

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุหลังคาที่มีสัมประสิทธิ์
การแผ่รังสีต่ำและฉนวนกันความร้อนทั่วไป

นางสาวอภิชนา อธิคมบัณฑิตกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

COMPARATIVE STUDY OF ENERGY PERFORMANCE OF RADIANT BARRIERS
AND TYPICAL ROOF INSULATION

Miss Aphichaya Athicombandhitkul

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

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

อภิธาน อธิคมบัณฑิตกุล : การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพวัสดุหลังคาที่มี
สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำและฉนวนกันความร้อนทั่วไป. (COMPARATIVE STUDY OF
ENERGY PERFORMANCE OF RADIANT BARRIERS AND TYPICAL ROOF
INSULATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. อรรถนธ์ เศรษฐบุตตร, 173 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าของวัสดุกันความร้อน อลูมิเนียมพอยล์ที่มีสัมประสิทธิ์แผ่
รังสีความร้อนต่ำ และ ฉนวนใยแก้วกันความร้อน ในหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน และ หลังคาที่มีฝ้าเพดาน เมื่อใช้งานใน
อาคาร 4 ประเภท ที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลาที่แตกต่างกัน ได้แก่ อาคารพักอาศัย อาคารสำนักงาน อาคาร
โรงพยาบาลและอาคารร้านค้า โดยหาค่าคุณสมบัติด้วยการวัดอุณหภูมิจากกล่องทดลองร่วมกับการใช้สมการทาง
คณิตศาสตร์ และ นำค่าคุณสมบัติที่ได้ไปอนุพัทธ์ข้อมูลของหลังคาเพื่อจำลองผลการใช้พลังงานของอาคารด้วยโปรแกรม
VisualDOE4.1 และคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษาดังกล่าวทดลองพบว่า ในหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดาน หลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.
และหลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้วมีค่าความต้านทานความร้อน
รวมมากที่สุด รองลงมาได้แก่ หลังคาที่มีการใช้อลูมิเนียมพอยล์ หลังคาที่ไม่มีการใช้วัสดุกันความร้อน และ หลังคาที่
ทาสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาต้านได้พบว่าให้ค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด

การจำลองการใช้พลังงาน พบว่าในอาคารพักอาศัยซึ่งมีการใช้เครื่องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวัน วัสดุ
กันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำหรือมีมวลสารน้อย เช่น สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา และ อลูมิเนียม
พอยล์ ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมและลดพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศรายชั่วโมงได้มากกว่าการใช้ฉนวน
ใยแก้ว 2 นิ้ว ในอาคารสำนักงาน ซึ่งมีการใช้เครื่องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวัน อาคารโรงพยาบาล ซึ่งมีการใช้
เครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง และ อาคารร้านค้าซึ่งมีการใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันมากกว่ากลางวัน
การใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงหรือเป็นมวลสารมากกว่า เช่น ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว จะช่วยป้องกันความ
ร้อนที่จะเข้าสู่อาคาร ลดภาระของระบบปรับอากาศ และได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำสุด หลังคาที่ใช้อลูมิเนียม
พอยล์ซึ่งมีคุณสมบัติป้องกันการแผ่รังสีความร้อนสูงพื้นที่ใช้งานเบื้องล่างในตอนกลางวัน และ ช่วยให้อาคาร
ระบายความร้อนได้เร็วในเวลากลางวัน ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้รองลงมาและมีประสิทธิภาพเทียบเท่า
ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ซึ่งเป็นข้อสังเกตสำหรับการวิจัยครั้งต่อไปว่าควรจำลองการใช้พลังงานในอาคารที่มีช่วงใช้งาน
เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันในปริมาณชั่วโมงที่มากกว่าเวลากลางวัน อลูมิเนียมพอยล์จะสามารถแสดง
ประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานได้เต็มที่ยิ่งขึ้น

ในบ้านพักอาศัย แม้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาและอลูมิเนียมพอยล์จะช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้
ดี แต่เนื่องจากมีต้นทุนวัสดุและค่าบำรุงรักษาสูง ทำให้มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงมาก ซึ่งหากต้องการ
ประหยัดรายจ่าย อาจต้องเลือกหลังคาแบบอื่นแทน ในอาคารสำนักงาน อาคารโรงพยาบาล และ อาคารร้านค้า
พบว่าการใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ในหลังคา นอกจากช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมมากที่สุดแล้ว ยังมีประสิทธิภาพ
ในทางเศรษฐศาสตร์อีกด้วย เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำกว่าวัสดุกรณีอื่น

ภาควิชา.....สถาปัตยกรรมศาสตร์..... ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา.....สถาปัตยกรรม..... ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2555.....

5573367225 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS : RADIANT BARRIER / ROOF INSULATION // ENERGY SIMULATION

APHICHAYA ATHICOMBANDHITKUL : COMPARATIVE STUDY OF ENERGY
PERFORMANCE OF RADIANT BARRIERS AND TYPICAL ROOF INSULATION.

ADVISOR : ASST.PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 173 pp.

This research compared the energy consumption of aluminum foil (radiant barrier) which has low coefficient of heat radiation and fibreglass insulation in the roofs with ceiling and roofs with no ceiling on four building types that are active at different times, including residential buildings, offices, hospitals and stores. All roofs were analyzed by measuring the temperature of the test boxes with the use of mathematical equations then input the properties of the roofs into VisualDOE4.1 to simulate the use of energy and then determined the cost effectiveness in each case.

In the experimental part , the test boxes with the roofs with no ceiling , roofs with ceilings height of 10 cm air gap and roofs with ceilings height of 20 cm air gap show that roofs with 2-inch fibreglass have the highest thermal resistance, followed by roofs with aluminum foils, roofs with no thermal insulation and roofs which are painted with silica coating beneath have the most thermal resistance, respectively.

In the simulation part , it was found that residential buildings where air conditioning is used only at night, roofs with low heat resistance or less thermal mass such as silica coating and aluminum foil reduce energy consumption and hourly energy used in cooling systems, at a higher rate than those with 2-inch fibreglass. In offices where operate cooling systems only in the daytime, hospitals where run cooling systems for 24 hours and stores where have more time range of cooling systems in the day rather than at the night, using materials with high thermal resistance such as 2-inch fibreglass helps prevent heat from entering the building, which reduce the burden on cooling systems, and allows the lowest total energy consumption. Roofs with aluminum foil, which possess anti-heat radiation into space beneath during the day and provide faster nocturnal radiation at night, have comparable performance of reducing energy consumption with those with 2-inch fibreglass. This is noted for the next research that should simulate energy use in buildings that have more time range of cooling systems at night rather than in the day. Aluminium foil can display the performance more fully.

In residential buildings, although silica coating and aluminum foil help reduce the use of electricity, the materials and maintainance costs are very high throughout the lifespan. To save expense , the owners may select other types of insulation instead. In office buildings ,hospitals and stores , 2-inch fibreglass insulation in the roof reduces the use of electricity the most, the expense over the life of the material is also lower than other cases.

Department :.....Architecture..... Student's Signature.....

Field of Study :.....Architecture..... Advisor's Signature.....

Academic Year :...2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือที่ดียิ่งของผู้มีอุปการะคุณ ดังต่อไปนี้

ผู้วิจัยขอพระขอบคุณ ผศ. ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตฺร ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ถ่ายทอดความรู้และให้คำแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่เข้ามาศึกษาในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ปิ่นขวัญ กาญจนรัชชิตี ในฐานะประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.วราภรณ์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ รศ. พรรณชลัท สุริโยธิน ในฐานะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ถ่ายทอดความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งอาจารย์ ดร. ณรงค์วิทย์ อารีมิตร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาร่วมสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำตลอดจนมุมมองที่เป็นประโยชน์แก่วิทยานิพนธ์ในหลายๆด้าน

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความร่วมมือในการวิจัย รวมทั้งเพื่อน ๆ 5+1 ในการติดต่อประสานงาน ตลอดการศึกษาในระดับมหบัณฑิต

ขอขอบพระคุณครอบครัวอติคมบัณฑิตกุล และครอบครัวอุตตมะธนากร ที่ได้สนับสนุนและให้กำลังใจจนจบการศึกษา

ขอขอบพระคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด รุ่งพัฒนาศิลป์โฆษณา ที่ให้ความอนุเคราะห์ ให้ยืมใช้สถานที่ และ ช่วยติดตั้งกล่องทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาสนับสนุนทุนสำหรับการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญแผนภูมิ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน	7
2.2 การถ่ายเทความร้อนของเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.3 การป้องกันความร้อนทางหลังคา.....	13
2.4 ทฤษฎี งานวิจัย และแนวคิดที่เกี่ยวข้อง.....	18
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	21
3.1 แนวทางการวิจัย	21
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	21
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล	21
3.4 ตัวแปรในการวิจัย	21
3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	38
4.1 ผลการจำลองและวิเคราะห์ข้อมูลจากกล่องทดลอง	38
4.2 ผลการจำลองการใช้พลังงานไฟฟ้าด้วยโปรแกรม VisualDoe4.1	61
4.3 ผลการคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	98

บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	121
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	121
5.2	ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป.....	131
รายการอ้างอิง		132
ภาคผนวก		135
	ภาคผนวก ก	136
	ภาคผนวก ข	138
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		173

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ	33
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารสำนักงานต้นแบบ.....	34
ตารางที่ 3.3	ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลต้นแบบ	35
ตารางที่ 3.4	ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารต้นแบบร้านค้า	36
ตารางที่ 4.1	ค่าความต้านทานความร้อน (R) ของหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	40
ตารางที่ 4.2	ค่าความต้านทานความร้อน (R) ของหลังคาแบบมีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.	48
ตารางที่ 4.3	ค่าความต้านทานความร้อน (R) ของหลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	54
ตารางที่ 4.4	ค่าความต้านทานความร้อน (R) และพลังงานความร้อน (Q) ที่ส่งผ่านทางหลังคา.	60
ตารางที่ 4.5	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัย.....	63
ตารางที่ 4.6	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	68
ตารางที่ 4.7	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	70
ตารางที่ 4.8	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	73
ตารางที่ 4.9	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน.	75
ตารางที่ 4.10	ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆเมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารสำนักงาน.....	76
ตารางที่ 4.11	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	77
ตารางที่ 4.12	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	79
ตารางที่ 4.13	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	82
ตารางที่ 4.14	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล.	85
ตารางที่ 4.15	ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆเมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารโรงพยาบาล.....	86
ตารางที่ 4.16	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	88
ตารางที่ 4.17	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.	90
ตารางที่ 4.18	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	93
ตารางที่ 4.19	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า.....	96

ตารางที่ 4.20	ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆเมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารร้านค้า	97
ตารางที่ 4.21	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของบ้านพักอาศัย	100
ตารางที่ 4.22	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	102
ตารางที่ 4.23	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงานหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องอากาศสูง 10 ซม.	104
ตารางที่ 4.24	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงานหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องอากาศสูง 20 ซม.	106
ตารางที่ 4.25	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	109
ตารางที่ 4.26	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	111
ตารางที่ 4.27	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	113
ตารางที่ 4.28	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน....	116
ตารางที่ 4.29	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.	118
ตารางที่ 4.30	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	120
ตารางที่ 5.1	ค่าความต้านทานความร้อน (R) ที่หาได้จากกล่องทดลอง.....	122
ตารางที่ 5.2	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารพักอาศัย.....	123
ตารางที่ 5.3	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารสำนักงาน	124
ตารางที่ 5.4	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารโรงพยาบาล...	125
ตารางที่ 5.5	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารร้านค้า.....	126
ตารางที่ 5.6	แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	129
ตารางที่ 5.7	แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	129
ตารางที่ 5.8	แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	129
ตารางที่ 5.9	แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	130

ตารางที่ 5.10	แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	130
ตารางที่ 5.11	แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%).....	130

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1	แผนผังการวิจัย	5
ภาพที่ 2.1	ค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับรังสีอินฟราเรดของวัสดุต่างๆ	16
ภาพที่ 2.2	ตำแหน่งติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์(radiant barrier)บนหลังคา.....	17
ภาพที่ 2.3	ตำแหน่งติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์(radiant barrier)บนหลังคา.....	18
ภาพที่ 3.1	รูปแบบหลังคาและการใช้วัสดุกันความร้อนที่ทำการวิจัย.....	24
ภาพที่ 3.2	อาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ	25
ภาพที่ 3.3	อาคารสำนักงานต้นแบบ	26
ภาพที่ 3.4	อาคารโรงพยาบาลต้นแบบและอาคารร้านค้าต้นแบบ.....	27
ภาพที่ 3.5	รูปแบบโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	28
ภาพที่ 3.6	ฟังก์ชันสำหรับป้อนข้อมูลรายละเอียดเปลือกอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	29
ภาพที่ 3.7	รายละเอียดกล่องทดลอง.....	30
ภาพที่ 3.8	ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากกล่องทดลอง	31
ภาพที่ 4.1	การศึกษาด้วยกล่องทดลอง	38
ภาพที่ 4.2	ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน.....	39
ภาพที่ 4.3	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.	47
ภาพที่ 4.4	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.	53

แผนภูมิที่ 4.22	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม..	57
แผนภูมิที่ 4.23	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(ขยาย) ...	57
แผนภูมิที่ 4.24	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม..	58
แผนภูมิที่ 4.25	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(ขยาย).....	58
แผนภูมิที่ 4.26	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.	59
แผนภูมิที่ 4.27	อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(ขยาย)	59
แผนภูมิที่ 4.28	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัยทั้ง 8 ทิศทาง	62
แผนภูมิที่ 4.29	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัย.....	63
แผนภูมิที่ 4.30	ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารพักอาศัย เวลา 1.00 – 24.00 น.	65
แผนภูมิที่ 4.31	ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารพักอาศัย เวลา 19.00 – 7.00 น.	66
แผนภูมิที่ 4.32	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	67
แผนภูมิที่ 4.33	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 – 24.00 น.	68
แผนภูมิที่ 4.34	ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารสำนักงาน เวลา 8.00 – 18.00 น.	69
แผนภูมิที่ 4.35	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	70
แผนภูมิที่ 4.36	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศของอาคารสำนักงานหลังคาแบบมีฝ้า เพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น. ...	71
แผนภูมิที่ 4.37	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 8.00 – 18.00 น.....	71
แผนภูมิที่ 4.38	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	72
แผนภูมิที่ 4.39	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น....	73

แผนภูมิที่ 4.40	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 8.00 – 18.00 น.....	74
แผนภูมิที่ 4.41	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน.....	75
แผนภูมิที่ 4.42	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	77
แผนภูมิที่ 4.43	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 – 24.00 น.	78
แผนภูมิที่ 4.44	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 10 ซม.....	79
แผนภูมิที่ 4.45	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.เวลา 1.00 -24.00 น.....	80
แผนภูมิที่ 4.46	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.เวลา 8.00 -18.00 น.....	81
แผนภูมิที่ 4.47	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.เวลา 19.00 -7.00 น.....	81
แผนภูมิที่ 4.48	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 20 ซม.....	82
แผนภูมิที่ 4.49	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น.....	83
แผนภูมิที่ 4.50	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 8.00 – 18.00 น.....	84
แผนภูมิที่ 4.51	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 19.00 – 7.00 น.....	84
แผนภูมิที่ 4.52	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล.....	86
แผนภูมิที่ 4.53	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน.....	87
แผนภูมิที่ 4.54	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 – 24.00 น.....	88
แผนภูมิที่ 4.55	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 10.00 – 22.00 น.....	89

แผนภูมิที่ 4.56	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	89
แผนภูมิที่ 4.57	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น.....	91
แผนภูมิที่ 4.58	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 10.00 – 22.00 น... ..	92
แผนภูมิที่ 4.59	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.....	93
แผนภูมิที่ 4.60	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 -24.00 น.	94
แผนภูมิที่ 4.61	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 10.00 -22.00 น.....	95
แผนภูมิที่ 4.62	ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า.....	97
แผนภูมิที่ 4.63	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อนในบ้านพักอาศัย.....	98
แผนภูมิที่ 4.64	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงาน หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน	101
แผนภูมิที่ 4.65	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงาน หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	103
แผนภูมิที่ 4.66	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงาน หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม... ..	105
แผนภูมิที่ 4.67	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงาน.....	107
แผนภูมิที่ 4.68	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารโรงพยาบาล หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน.....	108
แผนภูมิที่ 4.69	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารโรงพยาบาล หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	110
แผนภูมิที่ 4.70	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารโรงพยาบาล หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม... ..	112
แผนภูมิที่ 4.71	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารโรงพยาบาล.....	114

แผนภูมิที่ 4.72	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารร้านค้า หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน.....	115
แผนภูมิที่ 4.73	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารร้านค้า หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.....	117
แผนภูมิที่ 4.74	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารร้านค้า หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม... ..	119
แผนภูมิที่ 4.75	ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารร้านค้า.....	120

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันสภาวะอากาศของโลกร้อนขึ้นทุกปี เนื่องจากสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติถูกทำลาย ประกอบกับความเปลี่ยนแปลงในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้พลังงานขึ้นในหลายพื้นที่ทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย

พลังงานที่ถูกใช้บริโภคเป็นจำนวนมาก ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอาคาร ซึ่งส่วนใหญ่ถูกปรับสภาวะอากาศโดยเครื่องปรับอากาศ แหล่งกำเนิดความร้อนอย่างดวงอาทิตย์และสภาพอากาศที่ร้อนขึ้นจึงส่งโดยตรงต่อภาระการทำงานของเครื่องปรับอากาศ เกิดผลกระทบต่อความต้องการพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้ทำความเย็น ซึ่งย่อมส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านการจัดหาพลังงานในภาพรวมระดับประเทศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น การหาวิธีลดภาระความร้อนจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งในแง่ของการส่งเสริมภาวะน่าสบายและการลดความเปลี่ยนแปลงในการใช้พลังงานในอาคาร

วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว สามารถเริ่มได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบสถาปัตยกรรม ที่ควรคำนึงถึงการใช้ประโยชน์จากปัจจัยทางธรรมชาติและตอบรับกับสภาพอากาศ(Passive design) เช่น การป้องกันความร้อนเข้าสู่เปลือกอาคารส่วนต่างๆ เช่น การป้องกันความร้อนทางช่องเปิดผนัง หรือ หลังคา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร มีฤดูร้อนที่ค่อนข้างยาวนานตลอดปี หลังคาจึงเป็นส่วนสำคัญของอาคารที่ได้รับอิทธิพลความร้อนจากดวงอาทิตย์โดยตรง หากลดความร้อนในส่วนนี้ได้ นอกจากจะส่งผลดีต่อการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารแล้ว ยังเป็นการช่วยลดอุณหภูมิ ส่งเสริมภาวะน่าสบายในอาคารได้อีกด้วย

วิธีการป้องกันความร้อนทางหลังคา ได้แก่ การใช้ฉนวนมวลสารชนิดต่างๆเพื่อหน่วงการนำความร้อน การใช้วิธีการระบายอากาศธรรมชาติเพื่อพาความร้อนออกจากช่องใต้หลังคา การใช้วัสดุแผ่นที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนต่ำเช่นแผ่นอลูมิเนียมพอยล์เพื่อลดรังสีความร้อนลงสู่พื้นที่ใช้งาน เป็นต้น แต่แนวทางเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกซื้อสำหรับผู้บริโภคยังมีอยู่น้อย ดังนั้น หากมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุกันความ

ร้อนเหล่านี้ โดยอยู่ในเงื่อนไขสภาพอากาศร้อนชื้นของประเทศไทย อาจได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ใช้อาคารบ้างไม่มากก็น้อย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานไฟฟ้าระหว่าง อาคารที่ใช้วิธีกันความร้อนด้วยฉนวนมวลสารกันความร้อนทั่วไป (ฉนวนใยแก้ว) การกันความร้อนด้วยวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำแบบแผ่นอลูมิเนียมพอยล์ (radiant barrier sheet) และ สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา (silica coating) เพื่อทดสอบว่าในแต่ละวิธีการมีประสิทธิภาพในการช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าและลดภาระการทำความร้อน ในอาคารแต่ละประเภทที่มีความแตกต่างกัน ในแง่เวลาการใช้งานของเครื่องปรับอากาศ ตลอดจนมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งาน มากน้อยเพียงใด โดยมีสมมติฐานว่าการป้องกันความร้อนทางหลังคาด้วยวัสดุกันความร้อนแต่ละประเภท ได้แก่ การใช้ฉนวนมวลสารกันความร้อน(Thermal mass insulation) การใช้แผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อนต่ำ(Radiant barrier sheet) และ การใช้สีกันความร้อน มีผลต่อการใช้พลังงานของอาคารแต่ละประเภทไม่เหมือนกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของฉนวนกันความร้อนทั่วไปและวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำ

1.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าของฉนวนกันความร้อนทั่วไปและวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำ

1.3 ขอบเขตในการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อน และ ผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคาร

1.3.2 วิธีการกันความร้อน

- ฉนวนหลังคาใยแก้ว ใช้ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ความหนา 2 นิ้ว ความหนาแน่น 24 Kg/m³
- วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำแบบแผ่น (radiant barrier sheets) ใช้ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป และ มีคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C1313 - Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications

- สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา สีขาว
- 1.3.3 ศึกษาด้วยการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง และ การใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้า
- 1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เฉพาะอาคารที่ใช้ระบบปรับอากาศเท่านั้น
- 1.3.5 ศึกษาระบบหลังคาที่ไม่มีการระบายอากาศ แบบไม่มีฝ้าเพดานและแบบที่มีฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดที่มีช่องว่างอากาศ(attic)สูง 10 ซม. และ 20 ซม.
- 1.3.6 การจำลองการใช้พลังงานในโปรแกรม VisualDOE 4.1 แยกตามประเภทอาคาร เช่น อาคารพักอาศัย(ใช้งานเครื่องปรับอากาศเวลากลางคืนเท่านั้น) อาคารสำนักงาน(ใช้งานเครื่องปรับอากาศเวลากลางวันเท่านั้น) อาคารร้านค้า (ใช้งานเครื่องปรับอากาศเวลากลางวันต่อเนื่องถึงตอนกลางคืน) และ อาคารโรงพยาบาล (ใช้งานเครื่องปรับอากาศ 24 ชั่วโมง)
- 1.3.7 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้วยวิธีคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคาร 20 ปี (Life Cycle Cost)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาวรรณกรรมและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อกำหนดแนวทางในการวิจัย
 - 1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีและปัจจัยการถ่ายเทความร้อน
 - 1.4.1.2 ศึกษาปัจจัยของการใช้พลังงานในอาคารปรับอากาศ
 - 1.4.1.3 ศึกษาแนวทางการใช้วัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคา
 - 1.4.1.4 ศึกษาระเบียบวิธีวิจัย
- 1.4.2 ตั้งสมมติฐานในการวิจัย

การป้องกันความร้อนด้วยการใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำหรือฉนวนมวลสารกันความร้อนมีผลต่อการใช้พลังงานของอาคารแต่ละประเภทต่างกัน
- 1.4.3 กำหนดตัวแปรในการวิจัย
 - 1.4.3.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ ระบบหลังคาประเภทต่างๆ ซึ่งมีลักษณะของช่องว่างใต้ฝ้าเพดาน และ การใช้วัสดุกันความร้อนที่แตกต่างกัน
 - 1.4.3.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ผลการใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.-year)

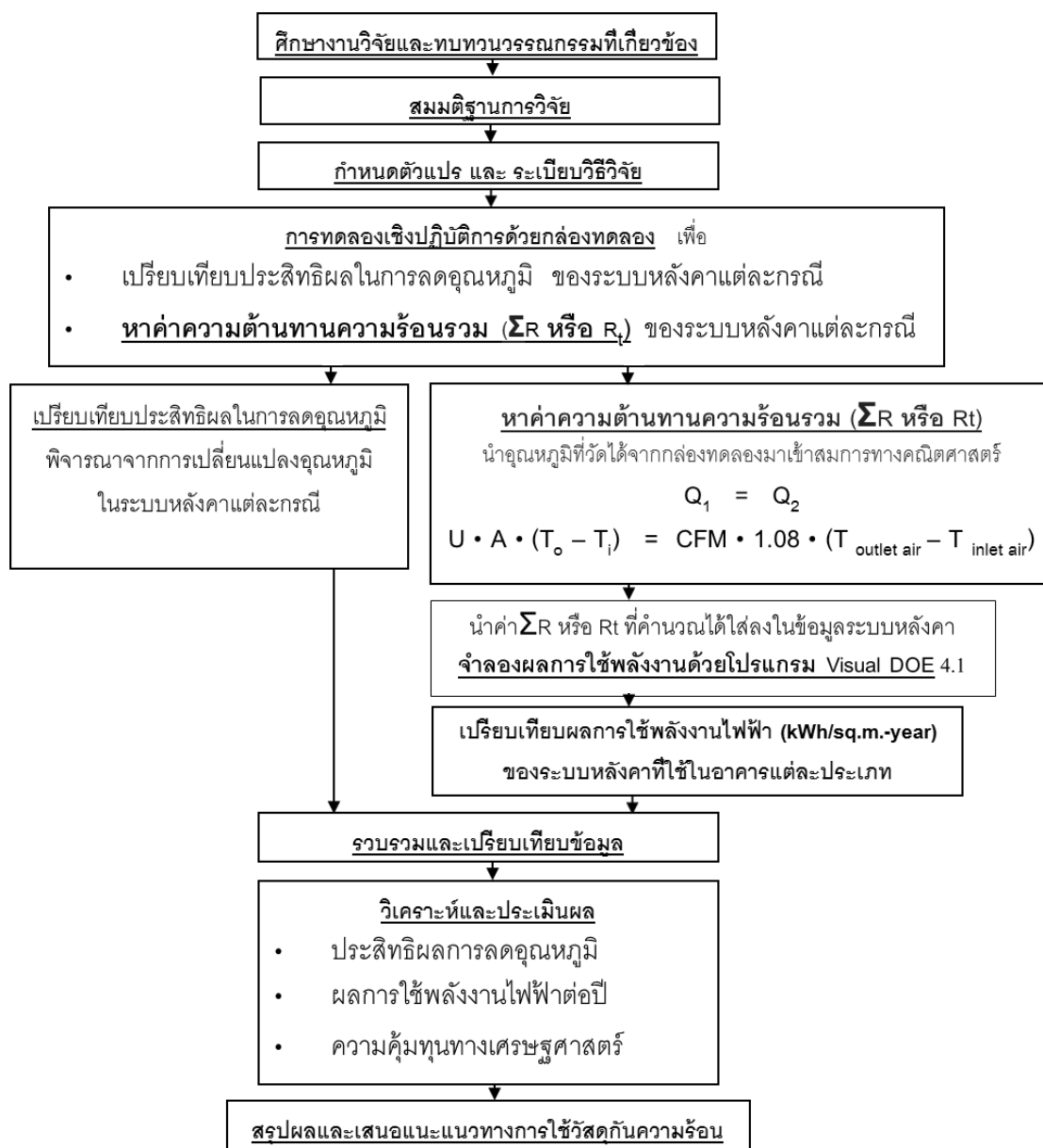
1.4.4 ทำการทดลองเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรม การถ่ายเทความร้อนของระบบหลังคาแต่ละประเภท และนำอุณหภูมิที่วัดได้จากจุดต่างๆ ในกล่องทดลองมาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานความร้อนรวม (ΣR หรือ R_t) ของระบบหลังคาแต่ละประเภท

1.4.5 จำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้ค่าคุณสมบัติที่ได้จากการ ทดลองเชิงปฏิบัติการเป็นข้อมูลของระบบหลังคาแต่ละประเภท เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ การใช้พลังงานไฟฟ้า

1.4.6 คำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี

1.4.7 สรุปผลและเสนอแนวทางในการใช้วัสดุกันความร้อน

แผนผังการวิจัย



ภาพที่ 1.1 แผนผังการวิจัย (ที่มา : ผู้วิจัย)

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1.5.1 ได้ศึกษาผลกระทบต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าของ ฉนวนกันความร้อนทั่วไป และวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ
- 1.5.2 ได้แนวทางในการใช้วัสดุกันความร้อนสำหรับการป้องกันความร้อนทางหลังคาที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดของอาคารแต่ละประเภทที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาที่ต่างกัน

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถกำหนดวิธีการศึกษาทฤษฎี แนวคิด และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวเรื่องต่อไปนี้

- คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน
- การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร
- การป้องกันความร้อนทางหลังคา
- ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- สมมติฐานของงานวิจัย

2.1 คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อน

พลังงานความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่อุณหภูมิสูงกว่าไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

แหล่งความร้อนที่เข้าสู่อาคารโดยทั่วไป ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ หรือ รังสีคลื่นสั้นที่ส่องมายังพื้นโลก ส่วนหนึ่งจะถูกชั้นบรรยากาศกรองไว้ โดยรังสีบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับด้วยโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ และ บางส่วนจะถูกดูดซึมไว้ในชั้นบรรยากาศ (ธนิต จินดาวงนิค , 2540)

รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ ที่ส่องมายังพื้นโลกแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

- รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct Radiation)
- รังสีที่กระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Radiation) เมื่อรังสีดวงอาทิตย์มาถึงชั้นบรรยากาศ บางส่วนจะถูก ก๊าซ ไอน้ำ ฝุ่นละออง ในชั้นบรรยากาศ ทำให้รังสีโดยตรงกระจายออก
- รังสีจากดวงอาทิตย์ที่กระทบพื้นผิวและสะท้อนความร้อน (Reflected Radiation) เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิววัสดุบนผิวโลก พื้นผิวนั้นๆจะสะท้อนความร้อน โดยเฉพาะวัสดุที่มีสีอ่อนและผิวมันวาว

รังสีจากดวงอาทิตย์หรือรังสีคลื่นสั้น(Solar Radiation) ที่ส่องลงมายังพื้นโลกจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.2-3.5 ไมโครเมตร (μm) พลังงานส่วนนี้ยังประกอบด้วยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆกัน ดังนี้

- รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) เป็นพลังงานช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.2-0.4 μm เป็นรังสีที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสรีรวิสัย อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ รวมทั้งผิวหนังมนุษย์ด้วย รังสีช่วงคลื่นดังกล่าวมีสัดส่วน 90% ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด
- Visible Light อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.4-0.7 μm ปรากฏอยู่ในรูปของแสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ มีสัดส่วนเป็น 28% ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด
- รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near Infrared Ray-NIR) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.7-3.5 μm เป็นพลังงานรูปความร้อน เห็นได้จากเมื่อมนุษย์สัมผัสกับแสงอาทิตย์โดยตรง จะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้นนี้มีสัดส่วนมากที่สุดจากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมด และเป็นตัวแปรหลักของความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่อาคาร

การถ่ายเทความร้อนที่กล่าวมา จะทำให้พื้นผิวโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และมีกลไกในการผ่านเข้าสู่เปลือกอาคาร อาศัยกลไกการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ดังนี้

2.1.1 การนำความร้อน(Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเนื้อวัตถุ หรือ เกิดจากการสัมผัสกันของเนื้อวัตถุ การถ่ายเทความร้อนเกิดจากการสั่นของโมเลกุลในเนื้อวัตถุที่มีอุณหภูมิสูง ส่งต่อสูโมเลกุลข้างเคียง ทำให้การนำความร้อนเกิดขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการนำความร้อนได้แก่ ความหนาแน่นของวัสดุ ความชื้นของวัสดุ ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุทั้ง 2 ด้านที่มีการถ่ายเทความร้อน ความหนาแน่นของวัสดุ และระยะเวลาในการถ่ายเทความร้อน โดยมีสมการในการคำนวณ ดังนี้

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

เมื่อ	Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
	U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
	A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)
	T_i	คือ	อุณหภูมิที่สูงกว่า ($^\circ\text{C}$)

T_o คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ($^{\circ}\text{C}$)

จะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน เป็นปัจจัยในการนำความร้อนเข้าสู่อาคาร ในการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างจึงควรพิจารณาวัสดุที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำเพื่อหน่วงความร้อน ให้เข้าสู่พื้นที่ภายในให้น้อยที่สุด

2.1.2 การพาความร้อน(Convection)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่อาศัยการเคลื่อนที่ของตัวกลางจำพวกของไหล(fluid) และ ก๊าซ เมื่อของไหลสัมผัสวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานในลักษณะการพาความร้อน ซึ่งมีสมการในการคำนวณ ดังนี้

$$Q = h \cdot A \cdot (T_a - T_s)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
 h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มอากาศ
 บริเวณที่ของไหลผ่าน ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)
 A คือ พื้นที่วัสดุที่ของไหลผ่าน (m^2)
 T_a คือ อุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิววัสดุ ($^{\circ}\text{C}$)

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน(Radiation)

เช่น การถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์มาสู่อาคาร โดยทั่วไปเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0°K) ซึ่งอาศัยสเปกตรัมการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ที่เปล่งออกจากพื้นผิววัสดุนั้นๆ โดยรังสีความร้อนนี้จะแผ่กระจายออกทุกทิศทาง วัสดุที่แผ่รังสีออกมาโดยไม่ได้รับรังสีความร้อนจากวัสดุอื่น อุณหภูมิของวัสดุนั้นจะลดลง ในทางกลับกัน ถ้าวัสดุได้รับรังสีความร้อนจากวัตถุอื่นมากกว่าการแผ่รังสีความร้อนของตัวเอง อุณหภูมิของวัสดุนั้นจะเพิ่มมากขึ้น

2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ถ้าการถ่ายเทความร้อนมีทิศทางจากด้านล่างสู่ด้านบน (เมื่ออุณหภูมิผิววัสดุภายในอาคารสูงกว่าอุณหภูมิผิววัสดุผนังหลังคา) จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อน ในช่องอากาศของหลังคา เนื่องจากการลอยตัวของโมเลกุลอากาศที่ร้อน และ การแทนที่ของโมเลกุลอากาศที่เย็นกว่า และ เกิดการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี โดยจะเป็นการถ่ายเทพลังงาน

ความร้อนทะลุผ่านช่องว่าง ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ไปยังพื้นผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง

และเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนจากด้านบนสู่ด้านล่าง (เช่น เมื่ออุณหภูมิผิววัสดุภายนอกอาคารสูงกว่าอุณหภูมิผิวภายในอาคาร) จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสี จากพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในทุกทิศทาง ส่วนการพาความร้อน แทบจะไม่เกิดขึ้น เนื่องจากการลอยตัวของโมเลกุลอากาศที่ร้อนกว่าด้านบนที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า โมเลกุลอากาศที่เย็นกว่าด้านล่าง จึงไม่มีการไหลเวียนโมเลกุลอากาศดังกล่าว

ระบบเปลือกอาคาร หมายถึง ส่วนของอาคารที่สัมผัสกับอากาศภายนอกอาคาร แบ่งเป็นส่วนที่บดบังแสงและส่วนโปร่งแสง ระบบเปลือกอาคารที่ดีควรสามารถลดปริมาณความร้อนและความชื้นที่เข้าสู่อาคาร และ อาจช่วยในการทำความเย็นแก่อาคารโดยใช้ประโยชน์จากสภาพแวดล้อมและปัจจัยทางธรรมชาติของที่ตั้ง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเปลือกอาคารหลังคาที่บดบังแสง โดยมีสมการในการคำนวณ ดังนี้

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

- เมื่อ Q คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
 U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 A คือ พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)
 T_o คือ อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่สูงกว่า ($^\circ C$)
 T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวเปลือกอาคารด้านที่ต่ำกว่า ($^\circ C$)

หรือ $Q = U \cdot A \cdot CLTD$

- เมื่อ Q คือ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
 U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
 $CLTD$ คือ ภาวะความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่า
 (Cooling Load Temperature - $^\circ C$)

สูตร $Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$ ใช้ในการคำนวณเมื่อ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและอุณหภูมิภายในอาคารมีความคงที่ (Steady State Condition)

สำหรับสูตร $Q = U \cdot A \cdot CLTD$ ใช้ในการคำนวณเมื่อ ต้องการค่าปริมาณความร้อนที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยค่า $CLTD$ คือค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ซึ่งไม่คงที่เพราะ

อิทธิพลจากสภาพแวดล้อม เช่น ตำแหน่งที่ตั้งอาคาร เวลา ฤดูกาล อิทธิพลของมวลสาร อิทธิพลของแสงแดด สภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

เป็นค่าคุณสมบัติที่ระบุถึงความสามารถในการนำความร้อนของวัสดุแต่ละประเภท หาได้จากอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านหน้าตัดพื้นผิววัสดุสองด้านที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน เรียกว่า ค่า K (K-value) มีหน่วย คือ $W/m \cdot ^\circ C$ หรือ $Btu/hr \cdot ft \cdot ^\circ F$

2.2.2 ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal resistance)

ระบุได้จากอัตราส่วนระหว่างความหนาวัสดุที่ความร้อนไหลผ่านกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (K-value) บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานความร้อนของวัสดุ เรียกว่า ค่า R (R-value) วัสดุใดที่มีค่า R สูง แสดงว่ามีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนกันความร้อนมาก มีหน่วยคือ $m^2 \cdot ^\circ C / W$ หรือ $(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F) / Btu$ คำนวณได้จากสูตร

$$R = \frac{\Delta X}{k}$$

เมื่อ

R	=	ค่าการต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)
ΔX	=	ความหนาของวัสดุที่นำมาพิจารณา
k	=	ค่าการนำความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

2.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U value)

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

$$U = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

เมื่อ

R	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
R_n	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ ลำดับที่ n
U	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุ ($m^2 \cdot ^\circ C / W$)

2.2.4 คุณสมบัติของรังสีความร้อนและการแผ่รังสีของพื้นผิว

รังสีความร้อนในธรรมชาติ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

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

วัตถุต่างๆบนโลกเมื่อได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นสั้น ผิววัสดุจะสะท้อนรังสี(Reflectance - P) หรือ ถ้าเป็นวัสดุโปร่งแสง จะมีการส่งผ่านรังสี (Transmittance - T) ส่วนรังสีความร้อนที่เหลือจะถูกดูดกลืน (Absorptance - α) เข้าสู่เนื้อวัตถุ ดังสมการ $P + \alpha + T = 1$ ซึ่งการดูดกลืนรังสีเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้วัสดุนั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด โดยค่าการดูดกลืนรังสีหาได้จาก

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

2.2.5 การแผ่รังสีจากวัสดุในช่วงคลื่นยาว (Longwave Radiation)

วัตถุที่บแสงต่างๆบนโลก เมื่อได้รับการแผ่รังสีความร้อนคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ จะดูดกลืนรังสีดังกล่าวไว้ และจะคายรังสีความร้อนออกมาในช่วงคลื่นยาว (Longwave Radiation) ซึ่งจะมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 3 μm ขึ้นไป โดยลักษณะการคายรังสีในช่วงคลื่นยาวนี้ ไม่สามารถผ่านทะลุกระจกได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) เกิดการสะสมความร้อนในอาคาร โดยค่าการคายรังสีความร้อนช่วงคลื่นยาวหาได้จาก

$$E = \frac{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากผิววัสดุ (Radiation from Material)}}{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากวัตถุดำในอุดมคติ(Radiation from Blackbody)}}$$

วัตถุดำในอุดมคติ(Black body) เป็นวัสดุในอุดมคติที่สามารถคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ (Perfect Emitted =1) ค่าการแผ่รังสีความร้อน(Emissivity) ของวัตถุใดๆซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบกับวัตถุดำในอุดมคติดังกล่าว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 เสมอ หากยังมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่าใด หมายความว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติในการคายหรือแผ่รังสีความร้อนในปริมาณมาก

การแผ่รังสีความร้อนช่วงคลื่นยาว สามารถแบ่งออกตามประเภทของวัสดุต่างๆได้ดังนี้

1. วัสดุธรรมชาติประเภทโลหะ มีค่าการคายรังสีความร้อนสูง ตั้งแต่ 0.85 ขึ้นไป
2. วัสดุโลหะ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้
 - โลหะเคลือบผิว เช่น วัสดุหลังคาโลหะเคลือบสี เป็นต้น จะมีค่าการคายรังสีความร้อนค่อนข้างสูง ประมาณ 0.85 ขึ้นไป

- โลหะไม่เคลือบผิว เช่น อลูมิเนียมพอยล์ สังกะสี ทองเหลือง ทองแดง จะมีการคายความร้อนต่ำ มักมีการคายความร้อนน้อยกว่า 0.5 ลงไป

ลักษณะของพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการดูดซับรังสีและการแผ่รังสีแตกต่างกันไป แนวคิดที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ได้แก่สมการดังนี้

$$P + \epsilon + T = 1$$

เมื่อ P = ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนจากพื้นผิว (Reflectivity)

α = ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorptivity)

T = ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน (Transmissivity)

ผลรวมของค่าการสะท้อนรังสีความร้อน ค่าการดูดซับรังสีความร้อน และค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ 100% ของพลังงานความร้อนที่ตกกระทบลงมาทั้งหมด แต่สำหรับวัสดุทึบตัน (Opaque Material) ค่าการส่งผ่านความร้อนเท่ากับ 0 ดังนั้น ผลรวมของค่าการสะท้อนรังสีความร้อนและค่าการดูดซับรังสีความร้อนจะเท่ากับ 1 ($P + \epsilon = 1$)

2.3 การป้องกันความร้อนทางหลังคา

2.3.1 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)

- การสร้างความเย็นโดยการพาความร้อน (Convection Cooling)

เป็นแนวทางสร้างความเย็นแก่อาคารโดยการนำความเย็นจากสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในอาคาร เข้ามาแทนที่โดยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารออกไป เมื่อนำหลักการพาความร้อนมาประยุกต์ใช้กับหลังคา จะช่วยลดอุณหภูมิภายในช่องหลังคา และลดอุณหภูมิของผิวของวัสดุภายในช่องหลังคาได้ โดยเฉพาะช่วงเวลากลางวันซึ่งภายใต้ช่องหลังคาจะมีอุณหภูมิสูงมาก

- การคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation)

ชั้นบรรยากาศท้องฟ้า โดยเฉพาะชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นแหล่งความเย็นที่สำคัญที่ทำให้วัตถุต่างๆบนโลกสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน สังเกตได้จากปรากฏการณ์ที่พื้นผิวของวัสดุบางชนิดมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศในช่วงกลางคืน ในบางครั้งอุณหภูมิผิวของวัตถุอาจลดต่ำลงมากกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ทำให้เกิดปรากฏการณ์มีน้ำค้างเกาะอยู่ตามยอดหญ้า หรือรถยนต์ ในช่วงเวลากลางคืน

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

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

ค่ามุมที่เปิดออกสู่ท้องฟ้า (Angle Factor) มีผลต่อการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางคืน เนื่องจากท้องฟ้าเป็นแหล่งความเย็นขนาดใหญ่ ดังนั้นวัสดุที่ทำมุมขนานระนาบกับท้องฟ้า (Horizontal) มากเท่าไร ก็จะมีพื้นที่เปิดออกสู่ท้องฟ้ามากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางกลับกัน ในช่วงเวลากลางวันท้องฟ้าจะเป็นแหล่งความร้อนจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นวัสดุที่วางตัวขนานกับท้องฟ้าก็จะมีโอกาสได้รับรังสีความร้อนมากขึ้น

ในการออกแบบมุมหรือความลาดชันหลังคาจึงควรพิจารณาเป้าหมายในการออกแบบระบบหลังคานั้นๆด้วย จึงจะได้มุมหลังคาที่เหมาะสมแก่การลดการรับความร้อนในช่วงเวลากลางวัน มีประสิทธิภาพในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าในช่วงเวลากลางคืน สามารถระบายน้ำฝนรวมถึงฝุ่นละอองได้อย่างเหมาะสม

2.3.2 การใช้ฉนวนมวลสารกันความร้อน (Thermal Mass Insulation)

ฉนวนกันความร้อน คือ วัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อน ไม่ให้ถูกส่งผ่านไปได้อย่างง่าย ฉนวนประเภทมวลสาร เป็นลักษณะของฉนวนกันความร้อนที่ประกอบด้วยโพรงช่องเล็กๆ และ ช่องอากาศภายในวัสดุที่เป็นแบบปิดทึบ (Totally Enclosed) ช่องเล็กๆเหล่านี้อาจเกิดขึ้นจากเกล็ด(Flakes) หรือ เส้นใย(Fibres) ปมแข็ง (Nodules of Solid) หรือเซลล์ของตัววัสดุเอง

โพรงอากาศภายในฉนวนมวลสารเป็นตัวการทำให้เกิดกลไกด้านการไหลของอากาศหรือ ก๊าซ ทำให้ความร้อนส่วนใหญ่ไม่สามารถถูกส่งผ่านจากด้านหนึ่งของวัสดุไปยังอีกด้านหนึ่งได้

เมื่อพิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ภายในวัสดุฉนวนที่มีความหนาแน่นค่าหนึ่ง สภาพการนำความร้อนจะลดลงได้ เนื่องจากการพาความร้อนโดยช่องว่างอากาศในฉนวนนั้นลดลง เพราะการลดขนาดของช่องอากาศระหว่างเส้นใยของเซลล์วัสดุซึ่งทำให้อากาศภายในฉนวนหยุดนิ่งจนมีสภาพเป็นตัวกั้นการถ่ายเทความร้อนได้อย่างดี

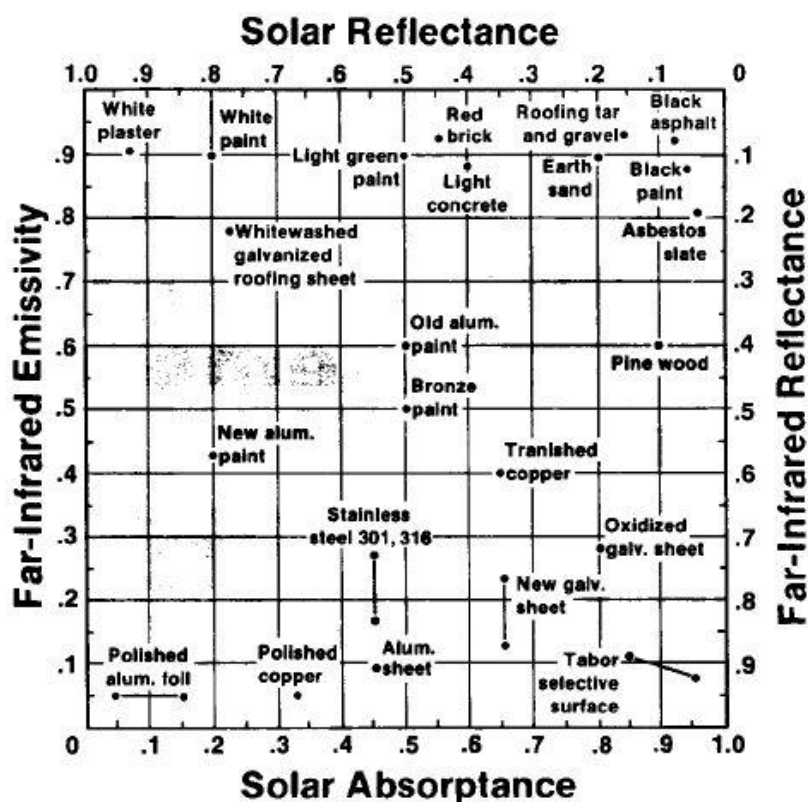
เมื่อความหนาแน่นของฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ การแผ่รังสีถ่ายเทระหว่างเส้นใยและพื้นผิวสู่พื้นผิวจะลดลง ทำให้สภาพการนำความร้อนปรากฏลดลงด้วย จนกระทั่งเมื่อเส้นใยหรือ เซลล์ เชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดการนำความร้อนขึ้นภายในวัสดุจนถึงจุดที่การแผ่รังสีลดลง สภาพการนำความร้อนปรากฏจะมากขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การใช้ฉนวนมวลสารนั้น จะมีค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ผลิตฉนวนกันความร้อนแต่ละประเภทที่เหมาะสมค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้น ฉนวนกันความร้อนที่ดี จึงควรเป็นฉนวนที่มีค่าสภาพการนำความร้อนปรากฏต่ำสุด

ดังนั้นควรพิจารณาเลือกใช้ฉนวนมวลสารที่มีค่าความต้านทานความร้อน (R - value) สูง ฉนวนมวลสารกันความร้อนสามารถติดตั้งได้ทั้งตำแหน่งใต้หลังคา(ขนานกับโครงหลังคา) และติดตั้งบนฝ้าเพดาน แต่การติดตั้งแบบหลังสามารถป้องกันความร้อนลงสู่พื้นที่ใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากกว่า (จัญดา บุญเกียรติ , 2537)

2.3.3 การใช้ระบบป้องกันการแผ่รังสีความร้อน (Radiant barrier system)

วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing & Materials) c1313 – 2010 Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications หมายถึงวัสดุพื้นผิวซึ่งประกอบด้วยโลหะบริสุทธิ์ 99% อย่างน้อย 1 ด้าน และต้องมีค่าการคายรังสีความร้อน(Emissivity) ต่ำกว่า 0.1 และต้องมีค่าการสะท้อนรังสี (Reflectivity) สูงกว่า 90%

อลูมิเนียมฟอยล์ เป็นวัสดุที่มีค่าการคายรังสีต่ำถึง 0.05 และมีลักษณะที่บดบัง ซึ่งถือว่าไม่มีการส่งผ่านรังสีผ่านวัสดุ ค่าการคายรังสีความร้อนจึงมีค่าเท่ากับหนึ่งลบด้วยค่าสะท้อนรังสีความร้อน อลูมิเนียมฟอยล์มีค่าการคายรังสีความร้อน 0.05 นั้นหมายความว่าค่าการสะท้อนรังสีประมาณ 0.95 ซึ่งสามารถสกัดกั้นการแผ่รังสีได้ถึง 95% โดยปกติแล้วอลูมิเนียมฟอยล์เป็นวัสดุที่นำความร้อนได้เป็นอย่างดี มีค่าต้านทานความร้อน (R-value) ที่ต่ำมาก แต่หากถูกวางไว้ระหว่างวัสดุที่พยายามจะถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี โดยมีช่องอากาศร่วมด้วย จะช่วยลดการส่งพลังงานรังสีความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากคุณสมบัติความต้านทานความร้อนของช่องอากาศที่เพิ่มขึ้นจากการสัมผัสกับวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การคายรังสีต่ำ (Low-Emissivity)



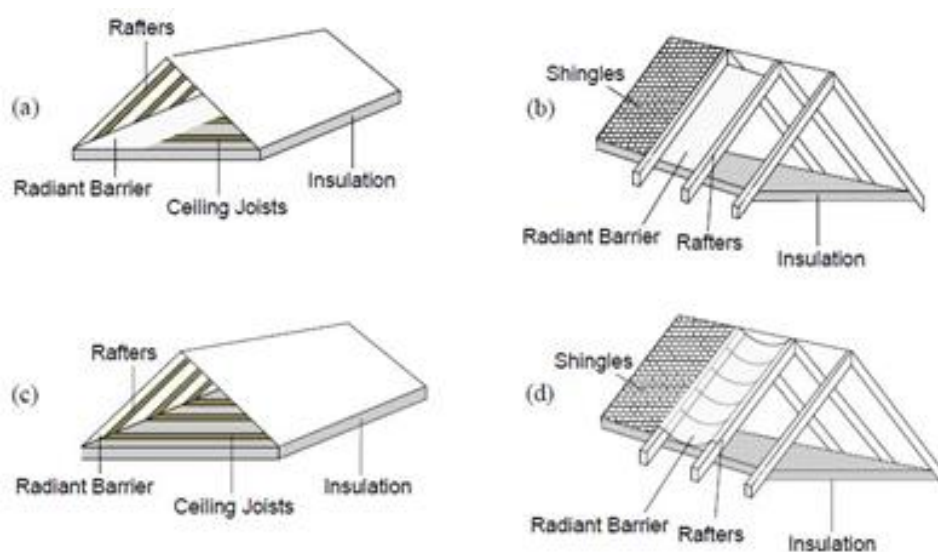
ภาพที่ 2.1 ค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับรังสีอินฟราเรดของวัสดุต่างๆ (P.Fairey., 1986.)

ระบบป้องกันรังสีความร้อน ประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ (Radiant barriers) เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำจะเป็นตัวสกัดกั้นความร้อนโดยลดการแผ่รังสีความร้อนลงมายังพื้นที่ใช้งานเบื้องล่าง (อนันต์ วัชรพงษ์วินิจ , 2537)

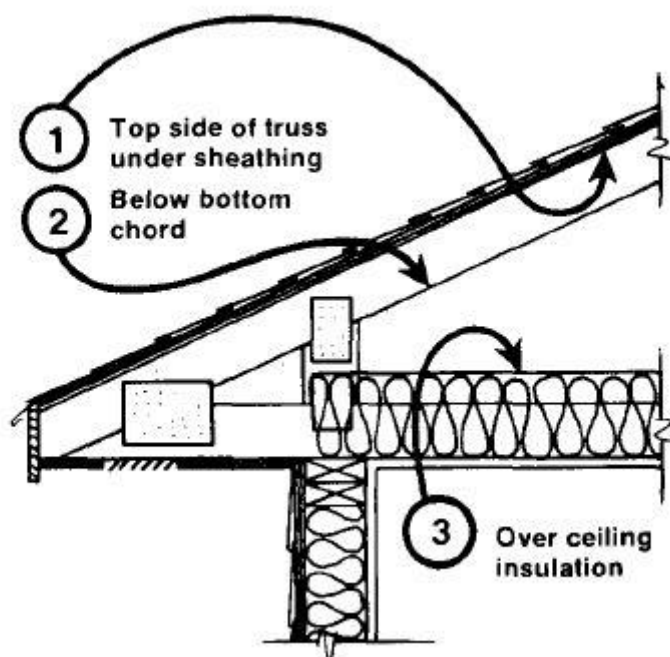
การติดตั้งระบบป้องกันรังสีความร้อนต้องให้วัสดุสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำหันหน้าออกสู่ช่องว่างอากาศของหลังคา ซึ่งทำให้พฤติกรรมที่ลดการแผ่รังสีของวัสดุสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำเสมือนว่าเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานความร้อน (R – Thermal Resistance) ให้ช่องว่างอากาศ (R air gap) มากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในแต่ละทิศทางของการถ่ายเทความร้อนและระยะห่างของช่องอากาศ (attic) ที่ต่างกัน มีผลต่อค่าต้านทานความร้อน (R value) ที่เกิดจากระบบป้องกันรังสีความร้อน ค่าความต้านทานความร้อนดังกล่าวอาจต่ำกว่าที่ได้ประมาณไว้ก็ได้ หากวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำถูกติดตั้งในตำแหน่งที่มีการเคลื่อนไหวของอากาศหรืออยู่ในช่องอากาศที่มีการรั่วไหลหรือไม่สม่ำเสมอ

M.Medina.,2012 ได้สรุปภาพรวมและผลงานวิจัยที่ได้มีการกล่าวถึงประสิทธิภาพของวัสดุแผ่รังสีความร้อนต่ำ ที่ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนได้ถึง 40-45% เมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่มี การป้องกันความร้อน แผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำสามารถติดตั้งได้ทั้งแบบขนานกับ โครงหลังคา(Truss Radiant Barriers-TRB) ระหว่างวัสดุฉนวน ใต้วัสดุฉนวน หรือติดตั้งบนฝ้าเพดาน (Horizontal Radiant barriers-HRB) ซึ่งวิธีติดตั้งที่มีประสิทธิผลลดความร้อนดีที่สุดคือ ติดตั้งบน ฝ้าเพดาน ทำให้ผิวหน้าอลูมิเนียมหันขึ้นสู่ช่องอากาศภายในหลังคา เมื่อถูกใช้งานระยะหนึ่ง จะทำ ให้เกิดการสะสมฝุ่นบนผิวหน้า ซึ่งเป็นการลดประสิทธิภาพของวัสดุแผ่รังสีต่ำลง ดังนั้นควรเลือก ติดตั้งแบบขนานกับโครงหลังคาหรือหันด้านที่เป็นอลูมิเนียมพอยล์ลงล่าง แม้จะช่วยลดการถ่ายเท ความร้อนรองลงมาจากกรณีติดตั้งบนฝ้าเพดานเล็กน้อย แต่จะมีอายุการใช้งานได้ยาวนานกว่า ไม่ สิ้นเปลืองค่าบำรุงรักษา เนื่องจากไม่สะสมฝุ่นนั่นเอง



ภาพที่ 2.2 ตำแหน่งติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมพอยล์(radiant barrier) บนหลังคา (Medina , 2012.)



ภาพที่ 2.3 ตำแหน่งติดตั้งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์(radiant barrier)บนหลังคา (P. Fairey., 1984.)

การนำวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำ (M.Medina., 2006) ไปใช้งาน มีการวิจัยโดยทดลองกับบ้านพักอาศัยจำลองในภูมิภาคที่มีความแตกต่างทางสภาพอากาศ 9 เขตในสหรัฐอเมริกา พบว่าวัสดุแผ่รังสีต่ำสามารถช่วยลดการถ่ายเทความร้อนสู่หลังคาได้ในบ้านทดลองทุกหลัง ซึ่งมีประสิทธิผลมากในบ้านทดลองที่ตั้งในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น หรือ ร้อนแบบทุ่งหญ้าสะวันนา เมื่อเทียบกับบ้านทดลองในเขตอากาศอื่นๆ

2.4 ทฤษฎี งานวิจัยและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ศึกษการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หลังคาของจตุรดา บุญยเกียรติ , 2537 ได้มีการใช้กล่องทดลองตั้งไว้กลางแจ้งพร้อมติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิไว้ตามจุดต่างๆภายในกล่องทดลอง เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนทางหลังคา ในตัวแปรประเภทวัสดุกันความร้อนพบว่า การใช้ฉนวนใยแก้วกันความร้อนเมื่อติดตั้งไว้บนฝ้าเพดาน มีประสิทธิผลในการลดอุณหภูมิภายในกล่องทดลองดีกว่าการติดตั้งกับโครงหลังคาโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบระบบป้องกันความร้อนทางหลังคาของ จุไรพร ตุมพสุวรรณ , 2540. ที่ได้มีการนำตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนทางหลังคามาทดสอบเพื่อหาทางเลือกในการป้องกันความร้อนทางหลังคา โดยสร้างกล่องทดลองตั้งทั้งไว้กลางแจ้ง พบว่าในการทดสอบการใช้ฉนวนโดยมีตัวแปรคือ ตำแหน่งติดตั้ง และการระบายอากาศพบว่า การติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน

สามารถลดอุณหภูมิพื้นผิวได้ฝ้าเพดาน และ อุณหภูมิห้องได้มากกว่าการติดตั้งฉนวนกันความร้อนแบบขนานโครงหลังคามุมเอียงและหลังคาที่มีประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นที่ใช้งานจากมากไปน้อยได้แก่ มุมหลังคา 60° 30° 15° และ 0° ตามลำดับ และ ถ้าหากมีการเปิดช่องระบายอากาศบริเวณฝ้าชายคา ก็จะยิ่งส่งเสริมประสิทธิภาพในการระบายความร้อนออกจากช่อง attic ได้ดีขึ้น ในทางกลับกันหากเป็นเวลากลางคืนที่วัสดุหลังคามีการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ท้องฟ้า ควรมีการปิดช่องระบายอากาศฝ้าชายคา มิให้อากาศที่อุณหภูมิสูงกว่าจากภายนอกเข้ามาในช่องattic ได้

อภิรัช พรหมสิริแสง , 2544. ได้ทำการทดลองเพื่อหารูปแบบหลังคาต้นแบบเพื่อลดอุณหภูมิภายในอาคาร มีการสร้างกล่องทดลองเป็นหลังคาจำลองวางทิ้งไว้ในบริเวณที่โล่งพร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ทำการเปรียบเทียบการใช้ วัสดุหลังคา วิธีในการไหลเวียนอากาศ และ วัสดุกันความร้อน พบว่า วัสดุหลังคาที่มีมวลสารมาก หรือ มีค่าการนำความร้อนต่ำ สามารถป้องกันความร้อนได้มากที่สุดในช่วงกลางวัน แต่ในช่วงกลางคืนช่องหลังคาที่ใช้วัสดุหลังคาที่มีมวลสารน้อยกว่ากลับวัดค่าอุณหภูมิได้ต่ำกว่ากล่องหลังคาที่ใช้วัสดุมวลสารมาก และยังต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกอีกด้วย เช่นเดียวกับ การทดสอบประเภทฉนวน พบว่า กล่องทดลองที่ใช้ฉนวนแกนซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อน (R-value) สูงกว่าฉนวนใยแก้ว มีอุณหภูมิช่องใต้หลังคาต่ำกว่าฉนวนใยแก้วในช่วงกลางวัน แต่ในช่วงกลางคืนกลับมีอุณหภูมิต่ำกว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว เนื่องจาก ค่าความต้านทานความร้อนที่ค่อนข้างสูงเป็นอุปสรรคต่อการคายความร้อนกลับสู่ท้องฟ้าของหลังคา ในการเลือกใช้วัสดุหลังคาหรือฉนวนกันความร้อน ควรพิจารณาวัสดุที่มีความต้านทานความร้อนที่เพียงพอสำหรับป้องกันความร้อนในช่วงกลางวัน แต่ไม่ควรมีมวลสารมากจนปิดกั้นการระบายความร้อนออกจากช่องหลังคาในช่วงกลางคืน

งานวิจัยของวิกรม จ้านงจิตต์ , 2545. ใช้อาคารจริงพักอาศัยจริง ทำการทดลองเพื่อศึกษาการปรับปรุงหลังคาเพื่อลดความร้อนด้วยการระบายอากาศโดยใช้พัดลมช่วยปรับให้มีอัตราระบายอากาศคงที่ เปรียบเทียบกับการใช้ฉนวนกันความร้อนใยแก้วหนา 2 นิ้ว และการใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์บู๊ได้จันตัน (Truss radiant barrier) และทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิทั้งกลางวันกลางคืน พบว่าการใช้วิธีระบายอากาศในช่องหลังคามีประสิทธิภาพในการลดความร้อนค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการใช้ฉนวนใยแก้วกันความร้อนและการใช้แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจว่าในช่วงกลางคืนการใช้ฉนวนใยแก้วซึ่งเป็นฉนวนมวลสารกันความร้อนทำให้อุณหภูมิช่องใต้หลังคาสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ ช่องหลังคาที่มีและไม่มีการระบาย

อากาศ และ ช่องหลังคาที่ใช้พอลิโพรพิลีนมีเนียม เนื่องจากฉนวนมวลสารเป็นตัวการหน่วงความร้อนภายในห้องไว้ไม่ให้ระบายออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก

การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในเปลือกอาคารทั้งกลางวันและกลางคืนมีกระบวนการตรงข้ามกัน เมื่ออุณหภูมิภายในอาคารต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ความร้อนจะเข้าสู่อาคาร และเมื่อถึงเวลากลางคืนอุณหภูมิภายนอกเริ่มเย็นลง ความร้อนที่ถูกสะสมในอาคารจะถูกระบายออกตามกระบวนการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้า วัสดุกันความร้อนที่มีความเหมาะสม ต้องมีความต้านทานความร้อนที่เพียงพอสำหรับป้องกันความร้อนในเวลากลางวัน แต่ไม่ควรมีมวลสารมากจนปิดกั้นการระบายความร้อนออกจากช่องหลังคาในเวลากลางคืน

จะเห็นได้ว่า ฉนวนมวลสารกันความร้อนมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้งานในเวลากลางวัน แต่จะหน่วงให้ความร้อนระบายออกได้ช้าในเวลากลางคืน ซึ่งหากนำมาใช้กับอาคารที่มีการปรับอากาศในเวลากลางคืน อาจเป็นภาระต่อการทำความเย็นในอาคารได้ ขณะที่วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำ หรือ วัสดุฉนวนมวลสารน้อยอื่นๆแม้ว่าประสิทธิภาพในการลดความร้อนเข้าสู่อาคารในเวลากลางวันอาจไม่มากเท่าฉนวนมวลสาร แต่มีคุณสมบัติเอื้อต่อการระบายความร้อนออกจากอาคารในเวลากลางคืนมากกว่า อาจเหมาะสมกับอาคารที่ต้องการภาวะน่าสบายในตอนกลางคืนมากกว่าก็เป็นได้ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยว่า ควรทำการทำการศึกษาระสิทธิภาพระหว่างการใช้ฉนวนมวลสารหรือวัสดุกันความร้อนอื่นๆ เช่น วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อนต่ำ ด้วยการเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานและภาระในการทำความเย็นของอาคารแต่ละประเภทที่มีช่วงเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนที่จำเป็นต้องหลีกเลี่ยงความร้อนตลอดเวลาเกือบทุกฤดูกาล ประกอบกับในปัจจุบันในวงการสถาปัตยกรรมได้มีการตื่นตัวต่อกระแสอาคารเขียว ที่ตอบรับต่อการอนุรักษ์พลังงาน การออกแบบอาคารให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อม และความน่าสบายในการใช้งานในอาคาร จึงได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุกันความร้อนทั้งฉนวนมวลสาร แผ่นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำ สีป้องกันความร้อน ออกสู่ท้องตลาดเพื่อสนองความต้องการดังกล่าวอยู่ทั่วไป ซึ่งแนวทางเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกซื้อสำหรับผู้บริโภคยังมีอยู่น้อย ดังนั้น หากมีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุกันความร้อน โดยอยู่ในเงื่อนไขสภาพอากาศร้อนขึ้นของประเทศไทย และ วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์อาจได้แนวทางที่เป็นประโยชน์แก่ผู้ใช้อาคารบ้างไม่มากก็น้อย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 แนวทางการวิจัย

งานวิจัยศึกษาผลจากการใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารประเภทต่างๆ ที่มีเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน ด้วยวิธีจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE4.1 และนำค่าคุณสมบัติของการใช้วัสดุกันความร้อน เช่น ค่าความต้านทานความร้อน (R -value/ R_f) หรือ ค่าการนำความร้อน (U -value) ซึ่งหาได้จากการนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองที่แทนระบบหลังคาที่ได้รับความร้อน มาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์ ป้อนเป็นข้อมูลของระบบหลังคา จากนั้นให้โปรแกรมทำการคำนวณผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมตลอดปี แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้วัสดุกันความร้อนของอาคารแต่ละประเภทในหน่วยการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ใช้สอยตลอดทั้งปี (kWh/sq.m.-year) และ คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงของวัสดุกันความร้อนต่อไป

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิจัยเชิงปฏิบัติการด้วยกล่องทดลอง และการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม (Electric end use) ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 อาคารที่นำมาจำลองการใช้พลังงาน ได้แก่ อาคารพักอาศัย อาคารสำนักงาน อาคารโรงพยาบาล และ อาคารร้านค้า

3.3 การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลเพื่อกำหนดตัวแปรจากเอกสารทางวิชาการ ข้อมูลจากกฎหมายด้านการอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ข้อมูลด้านพลังงานและวัสดุก่อสร้างจากองค์กรต่างประเทศที่ได้มาตรฐานสากล ได้แก่ ASHREA – American Society of Heating , Refrigerating and Air-conditioning Engineers และ ASTM – American Society of Testing and Materials

3.4 ตัวแปรในการวิจัย

3.4.1 ตัวแปรต้น

3.4.1.1 วัสดุกันความร้อน

- ผนวดยกเว้นความชื้น ความหนา 2 นิ้ว หนาแน่น 24 Kg/m^3
- อลูมิเนียมพอยล์สัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อนต่ำ ค่า Emissivity = 0.05
- สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาสีขาว ค่า Reflectivity 94.6%

3.4.1.2 ระบบหลังคา

- หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน
- หลังคามีฝ้าเพดานแบบช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ แบบช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

3.4.1.3 แบบจำลองอาคารที่มีเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศแตกต่างกัน

- อาคารพักอาศัย (ใช้งานเฉพาะเวลากลางคืน)
- อาคารสำนักงาน (ใช้งานเฉพาะเวลากลางวัน)
- อาคารโรงพยาบาล (ใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง)
- อาคารร้านค้า (ใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันกลางคืน)

3.4.2 ตัวแปรตาม

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

3.4.3 ตัวแปรควบคุม

3.4.3.1 วัสดุหลังคาและฝ้าเพดานสำหรับกล่องทดลอง ใช้หลังคาเมทัลชีทและฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดหนา 1.2 ซม.

3.4.3.2 รายละเอียดอื่นสำหรับวัสดุที่ใช้ประกอบอาคารในแบบอาคารจำลองแต่ละประเภทสำหรับโปรแกรม VisualDOE 4.1

3.5 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.5.1 การศึกษาทฤษฎี แนวคิด และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5.1.1 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณเปลือกอาคาร รูปแบบของวัสดุกันความร้อนและคุณสมบัติในการกันความร้อน

3.5.1.2 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการกันความร้อน

3.5.1.3 ศึกษาวิธีการติดตั้งและใช้งานของวัสดุกันความร้อนจากมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ เช่น ASHREA และ ASTM

3.5.1.4 ศึกษารูปแบบของหลังคา ลักษณะ ขนาด ขององค์ประกอบอื่นๆ เช่น ความสูงของฝ้าเพดานจากกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการกำหนดตัวแปรเพื่อสร้างระบบหลังคาในการทดลอง

3.5.1.5 รวบรวมข้อมูลประเภทอาคารในประเทศไทยที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จากบทความทางวิชาการ ฐานข้อมูล การใช้งานอาคาร การใช้พลังงานไฟฟ้า เวลาเปิด-ปิดของระบบปรับอากาศ วัสดุผนังอาคาร และ อื่นๆ แล้วนำมาเป็นอาคารต้นแบบในการจำลองและคำนวณผลการใช้พลังงานในโปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังคาแต่ละระบบที่มีวิธีใช้วัสดุความร้อนที่ต่างกัน

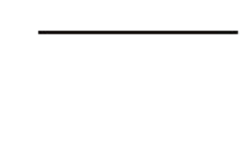
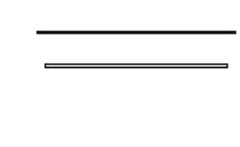
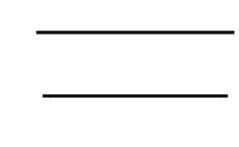




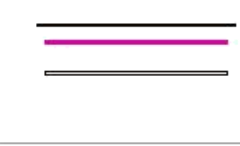
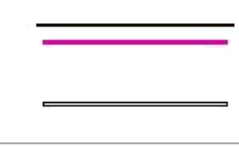

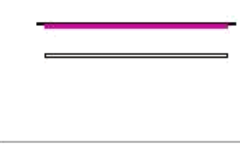
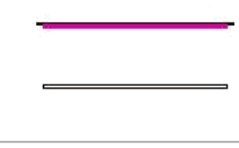
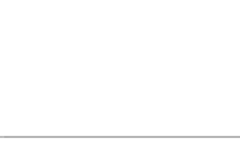


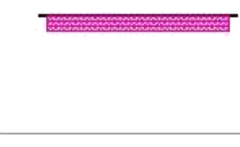
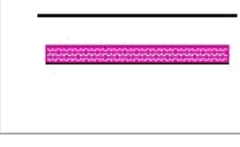
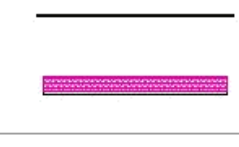
3.5.1.6 ศึกษาการใช้กล่องทดลอง และ สมการคณิตศาสตร์ ในการหาค่าคุณสมบัติของระบบหลังคา เพื่อนำมาใช้ในโปรแกรม VisualDOE 4.1

3.5.1.7 ศึกษาวิธีคิดค่าความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานวิจัย

3.5.2 ทำการกำหนดรูปแบบของระบบหลังคา

แบ่งหลังคาออกเป็น 3 ประเภท คือ หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. นำหลังคาทั้ง 3 แบบมาทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเมื่อมีการใช้ร่วมกับฉนวนใยแก้วกันความร้อน แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ สัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อนต่ำ และ สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา สรุปได้ตามตารางดังนี้

ภาพที่ 3.1 รูปแบบหลังคาและการใช้วัสดุกันความร้อนที่ทำการวิจัย

	ไม่มีฝ้าเพดาน	ช่องว่างฝ้า 10 cm	ช่องว่างฝ้า 20 cm
ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน			
RADIANT BARRIER ใต้หลังคา			
RADIANT BARRIER ลดระดับ 5 cm.			
SILICA COATING ทาใต้หลังคา			
SILICA COATING ทาใต้ฝ้าเพดาน			
ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว			

3.5.3 ทำการรวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารที่จะใช้จำลองผลการใช้พลังงาน

การวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลและรูปแบบของอาคารจากเอกสารทางวิชาการซึ่งได้ศึกษาลักษณะอาคารซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทยมาเป็นต้นแบบ(Reference Building) ในการจำลองผลการใช้พลังงานเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังคา นำข้อมูลมาวิเคราะห์และปรับเปลี่ยนเงื่อนไขบางประการให้เหมาะสมกับประโยชน์ใช้สอยในปัจจุบัน และใช้วิธีป้อนข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารแต่ละประเภทลงในโปรแกรม VisualDOE 4.1 ข้อมูลดังกล่าวได้แก่ ระยะเวลาเปิด-ปิดเครื่องปรับอากาศในแต่ละวัน อุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ ประเภทและประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลัง และ อุปกรณ์ไฟฟ้าแสงสว่าง ตลอดจน ตารางเวลาที่กำหนดจำนวนและความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอาคาร 4 ประเภท ดังนี้

3.5.3.1 บ้านพักอาศัย

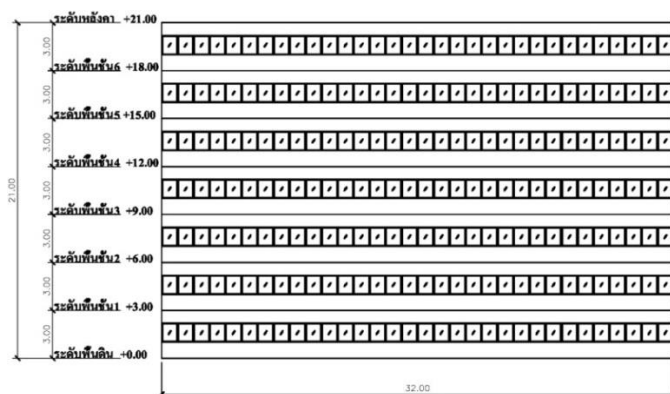
ได้อาคารพักอาศัยต้นแบบจากงานวิจัยการพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว (อรรจน์ เศรษฐบุตฺร, 2549)



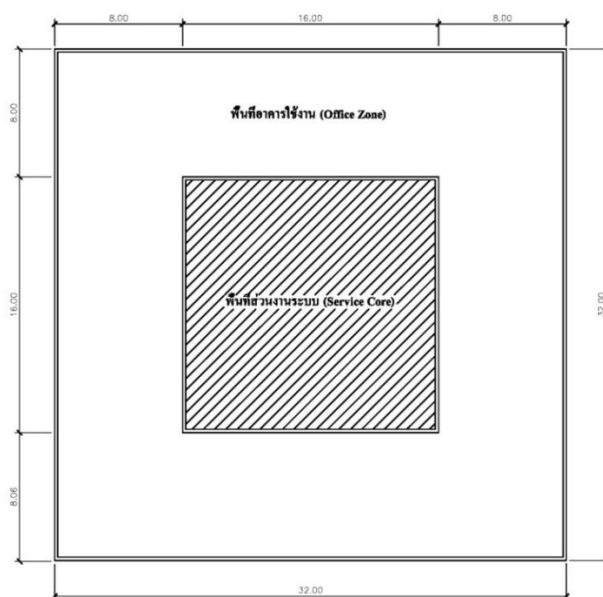
ภาพที่ 3.2 อาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ

3.5.3.2 อาคารสำนักงาน

อาคารสำนักงานต้นแบบ ได้ตัวอย่างจากงานวิจัยการจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นอาคารที่มีพื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร มีความสูงไม่เกิน 7 ชั้น มีความสูงไม่เกิน 23 เมตร ซึ่งมีจำนวนมากในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล (อรรจน์ เศรษฐบุตฺร, 2552) ในงานวิจัยนี้ใช้เป็นอาคารต้นแบบแทนอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวัน



Elevation



Ground floor plan

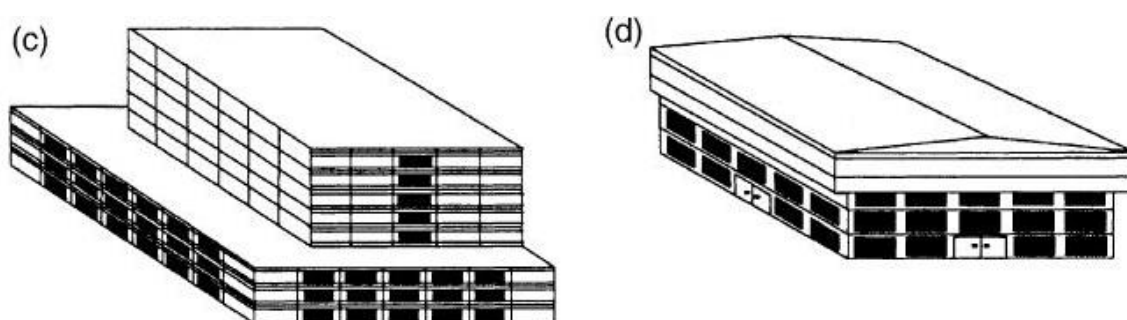
ภาพที่ 3.3 อาคารสำนักงานต้นแบบ

3.5.3.3 อาคารโรงพยาบาล

อาคารโรงพยาบาลตัวอย่าง ใช้เป็นต้นแบบสำหรับจำลองผลการใช้พลังงานของอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ได้จากงานวิจัย The technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand (S.Chirattananon, 2003) ซึ่งมีการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของอาคารแต่ละประเภททั้งภาครัฐและเอกชน เป็นอาคารต้นแบบสำหรับจำลองการใช้พลังงานในโปรแกรม DOE-2 เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงอาคารตามกฎหมายอนุรักษ์พลังงานในประเทศไทย

3.5.3.4 อาคารร้านค้า

ใช้สำหรับจำลองผลการใช้พลังงานสำหรับอาคารที่มีระยะเวลาใช้งาน เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันต่อเนื่องถึงเวลากลางคืน โดยได้อาคารต้นแบบจากงานวิจัยฉบับเดียวกับอาคารโรงพยาบาล



ภาพที่ 3.4 อาคารโรงพยาบาลต้นแบบและอาคารร้านค้าต้นแบบ

3.5.4 การเปรียบเทียบใช้พลังงานด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุกันความร้อนในโปรแกรมคำนวณ VisualDOE 4.1

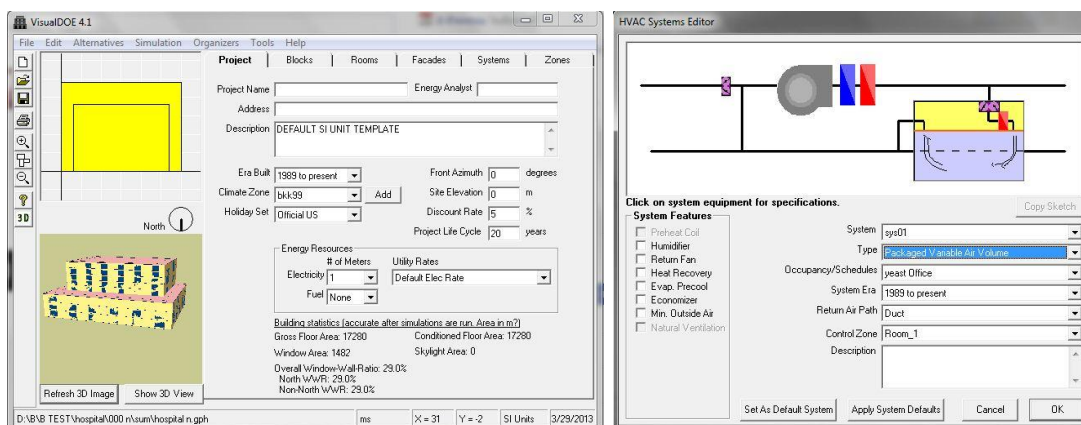
งานวิจัยชิ้นนี้เน้นแนวทางการศึกษาเชิงจำลองสถานการณ์จริง ใช้อาคารต้นแบบ 4 ประเภทอ้างอิงผลการใช้พลังงาน โดยป้อนค่าคุณสมบัติของระบบหลังคาทั้ง 17 กรณีแล้วจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา และนำผลการใช้พลังงานที่ได้มาเปรียบเทียบต่อไป

3.5.4.1 โปรแกรม VisualDOE 4.1

เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณผลการใช้พลังงานและภาระการทำความเย็นในอาคาร โดย Lawrence Berkley Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับการยอมรับจากนักวิจัย และเป็นเครื่องมือในการช่วยพัฒนาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับกฎหมายในการอนุรักษ์พลังงานในหลายประเทศทั่วโลก สามารถคำนวณผลการใช้พลังงานแยกตามประเภทได้ละเอียดถึงรายชั่วโมงในหนึ่งปี โดยอาศัยฐานข้อมูลทางสภาพอากาศเฉลี่ยรายชั่วโมงจากกรมอุตุนิยมวิทยา (ประวิตร กิตติชาญธีระ , 2553) สามารถจัดทำรายงานผลเป็นไฟล์คอมพิวเตอร์ในรูปแบบต่างๆได้

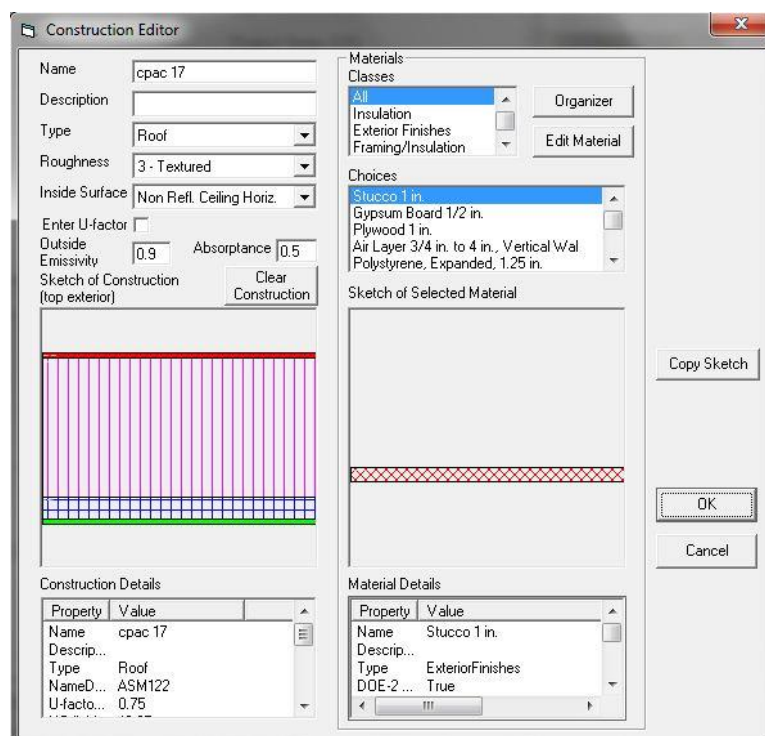
องค์ประกอบหลักในการจำลองผลการใช้พลังงานของ VisualDOE 4.1 แบ่งออกเป็น (1)LOAD คำนวณภาระในการทำความเย็น (2)SYSTEM (3)PLANT และ (4)ECONOMICS ซึ่งใช้คำนวณรายจ่ายอันเกิดจากการใช้พลังงาน

การคำนวณการใช้พลังงานและภาระในการทำความเย็นอาศัยปัจจัยทั้งภายนอกและภายในอาคาร ปัจจัยภายนอกอาคาร ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนจากสิ่งแวดล้อมสู่เปลือกอาคารทั้งผนังและหลังคา อิทธิพลจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ การรั่วซึมของอากาศ ส่วนปัจจัยภายในอาศัยข้อมูลการใช้งานภายในอาคาร ความร้อนที่เกิดจากความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ ความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังและไฟฟ้าแสงสว่าง เป็นต้น ข้อมูลทั้งหมดนี้จะทำให้โปรแกรมระบุได้ว่า อาคารต้นแบบควรเลือกใช้ อุปกรณ์ปรับอากาศประเภทใดและประสิทธิภาพเท่าใด จากนั้นก็จะทำการคำนวณผลการใช้พลังงานในอาคารออกมา



ภาพที่ 3.5 รูปแบบโปรแกรม VisualDOE 4.1

สำหรับงานวิจัยนี้ มุ่งศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบหลังคาที่ใช้วัสดุความร้อนที่มีค่าคุณสมบัติแตกต่างกัน การจำลองอาคารของโปรแกรม VisualDOE4.1 มีวิธีสร้างทางเลือกของเปลือกอาคารและวัสดุกันความร้อน ด้วยการป้อนค่าคุณสมบัติในการนำความร้อนของวัสดุ ได้แก่ การใช้วิธีใส่ค่าความต้านทานความร้อน (R value - thermal resistance - m^2K/W) และความหนาของวัสดุแล้วนำมาประกอบกันเป็นเปลือกอาคารที่ต้องการ หรือใช้วิธีใส่ค่าการนำความร้อนรวม(overall U factor method) หากทราบค่าการนำความร้อนรวม(U value) หรือค่าต้านทานความร้อนรวม($\sum R$ หรือ R)ของเปลือกอาคาร เป็นต้น

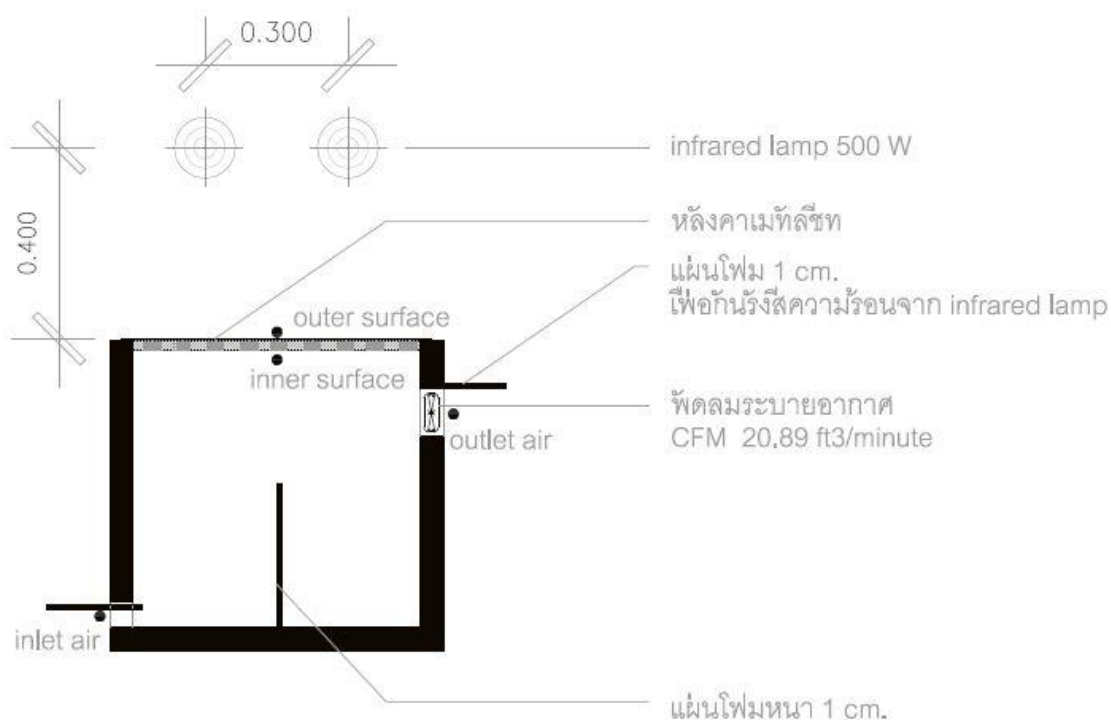


ภาพที่ 3.6 ฟังก์ชันสำหรับป้อนข้อมูลรายละเอียดเปลือกอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1

3.5.4.2 การใช้กล่องทดลองและสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t) ของระบบหลังคา

เพื่อนำค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) ใส่ข้อมูลเป็นคุณสมบัติของหลังคาแต่ละแบบในโปรแกรม VisualDOE 4.1 แต่เนื่องจากค่าต้านทานความร้อนวัสดุหลังคาที่ระบุในพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 แก้ไขโดยพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552 ไม่ครอบคลุมรูปแบบของการใช้วัสดุกันความร้อนในงานวิจัยและวัสดุกันความร้อนบางชนิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ค่อนข้างใหม่ในท้องตลาด เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ที่มีการติดตั้งแบบลดระดับหย่อนลงมา หรือ สีกันความร้อนแบบใหม่อนุภาคซิลิกา ดังนั้นจึงใช้กล่องทดลองเพื่อจำลองหลังคาที่ได้รับความร้อนจาก Sun simulator วัดค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากจุดต่างๆในกล่องทดลองแล้วนำมาเข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความต้านทานความร้อนรวม($\sum R$ หรือ R_t) โดยใช้กล่องทดลองตามรูปแบบที่ได้ศึกษาจาก P.C.Chang, 2008. และ T.Soubdhan, 2005.

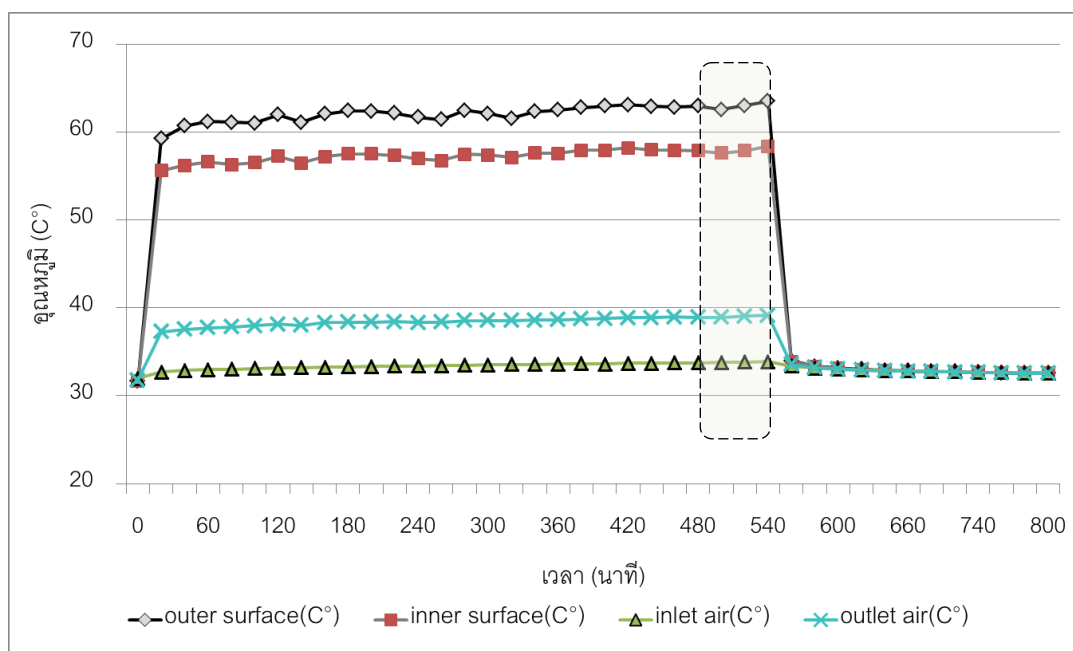
ดังภาพ



ภาพที่ 3.7 รายละเอียดดกล่องทดลอง (ที่มา : ผู้วิจัย)

กล่องทดลองทำจากโพลีสไตรีนความหนาแน่น 1 ปอนด์ตารางนิ้ว หนา 2 นิ้ว ที่วางภายใน .60x.60x.60 ลบ.ม. เจาะช่องอากาศเข้า(inlet) และช่องอากาศออกติดพัดลมระบายอากาศที่มีค่า CFM = 20.89 ft³/minute ถัดลงมา 10 ซม. จากวัสดุกันความร้อน ด้านบนสุดของกล่องเป็นพื้นที่วางหลังคาให้ความร้อนแก่หลังคาด้วย Sun simulator โดยใช้ไฟอินฟราเรด 500 W จำนวน 2 หลอด ซึ่งวัดค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ยบนพื้นผิวหลังคาด้วย Solar Power ได้ 1095 W/sq.m. ซึ่งใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของพลังงานจากแสงอาทิตย์ (1000 – 2000 W/sq.m.)

ใช้เครื่องเก็บข้อมูลอุณหภูมิ HOBO U12 Temperature/Relative Humidity/2 External Channel Data Logger - U12-013 พร้อมสาย Probe วัดอุณหภูมิที่พื้นผิวบนหลังคา พื้นผิวล่างสุดของหลังคา/วัสดุกันความร้อน/ฝ้าเพดาน ช่องอากาศเข้า และบริเวณกึ่งกลางพัดลมระบายอากาศออก ตั้งค่าวัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที



ภาพที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากกล่องทดลอง (ที่มา : ผู้วิจัย)

บริเวณเส้นประคือช่วง 60 นาทีก่อนปิดไฟ

ซึ่งจะนำข้อมูลมาใช้ในการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อน

ทำการทดลองในห้องปิดที่มีอุณหภูมิคงที่และไม่ได้รับอิทธิพลจากแสงแดดหรือสภาวะอากาศภายนอกอื่นๆ

เปิดไฟนาน 9 ชั่วโมงเพื่อรอให้อุณหภูมิตามจุดต่างๆอยู่ในภาวะคงที่(กราฟเป็นเส้นตรง) จากนั้นมานำอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ เข้าสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า R_i เฉลี่ย โดยยึดหลักว่าในภาวะคงที่พลังงานความร้อนของหลอดไฟอินฟราเรดที่เข้าสู่กล่องทดลองผ่านระบบหลังคา (Q_1) จะมีความสมดุลกับพลังงานความร้อนที่พัดลมระบายอากาศไหลเวียนออกจากกล่อง (Q_2) ดังนี้

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

Q_1 คือ ปริมาณความร้อนจากหลอดไฟที่เข้าสู่กล่องทดลอง (BTU/h)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (Btu/hr-ft²·°F)

A คือ พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน ในที่นี้คือ พื้นที่หลังคาที่ใช้ในกล่องทดลอง(ft²)

T_o คือ อุณหภูมิที่สูงกว่า (°F) หรือ อุณหภูมิผิวชั้นนอกสุดของหลังคา

T_i คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ($^{\circ}\text{F}$) ในที่นี้คืออุณหภูมิผิวชั้นในสุดของหลังคาเองหรือผิววัสดุกันความร้อนหรือผิวฝ้าเพดาน

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

CFM คือ ปริมาณการไหลของอากาศในกล่องทดลองที่เกิดจากพัดลมระบายอากาศที่ใช้ ($\text{ft}^3/\text{minute}$)

1.08 คือ ค่าคงที่

$T_{\text{inlet air}}$ คือ อุณหภูมิวัด ณ ช่องอากาศเข้า – อุณหภูมิห้อง ($^{\circ}\text{F}$)

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

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

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

เมื่อเข้าสมการแล้ว จะทราบค่า U ซึ่งอัตราส่วนผกผันของค่า U จะเท่ากับค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t) จากนั้น นำค่า R_t ที่ได้ไปใช้ในการป้อนข้อมูลเปลือกอาคารสำหรับอาคารต้นแบบในโปรแกรม VisualDOE4.1 ต่อไป

3.5.4.3 การตั้งค่าสภาวะการใช้งานของอาคารต้นแบบในโปรแกรม

VisualDoe4.1

▪ บ้านพักอาศัย

อ้างอิงข้อมูลการใช้งาน ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้า ตามงานวิจัยการพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารในอาคารบ้านเดี่ยว ที่ศึกษา รูปแบบบ้านพักอาศัยในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และ ปริมาณพล ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารบ้านพักอาศัยต้นแบบ

พื้นที่ใช้งาน	บ้านพักอาศัย			
	ห้องนั่งเล่น	ห้องน้ำ	โถงบันได	ห้องนอน
ขนาด(ตร.ม.)	90	16	22	90
รวม(ตร.ม.)	218			
พื้นที่ปรับอากาศ	90		22	90
รวม(ตร.ม.)	202			
ระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศ				
วันธรรมดา	19.00 - 23.00		19.00 - 23.00	23.00 - 6.00
วันหยุดเสาร์ - อาทิตย์	18.00 - 22.00		18.00 - 22.00	22.00 - 8.00
พื้นที่เปลือกอาคารรวม(ตร.ม.)	280			
WWR (window to wall ratio)	30%			
WWR ในแต่ละทิศ	30%			
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด(ตร.ม.)	78			
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ(ตร.ม.)	184			
ปริมาณผู้ใช้อาคาร(คน)	4			
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (w/sq.m.)	8.6			
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (w/sq.m.)	7.5			
ระบบปรับอากาศ	Residential System			

■ อาคารสำนักงาน

วิเคราะห์ข้อมูลมาจาก งานวิจัยการจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีการตั้งค่าเก็บข้อมูลตามพื้นที่การใช้งานจริงในแต่ละส่วนของอาคารสำนักงาน จำแนกได้เป็น

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารสำนักงานต้นแบบ

	สำนักงาน	
จำนวนชั้น	7	
พื้นที่ใช้งาน	พื้นที่สำนักงาน	พื้นที่งานระบบ (CORE)
ขนาด(ตร.ม.)	5376	1792
รวม(ตร.ม.)	7168	
พื้นที่ปรับอากาศ	5376	
รวม(ตร.ม.)	5376	
ระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศ		
วันธรรมดา	19.00 - 23.00	19.00 - 23.01
วันหยุดเสาร์ - อาทิตย์		
พื้นที่เปลือกอาคารรวม(ตร.ม.)	2688	
WWR (window to wall ratio)	40%	
WWR ในแต่ละทิศ	40%	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด(ตร.ม.)	1075	
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ(ตร.ม.)	1618	
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตร.ม./คน)	7	
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (w/sq.m.)	15.9	
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (w/sq.m.)	15.9	
ระบบปรับอากาศ	Package variable air volumn	

▪ โรงพยาบาล

วิเคราะห์ข้อมูลมาจาก งานวิจัย The technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand มีรายละเอียดการใช้งาน ดังนี้

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารโรงพยาบาลต้นแบบ

	โรงพยาบาล
จำนวนชั้น	8
พื้นที่ใช้งานรวม(ตร.ม.)	17280
พื้นที่ปรับอากาศรวม(ตร.ม.)	17280
ระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศ	
วันธรรมดา	24 ชั่วโมง
วันหยุดเสาร์ - อาทิตย์	24 ชั่วโมง
พื้นที่หลังคา(ตร.ม.)	1728
WWR (window to wall ratio)	29%
WWR ในแต่ละทิศ	29%
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด(ตร.ม.)	1553
ค่า shading coefficient ของกระจก	0.64
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ(ตร.ม.)	3803
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตร.ม./คน)	10
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (w/sq.m.)	3.36
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (w/sq.m.)	10.67
ระบบปรับอากาศ	Constant air volume system
Sensible heat gain per occupant (W)	73
Latent heat gain per occupant (W)	59

■ อาคารร้านค้า

ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลอาคารร้านค้าต้นแบบของงานวิจัย The technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand มีรายละเอียดการใช้งาน ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลสภาวะการใช้งานของอาคารร้านค้าต้นแบบ

	อาคารร้านค้า
จำนวนชั้น	3
พื้นที่ใช้งานรวม(ตร.ม.)	8280
พื้นที่ปรับอากาศรวม(ตร.ม.)	8281
ระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศ	
วันธรรมดา	24 ชั่วโมง
วันหยุดเสาร์ - อาทิตย์	24 ชั่วโมง
พื้นที่หลังคารวม(ตร.ม.)	2760
WWR (window to wall ratio)	38%
WWR ในแต่ละทิศ	38%
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นช่องเปิด(ตร.ม.)	1208
ค่า shading coefficient ของกระจก	0.96
พื้นที่เปลือกอาคารที่เป็นผนังทึบ(ตร.ม.)	1972
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร (ตร.ม./คน)	20
ปริมาณการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า EPD (w/sq.m.)	17.48
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง LPD (w/sq.m.)	25.05
ระบบปรับอากาศ	Constant air volumn system
Sensible heat gain per occupant (W)	73
Latent heat gain per occupant (W)	59

3.5.4.4 การวิเคราะห์ผลการใช้พลังงาน

พิจารณาค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่อตารางเมตรในระยะเวลาใช้งานหนึ่งปี (kWh/sq.m.-.year) ซึ่งประกอบด้วยค่าการใช้พลังงานทำความเย็นจากเครื่องปรับอากาศ และเครื่องเป่าลม (Cooling and Fan) การใช้ไฟฟ้าแสงสว่าง (Lighting) และ อุปกรณ์ไฟฟ้า (Equipment) โดยเปรียบเทียบภายในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน หลังคามีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ หลังคามีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ในอาคารแต่ละประเภท

3.5.5 การพิจารณาด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period Analysis) และ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life cycle cost) 20 ปี ของอาคาร

3.5.5.1 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Pay back period - PB)

สามารถคำนวณได้จากสูตร

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

3.5.5.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (Life cycle cost - LCC)

$$\text{Life cycle cost (ต่อปี)} = \text{ค่าใช้จ่ายในการลงทุน} + \text{ค่าบำรุงรักษา} + \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ดอกเบี้ย} + \text{ค่าเงินจากอัตราเงินเฟ้อ} + \text{อื่นๆ}$$

การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน หรือ ค่าต้นทุนตลอดอายุวัฏจักร ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ มูลค่าของการลงทุน (Owning) และ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดอายุการใช้งาน (Operating) โดยมีสูตรคำนวณ ดังต่อไปนี้

$$\text{Life cycle cost} = \text{ค่าก่อสร้างในปีเริ่มแรก} + \text{PV}$$

$$\text{PV} = \frac{\text{PV}_n}{(1 + rn)^n}$$

เมื่อ PV คือ มูลค่าปัจจุบันของค่าไฟฟ้าในปีที่ n (บาท)

R_n คือ อัตราดอกเบี้ยในปีที่ n

งานวิจัยนี้คิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุโครงการ 20 ปี จะได้สูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{PV} = \frac{\text{PV}_1}{(1 + r_1)^1} + \frac{\text{PV}_2}{(1 + r_2)^2} + \dots + \frac{\text{PV}_{20}}{(1 + R_{20})^{20}}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการรวบรวมผลทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

- ผลการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง
- ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองอาคารโดยใช้โปรแกรม VisualDOE4.1
- การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลจากการศึกษาด้วยกล่องทดลอง



ภาพที่ 4.1 การศึกษาด้วยกล่องทดลอง (ที่มา : ผู้วิจัย)

ให้ความร้อนกับระบบหลังคาเหนือกล่องทดลองด้วยหลอดไฟอินฟราเรด 500 W จำนวน 2 หลอดติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่พื้นผิวบนของหลังคา (outer surface) พื้นผิวล่างสุด (inner surface) ของหลังคา (แผ่นหลังคา / วัดดูกันความร้อน / ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด) ช่องติดตั้งพัดลมระบายอากาศออก(outlet) และช่องอากาศเข้า (inlet-แทนค่าอุณหภูมิห้อง) ตามลำดับ ใช้เวลาเปิดไฟ 9 ชั่วโมง และ ปิดไฟ 4 ชั่วโมง นำข้อมูลอุณหภูมิมาเปรียบเทียบ และใช้ข้อมูลช่วงก่อนปิดไฟ 1 ชั่วโมง

ซึ่งคุณสมบัติของตำแหน่งวัดอุณหภูมิทั้ง 4 จุด มีความคงที่มากำหนดหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบหลังคา (R_p) ตามสมการ

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

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

4.1.1 ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

ตำแหน่งวัดอุณหภูมิความร้อนอยู่ใต้หลังคา ดังนี้

หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน					
1	ไม่ใช้วัสดุ กันความร้อน	2	RADIANT BARRIER ใต้หลังคา	3	RADIANT BARRIER ลดระดับ 5 ซม.
					
4	SILICA COATING ทาใต้หลังคา	5	ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ติดใต้หลังคา		
					

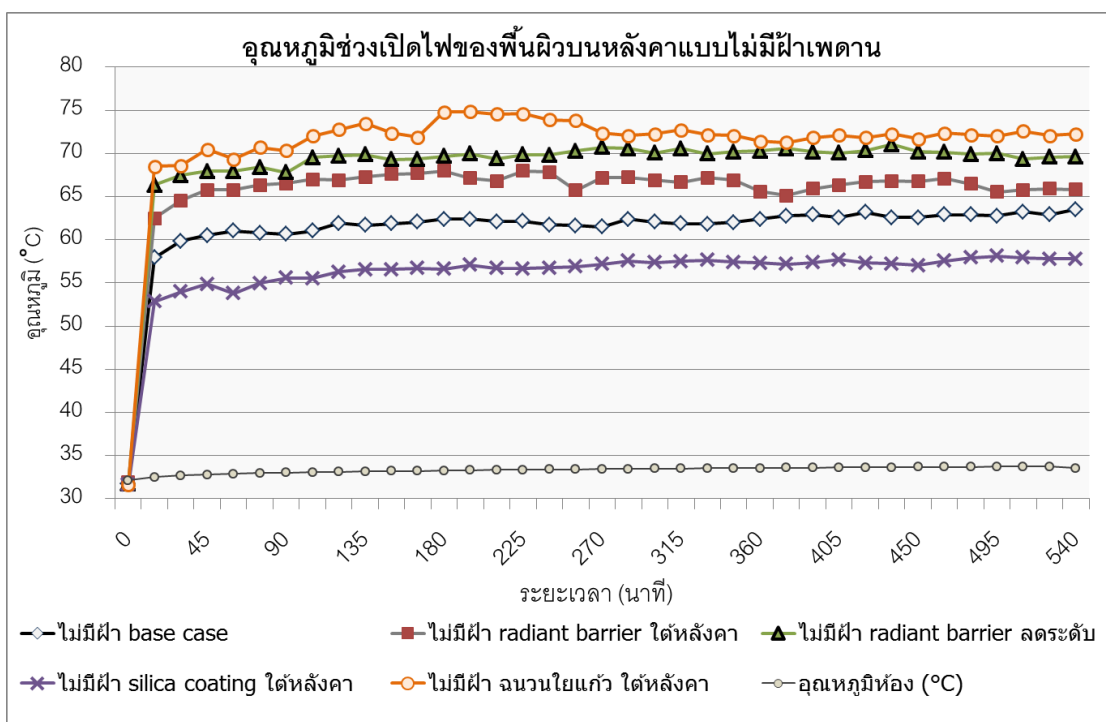
ภาพที่ 4.2 ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน (ที่มา : ผู้วิจัย)

4.1.1.1 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ของหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t -sq.m. K/W) ที่คำนวณได้ ของหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน				
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ใต้หลังคา
อุณหภูมิพื้นผิวบน ($T_o - C^\circ$)	63.00	65.85	69.69	57.84	72.26
อุณหภูมิพื้นผิวล่าง ($T_i - C^\circ$)	57.97	49.24	38.02	53.13	39.33
อุณหภูมิอากาศเข้า ($T_{inlet} - C^\circ$)	33.82	33.86	33.22	33.98	33.75
อุณหภูมิอากาศออก ($T_{outlet} - C^\circ$)	38.98	37.18	35.44	39.95	35.54
$T_o - T_i (C^\circ)$	5.03	16.61	31.67	4.70	32.93
$T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air} (C^\circ)$	5.17	3.32	2.22	5.97	1.80
$Q_1(W)$	62.34	40.09	26.77	72.09	21.70
$R_t (m^2.C^\circ/W)$	0.03	0.15	0.43	0.02	0.55

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ในหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีค่า R_t ที่คำนวณได้สูงสุด รองลงมาคือ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วแบบลดระดับมีช่องว่างอากาศ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วแบบติดใต้หลังคา หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน และ หลังคาที่ทำสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาสีขาวให้ค่า R_t ต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในกล่องทดลอง ตามแผนภูมิ 4.1 , 4.2 และ 4.3 ดังนี้

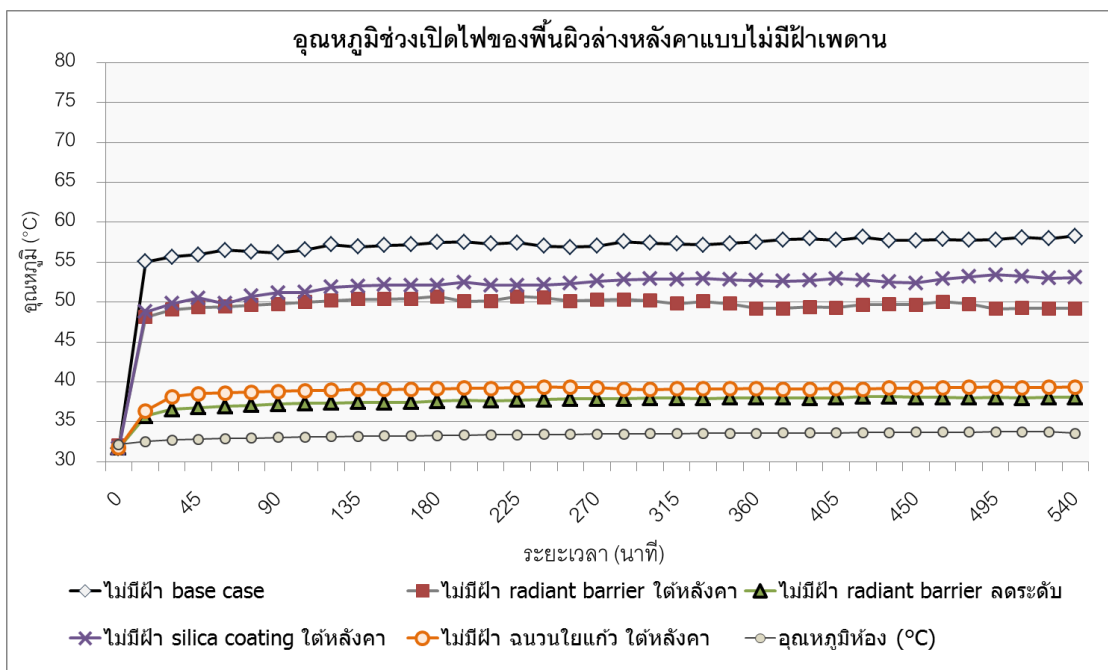


แผนภูมิที่ 4.1 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

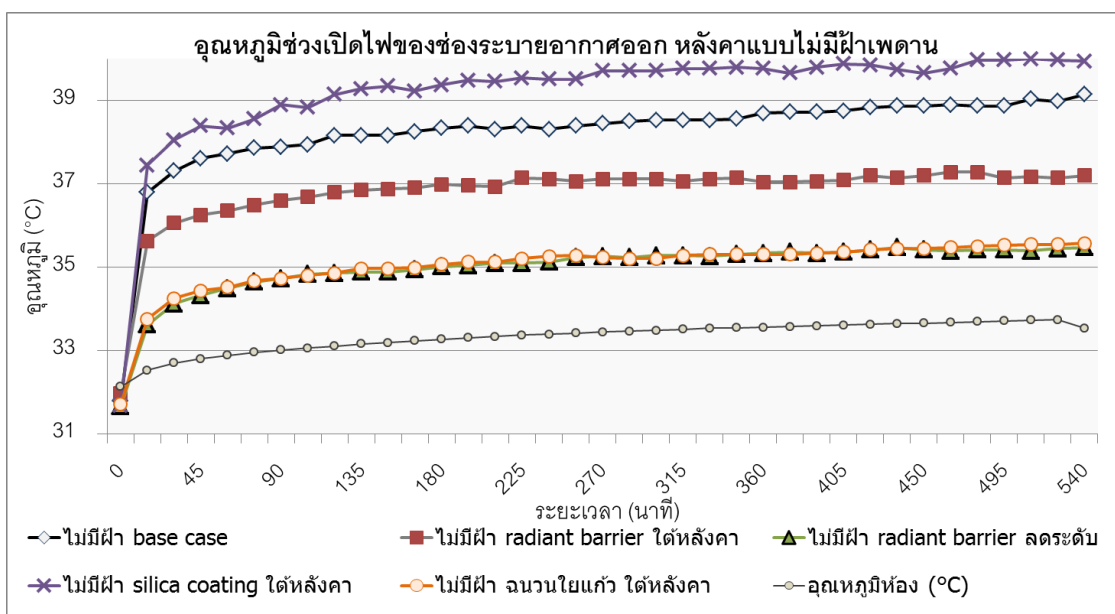
หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วชนิดระดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วชนิดติดด้านใต้ วัดได้ค่าอุณหภูมิพื้นผิวบนหลังคาค่อนข้างสูงและได้ค่าอุณหภูมิพื้นผิวล่างของระบบหลังคาค่อนข้างต่ำ หากพิจารณาจากสูตรคำนวณการนำความร้อน $Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$ จะได้ว่าค่า $U \propto Q/(T_o - T_i)$ และ $R \propto (T_o - T_i)/Q$ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเปลือกอาคารชั้นนอกและเปลือกอาคารชั้นใน $(T_o - T_i)$ มีความแตกต่างกันมากเท่าไร ก็จะส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อน (R - value / R_i) สูงขึ้น การที่พื้นผิวบนและพื้นผิวล่างสุดของหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วชนิดระดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วชนิดติดด้านใต้ มีค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก เป็นเพราะมีค่าความต้านทานความร้อนสูงนั่นเอง

สำหรับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนซึ่งได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมมากกว่า หลังคาที่ใช้วัสดุกันความร้อนอนุภาคซิลิกา แม้ว่าอุณหภูมิพื้นผิวล่างของหลังคาจะสูงกว่า แต่อุณหภูมิที่ช่องระบายอากาศออกกลับต่ำกว่า เนื่องจากวัสดุหลังคาเมทัลชีทมีพื้นผิวที่มีความมันวาวแบบโลหะ อันเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุแผ่รังสีความร้อนต่ำ ผิวด้านล่างหลังคาจึงมีอุณหภูมิสูงจากการกักความร้อนไว้กับตัว ส่วนหลังคาที่ทำวัสดุกันความร้อนไว้ด้านใต้ มีลักษณะเป็นสีขาวพื้นด้าน ซึ่งเมื่อนำมาทากับหลังคาเมทัลชีทหรือแผ่นยิปซัมบอร์ดทำให้ค่าการคายความร้อนออกมาค่อนข้างสูง(ดูผลทดสอบการทาสีอนุภาคซิลิกา ภาคผนวก ก) และเมื่อพิจารณาจากสมการ $Q =$

CFM • 1.08 • (T_{outlet air} - T_{inlet air}) พบว่า T_{outlet air} - T_{inlet air} ของหลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกา มีค่าสูงกว่า T_{outlet air} - T_{inlet air} ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน จึงทำให้กล่องทดลองของ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกา ได้รับปริมาณความร้อน (Q) มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิของ ระบายอากาศที่หลังคาทำสีอนุภาคซิลิกาสูงกว่ากรณีอื่นๆตามแผนภูมิ 4.3

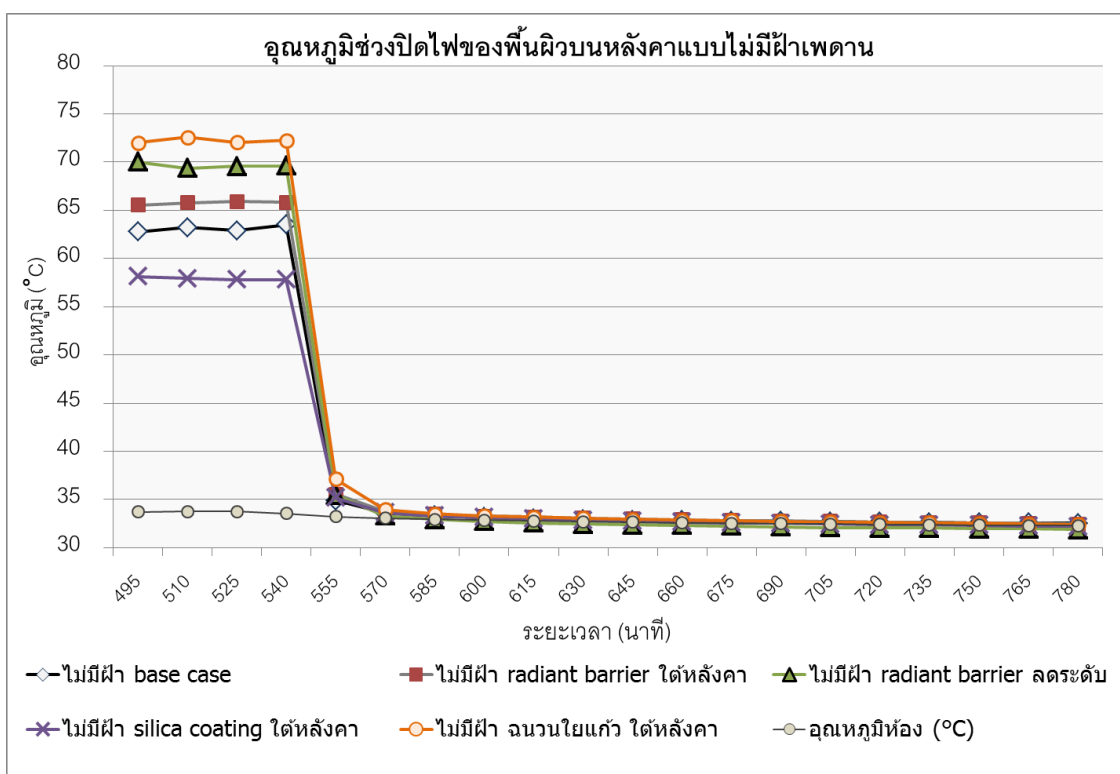


แผนภูมิที่ 4.2 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวล่างหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

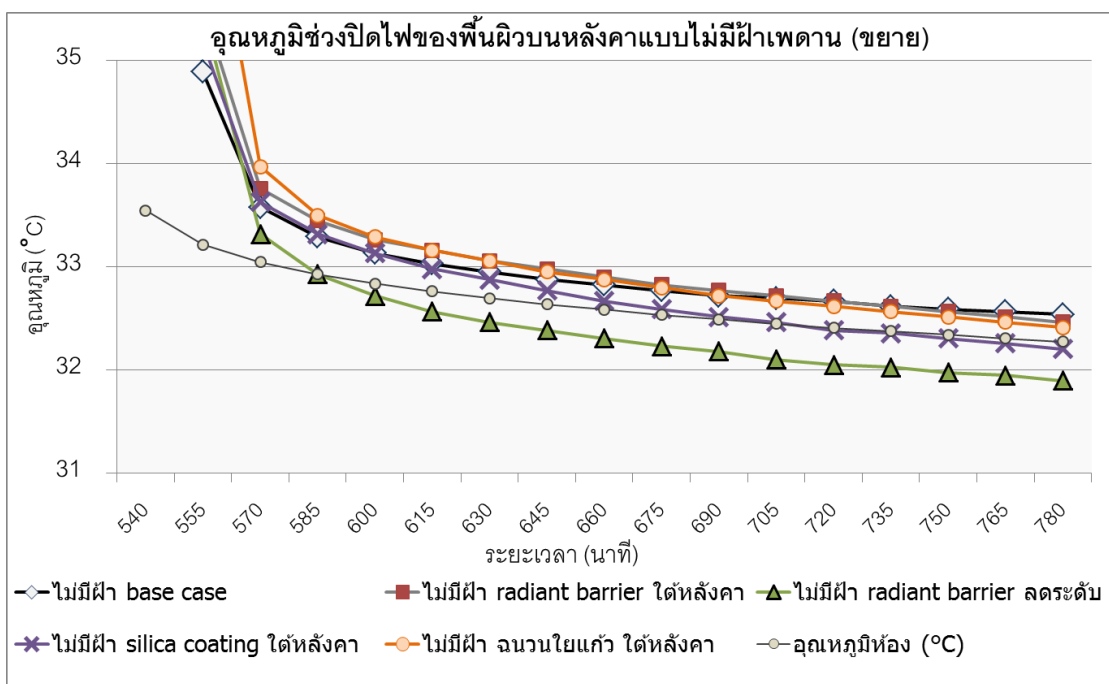


แผนภูมิที่ 4.3 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

4.1.1.2 อุณหภูมิช่วงปิดไฟ

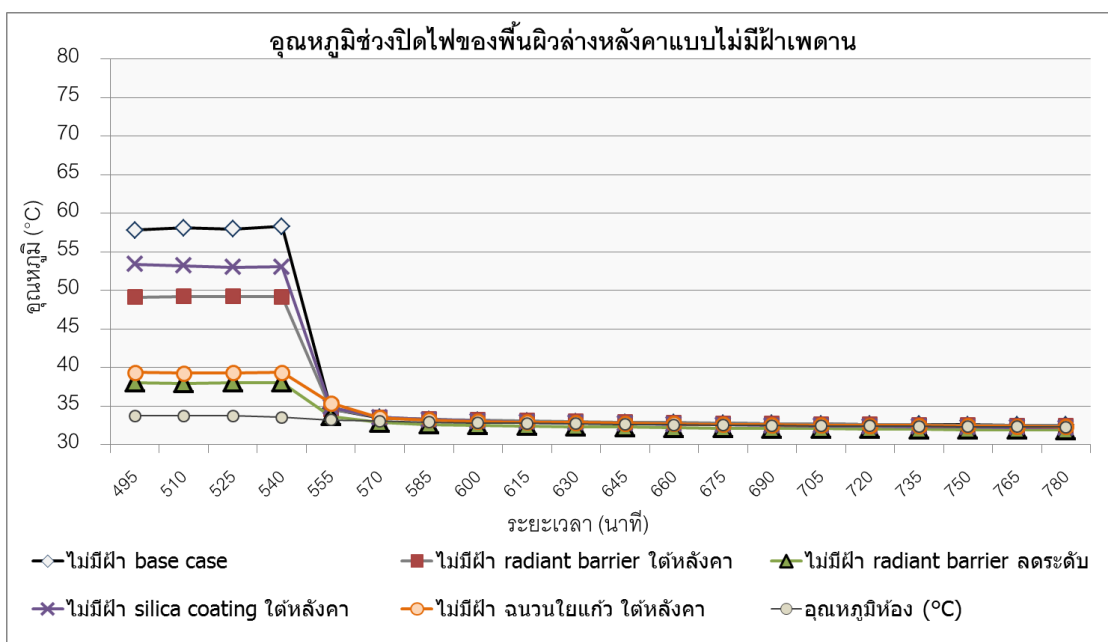


แผนภูมิที่ 4.4 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

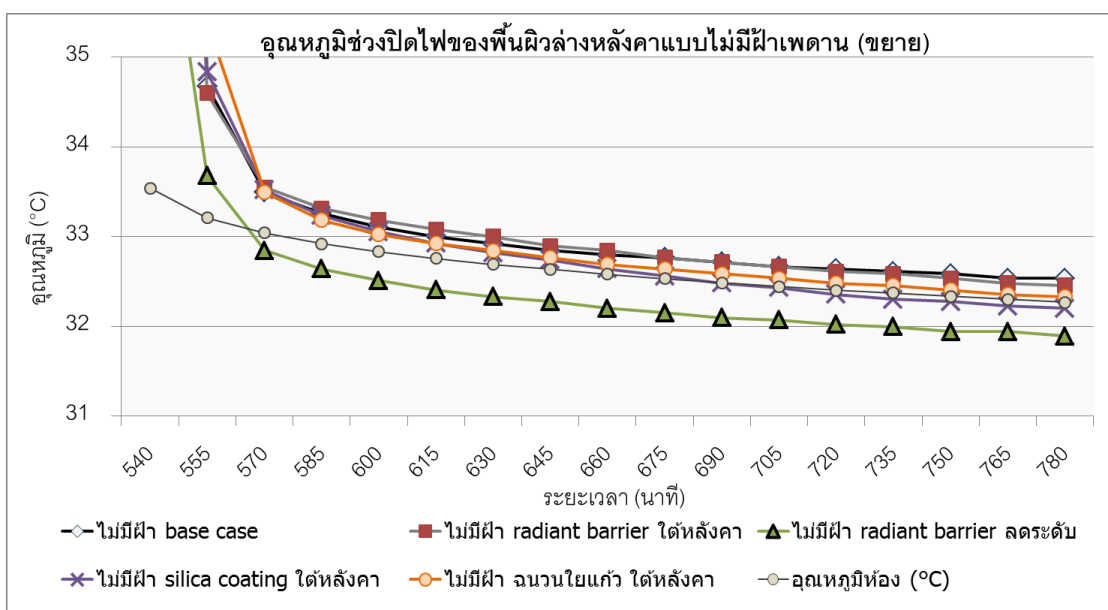


แผนภูมิที่ 4.5 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน(ขยาย)

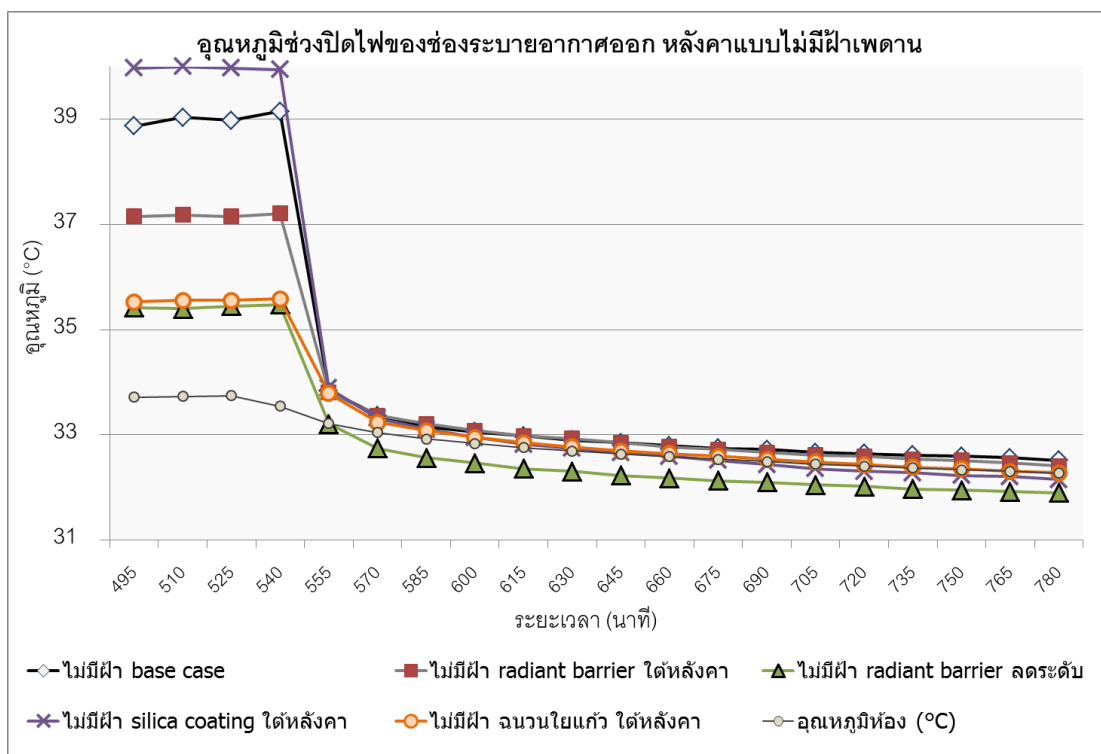
หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอยล์ลระดับ หลังคาที่ทำสีอนุภาคซิลิกา มีอุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบนและล่าง ลดระดับลงมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ซึ่งหลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอยล์แบบ ติดใต้หลังคา หลังคาเมทัลชีทที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน มีคุณสมบัติแผ่รังสีออกต่ำ และ หลังคาที่ใช้ ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีการหน่วงความร้อนได้ด้วยมวลสาร การคายความร้อนจึงช้าลงกว่ากรณี อื่น สอดคล้องกับอุณหภูมิที่วัดได้จากช่องระบายอากาศออก



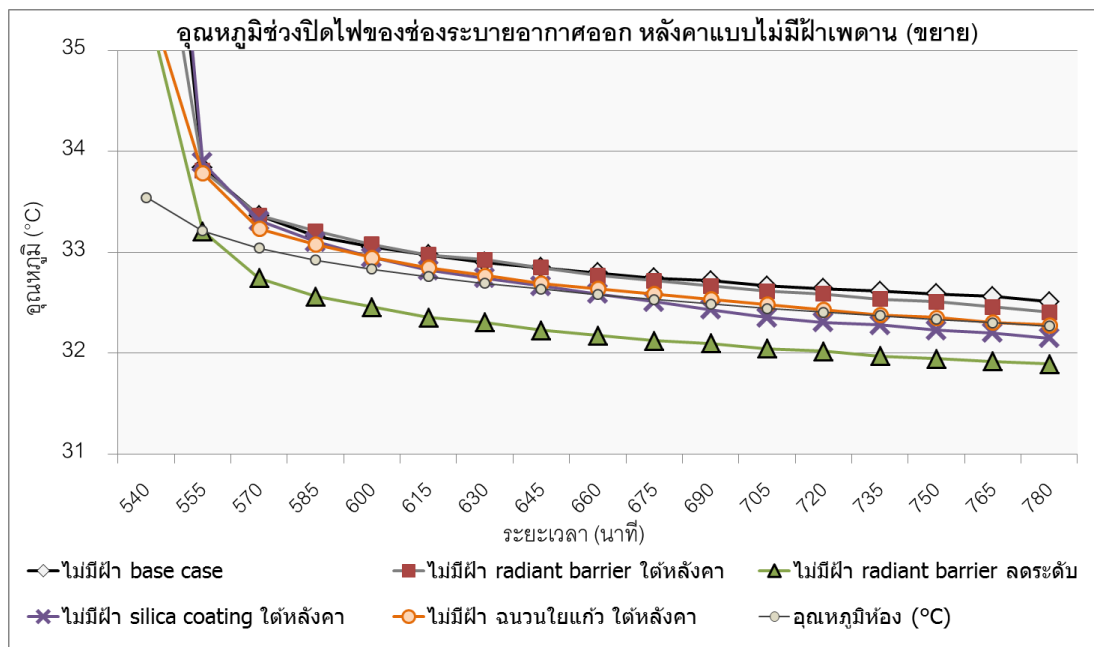
แผนภูมิที่ 4.6 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน



แผนภูมิที่ 4.7 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน(ขยาย)



แผนภูมิที่ 4.8 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน



แผนภูมิที่ 4.9 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน(ขยาย)

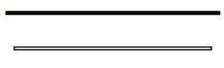
จากแผนภูมิข้างต้น จะเห็นได้ว่าขณะเปิดไฟ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว แม้จะมีค่าต้านทานความร้อนสูงช่วยทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิด้านนอกและด้านในของเปลือก

อาคารสูง แต่เมื่อถึงเวลาปิดไฟ หลังคาที่มีมวลสารน้อยกว่า เช่น หลังคาที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมพอยล์ลดระดับ หลังคาที่ทำสื่อนุภาคซิลิกาด้านใต้ กลับเย็นเร็วกว่า ส่วนหลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดใต้หลังคาโดยตรงมีคุณสมบัตินำความร้อนระหว่างอลูมิเนียมพอยล์กับแผ่นหลังคาจึงเย็นช้ากว่านั่นเอง

หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดตั้งแบบลดระดับเว้นช่องว่าง 5 ซม. ทำให้เกิดช่องอากาศระหว่างวัสดุหลังคากับอลูมิเนียมพอยล์ เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันรังสีความร้อนของอลูมิเนียมพอยล์ ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนโดยการนำความร้อนจากแผ่นหลังคา และ ไม่ก่อให้เกิดสภาพความเป็นมวลสาร ซึ่งเมื่อถึงเวลาคายความร้อนสู่สภาพแวดล้อมภายนอก จะไม่มีการหน่วงการระบายความร้อนไว้ หลังคาจะเย็นค่อนข้างเร็ว

4.1.2 ระบบหลังคามีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

คือหลังคาที่มีช่องว่างอากาศเหนือฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด ได้แก่ หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดด้านใต้ หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดลดระดับเว้นช่องว่างลงมา 5 ซม. หลังคาที่ทำสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาสีขาวด้านใต้หลังคา หลังคาที่ทำสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาสีขาวใต้ฝ้าเพดาน และ หลังคาที่วางฉนวนใยแก้วกันความร้อนหนา 2 นิ้วบนฝ้าเพดาน

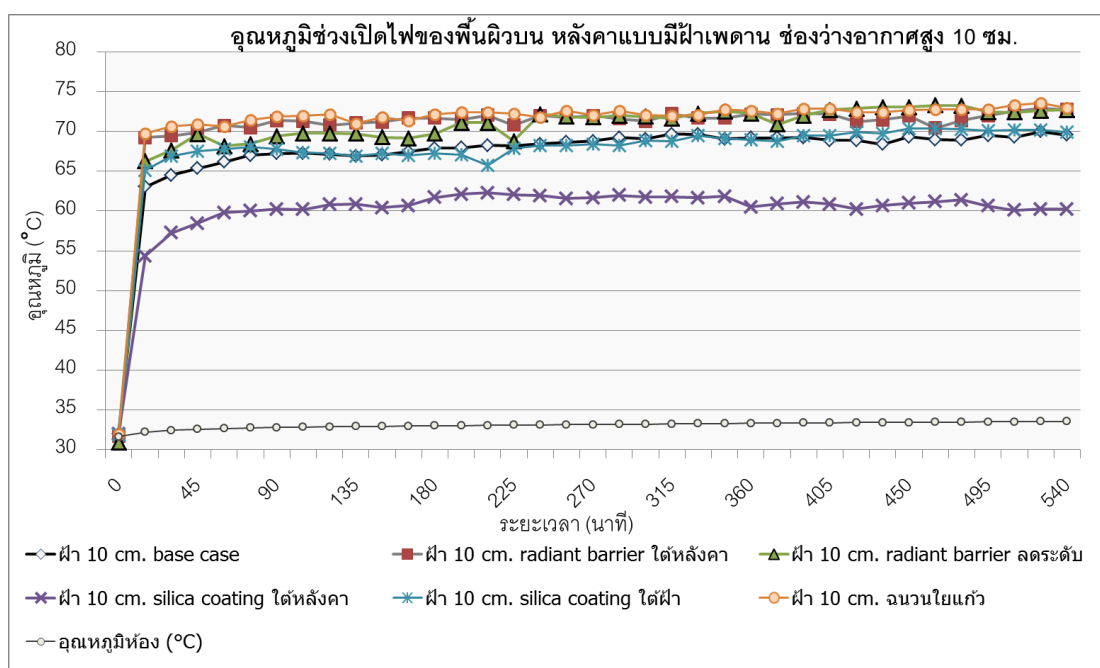
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 10 ซม.					
1	ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน	2	RADIANT BARRIER ใต้หลังคา	3	RADIANT BARRIER ลดระดับ 5 ซม.
					
4	SILICA COATING ทาใต้หลังคา	5	SILICA COATING ทาใต้ฝ้าเพดาน	6	ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว วางบนฝ้าเพดาน
					

ภาพที่ 4.3 หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. (ที่มา : ผู้วิจัย)

4.1.1.1 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานความร้อน(R_t) ของหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

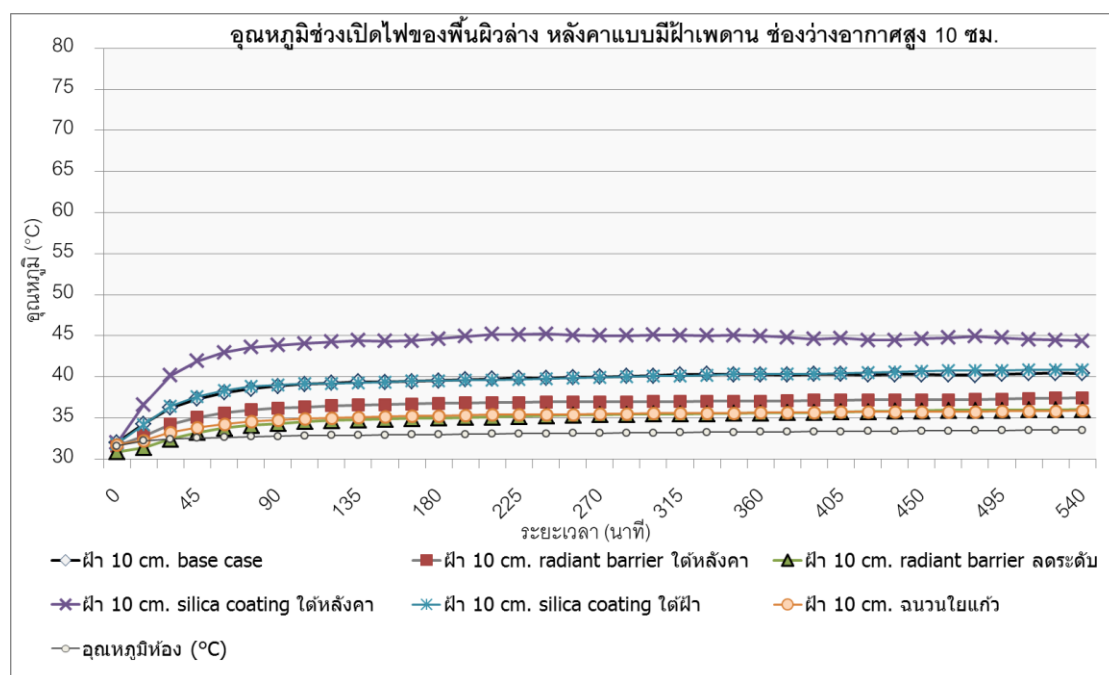
	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t -sq.m. K/W) ที่คำนวณได้ ของหลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.					
	base case	radiant barrier ใต้ หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้ หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
อุณหภูมิพื้นผิวบน ($T_o - C^\circ$)	69.55	72.51	72.56	60.39	70.16	73.16
อุณหภูมิพื้นผิวล่าง ($T_i - C^\circ$)	40.39	37.34	35.98	44.60	40.84	35.86
อุณหภูมิอากาศเข้า ($T_{inlet} - C^\circ$)	33.48	33.61	32.81	33.74	33.74	33.65
อุณหภูมิอากาศออก ($T_{outlet} - C^\circ$)	35.74	35.05	34.24	37.16	36.03	34.61
$T_o - T_i (C^\circ)$	29.16	35.17	36.58	15.79	29.32	37.30
$T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air} (C^\circ)$	2.26	1.44	1.44	3.41	2.29	0.95
$Q_1(W)$	27.25	17.32	17.33	41.20	27.64	11.49
$R_t (m^2.C^\circ/W)$	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17



แผนภูมิที่ 4.10 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

จากสูตรคำนวณการนำความร้อน $Q = U \cdot A \cdot (T_o - T_i)$ จะได้ว่าค่า $U \propto Q/(T_o - T_i)$ และ $R \propto (T_o - T_i)/Q$ เห็นได้ว่า อุณหภูมิพื้นผิวบนและอุณหภูมิพื้นผิวล่าง $(T_o - T_i)$ ของหลังคาที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อน (R) สูง เช่น หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก อุณหภูมิพื้นผิวบนค่อนข้างสูง และอุณหภูมิพื้นผิวล่างค่อนข้างต่ำ ตามแผนภูมิ 4.10 และ 4.11 แสดงถึงความสามารถในการต้านความร้อนสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองของระบบหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดาน

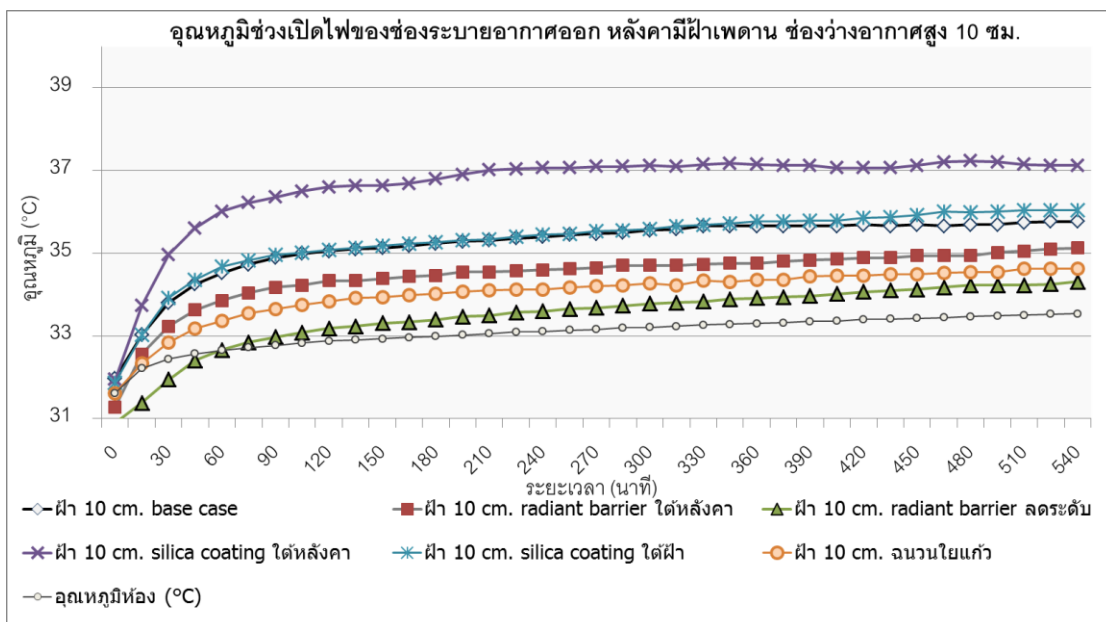
สำหรับหลังคาที่ใช้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกากรณีทาได้หลังคาและกรณีทาได้ฝ้าเพดาน ยิปซัมบอร์ด ซึ่งได้ค่า R_f น้อยกว่า หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน เนื่องจาก การทาสีอนุภาคซิลิกาเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนลงสู่พื้นที่เบื้องล่างมากขึ้น และ การที่หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาได้แผ่นหลังคาคำนวณค่า R_f ได้น้อยกว่า หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาได้ฝ้าเพดาน ยิปซัมบอร์ด เนื่องจาก แผ่นหลังคารับความร้อนจากไฟอินฟราเรดโดยตรง การทาสีไว้ด้านใต้ทำให้คุณสมบัติการแผ่ความร้อนที่มีมากเริ่มตั้งแต่แผ่นหลังคาต่อกับช่องอากาศ



แผนภูมิที่ 4.11 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

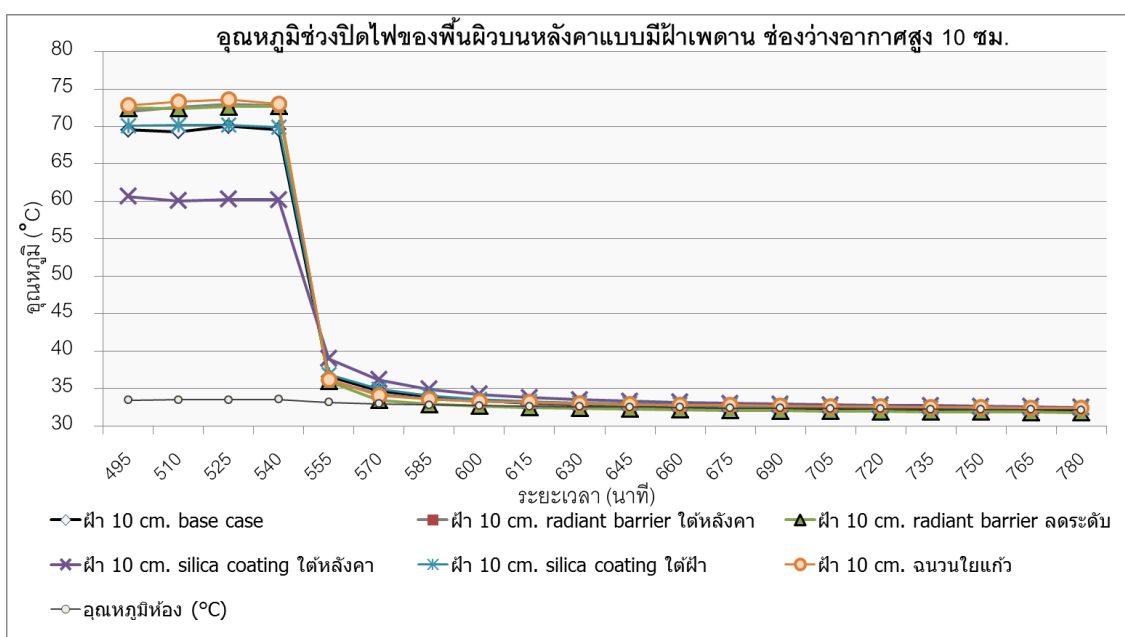
สำหรับอุณหภูมิจากช่องระบายอากาศแผนภูมิที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าหลังคาที่ใช้สีกันความร้อนสีขาวแบบที่ทาได้แผ่นหลังคา มีการถ่ายเทความร้อนออกมามากที่สุด รองลงมาคือ แบบที่ทาสีกันความร้อนใต้ฝ้าเพดาน หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดได้หลังคา แม้จะใช้วัสดุแผ่รังสี

ความร้อนต่ำ แต่เนื่องจากมีการนำความร้อนในวัสดุติดต่อกับแผ่นหลังคาซึ่งรับความร้อนโดยตรง จึงกันความร้อนได้ไม่ดีเท่าหลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมฟอยล์ระดับซึ่งมีช่องว่างอากาศระหว่างวัสดุ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีความเป็นมวลสารมากกว่า

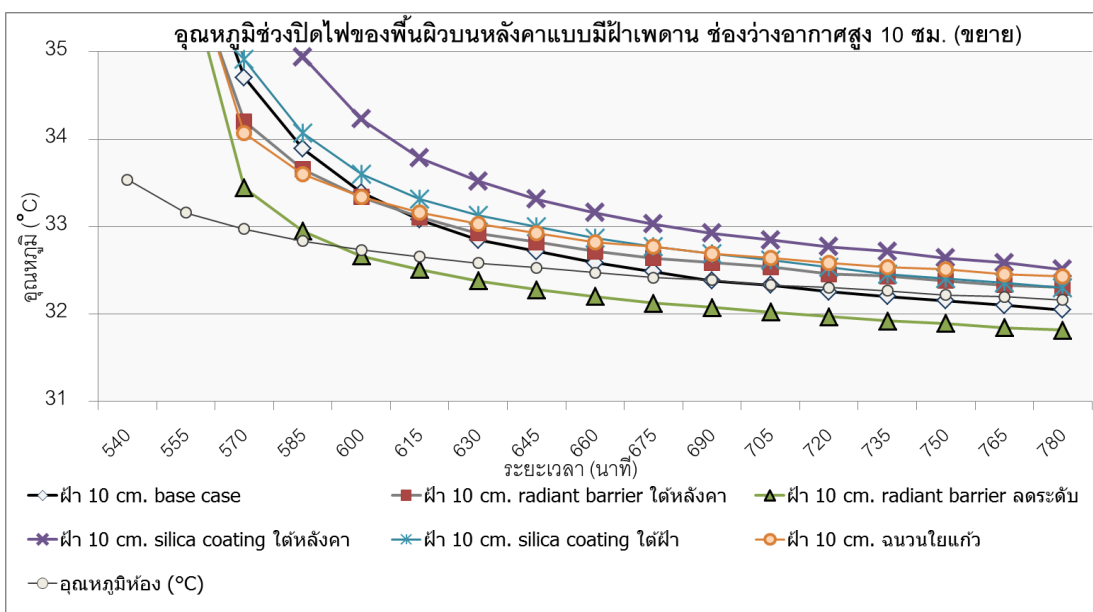


แผนภูมิที่ 4.12 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของช่องระบายอากาศออกหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

4.1.1.2 อุณหภูมิช่วงปิดไฟ

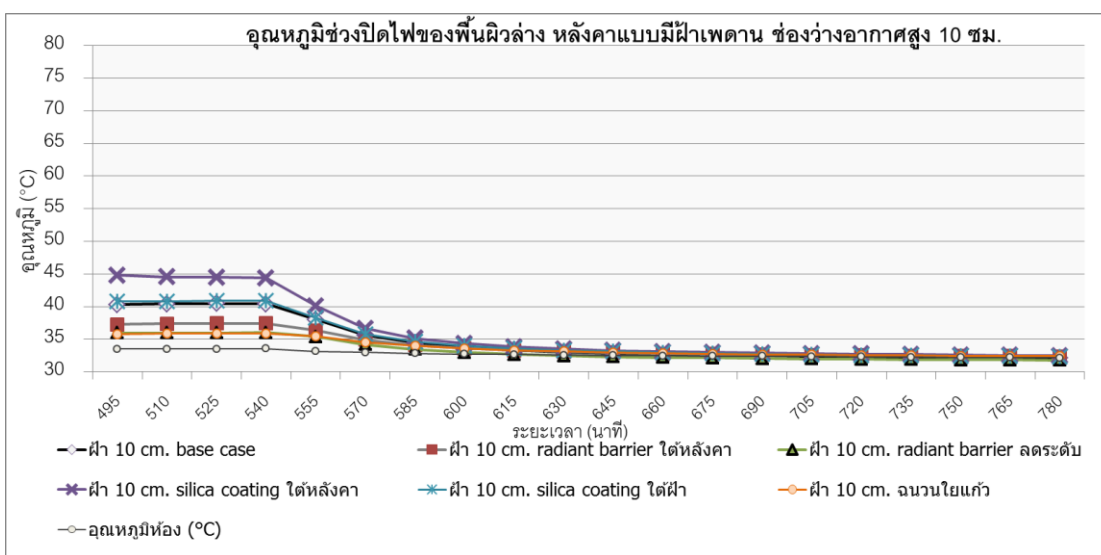


แผนภูมิที่ 4.13 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

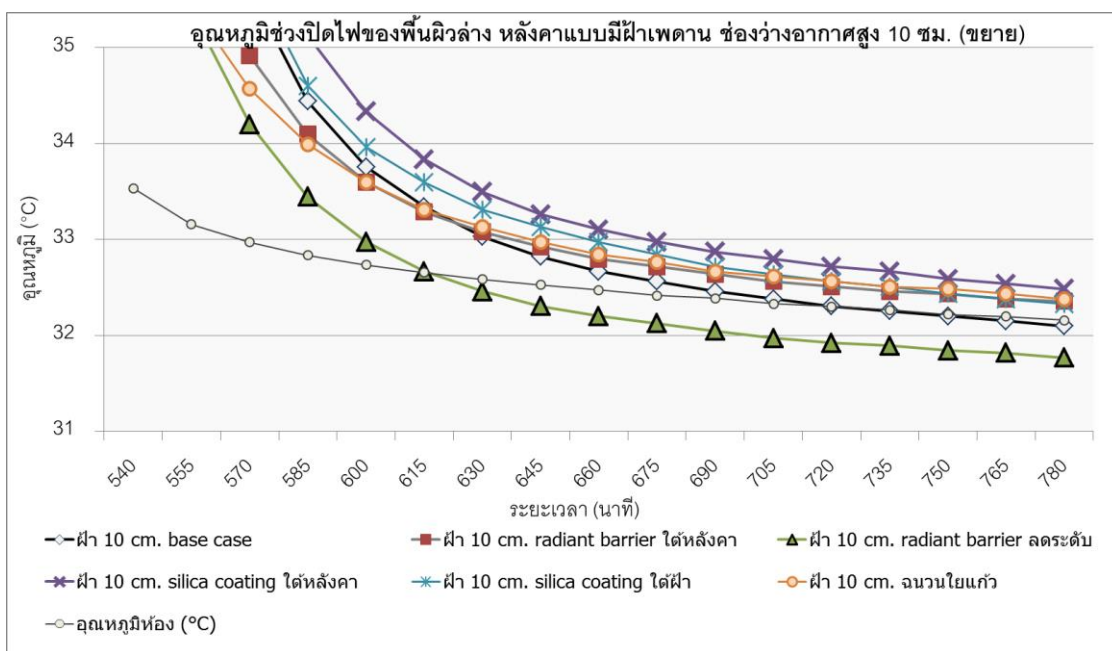


แผนภูมิที่ 4.14 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นฉนวน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.(ขยาย)

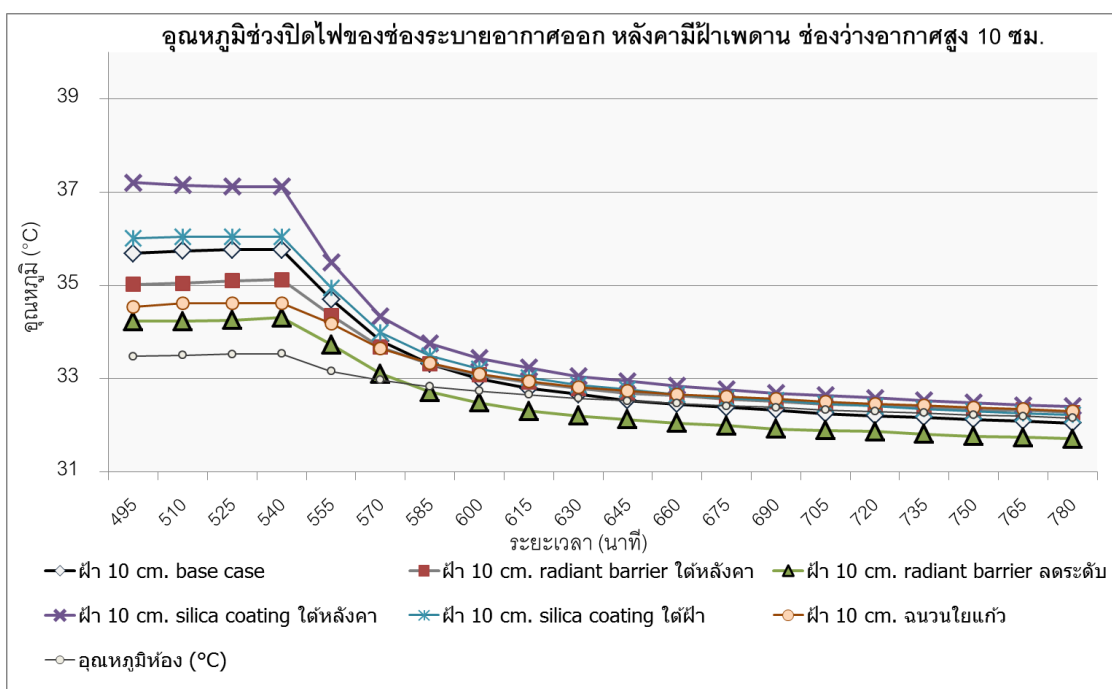
ในหลังคาที่มีช่องอากาศ(attic) พบว่าช่วงปิดไฟหลังคาที่มีแนวโน้มอุณหภูมิพื้นฉนวน อุณหภูมิพื้นผิวล่างและ อุณหภูมิจากช่องระบายอากาศ ที่ลดลงเร็วที่สุด ได้แก่ หลังคาที่ใช้ อลูมิเนียมพอยล์ลดระดับ หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดได้ หลังคา ตามลำดับ หลังคาที่ทำสีอนุภาคซิลิกาต้านได้ หลังคาที่ทำสีอนุภาคซิลิกาใต้ฝ้าเพดาน และหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ววางบนฝ้าเพดาน ระบายความร้อนในกล่องทดลองออกจาก พื้นผิวหลังคาได้ช้าที่สุด ตามลำดับ



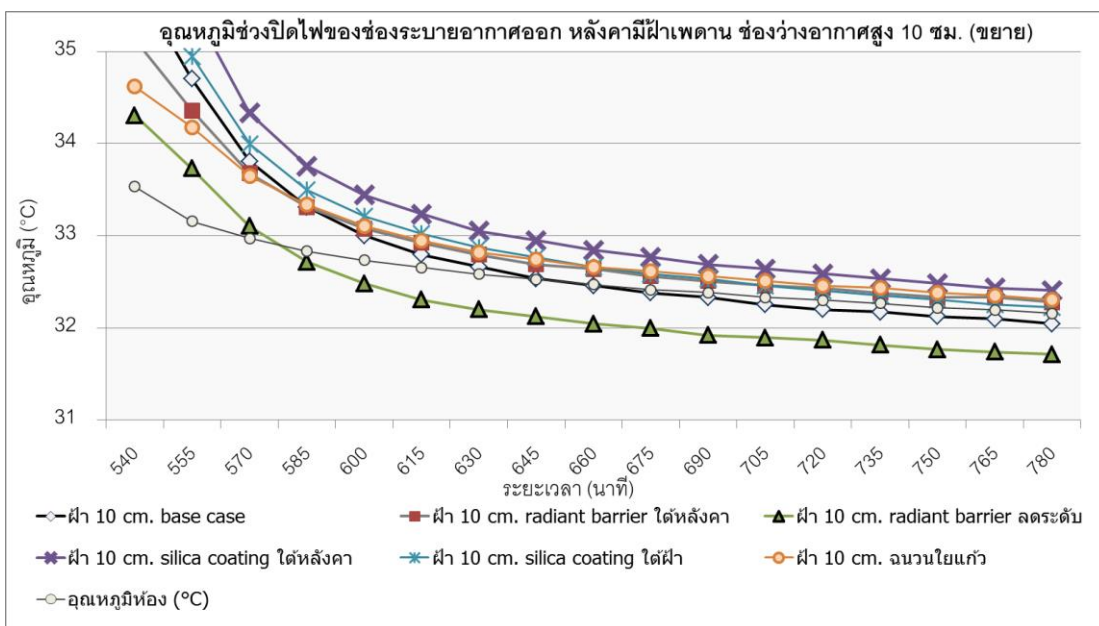
แผนภูมิที่ 4.15 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.



แผนภูมิที่ 4.16 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.(ขยาย)



แผนภูมิที่ 4.17 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.



แผนภูมิที่ 4.18 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.(ขยาย)

4.1.3 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 20 ซม.					
1	ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน	2	RADIANT BARRIER ใต้หลังคา	3	RADIANT BARRIER ลดระดับ 5 ซม.
4	SILICA COATING ทาใต้หลังคา	5	SILICA COATING ทาใต้ฝ้าเพดาน	6	ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว วางบนฝ้าเพดาน

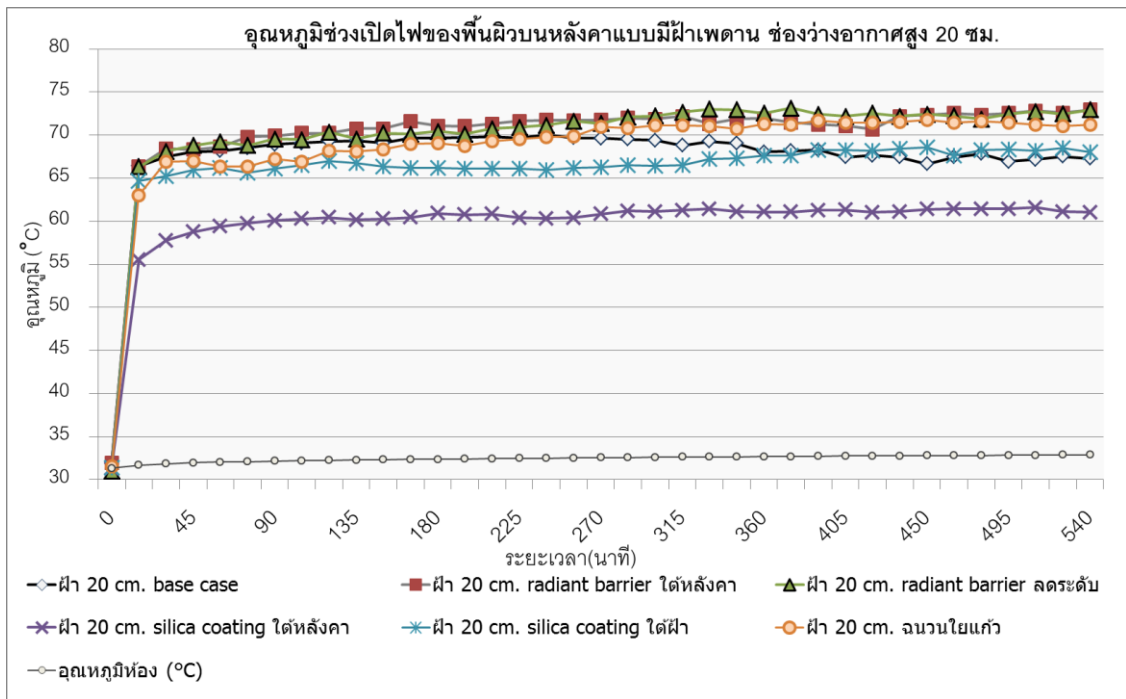
ภาพที่ 4.4 หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. (ที่มา : ผู้วิจัย)

4.1.1.1 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้

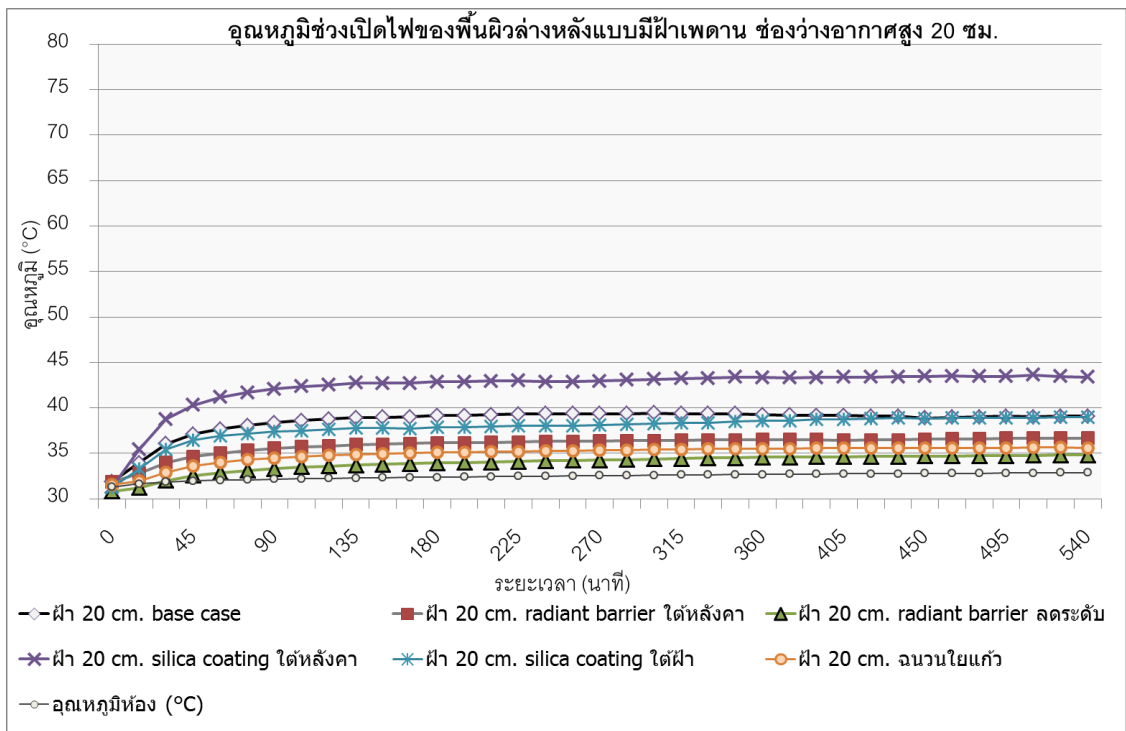
ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานความร้อน(R_t) ของหลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t -sq.m. K/W) ที่คำนวณได้ ของหลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม					
	base case	radiant barrier ใต้ หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้ หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
อุณหภูมิพื้นผิวบน ($T_o - C^\circ$)	67.35	72.60	72.64	61.25	68.20	71.45
อุณหภูมิพื้นผิวล่าง ($T_i - C^\circ$)	39.06	36.66	34.79	43.51	38.92	35.62
อุณหภูมิอากาศเข้า ($T_{inlet} - C^\circ$)	33.09	32.83	32.36	32.76	32.47	33.60
อุณหภูมิอากาศออก ($T_{outlet} - C^\circ$)	35.31	34.33	33.38	36.52	34.87	34.51
$T_o - T_i (C^\circ)$	28.29	35.93	37.85	17.74	29.27	35.83
$T_{outlet\ air} - T_{inlet\ air} (C^\circ)$	2.22	1.50	1.01	3.76	2.41	0.91
$Q_1(W)$	26.79	18.14	12.24	45.39	29.04	10.98
$R_t (m^2.C^\circ/W)$	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18

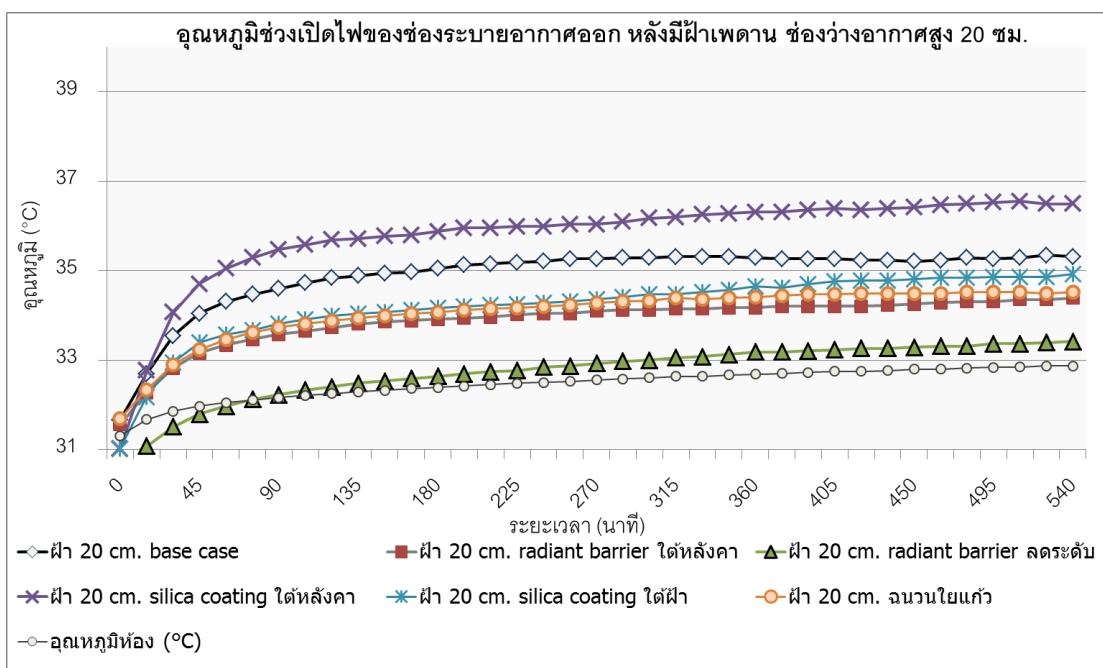
ในหลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่าอุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวบน อุณหภูมิพื้นผิวล่างหลังคา และ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวบนและพื้นผิวล่าง มีความสอดคล้องกับชุดหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน และชุดหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. หลังคาชุดที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t)สูง เช่น หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วพอยล์ลดระดับ วัดได้ค่าอุณหภูมิพื้นผิวบนค่อนข้างสูง และอุณหภูมิพื้นผิวล่างสุดค่อนข้างต่ำ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งด้านนอกและด้านในจึงมีมาก แสดงถึงความต้านทานความร้อนที่สูง ส่วนหลังคาที่คำนวณได้ค่า R_t ต่ำ ได้แก่หลังคาที่ทำสีกันความร้อนภาคซิลิกาตันใต้ จากแผนภูมิ 4.19 และ 4.20 จะเห็นว่า มีค่าอุณหภูมิผิวบนหลังคาต่ำที่สุดคือ $61.25^\circ C$ และ มีค่าอุณหภูมิผิวล่างสูงสุดคือ $43.51^\circ C$ แสดงถึงการส่งผ่านความร้อนที่มากกว่าหลังคากรณีอื่น



แผนภูมิที่ 4.19 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



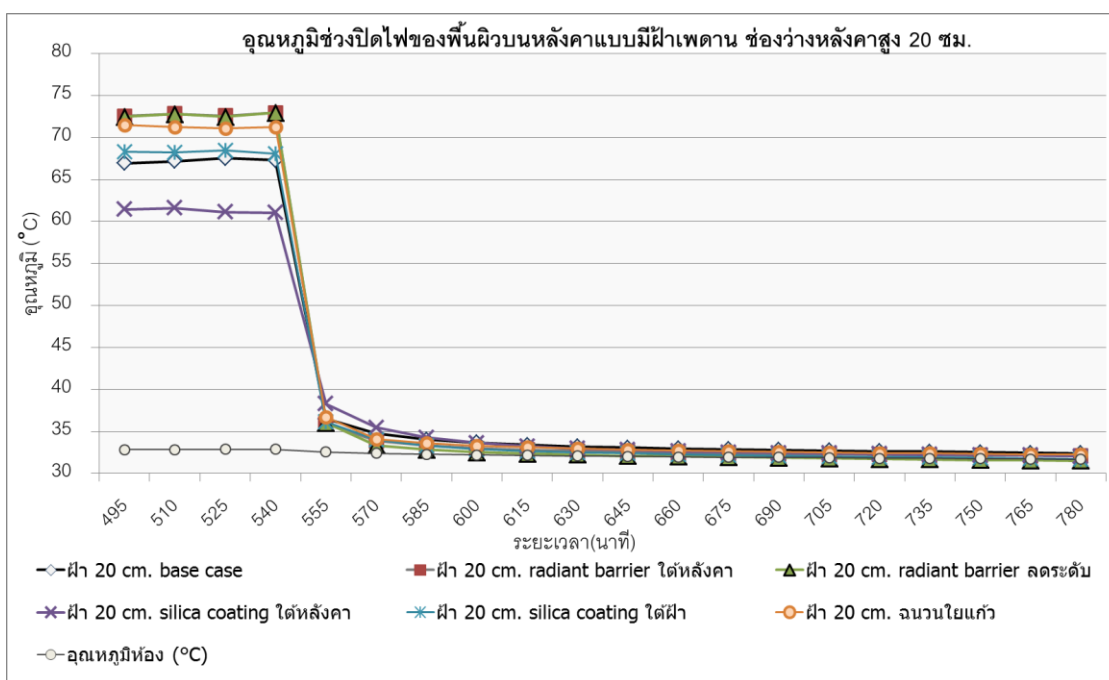
แผนภูมิที่ 4.20 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



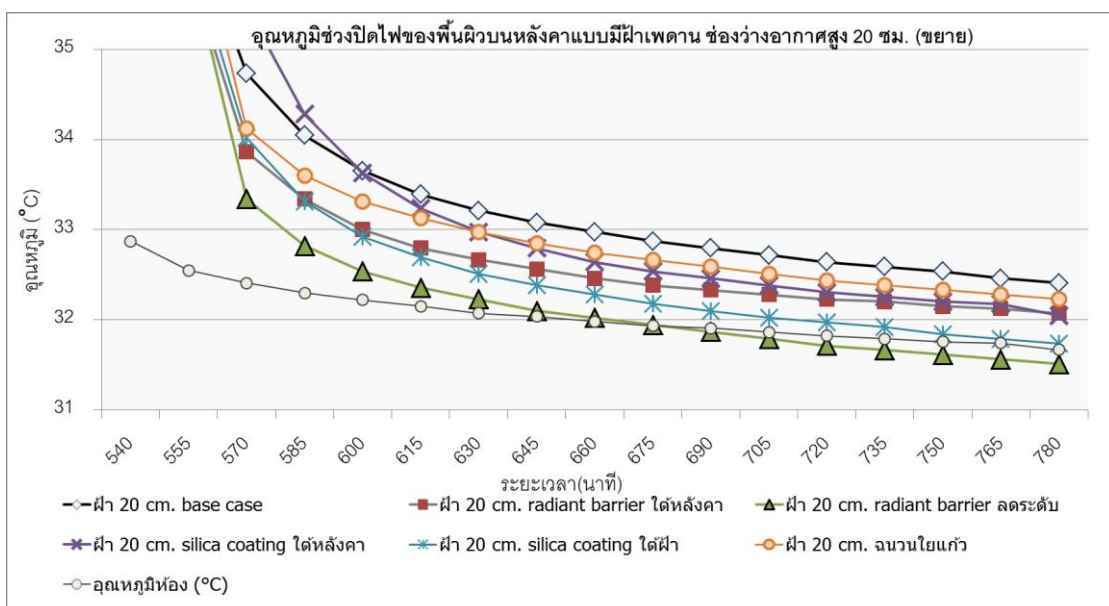
แผนภูมิที่ 4.21 อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

อุณหภูมิช่วงเปิดไฟของช่องพัดลมระบายอากาศออก เรียงตามลำดับมากไปหาน้อย คือ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านใต้ หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านฝ้าเพดาน หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วลดระดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วลดระดับ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยช่วง 1 ชั่วโมงสุดท้ายก่อนปิดไฟคือ 35.31°C , 34.33°C , 33.38°C , 36.52°C , 34.87°C และ 34.51°C ตามลำดับ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาแบบทาด้านใต้ และ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านฝ้าเพดาน รับพลังงานความร้อน(Q)เข้ามา มากเป็นอันดับต้นๆ อุณหภูมิอากาศที่วัดได้จากช่องระบายอากาศออกจึงมีค่าสูงกว่ากรณีอื่น

4.1.1.2 อุณหภูมิช่วงปิดไฟ



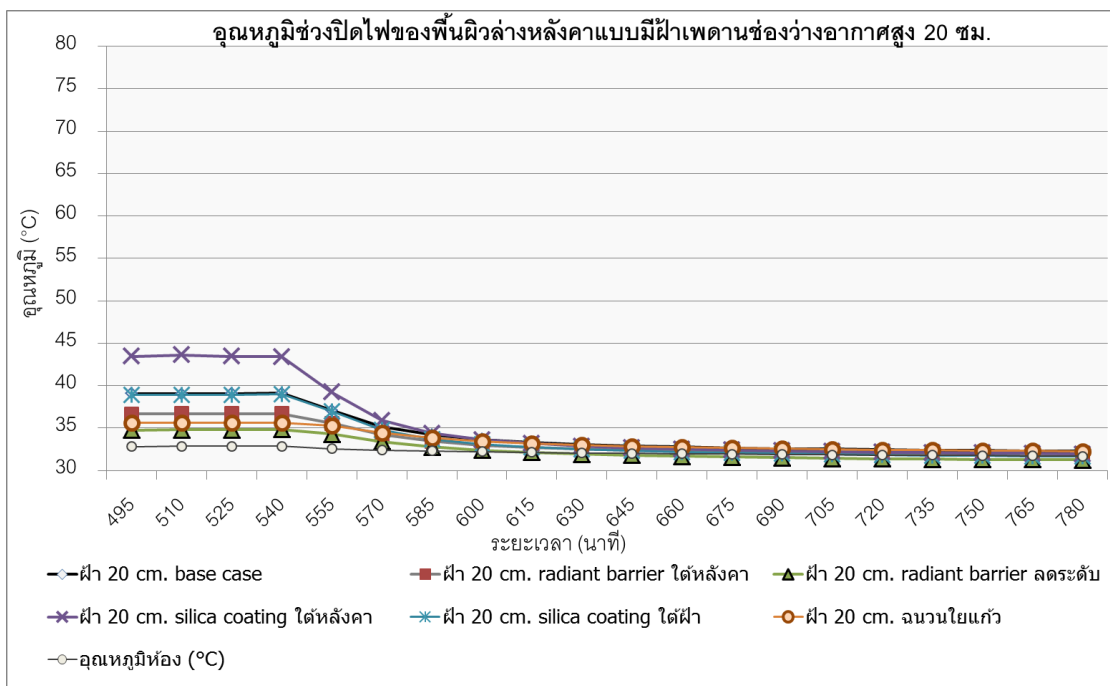
แผนภูมิที่ 4.22 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



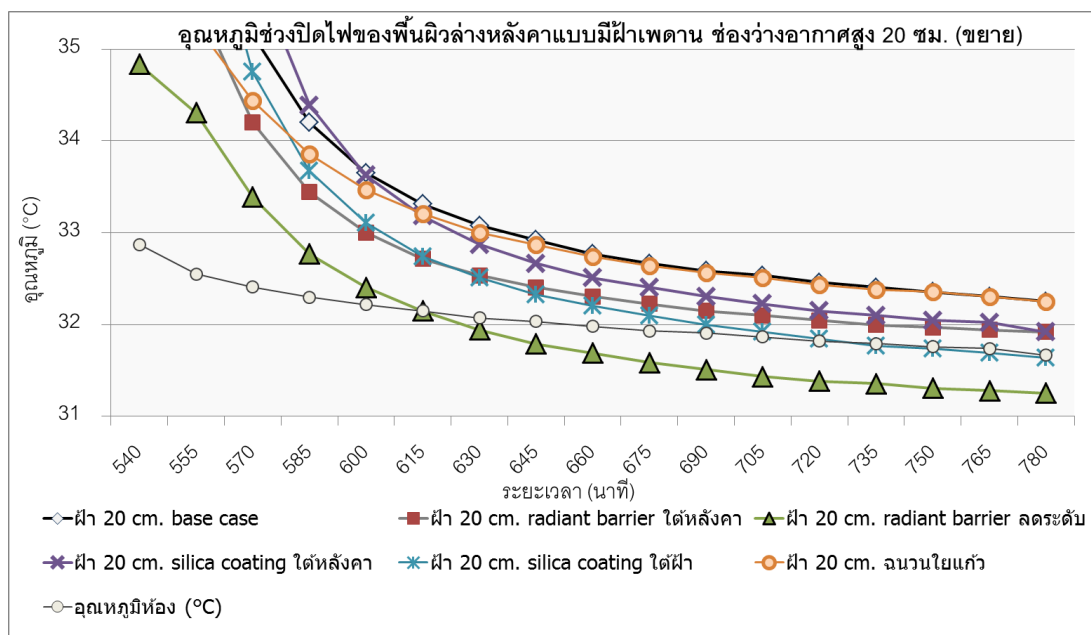
แผนภูมิที่ 4.23 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(ขยาย)

อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน และ พื้นผิวล่างสุดของหลังคา พบว่า หลังคาที่ใช้ อลูมิเนียมพอยล์ลดระดับเย็นลงเร็วกว่ากรณีอื่น เช่นเดียวกับผลที่เกิดขึ้นในชุดหลังไม่มีฝ้าเพดาน และ ชุดหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และพบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

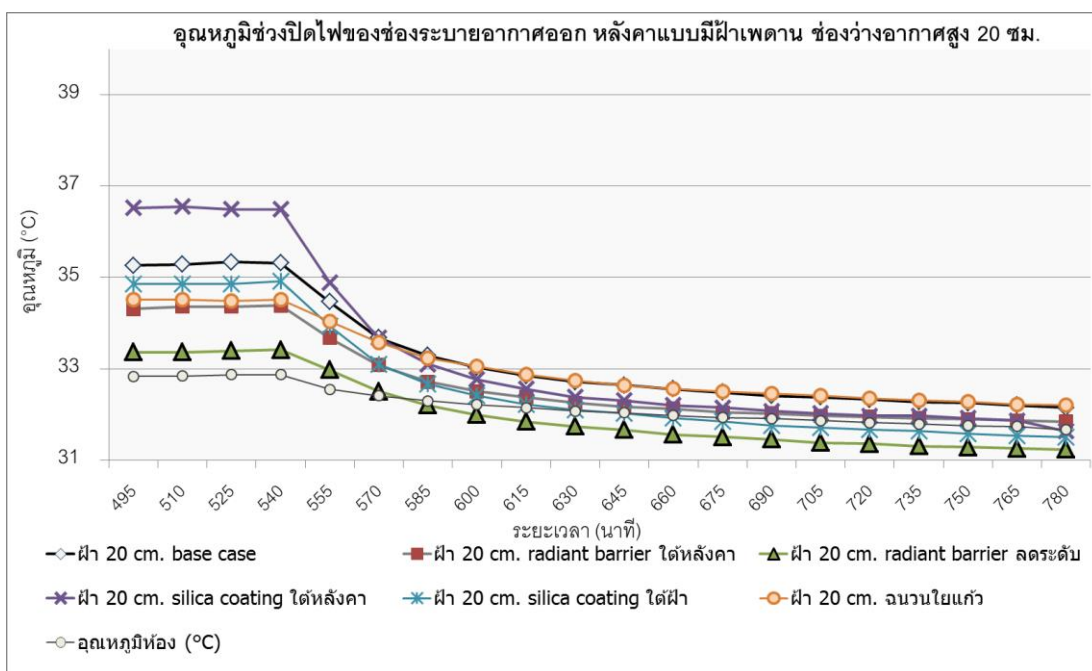
วางเหนือฝ้าเพดาน ได้แนวโน้มอุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวบน และพื้นผิวล่างสูงกว่าหลังคากรณีอื่น เนื่องจากหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วมีการกักความร้อนไว้โดยตัวมวลสาร ประกอบกับช่องอากาศที่หนาขึ้นทำให้ความร้อนระบายออกจากหลังคาได้ช้าลง



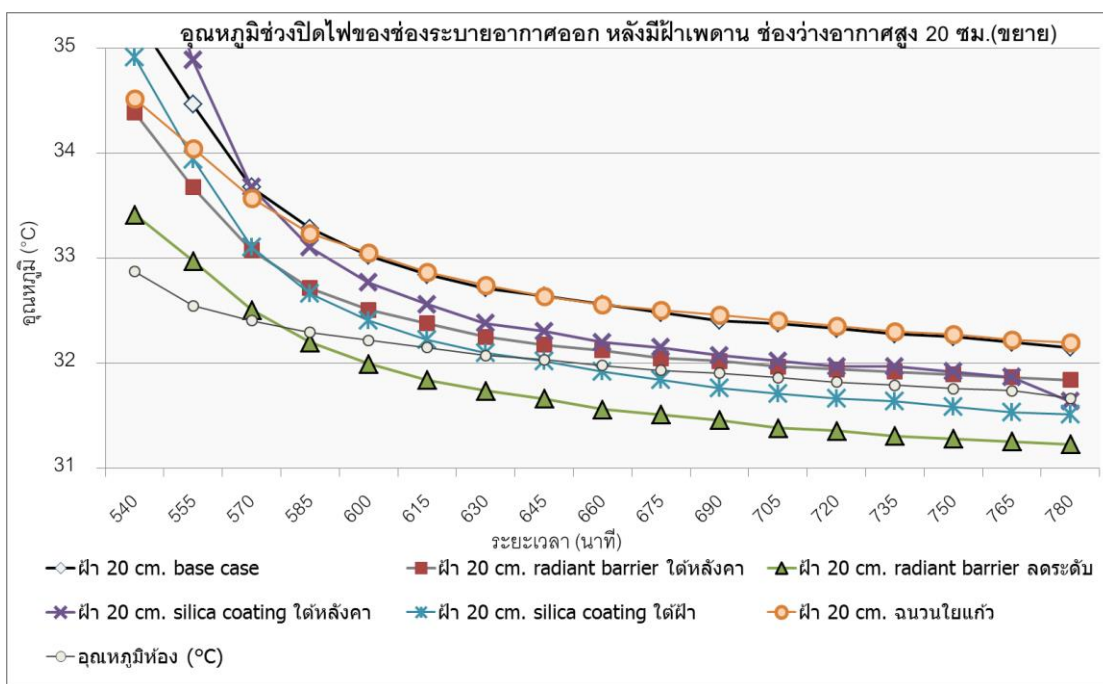
แผนภูมิที่ 4.24 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



แผนภูมิที่ 4.25 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของพื้นผิวล่าง หลังคาแบบมีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. (ขยาย)



แผนภูมิที่ 4.26 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออก หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน
ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



แผนภูมิที่ 4.27 อุณหภูมิช่วงปิดไฟของช่องระบายอากาศออกหลังคาแบบมีฝ้าเพดาน
ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(ขยาย)

แผนภูมิแนวโน้มอุณหภูมิช่วงปิดไฟของอากาศที่ระบายออกได้แสดงให้เห็นว่าหลังคาที่ใช้ อลูมิเนียมพอยล์ลระดับ มีการระบายความร้อนออก จนอุณหภูมิอากาศที่ออกจากกล่องทดลอง ลดลงต่ำกว่าวัสดุอื่น และแสดงให้เห็นว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ทำให้ความร้อน ระบายออกได้ช้า เห็นได้จากอุณหภูมิอากาศออกที่มีแนวโน้มลดลงแต่ยังสูงกว่าหลังคากรณีอื่น

4.1.4 สรุปค่าความต้านทานความร้อน(R_t)และพลังงานความร้อน(Q)ที่คำนวณ ได้จากกล่องทดลอง

ตารางที่ 4.4 ค่าความต้านทานความร้อน(R_t) และพลังงานความร้อน(Q)ที่ส่งผ่านทางหลังคา

	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t -sq.m. K/W)					
	base case	Radiant barrier ใต้ หลังคา	Radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้ หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน						
R_t (sq.m. K/W)	0.03	0.15	0.43	0.02		0.55
Q(Watts)	62.34	40.09	26.77	72.09		21.70
หลังคาช่อง ATTIC 10 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
Q(Watts)	27.25	17.33	17.33	41.20	27.64	11.49
หลังคาช่อง ATTIC 20 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
Q(Watts)	26.79	18.14	12.24	45.39	29.04	10.98

หลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดาน หลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ หลังคาที่มีฝ้า เพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) สอดคล้องกัน โดยที่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด หลังคาที่ใช้อลูมิเนียม พอยล์แบบติดใต้แผ่นหลังคาโดยตรง แม้จะมีคุณสมบัติแผ่รังสีความร้อนออกมาต่ำ คำนวณได้ค่า ความต้านทานความร้อนมากกว่าหลังคาที่ไม่ได้ใช้วัสดุกันความร้อน แต่เนื่องจากได้รับอิทธิพลการ นำความร้อนที่เกิดจากการติดตั้งกับแผ่นหลังคาโดยตรง ประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนจึง ไม่ดีเท่าหลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์แบบลดระดับ ซึ่งเป็นการเว้นช่องว่างอากาศ ลดปัจจัยการนำ

ความร้อน และส่งเสริมคุณสมบัติของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีความร้อนต่ำยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด และมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนดีกว่าวิธีกันความร้อนอื่นๆ เห็นได้จากปริมาณความร้อนที่เข้าสู่กล่องทดลอง(Q) ซึ่งได้ค่า 21.70 Watt , 11.49 Watt และ 10.98 Watt เรียงตามลำดับชุด หลังคา ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น

อย่างไรก็ตามหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. บางกรณีคำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อน(R_f)ออกมาได้ต่ำกว่าหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เล็กน้อย เมื่อใช้วิธีกันความร้อนอย่างเดียวกัน เนื่องจากหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ถือเป็นหลังคาที่เริ่มมีการไหลเวียนของอากาศ ซึ่งเป็นตัวการทำให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลง หลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ซึ่งเป็นช่องที่แคบทำให้อากาศภายในนิ่งกว่า เกิดความต้านทานความร้อนในช่องอากาศสูงกว่า

4.2 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการจำลองอาคารโดยใช้โปรแกรม VisualDOE4.1

นำค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_f)ที่คำนวณได้จากการศึกษาด้วยกล่องทดลองมาใส่เป็นข้อมูลของหลังคาทั้ง 17 รูปแบบ ในอาคารต้นแบบ 4 ประเภท ได้แก่อาคารพักอาศัย(อาคารใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางคืน) อาคารสำนักงาน(อาคารใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน) อาคารโรงพยาบาล(อาคารใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง) และอาคารร้านค้า (อาคารใช้งานเครื่องปรับอากาศทั้งกลางวันทั้งกลางคืน) พิจารณาผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ภายในหนึ่งปี (kWh/sq.m.-year) ดังนี้

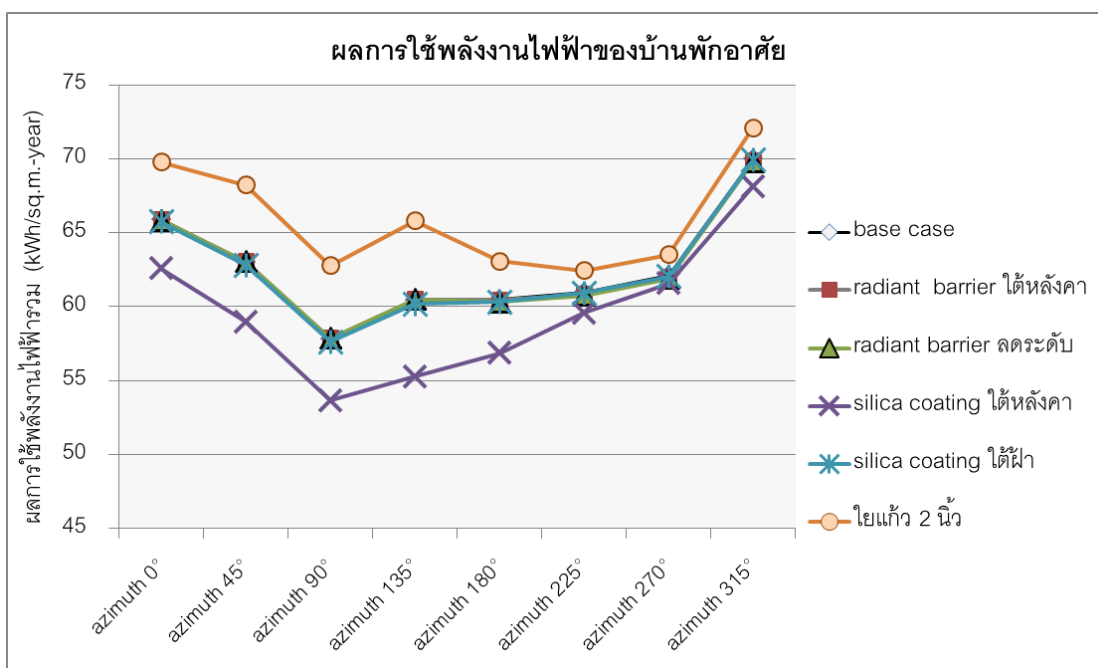
4.2.1 อาคารพักอาศัย

เนื่องจากอาคารพักอาศัยต้นแบบเป็นหลังคาทรงปั้นหยาซึ่งเป็นหลังคาทรงสูง ใช้ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด อากาศภายในช่องเหนือฝ้าเพดานเป็นอากาศที่มีการไหลเวียน ดังนั้น จึงทำการจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉพาะความต้านทานความร้อน(R_f) ที่ได้จากกล่องทดลองชุดหลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของช่องว่างอากาศที่เริ่มมีการเคลื่อนตัวของอากาศ ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนของช่องหลังคาใดๆจะไม่มีค่าสูงไปกว่านี้

ดังนั้นชุดหลังคาที่ใช้สำหรับจำลองผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับอาคารพักอาศัย คือหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอลิติดิตได้หลังคา หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอลิติดิตได้หลังคาลดระดับ 5 ซม.หลังคาที่ทาสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาได้วัสดุหลังคา หลังคา

ที่เท่ากันความร้อนอนุภาคซิลิกาใต้ฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ด และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว วางบนฝ้าเพดาน

ทำการจำลองการใช้พลังงานโดยใช้ค่าคุณสมบัติ-วิธีกันความร้อนของหลังคาทั้ง 6 แบบ โดยทดลองวางอาคารในทิศทางต่างกัน 8 ทิศทางตามมุม azimuth ในโปรแกรม VisualDOE4.1 ได้แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้า ตามแผนภูมิ 4.28 ดังนี้



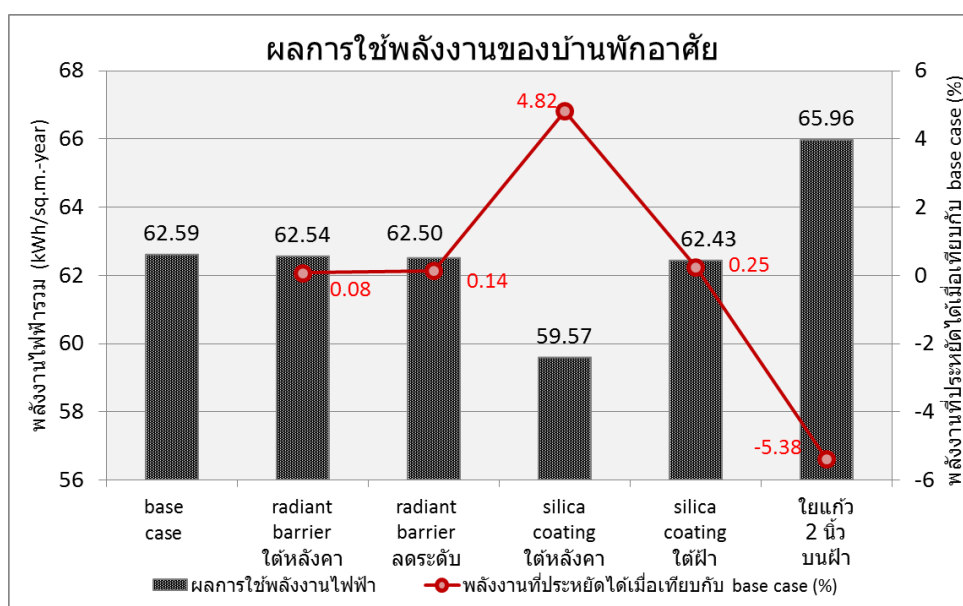
แผนภูมิที่ 4.28 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัยทั้ง 8 ทิศทาง

แนวโน้มการใช้พลังงานรวมของหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว สูงกว่าแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของวิธีกันความร้อนแบบอื่น วิธีกันความร้อนที่ให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดคือ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาใต้หลังคา ซึ่งเป็นวิธีกันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t)น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.5 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัย

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัย(kWh/sq.m.-year)					
	หลังคาบ้านพักอาศัย					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
Rt (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	62.59	62.54	62.50	59.57	62.43	65.96

เมื่อนำค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของการวางตัวอาคารทั้ง 8 ทิศทางมาหาค่าเฉลี่ยพบว่า หลังคาที่ใช้สื่อนุภาคซิลิกาทาต้านใต้แผ่นหลังคา ได้ผลการใช้พลังงานต่ำสุดคือ 59.57 kWh/sq.m. ประหยัดพลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 4.82 % ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 62.59kWh/sq.m. และพบว่าวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์แผ่รังสีต่ำในกรณีของ หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ลดระดับ และหลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์แบบติดใต้แผ่นหลังคา ได้ค่าการใช้พลังงานรวม 62.50 และ 62.54 kWh/sq.m. ตามลำดับซึ่งประหยัดกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน 0.14% และ 0.08% ตามลำดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ววางบนฝ้า ได้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ารวม 65.96 kWh/sq.m. ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าวิธีกันความร้อนอื่นๆ

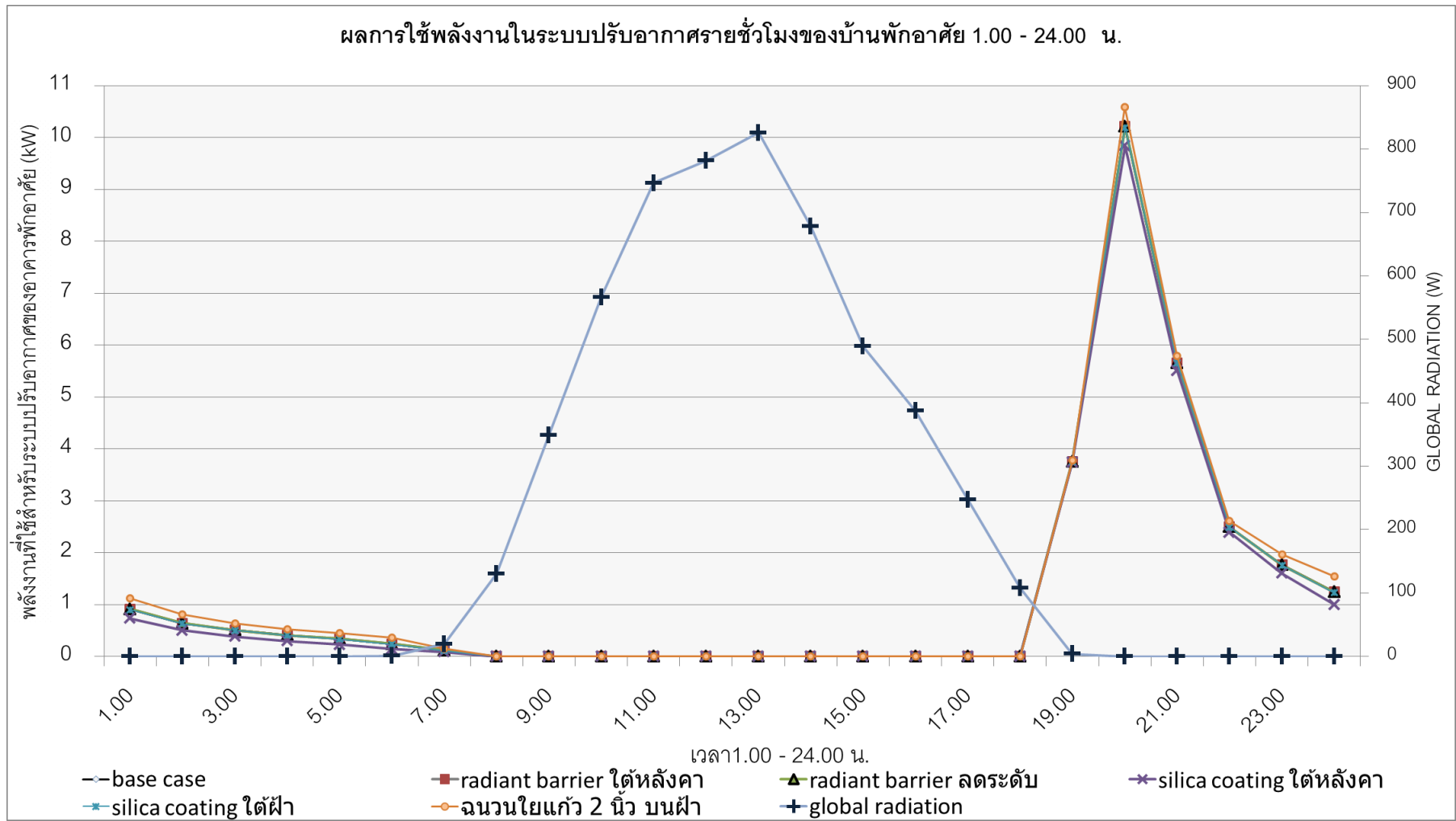


แผนภูมิที่ 4.29 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารพักอาศัย

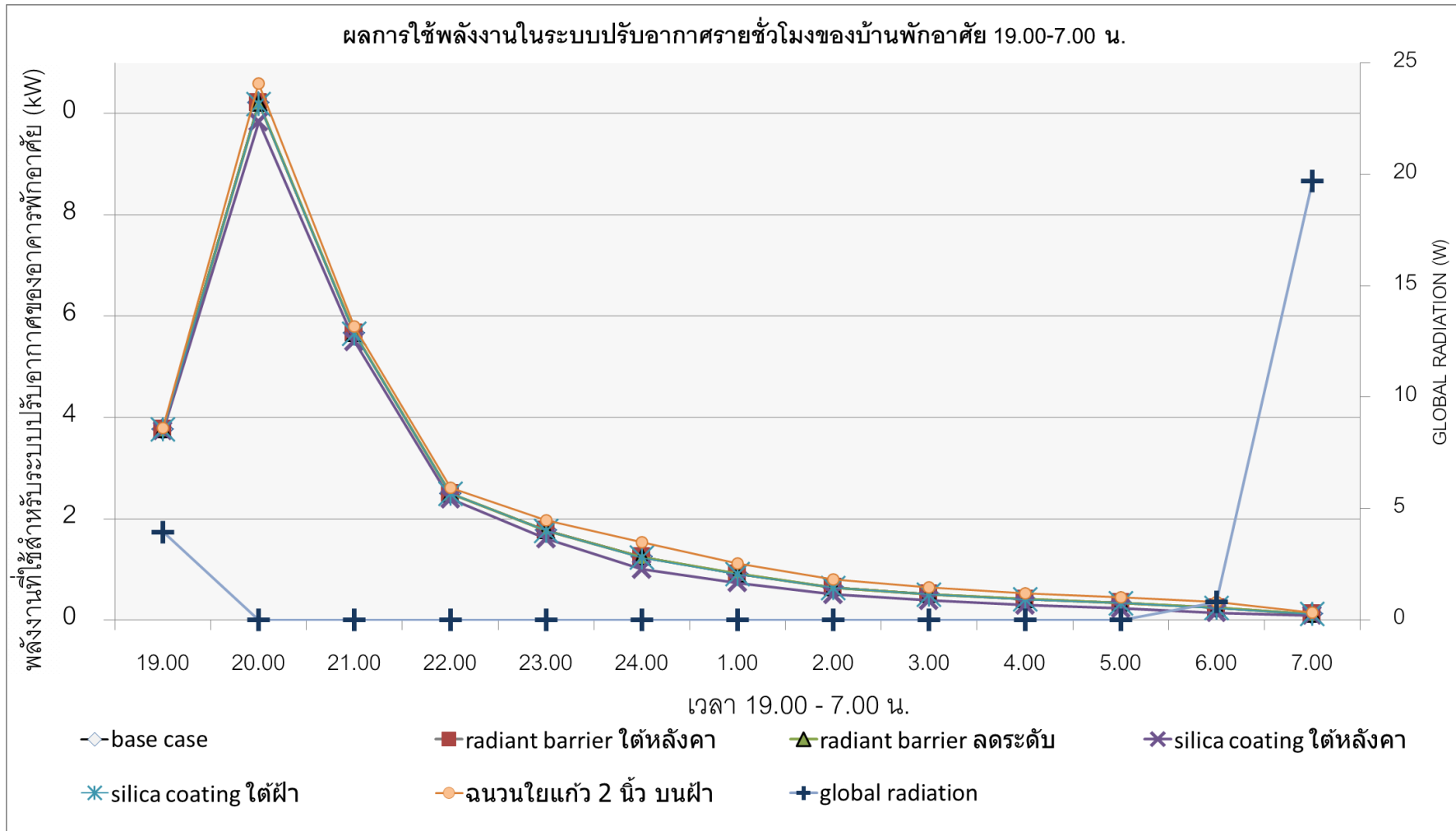
เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานระบบปรับอากาศรายชั่วโมงภายใน 24 ชั่วโมงของบ้านพักอาศัยตาม แผนภูมิที่ 4.30 และ 4.31 แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่เวลา 18.00 – 7.00 น. ซึ่งอัตราการแผ่รังสีความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกสู่อาคารลดลงน้อยที่สุดจนมีค่าเป็นศูนย์ (เวลากลางคืน) พบว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ไม่ได้ช่วยประหยัดพลังงาน เห็นได้จากแนวโน้มของพลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศอยู่ในระดับสูงสุด ขณะที่หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกา และ หลังคาที่ใช้ลูมีเนียมฟอสเฟต ให้แนวโน้มการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศที่ต่ำกว่า

เวลากลางคืนเป็นช่วงที่เปลือกอาคารเริ่มระบายความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ผลการจำลองการใช้พลังงานแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุหลังคาหรือวิธีกันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงในอาคารที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศเวลากลางคืนเป็นส่วนใหญ่ อาจทำให้ความร้อนที่เข้ามาในช่วงกลางวันระบายออกได้ช้า เป็นภาระให้อาคารต้องรับภาระในการทำความเย็นในช่วงกลางวันมากขึ้น และ ในที่นี้ผลการจำลองการใช้พลังงานระบุว่าหลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาด้านใต้ ให้ผลในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมมากที่สุด

อย่างไรก็ตาม อาคารพักอาศัยต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัย เป็นอาคารที่พื้นที่ใช้งานเกือบทุกพื้นที่เปิดใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน โดยเฉพาะห้องนอนในชั้นบนซึ่งอยู่ติดกับหลังคา ซึ่งถ้าหากว่ามีการจำลองอาคารพักอาศัยที่มีเงื่อนไขการใช้งานที่ให้พื้นที่ชั้นบนที่ติดกับหลังคา มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันด้วย การใช้ฉนวนมวลสารที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงอาจเป็นวิธีกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพด้านพลังงานมากกว่า เนื่องจากช่วยป้องกันความร้อนไม่ให้เป็นภาระต่อระบบปรับอากาศในเวลากลางวันได้ดีกว่า



แผนภูมิที่ 4.30 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารพักอาศัย เวลา 1.00 - 24.00 น.



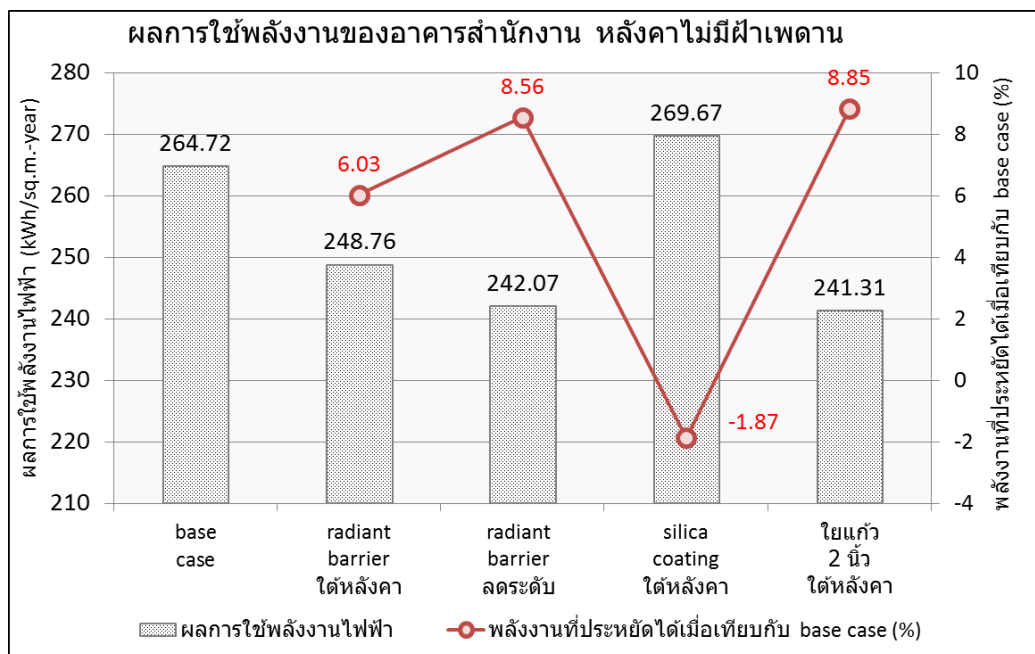
แผนภูมิที่ 4.31 ผลการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารพักอาศัย(เวลา 19.00 – 7.00 น.)

4.2.2 อาคารสำนักงาน

การจำลองผลการใช้พลังงานสำหรับอาคารสำนักงานต้นแบบ ใช้ข้อมูลความต้านทานความร้อน(R_v) ของชุดหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ตามลำดับ

4.2.2.1 ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

พบว่าหลังคาที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด คือ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้า 241.31 kWh/sq.m. ประหยัดได้ 8.85% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน (base case) รองลงมาคือหลังคาที่ใช้ฉนวนใยหินอัดตั้งลดระดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยหินอัดตั้งด้านใต้หลังคา ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า 242.07 และ 248.76 kWh/sq.m. ต่อปีตามลำดับ ประหยัดได้ 8.56% และ 6.03% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ทำสื่อนุภาคซิลิกาซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อน(R_v) ต่ำที่สุด



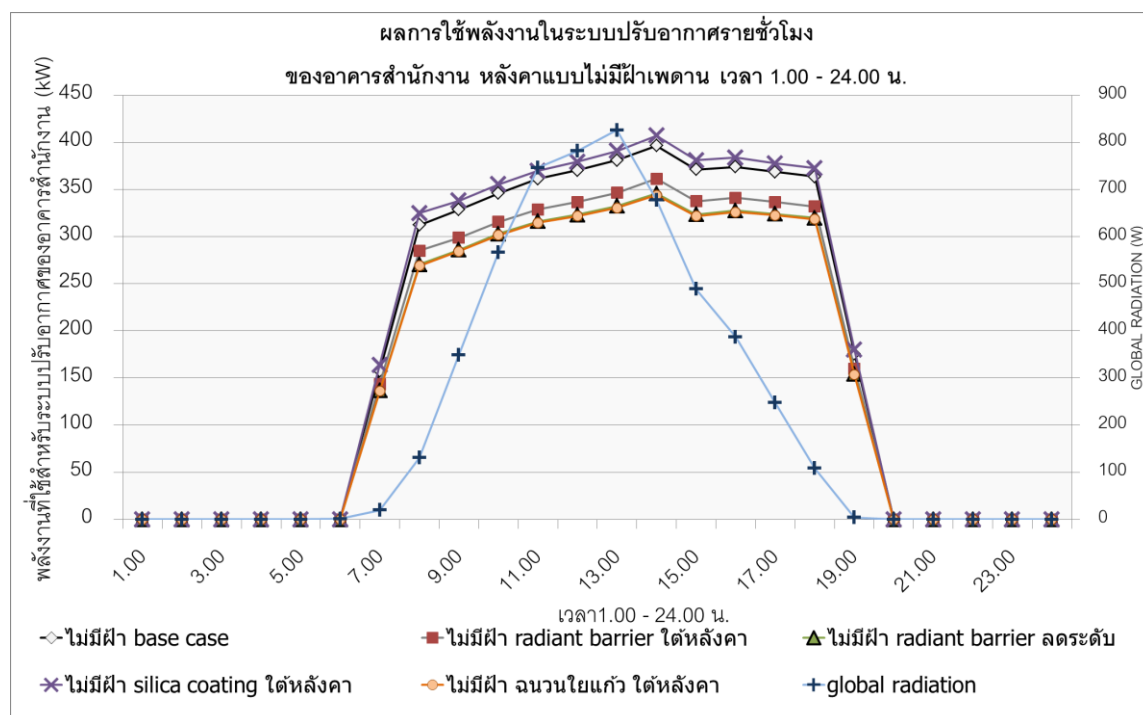
แผนภูมิที่ 4.32 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

เมื่อพิจารณาตามแผนภูมิที่ 4.32 และ 4.34 พบว่าหลังคาที่มีแนวโน้มการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศจากมากไปหาน้อยได้แก่ หลังคาที่ทำสื่อนุภาคซิลิกาด้านใต้ หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุ

กันความร้อน หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดด้านใต้แผ่นหลังคา หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดตั้งแบบลดระดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

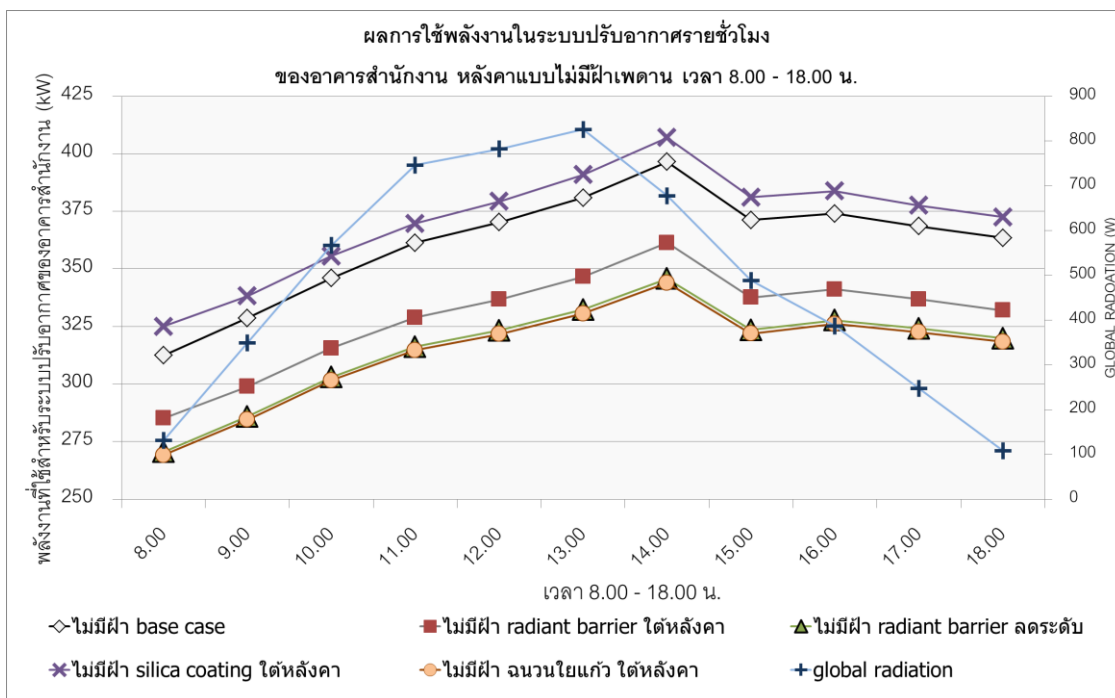
ตารางที่ 4.6 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน (kWh/sq.m.- year)				
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ใต้หลังคา
R_t (sq.m. KW)	0.03	0.15	0.43	0.02	0.55
kWh/sq.m.- year	264.72	248.76	242.07	269.67	241.31



แผนภูมิที่ 4.33 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 - 24.00 น.

จากการจำลองผลการใช้พลังงานแสดงให้เห็นว่า อาคารสำนักงานต้นแบบซึ่งมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน ขณะที่มีการถ่ายเทความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกเข้าสู่อาคาร การใช้หลังคาหรือวิธีกันความร้อนที่มีความต้านทานความร้อนสูง เป็นปัจจัยให้การใช้พลังงานไฟฟ้าวรวม และ การใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศลดลง

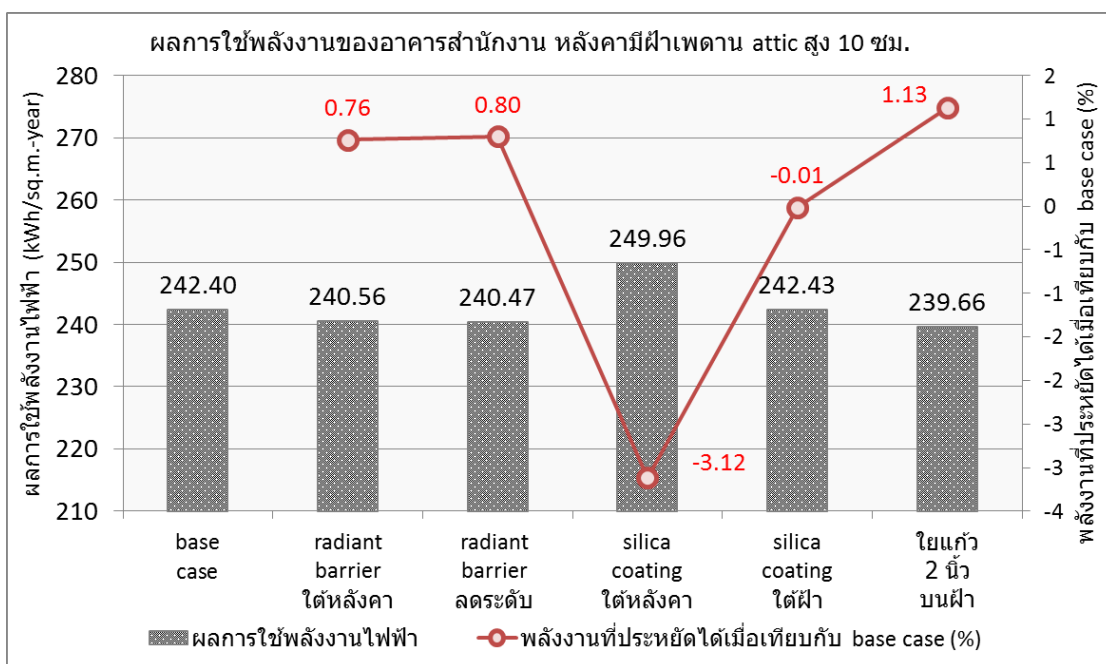


แผนภูมิที่ 4.34 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 8.00 - 18.00 น.

4.2.2.2 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

วิธีกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้า ของระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ในอาคารสำนักงานต้นแบบ เรียงตามลำดับได้แก่ การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ววางบนฝ้าเพดาน การใช้ฉนวนใยแก้วลดระดับ การใช้ฉนวนใยแก้วติดด้านใต้แผ่นหลังคา การไม่ใช้วัสดุกันความร้อนใดๆ (base case) การใช้สีอนุภาคซิลิกาทาฝ้าเพดาน และการใช้สีอนุภาคซิลิกาทาใต้แผ่นหลังคา

การใช้ฉนวนใยแก้ว การใช้ฉนวนใยแก้วลดระดับ การใช้ฉนวนใยแก้วติดด้านใต้หลังคา ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้า 239.66 , 240.47 และ 250.56 kWh/sq.m. ต่อปีตามลำดับ ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 1.13% , 0.80% และ 0.76% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ตามลำดับ

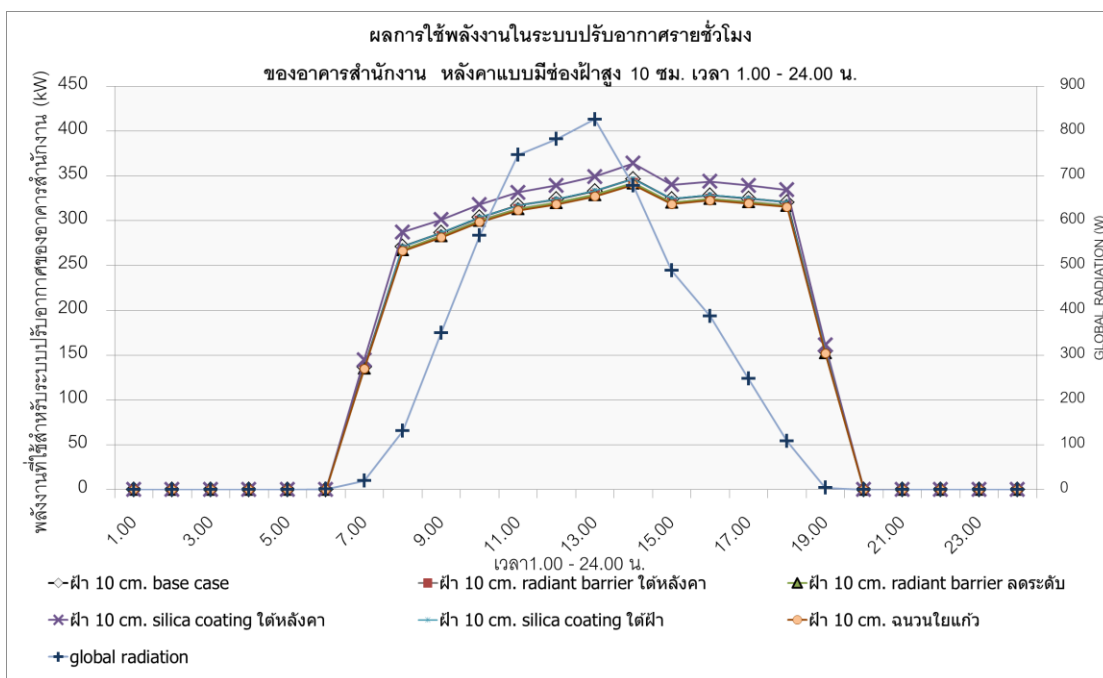


แผนภูมิที่ 4.35 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

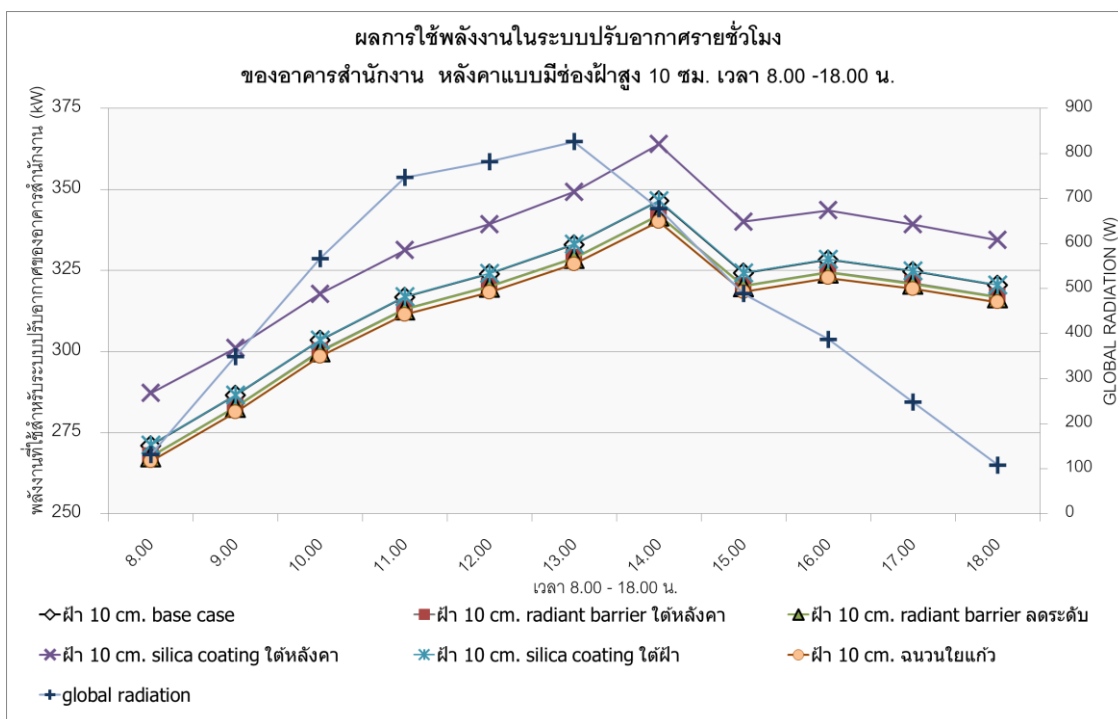
และเมื่อพิจารณาแผนภูมิที่ 4.36 และ 4.37 พบว่าหลังคาหรือวิธีกันความร้อนที่คำนวณได้ ค่าความต้านทานความร้อน (R_t) ต่ำ เช่น หลังคาทาสีอนุภาคซิลิกาด้านใต้ มีแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบปรับอากาศอยู่ในระดับสูงกว่ากรณีอื่นๆ ขณะที่หลังคาที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนสูง เช่น หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วอัดแน่นอัดระดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วอัดแน่นอัดด้านใต้แผ่นหลังคา มีแนวโน้มในระดับที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 4.7 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. (kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
R_t (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	242.40	240.56	240.47	249.96	242.43	239.66

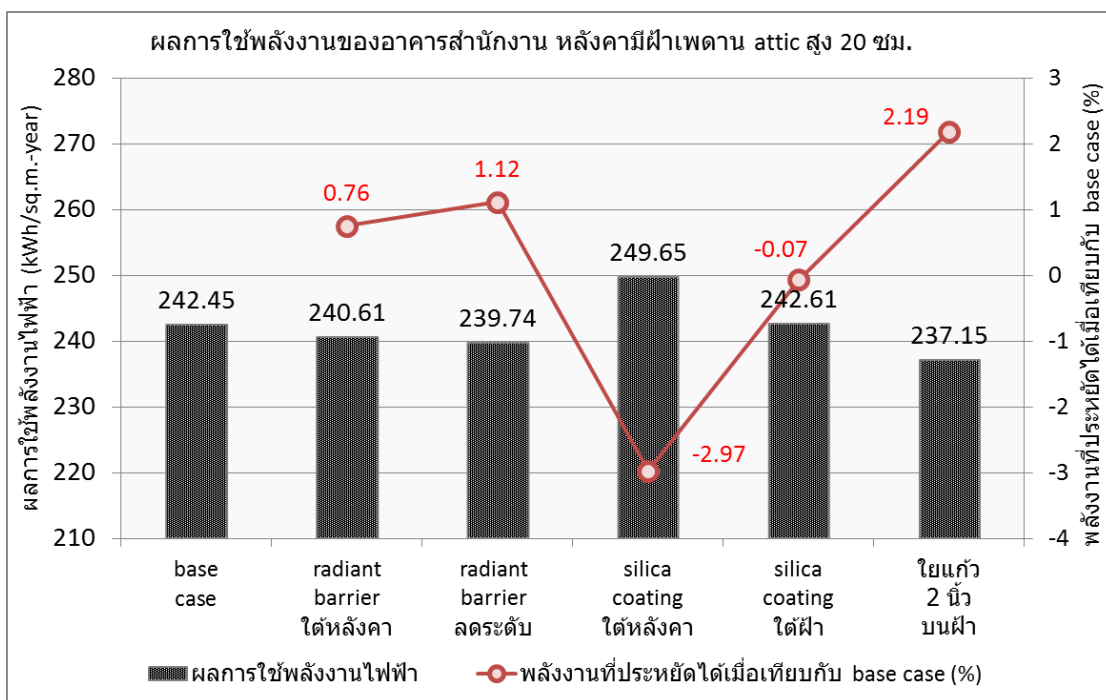


แผนภูมิที่ 4.36 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศของอาคารสำนักงาน
 หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น.



แผนภูมิที่ 4.37 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง
 ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 8.00 - 18.00 น.

4.2.2.3 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



แผนภูมิที่ 4.38 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

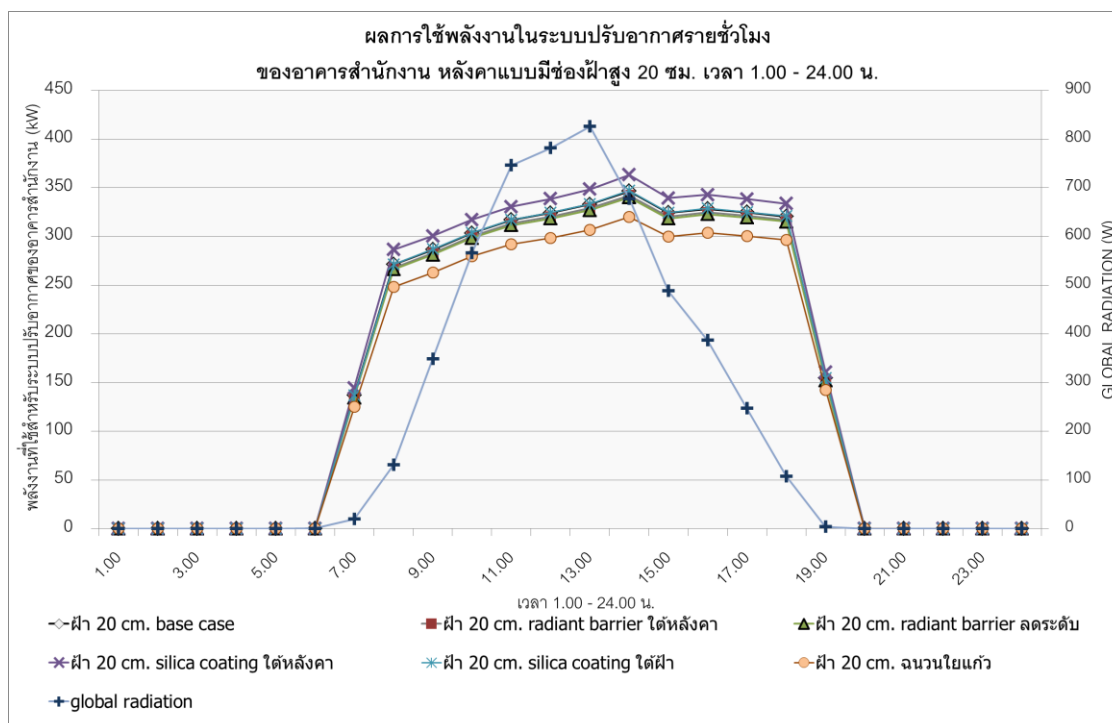
ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน ในชุดหลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่า หลังคาที่ได้ผลใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ววางบนฝ้า ใช้พลังงานไฟฟ้านรวม 237.15 kWh/sq.m. ประหยัดพลังงานไฟฟ้าคิดเป็น 2.19% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่มีประสิทธิภาพลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารองลงมาได้แก่หลังคาที่ใช้ลูมิเนียมพอยล์ติดตั้งแบบลดระดับ และหลังคาที่ใช้ลูมิเนียมพอยล์ติดได้แผ่นหลังคา ซึ่งประหยัดพลังงานไฟฟ้าเทียบกับกรณีไม่ใช้วัสดุกันความร้อน คิดเป็น 1.12% และ 0.76% ตามลำดับ

สำหรับหลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทั้งกรณีที่ทำได้แผ่นหลังคาและกรณีที่ทำฝ้าเพดาน ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อน(R_v) ต่ำกว่า หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้านรวมมากกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองพลังงานในชุดหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน และ หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

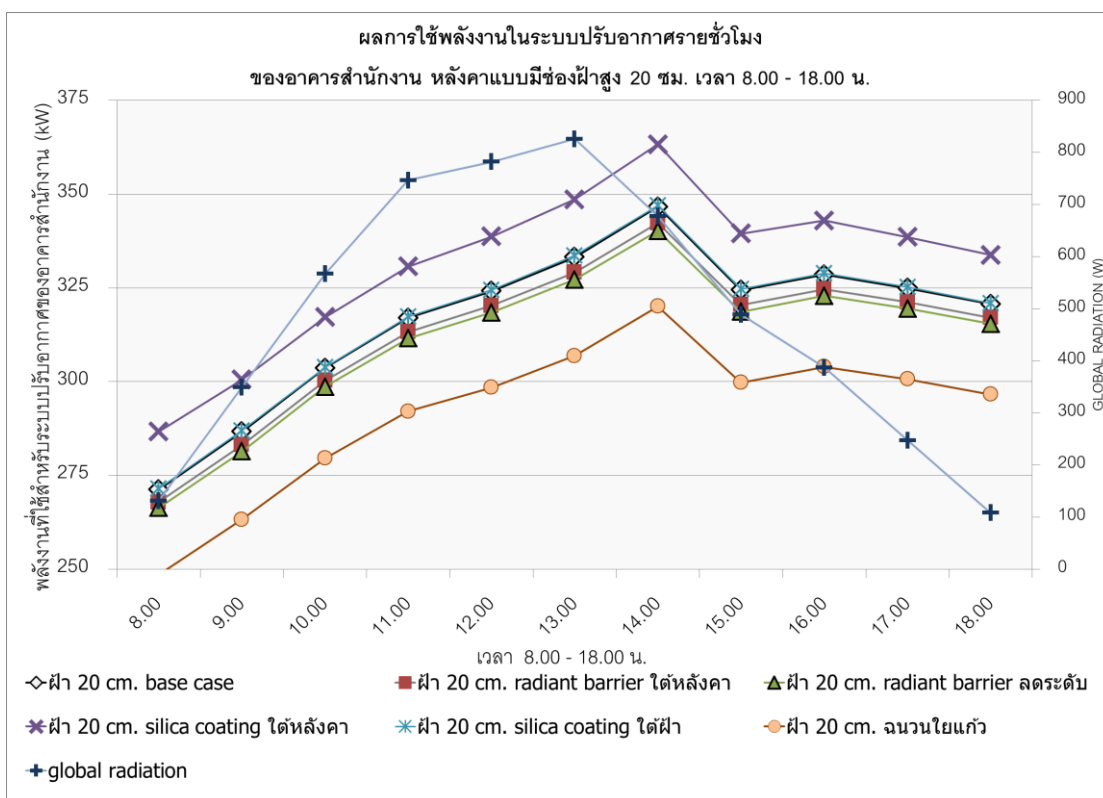
ตารางที่ 4.8 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ได้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ได้หลังคา	silica coating ได้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
R_t (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.-year	242.45	240.61	239.74	249.65	242.61	237.15

ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง ของหลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในการจำลองพลังงานของชุดหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน และ ชุดหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. หลังคาที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำ เช่น หลังคาที่ทำสื่อนุภาคซิลิกาต้านได้ มีระดับการใช้พลังงานสูงกว่ากรณีอื่น ขณะที่หลังคาที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนสูง เช่น หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ลูมิเนียมพอยล์ มีระดับการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศที่ต่ำกว่า



แผนภูมิที่ 4.39 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 - 24.00 น.



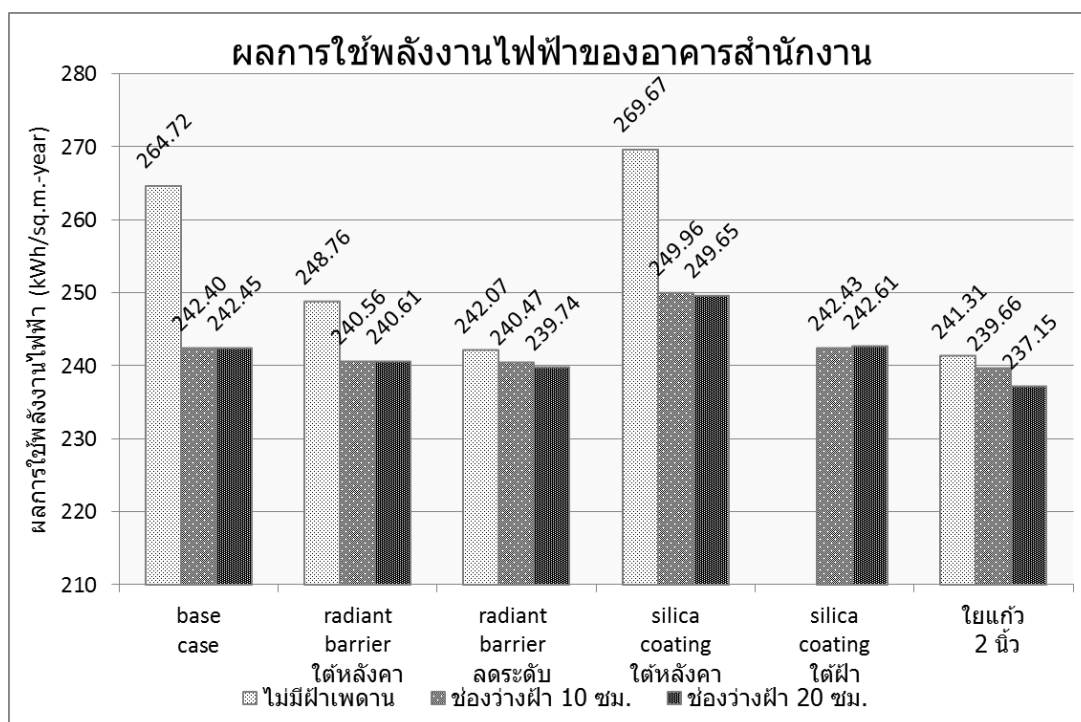
แผนภูมิที่ 4.40 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 8.00 - 18.00 น.

4.2.2.4 สรุป

การจำลองผลการใช้พลังงานของอาคารสำนักงานต้นแบบ แสดงให้เห็นว่าอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะในเวลากลางวันควรพิจารณาวัสดุเปลือกอาคารที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง เพื่อป้องกันความร้อนไม่ให้ถ่ายเทเข้ามาเป็นภาระของระบบปรับอากาศ เมื่อถึงเวลากลางคืนที่เปลือกอาคารต้องระบายความร้อนกลับสู่ภายนอก แม้ว่าวัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงจะหน่วงมิให้ความร้อนระบายออกไปได้โดยเร็ว ก็ไม่เป็นปัญหาแต่อย่างใด เนื่องจากไม่มีการทำงานของเครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืนนั่นเอง

ตารางที่ 4.9 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
R_t (sq.m. K/W)	0.03	0.15	0.43	0.02		0.55
kWh/sq.m.- year	264.72	248.76	242.07	269.67		241.31
ช่อง ATTIC 10 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	242.40	240.56	240.47	249.96	242.43	239.66
ช่อง ATTIC 20 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	242.45	240.61	239.74	249.65	242.61	237.15



แผนภูมิที่ 4.41 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารสำนักงาน

ผลการจำลองพลังงานของระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. แสดงให้เห็นว่าฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในอาคารสำนักงานได้ดีที่สุด โดยที่หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานรองลงมา และเมื่อพิจารณาผลการจำลองการใช้พลังงานทุกกรณี จะได้ว่า ระบบหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หรือมากกว่า ร่วมกับฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมต่ำที่สุด โดยประหยัดพลังงานได้เป็น 10.42% ของหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดานที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนใดๆ

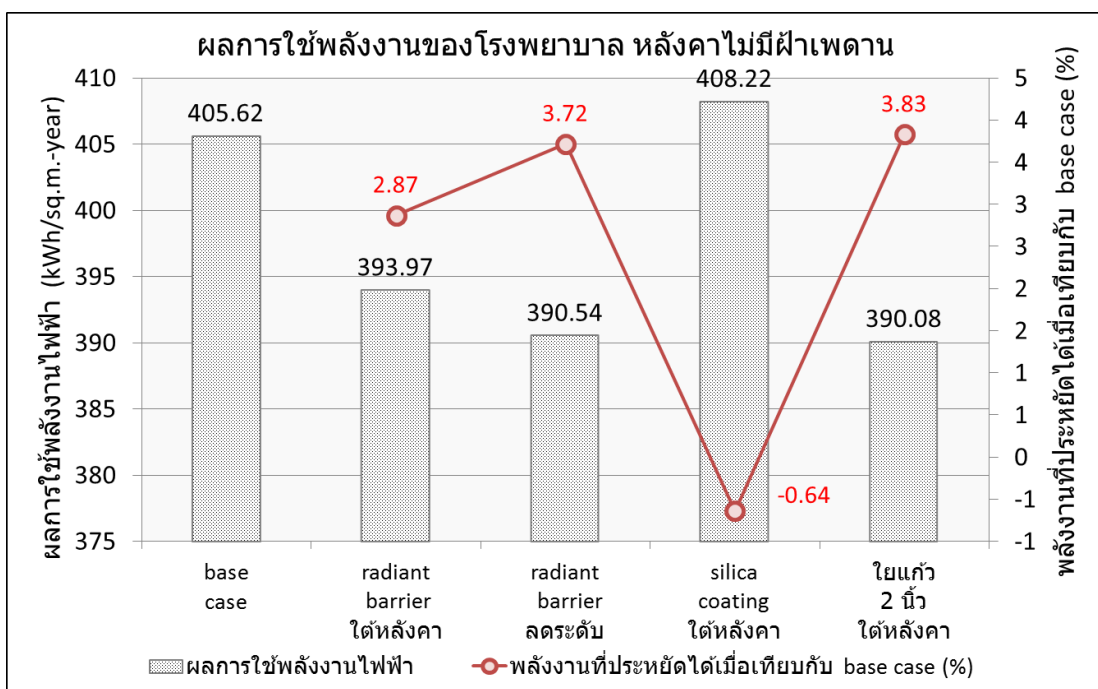
ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆ เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารสำนักงาน

	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		6.03	8.56	-1.87		8.85
ช่อง ATTIC 10 ซม.	8.43	9.13	9.16	5.58	8.42	9.47
ช่อง ATTIC 20 ซม.	8.41	9.11	9.44	5.69	8.35	10.42

4.2.3 อาคารโรงพยาบาล

4.2.3.1 ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาลในหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด 390.08 kWh/sq.m. ประหยัดกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน 3.83% รองลงมาได้แก่หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 10 ซม. ได้แก่หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. ใช้พลังงานไฟฟ้า 390.54 และ 393.97 kWh/sq.m. ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ประหยัดกว่า 3.72% และ 2.78% ตามลำดับ

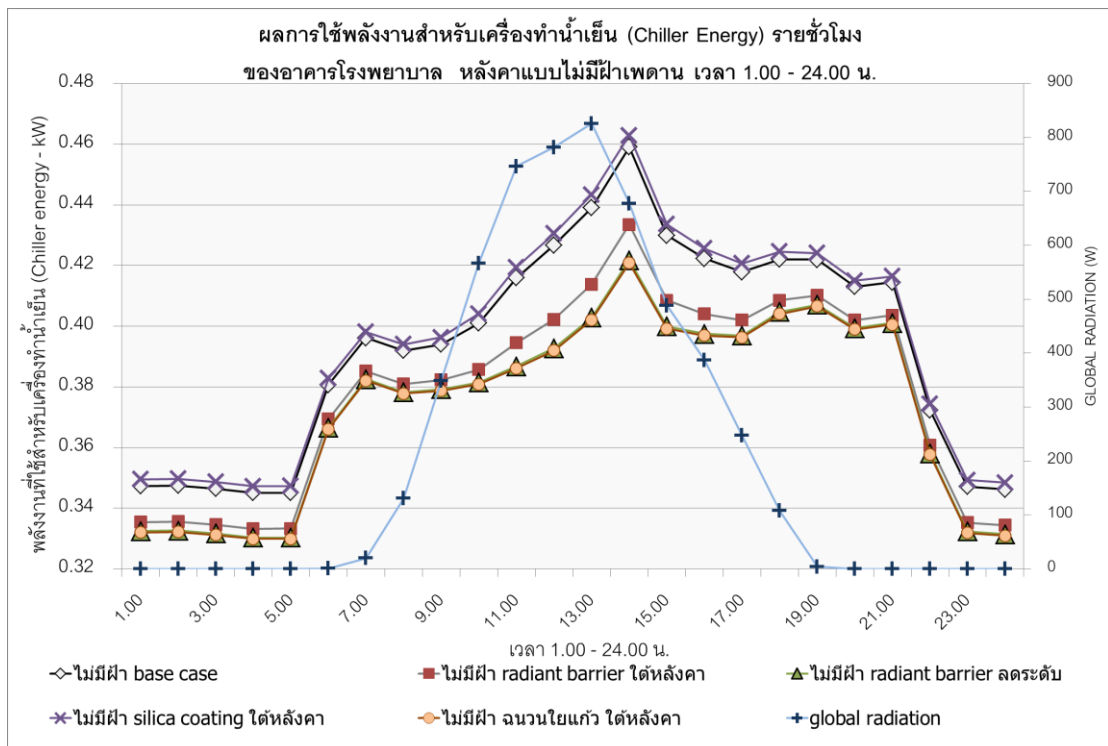


แผนภูมิที่ 4.42 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ตามแผนภูมิ 4.43 พบว่าหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t)ต่ำ เช่น หลังคาที่ใช้วัสดุภาคซิลิกาทา ด้านใต้ หลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน มีแนวโน้มการใช้พลังงานอยู่ในระดับที่สูง ส่วนหลังคาที่คำนวณได้ความต้านทานความร้อนค่อนข้างสูง เช่น หลังคาที่ใช้ฉนวนกันความร้อน หลังคาที่ใช้ อลูมิเนียมพอยล์ลดระดับ และ หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ติดด้านใต้ มีระดับการใช้พลังงานใน เครื่องทำน้ำเย็นต่ำกว่า

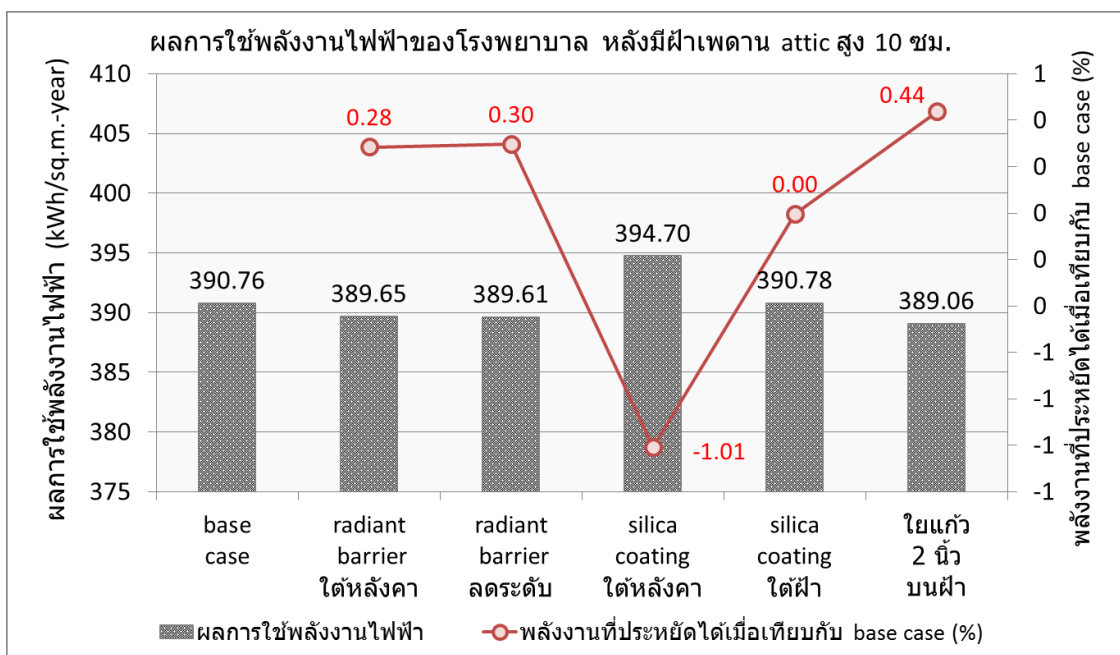
ตารางที่ 4.11 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน(kWh/sq.m.- year)				
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	ใยแก้ว 2 ชั้น ใต้หลังคา
R_t (sq.m. K/W)	0.03	0.15	0.43	0.02	0.55
kWh/sq.m.- year	405.62	393.97	390.54	408.22	390.08



แผนภูมิที่ 4.43 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 - 24.00 น.

4.2.3.2 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.



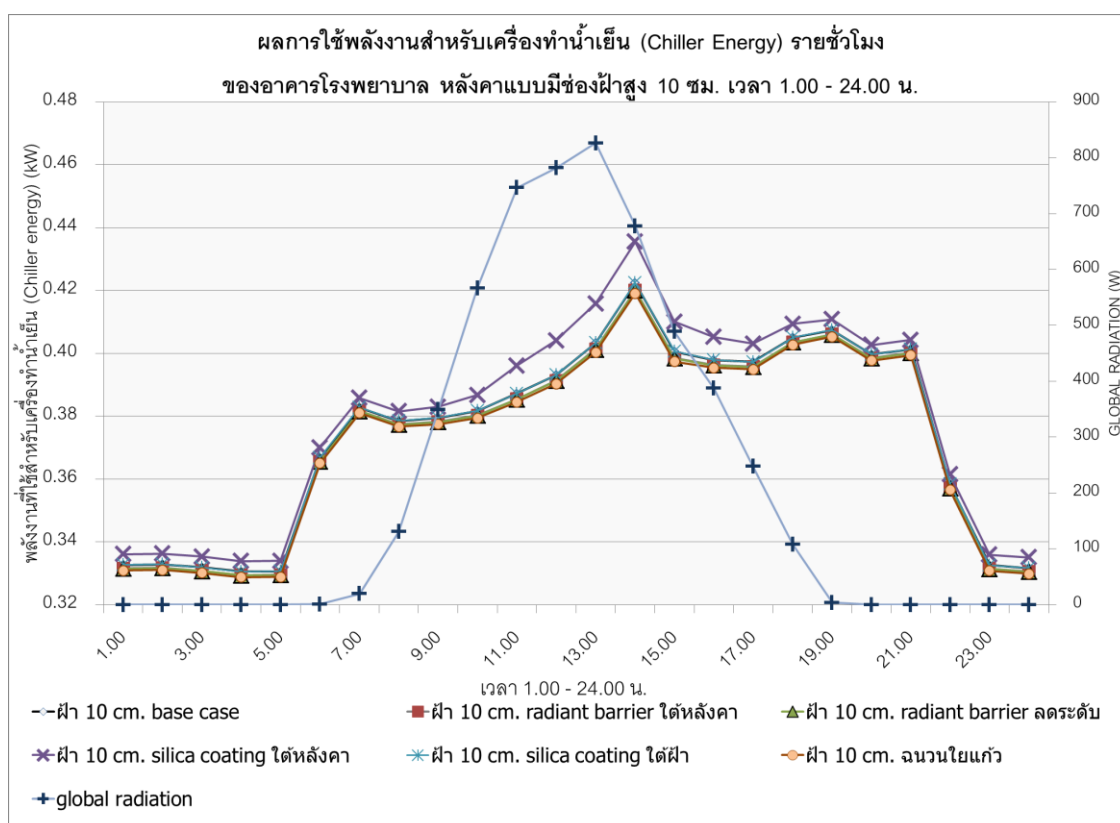
แผนภูมิที่ 4.44 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 10 ซม.

หลังคาที่ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมที่น้อยที่สุดคือ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า 389.06 kWh/sq.m. ต่อปี สามารถประหยัดพลังงานได้ 0.44% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้า 390.86 kWh/sq.m. หลังคาที่ใช้พลังงานไฟฟ้ารองลงมาจากหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว ได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดตั้งลดระดับและหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดด้านใต้แผ่นหลังคา ซึ่งใช้พลังงาน 389.61 และ 389.65 kWh/sq.m. ต่อปี ตามลำดับ เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ 0.30 และ 0.28% ตามลำดับ

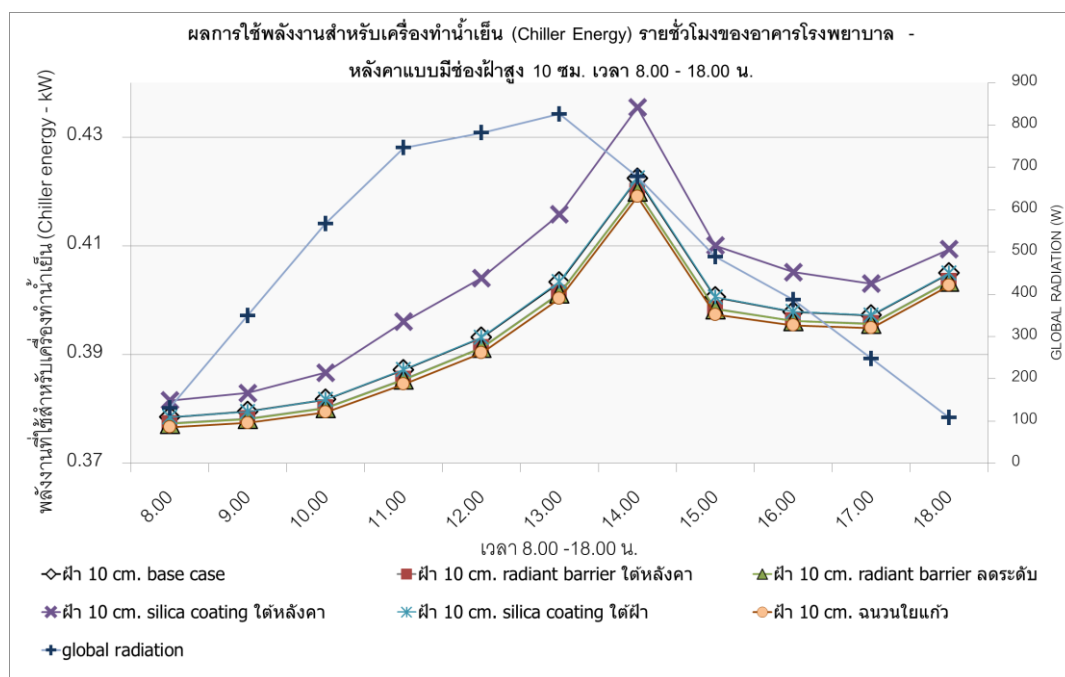
ตารางที่ 4.12 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ฝ้าหลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ฝ้าหลังคา	silica coating ฝ้า	ฝ้า 2 ชั้น บนมฝ้า
Rt (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	390.76	389.65	389.61	394.70	390.78	389.06

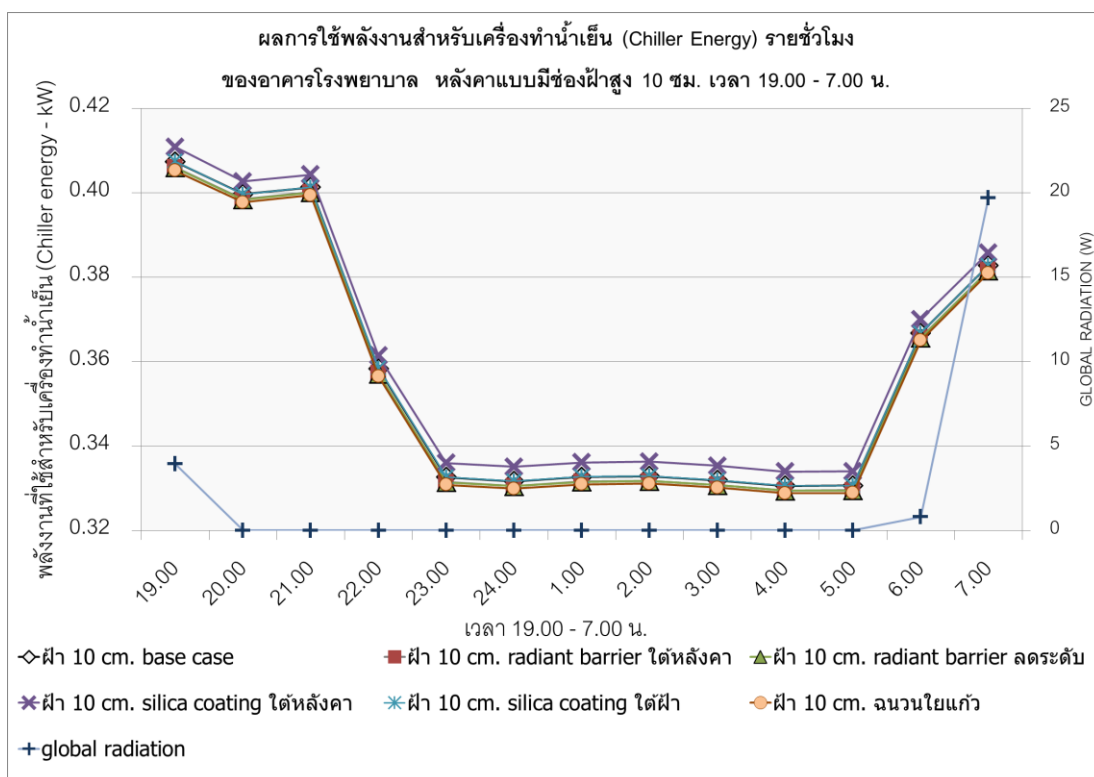
หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านใต้แผ่นหลังคา และ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้าน ใต้ฝ้าเพดาน ซึ่งคำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนรวม(R_t)ต่ำสุด ทำให้อาคารต้นแบบ สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน เมื่อพิจารณาแผนภูมิที่ 4.46 และ 4.47 จะเห็นว่า หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาใต้แผ่นหลังคา และ หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาใต้ ฝ้าเพดาน มีระดับการใช้พลังงานสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นสูงกว่าหลังคาที่มีค่าความต้านทานความ ร้อนรวมสูง เช่น หลังคาที่ใช้ลูมิเนียมพอยล์ เป็นต้น



แผนภูมิที่ 4.45 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.เวลา 1.00 -24.00 น.

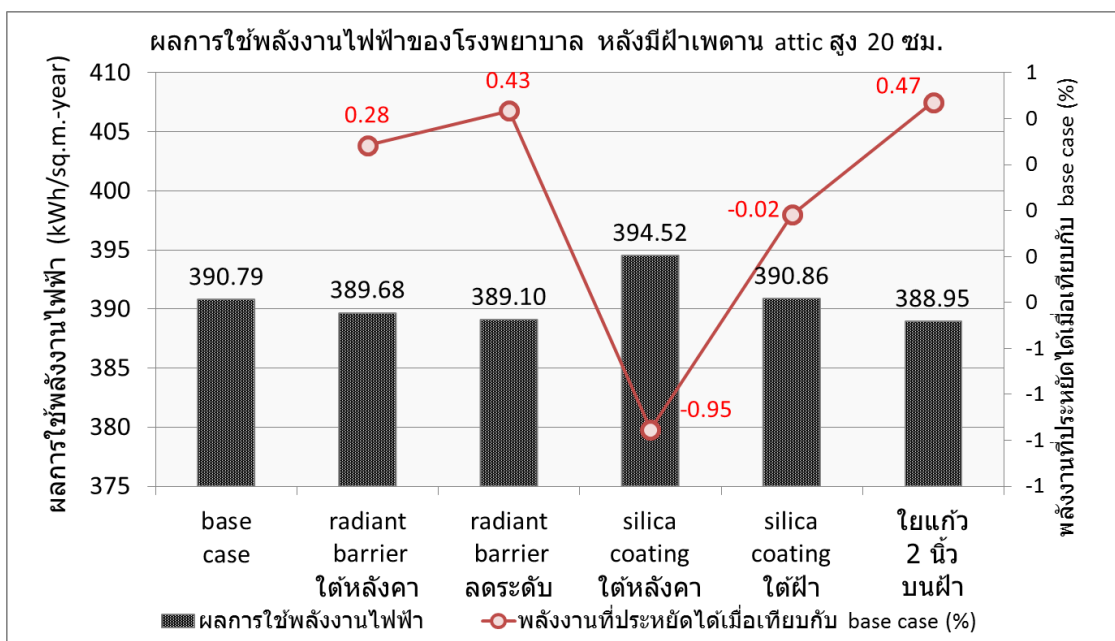


แผนภูมิที่ 4.46 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 8.00 - 18.00 น.



แผนภูมิที่ 4.47 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 19.00 - 7.00 น.

4.2.3.3 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

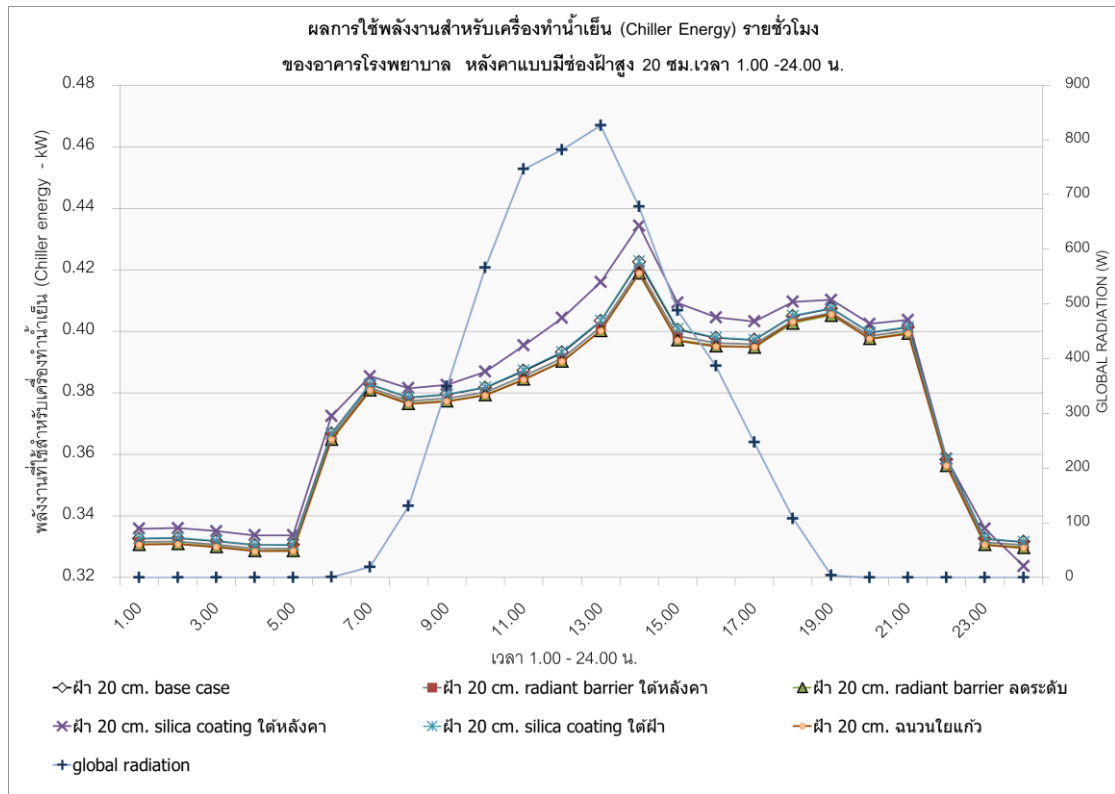


แผนภูมิที่ 4.48 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศ 20 ซม.

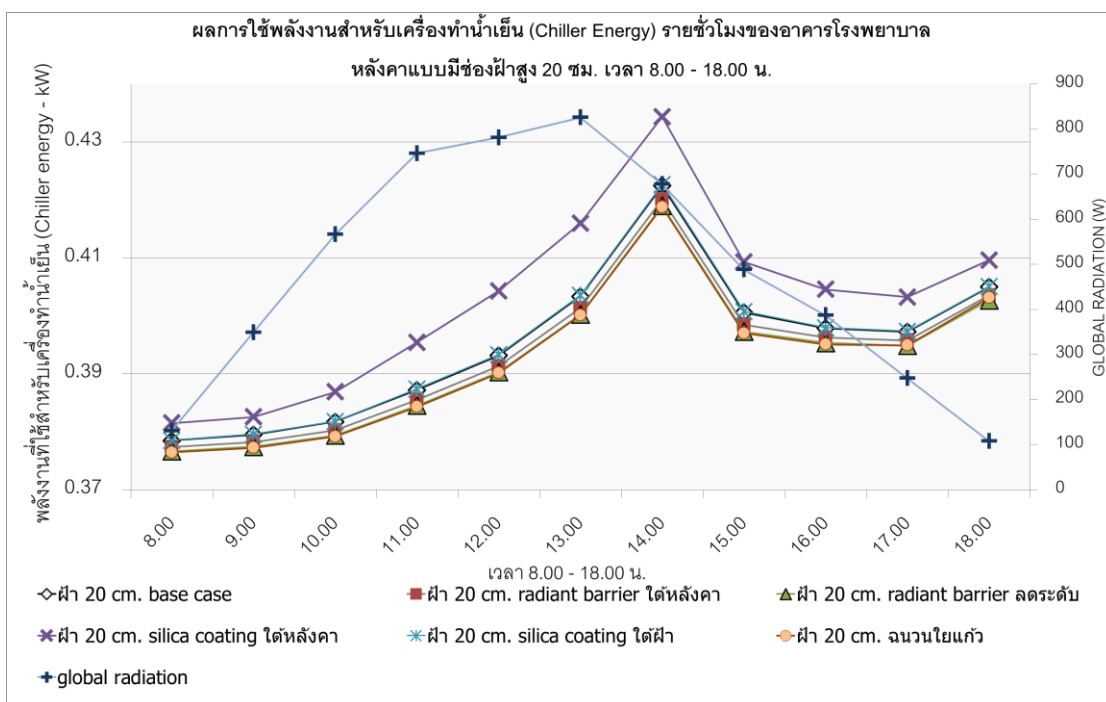
ผลการใช้พลังงานของอาคารโรงพยาบาล ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่า การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว วางบนฝ้า ทำให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปีน้อยที่สุด 388.95 kWh/sq.m. ประหยัดได้ 0.47% เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุป้องกันความร้อน หลังคาที่ช่วยประหยัดพลังงานรองลงมาได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดตั้งแบบลดระดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดตั้งใต้ฝ้าหลังคา ซึ่งประหยัดพลังงานไฟฟ้าเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนได้ 0.43% และ 0.28% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

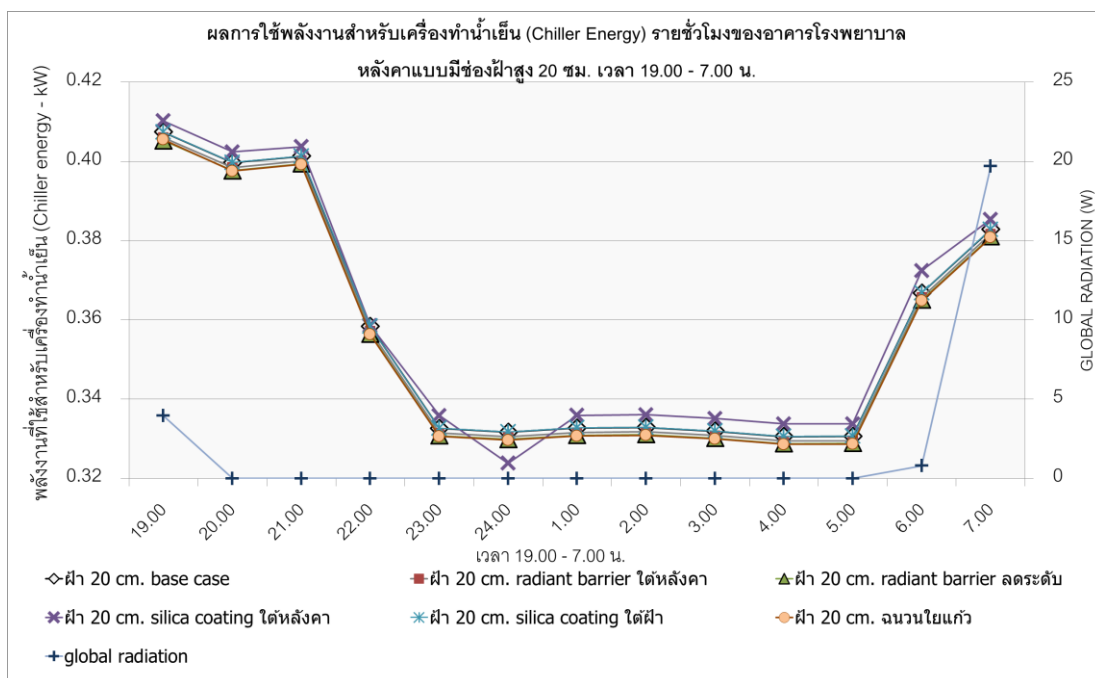
	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. (kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ฝ้าหลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ฝ้าหลังคา	silica coating ฝ้า	ฝ้า 2 นิ้ว บนฝ้า
R_f (sq.m. KW)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	390.79	389.68	389.10	394.52	390.86	388.95



แผนภูมิที่ 4.49 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
 ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น.



แผนภูมิที่ 4.50 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 8.00 - 18.00 น.



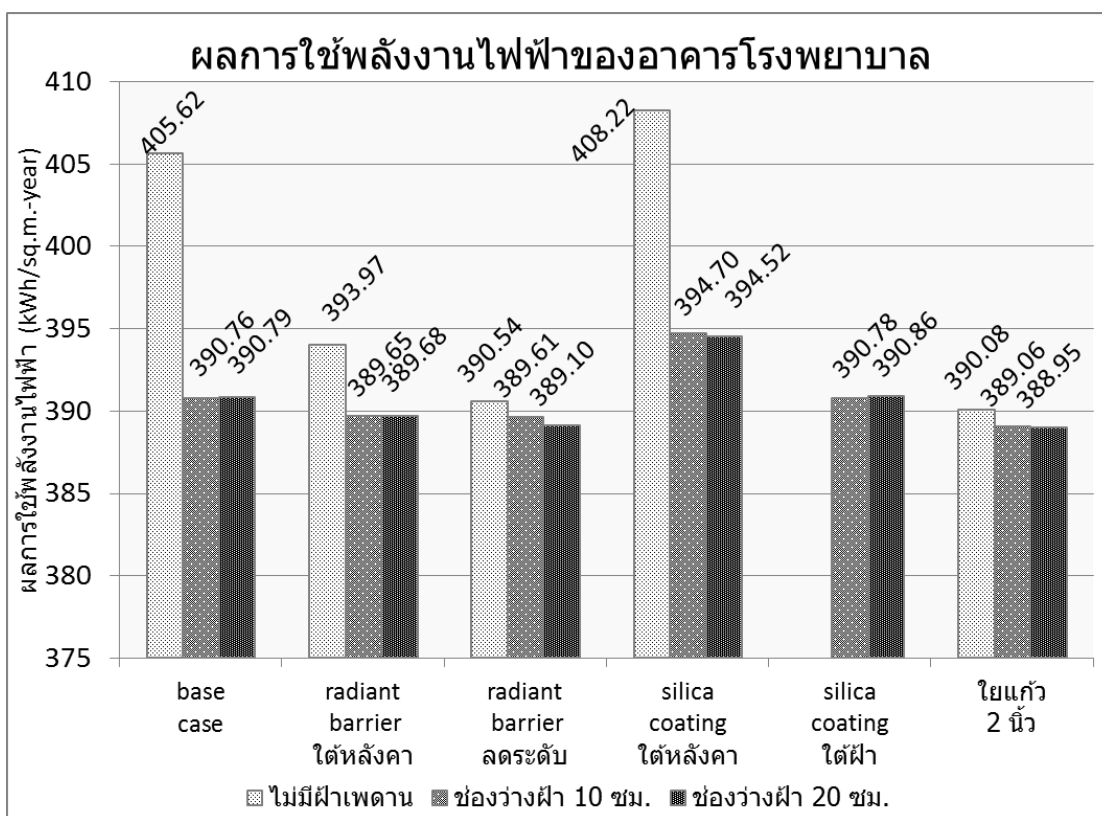
แผนภูมิที่ 4.51 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 19.00 - 7.00 น.

4.2.3.4 สรุป

ตารางที่ 4.14 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
R_t (sq.m. K/W)	0.03	0.15	0.43	0.02		0.55
kWh/sq.m.- year	405.62	393.97	390.54	408.22		390.08
ช่อง ATTIC 10 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	390.76	389.65	389.61	394.70	390.78	389.06
ช่อง ATTIC 20 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	390.79	389.68	389.10	394.52	390.86	388.95

ผลการจำลองการใช้พลังงานของอาคารโรงพยาบาลแสดงให้เห็นว่า ระบบหลังคาทั้ง 3 ระบบ หลังคาที่ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดคือหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อน(R_t)สูงสุด หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอยล์ลดระดับ มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว วิธีกันความร้อนที่สิ้นเปลืองพลังงานที่สุดได้แก่ การใช้สีอนุภาคซิลิกาทาใต้หลังคา และ การใช้สีอนุภาคทาใต้ฝ้าเพดาน ซึ่งมีความต้านทานความร้อนต่ำ สอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในอาคารสำนักงานต้นแบบที่มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน และเมื่อพิจารณาทุกกรณีรวมกัน จะได้ว่า หลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ฟูฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานที่สุด ซึ่งสามารถประหยัดการใช้ไฟฟ้าได้ 4.11% เมื่อเทียบกับหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดานที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน



แผนภูมิที่ 4.52 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารโรงพยาบาล

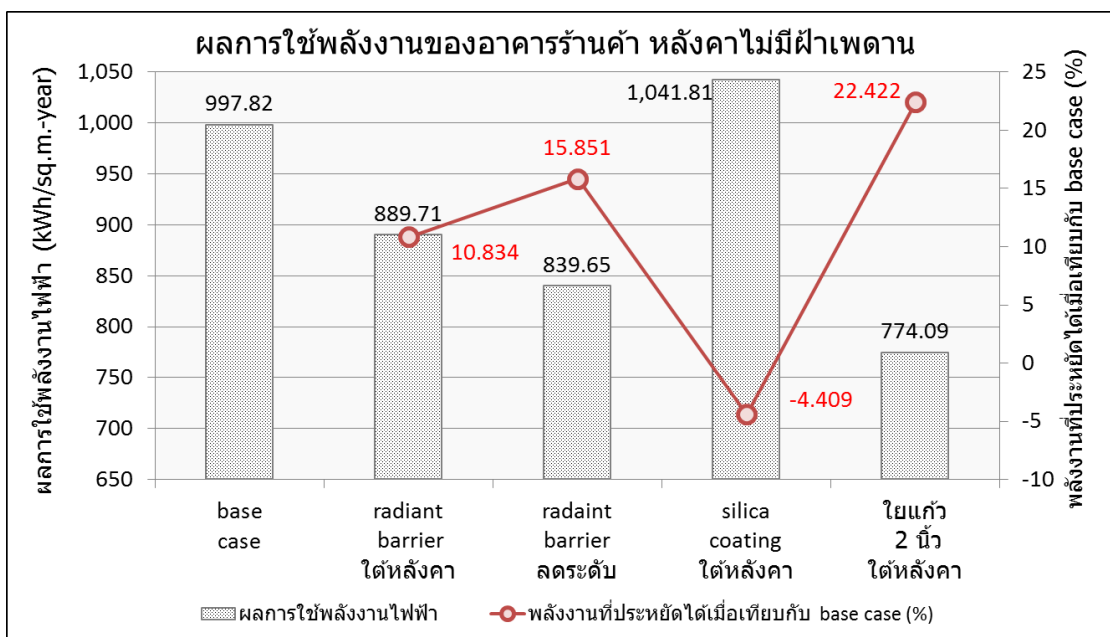
ตารางที่ 4.15 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆ
เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารโรงพยาบาล

	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ได้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ได้หลังคา	silica coating ได้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		2.87	3.72	-0.64		3.83
ช่องATTIC 10 ซม.	3.66	3.94	3.95	2.69	3.66	4.08
ช่องATTIC 20 ซม.	3.65	3.93	4.07	2.74	3.64	4.11

4.2.4 อาคารร้านค้า

อาคารร้านค้าต้นแบบมีการตั้งอุณหภูมิใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลา 10.00 – 22.00 น.

4.2.4.1 ระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน



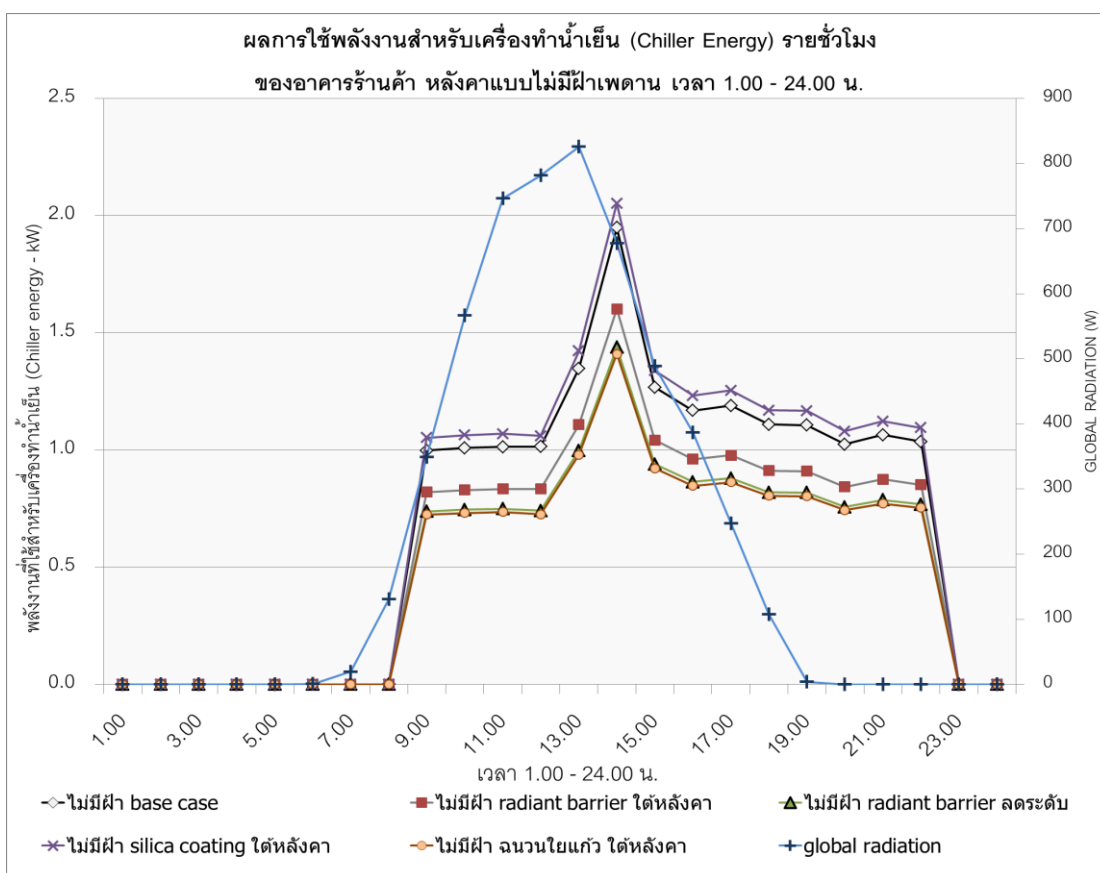
แผนภูมิที่ 4.53 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

ในการจำลองการใช้พลังงานอาคารร้านค้าที่ใช้หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ผลการใช้ไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด 779.04 kWh/sq.m. ประหยัดพลังงานได้ถึง 22.42 % จากหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้ารองลงมา พบว่าเป็นหลังคาที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อน (R_f) สูงรองลงมา ได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วลดระดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วติดด้านใต้ และ พบว่าหลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาใต้แผ่นหลังคาซึ่งเป็นหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนน้อยที่สุด เป็นทางเลือกที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี 1041.81 kWh/sq.m.

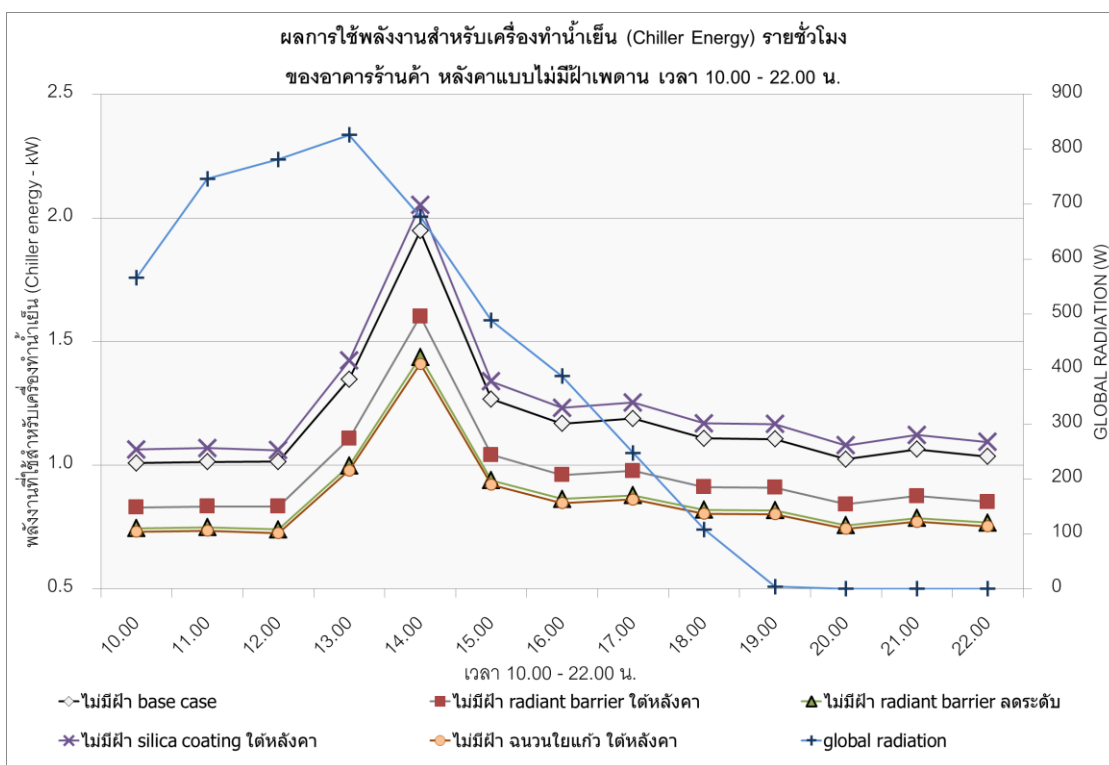
ตารางที่ 4.16 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน (kWh/sq.m.- year)				
	base case	radiant barrier ได้หลังคา	radaint barrier ลดระดับ	silica coating ได้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ได้หลังคา
R _f (sq.m. KW)	0.03	0.15	0.43	0.02	0.05
kWh/sq.m.- year	997.82	889.71	839.65	1,041.81	774.09

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานในการทำความเย็นรายชั่วโมงปรากฏว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำความเย็นต่ำที่สุด รองลงมาได้แก่ หลังคาที่ใช้อลูมิเนียมฟอยล์ ส่วนหลังคาที่ทำสื่อนุภาคซิลิกาต้านใต้ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุด มีระดับการใช้พลังงานในเครื่องทำน้ำเย็นสูงสุด

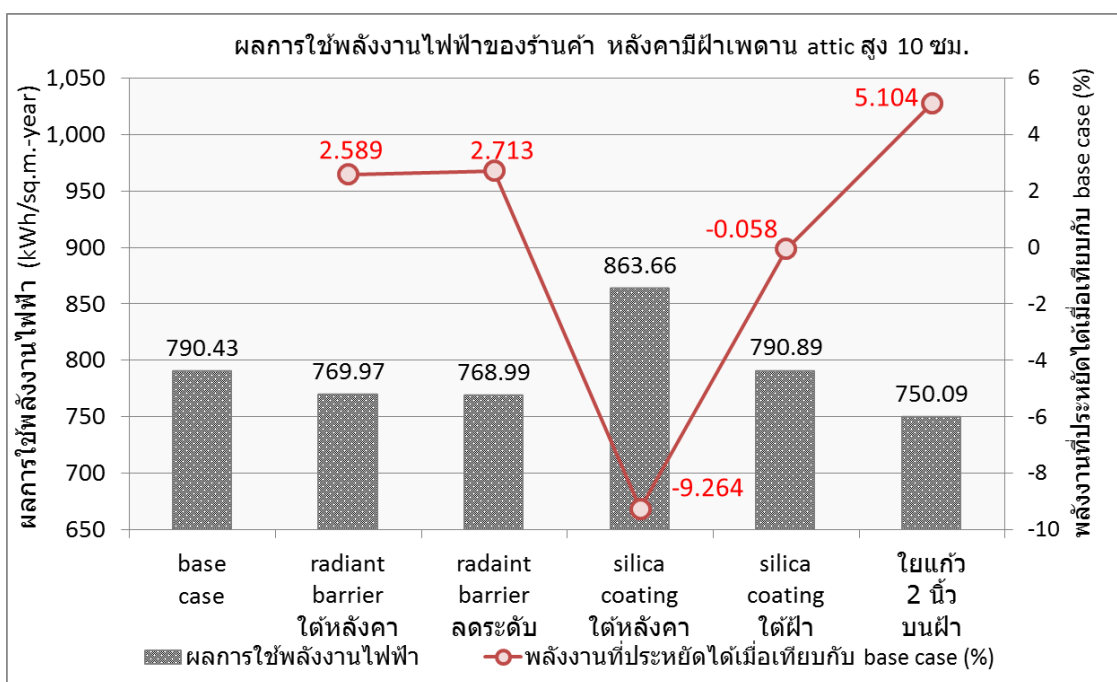


แผนภูมิที่ 4.54 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมงของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 1.00 – 24.00 น.



แผนภูมิที่ 4.55 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน เวลา 10.00 – 22.00 น.

4.2.4.2 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.



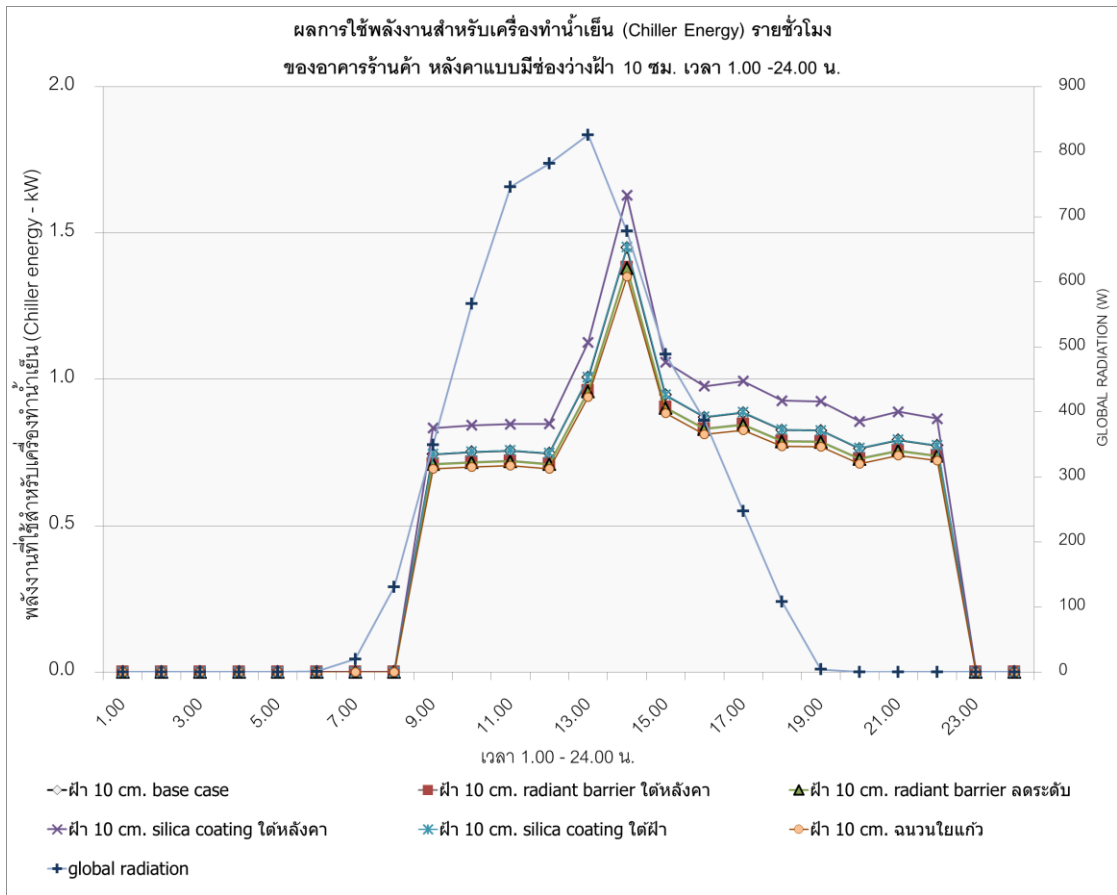
แผนภูมิที่ 4.56 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

ในระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. พบว่าหลังคาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด ได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ใช้พลังงานไฟฟ้า 750.09 kWh/sq.m. ต่อปี ประหยัดพลังงานไฟฟ้า 5.10% ของการใช้พลังงานในหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน รองลงมา ได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ระดับ ใช้พลังงานไฟฟ้า 768.99 kWh/sq.m. ประหยัดพลังงานได้ 2.71% เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ติดได้ แผ่นหลังคา ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้า 769.97 kWh/sq.m. ต่อปี ประหยัดพลังงานได้ 2.59% เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน และ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านใต้ ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด 863.66 kWh/sq.m.

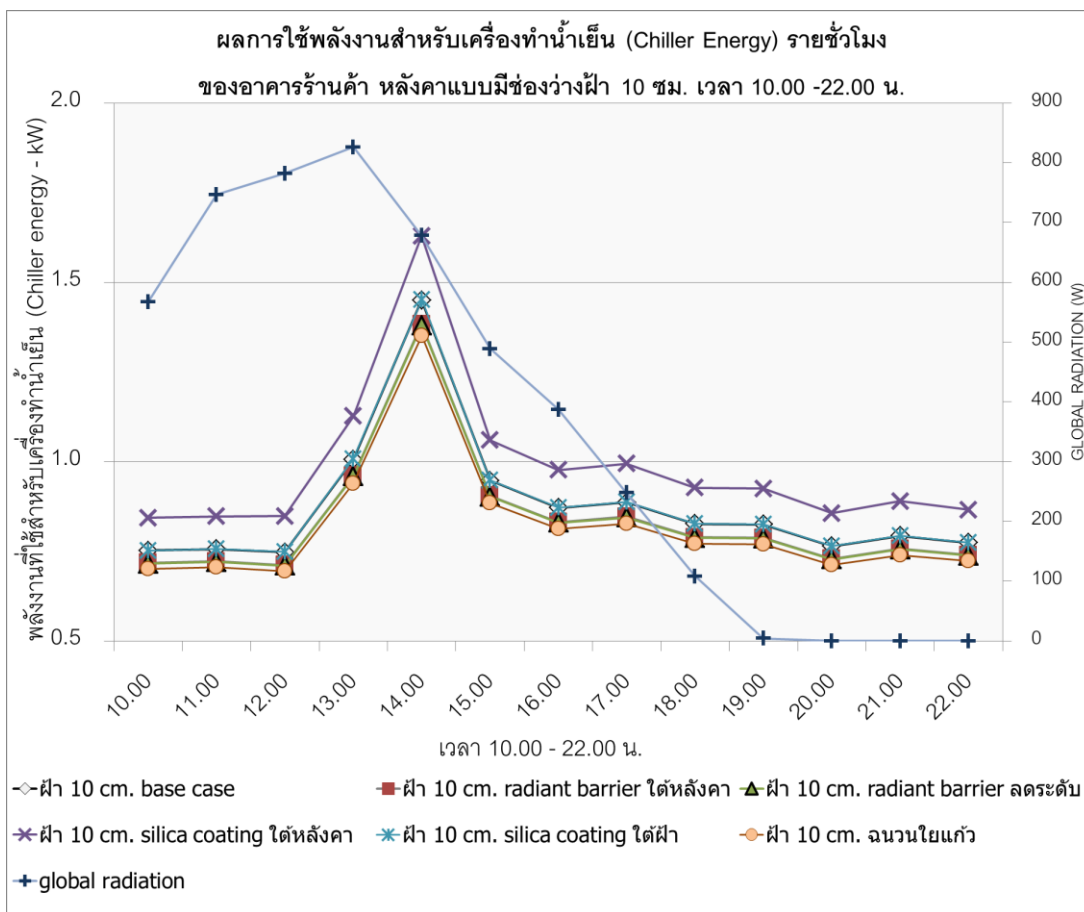
ตารางที่ 4.17 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radaint barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
R_t (sq.m. KW)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	790.43	769.97	768.99	863.66	790.89	750.09

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานเครื่องทำน้ำเย็นปรากฏว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีอื่นๆ และ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกาทาด้านใต้ซึ่งมีค่าต้านทานความร้อนต่ำสุด มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด



แผนภูมิที่ 4.57 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 1.00 – 24.00 น.



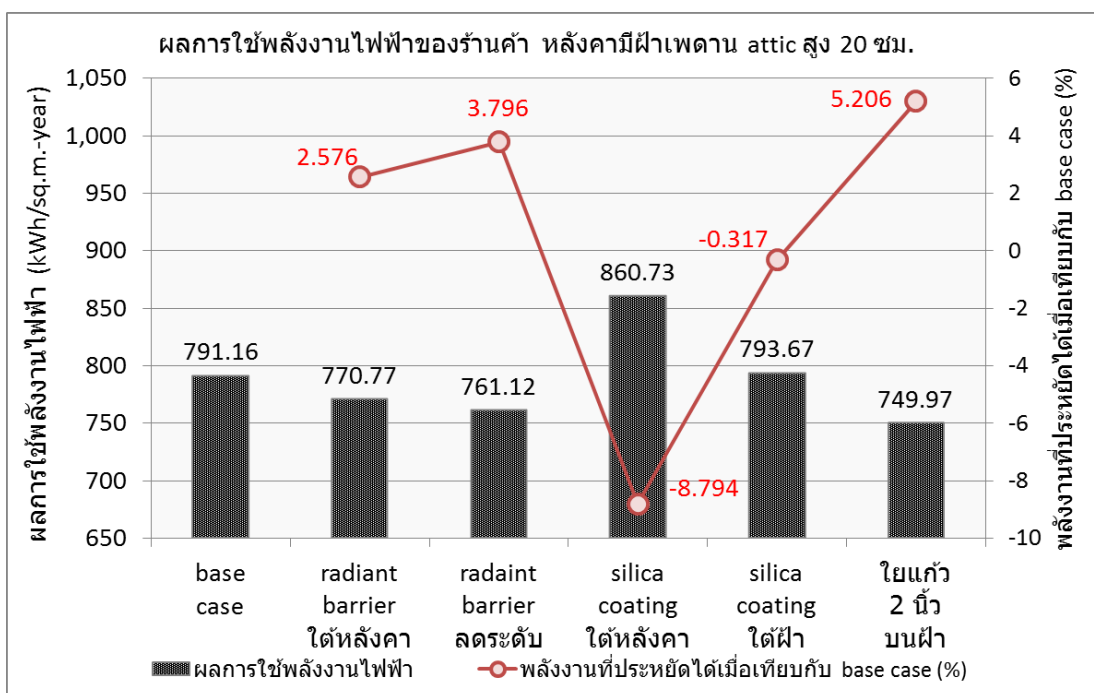
แผนภูมิที่ 4.58 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. เวลา 10.00 – 22.00 น.

4.2.4.3 ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

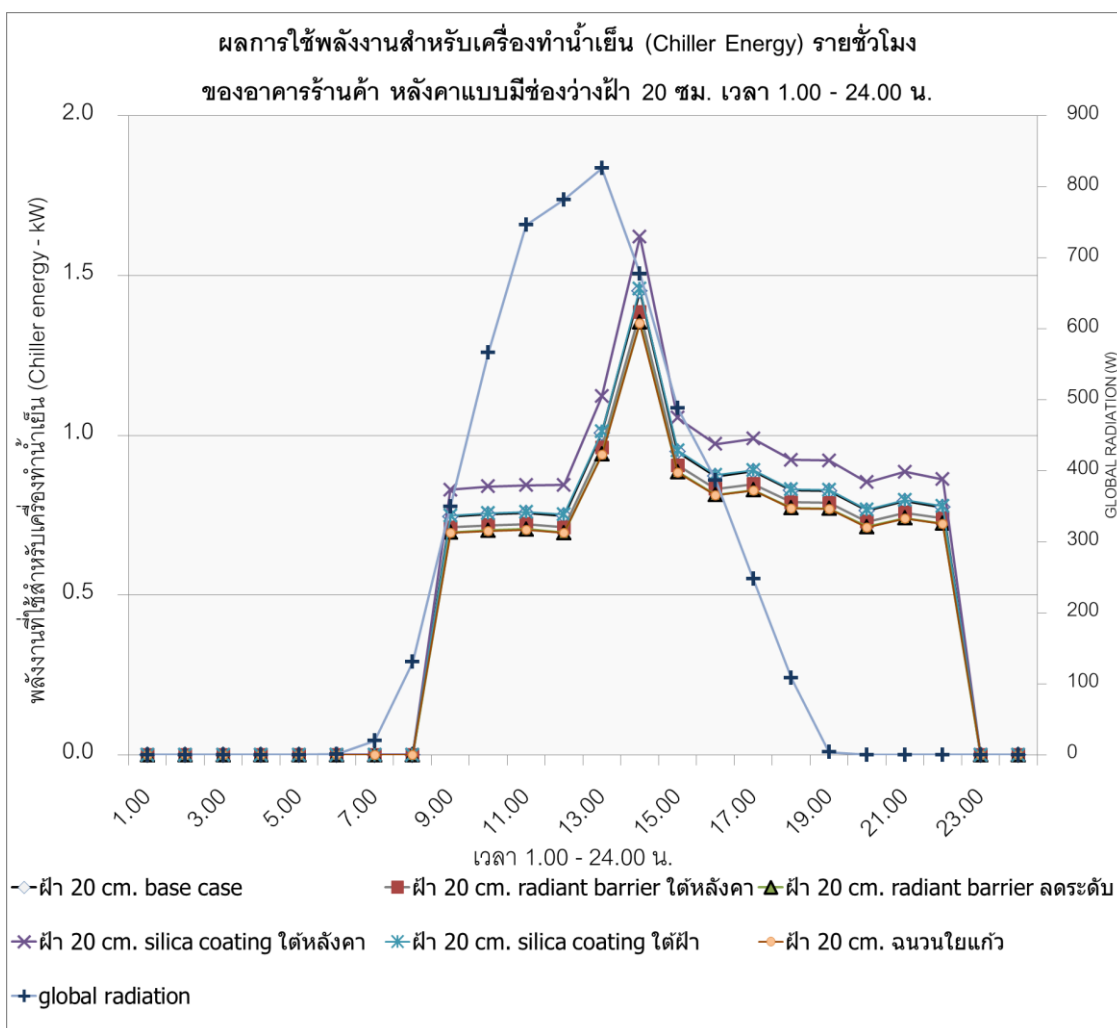
ตารางที่ 4.18 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radaint barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
R_t (sq.m. KW)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	791.16	770.77	761.12	860.73	793.67	749.97

ผลการใช้พลังงานของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 749.97 kWh/sq.m. ประหยัดได้ 5.20 % ของพลังงานที่ใช้ในหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้ารองลงมาได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วพอยล์ลระดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วพอยล์ทาด้านใต้ ใช้พลังงานไฟฟ้า 761.12 และ 770.77 kWh/sq.m. ต่อปีตามลำดับ และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วพอยล์ทาด้านใต้ได้ผลการใช้พลังงานสูงสุด 860.73 kWh/sq.m. ต่อปี

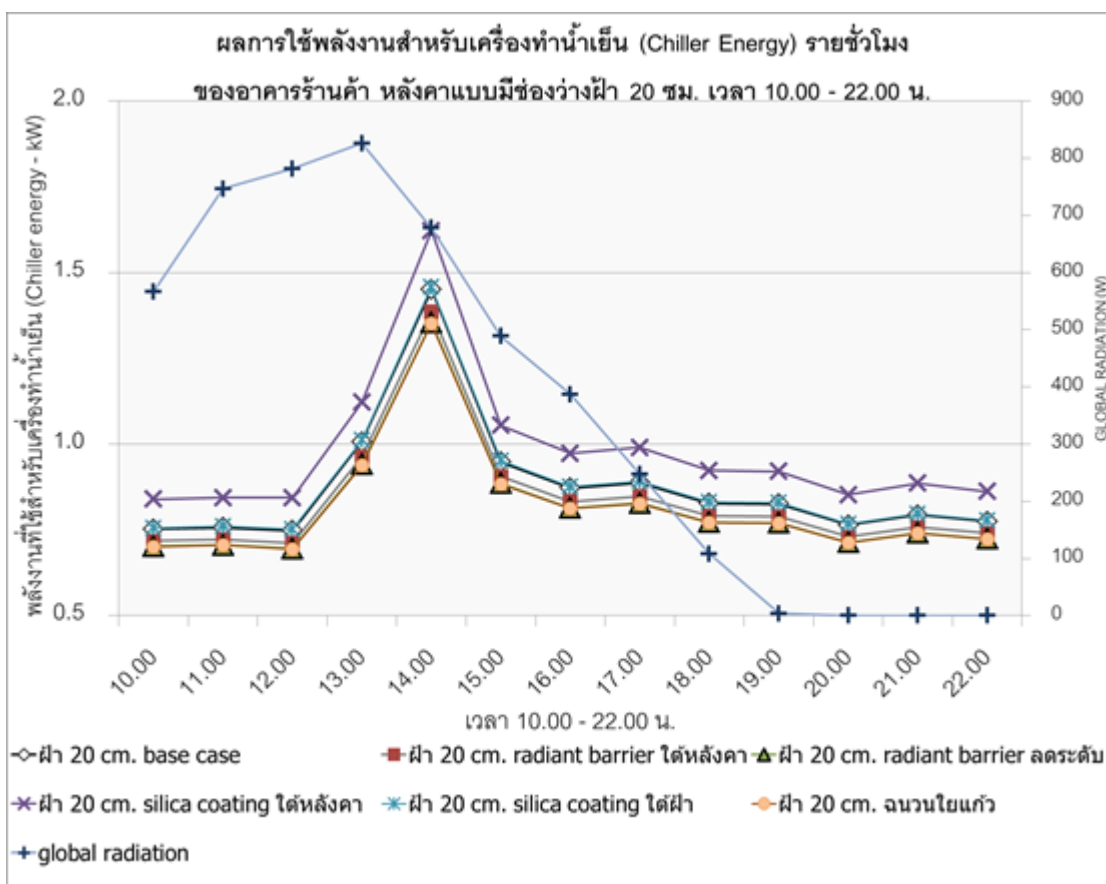


แผนภูมิที่ 4.59 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.



แผนภูมิที่ 4.60 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
 ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 1.00 -24.00 น.

เมื่อพิจารณาผลการใช้พลังงานเครื่องทำน้ำเย็นปรากฏว่า ได้ผลสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้น
 ในหลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน และ หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. คือ หลังคาที่ใช้
 ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว หลังคาที่ใช้ลูมีเนียมพอยด์ มีระดับการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำกว่ากรณีอื่นๆ
 และ หลังคาที่ใช้สื่อนุภาคซิลิกาทางด้านใต้ซึ่งมีค่าต้านทานความร้อนต่ำสุด มีระดับการใช้พลังงาน
 ไฟฟ้าสูงสุด



แผนภูมิที่ 4.61 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องทำน้ำเย็นภายใน 24 ชั่วโมง
ของอาคารร้านค้า หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. เวลา 10.00 - 22.00 น.

4.2.4.4 สรุป

ผลการจำลองการใช้พลังงานแสดงของอาคารร้านค้า แสดงให้เห็นว่า วิธีกันความร้อนที่ประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุดสำหรับหลังคาทั้ง 3 ระบบ คือ การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด รองลงมาได้แก่ การใช้อลูมิเนียมฟอยล์ลดระดับ และ การใช้อลูมิเนียมฟอยล์ติดด้านใต้ ส่วนกรณีที่ทำให้อาคารสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ได้แก่ หลังคาที่ใช้สีอนุภาคซิลิกา ซึ่งเป็นหลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำ

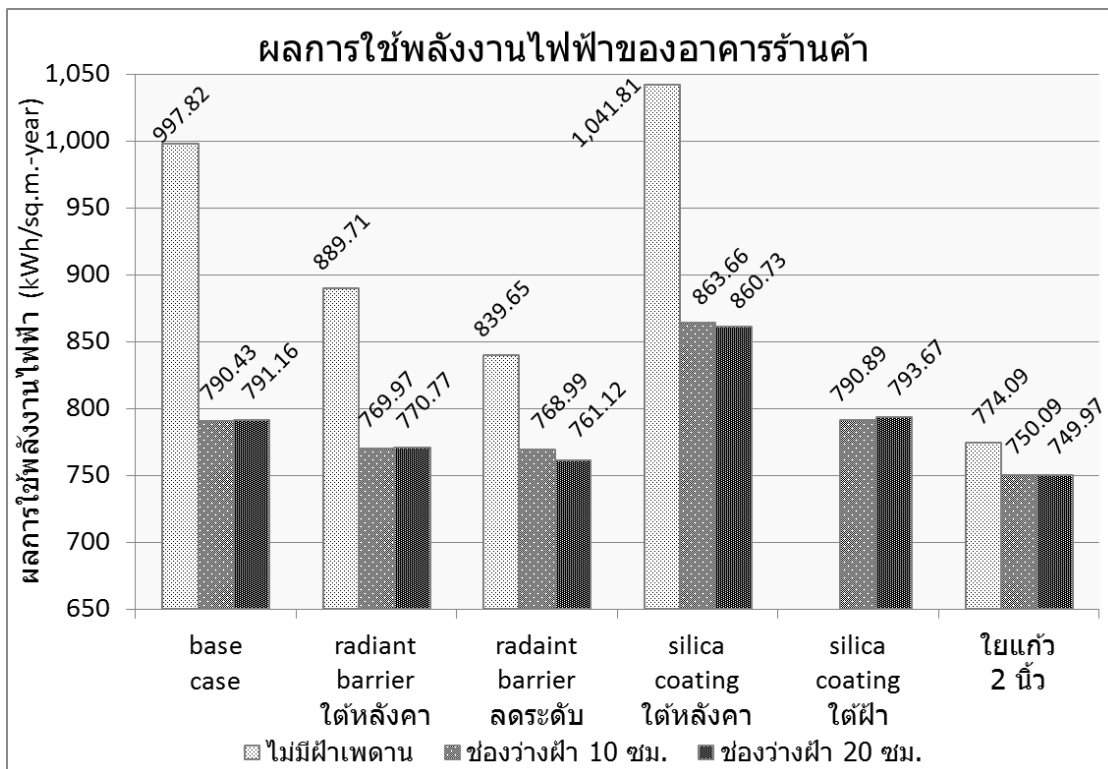
ตารางที่ 4.19 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า

	การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า(kWh/sq.m.- year)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radaint barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
R_t (sq.m. K/W)	0.03	0.15	0.43	0.02		0.55
kWh/sq.m.- year	997.82	889.71	839.65	1,041.81		774.09
ช่องว่างฝ้า 10 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
kWh/sq.m.- year	790.43	769.97	768.99	863.66	790.89	750.09
ช่องว่างฝ้า 20 ซม.						
R_t (sq.m. K/W)	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18
kWh/sq.m.- year	791.16	770.77	761.12	860.73	793.67	749.97

เมื่อพิจารณาในภาพรวม หลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 749.97 kWh/sq.m. ซึ่งลดลงถึง 24.84% เมื่อเทียบกับหลังคาไม่มีฝ้าเพดานที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ซึ่งหากมีทางเลือกในการออกแบบหลังคา และคำนึงถึงผลในแง่การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลักแล้ว อาจต้องเลือกหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หรือมากกว่า ร่วมกับการใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

จากผลการจำลองการใช้พลังงานรวม และ ผลการใช้ไฟฟ้าในเครื่องทำน้ำเย็น แสดงว่าอาคารร้านค้าซึ่งมีการใช้งานในช่วงกลางวัน ความร้อนจากภายนอกที่เข้าสู่อาคารเป็นปัจจัยในการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับการปรับอากาศ หลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงกว่ามีประสิทธิภาพผลในแง่ของการประหยัดพลังงานมากกว่า วัสดุฉนวนพอยล์ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้รองลงมาจากฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว และมีข้อสังเกตว่าอาคารร้านค้าต้นแบบนี้ มีชั่วโมงการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันมากกว่ากลางคืน ซึ่งหากเป็นไปได้ในงานวิจัยครั้งต่อไปควรหาอาคารต้นแบบซึ่งมีช่วงใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันยาวกว่าเวลากลางวันมาจำลองผลการใช้พลังงานเปรียบเทียบกับ ซึ่งฉนวนพอยล์จะแสดงคุณสมบัติใน

การช่วยระบายความร้อนสะสมในอาคาร ลดภาระของเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน เกิดประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าดีขึ้น



แผนภูมิที่ 4.62 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารร้านค้า

ตารางที่ 4.20 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของหลังคาประเภทต่างๆ เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน ของอาคารร้านค้า

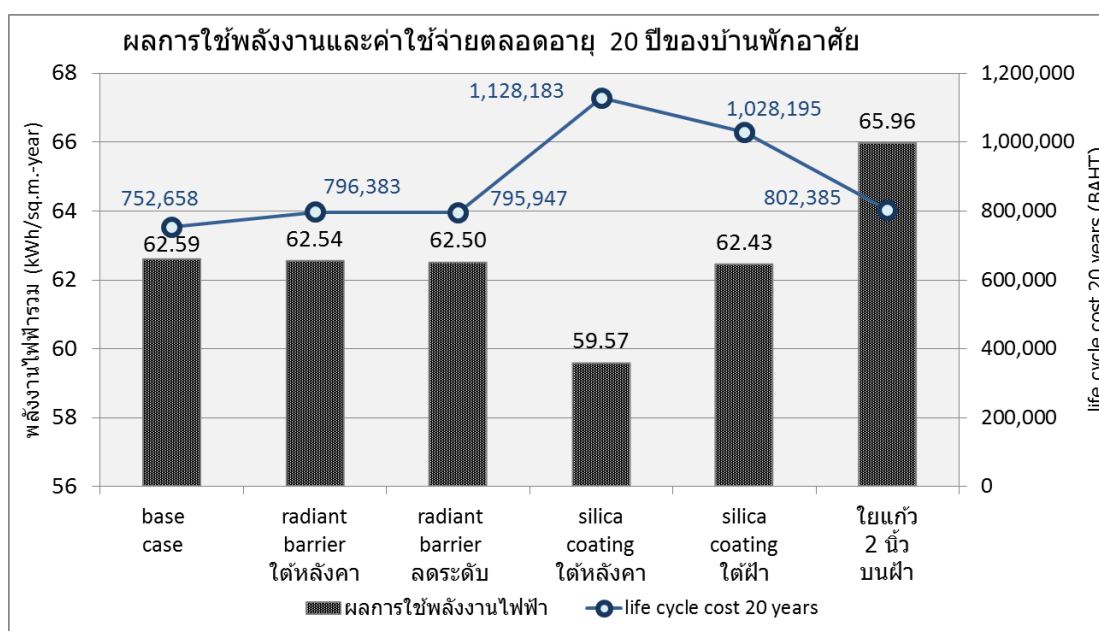
	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier (หลังคา)	radaint barrier (ลดระดับ)	silica coating (หลังคา)	silica coating (ฝ้า)	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		10.83	15.85	-4.41		22.42
ช่องATTIC 10 ซม.	20.78	22.83	22.93	13.45	20.74	24.83
ช่องATTIC 20 ซม.	20.71	22.75	23.72	13.74	20.46	24.84

4.3 การคำนวณและวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

พิจารณาจากผลค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคาร 20 ปี เป็นหลัก ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าที่มาจากผลการใช้พลังงานของวัสดุกันความร้อน ต้นทุนของวัสดุกันความร้อน ตลอดจนค่าบำรุงรักษา เพื่อให้ทราบความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงต่อไป

4.3.1 อาคารพักอาศัย

ในอาคารพักอาศัยพบว่า วิธีกันความร้อนที่ดีที่สุด คือ การใช้สีอนุภาคซิลิกาทาได้หลังคา ซึ่งให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปีน้อยที่สุด คือ 12,034 kWh คิดเป็นค่าไฟฟ้า 48,136 บาท เมื่อนำมาคำนวณหาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน พบว่าสีอนุภาคซิลิกามีค่าวัสดุต่อตารางเมตรสูงกว่าวัสดุอื่น (558 บาท) และ ต้องบำรุงรักษาโดยการทาสีทับทุกๆ 5 ปี ซึ่งเท่ากับว่าต้องลงทุนซื้อวัสดุใหม่ทุกๆ 5 ปี จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานรวม 1,128,183 บาท ซึ่งสูงที่สุดในวิธีกันความร้อนทั้ง 6 กรณี เมื่อพิจารณาวิธีกันความร้อนที่ช่วยประหยัดพลังงานได้รองลงมา เช่น การติดตั้งฉนวนใยแก้วระดับ และ การติดตั้งฉนวนใยแก้วด้านใต้หลังคา พบว่า ทั้งสองกรณีนี้มีค่าใช้จ่ายติดตั้งฉนวนใยแก้วต่อตารางเมตร 186 บาท ซึ่งถูกกว่าสีอนุภาคซิลิกา และไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เนื่องจากใช้วิธีการติดตั้งแบบคว่ำลงจึงไม่มีฝุ่นเกาะ ทำให้เมื่อรวมค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ได้ 795,947 และ 796.383 บาทตามลำดับ



แผนภูมิที่ 4.63 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อนในบ้านพักอาศัย

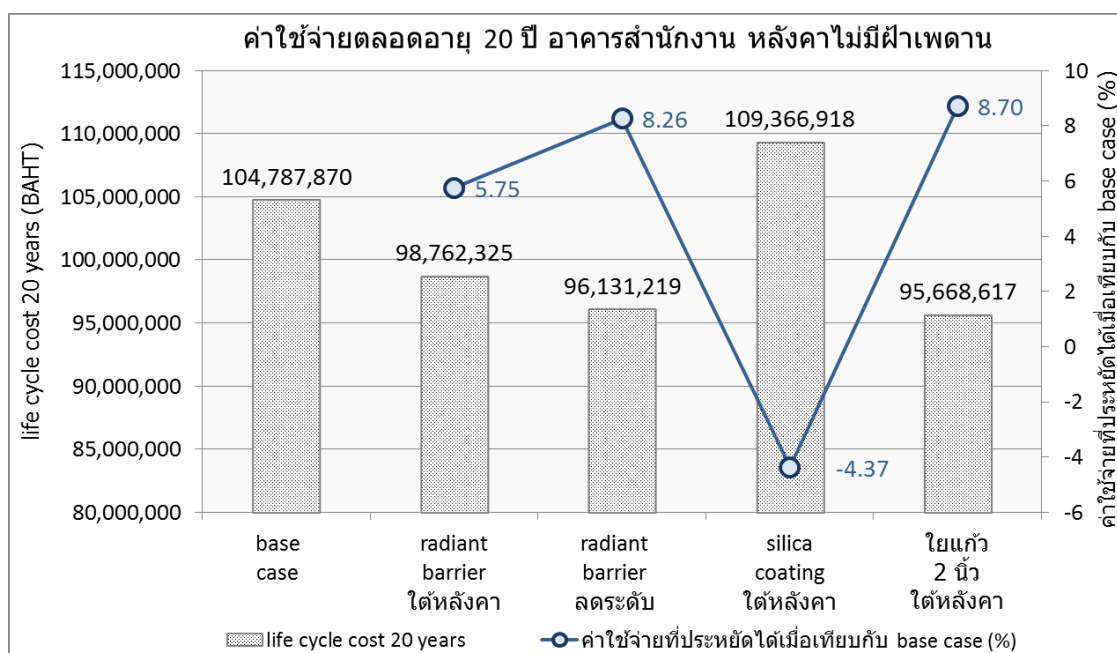
หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว แม้จะมีราคาวัสดุต่อตารางเมตรสูงกว่ากรณีอื่นๆ แต่ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด จึงเป็นตัวเลือกที่ไม่ควรนำมาพิจารณา สำหรับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน (base case) แม้ว่ามีผลการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าหลังคาที่ใช้อลูมิเนียมพอยล์ และ สีสันภาคซิลิกา แต่พบว่ามีรายจ่ายตลอด 20 ปี ต่ำสุด คือ 752,658 บาท ซึ่งถ้ามองในแง่การลงทุนของผู้บริโภค การเลือกใช้หลังคาแบบไม่มีวัสดุกันความร้อนจะได้รับความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่าตัวเลือกอื่นๆ

ตารางที่ 4.21 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของบ้านพักอาศัย

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารพักอาศัย					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/year)	12,643	12,633	12,625	12,034	12,612	13,323
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	50,574	50,533	50,501	48,136	50,447	53,294
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	693,708	693,153	692,717	660,273	691,973	731,017
ต้นทุน						
1) ราคากระเบื้องซีแพคโมเนียต่อ ตารางเมตร(บาท)	86	86	86	86	86	86
2) ราคาฝ้าปซีมบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	270	270	270	270	270	270
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่หลังคา(ตารางเมตร)	180	180	180	180	180	180
พื้นที่ฝ้าปซีมบอร์ด(ตารางเมตร)	121	121	121	121	121	121
พื้นที่ติดตั้งวัสดุกันความร้อน (ตารางเมตร)	0	180	180	180	121	121
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ (บาท)	58,950	103,230	103,230	166,590	133,668	71,368
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุต่างๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	301,320	202,554	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)	0	40	72	2,438	127	-2,720
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	752,658	796,383	795,947	1,128,183	1,028,195	802,385
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		1,095	613	44	591	-5

4.3.2 อาคารสำนักงาน

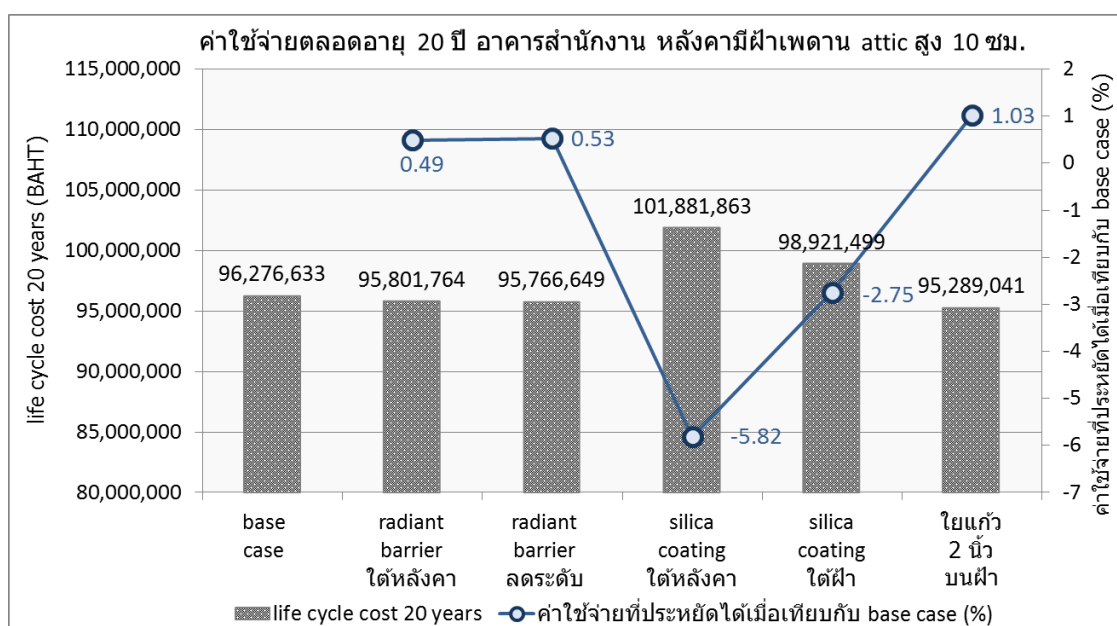
ผลการใช้พลังงานในอาคารสำนักงานที่ใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน แสดงให้เห็นว่าวิธีกันความร้อนที่ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความสามารถในการต้านความร้อนไม่ให้ลงสู่พื้นที่ใช้งานเบื้องล่าง ในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน วิธีที่ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุดคือ การใช้ฉนวนกันความร้อน การใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ การใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ติดด้านใต้หลังคา base case และ การใช้สีอนุภาคซิลิกา เมื่อนำมาคิดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ปรากฏว่า ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 8.70% ของ base case ประกอบกับมีราคาวัสดุถูกกว่าวัสดุชนิดอื่น (58 บาท/ตารางเมตร) ไม่มีค่าบำรุงรักษา-เปลี่ยนแปลงวัสดุ ทำให้ได้ค่าใช้จ่ายตลอด 20 ปีน้อยที่สุด 95,668,617 บาท ประหยัดกว่า base case 9,119,253 บาท คิดเป็น 8.70% ของ base case ดังนั้น วิธีใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว จึงมีความเหมาะสมที่สุดในแง่ของการประหยัดพลังงานไฟฟ้าและ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์



แผนภูมิที่ 4.64 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารสำนักงาน หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

ตารางที่ 4.22 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงาน หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารสำนักงาน				
	หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน				
	base case	radiant barrier ได้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ได้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ได้หลังคา
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	1,897,525	1,783,113	1,735,159	1,932,980	1,729,677
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	7,590,098	7,132,452	6,940,636	7,731,918	6,918,706
ค่า Present Value ของค่าไฟ(บาท)	104,112,030	97,834,581	95,203,475	106,057,350	94,902,665
ต้นทุน					
1) ราคาเมทัลชีทต่อตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600
2) ราคาชิปซีมบอร์ดต่อตารางเมตร(บาท)	0	0	0	0	0
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อตารางเมตร (บาท)	0	186	186	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อตารางเมตร (บาท)	60	120	120	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ(บาท)	675,840	927,744	927,744	1,288,192	765,952
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี (3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	2,021,376	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)	0	457,646	649,462	-141,820	671,392
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	104,787,870	98,762,325	96,131,219	109,366,918	95,668,617
ประหยัด (บาท)		6,025,545	8,656,651	-4,579,048	9,119,253
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		0.55	0.39	-4.32	0.13



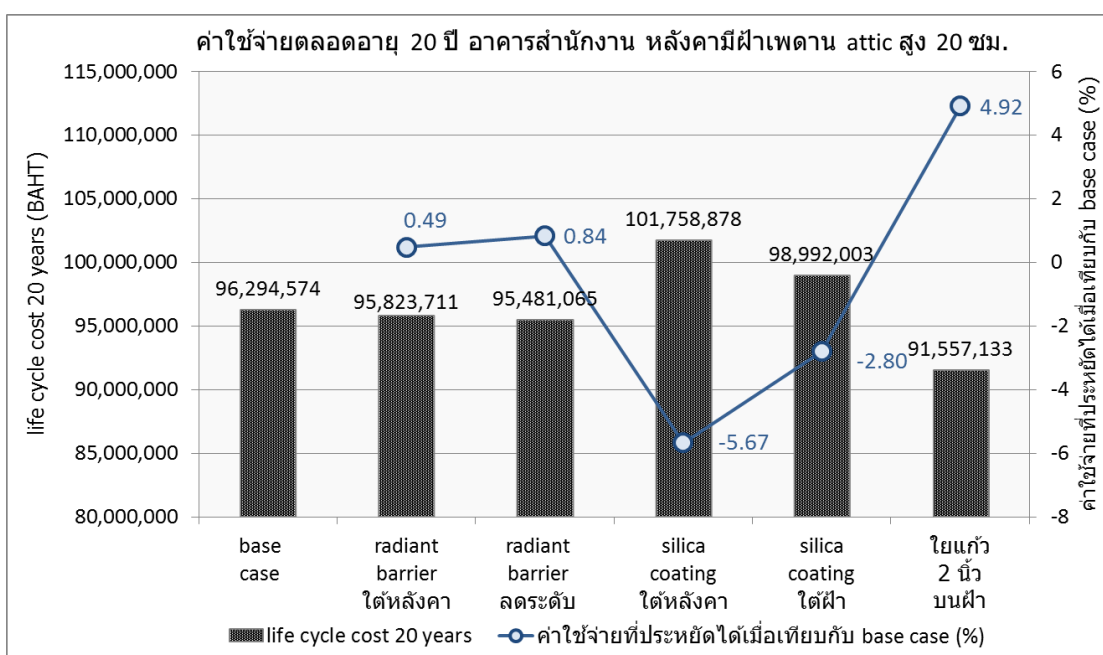
แผนภูมิที่ 4.65 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารสำนักงาน หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

สำหรับหลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ของอาคารสำนักงาน ได้ผล สอดคล้องกับในระบบหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดาน การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว เป็นวิธีที่ได้ผลการใช้ พลังงานน้อยที่สุด รองลงมา คือ หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอยล์ลดระดับ หลังคาที่ใช้ฉนวนมีเนียมพอยล์ ติดด้านใต้หลังคา หลังคา base case หลังคาที่ใช้สื่อนุภาคซิลิกาทาใต้ฝ้าเพดาน และ หลังคาที่ ทาสื่อนุภาคซิลิกาใต้แผ่นหลังคาลิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่สุด

เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน พบว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีค่าลงทุนต่ำกว่าวัสดุอื่นๆ ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ให้ผลค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าใน 20 ปี ต่ำสุด 6,871,624 บาท ทำให้มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานน้อยที่สุด 95,289,014 บาท ซึ่งประหยัดได้ 1.03% ของ base case

ตารางที่ 4.23 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงาน
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องอากาศสูง 10 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารสำนักงาน					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 cm.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	1,737,548	1,724,302	1,723,662	1,791,706	1,737,751	1,717,906
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	6,950,192	6,897,208	6,894,648	7,166,824	6,951,004	6,871,624
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	95,334,553	94,607,780	94,572,665	98,306,055	95,345,691	94,256,849
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาอีพ็อกซีบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ (บาท)	942,080	1,193,984	1,193,984	1,554,432	1,554,432	1,032,192
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	2,021,376	2,021,376	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		52,984	55,544	-216,632	-812	78,568
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	96,276,633	95,801,764	95,766,649	101,881,863	98,921,499	95,289,041
ประหยัด (บาท)		474,868	509,983	-5,605,231	-2,644,866	987,591
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		4.75	4.54	-2.83	-754.13	1.15



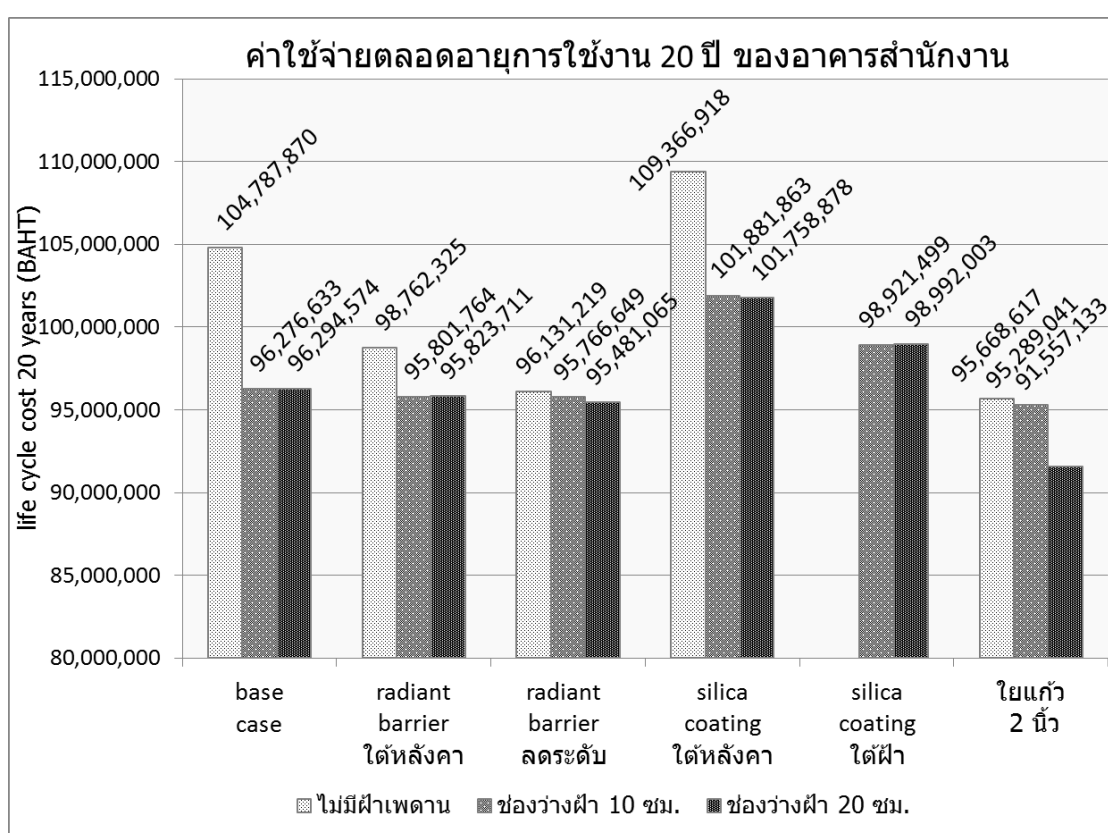
แผนภูมิที่ 4.66 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน
ในอาคารสำนักงาน หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุ 20 ปี อาคารสำนักงาน ในระบบหลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่าได้ผลสอดคล้องกับระบบหลังคา 2 กรณีแรก การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีประสิทธิผลในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด คำนวณได้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานน้อยที่สุด 91,557,133 บาท ราคาลดลงจาก base case 4,737,442 บาท ประหยัดได้ 4.92% ของ base case

ตารางที่ 4.24 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารสำนักงาน
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารสำนักงาน					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	1,737,875	1,724,702	1,718,457	1,789,465	1,739,036	1,699,894
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	6,951,500	6,898,808	6,873,828	7,157,858	6,956,144	6,799,574
ค่า Present Value ของค่าไฟ(บาท)	95,352,494	94,629,727	94,287,081	98,183,070	95,416,195	90,524,941
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาใยปซัมบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ (บาท)	942,080	1,193,984	1,193,984	1,554,432	1,554,432	1,032,192
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	2,021,376	2,021,376	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		52,692	77,672	-206,358	-4,644	151,926
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	96,294,574	95,823,711	95,481,065	101,758,878	98,992,003	91,557,133
ประหยัด (บาท)		470,863	813,509	-5,464,304	-2,697,429	4,737,442
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		4.78	3.24	-2.97	-131.86	0.59

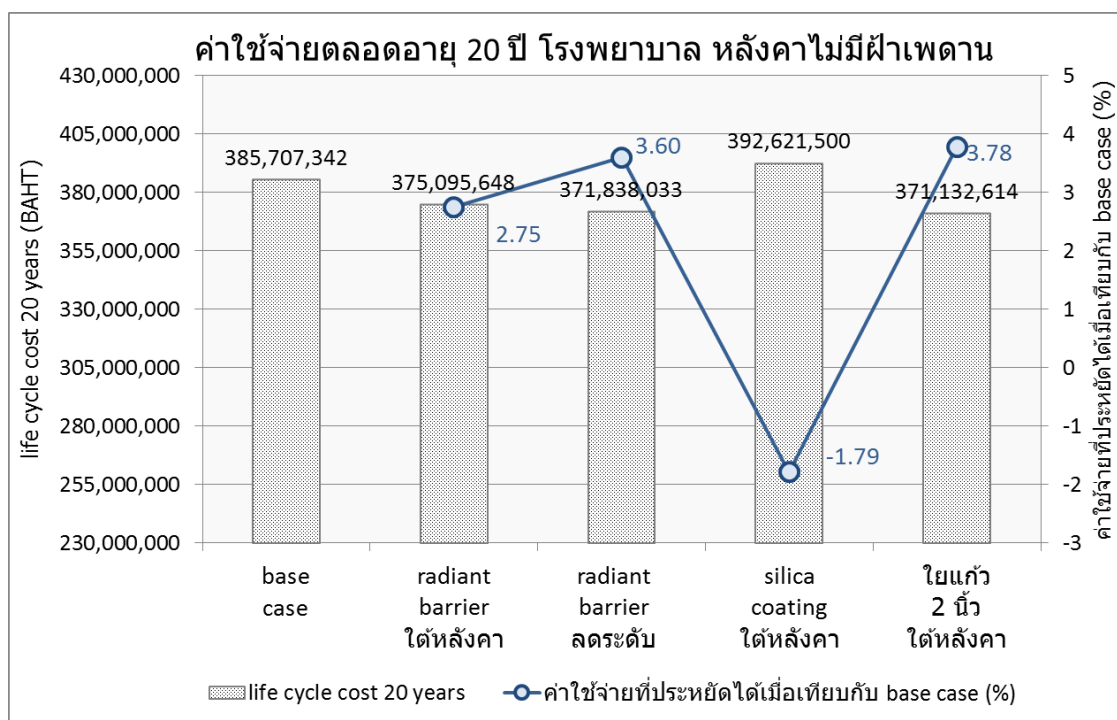
การใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ในอาคารสำนักงานให้ประสิทธิผลการประหยัดพลังงานมากกว่าวัสดุอื่น นอกจากนี้การที่มีราคาวัสดุต่อตารางเมตรต่ำ และ ไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุเป็นระยะๆ ทำให้เมื่อคิดค่าใช้จ่ายรวมภายใน 20 ปี ได้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เหมาะสมต่อการอนุรักษ์พลังงานและความคุ้มค่าด้านการเงินของอาคารสำนักงาน โดยเมื่อมองภาพรวม กรณีที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ในหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศ 20 ซม. ได้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุอาคารน้อยที่สุด 91,557,133 บาท ซึ่งประหยัดกว่าการใช้หลังคาไม่มีฝ้าเพดานและไม่มีวัสดุกันความร้อนถึง 134,230,737 บาท คิดเป็น 12.63%



แผนภูมิที่ 4.67 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงาน

4.3.3 อาคารโรงพยาบาล

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี อาคารโรงพยาบาล ในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน พบว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด ได้ค่าใช้จ่ายตลอด 20 ปี ต่ำสุด 371,132,614 บาท ประหยัดกว่า base case 14,574,729 บาท คิดเป็น 3.78% วัสดุหลังคาอื่นที่มีประสิทธิผลลดการใช้พลังงานรองลงมาได้แก่ การใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ติดตั้งลดระดับ การใช้ฉนวนใยพอลิเอสเตอร์ติดตั้งใต้แผ่นหลังคา การใช้สีอนุภาคซิลิกา ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้า ค่าต้นทุน ค่าบำรุงรักษาวัสดุมากกว่า รวมแล้วจึงมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงกว่า

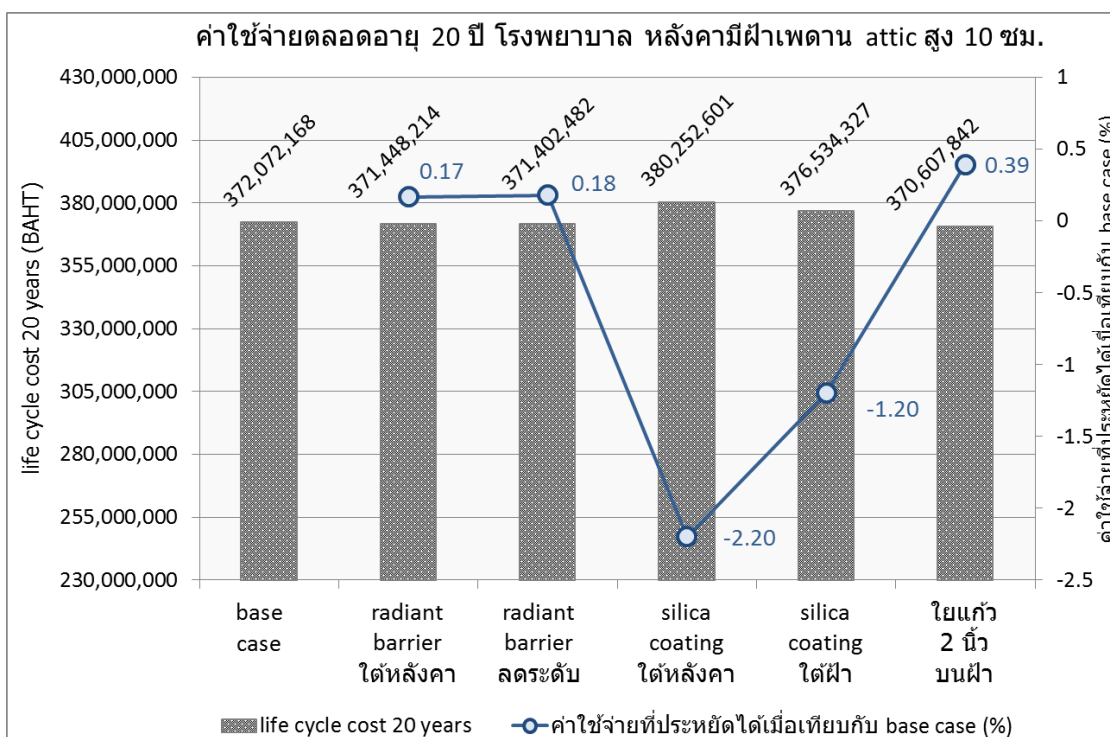


แผนภูมิที่ 4.68 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน ในอาคารโรงพยาบาล หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

ตารางที่ 4.25 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาล หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารโรงพยาบาล				
	หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน				
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ใต้หลังคา
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	7,009,037	6,807,883	6,748,510	7,054,050	6,740,629
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	28,036,147	27,231,531	26,994,040	28,216,199	26,962,517
ค่า Present Value ของค่าไฟ(บาท)	384,566,862	373,530,080	370,272,465	387,036,604	369,840,070
ต้นทุน					
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600
2) ราคาเย็บซิมบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	0	0	0	0
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,728	1,728	1,728	1,728	1,728
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ(บาท)	1,140,480	1,565,568	1,565,568	2,173,824	1,292,544
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	3,411,072	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)	0	804,617	1,042,107	-180,052	1,073,630
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	385,707,342	375,095,648	371,838,033	392,621,500	371,132,614
ประหยัด (บาท)		10,611,694	13,869,309	-6,914,157	14,574,729
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		0.53	0.41	-5.74	0.14

ในระบบหลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ให้ผลค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคารสอดคล้องกับในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด 6,722,876 บาท ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ประกอบกับการที่มีค่าต้นทุนวัสดุต่ำ ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านการบำรุงรักษา ทำให้ได้ระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด และมีค่าใช้จ่ายรวมตลอด 20 ปีต่ำสุด 370,607,842 บาท ประหยัดได้เป็น 0.39% เมื่อเทียบกับ base case

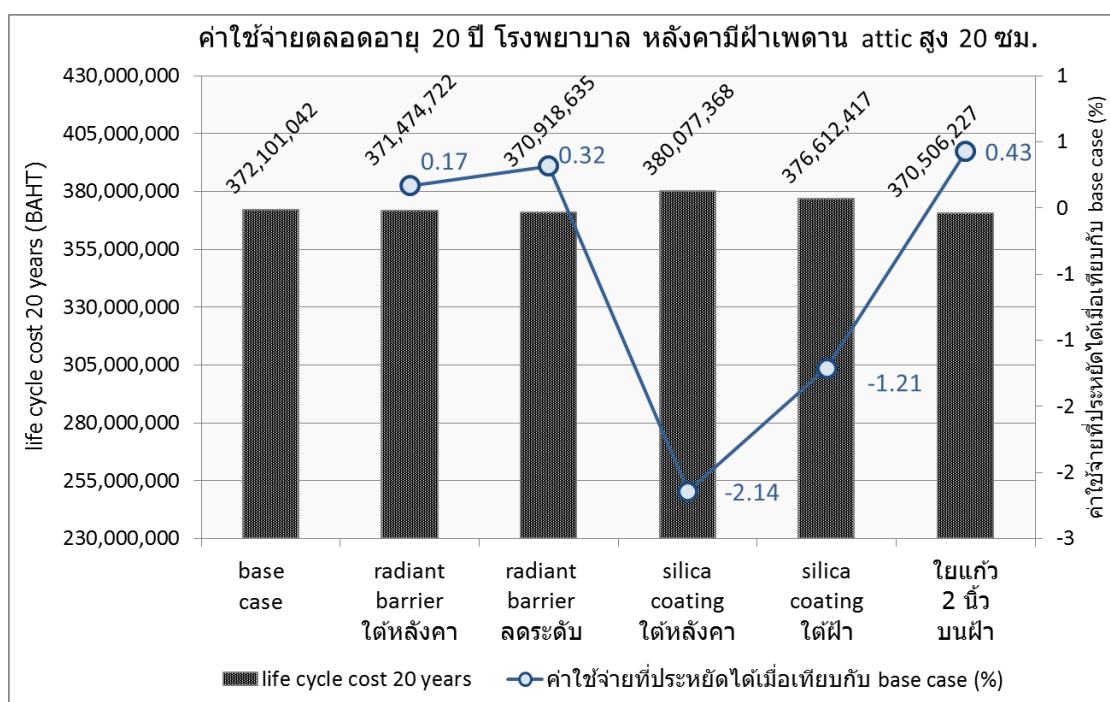


แผนภูมิที่ 4.69 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน
ในอาคารโรงพยาบาล หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องอากาศสูง 10 ซม.

ตารางที่ 4.26 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาล
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารโรงพยาบาล					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	6,752,336	6,733,217	6,732,383	6,820,428	6,752,660	6,722,876
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	27,009,346	26,932,867	26,929,533	27,281,713	27,010,639	26,891,506
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	370,482,408	369,433,366	369,387,634	374,218,425	370,500,151	368,866,018
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาอิฐปริมบอร์คต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,728	1,728	1,728	1,728	1,728	1,728
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้ง วัสดุ(บาท)	1,589,760	2,014,848	2,014,848	2,623,104	2,623,104	1,741,824
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	3,411,072	3,411,072	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		76,479	79,813	-272,368	-1,294	117,840
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี (บาท)	372,072,168	371,448,214	371,402,482	380,252,601	376,534,327	370,607,842
ประหยัด (บาท)		623,954	669,686	-8,180,433	-4,462,159	1,464,326
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		5.56	5.33	-3.79	-798.87	1.29

ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายสำหรับระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่าการใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด ได้รวมจ่ายรวมตลอดอายุการใช้งานต่ำสุด 370,506,227 บาท ประหยัดค่าใช้จ่ายคิดเป็น 0.43% ของ base case วัสดุอื่นเช่น อลูมิเนียมพอยล์ ซึ่งลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้รองลงมา ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น ประกอบกับต้นทุนวัสดุมีราคาแพงกว่า การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว จึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพทั้งในแง่ของการประหยัดพลังงานและความคุ้มค่าเงินของผู้บริโภคมากกว่ากรณีอื่น

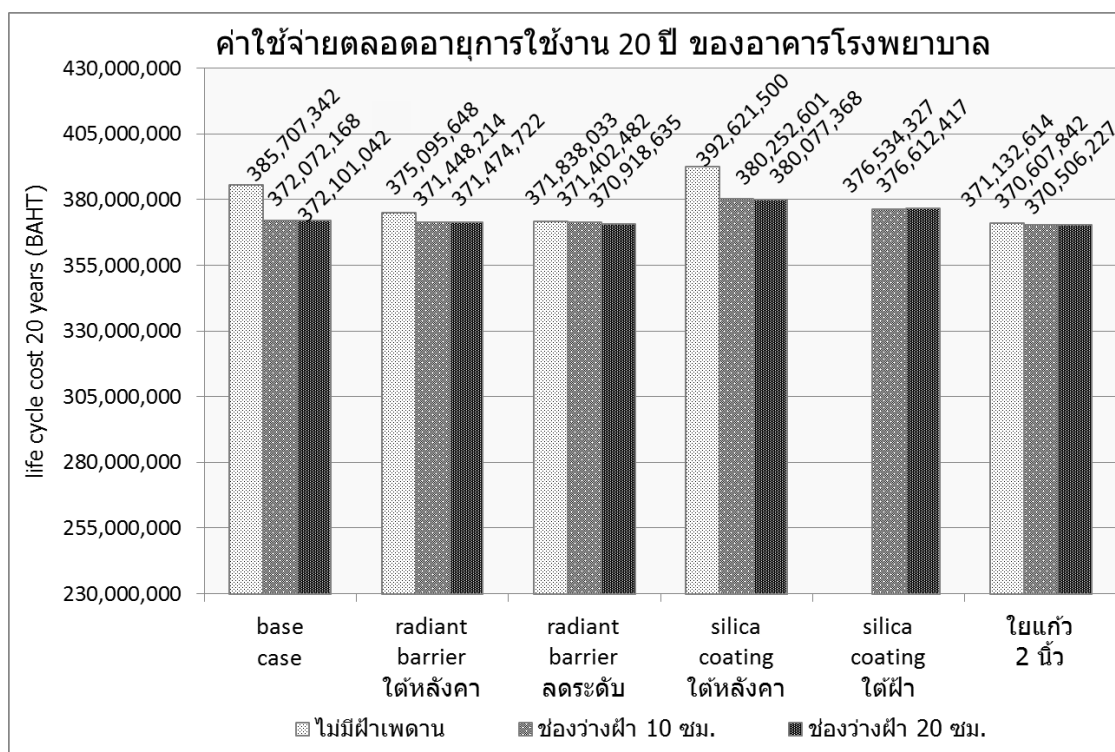


แผนภูมิที่ 4.70 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน
ในอาคารโรงพยาบาล หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

ตารางที่ 4.27 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารโรงพยาบาล
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องอากาศสูง 20 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารโรงพยาบาล					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 cm.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	6,752,863	6,733,700	6,723,565	6,817,235	6,754,083	6,721,024
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	27,011,451	26,934,800	26,894,259	27,268,938	27,016,332	26,884,098
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	370,511,282	369,459,874	368,903,787	374,043,192	370,578,241	368,764,403
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาอีปซัมบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	1,728	1,728	1,728	1,728	1,728	1,728
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้ง วัสดุ(บาท)	1,589,760	2,014,848	2,014,848	2,623,104	2,623,104	1,741,824
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	3,411,072	3,411,072	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		76,651	117,192	-257,488	-4,882	127,353
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี (บาท)	372,101,042	371,474,722	370,918,635	380,077,368	376,612,417	370,506,227
ประหยัด (บาท)		626,320	1,182,407	-7,976,326	-4,511,375	1,594,815
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		5.55	3.63	-4.01	-211.69	1.19

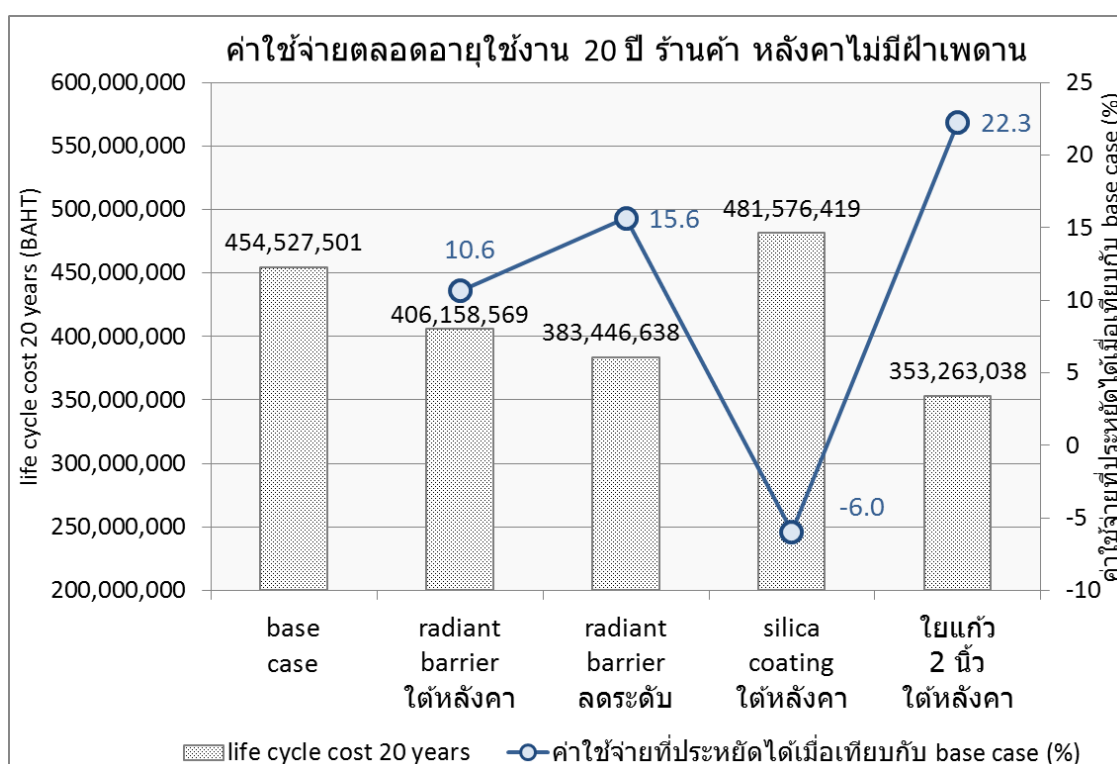
ในอาคารโรงพยาบาล การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด ในหลังคาทั้ง 3 ระบบ และเมื่อพิจารณาด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ช่วยลดรายจ่ายด้านพลังงาน ประกอบกับมีต้นทุนของวัสดุต่ำ ไม่จำเป็นต้องมีการบำรุงรักษาวัสดุเป็นระยะๆ เหมือนวัสดุอื่น และ เมื่อเพิ่มความหนาของหลังคาตั้งแต่ หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน จนถึงหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่า ยังมีค่าความต้านทานความร้อนมากขึ้น ก็ยังทำให้อาคารลดภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานมากขึ้น และเมื่อพิจารณาหลังคาทั้ง 3 ระบบรวมกัน พบว่าการใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ในหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ช่วยลดรายจ่ายด้านพลังงานไฟฟ้า และ ค่าใช้จ่ายรวมตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ในอาคารโรงพยาบาลมากที่สุด ประหยัดค่าใช้จ่ายรวมได้ 15,201,115 บาท คิดเป็น 3.94% ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดานที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน



แผนภูมิที่ 4.71 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารโรงพยาบาล

4.3.4 อาคารร้านค้า

ในหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดานของอาคารร้านค้า พบว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งให้ประสิทธิผลในการประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าลงทุนที่ต่ำและแทบไม่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาใดๆ มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ต่ำสุด 353,263,038 บาท ประหยัดได้ถึง 22.3 % ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน

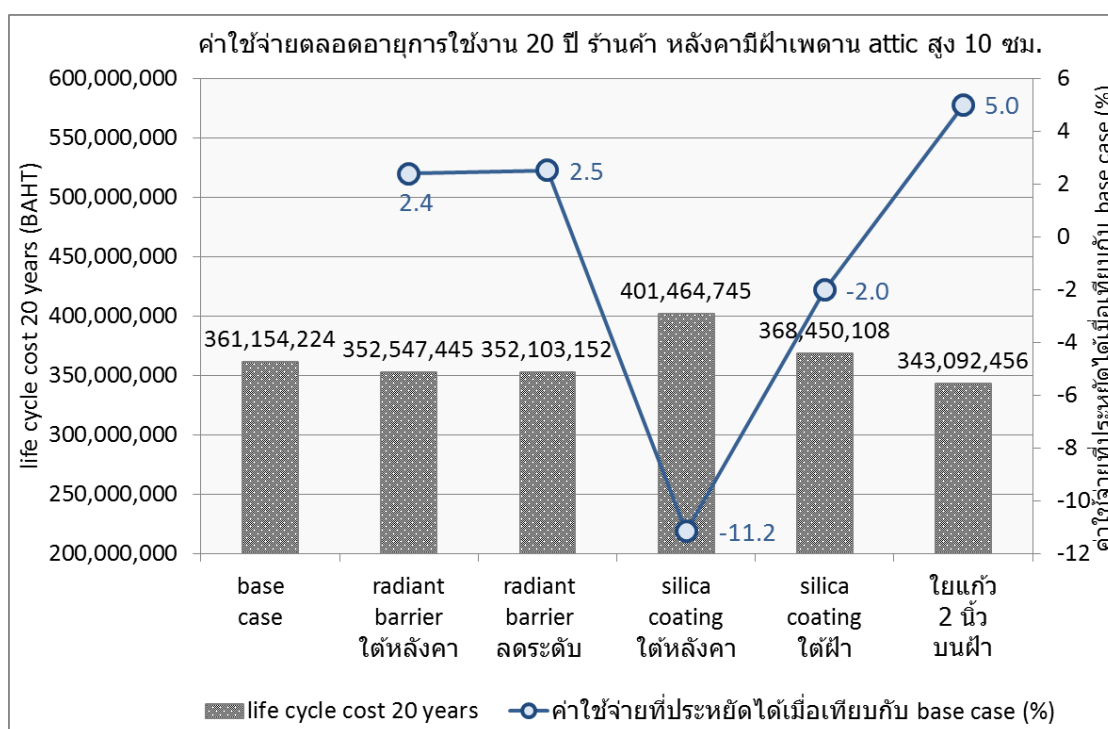


แผนภูมิที่ 4.72 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช่วัสดุกันความร้อน ในอาคารร้านค้า หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน

ตารางที่ 4.28 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารร้านค้า				
	หลังคาแบบไม่มีฝ้าเพดาน				
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	ใยแก้ว 2 นิ้ว ใต้หลังคา
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	8,250,970	7,357,050	6,943,107	8,614,754	6,400,924
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	33,003,880	29,428,200	27,772,428	34,459,016	25,603,696
ค่า Present Value ของค่าไฟ(บาท)	452,708,376	403,661,407	380,949,475	472,668,219	351,201,363
ต้นทุน					
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600
2) ราคาอีพ็อกซีบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	0	0	0	0
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	2,756	2,756	2,756	2,756	2,756
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้งวัสดุ (บาท)	1,819,125	2,497,163	2,497,163	3,467,363	2,061,675
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	5,440,838	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)	0	3,575,680	5,231,452	-1,455,136	7,400,184
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	454,527,501	406,158,569	383,446,638	481,576,419	353,263,038
ประหยัด (บาท)		48,368,932	71,080,863	-27,048,918	101,264,463
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		0.19	0.13	-1.13	0.03

การจำลองผลการใช้พลังงานในระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ของอาคารร้านค้า พบว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุดและมีประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์เช่นกัน โดยลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานลงจากหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนถึง 18,061,768 บาท คิดเป็น 5%

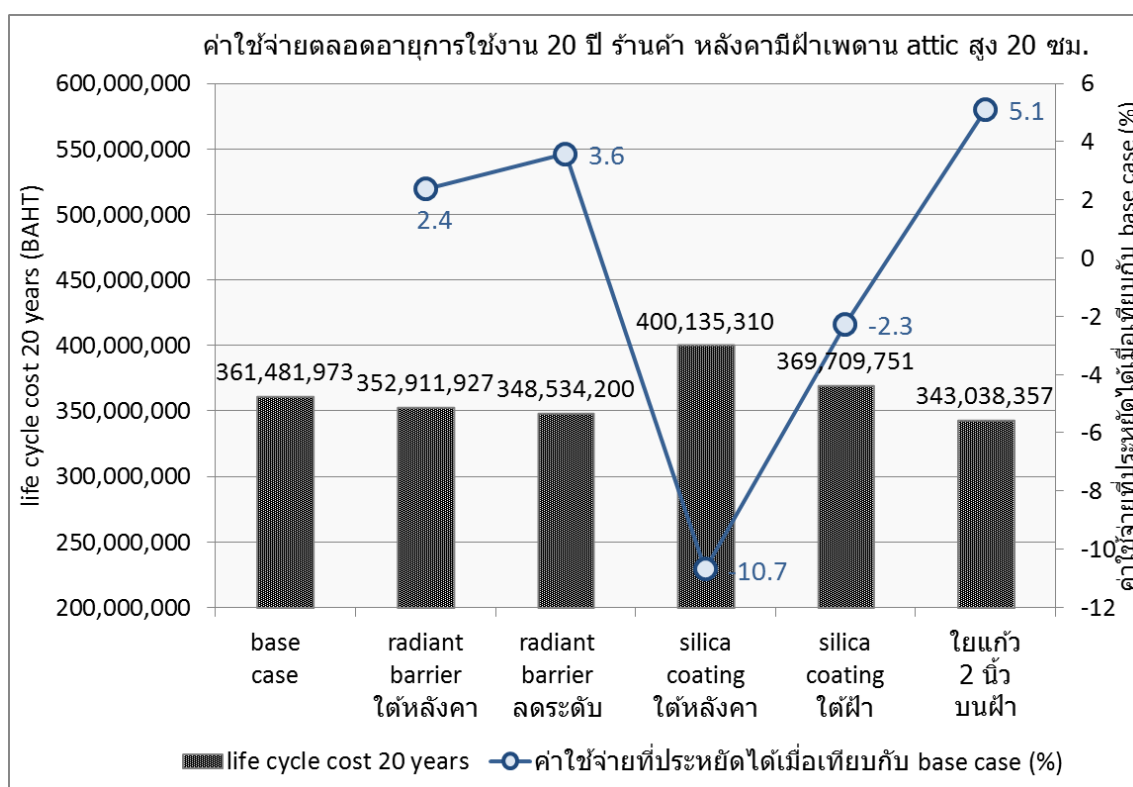


แผนภูมิที่ 4.73 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช่วัสดุกันความร้อน ในอาคารร้านค้า หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

ตารางที่ 4.29 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า
หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารร้านค้า					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	6,536,107	6,366,884	6,358,786	7,141,594	6,539,876	6,202,496
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	26,144,427	25,467,534	25,435,144	28,566,376	26,159,504	24,809,984
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	358,618,474	349,333,658	348,889,365	391,839,920	358,825,283	340,314,156
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาเย็บซีมบอร์ดต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	2,756	2,756	2,756	2,756	2,756	2,756
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้ง วัสดุ(บาท)	2,535,750	3,213,788	3,213,788	4,183,988	4,183,988	2,778,300
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	5,440,838	5,440,838	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		676,893	709,283	-2,421,949	-15,077	1,334,443
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	361,154,224	352,547,445	352,103,152	401,464,745	368,450,108	343,092,456
ประหยัด (บาท)		8,606,779	9,051,071	-40,310,521	-7,295,884	18,061,768
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		1.00	0.96	-0.68	-109.32	0.18

อาคารร้านค้ากรณีระบบหลังคาฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ได้ผลสอดคล้องกับสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดานและหลังคาฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ให้ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุด ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 343,038,357 บาท ประหยัดกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน 5.1%

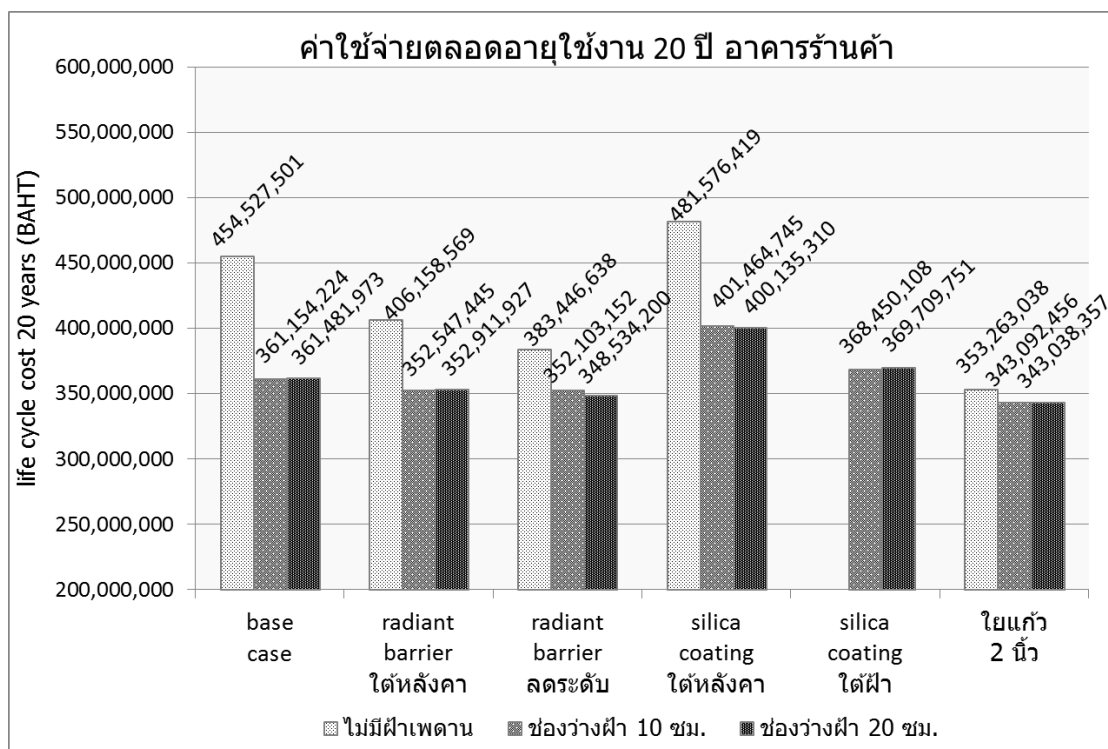


แผนภูมิที่ 4.74 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของการใช้วัสดุกันความร้อน
ในอาคารร้านค้า หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

ตารางที่ 4.30 การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของอาคารร้านค้า
หลังคาแบบมีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.

	การคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน(Life Cycle Cost) และ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)ของอาคารร้านค้า					
	หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว บนฝ้า
พลังงานไฟฟ้าต่อปี(kWh/y)	6,542,080	6,373,527	6,293,739	7,117,364	6,562,834	6,201,510
ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)	26,168,321	25,494,106	25,174,956	28,469,456	26,251,336	24,806,040
ค่า Present Value ของค่าไฟ (บาท)	358,946,223	349,698,139	345,320,412	390,510,485	360,084,926	340,260,057
ต้นทุน						
1) ราคาเมทัลชีทต่อ ตารางเมตร(บาท)	600	600	600	600	600	600
2) ราคาอิฐขี้มบอร์ดีต่อ ตารางเมตร(บาท)	260	260	260	260	260	260
3) ราคาวัสดุกันความร้อนต่อ ตารางเมตร(บาท)	0	186	186	558	558	58
4) ราคาค่าแรงติดตั้งวัสดุต่อ ตารางเมตร(บาท)	60	120	120	100	100	90
พื้นที่ติดตั้งวัสดุ(ตารางเมตร)	2,756	2,756	2,756	2,756	2,756	2,756
ค่าลงทุนในการซื้อและติดตั้ง วัสดุ(บาท)	2,535,750	3,213,788	3,213,788	4,183,988	4,183,988	2,778,300
ค่าบำรุงรักษา/เปลี่ยนวัสดุทุกๆ 5 ปี(3 ครั้ง - บาท)	0	0	0	5,440,838	5,440,838	0
ราคาค่าไฟที่ประหยัดได้(บาท)		674,215	993,365	-2,301,135	-83,015	1,362,281
ค่า Life cycle cost ตลอดอายุอาคาร 20 ปี(บาท)	361,481,973	352,911,927	348,534,200	400,135,310	369,709,751	343,038,357
ประหยัด (บาท)		8,570,046	12,947,774	-38,653,337	-8,227,778	18,443,617
ระยะเวลาคืนทุน (บาท)		1.01	0.68	-0.72	-19.85	0.18

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในภาพรวม ปรากฏว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งให้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำสุด คำนวณได้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานน้อยที่สุด 343,038,357 บาท ประหยัดได้ถึง 24.5% ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดานที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน



แผนภูมิที่ 4.75 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของวัสดุกันความร้อนในอาคารร้านค้า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในขั้นตอนการหาค่าคุณสมบัติความต้านทานความร้อนด้วยกล่องทดลองและการให้ความร้อนด้วยไฟอินฟราเรด แสดงให้เห็นว่าหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งเป็นมวลสารกันความร้อน ทำให้หลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงสุด หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วให้ค่าความต้านทานความร้อนรองลงมา เมื่อเปลี่ยนวิธีการติดตั้งฉนวนใยแก้วจากการติดตั้งได้แผ่นหลังคาโดยตรงเป็นการติดตั้งลดระดับลงมา 5 ซม. เป็นการลดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนสู่แผ่นฉนวนใยแก้วจากแผ่นหลังคาโดยตรง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นฉนวนใยแก้วเมื่อสัมผัสกับช่องว่างอากาศมากขึ้น เป็นผลให้ค่าความต้านทานความร้อนของวิธีการติดตั้งแผ่นฉนวนใยแก้วแบบลดระดับเพิ่มขึ้นจากวิธีการติดตั้งฉนวนใยแก้วได้แผ่นหลังคาโดยตรง และพบว่าในช่วงปิดไฟ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วแบบติดตั้งลดระดับมีอุณหภูมิผิวบนหลังคา อุณหภูมิผิวล่างหลังคา และอุณหภูมิช่องระบายอากาศออก อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าหลังคาที่ใช้วัสดุกันความร้อนแบบอื่นซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติที่ทำให้ความร้อนระบายออกได้เร็ว ต่างจากการใช้ฉนวนมวลสาร

หลังคาที่ใช้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทั้งกรณีทาได้แผ่นหลังคาและกรณีทาได้ฝ้าเพดาน ให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมที่น้อยกว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมที่เกิดจากหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน (base case) เนื่องจากหลังคาที่ใช้ในการทดลองเป็นหลังคาเมทัลชีทผสมฉนวนใยแก้ว พื้นผิวมีความมันวาวอยู่ในตัว คุณสมบัติคล้ายวัสดุที่แผ่รังสีความร้อนต่ำ จึงทำให้หลังคา base case มีปริมาณความร้อนถ่ายเทเข้าสู่กล่องทดลองน้อยกว่าหลังคาที่ใช้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา และ คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมสูงกว่า ซึ่งในการวิจัยต่อไป ควรมีการทดลองกับหลังคาประเภทอื่นบ้าง เช่น หลังคากระเบื้อง หลังคาดินเผา เพื่อทดสอบว่ากรณีที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนและกรณีที่ทำสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาของหลังคาแบบอื่น จะให้ผลเหมือนกันหรือแตกต่างกันกับสิ่งที่เกิดขึ้นในหลังคาเมทัลชีทของงานวิจัยนี้อย่างไร

ในหลังคาที่มีช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. และ 20 ซม. ค่าความต้านทานความร้อนรวมของหลังคาใช้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทาใต้แผ่นหลังคาน้อยกว่าค่าความต้านทานความร้อนของหลังคาที่ใช้สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทาใต้ฝ้าเพดาน เนื่องจากหลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาใต้แผ่นหลังคาโดยตรงเป็นการลดคุณสมบัติการแผ่รังสีต่ำของพื้นผิวมันวาวของแผ่นเมทัลชีท ทำให้พลังงานความร้อนลงสู่เบื้องล่างมากกว่าหลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาไว้ใต้ฝ้าเพดานนั่นเอง

ตารางที่ 5.1 ค่าความต้านทานความร้อน(R_t) ที่หาได้จากกล่องทดลอง

	ค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t -sq.m. K/W)					
	base case	Radiant barrier ใต้หลังคา	Radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน	0.03	0.15	0.43	0.02		0.55
หลังคาช่อง ATTIC 10 ซม.	0.39	0.73	0.76	0.14	0.38	1.17
หลังคาช่อง ATTIC 20 ซม.	0.38	0.71	1.11	0.14	0.36	1.18

เมื่อนำค่าความต้านทานความร้อนรวมมาเป็นข้อมูลคุณสมบัติของหลังคาในโปรแกรม VisualDOE4.1 ในอาคารพักอาศัยซึ่งเป็นอาคารที่มีพื้นที่ใช้งานส่วนใหญ่ เปิดเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันเท่านั้น ปรากฏว่าวิธีกันความร้อนที่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าคือวิธีกันความร้อนที่คำนวณได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมสูง เนื่องจากทำให้ความร้อนที่สะสมในอาคารตั้งแต่ช่วงกลางวัน ระบายออกได้ช้าลงในเวลากลางวันจนเป็นภาระทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ โดยที่หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้ารายปีมากที่สุด หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาใต้ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมน้อยที่สุดได้ประสิทธิผลในการลดการใช้พลังงานมากที่สุดคิดเป็น 4.82% ของหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน หลังคาที่ใช้ขลุ่ยมีเนียมพอยล์แบบติดด้านใต้หลังคาและแบบติดลดระดับช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า เมื่อเทียบกับหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน 0.08% และ 0.14% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหลังคาที่ใช้ขลุ่ยมีเนียมพอยล์แม้จะมีค่าต้านทานความร้อนรวมมากกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อน แต่ก็ไม่มีมวลสารที่จะทำให้การระบายความร้อนออกจากอาคารในตอนกลางวันช้าลง จึงเป็นเหตุให้ส่งเสริมประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอาคารพักอาศัยซึ่งใช้งานเครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวันได้ดีกว่า ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว และ ดีกว่าหลังคาที่ไม่ใช้วัสดุกันความร้อนใดๆ

ทั้งนี้ มีข้อสังเกตเพิ่มเติมว่า อาคารพักอาศัยในงานวิจัยนี้ มีพื้นที่ใช้งานชั้นบนซึ่งติดกับหลังคา เป็นห้องนอนซึ่งเปิดใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางคืน การใช้วัสดุกันความร้อนที่มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำกว่า หรือ เป็นมวลสารน้อยกว่า จึงให้ประสิทธิภาพลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ดี แต่หาก พื้นที่ใช้งานส่วนที่ติดกับหลังคามีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันด้วย การใช้วัสดุที่ให้ค่าความต้านทานความร้อนสูงซึ่งช่วยป้องกันความร้อนจากภายนอกมิให้เป็นภาระต่อเครื่องปรับอากาศที่ทำงานในเวลากลางวัน อาจให้ช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากกว่า

หลังคาที่ทาสีอนุภาคซิลิกาต้านได้ แม้จะเป็นวัสดุกันความร้อนที่ช่วยประหยัดพลังงานมากที่สุดในการพักอาศัยต้นแบบ แต่เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานกลับพบว่ามีการจ่ายตลอดอายุ 20 ปีสูงสุด เนื่องจากต้นทุนสูง และต้องมีการบำรุงรักษาทาสีใหม่ทุกๆ 4-5 ปี ซึ่งมีราคาเทียบเท่ากับการทาสีครั้งแรก หากคำนึงถึงความประหยัดของผู้บริโภคแล้ว อาจต้องเลือกใช้หลังคาที่ไม่ต้องใช้วัสดุกันความร้อนใดๆ ซึ่งให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานถูกที่สุด 752,685 บาท

ตารางที่ 5.2 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารพักอาศัย

	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.- year) และ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี(บาท) ของอาคารพักอาศัย					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
kWh/sq.m.- year	62.59	62.54	62.50	59.57	62.43	65.96
Life cycle cost 20 ปี(บาท)	752,658	796,383	795,947	1,128,183	1,028,195	802,385

การจำลองผลการใช้พลังงานในอาคารสำนักงานต้นแบบซึ่งใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันเท่านั้น ในระบบหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ระบบหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. หลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. พบว่าค่าความต้านทานความร้อนเป็นปัจจัยในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศ ในที่นี้หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้วซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมสูงสุดช่วยให้อาคารประหยัดพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ หลังคาอลูมิเนียมพอยล์ลดระดับ 5 ซม. และ หลังคาอลูมิเนียมพอยล์ติดด้านใต้ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมน้อยกว่าตามลำดับ หลังคาที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่สุดเรียงตามลำดับคือ หลังคาทาสีอนุภาคซิลิกาต้านได้ หลังคาทาสีอนุภาคซิลิกาใต้ฝ้าเพดาน และ หลังคาไม่ใช้วัสดุกันความร้อน ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นว่าในอาคารที่ใช้งาน

เครื่องปรับอากาศเฉพาะเวลากลางวัน ควรเลือกวัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง หรือเป็นมวลสารมากซึ่งจะป้องกันความร้อนไม่ให้เข้าไปเป็นภาระในการทำความเย็นได้ง่าย

ตารางที่ 5.3 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารสำนักงาน

	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.- year) และ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี(บาท) ของอาคารสำนักงาน					
	base case	Radiant barrier ใต้หลังคา	Radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
kWh/sq.m.- year	264.72	248.76	242.07	269.67		241.31
Life cycle cost	104,787,870	98,762,325	96,131,219	109,366,918		95,668,617
ช่อง attic 10 ซม.						
kWh/sq.m.- year	242.40	240.56	240.47	249.96	242.43	239.66
Life cycle cost	96,276,633	95,801,764	95,766,649	101,881,863	98,921,499	95,289,041
ช่อง attic 20 ซม.						
kWh/sq.m.- year	242.45	240.61	239.74	249.65	242.61	237.15
Life cycle cost	96,294,574	95,823,711	95,481,065	101,758,878	98,992,003	91,557,133

การจำลองผลการใช้พลังงานในอาคารโรงพยาบาลซึ่งใช้งานเครื่องปรับอากาศตลอด 24 ชั่วโมง ได้ผลการใช้พลังงานสอดคล้องกับผลที่เกิดขึ้นในอาคารสำนักงาน ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานขึ้นอยู่กับความต้านทานความร้อนของหลังคาหรือวัสดุกันความร้อน โดยในหลังคาทั้ง 3 ระบบ การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ามากที่สุด และ เมื่อมีการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานอาคารพบว่าการใช้ฉนวนมีรายจ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี น้อยที่สุด เนื่องจากต้นทุนวัสดุค่อนข้างต่ำ ไม่มีค่าบำรุงรักษาระหว่างการใช้งาน และหากต้องการเลือกระบบหลังคาที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและคุ้มค่าเงินที่สุดสำหรับอาคารที่มีรูปแบบการใช้งานใกล้เคียงกับอาคารโรงพยาบาลต้นแบบ ควรเลือกใช้หลังคาที่มีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หรือมากกว่า และใช้งานร่วมกับฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

ตารางที่ 5.4 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารโรงพยาบาล

	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.- year) และ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี(บาท) ของอาคารโรงพยาบาล					
	base case	Radiant barrier ใต้หลังคา	Radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
kWh/sq.m.- year	405.62	393.97	390.54	408.22		390.08
Life cycle cost	385,707,342	375,095,648	371,838,033	392,621,500	371,132,614	385,707,342
ช่อง attic 10 ซม.						
kWh/sq.m.- year	390.76	389.65	389.61	394.70	390.78	389.06
Life cycle cost	372,072,168	371,448,214	371,402,482	380,252,601	376,534,327	370,607,842
ช่อง attic 20 ซม.						
kWh/sq.m.- year	390.79	389.68	389.10	394.52	390.86	388.95
Life cycle cost	372,101,042	371,474,722	370,918,635	380,077,368	376,612,417	370,506,227

ผลการจำลองการใช้พลังงาน และ ผลการใช้ไฟฟ้าในเครื่องทำน้ำเย็นในอาคารร้านค้าซึ่งมีเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันต่อเนื่องจนถึงกลางคืน (10.00 – 22.00 น.) แสดงให้เห็นว่า ขณะที่มีการใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน ความร้อนจากภายนอกที่เข้าสู่อาคารเป็นปัจจัยสำคัญในการใช้พลังงานไฟฟ้า หลังคาที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูงกว่ามีประสิทธิผลในการประหยัดพลังงานมากกว่า การใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งให้ค่าต้านทานความร้อนสูงสุด เป็นวิธีกันความร้อนที่ให้ประสิทธิผลในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าดีที่สุด รองลงมาได้แก่ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. และ หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว โดยเมื่อคำนวณรายจ่ายตลอดอายุการใช้งาน พบว่า หลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด และเมื่อพิจารณาภาพรวมแล้ว หลังคามีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้า และคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากที่สุด ดังนั้นหากมีการทำหลังคาใหม่ หรือมีทางเลือกในการออกแบบความสูงหลังคาของอาคารที่มีสภาวะการดำเนินงานแบบเดียวกับอาคารร้านค้าต้นแบบนี้ ควรเลือกใช้ หลังคาแบบมีฝ้าเพดาน ช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หรือมากกว่า ร่วมกับการใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

ตารางที่ 5.5 ผลการใช้พลังงานไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ของอาคารร้านค้า

	การใช้พลังงานไฟฟ้า (kWh/sq.m.- year) และ ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี(บาท) ของอาคารร้านค้า					
	base case	Radiant barrier ใต้หลังคา	Radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน						
kWh/sq.m.- year	997.82	889.71	839.65	1,041.81		774.09
Life cycle cost	454,527,501	406,158,569	383,446,638	481,576,419		353,263,038
ช่อง attic 10 ซม.						
kWh/sq.m.- year	790.43	769.97	768.99	863.66	790.89	750.09
Life cycle cost	361,154,224	352,547,445	352,103,152	401,464,745	368,450,108	343,092,456
ช่อง attic 20 ซม.						
kWh/sq.m.- year	791.16	770.77	761.12	860.73	793.67	749.97
Life cycle cost	361,481,973	352,911,927	348,534,200	400,135,310	369,709,751	343,038,357

ในอาคารร้านค้าต้นแบบหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วชนิดลดระดับ 5 ซม. ซึ่งมีค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงมาจากหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว แต่มีคุณสมบัติไม่เป็นมวลสาร ช่วยให้อาคารระบายความร้อนเร็วในเวลากลางวัน ก็ไม่สามารถอาศัยคุณสมบัติดังกล่าวช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมได้เท่าฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว

ผลการจำลองการใช้พลังงานแสดงให้เห็นว่า อาคารที่มีช่วงการใช้เครื่องปรับอากาศในเวลากลางวัน เช่นสำนักงาน อาคารโรงพยาบาล หรืออาคารร้านค้า ควรเลือกใช้วิธีกันความร้อนที่คำนึงถึงค่าความต้านทานความร้อนสูงหรือมีค่าเป็นมวลสารหน่วงความร้อนเป็นหลัก เพื่อให้ความร้อนในเวลากลางวันถ่ายเทเข้าสู่หลังคาไปรบกวนการทำงานของระบบปรับอากาศได้ช้าที่สุด ซึ่งหากเป็นอาคารสร้างใหม่หรือมีทางเลือกในการออกแบบลักษณะช่องหลังคา/ฝ้าเพดาน ควรเลือกใช้ระบบหลังคาที่มีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. หรือ มากกว่า 20 ซม. ควบคู่กับการใช้ฉนวนมวลสาร ในที่นี้คือการใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งผลการจำลองการใช้พลังงานและผลการคำนวณค่าใช้จ่ายระบุว่า ช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุด และ ทำให้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานลดลงจนเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 20 ปี ต่ำที่สุดด้วย

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาทั้งอาคารสำนักงาน อาคารโรงพยาบาล และอาคารร้านค้า ต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ต่างเป็นอาคารที่ใช้งานเครื่องปรับอากาศในช่วงกลางวันเท่านั้น หรือ มิฉะนั้นก็มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศช่วงกลางวันต่อเนื่องถึงช่วงกลางคืน โดยที่มีปริมาณชั่วโมงการใช้งานเครื่องปรับอากาศเวลากลางวันมากกว่ากลางคืน และ หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านพลังงานระหว่างหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ในอาคารสำนักงานและอาคารโรงพยาบาล จะพบว่า พลังงานที่ประหยัดได้(%) เมื่อเทียบกับ base case หลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ของหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ซึ่งหากมีการนำฉนวนใยแก้วมาใช้งานกับอาคารที่มีระยะเวลาใช้งานเครื่องปรับอากาศตอนกลางวันน้อยกว่ากลางคืน หรือ มีชั่วโมงใช้งานเครื่องปรับอากาศตอนกลางวันมากกว่ากลางวัน ฉนวนใยแก้วจะใช้คุณสมบัติช่วยระบายความร้อนที่สะสมมาจากช่วงกลางวันซึ่งเป็นภาระของเครื่องปรับอากาศในตอนกลางวันให้ออกจากอาคารได้เด่นชัดขึ้น ซึ่งอาจเกิดประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารมากกว่าการใช้ฉนวนใยแก้วก็เป็นได้

และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี(%) และ ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี(%) ของหลังคาทุกประเภทกับหลังคา base case ในอาคารสำนักงาน อาคารโรงพยาบาล และ อาคารร้านค้า พบว่าการใช้วัสดุกันความร้อนหลังคาในอาคารที่มีสัดส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานค่อนข้างสูง(อาคารเดี่ยว - ในที่นี้ ได้แก่ อาคารร้านค้า) ทำให้วัสดุกันความร้อนแสดงประสิทธิภาพในการลดการใช้พลังงานและประสิทธิภาพในการลดรายจ่ายได้มากกว่าอาคารที่มีสัดส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานค่อนข้างต่ำ(อาคารสูง) เป็นข้อสังเกตว่าความสูงหรือจำนวนชั้นของอาคารอาจมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร ทำให้อาคารที่มีความสูง-เตี้ยได้รับอิทธิพลความร้อนน้อยแตกต่างกัน สิ่งที่ควรคำนึงถัดมา คือ แม้จะมีการเลือกใช้วัสดุกันความร้อนที่มีคุณสมบัติสูง แต่หากติดตั้งในอาคารที่มีภาระการทำความร้อนน้อยอยู่แล้ว อาจไม่ได้ช่วยให้เกิดประโยชน์ด้านประสิทธิภาพใดๆ แต่หากมีการนำวัสดุกันความร้อนมาใช้ในอาคารที่มีภาระการทำความร้อนมากกว่า(ความร้อนถ่ายเทเข้ามาได้ง่ายกว่า)วัสดุกันความร้อนจะสามารถแสดงประสิทธิภาพได้เต็มที่ จะเห็นได้ว่า การใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารร้านค้าต้นแบบได้ ประสิทธิภาพด้านพลังงานและด้านการเงินคิดเป็นเปอร์เซ็นต์สูงกว่าการใช้วัสดุกันความร้อนในอาคารสำนักงานและอาคารโรงพยาบาล และ เกิดความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านพลังงานระหว่างวัสดุกันความร้อนมากขึ้น เห็นได้จาก ในอาคารสำนักงาน และ อาคารโรงพยาบาล ประสิทธิภาพด้านพลังงานของหลังคาที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 5 ซม. จะเทียบเท่ากับหลังคา

ที่ใช้ฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว แต่เมื่อจำลองผลการใช้พลังงานกับอาคารร้านค้า กลับเห็นค่าความแตกต่างของประสิทธิภาพด้านพลังงานระหว่างอุณหภูมินิยมพอยล์ระดับ 5 ซม.และฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ที่ชัดเจนขึ้น ดังนั้นหากมีการวิจัยภายนอก ควรทำการศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยด้านรูปแบบอาคารที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานและความคุ้มค่าของวัสดุกันความร้อน ได้แก่ อาคารที่มีอัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานต่างกัน เช่น อาคารสูง-อาคารเตี้ย อาคารขนาดใหญ่-อาคารขนาดเล็ก อาคารที่แผ่พื้นที่ใช้งานในแนวราบ-อาคารที่ขยายพื้นที่ใช้งานในแนวตั้ง เป็นต้น เพื่อเป็นการต่อยอดองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้วัสดุกันความร้อนทางหลังคาให้ครอบคลุมในแต่ละบริบทของการใช้งานต่อไป

ตารางที่ 5.6 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		6.03	8.56	-1.87		8.85
ช่อง attic 10 ซม.	8.43	9.13	9.16	5.58	8.42	9.47
ช่อง attic 20 ซม.	8.41	9.11	9.44	5.69	8.35	10.42

ตารางที่ 5.7 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		2.87	3.72	-0.64		3.83
ช่อง attic 10 ซม.	3.66	3.94	3.95	2.69	3.66	4.08
ช่อง attic 20 ซม.	3.65	3.93	4.07	2.74	3.64	4.11

ตารางที่ 5.8 แสดงพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	พลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า เมื่อเทียบกับหลังคา base case แบบไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radaint barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		10.83	15.85	-4.41		22.42
ช่อง attic 10 ซม.	20.78	22.83	22.93	13.45	20.74	24.83
ช่อง attic 20 ซม.	20.71	22.75	23.72	13.74	20.46	24.84

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารสำนักงาน เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		5.75	8.26	-4.37		8.70
ช่อง attic 10 ซม.	8.12	8.58	8.61	2.77	5.60	9.06
ช่อง attic 20 ซม.	8.11	8.55	8.88	2.89	5.53	12.63

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารโรงพยาบาล เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		2.75	3.60	-1.79		3.78
ช่อง attic 10 ซม.	3.54	3.70	3.71	1.41	2.38	3.91
ช่อง attic 20 ซม.	3.53	3.69	3.83	1.46	2.36	3.94

ตารางที่ 5.11 แสดงค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า
เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)

	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ตลอด 20 ปี ของหลังคาประเภทต่างๆในอาคารร้านค้า เมื่อเทียบกับหลังคา base case ไม่มีฝ้าเพดาน (%)					
	base case	radiant barrier ใต้หลังคา	radiant barrier ลดระดับ	silica coating ใต้หลังคา	silica coating ใต้ฝ้า	ใยแก้ว 2 นิ้ว
ไม่มีฝ้าเพดาน		10.64	15.64	-5.95		22.28
ช่อง attic 10 ซม.	20.54	22.44	22.53	11.67	18.94	24.52
ช่อง attic 20 ซม.	20.47	22.36	23.32	11.97	18.66	24.53

5.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

5.2.1 ควรทำการเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานของวัสดุกันความร้อนที่หลากหลายกว่านี้ เช่น สีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา ควรมีการเปรียบเทียบผลกับ สีที่เข้มขึ้น เช่น สีดำ หรือวัสดุฉนวนมวลสารที่ใช้ อาจเพิ่มขนาดความหนามากกว่า 2 นิ้ว

5.2.2 อาคารต้นแบบที่นำมาจำลองผลการใช้พลังงานประเภทหนึ่งๆ อาจจัดให้มีเวลาการใช้งานเครื่องปรับอากาศที่แตกต่างกัน เช่น ในอาคารสำนักงานต้นแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลากลางวันระหว่างเวลา 8.00-18.00 น. ซึ่งในความเป็นจริง อาจมีสำนักงานที่ยังคงมีการใช้งานเครื่องปรับอากาศในเวลาเลย 18.00 น. ไปแล้วก็ได้

5.2.3 ควรจำลองอาคารต้นแบบที่มีรูปทรง ขนาด ความสูง อัตราส่วนพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานต่างกัน หลากๆรูปแบบ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการ ออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2552. ราชกิจจานุเบกษา 126 (20 กุมภาพันธ์ 2552): 21-29.

จญาติดา บุญยเกียรติ. การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

ธนิต จินดาวณิก. สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2540.

ประวิตร กิตติชาญธีระ. ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอุปกรณ์กันแดดแบบผนัง 2 ชั้น : กรณีศึกษาอาคารพักอาศัยเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

วิกรม จำนงจิตต์. ประสิทธิผลของการออกแบบการระบายอากาศของใต้หลังคาเพื่อป้องกันการ ถ่ายเทความร้อนจากหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรม ศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

อภิรักษ์ พรหมศิริแสง. การพัฒนารูปแบบและระบบการไหลเวียนอากาศของหลังคา เพื่อลด อุณหภูมิภายในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

อรรจน์ เศรษฐบุตร. การพัฒนาเกณฑ์ขั้นต่ำของคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของเปลือก อาคารในอาคารทาวน์เฮ้าส์. Journal of Architectural/Planning Research and Studies.5,1,(2549):30-52.

อรรจน์ เศรษฐบุตร. การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำหรับอาคารในประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. โครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพ สังกกองทุนรัชดาภิเษก, 2552.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing Materials. ASTM C1313 Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications. Thermal insulation standard West Conshohocken , USA : ASTM international : 2010.

C. O. Pedersen , D. E. Fisher, J. D. Spittler and R. J. Liesen. Cooling and heating load calculation principles. Atlanta , Georgia : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 1998.

P. Fairey. Design and Installing Radiant barrier systems. Cocoa , Florida : Florida Solar Energy Centre/University of Central Florida , 1984.

P. Fairey. Radiant energy transfer and Radiant barrier systems in building. Cocoa , Florida : Florida Solar Energy Centre/University of Central Florida , 1986.

M. A. Medina and B. Young. A perspective on the effect of climate and local environmental variables on the performance of attic radiant barriers in the United State. Building and Environment 41(2006) : 1767-1778.

M. A. Medina. A Comprehensive Review of Radiant Barrier Research Including Laboratory and Field Experiments. ASHRAE Transactions 118(2012).

P. C. Chang , C. M. Chiang and C. M. Lai. Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). Energy and Buildings 40(2008) : 140-147.

- S. Chirarattananon and J. Taweekun. A technical review of energy conservation programs for commercial and government buildings in Thailand. Energy Conversion & management 44(2003) : 743-762.
- T. Soubdhan, T. Feuillard and F. Bade. Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate. Solar Energy 79(2005) : 311-320.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบค่าการคายรังสีความร้อนของสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทรศัพท์ 0-2470-9671-3, 0-2470-9664-7 โทรสาร 0-2428-3374 <http://www.kmutt.ac.th>

ที่ ทธ. 5810/55858

20 พฤศจิกายน 2555

เรื่อง : แข็งผลการวัดสมบัติทางแสงและค่าการคายความร้อน
เรียน : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการทดสอบชิ้นงานทดสอบของท่าน ตามรายงานฉบับนี้ซึ่งแสดงผลการทดสอบค่าการสะท้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ (Solar reflectance) ที่ทดสอบด้วยเครื่อง Shimadzu UV-3100 (UV-VIS-NIR Recording Spectrophotometer) โดยค่าการทดสอบที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาค่าการสะท้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ASTM E903_82 และทดสอบวัดค่าการคายความร้อน ด้วยเครื่อง Emissometer ของบริษัท DEVICES&SERVICE รุ่น AE. ได้ผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้

ชิ้นงาน	ค่าการสะท้อนพลังงาน รังสีอาทิตย์ (%)	ค่าการดูดกลืนพลังงาน รังสีอาทิตย์ (%)	ค่าการคายความร้อน
มาสก์ขาว	91.1	8.9	0.86
มาสก์ดำ	7.2	92.8	0.89
เมทัลชีทแปรง 1	84.4	15.6	0.89
เมทัลชีทแปรง 2	86.8	13.2	0.90
เมทัลชีทลูกกลิ้ง 1	85.0	15.0	0.87
เมทัลชีทลูกกลิ้ง 2	85.0	15.0	0.92
ชิปซึ่มแปรง 1	89.3	10.7	0.75
ชิปซึ่มแปรง 2	89.4	10.6	0.76
ชิปซึ่มลูกกลิ้ง 1	89.0	11.0	0.75
ชิปซึ่มลูกกลิ้ง 2	89.3	10.7	0.76

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ดร. พิศนະ รักความสุข)

หัวหน้าโครงการ

(ผศ. นิติ บูรณจันทร์)

ผู้อำนวยการ

สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

รายงานผลที่สมบูรณ์จะต้องมีประทับตราของมหาวิทยาลัยและลายมือชื่อจริงของผู้มีอำนาจ
รายงานนี้ใช้ได้กับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบเท่านั้น ผลการทดสอบตามรายการนี้ใช้ได้กับวัสดุอื่น หรือผลิตภัณฑ์อื่น ๆ แม้จะผลิตจากบริษัทเดียวกัน

ภาพที่ ก.1 ผลการทดสอบค่าการคายรังสีความร้อนของสีกันความร้อนอนุภาคซิลิกา

ภาคผนวก ข

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)ของหลังคาที่คำนวณได้
ในระบบหลังคาทั้ง 17 ระบบ

ตารางที่ ข.1 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน base case

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน base case					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air (C°)	outlet air (C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
62.8530	57.8670	33.7570	38.8680	61.6703	0.0291
62.8070	57.9080	33.7830	38.9240	62.0323	0.0284
62.8070	57.9080	33.7830	38.8400	61.0187	0.0289
62.9000	57.9080	33.8090	38.9520	62.0564	0.0290
62.9000	57.8670	33.7830	38.9800	62.7080	0.0289
62.8530	57.9080	33.8090	38.9520	62.0564	0.0287
62.8530	57.9080	33.7830	38.8960	61.6944	0.0289
62.9460	57.9490	33.7570	38.9240	62.3460	0.0289
62.9460	57.9490	33.7570	38.8960	62.0081	0.0290
62.8530	58.0310	33.7830	38.9240	62.0323	0.0280
63.0380	58.0720	33.7570	38.9240	62.3460	0.0287
63.0380	57.9900	33.7830	38.8960	61.6944	0.0295
62.9000	57.8670	33.7570	38.8680	61.6703	0.0294
62.7610	57.8270	33.7830	38.8680	61.3566	0.0289
62.7610	57.7860	33.7830	38.8680	61.3566	0.0292
62.7150	57.7860	33.8090	38.8680	61.0428	0.0291
62.3490	57.6640	33.8090	38.8400	60.7050	0.0278
62.5320	57.5820	33.8090	38.9240	61.7185	0.0289
62.6240	57.5820	33.7830	38.9240	62.0323	0.0293
62.5780	57.6230	33.7830	38.8960	61.6944	0.0289
62.7150	57.7860	33.8090	38.9240	61.7185	0.0288
62.7150	57.8270	33.7830	38.8960	61.6944	0.0285
62.8530	57.8670	33.8090	39.0080	62.7321	0.0286
62.9920	57.9490	33.8090	39.0360	63.0700	0.0288
63.0850	57.9900	33.8090	39.0080	62.7321	0.0292
63.1770	58.1130	33.7830	39.0360	63.3837	0.0288
63.1310	58.0310	33.7830	39.0080	63.0458	0.0291
63.1310	58.1130	33.8090	39.0080	62.7321	0.0288
63.2240	58.1130	33.8350	39.0360	62.7562	0.0293
63.2710	58.0720	33.8350	39.0360	62.7562	0.0298
63.2240	58.0720	33.8350	39.0080	62.4184	0.0297

63.1310	57.9900	33.8350	38.9800	62.0805	0.0298
63.0380	57.9080	33.8090	38.9520	62.0564	0.0298
62.8530	57.8270	33.8090	38.9520	62.0564	0.0292
62.9000	57.8270	33.8350	38.9800	62.0805	0.0294
63.0380	57.9490	33.8350	39.0080	62.4184	0.0294
63.0380	57.9490	33.8350	39.0080	62.4184	0.0294
63.0380	57.9080	33.8350	39.0360	62.7562	0.0294
62.9460	57.8670	33.8350	39.0360	62.7562	0.0291
62.9920	57.8670	33.8350	39.0360	62.7562	0.0294
62.9920	57.8670	33.8090	39.0650	63.4199	0.0291
62.9000	57.8270	33.8350	39.0080	62.4184	0.0293
62.8070	57.8670	33.8350	38.9800	62.0805	0.0286
62.9000	57.9490	33.8350	38.9800	62.0805	0.0287
62.9000	57.9900	33.8610	39.0080	62.1047	0.0285
63.0380	58.0310	33.8610	39.0360	62.4425	0.0289
63.0850	58.0720	33.8350	39.0080	62.4184	0.0289
63.1770	58.1540	33.8610	39.0080	62.1047	0.0291
63.1310	58.1130	33.8350	39.0360	62.7562	0.0288
63.0850	58.0310	33.8350	39.0080	62.4184	0.0291
63.2240	58.0720	33.8350	39.0080	62.4184	0.0297
63.1770	58.0720	33.8610	39.0650	62.7924	0.0293
63.2710	58.1540	33.8610	39.0650	62.7924	0.0293
63.2240	58.2370	33.8870	39.0930	62.8166	0.0286
63.2710	58.2780	33.8350	39.0930	63.4440	0.0283
63.3640	58.3190	33.8610	39.0360	62.4425	0.0291
63.4110	58.3610	33.8350	39.1490	64.1197	0.0284
63.4570	58.2780	33.8870	39.1210	63.1544	0.0295
63.5040	58.2780	33.9140	39.1490	63.1665	0.0298
63.5040	58.3610	33.8610	39.1210	63.4681	0.0292
62.9988	57.9720	33.8177	38.9844	62.3420	0.0290

ตารางที่ ข.2 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน radiant barrier ติดด้านใต้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน radiant barrier ติดด้านใต้					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
66.3700	49.4450	33.8350	37.2060	40.6751	0.1498
66.3200	49.4790	33.8350	37.2330	41.0009	0.1479
66.2190	49.4450	33.8090	37.2060	40.9888	0.1473
66.1690	49.4110	33.8610	37.1780	40.0235	0.1507
65.9190	49.3090	33.8350	37.1780	40.3373	0.1482
65.9190	49.3430	33.8610	37.1510	39.6978	0.1503
65.8690	49.3430	33.8350	37.1780	40.3373	0.1475
65.8200	49.2750	33.8610	37.1510	39.6978	0.1500
65.6710	49.1400	33.8610	37.1510	39.6978	0.1499
65.5720	49.0730	33.8870	37.1780	39.7098	0.1496
65.5230	49.0730	33.8870	37.1240	39.0582	0.1516
65.4240	49.1400	33.8350	37.1510	40.0115	0.1465
65.4730	49.1070	33.8350	37.1510	40.0115	0.1473
65.5230	49.1400	33.8610	37.1510	39.6978	0.1486
65.6210	49.1400	33.8610	37.1780	40.0235	0.1482
65.7200	49.1070	33.8090	37.1780	40.6510	0.1471
65.6710	49.1740	33.8610	37.1780	40.0235	0.1484
65.8200	49.1740	33.8610	37.1510	39.6978	0.1510
65.9690	49.1070	33.8610	37.1510	39.6978	0.1529
65.9190	49.0390	33.8610	37.1780	40.0235	0.1518
65.8200	49.1070	33.8350	37.1780	40.3373	0.1492
65.8690	49.2080	33.8610	37.1780	40.0235	0.1499
65.8690	49.2750	33.8610	37.2060	40.3614	0.1480
65.8200	49.4110	33.8350	37.1780	40.3373	0.1464
65.9190	49.5130	33.8350	37.1780	40.3373	0.1464
65.9190	49.4790	33.8610	37.2330	40.6872	0.1455
65.8690	49.3770	33.8610	37.1780	40.0235	0.1483
65.7200	49.4110	33.8350	37.1780	40.3373	0.1456
65.7700	49.2420	33.8610	37.1780	40.0235	0.1487
65.7700	49.1740	33.8870	37.1780	39.7098	0.1505
65.7700	49.1740	33.8870	37.2060	40.0477	0.1492

65.8200	49.1740	33.8870	37.1780	39.7098	0.1509
65.8200	49.2080	33.8350	37.1780	40.3373	0.1483
65.8200	49.1740	33.8610	37.1780	40.0235	0.1497
65.8690	49.1740	33.8870	37.2060	40.0477	0.1501
65.9190	49.3090	33.8870	37.2330	40.3735	0.1481
65.9190	49.3430	33.8610	37.2060	40.3614	0.1478
65.9690	49.3090	33.8610	37.2060	40.3614	0.1486
65.9690	49.3770	33.8870	37.2610	40.7113	0.1467
65.9690	49.4110	33.8610	37.2060	40.3614	0.1477
65.9190	49.3770	33.8870	37.2060	40.0477	0.1487
65.9190	49.3430	33.8350	37.1780	40.3373	0.1479
65.9190	49.2080	33.8350	37.1780	40.3373	0.1491
65.9190	49.2080	33.8610	37.1510	39.6978	0.1515
65.9690	49.3090	33.8870	37.2060	40.0477	0.1498
66.0190	49.3090	33.8870	37.1510	39.3840	0.1527
65.9190	49.2420	33.8610	37.2060	40.3614	0.1487
65.8690	49.2420	33.8610	37.2060	40.3614	0.1483
65.7700	49.2420	33.8610	37.2060	40.3614	0.1474
65.7700	49.1740	33.8870	37.1780	39.7098	0.1505
65.7700	49.2420	33.8610	37.1780	40.0235	0.1487
65.8200	49.2420	33.8610	37.1510	39.6978	0.1503
65.8690	49.1740	33.8610	37.1510	39.6978	0.1514
65.8690	49.0390	33.8350	37.1780	40.3373	0.1502
65.8690	49.0060	33.8870	37.2060	40.0477	0.1516
65.8690	49.1070	33.8870	37.1780	39.7098	0.1520
65.8200	49.1740	33.8870	37.1780	39.7098	0.1509
65.8690	49.2080	33.9140	37.1780	39.3840	0.1523
65.8200	49.1740	33.8350	37.2060	40.6751	0.1473
65.7700	49.2420	33.9140	37.2330	40.0477	0.1486
65.8506	49.2429	33.8610	37.1838	40.0925	0.1491

ตารางที่ ข.3 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
70.0120	38.0320	33.1570	35.4220	27.3299	0.4213
69.8470	38.0320	33.2090	35.4480	27.0162	0.4239
69.8470	38.0320	33.2090	35.4220	26.7025	0.4289
69.8470	38.0320	33.1830	35.4220	27.0162	0.4239
69.7920	38.0320	33.2350	35.4480	26.7025	0.4282
69.9020	38.0320	33.2090	35.4220	26.7025	0.4297
70.0120	38.0320	33.2090	35.4220	26.7025	0.4312
70.0680	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4265
70.0120	38.0600	33.2090	35.4750	27.3420	0.4207
70.0120	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4258
69.7370	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4221
69.7920	38.0600	33.2350	35.4480	26.7025	0.4278
69.9020	38.0600	33.2090	35.4220	26.7025	0.4293
70.0120	38.0600	33.2090	35.4220	26.7025	0.4308
69.7370	38.0600	33.1830	35.4480	27.3299	0.4173
69.8470	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4236
69.7370	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4221
69.7920	38.0870	33.2350	35.4480	26.7025	0.4274
69.8470	38.0870	33.2090	35.4480	27.0162	0.4232
69.8470	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4236
69.7920	38.0600	33.2090	35.4480	27.0162	0.4228
69.9020	38.0320	33.2090	35.4220	26.7025	0.4297
69.9570	38.0320	33.2610	35.4220	26.0750	0.4408
69.9020	38.0320	33.2350	35.4480	26.7025	0.4297
69.7920	38.0320	33.2090	35.4480	27.0162	0.4232
69.6270	38.0320	33.2090	35.4480	27.0162	0.4210
69.4630	38.0040	33.2090	35.4220	26.7025	0.4241
69.4080	37.9490	33.2090	35.4220	26.7025	0.4241
69.3540	37.9490	33.2350	35.3950	26.0630	0.4338
69.2990	37.9490	33.2090	35.4220	26.7025	0.4227
69.2450	37.9490	33.2090	35.3950	26.3767	0.4271

69.2450	37.9490	33.2350	35.4220	26.3888	0.4269
69.2450	37.9760	33.2090	35.3950	26.3767	0.4268
69.2450	37.9760	33.2350	35.4220	26.3888	0.4266
69.3540	37.9490	33.2610	35.4220	26.0750	0.4336
69.4630	37.9490	33.2350	35.3950	26.0630	0.4353
69.4630	37.9490	33.2090	35.4220	26.7025	0.4249
69.4630	37.9760	33.2350	35.4480	26.7025	0.4245
69.5720	37.9760	33.2350	35.4220	26.3888	0.4310
69.5720	37.9490	33.2350	35.4220	26.3888	0.4314
69.6270	37.9760	33.2350	35.4220	26.3888	0.4318
69.5720	37.9760	33.2090	35.4480	27.0162	0.4210
69.5720	38.0320	33.2090	35.4480	27.0162	0.4203
69.5720	38.0320	33.2090	35.4480	27.0162	0.4203
69.6270	38.0040	33.2090	35.4480	27.0162	0.4214
69.6820	38.0040	33.2090	35.4480	27.0162	0.4221
69.8470	38.0320	33.2350	35.4480	26.7025	0.4289
69.9020	38.0040	33.2610	35.4480	26.3888	0.4352
70.0120	38.0320	33.2350	35.4750	27.0283	0.4260
70.1230	38.0600	33.2350	35.4750	27.0283	0.4271
70.0680	38.0870	33.2350	35.4750	27.0283	0.4260
69.8470	38.0600	33.2350	35.4480	26.7025	0.4285
69.6270	38.0870	33.2350	35.5020	27.3540	0.4151
69.4080	38.0600	33.2350	35.4750	27.0283	0.4175
69.2450	38.0320	33.2350	35.4480	26.7025	0.4208
69.4080	38.0040	33.2350	35.4480	26.7025	0.4234
69.3540	38.0320	33.2610	35.4750	26.7145	0.4221
69.5170	38.0040	33.2610	35.4750	26.7145	0.4247
69.6270	38.0320	33.2350	35.4750	27.0283	0.4208
69.6820	38.0600	33.2610	35.4480	26.3888	0.4314
69.6881	38.0223	33.2220	35.4407	26.7717	0.4259

ตารางที่ ข.4 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ทาสีป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาต้านได้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ทาสีป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาต้านได้					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
57.9900	53.2210	33.9400	39.8860	71.7455	0.0239
57.8670	53.1480	33.9400	39.9710	72.7712	0.0233
57.7860	53.1110	33.9400	39.8570	71.3956	0.0236
57.7450	53.0740	33.9400	39.9710	72.7712	0.0231
57.6640	53.0380	33.9400	39.8860	71.7455	0.0232
57.6640	52.9640	33.9660	39.9140	71.7697	0.0236
57.7450	53.0010	33.9660	39.9140	71.7697	0.0238
57.8670	53.1110	33.9920	39.9710	72.1437	0.0237
57.9900	53.1840	33.9920	40.0280	72.8315	0.0238
58.0310	53.2580	33.9920	40.0570	73.1814	0.0235
58.0310	53.3310	33.9660	40.0280	73.1452	0.0231
58.0310	53.3680	33.9660	40.0000	72.8074	0.0231
58.0720	53.4050	33.9660	40.0280	73.1452	0.0230
58.1130	53.4050	33.9660	39.9710	72.4575	0.0234
57.9900	53.3310	33.9660	39.9430	72.1196	0.0233
57.9490	53.2580	33.9920	40.0000	72.4937	0.0233
57.9080	53.1480	33.9920	39.9710	72.1437	0.0238
57.8270	53.0740	33.9920	39.9430	71.8059	0.0238
57.8270	53.1110	33.9660	40.0280	73.1452	0.0232
57.8270	53.1110	33.9920	40.0280	72.8315	0.0233
57.7860	53.0740	33.9660	39.9710	72.4575	0.0234
57.7860	53.1480	33.9400	39.9710	72.7712	0.0229
57.7860	53.0740	33.9400	39.9140	72.0834	0.0235
57.7450	53.0010	33.9400	39.8570	71.3956	0.0239
57.7450	53.0380	33.9660	39.8860	71.4318	0.0237
57.7860	53.1480	33.9660	40.0000	72.8074	0.0229
57.8270	53.1480	33.9920	40.0000	72.4937	0.0232
57.8670	53.2210	33.9660	40.0570	73.4951	0.0228
57.9080	53.2210	33.9920	40.0000	72.4937	0.0233
57.8270	53.1480	33.9920	39.9710	72.1437	0.0233

57.8270	53.1480	33.9660	40.0000	72.8074	0.0231
57.8670	53.1840	33.9660	39.9140	71.7697	0.0235
57.8670	53.1480	33.9660	39.9140	71.7697	0.0237
57.8270	53.1110	33.9660	39.9430	72.1196	0.0235
57.8270	53.1110	33.9660	40.0000	72.8074	0.0233
57.7860	53.1110	33.9920	39.9140	71.4560	0.0236
57.7450	53.0740	33.9660	39.9430	72.1196	0.0233
57.7040	53.0740	33.9660	39.9140	71.7697	0.0232
57.7860	53.0380	33.9920	39.9140	71.4560	0.0239
57.7450	53.0380	33.9920	39.9140	71.4560	0.0237
57.7450	53.0380	33.9920	39.9430	71.8059	0.0236
57.7860	53.1110	33.9660	39.9140	71.7697	0.0235
57.8670	53.1110	33.9920	39.8570	70.7682	0.0242
57.7860	53.0010	33.9920	39.9710	72.1437	0.0239
57.7860	53.0010	33.9920	39.9710	72.1437	0.0239
57.7860	53.0380	33.9660	39.9710	72.4575	0.0236
57.8270	53.1110	33.9920	39.9430	71.8059	0.0236
57.7860	53.1110	33.9920	39.9140	71.4560	0.0236
57.8270	53.0380	33.9920	39.9430	71.8059	0.0240
57.8270	53.1110	33.9920	39.9710	72.1437	0.0235
57.8670	53.1480	33.9920	39.9430	71.8059	0.0237
57.9080	53.2210	33.9920	39.9710	72.1437	0.0234
57.9490	53.3310	33.9920	40.0280	72.8315	0.0228
57.8270	53.2210	33.9660	39.8290	70.7441	0.0234
57.8270	53.1840	33.9660	39.9140	71.7697	0.0233
57.8270	53.1110	33.9920	39.8570	70.7682	0.0240
57.8270	53.0380	34.0190	39.8860	70.7923	0.0244
57.8270	53.0380	34.0190	39.9430	71.4801	0.0241
57.7860	53.0740	34.0190	39.9430	71.4801	0.0237
57.6230	53.0740	33.9660	39.9140	71.7697	0.0228
57.8377	53.1337	33.9760	39.9503	72.0868	0.0235

ตารางที่ ข.5 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
72.4130	39.2900	33.7040	35.5020	21.6950	0.5496
72.4130	39.3180	33.7300	35.5290	21.7071	0.5489
72.4130	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5484
72.5900	39.3460	33.7040	35.5290	22.0208	0.5435
72.5310	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5504
72.3540	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5474
72.4720	39.3460	33.7040	35.5290	22.0208	0.5416
72.5900	39.3460	33.7040	35.5290	22.0208	0.5435
72.5310	39.3180	33.7300	35.5290	21.7071	0.5508
72.4130	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5484
72.2950	39.3750	33.7570	35.5290	21.3813	0.5543
72.1770	39.3460	33.7300	35.5020	21.3813	0.5528
72.2360	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5455
72.0020	39.3460	33.7040	35.5290	22.0208	0.5339
71.9440	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5406
71.8850	39.3460	33.7300	35.5290	21.7071	0.5396
72.0020	39.3180	33.7570	35.5290	21.3813	0.5503
72.1770	39.2900	33.7300	35.5290	21.7071	0.5454
72.0020	39.2900	33.7570	35.5290	21.3813	0.5508
71.8850	39.3180	33.7300	35.5290	21.7071	0.5401
72.0600	39.2900	33.7570	35.5290	21.3813	0.5518
72.0600	39.2900	33.7570	35.5290	21.3813	0.5518
72.3540	39.2620	33.7040	35.5290	22.0208	0.5410
72.4130	39.2620	33.7300	35.5020	21.3813	0.5582
72.4130	39.2900	33.7300	35.5020	21.3813	0.5577
72.3540	39.2900	33.7300	35.5550	22.0208	0.5405
72.4720	39.2900	33.7570	35.5290	21.3813	0.5587
72.5310	39.2620	33.7300	35.5290	21.7071	0.5517
72.5900	39.2620	33.7300	35.5550	22.0208	0.5449
72.4130	39.2620	33.7300	35.5550	22.0208	0.5420
72.2950	39.2620	33.7300	35.5550	22.0208	0.5400

72.4130	39.2900	33.7300	35.5550	22.0208	0.5415
72.5900	39.2900	33.7570	35.5550	21.6950	0.5526
72.5310	39.3180	33.7830	35.5820	21.7071	0.5508
72.5310	39.2900	33.7570	35.5820	22.0208	0.5434
72.3540	39.2900	33.7570	35.5550	21.6950	0.5487
72.2950	39.3180	33.7570	35.5550	21.6950	0.5472
72.2950	39.3460	33.7830	35.5550	21.3813	0.5548
72.2360	39.3460	33.7570	35.5820	22.0208	0.5377
72.2360	39.3460	33.7570	35.5820	22.0208	0.5377
72.3540	39.3180	33.7830	35.5550	21.3813	0.5562
72.2950	39.3180	33.7830	35.5550	21.3813	0.5552
72.1770	39.3180	33.7570	35.5550	21.6950	0.5453
72.0600	39.3180	33.7570	35.5550	21.6950	0.5433
72.0020	39.3180	33.7570	35.5290	21.3813	0.5503
71.8270	39.3180	33.7830	35.5550	21.3813	0.5474
72.1770	39.3180	33.7830	35.5820	21.7071	0.5449
72.2950	39.3460	33.7830	35.5550	21.3813	0.5548
72.1770	39.3750	33.7570	35.5820	22.0208	0.5363
72.2360	39.3750	33.7570	35.5820	22.0208	0.5372
72.2360	39.4030	33.7570	35.5550	21.6950	0.5448
72.0600	39.4030	33.7570	35.5550	21.6950	0.5419
71.8850	39.3750	33.7830	35.5550	21.3813	0.5474
71.9440	39.3750	33.7570	35.5550	21.6950	0.5404
71.8850	39.3460	33.7830	35.5550	21.3813	0.5479
71.8850	39.3460	33.7830	35.5550	21.3813	0.5479
72.0020	39.3460	33.7570	35.5290	21.3813	0.5498
72.2950	39.3750	33.7570	35.5820	22.0208	0.5382
72.2360	39.3750	33.7570	35.5820	22.0208	0.5372
72.7090	39.3460	33.7300	35.5550	22.0208	0.5454
72.2583	39.3256	33.7466	35.5447	21.6962	0.5465

ตารางที่ ข.6 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. base case

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. Base case					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
68.9750	40.2280	33.4430	35.6890	27.1007	0.3819
68.9210	40.2280	33.4430	35.6890	27.1007	0.3812
68.8670	40.2280	33.4690	35.6890	26.7869	0.3849
68.9750	40.2860	33.4690	35.7160	27.1127	0.3809
69.1370	40.2280	33.4690	35.7160	27.1127	0.3839
69.2450	40.2570	33.4690	35.7160	27.1127	0.3849
69.3540	40.2280	33.4430	35.6890	27.1007	0.3869
69.4080	40.2280	33.4690	35.7160	27.1127	0.3874
69.5170	40.2280	33.4430	35.7160	27.4264	0.3844
69.4080	40.2000	33.4690	35.6890	26.7869	0.3925
69.4630	40.2280	33.4690	35.6890	26.7869	0.3929
69.5170	40.2280	33.4690	35.6890	26.7869	0.3936
69.5720	40.2570	33.4690	35.7160	27.1127	0.3892
69.5170	40.3140	33.4690	35.6890	26.7869	0.3925
69.5170	40.3430	33.4690	35.7160	27.1127	0.3874
69.5170	40.3140	33.4690	35.7160	27.1127	0.3878
69.5170	40.3430	33.4690	35.7160	27.1127	0.3874
69.5170	40.3720	33.4950	35.7430	27.1248	0.3868
69.4630	40.3430	33.4690	35.7160	27.1127	0.3867
69.5170	40.3430	33.4690	35.7160	27.1127	0.3874
69.5720	40.3720	33.4690	35.7430	27.4385	0.3831
69.6270	40.4000	33.4690	35.7160	27.1127	0.3881
69.6820	40.4000	33.4690	35.7160	27.1127	0.3888
69.5720	40.4290	33.4950	35.7430	27.1248	0.3868
69.3540	40.4000	33.4950	35.7160	26.7990	0.3889
69.3540	40.3720	33.4690	35.7430	27.4385	0.3803
69.2990	40.3720	33.4950	35.7430	27.1248	0.3839
69.2450	40.3720	33.4950	35.7160	26.7990	0.3879
69.2990	40.4000	33.4950	35.7430	27.1248	0.3835
69.4630	40.4000	33.4690	35.7430	27.4385	0.3813
69.5720	40.4000	33.4690	35.7430	27.4385	0.3827

69.6820	40.4290	33.4950	35.7430	27.1248	0.3882
69.7920	40.4290	33.4950	35.7430	27.1248	0.3897
69.7370	40.4290	33.4430	35.7430	27.7522	0.3802
69.7370	40.4000	33.4690	35.7430	27.4385	0.3849
69.8470	40.3720	33.4690	35.7430	27.4385	0.3867
69.9020	40.4000	33.4950	35.7430	27.1248	0.3916
69.9570	40.4290	33.4950	35.7430	27.1248	0.3919
69.9570	40.4290	33.4950	35.7430	27.1248	0.3919
70.0120	40.4290	33.5210	35.7700	27.1369	0.3925
70.1230	40.4290	33.4950	35.7700	27.4506	0.3894
70.1230	40.4290	33.4950	35.7700	27.4506	0.3894
70.0680	40.4580	33.4950	35.7700	27.4506	0.3883
70.0120	40.4580	33.4950	35.7700	27.4506	0.3876
69.9020	40.4870	33.5210	35.7700	27.1369	0.3902
69.9020	40.4870	33.4950	35.7700	27.4506	0.3858
69.8470	40.5160	33.5210	35.7700	27.1369	0.3891
69.8470	40.5160	33.4690	35.7970	28.0901	0.3759
69.7920	40.5160	33.4950	35.7970	27.7764	0.3794
69.6270	40.5440	33.4950	35.7700	27.4506	0.3814
69.5170	40.5440	33.5210	35.7970	27.4626	0.3798
69.4630	40.5440	33.4950	35.7700	27.4506	0.3793
69.2990	40.5440	33.4950	35.7970	27.7764	0.3727
69.1910	40.5160	33.5210	35.7700	27.1369	0.3804
69.1910	40.4870	33.4950	35.7700	27.4506	0.3764
69.2450	40.4870	33.4690	35.7700	27.7643	0.3729
69.4080	40.4580	33.4950	35.7700	27.4506	0.3797
69.4630	40.4580	33.4950	35.7700	27.4506	0.3804
69.5720	40.4290	33.4690	35.7700	27.7643	0.3779
69.6270	40.4000	33.4950	35.7700	27.4506	0.3833
69.5468	40.3866	33.4816	35.7403	27.2543	0.3852

ตารางที่ ข.7 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. radiant barrier ติดด้านใต้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. radiant barrier ติดด้านใต้					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
71.5950	37.2060	31.4330	34.9690	42.6660	0.2902
71.5380	37.2330	33.5480	34.9420	16.8203	0.7342
71.3080	37.2330	33.5480	34.9690	17.1461	0.7154
71.4230	37.2330	33.5480	34.9690	17.1461	0.7179
71.5380	37.2330	33.5740	34.9690	16.8323	0.7337
71.4800	37.2330	33.5740	34.9690	16.8323	0.7325
71.7110	37.2330	33.5480	34.9950	17.4598	0.7109
72.0020	37.2330	33.5740	34.9950	17.1461	0.7300
72.1190	37.2330	33.5480	34.9950	17.4598	0.7193
71.3080	37.2330	33.5740	34.9690	16.8323	0.7288
71.8270	37.2610	33.6000	34.9950	16.8323	0.7393
71.9440	37.2610	33.5740	34.9950	17.1461	0.7282
71.4230	37.2610	33.6000	34.9950	16.8323	0.7306
72.0020	37.2610	33.5740	35.0220	17.4718	0.7158
72.2950	37.2610	33.5480	34.9950	17.4598	0.7224
72.5900	37.2610	33.5740	34.9950	17.1461	0.7418
72.3540	37.2610	33.5740	35.0220	17.4718	0.7231
72.4720	37.2610	33.5740	35.0220	17.4718	0.7255
72.5310	37.2610	33.6000	35.0220	17.1581	0.7400
72.1190	37.3150	33.6000	35.0220	17.1581	0.7302
72.5900	37.2880	33.6260	35.0220	16.8444	0.7545
72.4720	37.3150	33.6000	35.0220	17.1581	0.7376
72.3540	37.3150	33.6000	35.0490	17.4839	0.7215
72.5310	37.3150	33.6000	35.0490	17.4839	0.7251
72.4720	37.3150	33.6260	35.0490	17.1702	0.7371
72.4720	37.3430	33.6000	35.0220	17.1581	0.7371
72.8880	37.3430	33.6000	35.0490	17.4839	0.7319
72.8880	37.3430	33.6260	35.0490	17.1702	0.7453

72.5900	37.3700	33.6000	35.0490	17.4839	0.7252
72.7680	37.3700	33.6260	35.0490	17.1702	0.7422
73.0070	37.3700	33.6260	35.0490	17.1702	0.7472
73.0670	37.3700	33.6260	35.0490	17.1702	0.7484
72.8280	37.3700	33.6260	35.0490	17.1702	0.7434
73.1270	37.3980	33.6260	35.0750	17.4839	0.7357
73.1270	37.3980	33.6260	35.0490	17.1702	0.7491
73.1880	37.3980	33.6260	35.1020	17.8097	0.7234
73.1880	37.3700	33.6260	35.0750	17.4839	0.7375
72.9470	37.3980	33.6260	35.0490	17.1702	0.7453
73.0670	37.3980	33.6260	35.0750	17.4839	0.7344
72.9470	37.3980	33.6260	35.0750	17.4839	0.7320
72.4720	37.3980	33.6520	35.0490	16.8565	0.7491
72.5310	37.3980	33.6260	35.1020	17.8097	0.7102
72.5900	37.3980	33.6260	35.1020	17.8097	0.7114
72.9470	37.4250	33.6780	35.1020	17.1823	0.7443
73.0070	37.3980	33.6520	35.0750	17.1702	0.7466
73.0070	37.4250	33.6520	35.0750	17.1702	0.7460
72.4720	37.4250	33.6780	35.1020	17.1823	0.7343
72.8280	37.4250	33.6520	35.1020	17.4960	0.7285
72.8880	37.4250	33.6520	35.0750	17.1702	0.7435
73.0670	37.4250	33.6780	35.1020	17.1823	0.7468
73.3080	37.3980	33.6520	35.1280	17.8097	0.7259
73.2480	37.4250	33.6520	35.1020	17.4960	0.7371
73.0670	37.4250	33.6520	35.1020	17.4960	0.7334
73.0670	37.4250	33.6520	35.1020	17.4960	0.7334
72.8280	37.4530	33.6520	35.1020	17.4960	0.7279
72.4720	37.4530	33.6260	35.1280	18.1234	0.6956
72.7090	37.4530	33.6780	35.1280	17.4960	0.7254
72.4720	37.4530	33.6780	35.1550	17.8218	0.7074
72.7680	37.4530	33.6520	35.1280	17.8097	0.7138
72.9470	37.4530	33.6520	35.1280	17.8097	0.7175
72.5132	37.3448	33.5791	35.0495	17.7429	0.7240

ตารางที่ ข.8 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
73.1880	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7741
73.1270	35.9580	32.7680	34.2020	17.3029	0.7733
73.0670	35.9580	32.7680	34.2290	17.6287	0.7578
73.0070	35.9580	32.7170	34.2020	17.9183	0.7444
72.8280	35.9580	32.7420	34.2020	17.6166	0.7534
72.7090	35.9580	32.7420	34.2290	17.9424	0.7374
72.6490	35.9580	32.7680	34.2290	17.6287	0.7493
72.5900	35.9580	32.7680	34.2290	17.6287	0.7481
72.4720	35.9850	32.7940	34.2290	17.3150	0.7586
72.4720	35.9850	32.7940	34.2020	16.9892	0.7732
72.4130	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7579
72.3540	35.9850	32.7940	34.2020	16.9892	0.7707
72.3540	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7567
72.4720	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7592
72.4720	35.9580	32.8200	34.2550	17.3150	0.7592
72.4130	35.9580	32.8200	34.2290	17.0013	0.7719
72.2360	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7543
72.3540	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7567
72.4720	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7592
72.5310	35.9580	32.7940	34.2020	16.9892	0.7750
72.5900	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7616
72.5900	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7616
72.5310	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7604
72.5310	35.9580	32.7940	34.2290	17.3150	0.7604
72.5900	35.9850	32.7680	34.2290	17.6287	0.7475
72.5900	35.9850	32.7680	34.2290	17.6287	0.7475
72.4720	35.9850	32.7680	34.2550	17.9424	0.7321
72.4720	35.9850	32.8200	34.2550	17.3150	0.7586

72.4130	35.9850	32.8200	34.2290	17.0013	0.7714
72.2360	35.9850	32.8200	34.2290	17.0013	0.7676
72.3540	35.9850	32.8200	34.2550	17.3150	0.7562
72.4130	35.9580	32.8200	34.2290	17.0013	0.7719
72.4720	35.9850	32.7940	34.2550	17.6287	0.7451
72.5310	35.9850	32.8200	34.2290	17.0013	0.7739
72.5310	35.9850	32.7940	34.2290	17.3150	0.7598
72.5310	35.9850	32.7940	34.2290	17.3150	0.7598
72.4130	35.9580	32.8460	34.2550	17.0013	0.7719
72.4720	35.9850	32.8460	34.2290	16.6875	0.7871
72.5310	35.9580	32.8200	34.2550	17.3150	0.7604
72.5310	35.9580	32.8200	34.2550	17.3150	0.7604
72.4720	35.9850	32.8200	34.2550	17.3150	0.7586
72.5900	35.9580	32.8200	34.2810	17.6287	0.7481
72.5900	35.9850	32.7940	34.2550	17.6287	0.7475
72.6490	35.9850	32.7940	34.2550	17.6287	0.7487
72.6490	35.9850	32.8200	34.2810	17.6287	0.7487
72.7680	35.9850	32.8200	34.2550	17.3150	0.7648
72.7680	35.9850	32.8200	34.2550	17.3150	0.7648
72.6490	35.9850	32.8200	34.2810	17.6287	0.7487
72.5900	36.0120	32.8460	34.2810	17.3150	0.7605
72.4130	35.9850	32.8460	34.2550	17.0013	0.7714
72.4130	36.0120	32.8200	34.2550	17.3150	0.7568
72.4720	36.0120	32.8460	34.2810	17.3150	0.7580
72.4130	35.9850	32.8720	34.2810	17.0013	0.7714
72.4720	36.0120	32.8720	34.2810	17.0013	0.7720
72.2950	36.0120	32.8720	34.2810	17.0013	0.7683
72.5310	36.0120	32.8460	34.2810	17.3150	0.7593
72.7090	36.0390	32.8460	34.2810	17.3150	0.7624
72.7680	36.0390	32.8460	34.2810	17.3150	0.7636
72.7090	36.0120	32.8460	34.3080	17.6408	0.7489
72.7090	36.0390	32.8460	34.2810	17.3150	0.7624
72.5601	35.9792	32.8079	34.2445	17.3347	0.7598

ตารางที่ ข.9 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ

และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)

ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. สี่ป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทางด้านใต้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ					
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t)					
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ทาสีป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทางด้านใต้.					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
61.1820	44.9680	33.7300	37.2060	41.9421	0.1392
61.3150	44.9680	33.6780	37.2060	42.5695	0.1382
61.2270	44.9360	33.7040	37.2330	42.5816	0.1377
61.2710	44.9680	33.7040	37.2060	42.2558	0.1389
61.2710	44.9990	33.7300	37.2330	42.2679	0.1386
61.2270	44.9990	33.7300	37.2060	41.9421	0.1393
61.0940	44.9990	33.7570	37.2610	42.2799	0.1370
61.0060	44.9360	33.7040	37.2610	42.9194	0.1348
60.8740	44.9680	33.7040	37.2060	42.2558	0.1355
60.7860	44.9050	33.7300	37.2060	41.9421	0.1363
60.6550	44.8740	33.7570	37.2060	41.6163	0.1365
60.6550	44.8430	33.7040	37.2330	42.5816	0.1337
60.6550	44.7810	33.7040	37.2060	42.2558	0.1352
60.6550	44.7810	33.7300	37.2060	41.9421	0.1363
60.5240	44.7810	33.7300	37.1780	41.6042	0.1362
60.6110	44.7500	33.7040	37.1780	41.9179	0.1362
60.4810	44.7500	33.7300	37.1780	41.6042	0.1361
60.4370	44.7190	33.7570	37.1780	41.2784	0.1371
60.3940	44.6270	33.7300	37.1780	41.6042	0.1364
60.2640	44.6270	33.7040	37.1780	41.9179	0.1343
60.1770	44.6580	33.7300	37.1780	41.6042	0.1343
60.2200	44.6580	33.7570	37.1240	40.6269	0.1379
60.0480	44.6580	33.7300	37.1510	41.2784	0.1342
60.0480	44.6270	33.7300	37.1510	41.2784	0.1345
60.0480	44.6270	33.7040	37.1510	41.5921	0.1335
59.9620	44.6270	33.7830	37.1510	40.6389	0.1358
60.0480	44.5960	33.7570	37.1510	40.9526	0.1358
60.0910	44.5960	33.7570	37.1240	40.6269	0.1373

60.0910	44.5650	33.7300	37.1510	41.2784	0.1354
60.1340	44.5340	33.7300	37.1510	41.2784	0.1361
60.0910	44.4720	33.7570	37.1240	40.6269	0.1384
60.0480	44.4720	33.7570	37.1240	40.6269	0.1380
60.0910	44.4720	33.7300	37.1240	40.9526	0.1373
60.0910	44.4420	33.7300	37.0960	40.6148	0.1387
60.0480	44.4110	33.7300	37.1240	40.9526	0.1375
60.1340	44.4110	33.7300	37.1240	40.9526	0.1382
60.1770	44.4110	33.7300	37.1240	40.9526	0.1386
60.2200	44.4420	33.7570	37.0960	40.2890	0.1410
60.1770	44.4420	33.7300	37.1240	40.9526	0.1383
60.2200	44.5030	33.7570	37.1240	40.6269	0.1393
60.2200	44.4420	33.7570	37.1510	40.9526	0.1387
60.2200	44.4110	33.7300	37.1510	41.2784	0.1379
60.2640	44.4720	33.7570	37.0960	40.2890	0.1411
60.2640	44.4720	33.7300	37.1240	40.9526	0.1388
60.2640	44.4720	33.7570	37.1240	40.6269	0.1399
60.2640	44.4720	33.7300	37.0960	40.6148	0.1400
60.1340	44.4420	33.7570	37.0690	39.9632	0.1414
60.1770	44.4110	33.7570	37.1510	40.9526	0.1386
60.1770	44.4420	33.7570	37.1240	40.6269	0.1394
60.2640	44.4420	33.7570	37.0960	40.2890	0.1414
60.3070	44.4420	33.7570	37.1240	40.6269	0.1406
60.3070	44.4420	33.7830	37.1510	40.6389	0.1405
60.3070	44.4420	33.7830	37.1240	40.3131	0.1417
60.3070	44.4420	33.7570	37.1510	40.9526	0.1395
60.3070	44.4110	33.7570	37.1510	40.9526	0.1397
60.2640	44.3490	33.7830	37.1510	40.6389	0.1410
60.1770	44.3190	33.7830	37.1240	40.3131	0.1416
60.2200	44.3490	33.7830	37.1240	40.3131	0.1417
60.2200	44.3800	33.7830	37.1240	40.3131	0.1415
60.2200	44.4110	33.8090	37.1780	40.6510	0.1400
60.3939	44.6045	33.7417	37.1566	41.2040	0.1380

ตารางที่ ข.10 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. สี่ป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทำฝ้าเพดาน

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ทาสีป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาฝ้าเพดาน					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
70.3460	40.8040	33.7040	36.0120	27.8488	0.3819
70.1790	40.7750	33.7300	35.9850	27.2093	0.3890
70.1790	40.8040	33.7040	35.9850	27.5230	0.3842
70.1230	40.8330	33.7300	35.9850	27.2093	0.3875
70.1230	40.8330	33.7300	36.0120	27.5350	0.3829
70.1230	40.8040	33.7040	36.0120	27.8488	0.3790
70.1790	40.7750	33.7300	36.0120	27.5350	0.3844
70.1790	40.8040	33.7040	35.9850	27.5230	0.3842
70.0680	40.8330	33.7040	36.0120	27.8488	0.3779
70.1790	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3792
70.2900	40.8040	33.7300	36.0120	27.5350	0.3855
70.2350	40.7750	33.7040	36.0120	27.8488	0.3808
70.1790	40.8040	33.7040	36.0390	28.1745	0.3753
70.1230	40.7750	33.7040	36.0120	27.8488	0.3794
70.0680	40.8330	33.7040	36.0120	27.8488	0.3779
70.1230	40.8330	33.7040	35.9850	27.5230	0.3831
70.4020	40.8040	33.7300	36.0120	27.5350	0.3870
70.3460	40.8040	33.7300	36.0120	27.5350	0.3862
70.4020	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3821
70.2350	40.8330	33.7570	36.0120	27.2093	0.3890
70.1230	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3785
70.0120	40.8910	33.7300	36.0120	27.5350	0.3807
69.9020	40.8620	33.7300	36.0120	27.5350	0.3797
70.0680	40.8330	33.7300	36.0120	27.5350	0.3822
70.1790	40.8040	33.7570	36.0120	27.2093	0.3887
70.1790	40.8040	33.7300	36.0120	27.5350	0.3841
70.2900	40.8040	33.7300	36.0120	27.5350	0.3855
70.2900	40.8330	33.7570	36.0120	27.2093	0.3897

70.1790	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3792
70.1230	40.8330	33.7300	36.0120	27.5350	0.3829
70.0680	40.8330	33.7300	36.0120	27.5350	0.3822
69.9570	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3763
69.9020	40.8620	33.7300	36.0120	27.5350	0.3797
70.0680	40.8910	33.7570	36.0390	27.5350	0.3815
70.1790	40.8620	33.7300	36.0390	27.8608	0.3788
70.1230	40.8910	33.7300	36.0390	27.8608	0.3777
70.2350	40.8910	33.7570	36.0390	27.5350	0.3837
70.3460	40.8910	33.7300	36.0650	28.1745	0.3764
70.1790	40.8620	33.7570	36.0390	27.5350	0.3833
70.1230	40.8330	33.7570	36.0390	27.5350	0.3829
70.2350	40.8620	33.7300	36.0390	27.8608	0.3795
70.1790	40.8330	33.7570	36.0390	27.5350	0.3837
70.1790	40.8620	33.7570	36.0390	27.5350	0.3833
70.1790	40.8910	33.7830	36.0390	27.2213	0.3873
70.1230	40.8910	33.7830	36.0390	27.2213	0.3866
70.2350	40.8620	33.7830	36.0390	27.2213	0.3885
70.3460	40.8620	33.7830	36.0650	27.5350	0.3855
70.4020	40.8330	33.7570	36.0650	27.8488	0.3822
70.4020	40.8620	33.7300	36.0390	27.8608	0.3817
70.4020	40.8620	33.7040	36.0650	28.4883	0.3733
70.3460	40.8330	33.7300	36.0390	27.8608	0.3813
70.2900	40.8330	33.7570	36.0390	27.5350	0.3851
70.2900	40.9200	33.7570	36.0650	27.8488	0.3797
70.1230	40.8910	33.7570	36.0650	27.8488	0.3779
70.0120	40.8620	33.7830	36.0650	27.5350	0.3811
69.8470	40.8910	33.7830	36.0650	27.5350	0.3786
69.8470	40.8620	33.7830	36.0390	27.2213	0.3833
69.8470	40.8910	33.7570	36.0650	27.8488	0.3743
69.9020	40.8910	33.7830	36.0390	27.2213	0.3837
70.0120	40.8620	33.7300	36.0650	28.1745	0.3725
70.1634	40.8422	33.7386	36.0289	27.6356	0.3820

ตารางที่ ข.11 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม. ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 10 ซม.ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
72.8280	35.7970	33.6000	34.5450	11.4025	1.1691
72.7680	35.7970	33.6000	34.5190	11.0888	1.2003
72.9470	35.7970	33.6260	34.5720	11.4146	1.1717
73.1270	35.7970	33.6000	34.5450	11.4025	1.1786
73.0670	35.7970	33.6260	34.5450	11.0888	1.2100
72.8880	35.7970	33.6260	34.5450	11.0888	1.2042
72.9470	35.7970	33.6260	34.5450	11.0888	1.2061
72.8880	35.8230	33.6260	34.5720	11.4146	1.1690
73.0070	35.8230	33.6260	34.5450	11.0888	1.2072
73.0670	35.8230	33.6260	34.5720	11.4146	1.1746
72.8880	35.8230	33.6000	34.5720	11.7283	1.1377
72.8880	35.8230	33.6000	34.5450	11.4025	1.1702
72.8280	35.8230	33.6000	34.5720	11.7283	1.1359
72.7680	35.8230	33.6260	34.5450	11.0888	1.1994
72.9470	35.8230	33.6260	34.5720	11.4146	1.1708
72.9470	35.8230	33.6260	34.5720	11.4146	1.1708
73.0670	35.8230	33.6520	34.5720	11.1009	1.2078
73.3080	35.8230	33.6260	34.5720	11.4146	1.1822
73.4290	35.8230	33.6520	34.5980	11.4146	1.1860
73.5510	35.8230	33.6780	34.5980	11.1009	1.2235
73.5510	35.8230	33.6520	34.5980	11.4146	1.1899
73.4290	35.8230	33.6520	34.5980	11.4146	1.1860
73.4900	35.8500	33.6520	34.5720	11.1009	1.2207
73.3690	35.8500	33.6520	34.6240	11.7283	1.1516
73.3690	35.8770	33.6520	34.6240	11.7283	1.1508
73.3690	35.8770	33.6520	34.5980	11.4146	1.1824
73.2480	35.8770	33.6260	34.5720	11.4146	1.1786
73.3080	35.8500	33.6780	34.5980	11.1009	1.2148

73.3080	35.8500	33.6520	34.6240	11.7283	1.1498
73.3690	35.8500	33.6260	34.5980	11.7283	1.1516
73.2480	35.8770	33.6520	34.5980	11.4146	1.1786
73.3080	35.8500	33.6520	34.5980	11.4146	1.1814
73.3080	35.8770	33.6520	34.6240	11.7283	1.1489
73.3690	35.8770	33.6780	34.6240	11.4146	1.1824
73.2480	35.8770	33.6780	34.5980	11.1009	1.2119
73.3080	35.8770	33.6780	34.6240	11.4146	1.1805
73.3080	35.8770	33.6520	34.6240	11.7283	1.1489
73.4290	35.8770	33.6520	34.6240	11.7283	1.1527
73.4900	35.8770	33.6780	34.5980	11.1009	1.2198
73.3080	35.8770	33.6780	34.6510	11.7404	1.1478
73.3690	35.8770	33.6780	34.6510	11.7404	1.1496
73.4900	35.8770	33.6780	34.6240	11.4146	1.1863
73.6120	35.8770	33.6780	34.6240	11.4146	1.1901
73.6120	35.8770	33.7040	34.6240	11.1009	1.2237
73.4290	35.9040	33.6780	34.6510	11.7404	1.1506
73.4900	35.8770	33.6780	34.6510	11.7404	1.1533
73.3690	35.9040	33.6520	34.6510	12.0541	1.1189
73.0670	35.9040	33.6520	34.6510	12.0541	1.1099
73.0670	35.9040	33.6780	34.6510	11.7404	1.1395
72.9470	35.9040	33.6780	34.6510	11.7404	1.1359
73.0070	35.9040	33.6780	34.6510	11.7404	1.1377
73.0070	35.9040	33.6520	34.6510	12.0541	1.1081
73.1270	35.9040	33.6780	34.6510	11.7404	1.1414
72.9470	35.9040	33.7040	34.6240	11.1009	1.2013
72.8880	35.9040	33.7040	34.6510	11.4267	1.1652
72.7090	35.9310	33.7040	34.6510	11.4267	1.1587
72.8280	35.9310	33.6520	34.6770	12.3678	1.0740
72.8880	35.9310	33.6780	34.6510	11.7404	1.1332
73.0070	35.9040	33.6780	34.6240	11.4146	1.1702
72.1770	35.9310	33.6780	34.6510	11.7404	1.1114
73.1554	35.8600	33.6529	34.6051	11.4892	1.1694

ตารางที่ ข.12 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ

และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)

ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. base case

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ					
ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t)					
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. base case					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm. C° /Watts)
67.8590	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3844
67.7020	39.0360	33.0530	35.2880	26.9679	0.3827
67.7020	39.0650	33.0790	35.2880	26.6542	0.3868
67.6500	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3816
67.5980	39.0650	33.0790	35.2880	26.6542	0.3854
67.5980	39.0650	33.0790	35.2880	26.6542	0.3854
67.5980	39.0650	33.0790	35.3150	26.9800	0.3807
67.3910	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3781
67.2870	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3767
67.2360	39.0650	33.0790	35.2880	26.6542	0.3805
67.1840	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3754
67.0300	39.0650	33.0530	35.2880	26.9679	0.3733
67.0300	39.0650	33.0530	35.3150	27.2937	0.3689
66.9280	39.0650	33.0530	35.2620	26.6542	0.3763
66.9280	39.0360	33.0790	35.2880	26.6542	0.3767
66.9790	39.0360	33.0790	35.3150	26.9800	0.3728
66.9790	39.0650	33.0790	35.2880	26.6542	0.3770
66.8260	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3748
66.9280	39.0360	33.0790	35.3150	26.9800	0.3722
66.9790	39.0360	33.0790	35.2880	26.6542	0.3774
67.0300	39.0080	33.0530	35.2880	26.9679	0.3741
67.0820	39.0360	33.0790	35.2880	26.6542	0.3788
67.1840	39.0360	33.1050	35.2880	26.3405	0.3847
67.2360	39.0360	33.0790	35.2880	26.6542	0.3809
67.2360	39.0360	33.1050	35.2880	26.3405	0.3854
67.1330	39.0360	33.1050	35.2880	26.3405	0.3840
67.1330	39.0360	33.1050	35.3150	26.6663	0.3793
67.1840	39.0080	33.0790	35.2880	26.6542	0.3806

67.1840	39.0080	33.0790	35.2880	26.6542	0.3806
67.1840	39.0360	33.0790	35.2880	26.6542	0.3802
67.2870	39.0080	33.0790	35.2880	26.6542	0.3819
67.4940	39.0360	33.1050	35.3150	26.6663	0.3842
67.6500	39.0360	33.1050	35.2880	26.3405	0.3911
67.6500	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3859
67.7550	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3873
67.7020	39.0930	33.1050	35.2880	26.3405	0.3910
67.5460	39.0930	33.0790	35.3150	26.9800	0.3797
67.4940	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3838
67.4430	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3831
67.5460	39.0650	33.1050	35.3150	26.6663	0.3845
67.5980	39.0650	33.0790	35.3150	26.9800	0.3807
67.5460	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3799
67.4940	39.1210	33.1050	35.3150	26.6663	0.3830
67.5460	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3799
67.5460	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3799
67.5460	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3799
67.3910	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3778
67.5460	39.0650	33.0790	35.3420	27.3058	0.3755
67.5980	39.0650	33.0790	35.3420	27.3058	0.3762
67.3910	39.0930	33.1050	35.3420	26.9921	0.3774
67.2870	39.0650	33.1310	35.3420	26.6783	0.3808
67.2870	39.0650	33.0790	35.3420	27.3058	0.3721
67.3390	39.0650	33.0790	35.3150	26.9800	0.3773
67.2870	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3764
67.2870	39.0650	33.1310	35.3150	26.3526	0.3855
67.2870	39.0650	33.1050	35.3420	26.9921	0.3764
67.3910	39.0930	33.1310	35.3420	26.6783	0.3819
67.2870	39.0930	33.1050	35.3420	26.9921	0.3760
67.2870	39.0930	33.1050	35.3150	26.6663	0.3806
67.2870	39.0930	33.1310	35.3420	26.6783	0.3805
67.3466	39.0586	33.0885	35.3092	26.7946	0.3801

ตารางที่ ข.13 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. radiant barrier ติดด้านในได้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. radiant barrier ติดด้านในได้					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
72.1770	36.6060	32.7940	34.2810	17.9424	0.7137
72.1770	36.6060	32.7940	34.2810	17.9424	0.7137
72.1770	36.6060	32.7940	34.2810	17.9424	0.7137
72.1770	36.6060	32.7940	34.3080	18.2682	0.7010
72.1190	36.6060	32.7940	34.3080	18.2682	0.6998
72.0600	36.6330	32.7940	34.3080	18.2682	0.6981
72.0600	36.6330	32.8200	34.3080	17.9545	0.7103
72.0600	36.6330	32.7940	34.3080	18.2682	0.6981
72.2360	36.6330	32.7940	34.2810	17.9424	0.7143
72.3540	36.6060	32.7940	34.3080	18.2682	0.7045
72.4720	36.6060	32.7940	34.2810	17.9424	0.7196
72.5310	36.6330	32.8200	34.2810	17.6287	0.7331
72.5310	36.6330	32.8200	34.2810	17.6287	0.7331
72.5310	36.6610	32.8200	34.3080	17.9545	0.7192
72.5900	36.6330	32.8200	34.3080	17.9545	0.7210
72.7090	36.6330	32.8200	34.3340	18.2682	0.7109
72.8880	36.6330	32.8460	34.3080	17.6408	0.7399
73.0070	36.6330	32.8200	34.3080	17.9545	0.7293
73.1880	36.6610	32.7940	34.3340	18.5819	0.7077
73.2480	36.6610	32.8200	34.3080	17.9545	0.7336
73.2480	36.6610	32.7940	34.3340	18.5819	0.7088
73.1270	36.6610	32.8460	34.3340	17.9545	0.7312
73.0670	36.6610	32.8460	34.3340	17.9545	0.7300
72.9470	36.6610	32.8200	34.3600	18.5819	0.7030
72.8880	36.6610	32.8460	34.3600	18.2682	0.7139
72.8280	36.6610	32.8200	34.3340	18.2682	0.7127
72.7680	36.6610	32.8460	34.3340	17.9545	0.7240
72.8280	36.6610	32.8200	34.3080	17.9545	0.7252

72.8280	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7122
72.7090	36.6880	32.8460	34.3340	17.9545	0.7222
72.6490	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7087
72.5310	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7063
72.5310	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7063
72.5310	36.6610	32.8200	34.3600	18.5819	0.6949
72.5310	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7063
72.5900	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7075
72.5310	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7063
72.5900	36.6880	32.8460	34.3340	17.9545	0.7199
72.5900	36.7150	32.8460	34.3340	17.9545	0.7193
72.5900	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7075
72.6490	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7087
72.7090	36.7150	32.8460	34.3600	18.2682	0.7093
72.7090	36.6880	32.8200	34.3340	18.2682	0.7098
72.5900	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7075
72.4130	36.6880	32.8460	34.3340	17.9545	0.7163
72.2360	36.6880	32.8200	34.3600	18.5819	0.6887
72.1770	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7116
72.1770	36.6880	32.8200	34.3600	18.5819	0.6876
72.2950	36.6880	32.8460	34.3870	18.5940	0.6894
72.4130	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7040
72.3540	36.6610	32.8460	34.3600	18.2682	0.7034
72.4720	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7052
72.5900	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7199
72.7090	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7222
72.8280	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7246
72.8880	36.6880	32.8460	34.3600	18.2682	0.7134
72.8880	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7258
72.8880	36.6880	32.8980	34.3600	17.6408	0.7387
72.9470	36.6880	32.8720	34.3870	18.2803	0.7141
72.8280	36.6880	32.8720	34.3600	17.9545	0.7246
72.5992	36.6643	32.8304	34.3335	18.1365	0.7134

ตารางที่ ข.14 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. radiant barrier ติดลดระดับ 5 ซม.					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm. C° /Watts)
72.0020	34.7300	32.3040	33.3390	12.4885	1.0744
72.1770	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1073
72.2950	34.7300	32.3040	33.3130	12.1748	1.1108
72.3540	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1125
72.2950	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1108
72.2950	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1108
72.3540	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1125
72.4720	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1160
72.5900	34.7300	32.3300	33.3390	12.1748	1.1195
72.5900	34.7570	32.3300	33.3390	12.1748	1.1187
72.6490	34.7300	32.3550	33.3390	11.8731	1.1497
72.6490	34.7300	32.3550	33.3650	12.1868	1.1201
72.5310	34.7570	32.3300	33.3390	12.1748	1.1170
72.4720	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1141
72.4130	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1124
72.4130	34.7830	32.3550	33.3650	12.1868	1.1116
72.4130	34.7830	32.3550	33.3650	12.1868	1.1116
72.5310	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1158
72.6490	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1193
72.6490	34.7830	32.3550	33.3650	12.1868	1.1186
72.5310	34.7830	32.3550	33.3650	12.1868	1.1151
72.4130	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1124
72.4130	34.7570	32.3810	33.3650	11.8731	1.1418
72.4130	34.7830	32.3810	33.3650	11.8731	1.1410
72.4720	34.7830	32.3810	33.3650	11.8731	1.1428
72.5900	34.7570	32.3550	33.3650	12.1868	1.1176
72.7090	34.7570	32.3550	33.3910	12.5006	1.0930
72.7680	34.7830	32.3550	33.3910	12.5006	1.0939

72.7680	34.7830	32.3300	33.3650	12.4885	1.0950
72.8280	34.7830	32.3550	33.3910	12.5006	1.0956
72.7680	34.7830	32.3550	33.3650	12.1868	1.1221
72.7680	34.7830	32.3550	33.3910	12.5006	1.0939
72.7680	34.7830	32.3550	33.3910	12.5006	1.0939
72.7680	34.7830	32.3810	33.3910	12.1868	1.1221
72.7090	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1195
72.6490	34.8100	32.3810	33.4170	12.5006	1.0897
72.5900	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1160
72.6490	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1178
72.7680	34.8100	32.3550	33.3910	12.5006	1.0931
72.7090	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1195
72.5900	34.8100	32.4070	33.3910	11.8731	1.1455
72.5900	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1160
72.5310	34.8100	32.3810	33.4170	12.5006	1.0863
72.4720	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1125
72.4720	34.8100	32.3550	33.3910	12.5006	1.0846
72.4720	34.8100	32.4070	33.3910	11.8731	1.1419
72.6490	34.8100	32.3810	33.4170	12.5006	1.0897
72.7680	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1213
72.8880	34.8100	32.3810	33.3910	12.1868	1.1248
72.9470	34.8100	32.4070	33.3910	11.8731	1.1563
73.0070	34.8100	32.3550	33.3910	12.5006	1.1000
73.0670	34.8100	32.4070	33.4170	12.1868	1.1301
73.0670	34.8360	32.4070	33.4170	12.1868	1.1293
73.1270	34.8360	32.3810	33.4170	12.5006	1.1027
73.0670	34.8360	32.4070	33.4170	12.1868	1.1293
73.1270	34.8630	32.4070	33.4170	12.1868	1.1303
73.0670	34.8360	32.3810	33.4170	12.5006	1.1010
73.0070	34.8360	32.3810	33.4170	12.5006	1.0993
72.9470	34.8360	32.4070	33.4170	12.1868	1.1258
72.6490	34.8630	32.3810	33.4170	12.5006	1.0882
72.6393	34.7850	32.3643	33.3784	12.2367	1.1139

ตารางที่ ข.15 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
 และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
 ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. สี่ป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทางด้านใต้

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ทาสีป้องกันความร้อนอนุภาคซิลิกาทางด้านใต้					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm.C°/Watts)
61.3600	43.5250	32.7170	36.5250	45.9480	0.1397
61.3150	43.5250	32.6910	36.4980	45.9360	0.1394
61.3150	43.5250	32.7170	36.5250	45.9480	0.1394
61.3150	43.5560	32.6910	36.4980	45.9360	0.1392
61.2710	43.5560	32.7170	36.4980	45.6223	0.1398
61.3150	43.5560	32.7170	36.4710	45.2965	0.1411
61.3150	43.5560	32.7170	36.4980	45.6223	0.1401
61.3600	43.5250	32.7170	36.5250	45.9480	0.1397
61.3600	43.5560	32.7170	36.4980	45.6223	0.1405
61.4040	43.5250	32.6910	36.4980	45.9360	0.1401
61.4040	43.5250	32.6910	36.5520	46.5875	0.1382
61.3600	43.5250	32.7420	36.5250	45.6464	0.1407
61.3600	43.4650	32.7420	36.5250	45.6464	0.1411
61.4490	43.4650	32.7420	36.5250	45.6464	0.1418
61.4040	43.4950	32.6910	36.5520	46.5875	0.1384
61.4490	43.4650	32.7170	36.5250	45.9480	0.1409
61.4930	43.4950	32.7420	36.5250	45.6464	0.1419
61.5830	43.4950	32.7420	36.5520	45.9722	0.1416
61.6270	43.4950	32.7420	36.5520	45.9722	0.1420
61.6270	43.5560	32.7420	36.5250	45.6464	0.1425
61.6270	43.5250	32.7420	36.5520	45.9722	0.1418
61.6720	43.5560	32.7680	36.5520	45.6585	0.1428
61.6720	43.5250	32.7420	36.5250	45.6464	0.1431
61.6270	43.5250	32.7420	36.5250	45.6464	0.1428
61.6720	43.5860	32.7420	36.5520	45.9722	0.1416
61.6270	43.6160	32.7420	36.5790	46.2980	0.1400
61.6270	43.6160	32.7420	36.5520	45.9722	0.1410
61.6270	43.6160	32.7170	36.5790	46.5996	0.1391

61.5830	43.6160	32.7420	36.5520	45.9722	0.1407
61.5380	43.6470	32.7420	36.5520	45.9722	0.1401
61.5380	43.6160	32.7680	36.5520	45.6585	0.1413
61.4490	43.6160	32.7680	36.5520	45.6585	0.1406
61.0940	43.6160	32.8980	36.5790	44.4156	0.1417
60.1340	43.5860	32.9490	36.6330	44.4518	0.1340
60.1770	43.6160	32.8460	36.6060	45.3689	0.1314
60.5240	43.6160	32.7940	36.5520	45.3447	0.1342
60.7420	43.6160	32.7940	36.5520	45.3447	0.1360
60.8740	43.5560	32.7940	36.4980	44.6932	0.1395
60.9620	43.4950	32.7680	36.4980	45.0069	0.1397
61.0940	43.5250	32.7940	36.5250	45.0189	0.1405
61.1820	43.4950	32.7420	36.4980	45.3206	0.1405
61.2270	43.4650	32.7420	36.4980	45.3206	0.1411
61.1820	43.4950	32.7680	36.4980	45.0069	0.1415
61.1380	43.4650	32.7680	36.4980	45.0069	0.1414
61.0940	43.4950	32.7940	36.5250	45.0189	0.1407
61.0500	43.5250	32.7420	36.4440	44.6690	0.1412
60.9620	43.4650	32.7680	36.4710	44.6811	0.1410
60.9620	43.4040	32.7680	36.4440	44.3553	0.1425
61.0060	43.4040	32.7680	36.4710	44.6811	0.1418
61.0060	43.4040	32.7680	36.4980	45.0069	0.1408
61.0500	43.3740	32.7420	36.4710	44.9948	0.1414
61.1380	43.3740	32.7680	36.4440	44.3553	0.1442
61.2270	43.3740	32.7420	36.4710	44.9948	0.1428
61.2270	43.3740	32.7680	36.4980	45.0069	0.1428
61.1820	43.4350	32.7680	36.4710	44.6811	0.1430
61.1820	43.4350	32.7680	36.4710	44.6811	0.1430
61.1820	43.4350	32.7940	36.4710	44.3674	0.1440
61.0940	43.4350	32.7940	36.4710	44.3674	0.1433
61.0500	43.4040	32.7940	36.4980	44.6932	0.1421
60.8740	43.4040	32.7680	36.4710	44.6811	0.1408
61.2494	43.5122	32.7552	36.5174	45.3946	0.1407

ตารางที่ ข.16 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ
และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)
ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. สื่อนุภาคซิลิกาทำฝ้าฝ้าเพดาน

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม.ทำสื่อนุภาคซิลิกาฝ้าฝ้าเพดาน					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm. C° /Watts)
68.0690	38.8960	32.4580	34.8100	28.3797	0.3701
68.0160	38.8680	32.4580	34.8630	29.0192	0.3616
68.0690	38.8960	32.4330	34.8630	29.3208	0.3582
68.0160	38.9240	32.4330	34.8360	28.9950	0.3612
68.1220	38.9240	32.4580	34.8100	28.3797	0.3704
68.2270	38.9240	32.4580	34.8360	28.6934	0.3676
68.2800	38.8680	32.4330	34.8630	29.3208	0.3611
68.3330	38.8960	32.4330	34.8630	29.3208	0.3614
68.3330	38.8960	32.4580	34.8360	28.6934	0.3693
68.2800	38.8960	32.4840	34.8360	28.3797	0.3727
68.2270	38.8960	32.4330	34.8630	29.3208	0.3601
68.2800	38.8960	32.4840	34.8360	28.3797	0.3727
68.2800	38.8960	32.4330	34.8360	28.9950	0.3648
68.3330	38.8960	32.4580	34.8890	29.3329	0.3613
68.2800	38.8680	32.4330	34.8630	29.3208	0.3611
68.1750	38.8400	32.4330	34.8890	29.6346	0.3564
68.2270	38.8680	32.4070	34.8360	29.3088	0.3606
68.1750	38.8960	32.4580	34.8890	29.3329	0.3593
68.0160	38.8680	32.4580	34.8890	29.3329	0.3577
67.9120	38.8960	32.4580	34.8630	29.0192	0.3600
67.7550	38.8960	32.4580	34.8360	28.6934	0.3621
67.7550	38.8960	32.4580	34.8890	29.3329	0.3542
67.7550	38.8960	32.4580	34.8630	29.0192	0.3580
67.8070	38.8960	32.4580	34.8630	29.0192	0.3587
67.9120	38.8960	32.4580	34.8630	29.0192	0.3600
68.0690	38.8960	32.4580	34.8890	29.3329	0.3580
68.1750	38.9240	32.4840	34.8630	28.7055	0.3668
68.2270	38.9240	32.4580	34.8630	29.0192	0.3635

68.2270	38.8960	32.4580	34.8630	29.0192	0.3639
68.0160	38.9240	32.4840	34.8630	28.7055	0.3648
67.9120	38.9240	32.4330	34.8360	28.9950	0.3599
67.9640	38.9240	32.4580	34.8890	29.3329	0.3564
68.0690	38.9240	32.5100	34.8890	28.7055	0.3655
68.2270	38.9240	32.4840	34.8890	29.0192	0.3635
68.3330	38.8960	32.5100	34.8890	28.7055	0.3692
68.3330	38.8960	32.4840	34.8630	28.7055	0.3692
68.2270	38.8960	32.4580	34.8890	29.3329	0.3600
68.1750	38.9240	32.4580	34.8890	29.3329	0.3590
68.0690	38.9520	32.4840	34.8890	29.0192	0.3612
68.0690	38.9520	32.4840	34.8890	29.0192	0.3612
68.2270	38.9520	32.4580	34.8630	29.0192	0.3632
68.3860	38.9520	32.4580	34.8630	29.0192	0.3651
68.4930	38.9520	32.4840	34.8890	29.0192	0.3665
68.4930	38.9520	32.4840	34.8890	29.0192	0.3665
68.4930	38.9520	32.5100	34.8630	28.3917	0.3746
68.5460	38.9240	32.5100	34.8890	28.7055	0.3715
68.4930	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3661
68.4390	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3655
68.4390	38.9800	32.4580	34.8890	29.3329	0.3615
68.3860	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3648
68.3330	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3641
68.3330	38.9520	32.4580	34.8890	29.3329	0.3606
68.3860	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3648
68.4390	38.9800	32.4840	34.8890	29.0192	0.3655
68.3860	39.0080	32.4840	34.9160	29.3450	0.3604
68.2800	38.9800	32.4840	34.9160	29.3450	0.3594
68.1750	38.9800	32.4840	34.9160	29.3450	0.3582
68.0690	39.0080	32.4580	34.8890	29.3329	0.3567
68.0690	38.9800	32.4580	34.9160	29.6587	0.3531
68.2270	38.9800	32.5100	34.9160	29.0312	0.3627
68.1970	38.9249	32.4660	34.8729	29.0421	0.3629

ตารางที่ ข.17 อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ

และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ย(R_t)

ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว

อุณหภูมิที่วัดได้จากกล่องทดลองช่วง 60 นาทีสุดท้ายก่อนปิดไฟ และ ค่าความต้านทานความร้อนรวมเฉลี่ยของหลังคา(R_t) ของหลังคามีฝ้าเพดานช่องว่างอากาศสูง 20 ซม. ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว					
outer surface(C°)	inner surface(C°)	inlet air(C°)	outlet air(C°)	Q(Watts)	R_t (sqm. C° /Watts)
71.5950	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1683
71.7110	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1721
71.7110	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.2066
71.7110	35.6360	33.5740	34.5190	11.4025	1.1390
71.6530	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1702
71.7110	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1721
71.6530	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.2056
71.5380	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1664
71.5380	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.2008
71.5380	35.6090	33.5740	34.5190	11.4025	1.1343
71.4800	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.1989
71.4230	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1627
71.4800	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.1989
71.4800	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1646
71.4800	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1646
71.5380	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1664
71.7110	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1721
71.7690	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1739
71.6530	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.2056
71.6530	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1702
71.5380	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1664
71.5380	35.6090	33.5740	34.5190	11.4025	1.1343
71.5380	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1664
71.4800	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1637
71.4800	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1646
71.4800	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.1998
71.4800	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1646
71.4230	35.6090	33.6260	34.5190	10.7751	1.1966

71.2510	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1562
71.3080	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1590
71.3650	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.1951
71.4800	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1637
71.4800	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1637
71.5380	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.2008
71.4800	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1637
71.5380	35.6360	33.5740	34.4920	11.0768	1.1668
71.5380	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.2008
71.4800	35.6360	33.6000	34.4920	10.7630	1.1989
71.4800	35.6360	33.6260	34.4920	10.4493	1.2349
71.4230	35.6360	33.5740	34.5190	11.4025	1.1299
71.3650	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1599
71.3080	35.6360	33.5740	34.5190	11.4025	1.1262
71.1360	35.6360	33.5740	34.5190	11.4025	1.1208
71.0790	35.6360	33.6260	34.4920	10.4493	1.2211
71.0220	35.6360	33.6260	34.4920	10.4493	1.2191
71.0790	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1507
71.1930	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1544
71.1360	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.1883
71.1930	35.6360	33.6000	34.5190	11.0888	1.1544
71.1930	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.1902
71.2510	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1571
71.3080	35.6090	33.6260	34.4920	10.4493	1.2299
71.3650	35.6090	33.6260	34.5190	10.7751	1.1946
71.5380	35.6090	33.6260	34.5190	10.7751	1.2004
71.5950	35.6090	33.6260	34.5450	11.0888	1.1683
71.6530	35.6090	33.6260	34.4920	10.4493	1.2418
71.5950	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1683
71.4230	35.6090	33.6000	34.4920	10.7630	1.1979
71.2510	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1571
71.1930	35.6090	33.6000	34.5190	11.0888	1.1552
71.4537	35.6203	33.6009	34.5104	10.9750	1.1760

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิษฐา อธิคมบัณฑิตกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสถาปัตยกรรมศาสตรบัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม ในภาคต้น การศึกษา 2555