลี่ยนสีของสีเทอร์โมโครมิกจากสีใสเป็นสีดำในช่วงเวลากลางคืน นั้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคา ทำให้ช่วยลดอุณหภูมิใต้หลังคาได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ Azari and Bierman (2008); Watts et al. (2007) และ Ma et al. (2000)

เช่นเดียวกันกับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน การใช้ฉนวนป้องกันความร้อนที่หลังคา และการเคลือบหลังคาสีขาว นั้นเหมาะสมกับอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน เนื่องจากฉนวนช่วยหน่วงความร้อน และการใช้สีขาวนั้นช่วยสะท้อนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดี จึงช่วยลดภาระการทำความเย็นในอาคาร โดยผลจากการเปลี่ยนสีของเทอร์โมโครมิกจากสีดำเปลี่ยนเป็นสีใสในช่วงเวลากลางวัน มีประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอาคารใกล้เคียงกับการใช้สีขาวเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้การใช้สีเทอร์โมโครมิกยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการคายความร้อนคืนสู่ท้องฟ้าของหลังคาได้ดี จากผลการเปลี่ยนสีเป็นสีดำสนิท ซึ่งช่วยลดภาระการทำความเย็นของอาคารได้ในเวลากลางคืน ตรงกับงานวิจัยของ Zheng et al. (2015)

5.3 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

5.3.1 ควรทำการเปรียบเทียบการใช้สีเทอร์โมโครมิกกับการใช้วัสดุกันความร้อนประเภทอื่นๆที่หลากหลายกว่านี้ เช่น สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา การใช้วัสดุหลังคาประเภทอื่นๆที่ไม่ใช่เมทัลชีทรวมถึงประเภทและความหนาของฉนวนกันความร้อน

5.3.2 อาคารต้นแบบที่นำมาจำลองผลการใช้พลังงานประเภทต่างๆ มีระยะเวลาการใช้งานที่หลากหลายกว่าอาคารต้นแบบ ซึ่งอาจยาวนานหรือสั้นกว่าจากรูปแบบที่ตั้งค่า โดยอาจจัดให้มีเวลาการใช้งานที่หลากหลายกว่าเดิม

5.3.3 ในการทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการวัดเรื่องของความเข้มอ่อนของสีที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอย่างละเอียด โดยการศึกษาถัดไปควรมีการวัด ในเรื่องของ Solar radiation spectrum ของสีเทอร์โมโครมิกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

5.3.4 ในปัจจุบันสีเทอร์โมโครมิกมีการใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย ขึ้นอยู่กับผู้ประดิษฐ์ว่าต้องการให้สีออกมาในลักษณะแบบใด เปลี่ยนเป็นสีอะไรบ้าง ควรมีการเลือกใช้สีเทอร์โมโครมิกที่มีการแสดงสี (Color/Colorless phase) และเปลี่ยนสีที่แตกต่างกัน เพื่อนำมาเทียบความแตกต่างของประสิทธิภาพในการใช้งาน

5.3.5 การศึกษาครั้งนี้ ศึกษาเฉพาะหลังคาเมทัลชีทชนิดแผ่นเรียบเท่านั้น ซึ่งเป็นการจำลองวัสดุหลังคา แต่ในการใช้งานจริง หลังคานั้นมีรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่นหลังคาลอนคู่ ดังนั้นประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และจำนวนสีที่ใช้ทาหลังคาอาจมีจำนวนแตกต่างกันออกไปตามลักษณะรูปแบบหลังคา

5.3.6 ควรทำการศึกษาเรื่องอายุการใช้งานของสีเทอร์โมโครมิกที่ส่งผลต่อความคุ้มทุนระยะยาวด้วย

5.3.7 การทดลองโดยการใช้กล่องทดลองและจำลองการใช้หลังคาแบบแบน (Slab) เท่านั้น ซึ่งในการทดลองต่อไปอาจมีการจำลองและทำการทดลองในรูปแบบหลังคาที่มีองศาต่างๆ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน

5.6.8 การศึกษาและทดลองครั้งนี้ทำการทดลอง เฉพาะวันที่มีแดดจัดและท้องฟ้าปลอดโปร่งเพียงแค่วันเดียว ในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการทดลองในวันที่มีท้องฟ้าที่หลากหลายรูปแบบและในเดือนหรือฤดูที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมพัฒนาและการส่งเสริมพลังงาน. (2543). การใช้วัสดุและอุปกรณ์เพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คอมฟอร์ม.

จญาดา บุณยเกียรติ. (2537). การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. (2553). หมึกเปลี่ยนสีตามอุณหภูมิ. เทคโนโลยีวัสดุ, *59*, 22-25.

ยิ่งสวัสดิ์ ไชยกุล. (2556). สีและการลดความร้อนภายในอาคาร. วารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, *12*, 112-118.

วิกรม จำนงค์จิตต์. (2545). ประสิทธิผลของการออกแบบการระบายอากาศช่องใต้หลังคาเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา. . วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิชญา อธิคมบัณฑิตกุล. (2556). การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและฉนวนกันความร้อนหลังคาทั่วไป. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิทัช พรหมสิริแสง. (2544). การพัฒนารูปแบบและระบบไหลเวียนอากาศของหลังคาเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรรจน์ เศรษฐบุตร. (2549). การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารทาวน์เฮ้าส์. *Journal of Architectural/Planing Research and Studies, 5*, 30-52.

อรรจน์ เศรษฐบุตร. (2552). การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี *Life Cycle Assessment (LCA)* โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษก.

ภาษาอังกฤษ

A., S., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Enegy and Buildings, 39*(11), 1167-1174.

Akbari, H., Konopacki, S., & Pomerantz, M. (1999). Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in United States. *Enegy, 24*(5), 391-407.

ASHRAE. (1997). *America Society of Heating Refrigirating and Air-conditioning Engineering, Inc.* Atlanta, Geogia.

Azari, S., & Bierman, J. (2008). 0064175. U. S. Patent.

Chirattanon, S., & Taweekun, J. (2003). A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. *Enegy Conversion & Management, 44*, 743-762.

Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., & Livada, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Solar Energy, 83*(4), 538-551.

Ma, Y., Zhang, X., & Wu, K. (2000). Preparation of reversible thermochromic building coatings and their properties. *Journal of Coatings Technology, 72*(911), 67-71.

Ma, Y., Zhang, X., Zhu, B., & Wu, K. (2002). Research on reversible effects and mechanism between the energy-absorbing and energy-reflecting states of chameleon-type building coatings. *Solar Energy, 72*(6), 511-520.

Meyer W. T. (1979). *Energy Economics and Building Design*. Newyork: Mcggraw-Hill Book Company.

Neves, R. (2001). 92633. W. I. P. Organization.

Watts, D., Battista, L., Zunino, J., Colon, N., Federici, J., Thomas, G., . . . Zhang, Y. (2007). 0182160. U. S. Patent.

Zheng, S., Xu, Y., Shen, Q., & Yang, H. (2015). Preparation of thermochromic coatings and their energy saving analysis. *Solar Energy, 112*(February), 263-271.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณรัฐ ข้องม่วง เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต(สถาปัตยกรรม) คระครุศาสตร์อุตสหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา พ.ศ. 2550 หลังจากจบการศึกษา ได้ประกอบวิชาชีพสถาปัตยกรรม ตำแหน่ง สถาปนิก บริษัท คาซ่า จำกัด จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม หลักสูตรนิเวศสถาปัตย์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2558

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University