

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีป้องกันความร้อนผสมอนุภาคซิลิกา
กับวิธีการป้องกันความร้อนอื่นๆ



นายกวิน วิฑูรพงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

PERFORMANCE COMPARISON AMONG HIGH REFLECTANCE SILICA PANTING AND
OTHER HEAT PREVENTION TECHNIQUE

Mr. Kawin Vitoonpong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีป้องกันความร้อนผสม
อนุภาคซิลิกากับวิธีการป้องกันความร้อนอื่นๆ

โดย

นายกวิน วิฑูรพงศ์

สาขาวิชา

สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงศ์กิติ วัฒนศิริลป)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนนัชชิตติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถนัย เศรษฐบุตุตร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ณรงค์วิทย์ อารีมิตร)

ภวิน วิฑูรพงษ์ : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีป้องกันความร้อนผสมอนุภาคซิลิกากับวิธีการป้องกันความร้อนอื่นๆ. (PERFORMANCE COMPARISON AMONG HIGH REFLECTANCE SILICA PAINTING AND OTHER HEAT PREVENTION TECHNIQUE) อ. ที่มหาวิทยาลัยพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อรรถนธ์ เศรษฐบุตร, 77 หน้า.

การศึกษาชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของผลิตภัณฑ์สีผสมอนุภาคซิลิกา(Silicate paint) เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานวัสดุกันความร้อน และสร้างแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุที่เหมาะสมต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร

การศึกษานี้แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนการทดลองคุณสมบัติของวัสดุ การจำลองการใช้พลังงานด้วยคอมพิวเตอร์ และ การศึกษาความคุ้มค่าในด้านการเงิน วัสดุที่ถูกศึกษาได้รับการทดสอบเพื่อหาค่าการสะท้อนความร้อนด้วยวิธี ASTM. E1918A และค่าการต้านทานความร้อนจากการวัดด้วยดาต้าล็อกเกอร์ ในการจำลองกรณีศึกษามีตัวแปรของอาคารที่คำนึงถึงคือ ทิศทางอาคาร อัตราส่วนช่องเปิด (WWR) ความชันของหลังคา พื้นที่อาคาร และชนิดการใช้งานอาคาร โดยทุกกรณีศึกษาเป็นอาคารปรับอากาศ ส่วนการการศึกษาความคุ้มค่าจะใช้ค่า ระยะคืนทุน(Payback period) มูลค่าปัจจุบัน(NPV) และ อัตราผลตอบแทนภายใน(IRR)

ผลการทดลองพบว่า วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดคือ สีผสมอนุภาคซิลิกา และรองลงมาคือ สีผสมอนุภาคเซรามิก และฉนวนใยแก้วตามลำดับ จากการจำลอง วัสดุฉนวนจะมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดในทิศทางมุม อะซิมุท 135° ในขณะที่กลุ่มวัสดุสะท้อนความร้อน จะประหยัดที่สุดที่มุมอะซิมุท 180° โดยเฉลี่ยอาคารสำนักงานสามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุด กรณีที่ประหยัดที่สุดคือกรณีที่มีช่องเปิดร้อยละ 0 และความสามารถประหยัดพลังงานมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนหน้าต่างอาคาร(WWR) ความชันของหลังคามีผลกระทบต่อ การประหยัดพลังงานพลังงานน้อยมากแต่เพิ่มปริมาณวัสดุเมื่อความชันสูงขึ้น การเพิ่มความชันหลังคาจึงเป็นการลดความคุ้มค่า ในการจำลองกรณีศึกษาของอาคารสำนักงาน การซัพพลังงานเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน ในขณะที่รั้วค่าการใช้ งานอาคารสำนักงานมีช่วงเวลาที่ใช้พลังงานในตอนกลางวันเป็นส่วนมาก ในขณะที่อาคารพาณิชย์มีการใช้งานในช่วงหัวค่ำด้วย ซึ่งการป้องกันความร้อนทางหลังคาไม่มีผลต่อการประหยัดพลังงาน ดังนั้นอาคารที่ใช้งานในเวลากลางวันจึงเหมาะกับการใช้วัสดุป้องกันความร้อนทางหลังคา มากกว่า อาคารที่ได้รับประโยชน์จากการใช้วัสดุป้องกันความร้อนจากหลังคา คืออาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน มีหลังคาความชันต่ำ มีช่องเปิดน้อย และมีการปรับอากาศ อาคารดังกล่าว คืออาคารศูนย์กระจายสินค้า และอาคารศูนย์การค้าแบบไฮเปอร์มาร์เก็ต เป็นต้น

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยาลัยพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5374192725 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: SILICATE PAINT / THERMAL REFLECTANCE / FEASIBILITY STUDY

KAWIN VITONPONG: PERFORMANCE COMPARISON AMONG HIGH REFLECTANCE SILICA PANTING AND OTHER HEAT PREVENTION TECHNIQUE. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 77 pp.

This study aims to compare the energy saving performance and feasibility of silicate coating roof paint with other products, and create a guideline for selecting the appropriate product for thermal protection in buildings.

This study is composed of three parts : materials testing, computer simulation and economic value calculation. The studied materials were tested for thermal reflectance by the ASTM. E1918A procedure and thermal resistance by data logger. In the simulation part, the relevant factors of the building are slope of the roof, window-to-wall ratio (WWR), building area and types. All cases are air conditioned. The feasibility study used Payback Period, Net Present Value and Internal Rate of Ratio.

The results showed that the energy saving performance of the silicate paint is the best among the three materials, followed by ceramic paint and fiberglass insulation. From the simulation, fiberglass insulation can perform best when that building faces south east (azimuth 135°), while both silicate and ceramic paint performs best when the building faces south (180°). On average, all material can perform best in office building cases, and the performance increasing proportionally to the WWR. slope of the roof has very small impact to the energy saving. In the feasibility evaluation, both reflective paints were less feasible than insulation in all cases. The best case scenario is when the building has 0% window-to-wall ratio, the feasibility worsens when the WWR increases. Since the slope of the roof has small impact on saving performance but increases the amount of material when it gets higher, the increasing of the slope of roofs decreases feasibility.

In the office simulation cases, the energy consumption takes place mostly during daytime, while in the retail case, it also takes place in the evening, when roof thermal protection became ineffective. Hence, the office building is more appropriate for use in roof thermal protection. In the best case scenario for the building to be able to benefit most from using roof thermal protection is that air-conditioned in daytime usage with a low angle roof, low WWR and aired conditioned, such as a goods distribution superstore or hypermarket.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างสูงจาก ผศ. ดร. อรรถจน์ เศรษฐบุตร์ ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำอย่าไกล้ชิดโดยตลอดตั้งแต่เข้ามาศึกษาในคณะสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนรัชฎิติ ในฐานะประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.วรภัทร์อิงค์โรจน์ฤทธิ์และ รศ. พรรณชลัท สุริโยธิน ในฐานะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอน ดร. ณรงค์วิทย์อารีมิตร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่สละเวลาในการให้คำแนะนำและร่วมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาคสถาปัตยกรรมศาสตร์ทุกท่าน ในการให้คำแนะนำการติดต่อประสานงาน สำหรับการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

ขอบคุณเพื่อนทุกคน รุ่นพี่และรุ่นน้องที่ได้ร่วมเรียน ร่วมทำงาน ช่วยเหลือกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับผู้สนับสนุนการเรียนการสอนและความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการใช้พลังงาน และการประหยัดพลังงานในอาคาร	7
2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น	12
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 กำหนดการดำเนินการวิจัย	17
3.2 เครื่องมือในการวิจัย.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	30
4.1 ผลการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุ	30
4.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	35
4.3 การคำนวณความคุ้มค่าทางการเงินของวัสดุที่ใช้ในการป้องกันความร้อน.....	47
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	73
5.1 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน.....	73
5.2 ความคุ้มค่าในการลงทุน	73
5.3 แนวทางในการเลือกใช้วัสดุ.....	74
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	75

รายการอ้างอิง 76

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 77



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการแผ่รังสีของตัวอย่างวัสดุต่างๆ (ASHRAE Handbook, 2009).....	11
ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรควบคุมในการทดลอง.....	22
ตารางที่ 3.2 แสดงกรณีศึกษาในการจำลอง.....	23
ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของอาคารสำนักงานที่ใช้ในการทดลอง	23
ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของอาคารร้านค้าที่ใช้ในการทดลอง.....	25
ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ย และ ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดลอง.....	31
ตารางที่ 4.2 แสดงความต่างของอุณหภูมิจากพื้นผิวภายนอกและภายใน.....	33
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการสะท้อนของสีผสมอนุภาคเซรามิก	34
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการสะท้อนของสีผสมอนุภาคซิลิกา	35
ตารางที่ 4.5 แสดงกรณีศึกษาในการจำลอง.....	35
ตารางที่ 4.6 แสดงตัวแปรควบคุมในการทดลอง.....	36
ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดของอาคารสำนักงานที่ใช้ในการทดลอง	36
ตารางที่ 4.8 แสดงรายละเอียดของอาคารร้านค้าที่ใช้ในการทดลอง.....	37
ตารางที่ 4.9 แสดงต้นทุนของการติดตั้งวัสดุ.....	47
ตารางที่ 4.10 แสดงพื้นที่ของการติดตั้งวัสดุในกรณีหลังคามุมเงยต่างๆ.....	48
ตารางที่ 4.11 แสดงรายละเอียดตัวแปรควบคุมของอาคารที่ใช้ในการจำลอง	65
ตารางที่ 4.12 แสดงรายละเอียดอาคารที่ใช้ในการจำลอง.....	65
ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราส่วนพลังงานที่ประหยัดได้.....	67
ตารางที่ 5.1 สรุปผลประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการจำลอง	73
ตารางที่ 5.2 สรุปผลความคุ้มค่า.....	74

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 4.1 แสดงแผนภูมิอนุกรมที่ได้จากการทดลองวัสดุฉนวนใยแก้ว.....	31
แผนภูมิที่ 4.2 แสดงแผนภูมิอนุกรมพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาเปิดไฟ.....	32
แผนภูมิที่ 4.3 แสดงอนุกรมพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาปิดไฟ (นาทิตั้ง 531-590).....	32
แผนภูมิที่ 4.4 แสดงอนุกรมพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาปิดไฟนาทิตั้ง 540-560.....	33
แผนภูมิที่ 4.5 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ย.....	39
แผนภูมิที่ 4.6 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลอง.....	40
แผนภูมิที่ 4.7 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลองสัดส่วนช่องเปิด.....	41
แผนภูมิที่ 4.8 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลองสัดส่วนช่องเปิด.....	42
แผนภูมิที่ 4.9 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลอง ต่อมุมเงยหลังคา.....	43
แผนภูมิที่ 4.10 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อทิศทางอาคาร.....	44
แผนภูมิที่ 4.11 แสดงพลังงานที่ประหยัดต่ออัตราส่วนช่องเปิดอาคาร.....	45
แผนภูมิที่ 4.12 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อมุมเงยของหลังคา.....	46
แผนภูมิที่ 4.13 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อพื้นที่ของอาคาร.....	47
แผนภูมิที่ 4.14 แสดงมูลค่าปัจจุบัน (NPV) ต่อทิศทางของอาคาร (ฉนวนใยแก้ว และ สีเซรามิก).....	49
แผนภูมิที่ 4.15 แสดงมูลค่าปัจจุบัน (NPV) ต่อทิศทางของอาคาร (สีซิลิกา).....	50
แผนภูมิที่ 4.16 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ต่อสัดส่วนช่องเปิดต่อผนัง (WWR).....	51
แผนภูมิที่ 4.17 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ต่อสัดส่วนช่องเปิดต่อผนัง (WWR).....	52
แผนภูมิที่ 4.18 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อความชันหลังคา.....	53
แผนภูมิที่ 4.19 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อความชันหลังคา.....	54
แผนภูมิที่ 4.20 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อพื้นที่อาคาร.....	55
แผนภูมิที่ 4.21 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อพื้นที่อาคาร.....	56
แผนภูมิที่ 4.22 แสดงระยะเวลาคืนทุนต่อทิศทางของอาคาร.....	57
แผนภูมิที่ 4.23 แสดงระยะเวลาคืนทุนต่อทิศทางของอาคาร.....	58
แผนภูมิที่ 4.24 แผนภูมิแสดงระยะเวลาคืนทุนต่อความชันหลังคา.....	59
แผนภูมิที่ 4.25 แผนภูมิแสดงระยะเวลาคืนทุนต่อความชันหลังคา.....	60
แผนภูมิที่ 4.26 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่อทิศทางอาคาร.....	61
แผนภูมิที่ 4.27 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่ออัตราส่วนช่องเปิดต่อผนัง.....	62
แผนภูมิที่ 4.28 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่อความชันหลังคา.....	63
แผนภูมิที่ 4.29 แสดงอัตราผลตอบแทนคืนทุนต่อพื้นที่อาคาร.....	64

แผนภูมิที่ 4.30 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้ในกรณีไม่มี ฝ้าเพดาน.....	66
แผนภูมิที่ 4.31 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้เปรียบเทียบ	67
แผนภูมิที่ 4.32 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้.....	68
แผนภูมิที่ 4.33 แผนภูมิแสดงปริมาณร้อยละของพลังงานที่ใช้และประหยัดได้	69
แผนภูมิที่ 4.34 แสดงระยะเวลาคืนทุน.....	70
แผนภูมิที่ 4.35 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ	71
แผนภูมิที่ 4.36 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR).....	72



สารบัญภาพ

หน้า

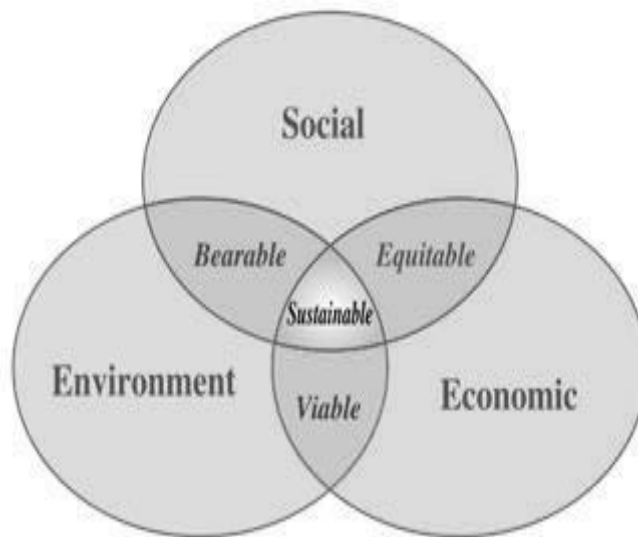
ภาพที่ 1.1	แผนภาพแสดงปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอาคารยั่งยืน.....	1
ภาพที่ 1.2	แสดงการวัดค่า Irradiance (H. Akbari, 2008).....	5
ภาพที่ 1.3	กราฟแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบ	5
ภาพที่ 2.1	แสดงช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์	9
ภาพที่ 2.2	แสดงแผนภาพอุณหภูมิพื้นผิวที่เคลือบสีธรรมชาติ	15
ภาพที่ 2.3	แสดงแผนภาพอุณหภูมิพื้นผิวที่เคลือบสีผสมอนุภาคโลหะออกไซด์	15
ภาพที่ 3.1	แสดงแผนภาพกล่องทดลอง	18
ภาพที่ 3.2	แสดงกล่องทดลอง	19
ภาพที่ 3.3	แสดงการวัดค่า Irradiance	21
ภาพที่ 3.4	แสดงหน้าต่างกรอกข้อมูลของโปรแกรมในการจำลอง	22
ภาพที่ 3.5	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารสำนักงาน.....	24
ภาพที่ 3.6	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารสำนักงาน	24
ภาพที่ 3.7	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารสำนักงาน	24
ภาพที่ 3.8	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารร้านค้า	25
ภาพที่ 3.9	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารร้านค้า.....	25
ภาพที่ 3.10	แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารร้านค้า	26
ภาพที่ 3.11	แสดงมุมเงยของหลังคาที่ใช้ในการจำลอง 15°, 10°, 5° และ 0° ตามลำดับ	26
ภาพที่ 3.12	การกำหนดทิศทางการวางตัวของอาคาร	26
ภาพที่ 3.13	แสดงลักษณะเครื่อง HOBO data logger.....	28
ภาพที่ 3.14	แสดงลักษณะเครื่อง Pyranometer.....	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เพราะตามความต้องการพลังงาน และ จำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น บวกกับภัยธรรมชาติที่รุนแรงขึ้นอีกทั้งพลังงานที่เป็นรูปแบบหลักในระบบอุตสาหกรรมของประเทศ ซึ่งก็คือ พลังงานจากปิโตรเลียม ก็เป็นพลังงานที่ร่อยหรอลงทุกวัน ปัจจุบัน สังคมจึงให้ความสำคัญกับการรักษาสิ่งแวดล้อม และการประหยัดพลังงานมากยิ่งขึ้นเรื่อยๆ



ภาพที่ 1.1 แผนภาพแสดงปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบอาคารยั่งยืน

ในวงการการออกแบบสถาปัตยกรรม สถาปนิกทุกแขนงต่างก็สรรหาวิธีที่ทำให้อาคารมีความยั่งยืน แต่ด้วยเทคโนโลยีที่มีความซับซ้อนและหลากหลายมากขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลานี้ ทำให้สิ่งที่ต้องคำนึงถึง ในการออกแบบอาคารมีความซับซ้อนขึ้นไปตามกัน วัสดุ และ อุปกรณ์รวมไปถึงระบบควบคุม และ จัดการที่ทันสมัยต่างก็ถูกสร้างสรรค์ขึ้นเพื่อสนองความต้องการที่ซับซ้อนขึ้น ทำให้การตัดสินใจเลือกใช้วัสดุในการออกแบบยุ่งยากขึ้นไปด้วย

ในกรณีของภูมิอากาศร้อนชื้นเช่นประเทศไทย การปรับอากาศด้วยเครื่องกลเป็นทางเลือกที่จำเป็น หากต้องการสร้างสภาวะน่าสบาย วิธีการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารแบบต่างๆ จึงถูกนำมาใช้ เพื่อลดค่าใช้จ่าย และ ปริมาณการใช้พลังงานที่เกิดจากการปรับอากาศ

ในองค์ประกอบทั้งหมดของอาคาร หลังคาเป็นสิ่งที่รับความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด เนื่องจากอยู่บนจุดสูงสุดของอาคาร¹ วิธีการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคา จึงถูกให้ความสำคัญ จะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดที่มีให้เลือกใช้ในท้องตลาด ไม่ว่าจะเป็น ฉนวนวัสดุผนังชนิดใหม่ๆ หรือสีทาผสมสารกันความร้อน การใช้สีป้องกันความร้อนทดแทนฉนวนโดยเทียบค่าสะท้อนความร้อนกับค่าป้องกันความร้อนจะไม่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานในกรณีที่อุณหภูมิอากาศภายนอกเย็นกว่าอุณหภูมิการปรับอากาศแต่สำหรับในภูมิอากาศเขตร้อน อุณหภูมิภายนอกสูงกว่าอุณหภูมิปรับอากาศตลอดทั้งปี ทำให้ การใช้สีป้องกันความร้อนแทนฉนวนมีความเหมาะสม

อย่างไรก็ตาม วิธีการป้องกันความร้อน บางวิธีการมีประสิทธิภาพสูง แต่ราคาแพง บางเทคนิค มีต้นทุนต่ำแต่ก็ทำให้ประสิทธิภาพไม่สูงเท่าที่ควร และวัสดุบางชนิดยังไม่มีมีการพิสูจน์เปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ ทั้งในด้านประสิทธิภาพและราคา จึงเกิดคำถามที่ว่า ควรจะเลือกใช้อย่างไรเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน และ ความคุ้มค่าทางการเงินที่เหมาะสมที่สุด

แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณประสิทธิภาพอาคาร แต่บุคลากรในการออกแบบ ที่มีความสามารถในการสร้างแบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในประเทศยังมีจำนวนน้อย หากจะทำการจำลองให้ครอบคลุมทุกกรณี ก็จะต้องสิ้นเปลืองเวลา และ ค่าใช้จ่าย การที่ได้มา ซึ่งแนวทางในการเลือกใช้วัสดุ ก็จะเป็นการลดความยุ่งยากลงบ้าง และ ยังช่วยลดจำนวนกรณีในการทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย

การศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการเจาะจงศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุป้องกันความร้อน 2 ประเภทหลัก ซึ่งก็คือ ฉนวน และ สีป้องกันความร้อน โดยจะทำการศึกษาทั้งในแง่ของประสิทธิภาพ และ ความคุ้มค่าในการลงทุน เพื่อให้รู้วาระหว่างหลังคาที่ติดตั้งฉนวน และ หลังคาที่ทาสีป้องกันความร้อน สามารถช่วยลดพลังงาน ในการทำความเย็นได้มากน้อยอย่างไร การใช้สีป้องกันความร้อน จะมีความสามารถเทียบเท่าฉนวนขนาดหนาเท่าใด และการใช้งานวัสดุใดที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่สุด ซึ่งผลของการศึกษา จะทำให้เห็นแนวทางในการเลือกตัดสินใจเลือกใช้วัสดุและเทคนิคการกันความร้อนได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของผลิตภัณฑ์สีทาหลังคาผสมเซลิคา และผลิตภัณฑ์ อื่นๆ

1.2.2 ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานวัสดุกันความร้อน

1.2.3 สร้างแนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุ ที่เหมาะสมต่อการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคาร

¹ ธนิต จินดาวงศ์, สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี(กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540).

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ทำการศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคา ของผลิตภัณฑ์ สีป้องกันความร้อนผสมซิลิกา

1.3.2 ทำการศึกษาคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคา ของผลิตภัณฑ์ สีป้องกันความร้อนผสมเซรามิก ซึ่งเป็นป้องกันความร้อนที่ได้รับความนิยมโดยทั่วไป

1.3.3 ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสีป้องกันความร้อนกับฉนวนป้องกันความร้อนประเภทใยแก้ว และโพลียูรีเทน ที่มีค่าการถ่ายเทความร้อน (U) เทียบเท่ากับของสีป้องกันความร้อนที่ได้จากการคำนวณ

1.3.4 จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณปริมาณการใช้พลังงาน

1.3.5 ศึกษาความคุ้มค่าในการลงทุนของวัสดุแต่ละชนิด

1.3.6 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาแนวทางการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาที่มีความเหมาะสมในด้านประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการลงทุน

1.4 ระเบียบวิธีการวิจัย

การวิจัยนี้ เป็นการวิจัยที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ และ ส่วนที่เป็น การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อหาความคุ้มค่าทางการศึกษาประสิทธิภาพ และ ความคุ้มค่าในการลงทุนติดตั้งวัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาประเภทสีป้องกันความร้อน(High Reflectance Paint) และ ฉนวนความร้อน (Mass Insulation) ผลการศึกษาในครั้งนี้จะนำไปสู่การสร้างแนวทางการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนผ่านหลังคาในอาคารประเภทต่างๆ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด

1.4.1 การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเบื้องต้น เกี่ยวกับหลักการทำงานของวัสดุป้องกันความร้อนผ่านหลังคาประเภทสีทาป้องกันความร้อน และการทดลองต่างๆ เพื่อกำหนดแนวทางศึกษา และ ตัวแปรในการทดลอง

ส่วนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีและปัจจัยการถ่ายเทความร้อน

ส่วนที่ 2 ศึกษาปัจจัยของการใช้พลังงานในอาคารปรับอากาศ

ส่วนที่ 3 ศึกษาแนวทางการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาในอาคารประเภทต่างๆ โดยจะเน้นไปที่ช่วงเวลาการใช้การปรับอากาศของอาคารแต่ละประเภทในสภาพอากาศเขตร้อน

1.4.2 การวิจัยเชิงทดลอง

การจำลองเพื่อคำนวณหาค่าการใช้พลังงานจำเป็นต้องมีตัวแปรของวัสดุที่จะทำการจำลอง ซึ่งค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับการป้องกันความร้อนในการศึกษานี้มีอยู่ 2 ค่าด้วยกัน คือ ค่าการสะท้อน

ความร้อน(Thermal Reflectance) และ ค่าการต้านทานความร้อน (Thermal Resistance) เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

กลุ่มที่การทำงานด้วยการสะท้อนความร้อนได้แก่ สีป้องกันความร้อนจะผสมอนุภาคเซรามิกสีขาว และสีป้องกันความร้อนชนิดผสมอนุภาคซิลิกาสีขาว รวมถึงค่าการสะท้อนความร้อนของเมทัลชีทที่เป็นตัวแปรควบคุม

การศึกษาประสิทธิภาพของสีดังกล่าว ทำโดยวัดค่าการสะท้อนความร้อน (Thermal Reflection) จะใช้วิธี ASTM. E1918A (E1918 Alternative)² เป็นวิธีการที่ใช้ไพราโนมิเตอร์ (Pyrometer) วัดค่า Solar Irradiance (Wm^{-2}) ซึ่งเป็นวิธีทางเลือกของ มาตรฐาน ASTM. E1918 โดยนำค่า Irradiance ที่วัดได้มาคำนวณตามสมการ

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$$

โดยที่

I_H คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดท้องฟ้า (W/m^2)

I_1 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีขาวด้าน (W/m^2)

I_2 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีดำด้าน (W/m^2)

I_3 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุโดยไม่มีการคลุม (W/m^2)

R_t คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุที่ทำการวัด

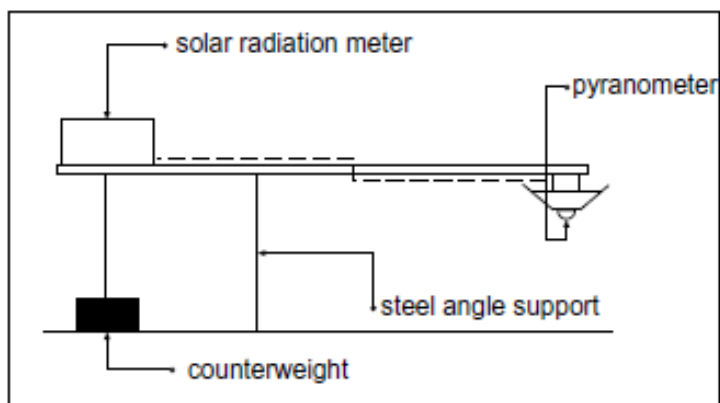
R_w คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีขาวด้าน

R_b คือค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีดำด้าน

วิธีการวัดดังกล่าวใช้วัสดุที่มีขนาดอย่างน้อย 1 ตารางเมตร ทำการวัด 4 ครั้งด้วยกันต่อ 1 ชนิดวัสดุ ครั้งแรกเป็นการวัดโดยหันตำแหน่งเซนเซอร์เข้าหาท้องฟ้า ค่าที่ได้เป็นค่า I_{sky} การวัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 คือการวัดโดยหันเซนเซอร์ไปทางวัสดุที่ต้องการวัดโดยที่วัสดุถูกปกคลุมด้วยวัสดุด้านที่ขาว ดำ และ วัสดุที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุม โดยค่าที่ได้เป็นค่า I_1 , I_2 และ I_3 ตามลำดับ โดยการวัดทั้งหมดต้องทำในเวลาไม่เกิน 10นาที และแต่ละครั้งต้องปล่อยให้ไพราโนมิเตอร์วัดค่าเป็นเวลาอย่างน้อย 30 วินาที เมื่อได้ค่าจากการคำนวณ ให้ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งขึ้นไป แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยหาค่า R_t ที่ได้ในแต่ละครั้งเกิน 0.02 ให้ทำการวัดใหม่ตั้งแต่ต้นอีกครั้งทั้งนี้ในการวัดต้องทำในขณะที่สภาพอากาศต้องโปร่ง และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ต้องมีมุมวัดจากเส้นตั้งฉากกับพื้นโลกน้อยกว่า 45 องศา ($\theta_z < 45^\circ$)³

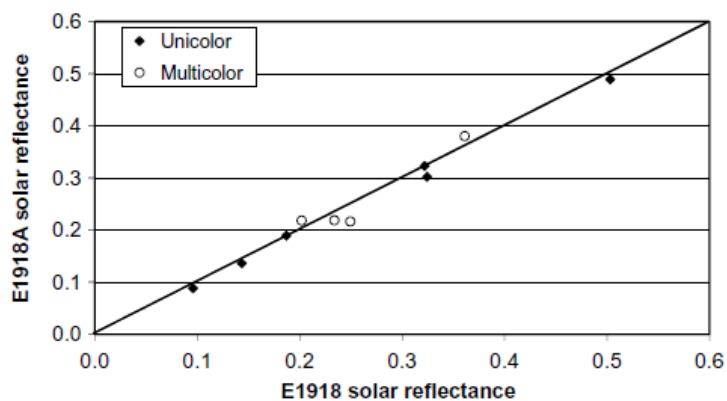
² M. Santamouris A. Synnefa , H. Akbari,, "Estimating the Effect of Using Cool Coatings on Energy Loads and Thermal Comfort in Residential Buildings in Various Climatic Conditions," *Energy and Buildings* 39(2007).

³ H. Akbari Ronnen Levinson, Pualberdahl,, "Solar Reflectance Part li : Review of Practical Methody," *Heat Island Group Lawrence Berkeley National Laboratory* (2010).



ภาพที่ 1.2 แสดงการวัดค่า Irradiance (H. Akbari, 2008)

จาก Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assembly. พบว่าวิธีการ E1918A มีความคลาดเคลื่อนจากวิธี E1918 ที่เป็นวิธีของ ASTM เป็นค่าสัมบูรณ์ของความต่างไม่เกิน 0.02 ในกรณีของการวัดวัสดุที่มีสีเดียวกันทั้งชิ้น (Unicolor) และไม่เกิน 0.03 ในกรณีวัสดุที่มีหลายสี (Multicolor)⁴



ภาพที่ 1.3 กราฟแสดงผลการทดลองเปรียบเทียบ

มาตรฐาน E1919 และ E1918A (H. Akbari, 2008)

⁴เรื่องเดียวกัน.

กลุ่มที่การทำงานด้วยการต้านทานความร้อนได้แก่ ฉนวนโพลียูรีเทนแบบพ่น หนา 50 มิลลิเมตร รวมถึงค่าการต้านทานความร้อนของเมทัลชีทที่เป็นตัวแปรควบคุม โดยจะวัดค่าการต้านทานความร้อน จากกล่องทดลอง และนำมาคำนวณจากสมการดังนี้⁵

$$Q = 1.08 * CFM * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 1/R_{total} * A * (T_{exterior} - T_{interior})$$

โดยที่

Q	คือ พลังงานความร้อน (Btu/hr.)
CFM	คือ ค่าความเร็วลมของพัดลม มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ft ³ /min)
T_{out}	คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากลมที่ระบายออกจากกล่องทดลอง (°F)
T_{in}	คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากลมนำเข้ากล่องทดลอง (°F)
R_{total}	คือ ค่าการต้านทานความร้อน (°Fhr./Btu)
$T_{exterior}$	คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านนอกของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)
$T_{interior}$	คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านในของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)
A	คือ พื้นที่ในการนำความร้อน (ft ²)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของผลิตภัณฑ์สีทาหลังคาผสมเซลิคา และผลิตภัณฑ์ อื่นๆ

1.5.2 ทราบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานวัสดุกันความร้อน

1.5.3 ได้แนวทางในการตัดสินใจเลือกวัสดุ สีป้องกันความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

⁵ Norbert Lechner, *Heating Cooling Lighting: Design Methods for Architects*(New York: John Wiley & Sons, 1991).

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถกำหนดวิธีการศึกษาทฤษฎี แนวคิด และ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่อไปนี้

- ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermal dynamics)
- การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง
- ทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการใช้พลังงาน และการประหยัดพลังงานในอาคาร

2.1.1 ทฤษฎีอุณหพลศาสตร์ (Thermal dynamics)

เป็นศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์กับพลังงาน (Energy) ตลอดจนครอบคลุมถึงเรื่องของพลังงานในรูปต่างๆโดยจะกล่าวถึงความร้อนและงาน รวมทั้งสมบัติต่างๆของสสารซึ่งเป็นตัวกลางในการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ โดยที่พลังงานมีความสามารถที่เปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้โดยที่พลังงานนั้นจะคงที่เสมอ ซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน (conservation energy principle) และกฎของอุณหพลศาสตร์มีกฎทั้งหมด 4 ข้อในอุณหพลศาสตร์ดังนี้

กฎของอุณหพลศาสตร์

กฎข้อที่ 1. พลังงานภายในของระบบที่เพิ่มขึ้น เท่ากับปริมาณพลังงานความร้อนที่นำเข้าสู่ระบบ ลบด้วยพลังงานที่สูญเสียไปเป็นงานของระบบที่กระทำต่อสิ่งแวดล้อมกล่าวคือ พลังงานในระบบอุณหพลศาสตร์หนึ่งๆ จะมีค่ารวมเท่าเดิมเสมอ หรือพลังงานไม่มีการสูญสลาย

กฎข้อที่ 2. กล่าวถึงการเพิ่มขึ้นของเอนโทรปี ในระบบอิสระ โดยอธิบายได้หลายแบบดังนี้

- ไม่มีเครื่องจักรความร้อนใด ๆ ที่จะให้ประสิทธิภาพ 100 % (เคลวิน-พลังค์)
- ความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ไม่สามารถถ่ายเทไปยังแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าได้

โดยธรรมชาติ (เคลลาซิอุส)

- เอนโทรปีของระบบอิสระไม่มีทางที่จะลดลงในกระบวนการใด ๆ

กฎข้อที่ 3. กล่าวถึงอุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ โดยอธิบายได้ดังนี้เมื่ออุณหภูมิสัมบูรณ์เข้าสู่ศูนย์ เอนโทรปีของระบบจะเข้าสู่ค่าคงที่หรืออีกนัยหนึ่งไม่มีกระบวนการใดที่สามารถลดพลังงานของระบบลงจนถึงศูนย์องศาสัมบูรณ์ได้

กฎข้อที่ 4. กล่าวถึงภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ นั่นคือภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์มีคุณสมบัติถ่ายทอด (Transitive) ได้นั่นเอง โดยพลังงานจะดำรงอยู่ด้วย 2 รูปแบบคือพลังงานศักย์ (Static) และ พลังงานจลน์ (Dynamic) โดยแบ่งพลังงานจลน์เป็น 2 ประเภทคือความร้อน (Heat)

และ งาน (Work) โดยที่ ความร้อนมีแรงผลักดันเป็นความต่างศักย์ความร้อน หรือ อุณหภูมิทำให้เกิด การถ่ายเทความร้อน เรียกว่า Heat Transfer ⁶

2.1.2 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

ในอาคารปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีจัดการสิ่งแวดล้อมในอาคาร ไม่ว่าจะเป็น แสง อากาศ หรือ อุณหภูมิ โดยมีจุดมุ่งหมายให้อุณหภูมิอยู่ในสภาวะน่าสบาย การปรับอุณหภูมิในอาคาร เป็นสิ่งที่ ใช้พลังงานปริมาณมาก โดยเฉพาะกรณีที่อยู่ในอาคารมีอุณหภูมิแตกต่างจากภายนอกมาก ในการ ออกแบบอาคาร ในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนอย่างในประเทศไทยจึงเน้นไปที่การป้องกันความร้อนจาก ภายนอกเข้าสู่อาคาร โดยสามารถใช้วิธีการหลีกเลี่ยงความร้อน เช่นการวางตัวอาคารให้อยู่ในทิศทาง ที่เหมาะสม หรือการใช้วัสดุในการป้องกันความร้อน

การถ่ายเทความร้อนในธรรมชาติมี 3 วิธีด้วยกัน คือการนำความร้อน การพาความร้อน และ การแผ่รังสีความร้อนในอาคารก็เช่นเดียวกัน

การนำความร้อน (Conduction)

เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสกันของเนื้อวัตถุ การถ่ายเทความร้อนเกิด จากการสั่นของอนุภาคของวัสดุ ที่ส่งต่อพลังงานนั้นจากศักย์สูงไปต่ำ ทำให้การนำความร้อนเกิดขึ้น ความสามารถในการนำความร้อนนั้นเป็นคุณสมบัติของวัสดุที่สามารถนำความร้อนผ่านอนุภาคที่มี ศักย์ความร้อนสูงไปหา ศักย์ความร้อนต่ำ ตามสมการ⁷

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

โดยที่

q_x = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Watt,J/s)

T = อุณหภูมิ (K)

X = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

K = ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)(W/m)

หากวัสดุมีค่าการนำความร้อน(k) สูง ก็จะถูกจัดเป็นตัวนำความร้อน(conductor) หากมี ความสามารถในการนำความร้อนต่ำ ก็จะถูกจัดเป็นฉนวน(insulation) ในการใช้งาน เมื่อเรารู้ค่า ความหนาของวัสดุ เราอาจเขียนสมการใหม่เป็น

$$Q = U A (\Delta T)$$

โดยที่

⁶ Hendrick Van Ness J.M. Smith, Michael Abbott *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* (New York: The McGraw-Hill Companies, 2005).

⁷ ธนิต จินดาวงศ์, สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี.

Q	คือ	ปริมาณพลังงานความร้อนที่ผ่านเข้ามา (W)
U	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
A	คือ	พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน (m^2)
ΔT_i	คือ	ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผิววัสดุ (K, $^\circ C$)

การพาความร้อน (Convection)

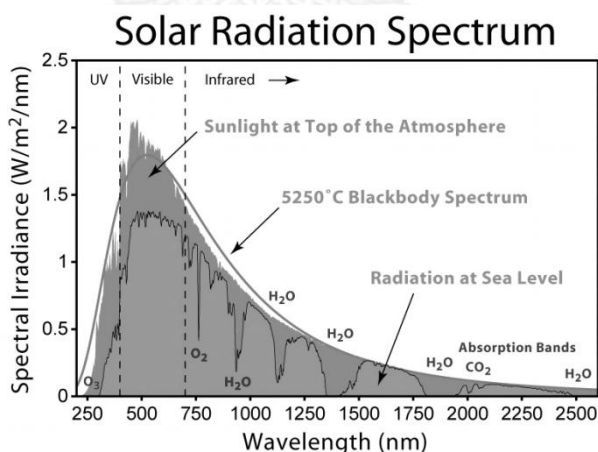
เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ ในสสารสองสถานะคือ ก๊าซและของเหลว เนื่องจากเป็นสิ่งที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยจะมีทิศทางลอยขึ้นเท่านั้น เนื่องจาก เมื่อสสารได้รับความร้อนจะมีการขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นต่ำลง และสสารที่มีอุณหภูมิ ต่ำกว่า (ความหนาแน่นสูงกว่า)

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

คือ การถ่ายโอนพลังงานความร้อนออกไปโดยรอบ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางใด ๆ ทั้งสิ้น เช่น ความร้อนจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีมายังโลกในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัตถุใดๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 เคลวิน จะมีการแผ่รังสีความร้อนออกมาเสมอ และ แผ่ออกมาในทุกทิศทาง

2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

รังสีความร้อนในธรรมชาติแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ รังสีความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) หรือรังสีคลื่นสั้น และ รังสีความร้อนจากผิววัสดุ หรือ รังสีช่วงคลื่นยาว (Long wave Radiation)



ภาพที่ 2.1 แสดงช่วงความยาวคลื่นของแสงอาทิตย์

เมื่อรังสีความร้อนกระทบวัสดุอาคารเมื่อได้รับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงคลื่นสั้น รังสี ความร้อนนั้นก็จะถูกดูดซับสะท้อนและคายออกมาจากวัสดุนั้น ถ้าเป็นวัสดุโปร่งแสง จะมีการส่งผ่านรังสี (Transmittance - T) ส่วนรังสีความร้อนที่เหลือจะถูกดูดกลืน (Absorption - α) เข้าสู่

เนื้อวัตถุ และสะท้อน (reflectance- ρ) ดังสมการ $\rho + \alpha + T = 1$ ซึ่งการดูดกลืนรังสีเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้วัสดุต่างๆ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด โดยค่าการดูดกลืนรังสีหาได้จากสมการ

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

2.2.1 การแผ่รังสีจากวัสดุในช่วงคลื่นยาว (Long wave Radiation)

วัสดุทึบแสงได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นต่างๆ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกดูดซับไว้ ก็จะถูกกักเก็บไว้ในวัสดุในรูปพลังงานความร้อน แล้วคายความร้อนออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นยาว (Long wave Radiation) ซึ่งจะมีความยาวคลื่นตั้งแต่ $3\mu\text{m}$ ขึ้นไป ค่าการแผ่รังสีคือคุณสมบัติของวัตถุในการปล่อยพลังงานออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยลักษณะการแผ่รังสีในช่วงคลื่นยาวนี้ ไม่สามารถผ่านวัสดุโปร่งใสบางชนิดได้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมความร้อนในอาคาร(ปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) โดยทั่วไปวัสดุที่มีความมันวาว และมี สีอ่อน จะมีความสามารถดูดซับต่ำ ในขณะที่ วัสดุที่มีผิวด้าน และมีสีเข้มมีความสามารถในการดูดซับสูงซึ่งจะตรงกันข้ามกับคุณสมบัติในการสะท้อน ทั้งนี้ ความสามารถที่เกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ อาจแตกต่างกันด้วยส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งเป็นปัจจัยเพิ่มเติมจากความเข้มของสีพื้นผิวของวัสดุค่าการดูดซับและค่าการสะท้อนของพื้นผิววัสดุมีค่ารวมกันเป็น 1 เสมอ วัสดุทึบแสงต่างๆบนโลก เมื่อได้รับการแผ่รังสีความร้อนคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ โดยค่าการแผ่รังสีความร้อนช่วงคลื่นยาวหาได้จาก

$$\varepsilon = \frac{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากผิววัสดุ (Radiation form Material)}}{\text{ปริมาณการแผ่รังสีจากวัตถุดำในอุดมคติ (Radiation form Blackbody)}}$$

วัตถุดำในอุดมคติ (Blackbody) เป็นวัสดุในอุดมคติที่สามารถคายรังสีความร้อนได้อย่างสมบูรณ์ (Perfect Emitted =1) ค่าการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุใดๆซึ่งเกิดจากการเปรียบเทียบอัตราส่วนกับวัตถุดำในอุดมคติดังกล่าว จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 เสมอ หากยังมีค่าเข้าใกล้ 1 เท่าใดหมายความว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติในการคายหรือแผ่รังสีความร้อนในปริมาณมาก

ลักษณะของพื้นผิวมีอิทธิพลต่อการดูดซับรังสีและการแผ่รังสีแตกต่างกันไป แนวคิดที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ได้แก่สมการดังนี้

$$\rho + \varepsilon + T = 1$$

เมื่อ ρ = ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนจากพื้นผิว (Reflectivity)

α = ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อน (Absorptivity)

T = ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน (Transmissivity)

ผลรวมของค่าการสะท้อนรังสีความร้อน ค่าการดูดซึมรังสีความร้อน และค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนมีค่าเท่ากับ 100% ของพลังงานความร้อนที่ตกกระทบลงมาทั้งหมด แต่สำหรับวัสดุที่บดแสงค่าการส่งผ่านความร้อนเท่ากับ 0 ดังนั้น ผลรวมของค่าการสะท้อนรังสีความร้อนและค่าการดูดซึมรังสีความร้อนจะเท่ากับ 1 ($\rho + \epsilon = 1$)

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าการแผ่รังสีของตัวอย่างวัสดุต่างๆ (ASHRAE Handbook, 2009)⁸

วัสดุ	ค่าการแผ่รังสี(Thermal emissivity)
Aluminum foil	0.03
Asphalt	0.88
Brick	0.90
Concrete, rough	0.91
Limestone	0.92
Marble, Polished or white	0.89 to 0.92
Marble, Smooth	0.56

2.2.2 ค่าความเป็นฉนวนความร้อน ฉนวนความร้อนคือ วัสดุหรือวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ทำให้วัสดุส่งผ่านความร้อนจากด้านใดด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ยากขึ้น โดยทั่วไป นอกจากคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุ ความสามารถในการต้านทานความร้อนของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ฉนวนความร้อนที่ดีที่สุดอย่างหนึ่งคืออากาศซึ่งเป็นอากาศที่หยุดนิ่ง วัสดุฉนวนที่ใช้ในการป้องกันความร้อนในอาคารจึงมักเป็นวัสดุที่มีอากาศกักอยู่ภายในเนื้อวัสดุ หรือเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ค่าการต้านทานความร้อนคือส่วนกลับของค่าการนำความร้อนมีหน่วยเป็น (m^2C/W)

ค่าความจุความร้อนคือปริมาณความร้อนที่ทำให้วัตถุหน่วยปริมาตรหนึ่ง หรือวัตถุ หน่วยพื้นที่หนึ่ง มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศา มีหน่วยเป็น $Kcal/m^2c^{\circ}$ หรือเรียกว่าค่า C คุณสมบัตินี้ถูกกำหนดโดย 2 ปัจจัย คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่นของวัสดุ โดยปัจจัยที่มีผลมากกว่าคือความหนาแน่นของวัสดุ

2.2.3 การป้องกันความร้อนทางหลังคา

การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)

การระบายความร้อนผ่านหลังคาด้วยวิธีธรรมชาติเป็นวิธีลดความร้อนโดยไม่ใช้เครื่องกลเช่นพัดลม หรือเครื่องปรับอากาศโดยใช้การพาความร้อนด้วยอากาศ และ การแผ่รังสีนำความร้อนออกไปจากอาคาร เช่น การสร้างความเย็นโดยการพาความร้อน (Convection cooling) และการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้า ในเวลากลางคืน (Nocturnal Radiation) ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นแหล่ง

⁸ ASHRAE, *Ashrae Handbook Fundamentals*(Atlanta,GA: ASHRAE ,Inc., 2009).

ระบายความร้อน ที่ทำให้วัตถุต่างๆบนโลกสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ท้องฟ้าในเวลากลางวัน สิ่งเกิดได้จากปรากฏการณ์ที่พื้นผิวของวัสดุบางชนิดมีอุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศในช่วงกลางวัน ในบางครั้งอุณหภูมิผิวของวัตถุอาจ ลดต่ำลงมากกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) สภาพท้องฟ้าดังกล่าวเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการการคายความร้อนเปลี่ยนแปลงไปตามภูมิอากาศ

ค่าการคายความร้อนในช่วงคลื่นยาว (Long Wave Radiation) เป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าในช่วงเวลากลางวัน วัสดุที่มีค่าการคายรังสีความร้อนสูง จะมีความสามารถในการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าสูง ในทางกลับกัน วัสดุที่มีค่าการคายรังสีความร้อนต่ำ จะมีความสามารถในการคายรังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าต่ำ

ค่ามุมที่เปิดออกสู่ท้องฟ้า (Angle Factor) มีผลต่อการคายความร้อนสู่ท้องฟ้าวัสดุที่ทำมุมขนานระนาบกับท้องฟ้า (Horizontal) มากเท่าไร ก็จะมีพื้นที่ที่เปิดออกสู่ท้องฟ้ามากขึ้นเท่านั้น แต่จะมีโอกาสได้รับรังสีความร้อนมากขึ้นในตอนกลางวันเช่นกัน

การใช้ฉนวนมวลสารกันความร้อน (Thermal Mass Insulation)

ฉนวนกันความร้อน คือ วัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อน ไม่ให้ถูกส่งผ่านไปได้อย่างง่าย ฉนวนประเภทมวลสาร เป็นลักษณะของฉนวนกันความร้อนที่ประกอบด้วยโพรงช่องเล็กๆ และ ช่องอากาศภายในวัสดุที่เป็นแบบปิดทึบ (Totally Enclosed) ช่องเล็กเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นจากเกล็ด (Flakes) หรือเส้นใย (Fibers) ปมแข็ง (Nodules of Solid) หรือเซลล์ของตัววัสดุเอง

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 ด้าน⁹

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

งบประมาณรายจ่ายการลงทุนเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินความคุ้มค่าเพื่อวางแผนในการลงทุนระยะยาวที่มีค่าใช้จ่ายสูง และมีระยะโครงการยาวนานหลายปี ซึ่งหวังผลกำไรได้จากอนาคตเกิน 1 ปีขึ้นไป จึงจำเป็นที่จะต้องประเมินอย่างรอบคอบเพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อผู้ลงทุน โดยทั่วไป แบ่งรายจ่ายของธุรกิจเป็น 2 ประเภท คือ

- งบประมาณการดำเนินงาน เป็นรายจ่ายที่เกิดขึ้นเพื่อธุรกิจดำเนินต่อไปได้ เช่น ค่าจ้างพนักงาน ค่าใช้จ่ายในการขาย ค่าใช้จ่ายในการผลิต
- งบประมาณลงทุน เป็นรายจ่ายจำนวนมากผูกพันกับโครงการมากกว่า 1 ปี และมีผลตอบแทนในอนาคต เช่นค่าก่อสร้าง ค่าเครื่องจักร ค่าวิจัยฯลฯ

⁹ American Society for Testing Materials, "Astm C1313 Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications," ed. American Society for Testing Materials(West Conshohocken , USA2010).

การประเมินความคุ้มค่ามีความสำคัญในการลงทุนมีดังนี้

1. เพื่อควบคุมการใช้จ่ายไม่ให้สูงเกินจำเป็น
2. เพื่อควบคุมให้มีผลตอบแทนไปตามแผนการที่วางไว้
3. เพื่อให้เกิดผลผลิต หรือ ผลตอบแทนอย่างเต็มที่
4. เพื่อให้มีผลตอบแทนเป็นไปตามเวลาที่กำหนด
5. เพื่อความต่อเนื่อง และ การเติบโตของธุรกิจ

ขั้นตอนในการประเมินการลงทุนมีดังนี้

1. กำหนดโครงการลงทุน
2. ประเมินโครงการ
3. จัดทำงบประมาณการลงทุน
4. ดำเนินงาน
5. ติดตามผลของโครงการ

2.3.1 การประมาณการเคลื่อนไหวของเงินสดเข้าและออกของโครงการ

การประมาณการเคลื่อนไหวเป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปการเคลื่อนไหวจะมี 2 ประเภทคือเงินสดออก(Cash outflow) เป็นเงินที่ต้องจ่าย หรือลงทุนตามที่วางแผนไว้ และ เงินสดเข้า (cash inflow) คือ ผลตอบแทนที่คาดว่าจะได้รับการคาดการณ์ความคุ้มค่าในการลงทุนขึ้นอยู่กับความแม่นยำของการคาดการณ์กระแสเงินสดที่ได้จากข้อมูลในอดีตและปัจจุบัน

2.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินค่าของการลงทุนแบ่งได้เป็น 5 วิธี ได้แก่

1. ระยะเวลาคืนทุน(Payback period)

ระยะเวลาคืนทุน (PB) คือ ระยะเวลาที่ทำให้กระแสเงินสดรับสุทธิในแต่ละปีรวมกันมีค่าเท่ากับเงินสดจ่ายลงทุนเริ่มแรก หลักเกณฑ์ กิจการจะตอบรับโครงการลงทุนนั้น ถ้าระยะเวลาคืนทุนที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าอายุโครงการ หรือน้อยกว่าระยะเวลาคืนทุนที่กิจการต้องการคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{จำนวนปีก่อนได้รับการชดเชยเต็มจำนวน} + \frac{\text{ต้นทุนที่ยังชำระไม่ครบต้นปี}}{\text{กระแสเงินสดระหว่างปี}}$$

2. ระยะเวลาคืนทุนแบบคิดลด (Discounted Payback period)

ระยะคืนทุนแบบคิดลดมีความคล้ายกับระยะคืนทุน แตกต่างกันที่จะมีการคิดลดค่ากระแสเงินสดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

3. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือ ผลต่างในมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดไหลเข้าและออกที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิธีนี้ใช้การคิดแบบกระแสเงินสดคิดลด (Discounted cash flow) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หามูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดไหลเข้าและออก
2. บวกกระแสเงินสดคิดลดรวมจะได้มูลค่าปัจจุบันคิดลดของโครงการ
3. ถ้าค่ามากเท่าไรแสดงว่าโครงการนั้นมีความคุ้มค่าสูง

4. อัตราผลตอบแทน (Internal rate of return)

อัตราผลตอบแทนคืออัตราดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน หรือมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 0

5. ดัชนีกำไร (Profitability Index)

ดัชนีกำไรหมายถึงอัตราส่วนระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดเข้าสุทธิที่คาดว่าจะได้รับต่อเงินลงทุนทั้งหมดที่คิดเป็นมูลค่าปัจจุบัน หากมีค่ามากกว่า 1 จะยอมรับโครงการ หากมีค่าน้อยกว่า 1 จะปฏิเสธโครงการ¹⁰

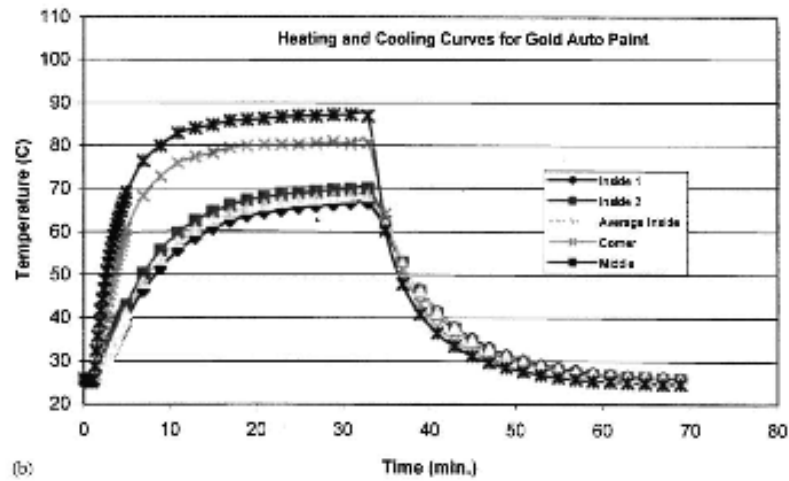
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุป้องกันความร้อนแบบสะท้อนรังสีความร้อน มีอยู่หลายชิ้นด้วยกัน

ในบทความ Colored paints based on iron oxide and silicon oxide coated flakes of aluminum as the pigment (G.B. Smith, 2003) มีการเปรียบเทียบค่ากระสะท้อนและดูดซับของวัสดุที่เคลือบสีธรรมดา และวัสดุที่เคลือบสีผสมอนุภาคโลหะออกไซด์ การทดลองครั้งนี้ ใช้วิธีการวัดอุณหภูมิจากกล่องทดลอง แล้วสังเกตความเร็วในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพื้นผิว ทำให้เห็นพฤติกรรมในการดูดซับและคายความร้อนของสีชนิดต่างๆ สีที่มีอนุภาคโลหะออกไซด์ผสมอยู่ มีค่าการสะท้อน (ρ) ที่สูงกว่า และมีค่าการดูดซับ (α) ที่ต่ำกว่า และทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวที่ถูกเคลือบมีอุณหภูมิลดลง¹¹

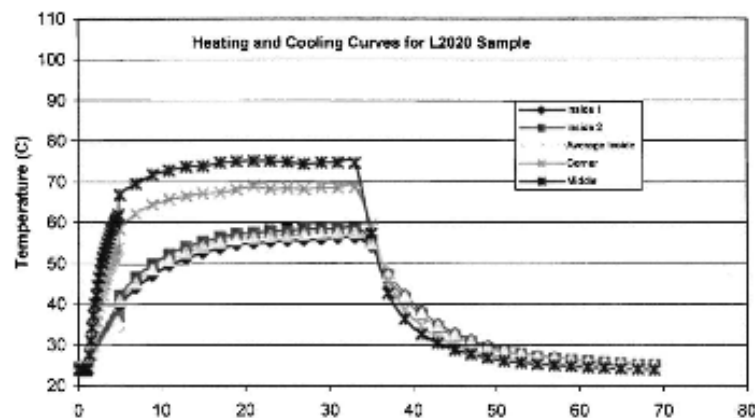
¹⁰ ปริญดา มณีโรจน์ ผศ. กชกร เฉลิมกาญจนา, ผศ. แพร่ กิระสุนทรพงษ์, สมพงษ์ พรอุปถัมภ์, ผศ. ดวงสมร อรพันธ์,, การบัญชีการเงิน : *Financial Accounting*(กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003).

¹¹ A. Gentlea G.B. Smitha, P.D. Swift, A. Earp, N. Mronga,, "Colored Paints Based on Iron Oxide and Silicon Oxide Coated Flakes of Aluminum as the Pigment, for Energy Efficient Paint: Optical and Thermal Experiments," *Energy Materials & Solar Cells* 79(2003).



(b)

ภาพที่ 2.2 แสดงแสดงแผนภาพอุณหภูมิพื้นผิวที่เคลือบสีธรรมดา



ภาพที่ 2.3 แสดงแผนภาพอุณหภูมิพื้นผิวที่เคลือบสีผสมอนุภาคโลหะออกไซด์

ในงานวิจัย Dynamic thermal simulation of a retail shed with solar reflective coatings (Xiaoxin Wang, 2007) ซึ่งเป็นการศึกษาจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการใช้พลังงานของอาคารร้านค้าในที่ตั้งอาคารที่มีละติจูด และภูมิอากาศแตกต่างกัน ผลของการวิจัยพบว่าสถานที่ตั้ง และ ภูมิอากาศ มีผลประสิทธิภาพในการเลือกใช้หลังคาที่มีค่าการสะท้อนสูง อาคารในละติจูดต่ำ จะได้รับผลดีจากการใช้สีสะท้อนความร้อนมากกว่าอาคารในละติจูดสูง อาคารที่ตั้งอยู่ในที่มีสภาพอากาศปลอดโปร่งทั้งปี เช่นทะเลทราย จะได้รับผลประโยชน์จากการใช้สีสะท้อนความร้อนมากกว่าอาคารในภูมิอากาศที่มีเมฆครึ้ม สีที่มีค่าการสะท้อนสูง สามารถประหยัดพลังงานได้ในกรณีที่

อาคารไม่มีการติดตั้งฉนวนที่ผิวอาคาร แต่ในกรณีที่อาคารมีการใช้ฉนวนที่ผิวนอกของอาคารอย่างดีแล้ว การใช้หลังคาที่มีค่าการสะท้อนสูงจะไม่ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานไปกว่าเดิม¹²

ในงานวิจัย Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate (Harry Suhrcke, 2007) ได้ศึกษาด้วยการจำลองการถ่ายเทความร้อนสู่อาคารในสภาพอากาศของออสเตรเลียตอนเหนือ ซึ่งเป็นภูมิอากาศเขตร้อน มีเปรียบเทียบการใช้พลังงานของอาคารที่มีสีของหลังคาซึ่งมีความสว่างแตกต่างกัน ผลจากการจำลองพบว่าสีของหลังคามีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ภายในอาคารสีที่สว่างกว่า จะมีการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าสีที่เข้ม¹³

งานวิจัย Estimating thermal performance of cool colored paints (Kai L. Uemoto, 2010) เป็นการทดลองโดยใช้กล่องทดลองเช่นกัน นอกจากจะวัดอุณหภูมิแล้ว ยังมีการวัดช่วงความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อแสดงให้เห็นว่าสีป้องกันความร้อนสามารถสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่มนุษย์มองเห็นได้เหมือนกับสีธรรมดา แต่มีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นความถี่ใกล้อินฟราเรดมากกว่าสีธรรมดา ทำให้แม่มีสีที่ตามองเห็นเหมือนกัน แต่ประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนต่างกัน¹⁴

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

¹² Chris Kendrick XiaoxinWang , Ray Ogden, James Maxted,, "Dynamic Thermal Simulation of a Retail Shed with Solar Reflective Coatings," *Applied Thermal Engineering* 28(2008).

¹³Eric L. Peterson Harry Suehrcke, Neville Selby,, "Effect of Roof Solar Reflectance on the Building Heat Gain in a Hot Climate," *Energy and Buildings* 40, no. 12 (2008).

¹⁴ Neide M.N. Sato Kai L. Uemoto "Estimating Thermal Performance of Cool Colored Paints," *Energy and Buildings* 42(2010).

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคูณสมบัติ ประสิทธิภาพ และ ประสิทธิผล (ความคุ้มค่าในการลงทุน) ของการใช้วิธีการป้องกันความร้อนด้วยฉนวน สีสผสมอนุภาคเซรามิกและสีผสมอนุภาคซิลิกา โดยการทดลองเพื่อหาคูณสมบัติของวัสดุ แล้วจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าการใช้พลังงาน จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางการเงิน เพื่อวิเคราะห์แนวทางการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนที่เหมาะสมในกรณีต่างๆ

3.1 กำหนดการดำเนินการวิจัย

3.1.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความร้อน ผ่านทางหลังคา หลักการทำงานของสีป้องกันความร้อน หลักการทำงานของฉนวนโดยทั่วไป วิธีการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุ และ วิธี การประเมินความคุ้มค่าทางการเงิน

3.1.2 กำหนดวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่นำมาศึกษาในครั้งนี้เป็นวัสดุสีป้องกันความร้อนที่ทำงานโดยการสะท้อนความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นำมาเปรียบเทียบกับฉนวนกันความร้อนราคาถูก ที่ใช้กันทั่วไป เหตุผลในการเลือก

- การเลือกใช้สีกันความร้อนแบบผสมอนุภาคซิลิกา เพราะวัสดุนี้เป็นวัสดุที่ยังไม่แพร่หลายในท้องตลาด ทำให้ยังไม่มีการศึกษาประสิทธิภาพ หรือ ความคุ้มค่าในการลงทุนเลือกใช้สีชนิดนี้

- การเลือกใช้สีกันความร้อนแบบผสมอนุภาคเซรามิก เพราะวัสดุชนิดนี้เริ่มมีการวางขายทั่วไปตามท้องตลาด โดยมีราคาสูงกว่าสีสำหรับทาหลังคาโดยทั่วไป มีหลักการทำงานด้วยการสะท้อนความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับสีผสมอนุภาคซิลิกา

- การเลือกใช้วัสดุฉนวนใยแก้ว เพราะเป็นวัสดุป้องกันความร้อนผ่านหลังคาที่แพร่หลาย แล้วมีการใช้อย่างกว้างขวาง ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดใหม่

3.1.3 การศึกษาวิธีการทดลองเพื่อหาคูณสมบัติของวัสดุ

ในการจำลองเพื่อหาค่าการใช้พลังงาน ต้องมีการป้อนค่าคูณสมบัติของวัสดุ ซึ่งค่าเหล่านี้จะหาได้จากการทดลอง การส่งวัสดุไปตรวจสอบในต่างประเทศมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ทำให้การวิจัยในครั้งนี้จำเป็นต้องทดลองหาค่าคูณสมบัติของวัสดุเอง

3.1.3.1 การหาค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุ

จากสมการคำนวณปริมาณความร้อน¹⁵

$$Q = 1.08 * CFM * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 1/R_{total} * A * (T_{exterior} - T_{interior})$$

โดยที่

Q คือพลังงานความร้อน (Btu/hr.)

CFM คือค่าความเร็วลมของพัดลม มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ft³/min)

T_{out} คืออุณหภูมิที่วัดได้จากลมที่ระบายออกจากห้องทดลอง (°F)

T_{in} คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากลมนำเข้าห้องทดลอง (°F)

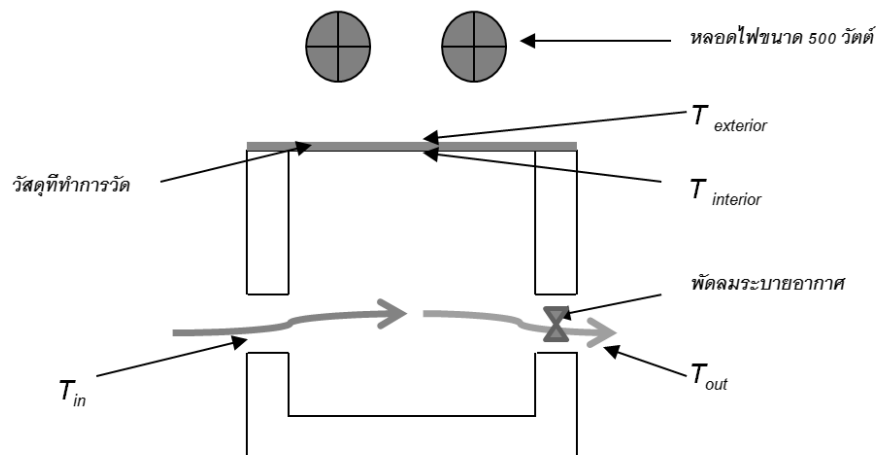
R_{total} คือค่าการต้านทานความร้อน (°Fhr. / Btu)

$T_{exterior}$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านนอกของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)

$T_{interior}$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านในของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)

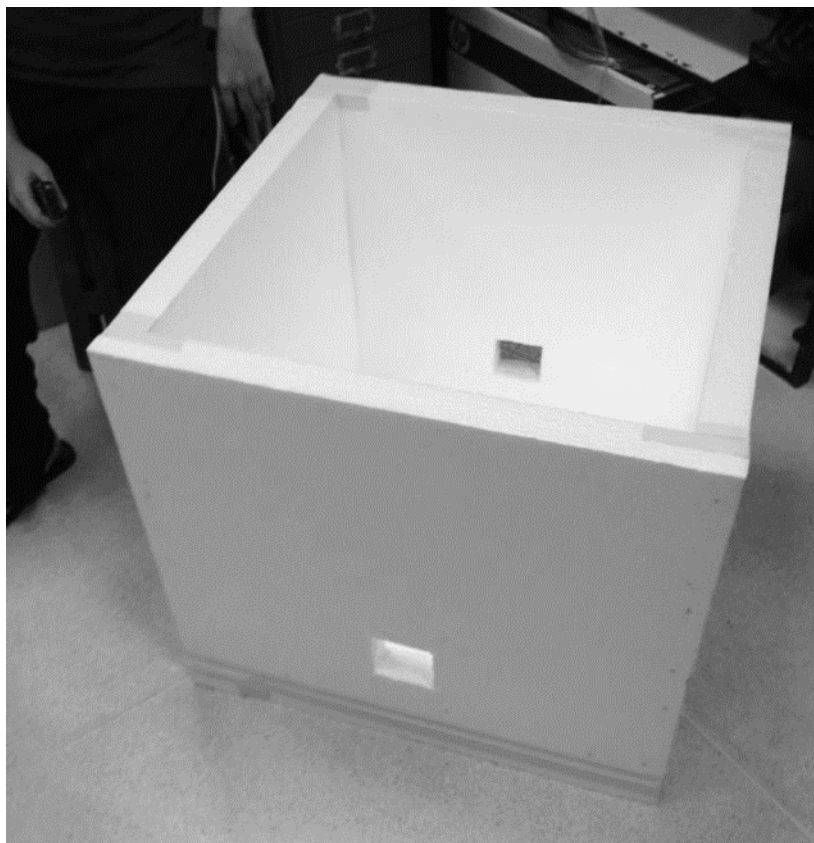
A คือพื้นที่ในการนำความร้อน (ft²) ในการทดลองนี้ใช้วัสดุขนาด 0.36 m²

ทำให้เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุได้จากการทดลอง



ภาพที่ 3.1แสดงแผนภาพกล่องทดลอง

¹⁵ Norbert Lechner, *Heating Cooling Lighting: Design Methods for Architects*.



ภาพที่ 3.2 แสดงกล่องทดลอง

การทดลองนี้จะมีการเก็บค่าอุณหภูมิด้วยดาต้าล็อกเกอร์ (data logger) แล้วนำผลที่ได้ มาทำการคำนวณตามสมการข้างต้น โดยเป็นค่าเฉลี่ยจากการเก็บค่าทุกๆ 1 นาทีในช่วงที่ระบบของกล่องทดลองมีอุณหภูมิคงที่ โดยวัสดุที่นำมาหาค่าความต้านทานความร้อนคือฉนวนใยแก้วหนาแน่น 24 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 50 มิลลิเมตร จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของผิวหลังคาที่ได้ทำการเคลือบสีป้องกันความร้อนทั้งชนิดที่ผสมอนุภาคเซรามิก และ ซิลิกา โดยทำการวัดผิวด้านนอก และผิวใต้หลังจาก แล้วจึงนำมาเขียนแผนภูมิเปรียบเทียบเพื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของวัสดุทั้งสามชนิด

3.1.3.2 การทดลองหาค่าการสะท้อนของวัสดุสีสะท้อนความร้อน

กลุ่มที่การทำงานด้วยการสะท้อนความร้อนได้แก่ สีป้องกันความร้อนจะผสมอนุภาคเซรามิกสีขาว และสีป้องกันความร้อนชนิดผสมอนุภาคซิลิกาสีขาว

การศึกษาประสิทธิภาพของสีดังกล่าว ทำโดยวัดค่าการสะท้อนความร้อน (Thermal Reflection) จะใช้วิธี ASTM. E1918A (E1918 Alternative) เป็นวิธีการที่ใช้ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) วัดค่า Solar Irradiance (W/m^2) ซึ่งเป็นวิธีทางเลือกของมาตรฐาน ASTM. E1918 แต่สามารถใช้เครื่องมือที่มีราคาถูกกว่า และใช้ขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเพียงไม่ต่ำกว่า 1 ตารางเมตรในกรณีรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือ รูปวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ต่ำกว่า 1 เมตร โดยนำค่า Irradiance ที่วัดได้จากไพโรมิเตอร์ มาคำนวณตามสมการ

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$$

โดยที่

I_H คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดท้องฟ้า (W/m^2)

I_1 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีขาวด้าน (W/m^2)

I_2 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีดำด้าน (W/m^2)

I_3 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุโดยไม่มีการคลุม (W/m^2)

R_t คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุที่ทำการวัด

R_w คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีขาวด้าน

R_b คือค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีดำด้าน

วิธีการวัดดังกล่าวให้วัดโดยมีตัวรับแสงห่างจากวัสดุ 50 เซนติเมตร ทำการวัด 4 ครั้งด้วยกันต่อ 1 ชนิดวัสดุ ครั้งแรกเป็นการวัดโดยหันตำแหน่งเซนเซอร์เข้าหาท้องฟ้า ค่าที่ได้เป็นค่า I_{sky} การวัดครั้งที่ 2, 3 และ 4 คือการวัดโดยหันเซนเซอร์ไปทางวัสดุที่ต้องการวัดโดยที่วัสดุถูกปกคลุมด้วยวัสดุด้านที่ขาว ดำ และ วัสดุที่ไม่มีสิ่งใดปกคลุม โดยค่าที่ได้เป็นค่า I_1 , I_2 และ I_3 ตามลำดับ โดยการวัดทั้งหมดต้องทำในเวลาไม่เกิน 10ที และแต่ละครั้งต้องปล่อยให้ไพราโนมิเตอร์วัดค่าเป็นเวลาอย่างน้อย 30 วินาที เมื่อได้ค่าจากการคำนวณให้ทำซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้งขึ้นไป แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย หากค่า R_t ที่ได้ในการวัดแต่ละครั้งมีความแตกต่างกัน เกิน 0.02 ให้ทำการวัดใหม่ตั้งแต่ต้นอีกครั้งตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ของมาตรฐาน ASTM. E1918A ทั้งนี้ในการวัดต้องทำในขณะที่สภาพอากาศต้องปลอดโปร่ง และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ต้องมีมุมวัดจากเส้นตั้งฉากกับพื้นโลกน้อยกว่า 45 องศา ($\theta_z < 45^\circ$)¹⁶

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

¹⁶ Ronnen Levinson, "Solar Reflectance Part II : Review of Practical Methody."



ภาพที่ 3. 3แสดงการวัดค่า Irradiance

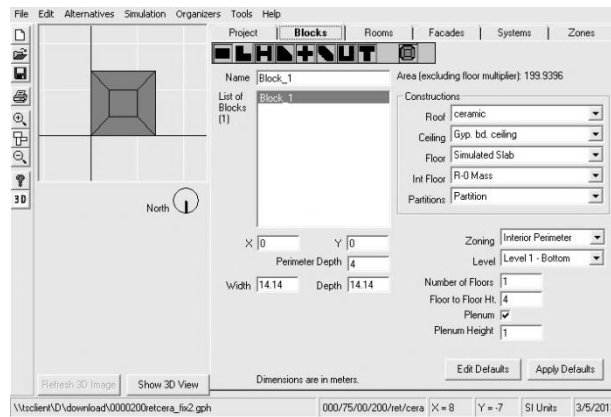
จาก Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assembly.พบว่าวิธีการ E1918A มีความคลาดเคลื่อนจากวิธี E1918 ที่เป็นวิธีของ ASTM เป็นค่าสัมบูรณ์ของความต่างไม่เกิน 0.02 ในกรณีของการวัดวัสดุที่มีสีเดียวกันทั้งชิ้น (Unicolor) และไม่เกิน 0.03 ในกรณีวัสดุที่มีหลายสี (Multicolor)

3.1.4 จำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การจำลองอาคารในครั้งนี้ เป็นการจำลองเพื่อให้ได้ปริมาณการใช้พลังงานใน 1 ปี ซึ่งครอบคลุมทั้งช่วงที่อากาศร้อน และ เย็นที่สุด โดยจำลองภายใต้สภาพอากาศเฉลี่ยกรุงเทพมหานคร ใน โปรแกรม Visual DOE 4.1 โปรแกรมดังกล่าวได้รับการพัฒนาจากโปรแกรม Visual DOE 2.0 ที่ใช้เวลาพัฒนามากว่า 10 ปี ทำให้มีความแม่นยำ และ Visual Doe4.1 ยังเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับจากเกณฑ์ LEED ให้ใช้ในการจำลองเพื่อหาปริมาณการใช้พลังงานได้¹⁷

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุด้วยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยผลที่ได้เป็นปริมาณพลังงานที่ใช้ใน 1 ปี เพื่อศึกษาปัจจัยที่อาจส่งเสริมประสิทธิภาพของวัสดุที่ใช้ และรูปแบบของอาคารที่เหมาะสมต่อการใช้วัสดุในการป้องกันความร้อน

¹⁷ ASHRAE, *Ashrae Handbook Fundamentals*.



ภาพที่ 3.4 แสดงหน้าต่างกรอกข้อมูลของโปรแกรมในการจำลอง

ลักษณะของอาคารที่ใช้ในการจำลอง

ตัวแปรควบคุมเป็นวัสดุที่ไม่มีคุณสมบัติป้องกันความร้อนโดยเฉพาะ เพื่อให้ผลการประหยัดพลังงานเป็นผลที่ได้ที่ได้จากการป้องกันความร้อนผ่านหลังคาเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรควบคุมในการทดลอง

รายการ	วัสดุ	รายละเอียด
เพดาน	ยิปซัมบอร์ด	สูงจากพื้น 3 เมตรและมีพื้นที่เหนือฝ้า 1 เมตร
ผนัง	คอนกรีตบล็อก	หนา 10 เซนติเมตร ฉาบเรียบ
พื้น	คอนกรีตเสลอป	หนา 10 เซนติเมตร
ช่องเปิด	กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร 1 แผ่น	ไม่มีแผงบังแดดใดๆ
หลังคา	เมทัลชีท	เป็นรูปแบบเพิงหมาแหงน
รูปทรงของอาคาร	-	สี่เหลี่ยมจัตุรัส
อาคารข้างเคียง	-	การจำลองไม่มีเงาจากอาคารข้างเคียง

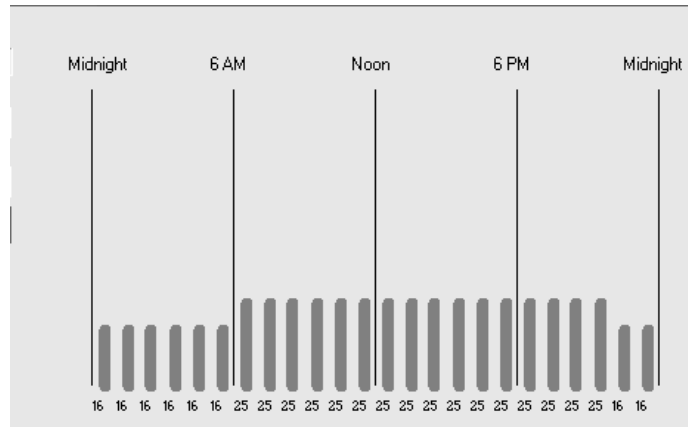
เนื่องจากต้องการจำลองเพื่อหาความแตกต่างของปริมาณพลังงานที่ใช้ในอาคาร มีตัวแปรต้นแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เกิดจากการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อน และส่วนองค์ประกอบอื่นของอาคารโดยที่กรณีจำของเริ่มต้น(Base case) มีลักษณะเป็นอาคารชั้นเดียวเพราะอาคารที่ได้รับผลจากตัวแปรต้น มีเพียงชั้นที่อยู่ติดกับหลังคา ในขณะที่ชั้นถัดลงมาไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

มีกรณีในการจำลองดังนี้
ตารางที่ 3.2 แสดงกรณีศึกษาในการจำลอง

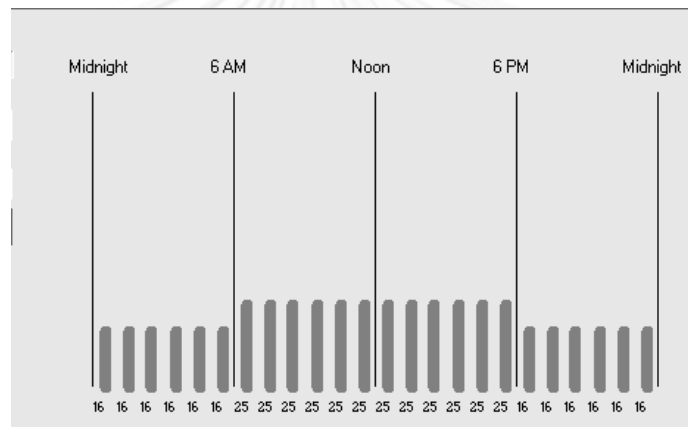
ทิศทางอาคาร(AZIMUTH)	อัตราส่วน หน้าต่างต่อ ผนัง(%)	ความชัน หลังคา (°)	พื้นที่ (ตร.ม.)	การใช้งาน	การป้องกัน ความร้อน
0	0	0	200	office	กรณีควบคุม
45					
90	25	5	400		ฉนวน
135					
180	50	10	600	retail	สีผสม อนุภาคเซรามิก
225					
270	75	15	800		สีผสม อนุภาคซิลิกา
315					

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของอาคารสำนักงานที่ใช้ในการทดลอง

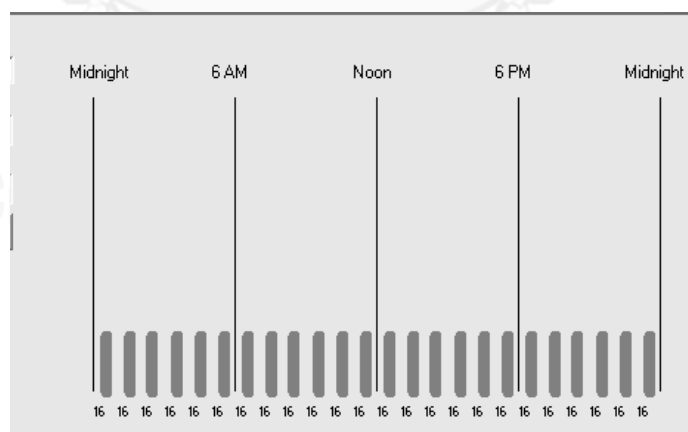
คุณสมบัติ	รายละเอียด
LPD (W/m^2)	21.5
EPD (W/m^2)	8.1
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ($m^2/คน$)	25.6
อุณหภูมิในการทำความเย็น ($^{\circ}C$)	23.9
Sensible Heat Gain (W/คน)	67.4
Latent Heat Gain (W/คน)	55.7



ภาพที่ 3.5 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารสำนักงาน



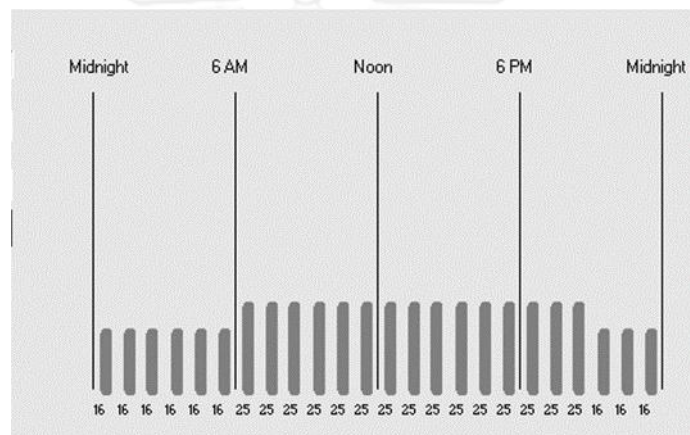
ภาพที่ 3.6 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารสำนักงาน



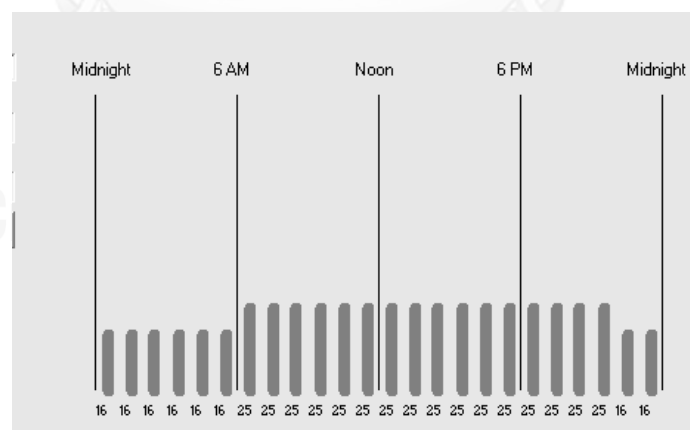
ภาพที่ 3.7 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารสำนักงาน

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของอาคารร้านค้าที่ใช้ในการทดลอง

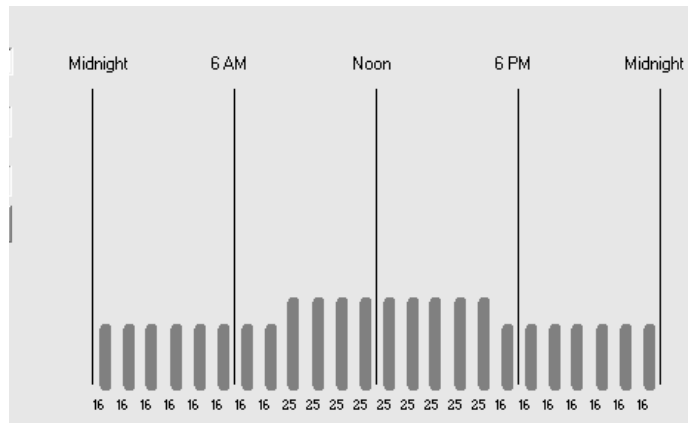
คุณสมบัติ	ลายละเอียด
LPD (W/m^2)	29.1
EPD (W/m^2)	2.7
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ($m^2/คน$)	27.6
อุณหภูมิในการทำความเย็น ($^{\circ}C$)	23.3
Sensible Heat Gain (W/คน)	67.4
Latent Heat Gain (W/คน)	55.7



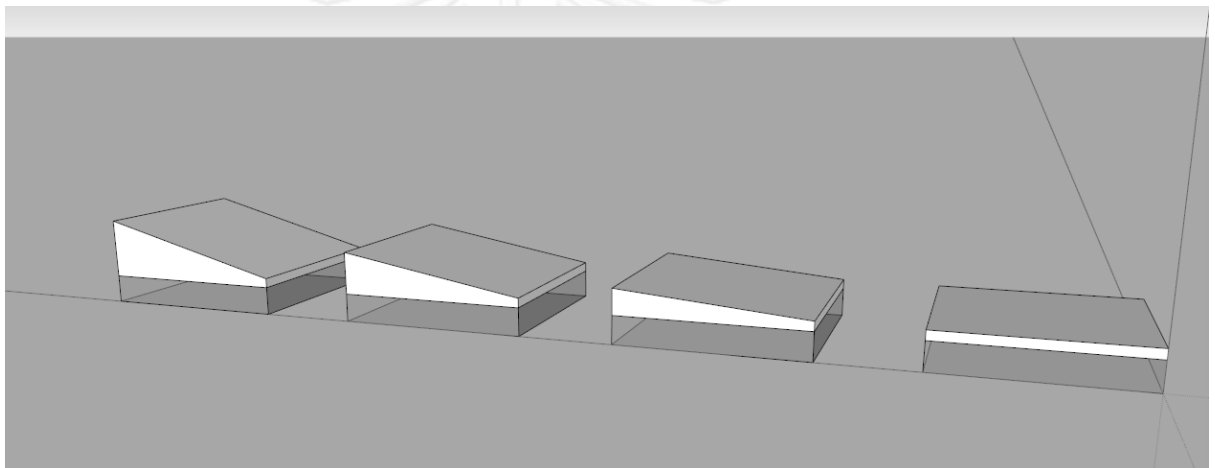
ภาพที่ 3.8 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารร้านค้า



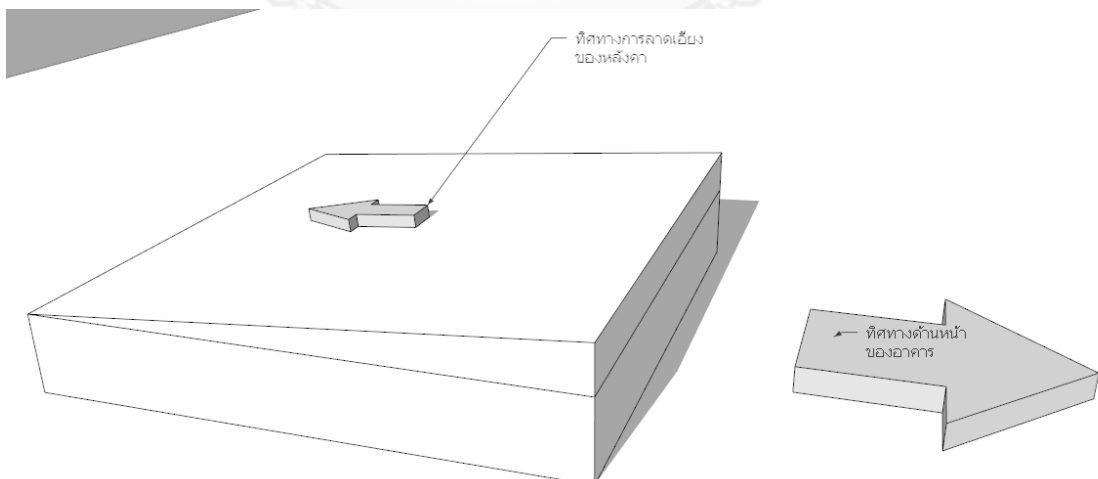
ภาพที่ 3.9 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารร้านค้า



ภาพที่ 3.10 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารร้านค้า



ภาพที่ 3.11 แสดงมุมเงยของหลังคาที่ใช้ในการจำลอง 15°, 10°, 5° และ 0° ตามลำดับ



ภาพที่ 3.12 การกำหนดทิศทางการวางตัวของอาคาร

3.1.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์ โดยจัดการให้อยู่ในรูปตารางและแผนภูมิ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้วัสดุป้องกันความร้อนแต่ละชนิดแสดงประสิทธิภาพออกมา โดยผลที่นำมาวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของปริมาณพลังงานที่ใช้ และ ร้อยละของพลังงานที่สามารถประหยัดได้ เพื่อนำมาสร้างแนวทาง ในการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนในกรณีต่างๆ

3.1.6 คำนวณความคุ้มค่าทางการเงิน

การลงทุนในการติดตั้งวัสดุป้องกันความร้อน หรือการปรับปรุงอาคารเพื่อการป้องกันความร้อน จัดอยู่ในการลงทุนประเภทการลงทุนเพื่อความปลอดภัย หรือโครงการสิ่งแวดล้อม ซึ่งมักเป็นโครงการที่สร้างขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามกฎหมายที่รัฐบาลบังคับใช้ หรือ กฎเกณฑ์ ที่มีการตกลงร่วมกัน เพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่นเกณฑ์ประหยัดพลังงานต่างๆ แต่โครงการที่ช่วยให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานลงได้ สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าทางการเงินได้ด้วยเช่นกัน ในการวิจัยครั้งนี้ ได้เลือกใช้เครื่องมือในการประเมิน 3 อย่างด้วยกัน คือ

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
2. ระยะเวลาคืนทุนแบบคิดลด
3. อัตราผลตอบแทน

3.1.6.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value)

คือผลต่างของมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดไหลเข้าและไหลออกของโครงการ โดยใช้ในการคิดแบบกระแสเงินสดแบบคิดลด(Discounted cash flow) โดยมีสมการดังนี้

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

โดยที่

n = เวลา(ปี)

C = กระแสเงินสด ในกรณีการวิจัยครั้งนี้ กระแสเงินสดได้จากการนำราคาค่าวัสดุ และค่าติดตั้งมาใช้เป็นเงินลงทุนครั้งแรก มีเงินสดเข้าเป็นค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ในแต่ละปี

R = อัตราลด ในการวิจัยครั้งนี้ใช้อัตราเงินเฟ้อทั่วไปของประเทศไทย จากรายงานนโยบายการเงิน ธนาคารแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2555 ซึ่งก็คือ 3%

3.1.6.2 ระยะเวลาคืนทุนคิดลด (Discounted payback period)

คือระยะเวลาที่คาดว่ากระแสเงินสดรับสุทธิเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น โดยกระแสเงินสดในแต่ละปีมีการคิดลดมูลค่าตามที่เรากำหนด ในกรณีใช้เป็นอัตราเงินเฟ้อของปี พ.ศ. 2555

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นการวิเคราะห์ โครงการ โดยดูจากระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด เพราะจะทำให้ผู้ลงทุนมีความเสี่ยงจากการลงทุนน้อยที่สุดด้วย แต่อย่างไรก็ตามการ

วิเคราะห์การลงทุนโดยใช้ระยะเวลาการลงทุนเพียงอย่างเดียวไม่เหมาะสมนักต้องใช้เครื่องมืออื่น ๆ ประกอบด้วย

3.1.6.3 อัตราผลตอบแทน (Internal rate of return)

เป็นอัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับเงินลงทุน หรือก็คืออัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันเท่ากับ 0 โดยใช้การคำนวณจากตารางกระแสเงินสดเช่นเดียวกับมูลค่าปัจจุบัน

3.1.7 สรุปแนวทางในการเลือกใช้วัสดุ

เมื่อได้ผลการใช้พลังงาน และ ผลความคุ้มค่าในการลงทุนแล้ว ก็จะมีการวิเคราะห์แนวทางในการเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนในอาคารในกรณีต่างๆ¹⁸

3.2 เครื่องมือในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

การวัดอุณหภูมิของวัสดุในการทดลองมีให้เลือกใช้หลายชนิด เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบกระดาษ เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ฯลฯ แต่การเก็บข้อมูลปริมาณมาก และ ใช้เวลายาวนาน ทำให้จำเป็นต้องเลือกใช้เครื่องวัด และ บันทึกข้อมูล (Data Logger)

เครื่องมือที่ใช้วัดและเก็บบันทึกข้อมูลในการทดลองนี้คือ Hobo data logger และ หัวตรวจวัด (sensory probe) ทำการเก็บค่าอุณหภูมิวัสดุ และ อากาศที่จำเป็นต้องการนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานของวัสดุ



ภาพที่ 3.13 แสดงลักษณะเครื่อง HOBO data logger

¹⁸ ผศ. กชกร เฉลิมกาญจนาน, การบัญชีการเงิน : Financial Accounting.

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าการสะท้อนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

จากการใช้วิธีวัดค่าการสะท้อนแบบ E1918 Alternative ซึ่งใช้ค่า Irradiance ในการคำนวณ จึงต้องใช้ไพราโนมิเตอร์ในการวัดวัดค่าดังกล่าว ในการทดลองครั้งนี้ได้เลือกใช้ Solar Power Meter spm 1116SD



ภาพที่ 3.14 แสดงลักษณะเครื่อง Pyranometer

3.2.2 โปรแกรมในการจำลองการใช้พลังงาน

การจำลองอาคารในครั้งนี้ เป็นการจำลองเพื่อให้ได้ปริมาณการใช้พลังงานใน 1 ปี ซึ่งครอบคลุมทั้งช่วงที่อากาศร้อน และ เย็นที่สุด โดยจำลองภายใต้สภาพอากาศเฉลี่ยกรุงเทพมหานคร ในโปรแกรม Visual DOE 4.1

บทที่ 4 ผลการทดลอง

ผลจากการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือผลจากการหาค่าคุณสมบัติของวัสดุ ซึ่งเป็นผลจากกล่องทดลอง และการทดสอบค่าของวัสดุจริง ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ และผลจากการคำนวณเพื่อหาความคุ้มค่าของวัสดุ

4.1 ผลการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติความต้านทานของวัสดุฉนวน(Thermal Resistance) วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ ฉนวนใยแก้วหนา 50 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าความต้านทานนี้จะคำนวณได้จากสมการคำนวณปริมาณความร้อน¹⁹

$$Q = 1.08 * CFM * (T_{out} - T_{in})$$

$$Q = 1/R_{total} * A * (T_{exterior} - T_{interior})$$

โดยที่

Q คือ พลังงานความร้อน (Btu/hr.)

CFM คือ ค่าการระบายอากาศของกล่องทดลอง มีหน่วยเป็นลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ft³/min)

T_{out} คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากลมที่ระบายออกจากกล่องทดลอง (°F)

T_{in} คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากลมนำเข้ากล่องทดลอง (°F)

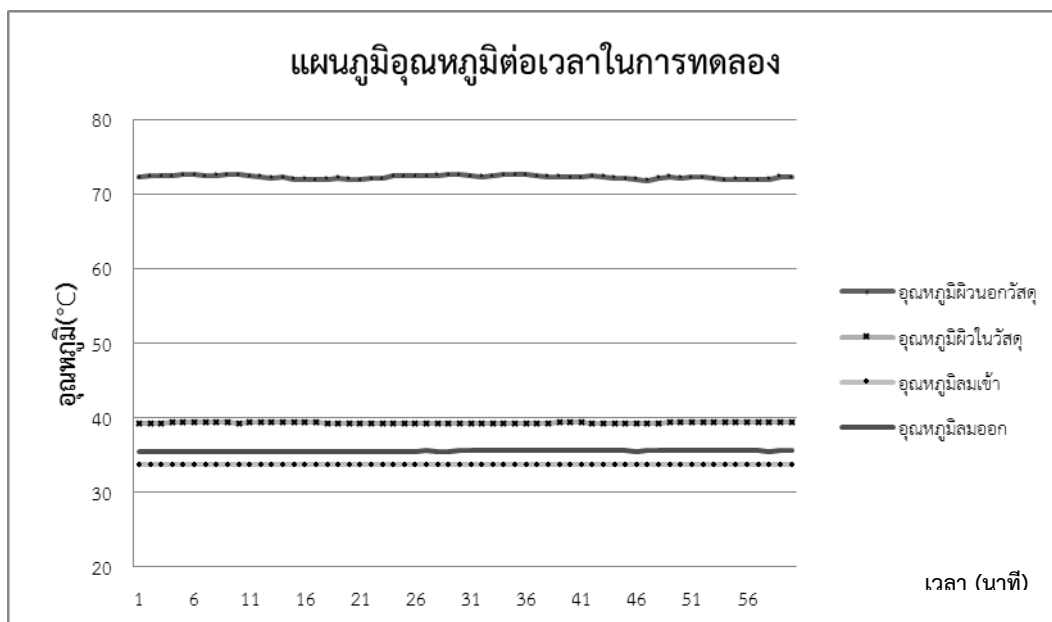
R_{total} คือ ค่าการต้านทานความร้อน (°Fhr./Btu)

$T_{exterior}$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านนอกของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)

$T_{interior}$ คือ อุณหภูมิที่วัดได้จากผิวด้านในของวัสดุที่ต้องการวัด (°F)

A คือ พื้นที่ในการนำความร้อน (ft²) ในการทดลองนี้ ใช้วัสดุขนาด 4 ft² หรือ 0.36 m²

¹⁹ Norbert Lechner, *Heating Cooling Lighting: Design Methods for Architects*.



แผนภูมิที่ 4.1 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองวัสดุฉนวนใยแก้ว

ผลการทดลองการหาค่าความต้านทานความร้อน

$$Q = 1.08 * CFM * (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q &= 1.08 * CFM * (T_{out} - T_{in}) \\ &= 1.08 * (21.17) * (3.24) \\ &= 74.01 \text{ Btu/hr.} \\ &= 21.69 \text{ W.} \end{aligned}$$

$$Q = 1/R_{total} * A * (T_{exterior} - T_{interior}) \quad (2)$$

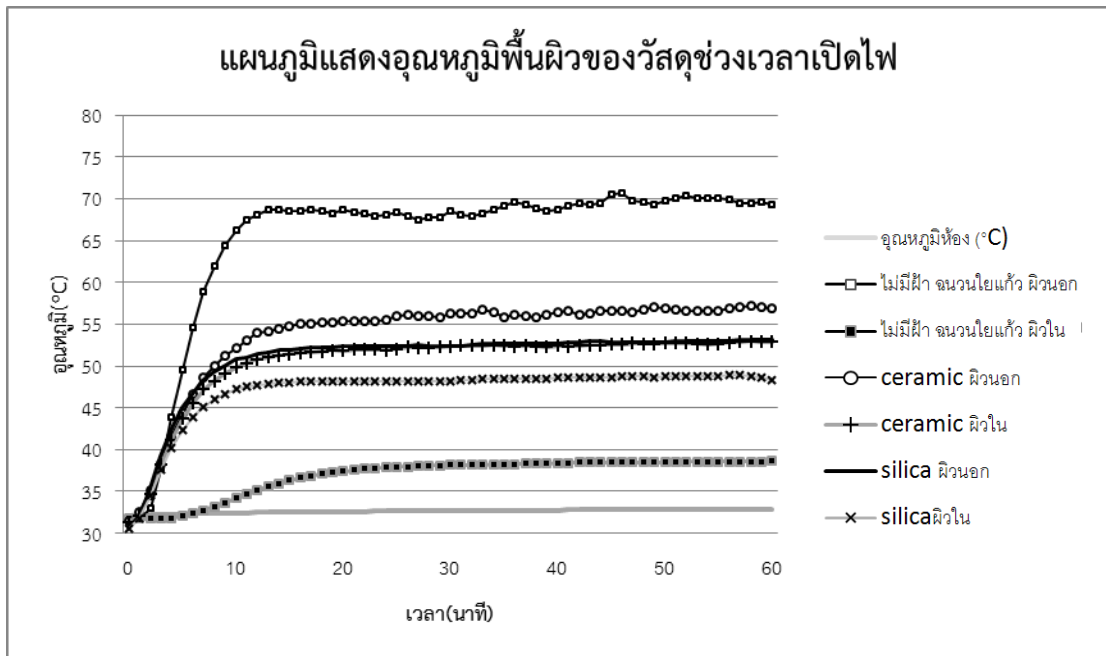
$$21.69 = 1/R_{total} (0.36) (32.54)$$

$$R_{total} = 0.55 \text{ m}^2 \text{ C}^\circ / \text{W.}$$

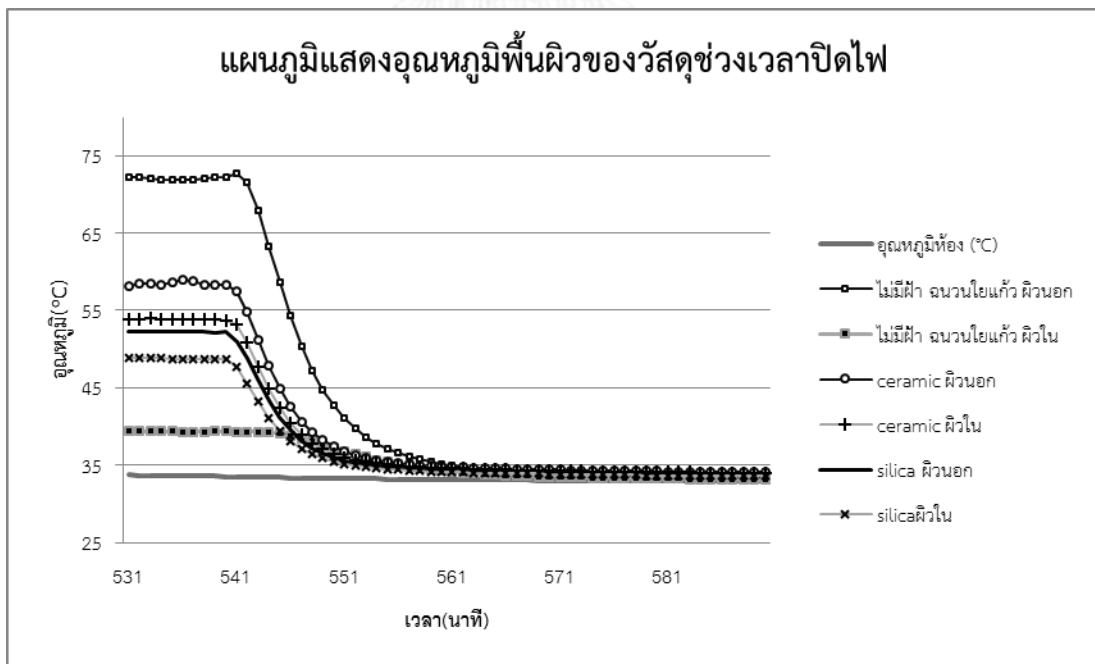
ตารางที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ย และ ค่าความต้านทานที่ได้จากการทดลอง

อุณหภูมิผิวนอกเฉลี่ย (C°)	72.25
อุณหภูมิผิวในเฉลี่ย (C°)	39.32
อุณหภูมิลมเข้าเฉลี่ย (C°)	33.75
อุณหภูมิลมออกเฉลี่ย (C°)	35.54
ผลต่างอุณหภูมิของผิวนอก-ใน	32.93
ผลต่างอุณหภูมิของลมเข้า-ออก	1.80
พื้นที่ (m ²)	0.36
ต้านทานความร้อนเฉลี่ย (m ² C°/W.)	0.55

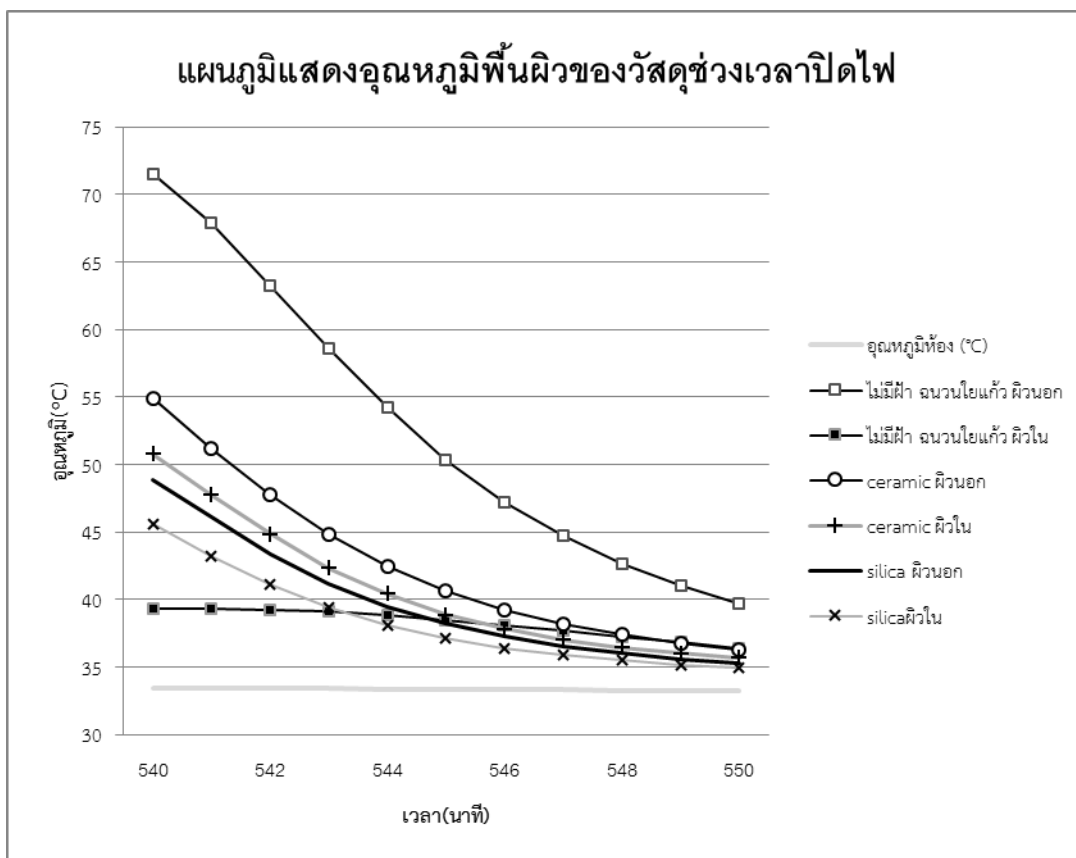
ผลการทดลองลักษณะการถ่ายเทความร้อนของวัสดุฉนวนใยแก้ว



แผนภูมิที่ 4.2 แสดงแผนภูมิอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาเปิดไฟ



แผนภูมิที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาปิดไฟ (นาทีที่ 531-590)



แผนภูมิที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุช่วงเวลาปิดไฟนาทีที่ 540-560

ตารางที่ 4.2 แสดงความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่พื้นผิวภายนอกและภายใน

	ฉนวนใยแก้ว(C°)	ซีเซรามิก(C°)	ซีซิลิกา(C°)
ค่าเฉลี่ยนาทีที่ 1 - 570	23.05	3.03	2.75
ค่าสูงสุด	33.17	4.38	3.93

จากการทดลอง ในช่วงเวลาที่อุณหภูมิของกล่องทดลองมีความคงที่ แผ่นเมทัลชีทที่มีฉนวนใยแก้วมีอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกสูงที่สุด รองมาคือ เมทัลชีทเคลือบเซรามิก และ ซีซิลิกา ตามลำดับ ในส่วนอุณหภูมิ ผิวด้านใน เมทัลชีทเคลือบซีเซรามิกมีอุณหภูมิสูงสุด รองลงมาคือเมทัลชีทเคลือบซีซิลิกา และ ผิวด้านในของฉนวนใยแก้วมีอุณหภูมิต่ำสุด เมทัลชีทติดตั้งฉนวนใยแก้วมีความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวนอกและผิวในสูงสุด ส่วนในกรณีของซีเซรามิก และ ซีซิลิกา มีค่าไม่ต่างกันนัก

ช่วงเวลาเริ่มเปิดไฟ ชุดทดลองกรณีสี่สะท้อนความร้อนมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวภายในสู่จุดอุณหภูมิคงที่ในเวลา 15 นาที ในขณะที่ฉนวนใยแก้วใช้เวลาถึง 40 นาที และเมื่อปิดไฟเพื่อปล่อยให้อุณหภูมิลดลง (นาทีที่ 540 เป็นต้นไป) ฉนวนใยแก้วมีการเย็นตัวลงช้ากว่าสี่สะท้อนความร้อนทั้งสองชนิด

4.1.2 ผลการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติการสะท้อนความร้อน (Thermal Reflectance)

จากการวัดค่า ด้วยวิธี E1918A(E1918 Alternative)และคำนวณโดยสมการ

$$R_t = R_b + \frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} (R_w - R_b)$$

โดยที่

I_H คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดท้องฟ้า (W/m^2)

I_1 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีขาวด้าน (W/m^2)

I_2 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุที่คลุมด้วยวัสดุสีดำด้าน (W/m^2)

I_3 คือ ค่าSolar Irradiance ที่ได้จากการวัดวัสดุโดยไม่มีการคลุม (W/m^2)

R_t คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุที่ทำการวัด

R_w คือ ค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีขาวด้าน

R_b คือค่าการสะท้อนความร้อนของวัสดุคลุมสีดำด้าน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการสะท้อนของสีผสมอนุภาคเซรามิก

I_h	$I_{h'}$	$I_1(\text{white})$	$I_2(\text{black})$	I_3	$I_h - I_{h'}$	ค่าการสะท้อน
1536	1530	1110	352	1060	6	85.5657
1546	1536	1106	380	1058	10	85.5529
1530	1546	1108	349	1058	-16	85.5730
					เฉลี่ย	85.5639

จากการทดลองทำให้ได้ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ผสมอนุภาคเซรามิก = **14.4361**

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการสะท้อนของสีผสมอนุภาคซิลิกา

I_h	$I_{h'}$	$I_1(\text{white})$	$I_2(\text{black})$	I_3	$I_{h-h'}$	ค่าการสะท้อน
1300	1310	1009	320	978	-10	87.3251
1315	1330	1011	325	980	-15	87.3086
1295	1300	1005	318	974	-5	87.3141
					เฉลี่ย	87.3159

จากการทดลองทำให้ได้ค่าการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ผสมอนุภาคซิลิกา = **12.6841**

4.2 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 4.5 แสดงกรณีศึกษาในการจำลอง

ทิศทางอาคาร (AZIMUTH)	อัตราส่วนหน้าต่างต่อผนัง(%)	ความชันหลังคา (°)	พื้นที่ (ตร.ม.)	การใช้งาน	การป้องกันความร้อน	
0	0	0	200	office	กรณีควบคุม	
45						
90	25	5	400		retail	ฉนวน
135						
180	50	10	600	สีผสมอนุภาคเซรามิก		
225						
270	75	15	800		สีผสมอนุภาคซิลิกา	
315						

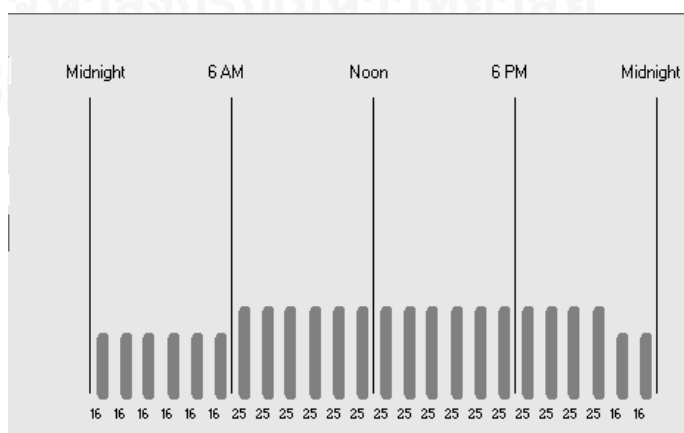
จากตารางแสดงตัวแปรในการทดลองทำให้เราได้กรณีศึกษาออกมาทั้งหมด 4,096 กรณี

ตารางที่ 4.6 แสดงตัวแปรควบคุมในการทดลอง

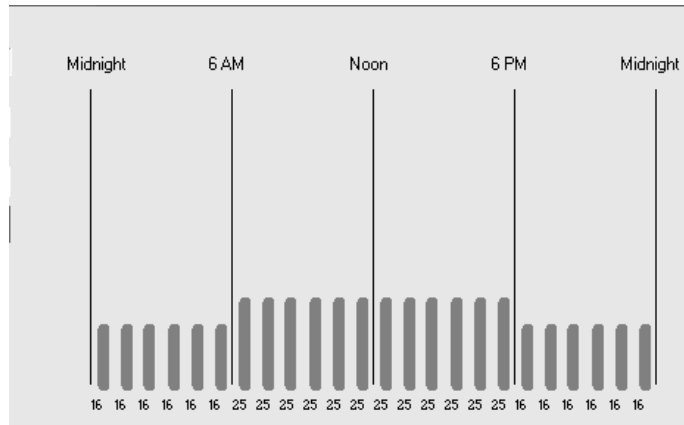
รายการ	วัสดุ	รายละเอียด
เพดาน	ยิปซัมบอร์ด	สูงจากพื้น 3 เมตรและมีพื้นที่เหนือฝ้า 1 เมตร
ผนัง	คอนกรีตบล็อก	หนา 10 เซนติเมตร ฉาบเรียบ
พื้น	คอนกรีตเสลป	หนา 10 เซนติเมตร
ช่องเปิด	กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร 1 แผ่น	ไม่มีแผงบังแดดใดๆ
หลังคา	เมทัลชีท ($\epsilon = 0.9, \alpha = 0.3$)	เป็นรูปแบบเพิงหมาแหงน
รูปทรงของอาคาร	-	สี่เหลี่ยมจัตุรัส
อาคารข้างเคียง	-	การจำลองไม่มีเงาจากอาคารข้างเคียง

ตารางที่ 4.7 แสดงรายละเอียดของอาคารสำนักงานที่ใช้ในการทดลอง

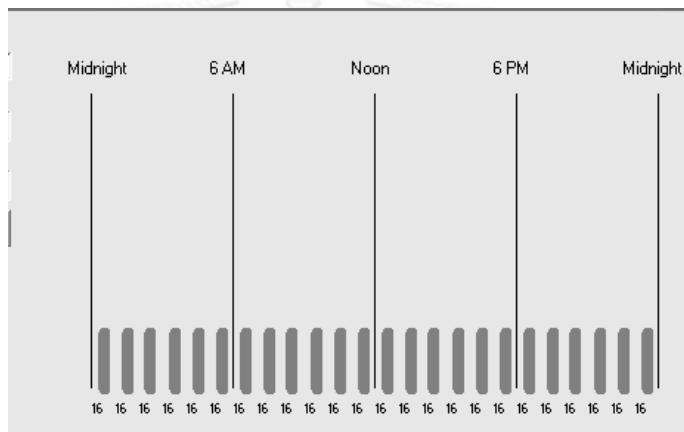
คุณสมบัติ	รายละเอียด
LPD (W/m^2)	21.5
EPD (W/m^2)	8.1
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ($m^2/คน$)	25.6
อุณหภูมิในการทำความเย็น ($^{\circ}C$)	23.9
Sensible Heat Gain ($W/คน$)	67.4
Latent Heat Gain ($W/คน$)	55.7



ภาพที่ 4.1 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารสำนักงาน



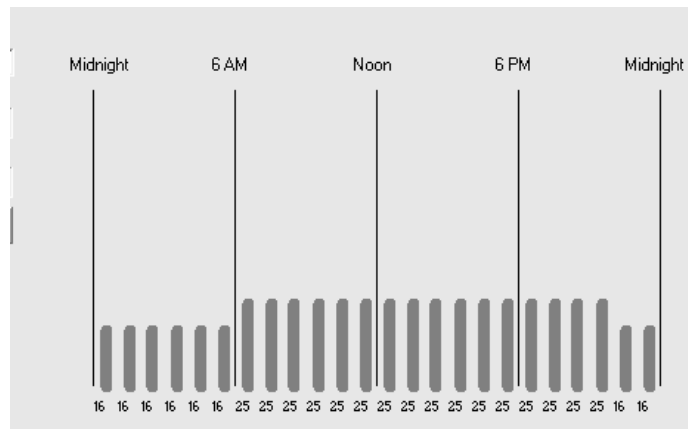
ภาพที่ 4.2 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารสำนักงาน



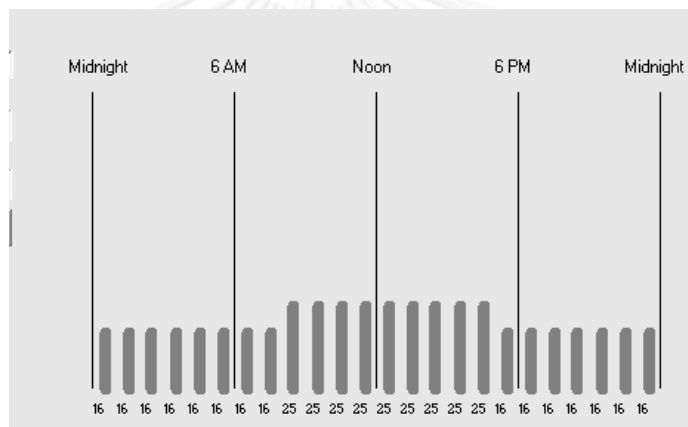
ภาพที่ 4.3 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารสำนักงาน

ตารางที่ 4.8 แสดงรายละเอียดของอาคารร้านค้าที่ใช้ในการทดลอง

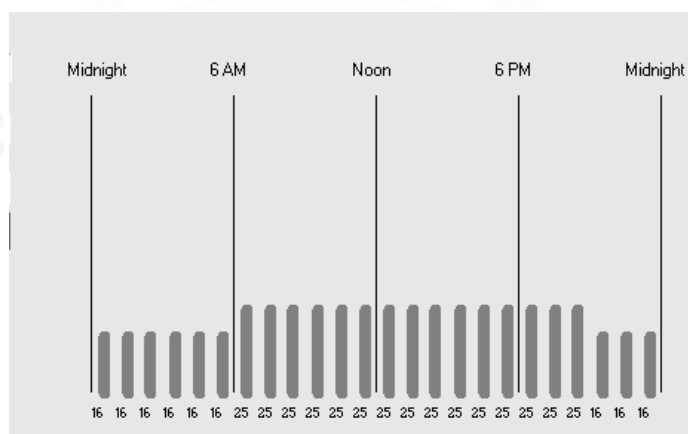
คุณสมบัติ	ลายละเอียด
LPD (W/m^2)	29.1
EPD (W/m^2)	2.7
ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ($m^2/คน$)	27.6
อุณหภูมิในการทำความเย็น ($^{\circ}C$)	23.3
Sensible Heat Gain (W/คน)	67.4
Latent Heat Gain (W/คน)	55.7



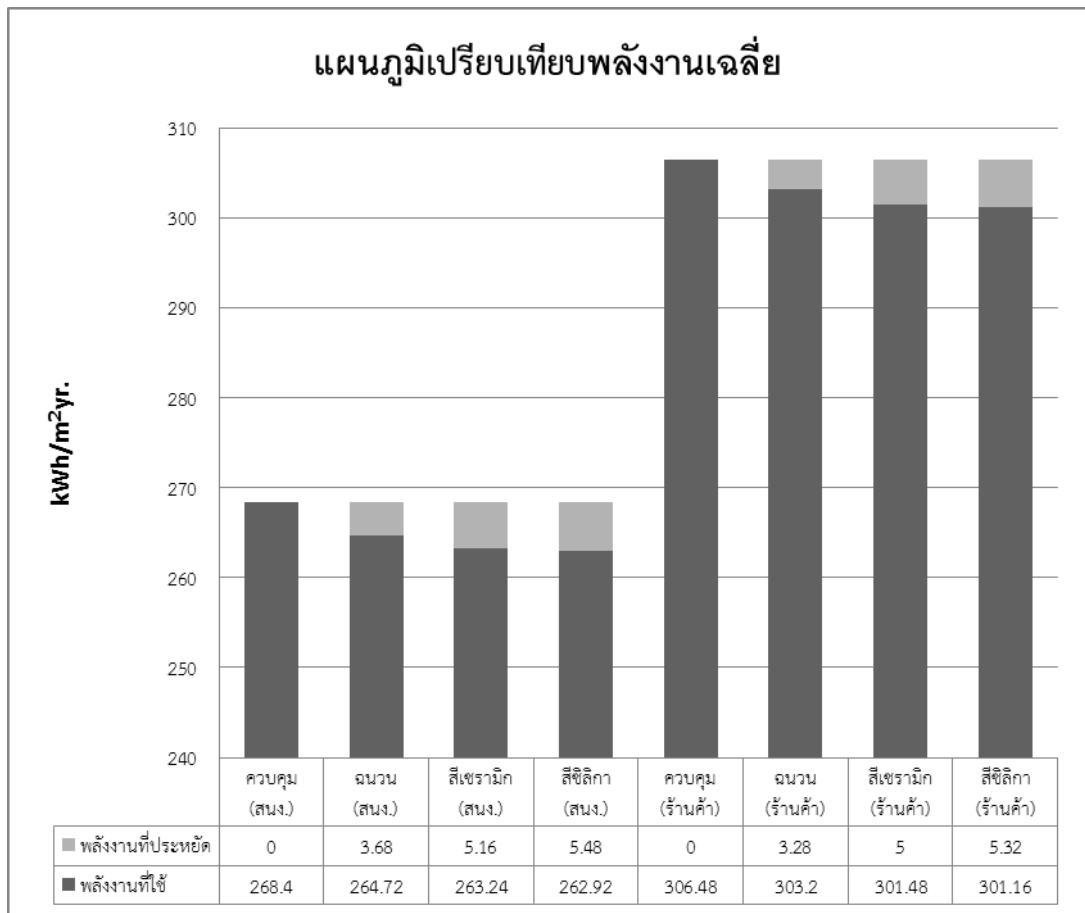
ภาพที่ 4.4 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันธรรมดาของอาคารร้านค้า



ภาพที่ 4.5 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันเสาร์ของอาคารร้านค้า

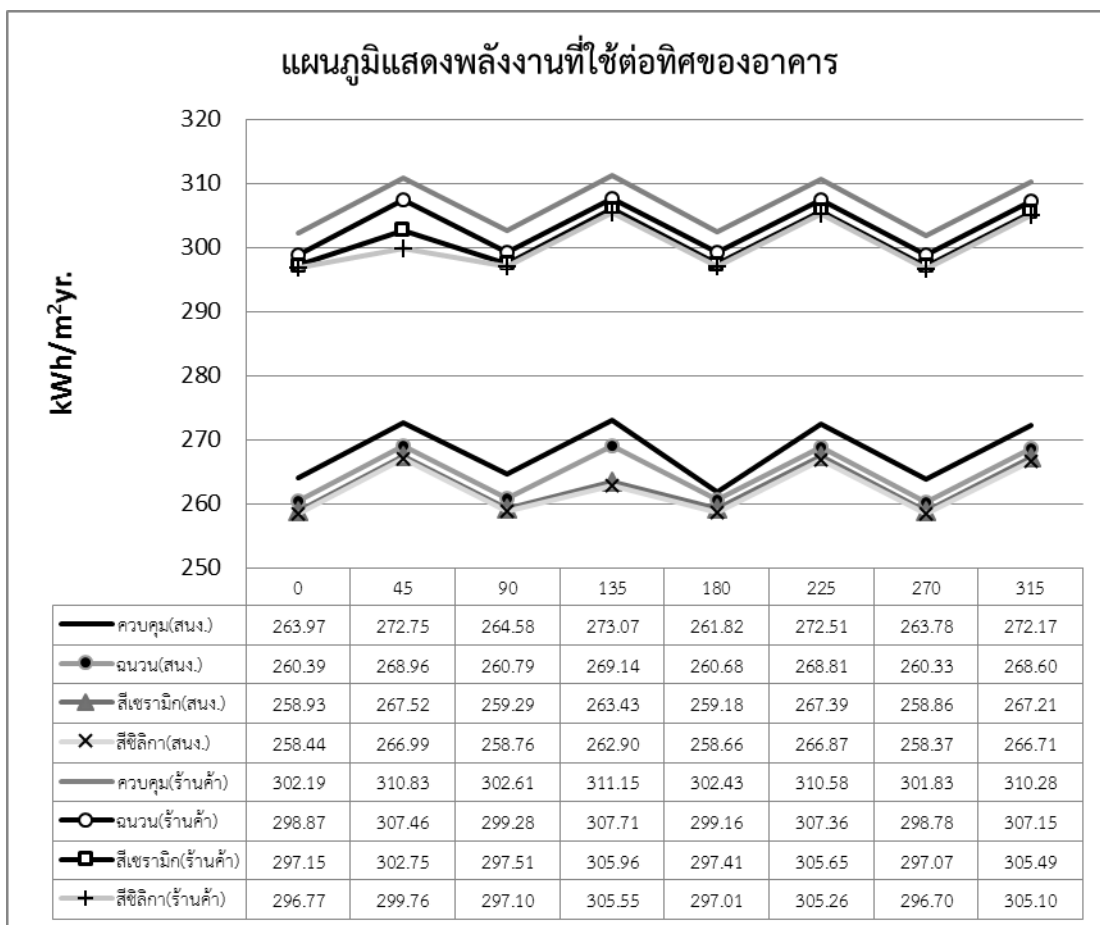


ภาพที่ 4.6 แสดงตารางเวลาอัตราส่วนการใช้พลังงานในวันอาทิตย์ของอาคารร้านค้า



แผนภูมิที่ 4.5 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบพลังงานเฉลี่ย

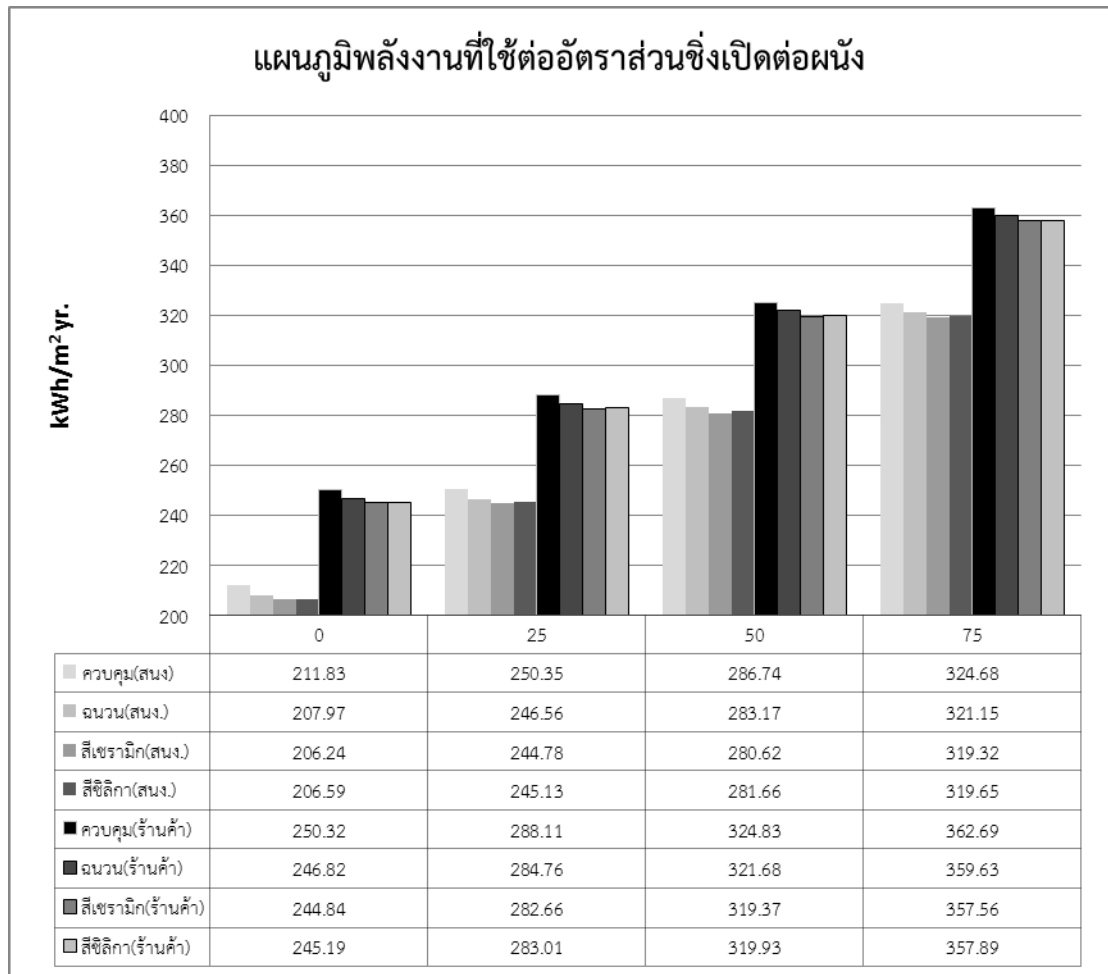
จากกราฟจะเห็นว่าอาคารสำนักงานจะมีการใช้พลังงานน้อยกว่าอาคารพาณิชย์ แต่วัสดุป้องกัน ความร้อนทั้ง 3 ชนิด สามารถแสดงประสิทธิภาพมากกว่าในอาคารสำนักงาน โดยเรียงตามประสิทธิภาพได้เป็น สีสมนุภาคซิลิกา สีสมนุภาคเซรามิก และ ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว จาก มากไปหาน้อย



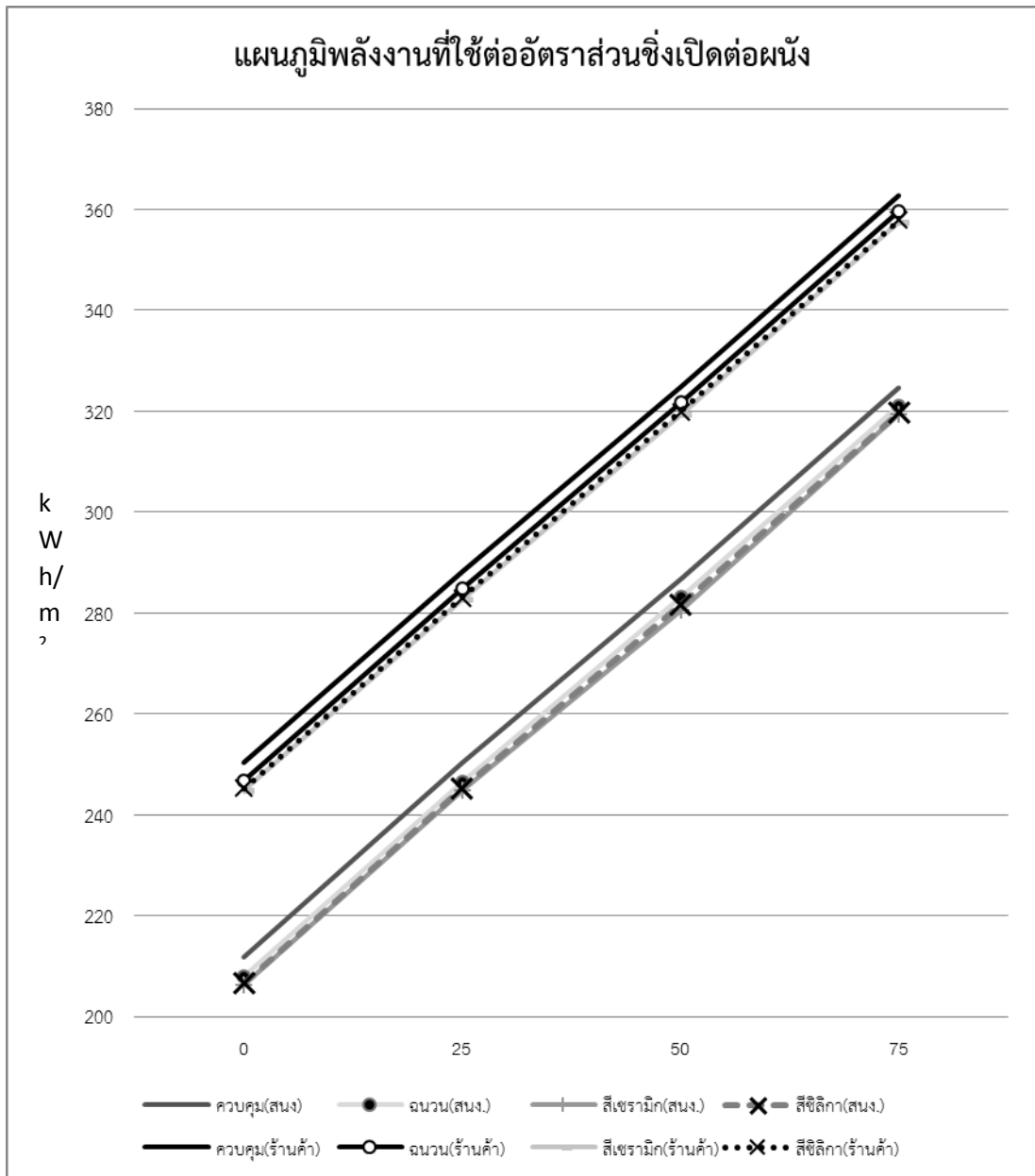
แผนภูมิที่ 4.6 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลอง

จากแผนภูมิจะเห็นว่าทิศทางการวางตัวของอาคารโดยเฉลี่ย มีผลต่อการใช้พลังงาน โดยอาคาร ที่วางตัวในมุม อะซิมุทที่ 0°, 90°, 180° และ 270° มีการใช้พลังงานต่ำกว่า มุม 45°, 135°, 225° และ 315° ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อผนังของอาคารทำมุมไม่ประจันกับแนวทิศตะวันออก และ ตะวันตก จะทำให้พื้นผิวของอาคารได้รับแสงแดดมากขึ้นและ ทำให้ต้องใช้พลังงานในการทำความเย็นเพิ่มขึ้น

ในกลุ่มอาคารที่วางตัวในมุมอะซิมุท 45°, 135°, 225° และ 315° พบว่า กลุ่มอาคารสำนักงาน มีการใช้พลังงานต่ำสุดเมื่ออาคารวางตัวโดยหันหน้าอาคาร (ด้านเงยของหลังคาเพิงหมาแหงน) ไปในมุม อะซิมุท 135° ในขณะที่กลุ่มพาณิชย์จะต่ำสุดเมื่อเป็รมุม 45° โดยที่สาเหตุมาจากอาคารสำนักงานมีการใช้งานในเวลากลางวันเท่านั้น ทำให้การหันแผงหลังคาไปทางตะวันออกเฉียงใต้ มีประโยชน์ในการประหยัดพลังงานมากกว่า ขณะที่อาคารพาณิชย์มีการใช้งานในเวลากลางวันด้วยการหันแผงหลังคาไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้จึงเป็นการป้องกันความร้อนของช่วงบ่ายได้ดีกว่า ส่วนในกลุ่มอาคารที่วางตัวในมุมอะซิมุท ที่ 0°, 90°, 180° และ 270°มีการใช้พลังงานที่ใกล้เคียงกัน

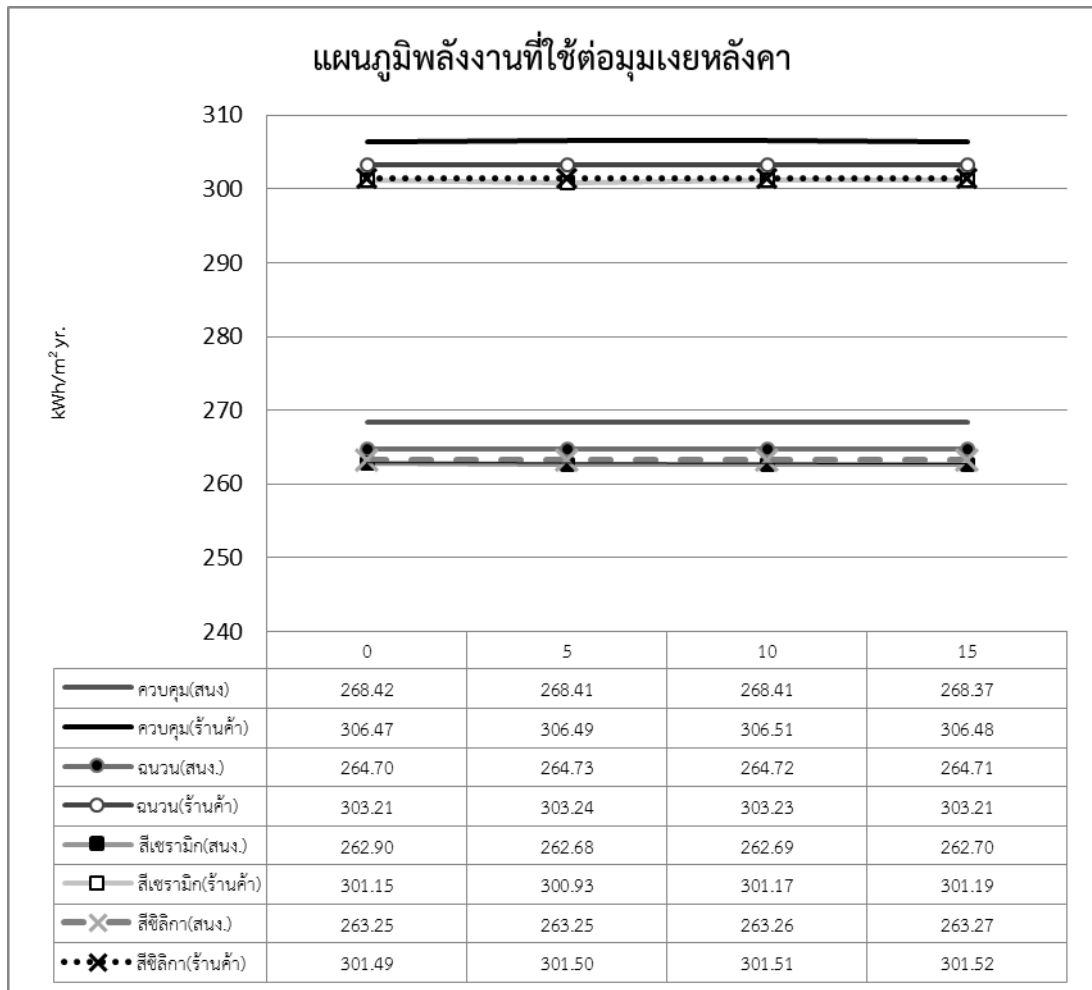


แผนภูมิที่ 4.7 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลองสัดส่วนช่องเปิด



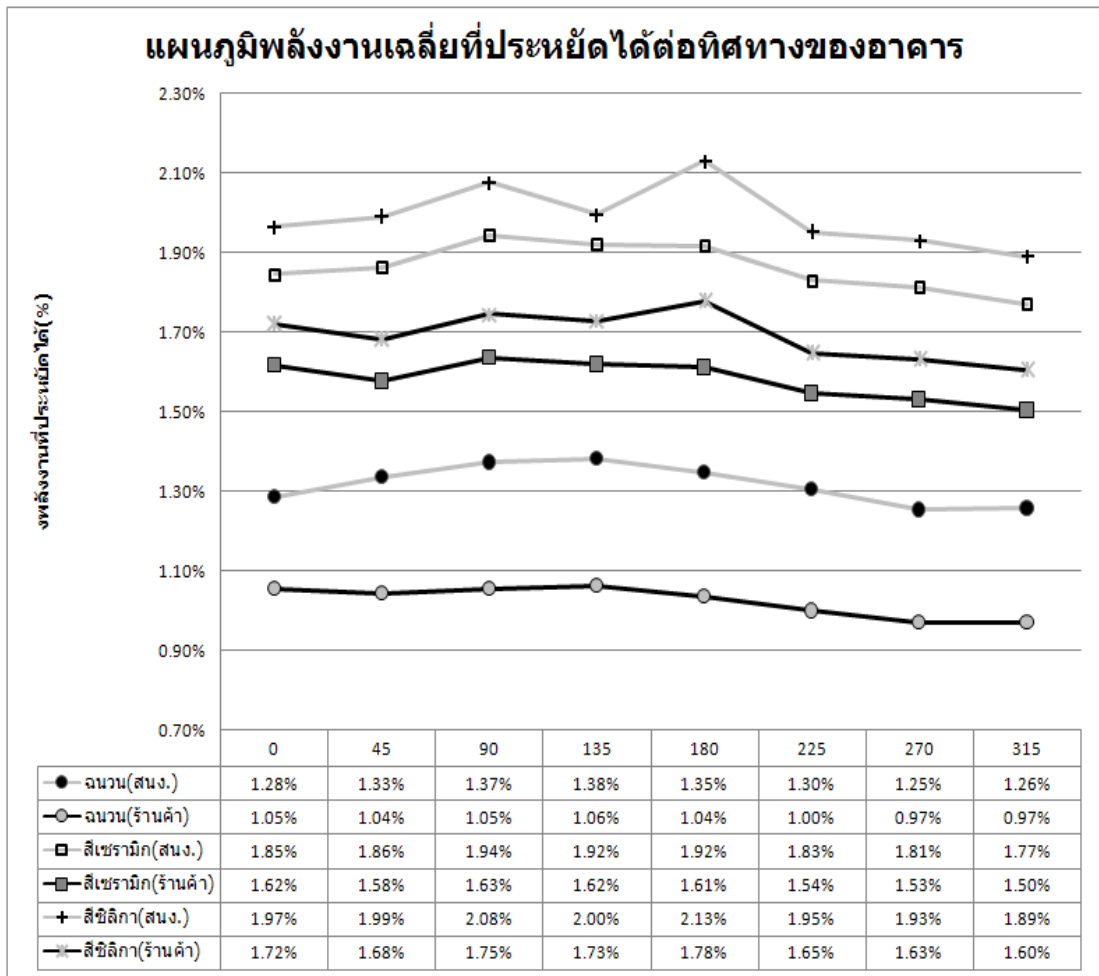
แผนภูมิที่ 4.8 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลองสัดส่วนช่องเปิด

จากแผนภูมิการใช้พลังงานแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนหน้าต่างและผนัง(WWR) อย่างเห็นได้ชัดเพราะเมื่อช่องเปิดเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความร้อนจากช่องเปิดเข้ามาได้มากขึ้นตาม



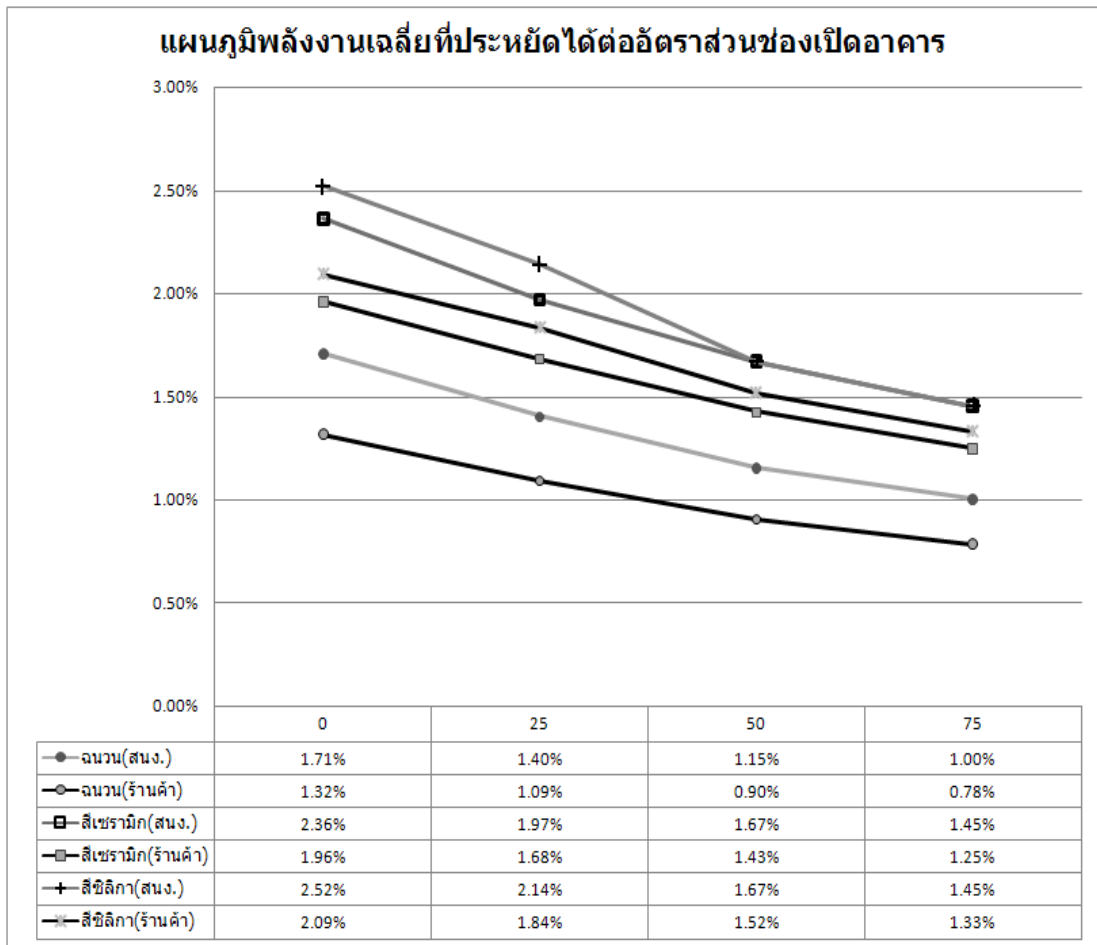
แผนภูมิที่ 4.9 แสดงพลังงานที่ใช้จากผลการจำลอง ต่อมูมเงยหลังคา

จากแผนภูมิ การเพิ่มความชันของหลังคา มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานน้อยมากเพราะมูมหลังคาที่ใช้ในการทดลองเป็นมูมลาดชันต่ำ



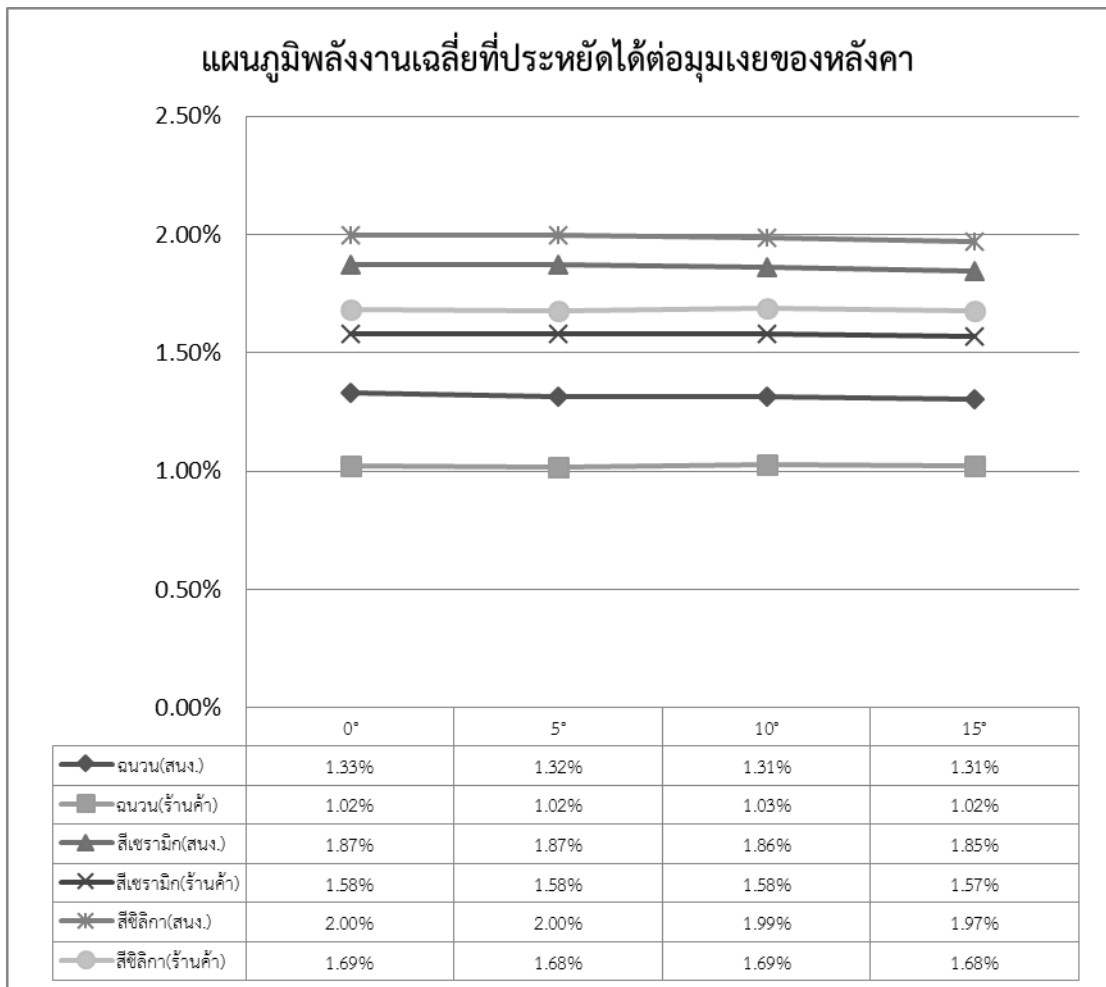
แผนภูมิที่ 4.10 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อทิศทางอาคาร

จากแผนภูมิ ความสัมพันธ์ของทิศทางของอาคารกับพลังงานที่ประหยัดได้ มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มของวัสดุสะท้อนความร้อน และ วัสดุฉนวน โคนวัสดุฉนวนจะมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดในทิศทางมุม อะซิมุท 135° ในขณะที่สีซิลิกาจะประหยัดที่สุดที่มุมอะซิมุท 180° (ทิศใต้) ในขณะที่สีเซรามิกจะประหยัดที่สุดที่มุมอะซิมุท 90° (ทิศตะวันออก) โดยที่อาคารสำนักงานสามารถประหยัดพลังงานเป็นอัตราส่วนที่สูงกว่า



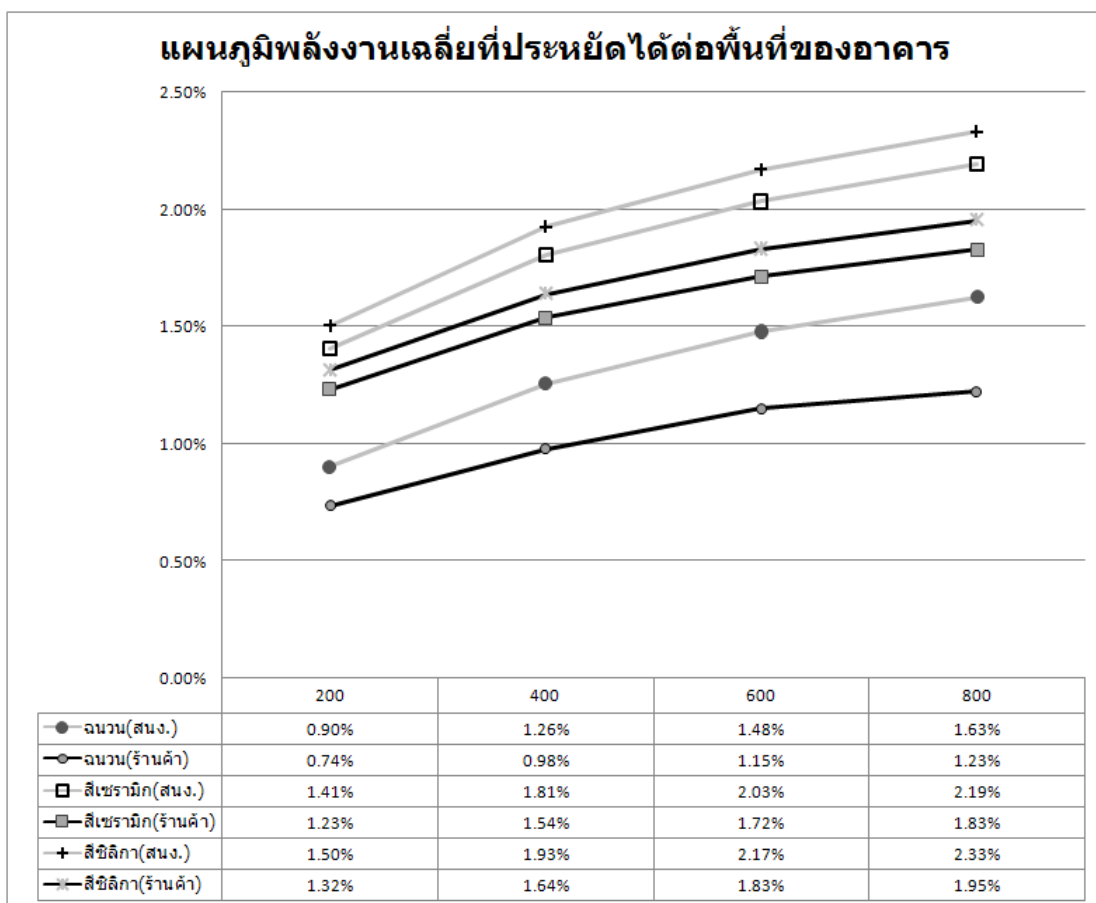
แผนภูมิที่ 4.11 แสดงพลังงานที่ประหยัดต่ออัตราส่วนช่องเปิดอาคาร

จากแผนภูมินี้จะเห็นได้ชัดว่าความสามารถประหยัดพลังงานมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนหน้าต่างอาคาร(WWR) และในกรณีของอาคารสำนักงาน เมื่อช่องเปิดเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการประหยัดพลังงานของวัสดุสะท้อนความร้อนที่นำมาจำลอง ก็จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น เนื่องจากวัสดุป้องกันความร้อนในการจำลองมีการติดตั้งเฉพาะบริเวณหลังคาเท่านั้น เมื่อช่องเปิดมากขึ้น ความร้อนที่เข้ามาในอาคารโดยไม่ผ่านทางหลังคาก็มากขึ้นตาม ทำให้ความสามารถในการป้องกันความร้อนของวัสดุที่ติดตั้งบนหลังคามีประสิทธิภาพลดลง



แผนภูมิที่ 4.12 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อมูเมยของหลังคา

จากแผนภูมิ การเพิ่มความชันของหลังคา มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานที่ประหยัดได้ต่อมูเมยของหลังคา น้อยมาก เป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับกราฟพลังงานที่ใช้ต่อมูเมยของหลังคา



แผนภูมิที่ 4.13 แสดงพลังงานที่ประหยัดได้ต่อพื้นที่ของอาคาร

จากแผนภูมินี้ แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของวัสดุป้องกันความร้อนจะสูงขึ้น เมื่อพื้นที่อาคารเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้เพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรง โดยคณะได้ว่าจะถึงจุดที่กราฟมีความชันเป็น 0 ในที่สุดการที่พื้นที่ใช้งานเพิ่มขึ้นในขณะที่ผิวด้านของอาคารเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้มีสัดส่วนความร้อนที่เข้ามาทางผนังลดลง ความร้อนที่ผ่านเข้ามาทางหลังคาจึงมีสัดส่วนมากขึ้น การป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาจึงมีความสำคัญมากขึ้นไปด้วย

4.3 การคำนวณความคุ้มค่าทางการเงินของวัสดุที่ใช้ในการป้องกันความร้อน

ตารางที่ 4.9 แสดงต้นทุนของการติดตั้งวัสดุ

ราคามูลค่า 2 ปี ต่อตร.ม.(บาท)	ราคาสีเซรา มิก ต่อตร.ม. (บาท)	ราคาสีซิลิกา ต่อตร.ม.(บาท)	ราคาค่าแรง ทาสี ต่อตร.ม.(บาท)	ราคาากลาง ติดตั้ง ต่อตร.ม.(บาท)
58.33	100	430.60	25	15

ตารางที่ 4.10 แสดงพื้นที่ของการติดตั้งวัสดุในกรณีหลังคามุมเงยต่างๆ

มุมเงยหลังคา	อาคาร 200 ตร.ม.	อาคาร 400 ตร.ม.	อาคาร 600 ตร.ม.	อาคาร 800 ตร.ม.
0°	200	400	600	800
5 °	200.70	401.53	602.05	802.81
10 °	203.02	406.17	609.01	812.1
15 °	206.99	414.11	620.92	827.97

4.3.1มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) คือผลต่างของมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดไหลเข้าและไหลออกของโครงการ โดยใช้การคิดแบบกระแสเงินสดแบบคิดลด (Discounted cash flow) โดยมีสมการดังนี้

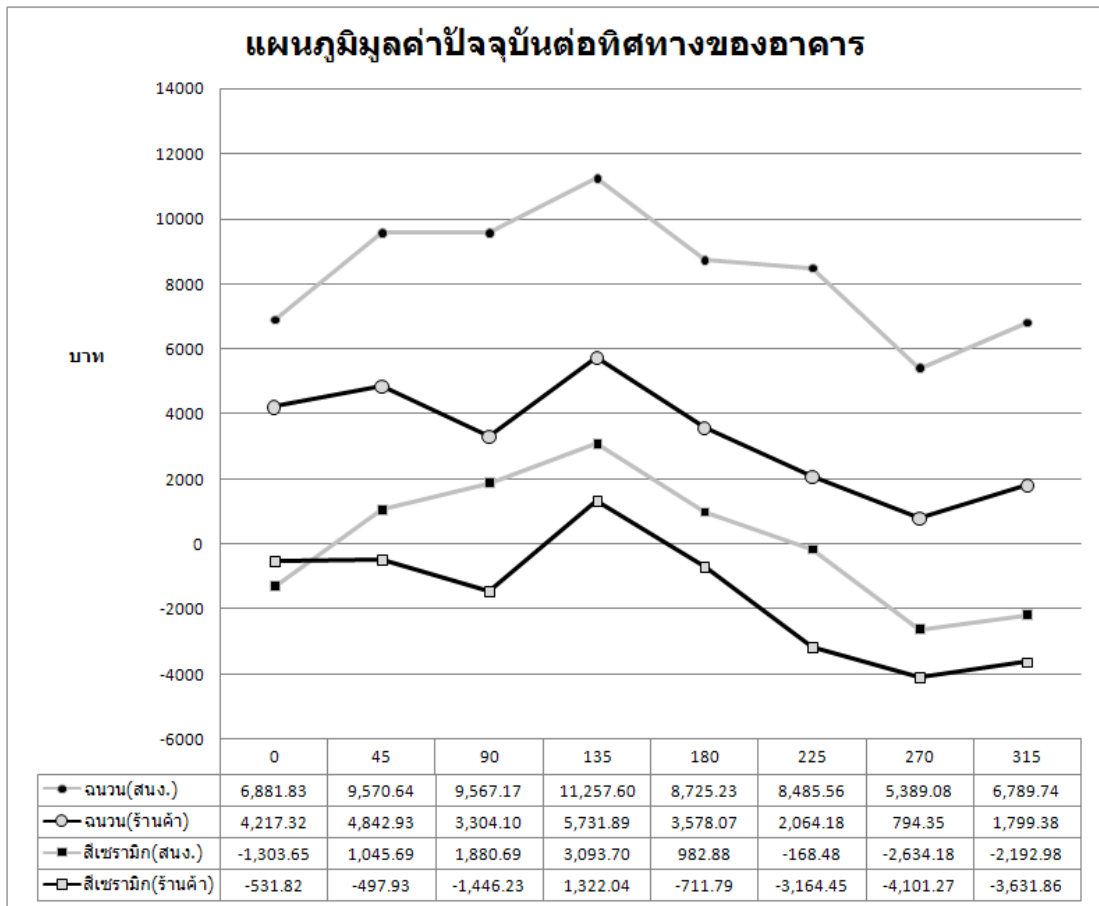
$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

n = เวลา(ปี) ในการคำนวณครั้งนี้ใช้ระยะเวลา 10 ปี

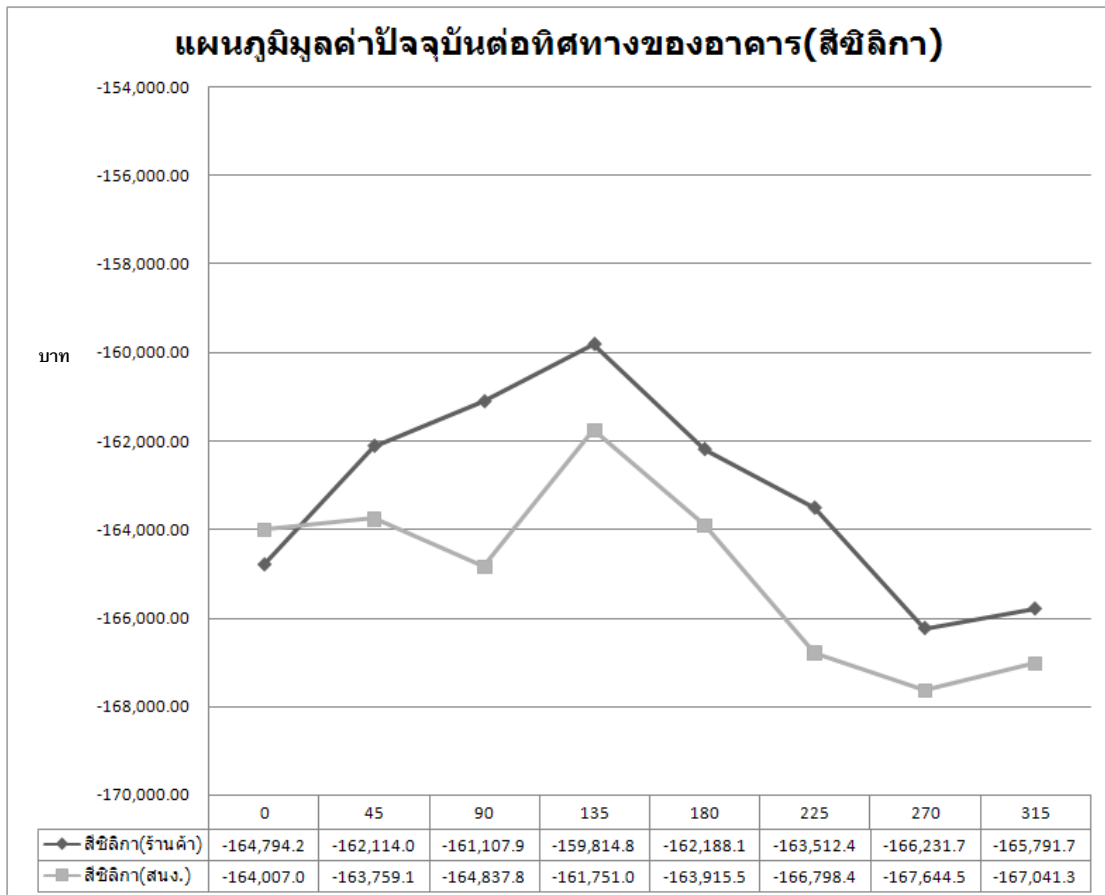
C = กระแสเงินสด

R = อัตราลด

ในการคำนวณครั้งนี้ได้กำหนดระยะเวลา (n) ในการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 10 ปี ซึ่งเป็นอายุการใช้งานขงสี โดยที่กำหนดอัตราลด (R) ให้เท่ากับอัตราเงินเฟ้อของปี พ.ศ. 2555 ซึ่งเท่ากับ 3% อ้างอิงจากธนาคารแห่งประเทศไทย โดยเงินลงทุนในปีแรก = (ค่าวัสดุ + ค่าแรงงานในการติดตั้ง) * พื้นที่ในการติดตั้ง โดยที่วัสดุใด ทำให้มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงสุด ก็ย่อมเป็นการลงทุนที่คุ้มค่ากว่า

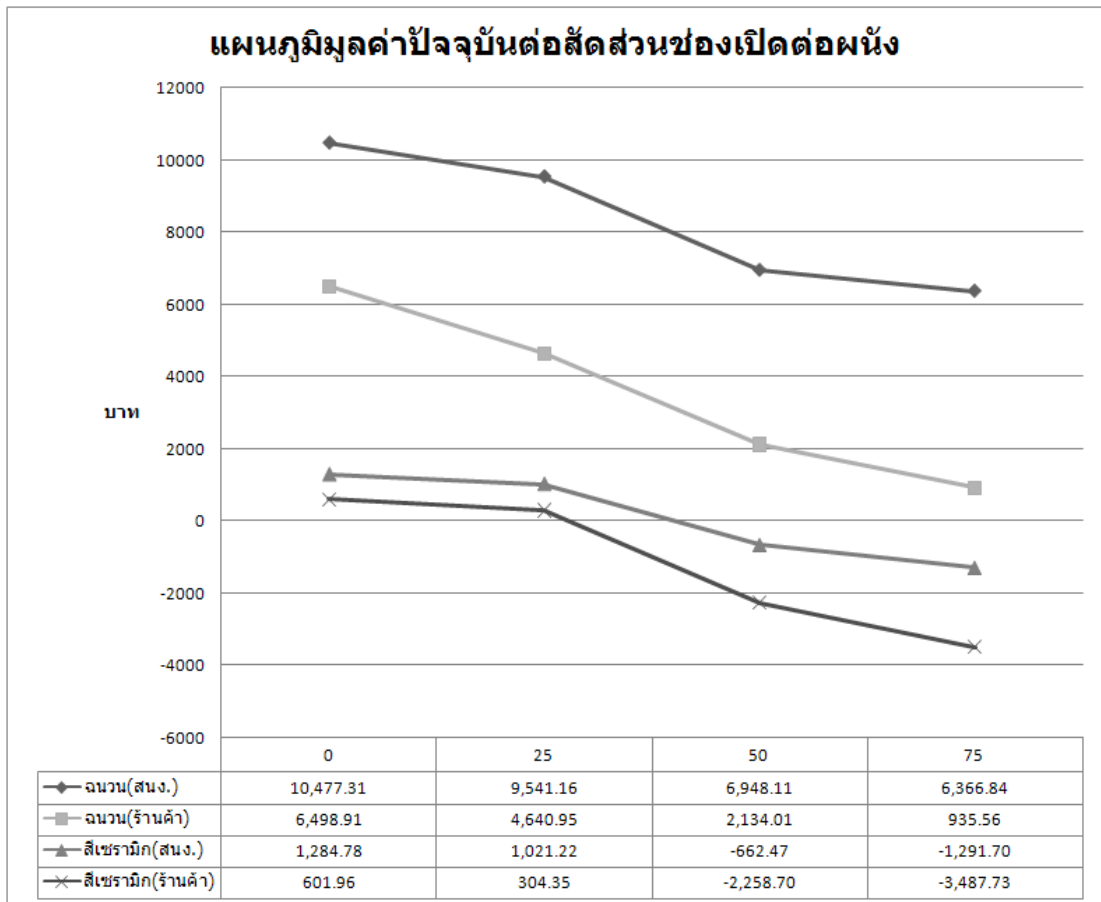


แผนภูมิที่ 4.14 แสดงมูลค่าปัจจุบัน (NPV) ต่อทิศทางของอาคาร (นวนวนใยแก้ว และ สีเซรามิก)

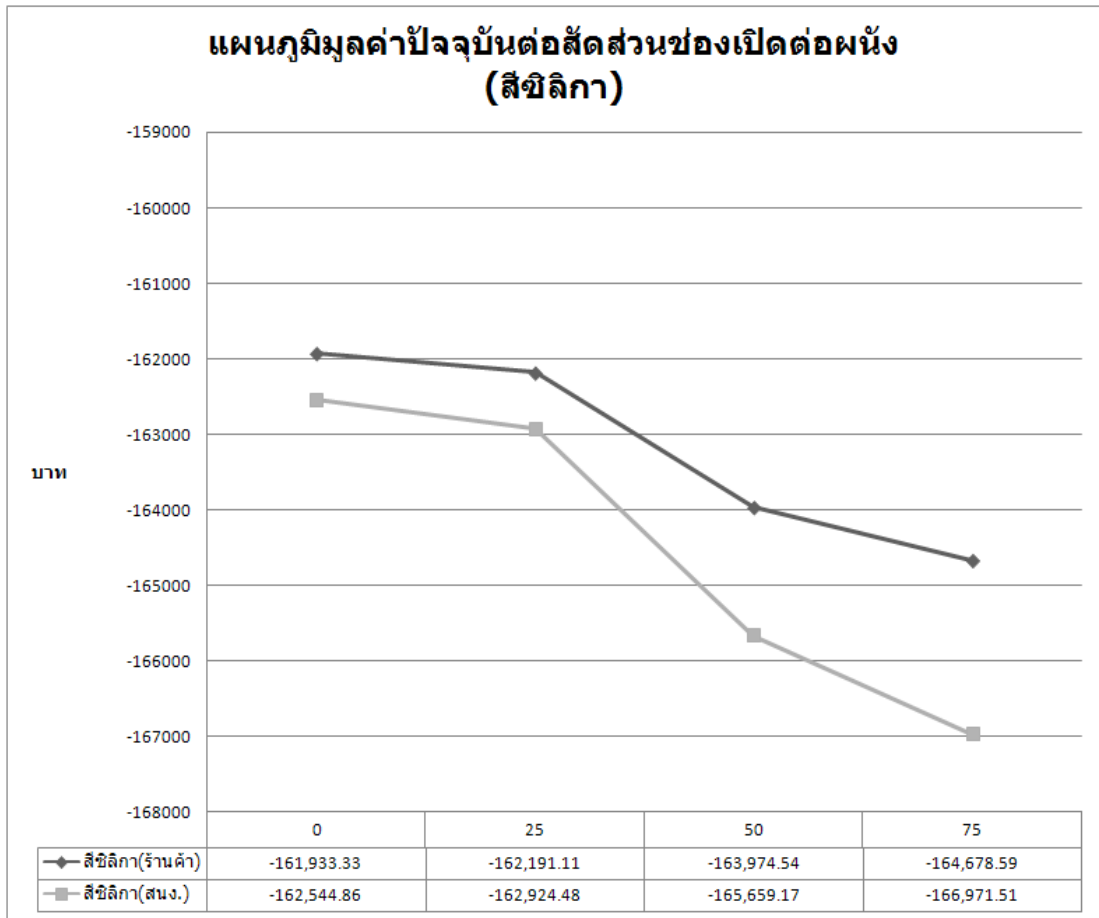


แผนภูมิที่ 4.15 แสดงมูลค่าปัจจุบัน (NPV) ต่อทิศทางของอาคาร (สี่ขลิกา)

การคำนวณในครั้งนี พบว่าค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิของวัสดุสี่ขลิกาต่ำมาก เนื่องจากการลงทุนปีแรกมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าวัสดุอื่นมาก และพบว่าการวางอาคารให้หันหน้าไปทางมุมอะซิมุส 135° มีความคุ้มค่าสูงสุดในทุกวัสดุ แต่สี่ขลิกาทิศตะวันออกมีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิต่ำที่สุด แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงสุดก็ตาม

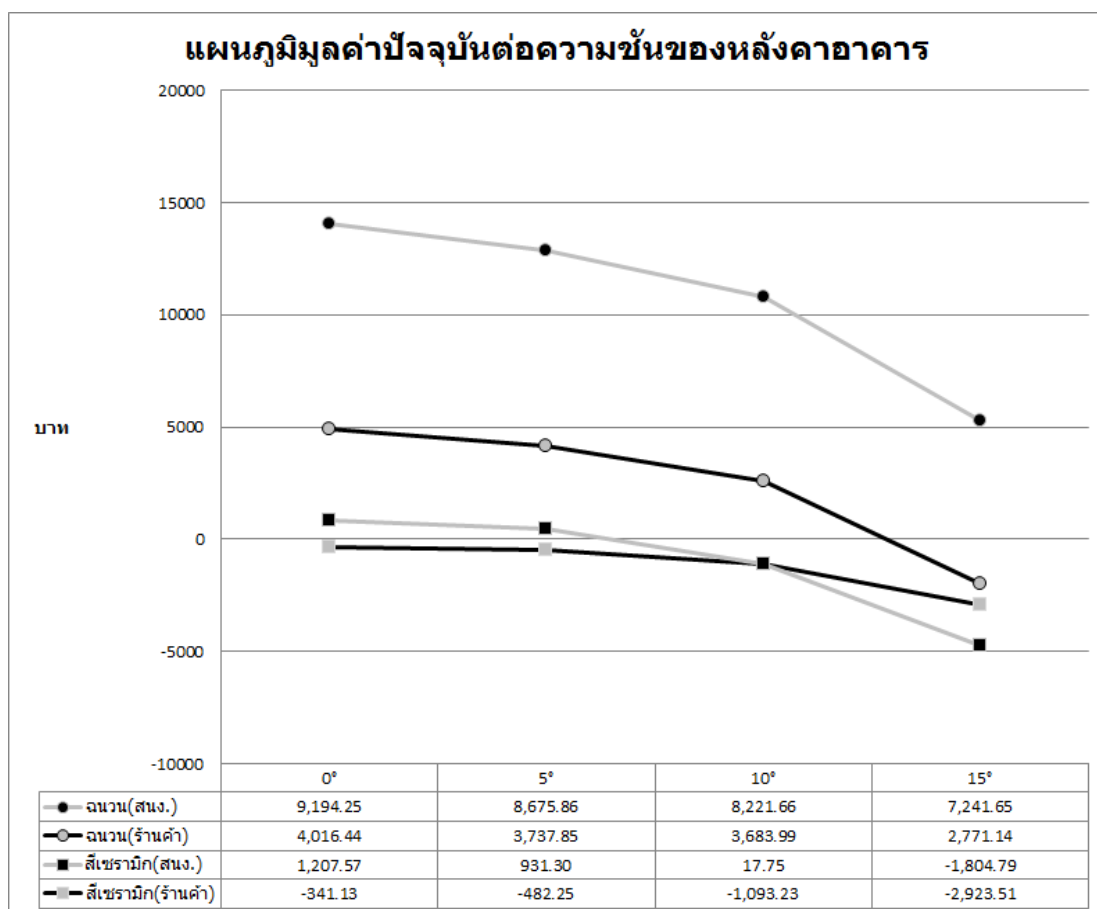


แผนภูมิที่ 4.16 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ต่อสัดส่วนช่องเปิดต่อผนัง (WWR)

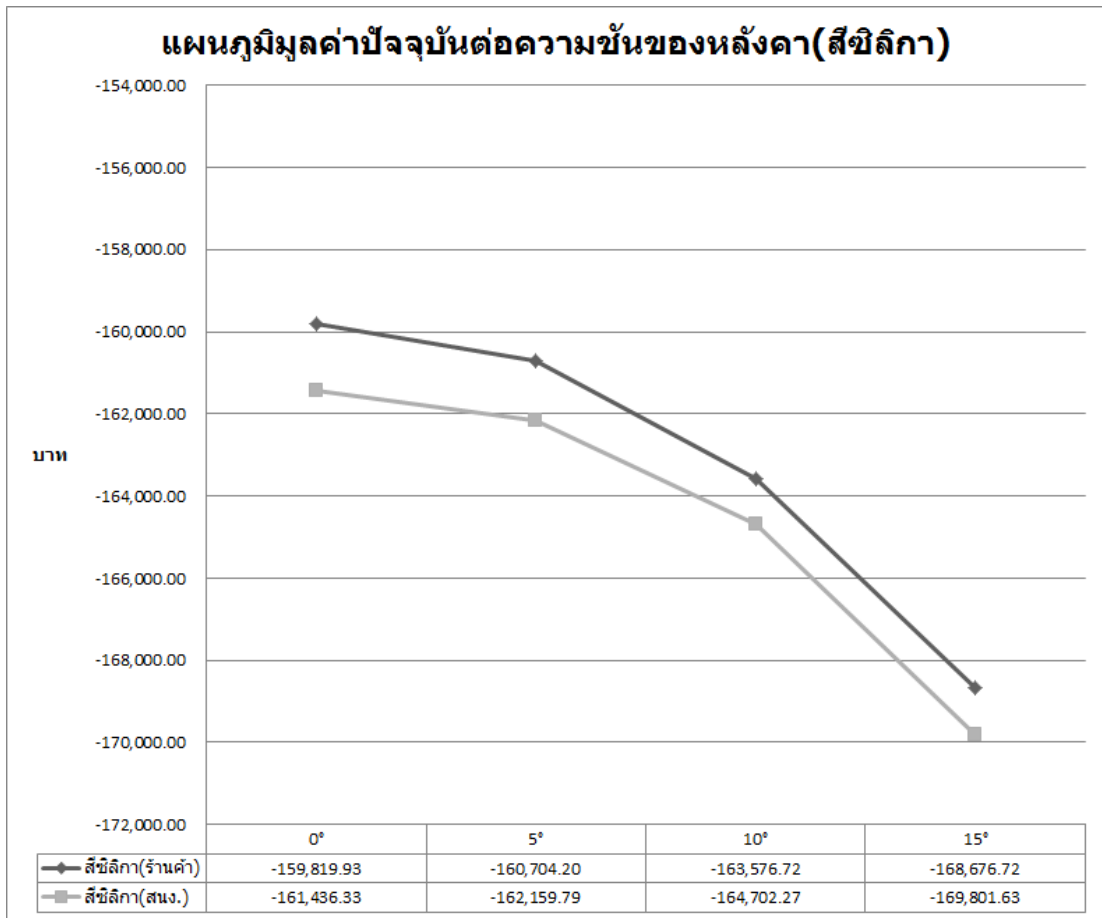


แผนภูมิที่ 4.17 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ต่อสัดส่วนช่องเปิดต่อผนัง (WWR)

จากแผนภูมิแสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อช่องเปิดอาคาร พบว่ามีรูปแบบสอดคล้องกัน ทั้งสามวัสดุ โดยที่กรณีที่มีค่าที่สุดคือกรณีที่ช่องเปิดเป็น ร้อยละ 0 และลดลงจนต่ำสุดที่กรณีที่มีช่องเปิดร้อยละ 75 ซึ่งเป็นอัตราช่องเปิดต่อผนังที่สูงสุดที่ใช้ในการจำลอง

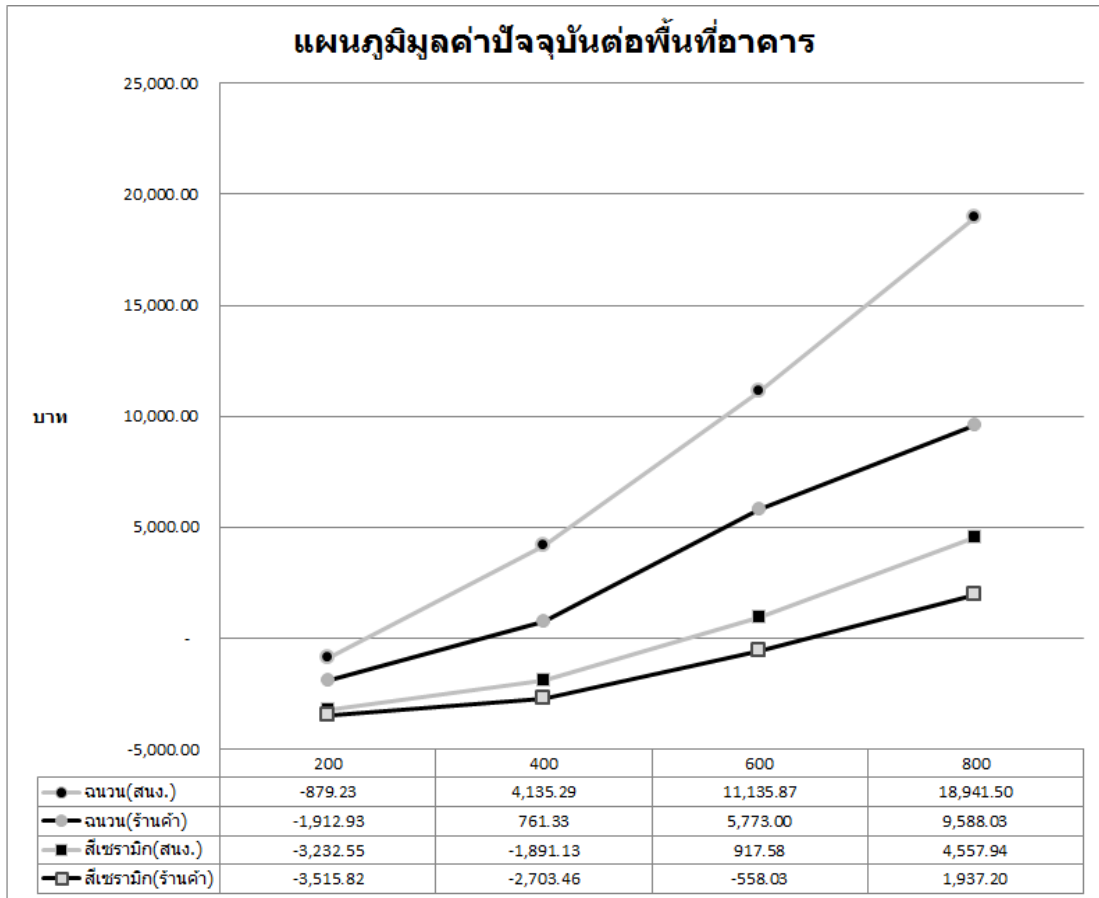


แผนภูมิที่ 4.18 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อความชันหลังคา

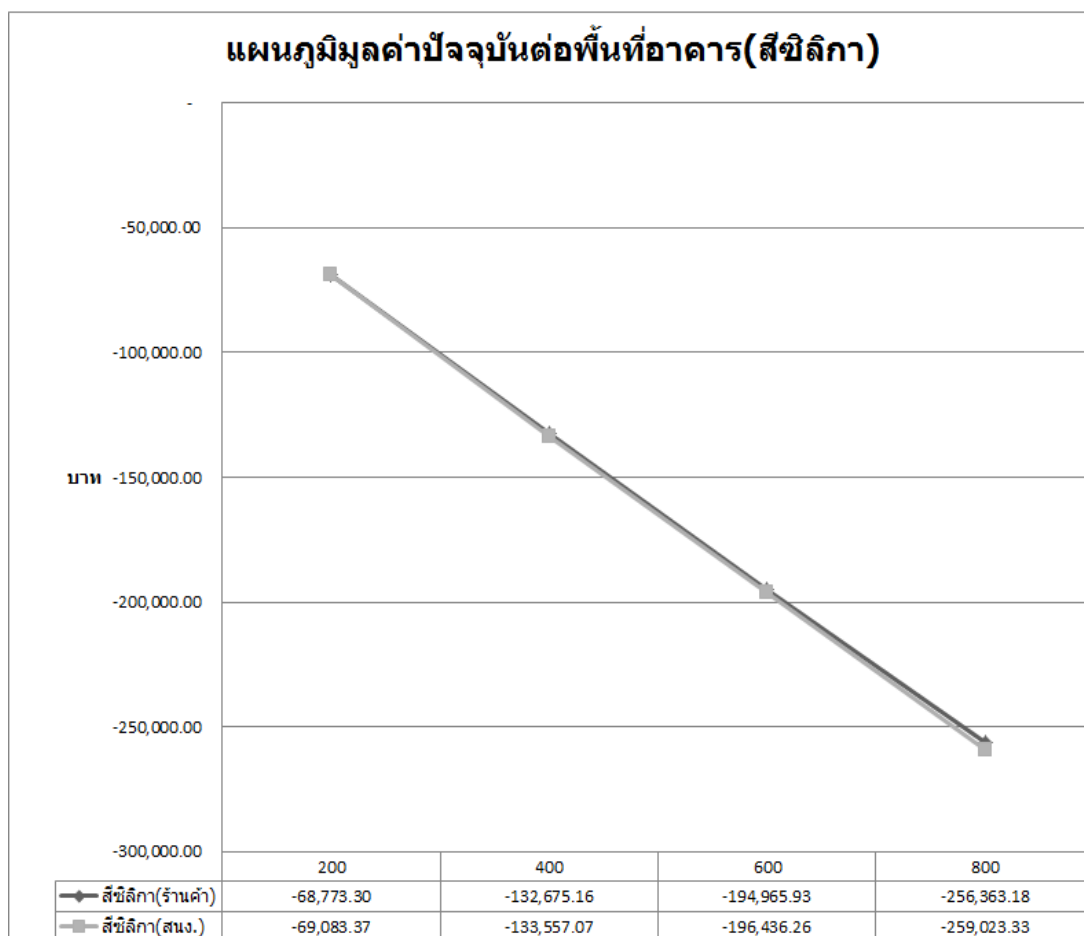


แผนภูมิที่ 4.19 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อความชันหลังคา

จากกราฟความคุ้มค่าจะลดลงเมื่อความชันหลังคาเพิ่มขึ้น เนื่องจากความชันของหลังคา โดยเฉลี่ยแล้ว ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน แต่การที่ความชันเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ หลังคามีมากขึ้นส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายเพื่อขึ้นตามไปด้วย



แผนภูมิที่ 4.20 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อพื้นที่อาคาร

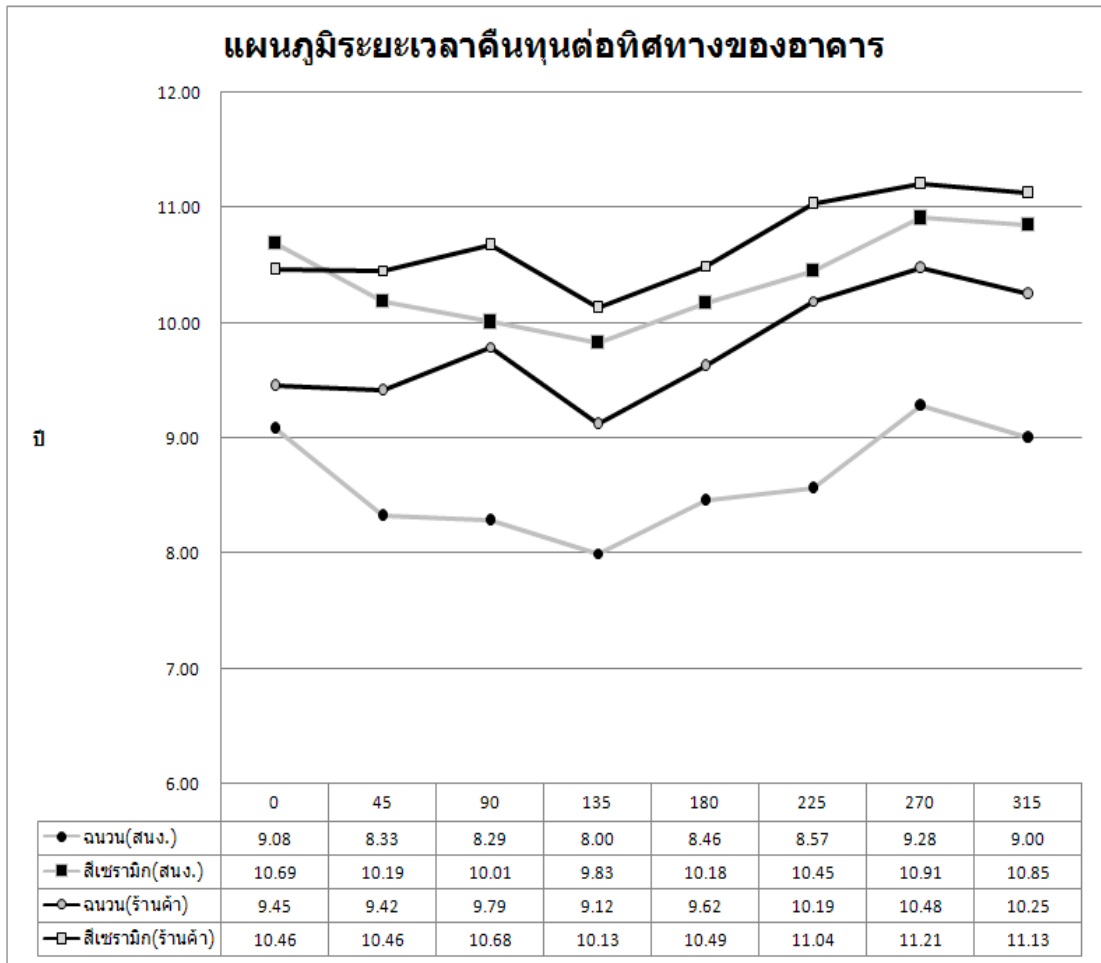


แผนภูมิที่ 4.21 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิต่อพื้นที่อาคาร

แผนภูมินี้แสดงให้เห็นว่าการลงทุนติดตั้งวัสดุจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นเมื่ออาคารมีพื้นที่มากขึ้น แต่ในกรณีของวัสดุสีผสมอนุภาคขลิกา พบว่ายิ่งพื้นที่เพิ่มมากขึ้น ก็ยิ่งทำให้ความคุ้มค่าลดลง เนื่องจากมูลค่าการลงทุนเริ่มต้นที่สูงมาก

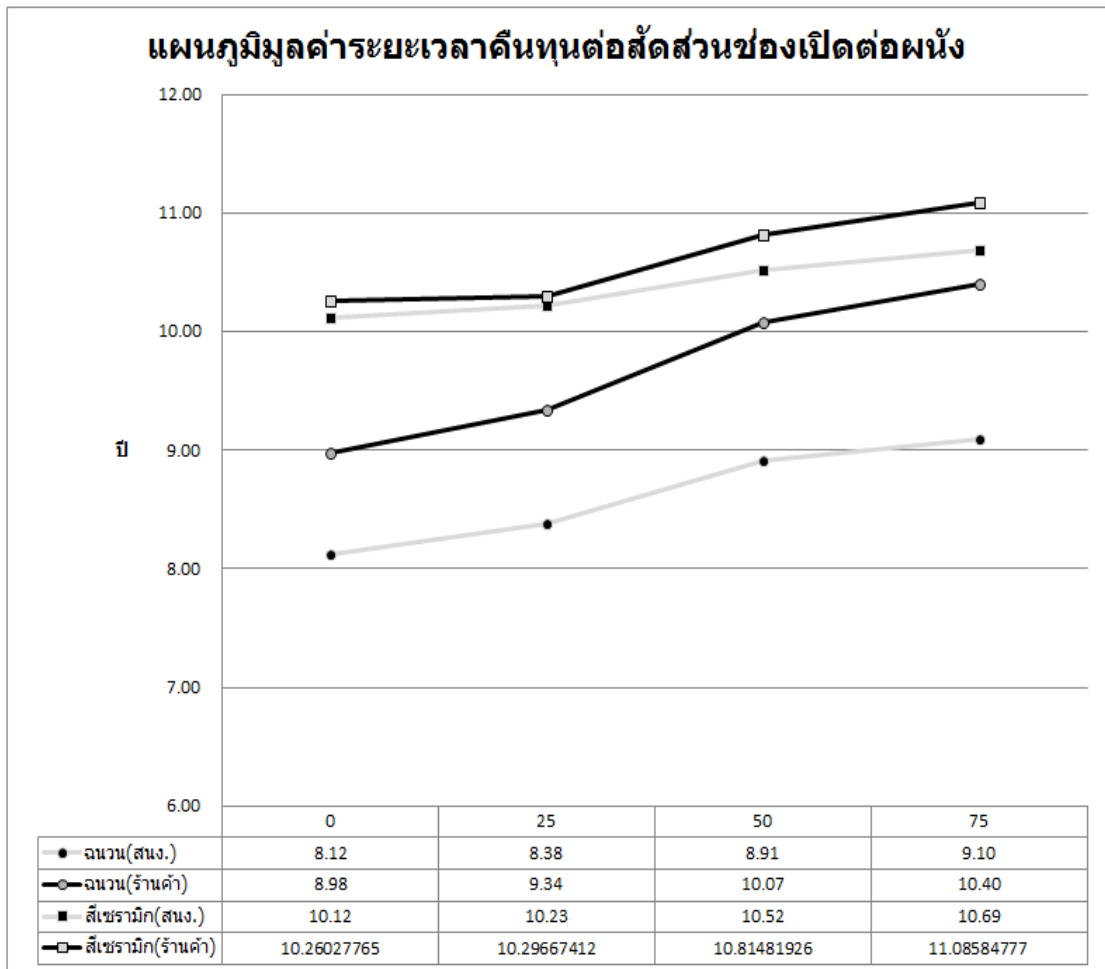
4.3.2 ระยะเวลาคืนทุนแบบคิดลด

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นการวิเคราะห์ โครงการ โดยดูจากระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุด เพราะจะทำให้ผู้ลงทุนมีความเสี่ยงจากการลงทุนน้อยที่สุดด้วย ในการคำนวณครั้งนี้ พบว่าระยะเวลาคืนทุนของสีผสมอนุภาคขลิกา มีระยะเวลานานกว่า 50 ปี ซึ่งถือว่านานเกินกว่าจะนำมาพิจารณาเปรียบเทียบ



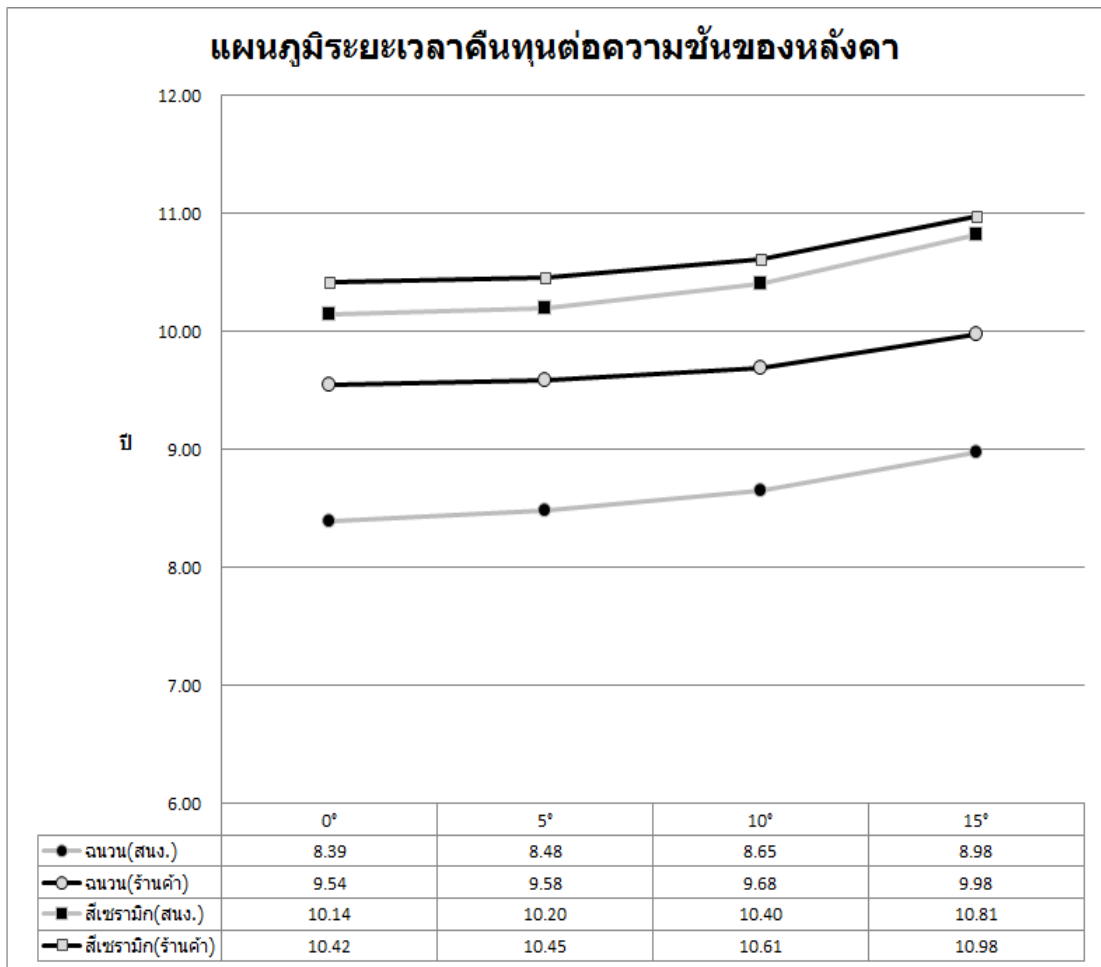
แผนภูมิที่ 4.22 แสดงระยะเวลาคืนทุนต่อทิศทางของอาคาร

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้วยระยะเวลาคืนทุนมีความสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ ซึ่งกรณีที่คุ้มค่าที่สุด(คืนทุนได้เร็วที่สุด) คือกรณีที่อาคารวางตัวในมุมอะซิมุท 135°



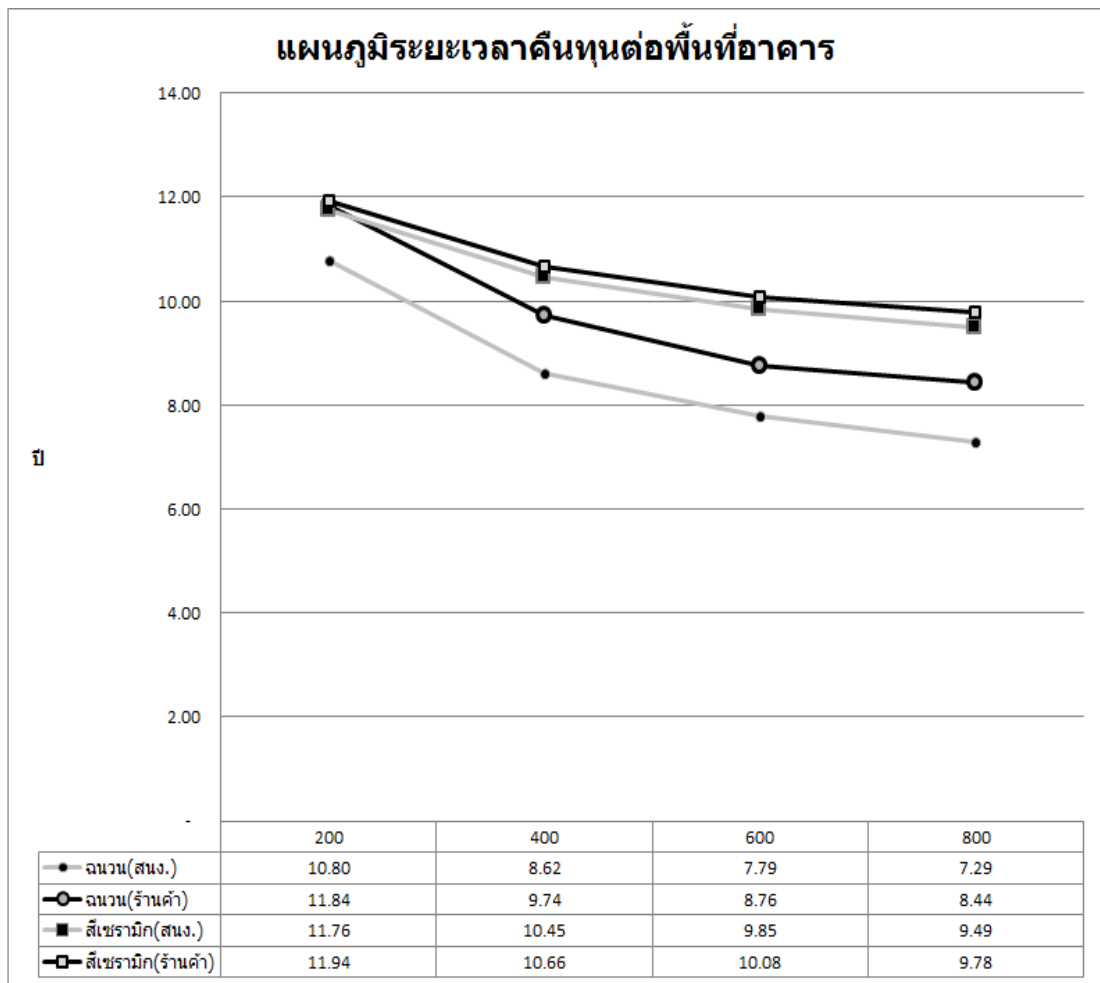
แผนภูมิที่ 4.23 แสดงระยะเวลาคืนทุนต่อทิศทางของอาคาร

การวิเคราะห์ระยะคืนทุนต่ออัตราส่วนช่องเปิดก็สอดคล้องกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิในกรณีเดียวกันเช่นกัน โดยกรณีที่สามารถคืนทุนได้เร็วที่สุดคือกรณีที่มีช่องเปิดเป็นร้อยละ 0 และ คืนทุนช้าลง เมื่อมีช่องเปิดมากขึ้นเรื่อยๆ



แผนภูมิที่ 4.24 แผนภูมิแสดงระยะเวลาคืนทุนต่อความชื้นหลังคา

จากกราฟระยะเวลาคืนทุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นหลังคามากขึ้น เนื่องจากความชื้นของหลังคา โดยเฉลี่ยแล้ว ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน แต่การที่ความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ หลังคามีมากขึ้นส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายเพื่อขึ้นตามไปด้วย



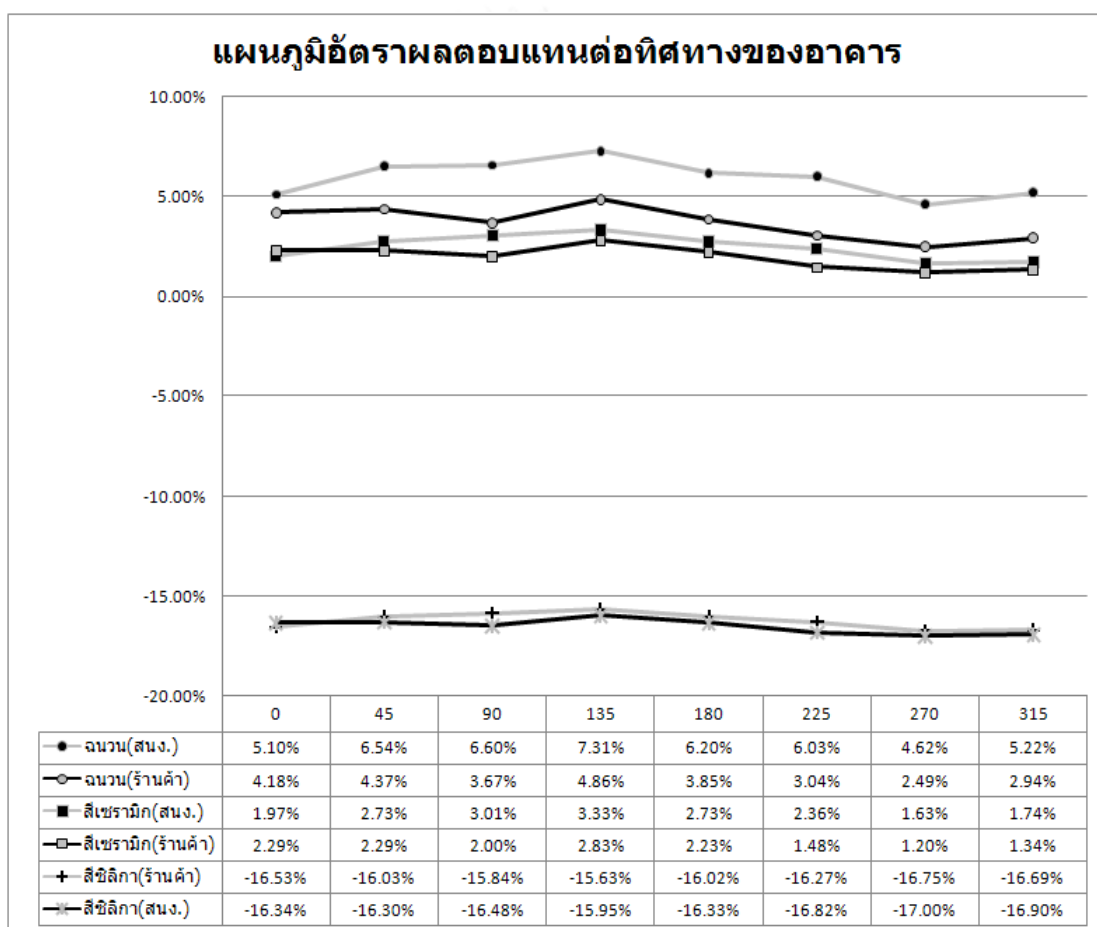
แผนภูมิที่ 4.25 แผนภูมิแสดงระยะเวลาคืนทุนต่อความชันหลังคา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนภูมินี้ก็แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องระหว่างการวิเคราะห์ด้วยมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และ ระยะเวลาคืนทุนเช่นกัน โดยยิ่งอาคารมีพื้นที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาคืนทุนจะลดลง

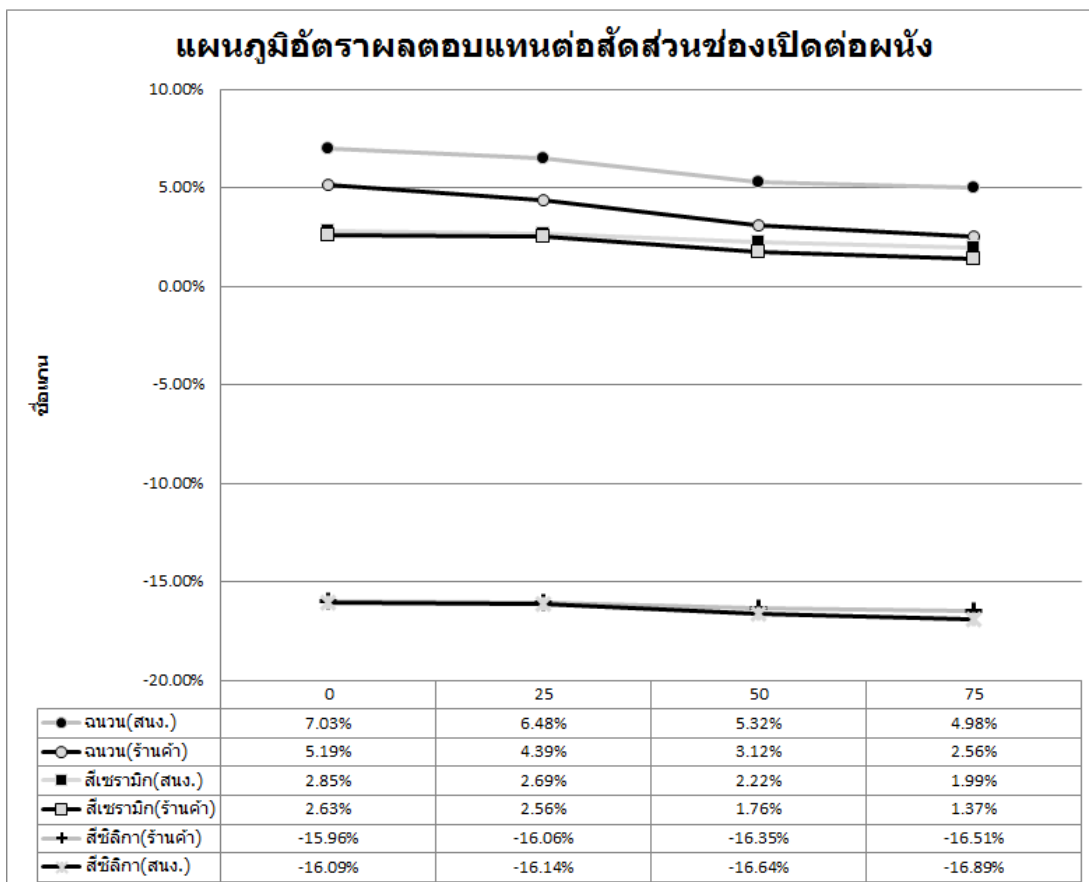
4.3.3 อัตราผลตอบแทน (Internal rate of return)

เป็นอัตราลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดสุทธิเท่ากับเงินลงทุน หรือก็คืออัตราลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาโครงการที่กำหนด (10 ปี) เท่ากับ 0 โดยใช้การคำนวณจากตารางกระแสเงินสดเช่นเดียวกับมูลค่าปัจจุบัน ยิ่งอัตราผลตอบแทนมากเท่าใด ก็หมายถึงความน่าลงทุนของโครงการที่มากขึ้น ซึ่งอาจมีกรณีที่มีการลงทุนเริ่มต้นต่ำ ทำให้ระยะเวลาคืนทุนสั้น แต่อัตราผลตอบแทนต่ำกว่า จึงทำให้มีการใช้เกณฑ์ นี้เพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยในการตัดสินใจลงทุน

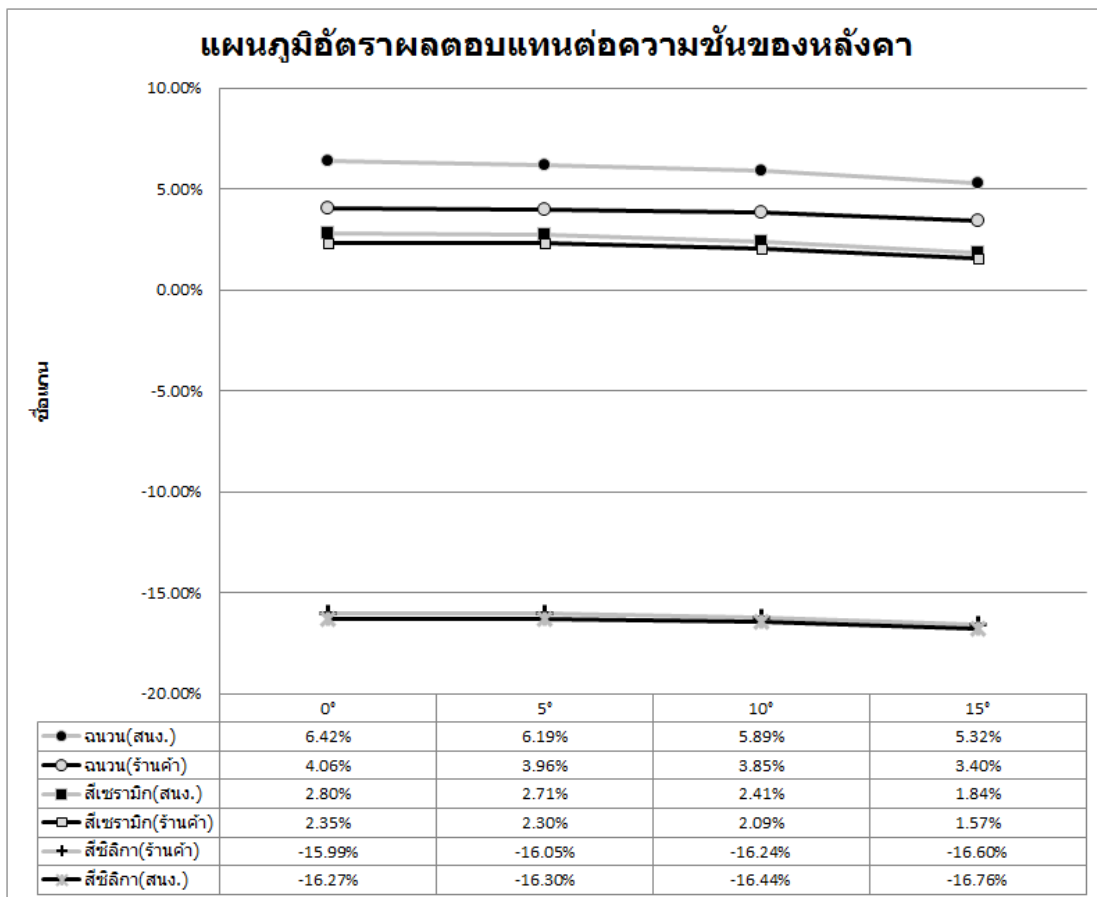


แผนภูมิที่ 4.26 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่อทิศทางอาคาร

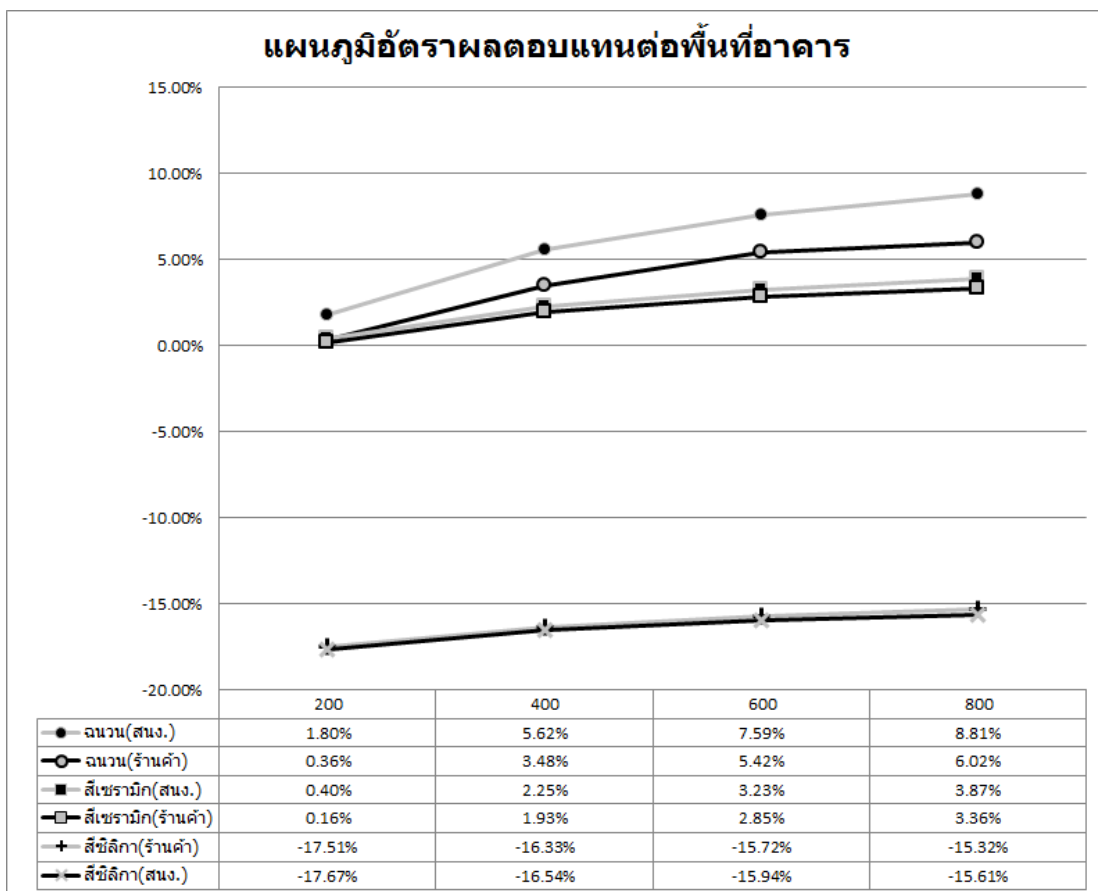
ลักษณะของแผนภูมินี้ สอดคล้องกับแผนภูมิมูลค่าปัจจุบันสุทธิ โดยที่อัตราผลตอบแทนของสีผสมอนุภาคซิลิกาติดลบในทุกกรณี แต่ยังสามารถเห็นว่า มีรูปร่างของกราฟเส้นเป็นไปในแบบเดียวกับสีผสมอนุภาคเซรามิก



แผนภูมิที่ 4.27 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่ออัตราส่วนช่องเปิดต่อผนัง



แผนภูมิที่ 4.28 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR) ต่อความชื้นหลังคา



แผนภูมิที่ 4.29 แสดงอัตราผลตอบแทนคืนทุนต่อพื้นที่อาคาร

จากกราฟทั้งหมดพบว่ามีผลสอดคล้องกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และก็ยังสอดคล้องกับผลการคำนวณระยะเวลาคืนทุนด้วย

หลังจากที่ได้พิจารณากรณีศึกษาทั้งหมดที่เกิดขึ้น พบว่า ความสามารถในการประหยัดพลังงาน ของวัสดุทั้งสามชนิดที่นำมาจำลอง ไม่สูงอย่างที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากอากาศในช่องเหนือฝ้าเพดานมีความเป็นฉนวน ทำให้ลดผลกระทบของความร้อนที่เข้าสู่อาคารผ่านทางหลังคาแล้วระดับหนึ่ง การติดตั้งวัสดุป้องกันความร้อนเพิ่มเติม จึงแสดงผลออกมาไม่ชัดเจนนัก จึงได้ทำการจำลองเพิ่ม โดยนำฝ้าเพดานออกโดยเป็นการจำลองโดยใช้กรณีศึกษาดังนี้

ตารางที่ 4.11 แสดงรายละเอียดตัวแปรควบคุมของอาคารที่ใช้ในการจำลอง

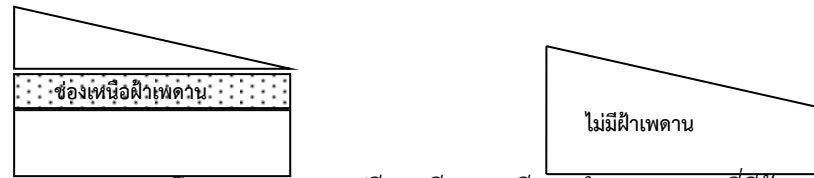
รายการ	วัสดุ	รายละเอียด
เพดาน	ไม่มีฝ้าเพดาน	
ผนัง	คอนกรีตบล็อก	หนา 10 เซนติเมตร ฉาบเรียบ
พื้น	คอนกรีตเสลป	หนา 10 เซนติเมตร
ช่องเปิด	กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร 1แผ่น	ไม่มีแผงบังแดดใดๆ
หลังคา	เมทัลชีท ($\epsilon = 0.9$, $\alpha = 0.3$)	เป็นรูปแบบเพิงหมาแหงน
รูปทรงของอาคาร	-	สี่เหลี่ยมจัตุรัส
อาคารข้างเคียง	-	การจำลองไม่มีเงาจากอาคารข้างเคียง

ตารางที่ 4.12 แสดงรายละเอียดอาคารที่ใช้ในการจำลอง

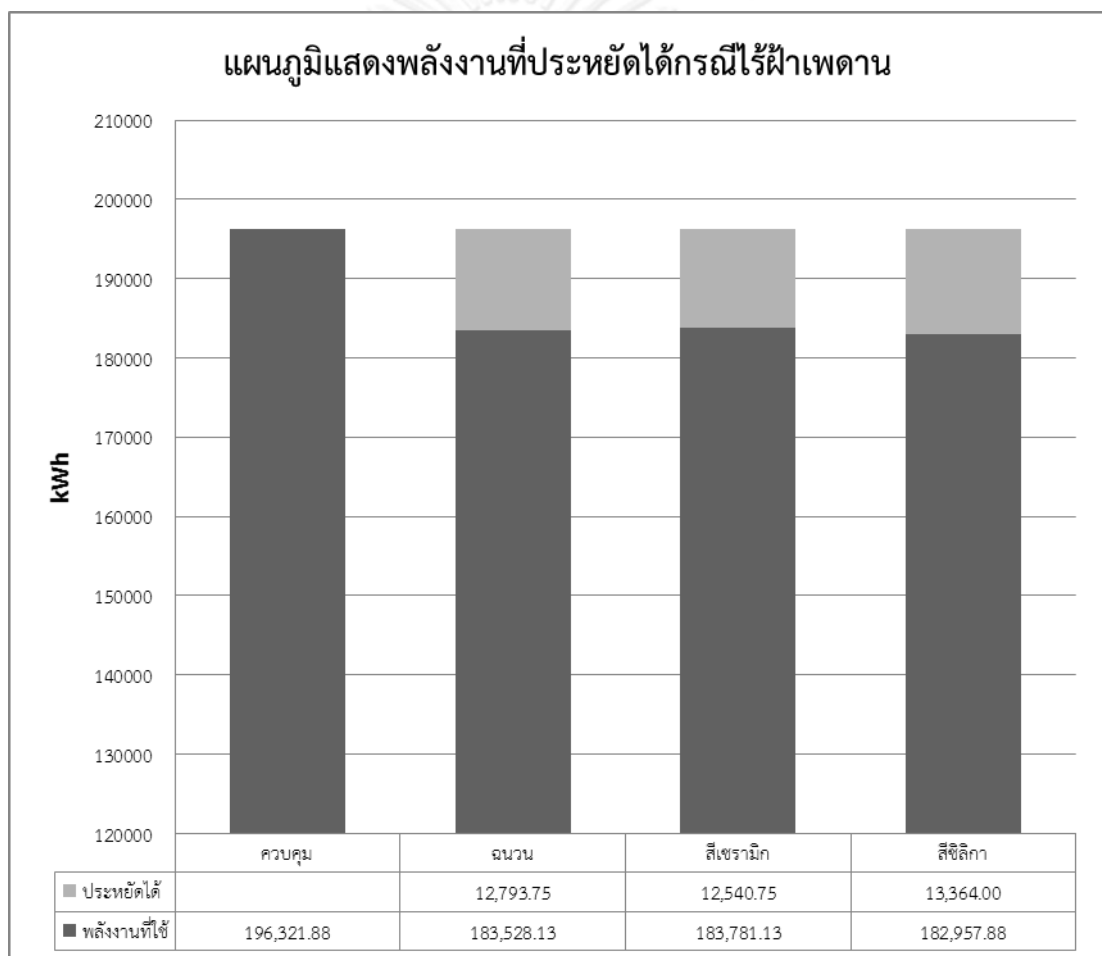
ทิศทางอาคาร (AZIMUTH)	อัตราส่วน หน้าต่างต่อ ผนัง(%)	ความชัน หลังคา ($^{\circ}$)	พื้นที่ (ตร.ม.)	การใช้งาน	การ ป้องกัน ความร้อน
0 - 315	0	15	800	retail	กรณี ควบคุม ฉนวน สีเซรามิก สีซิลิกา

รวมทั้งสิ้น 32กรณีศึกษา

หลังจากจำลองแล้ว ได้มีการนำผลการจำลองมาคำนวณความคุ้มค่าทางการเงินด้วยวิธีการเดียวกัน



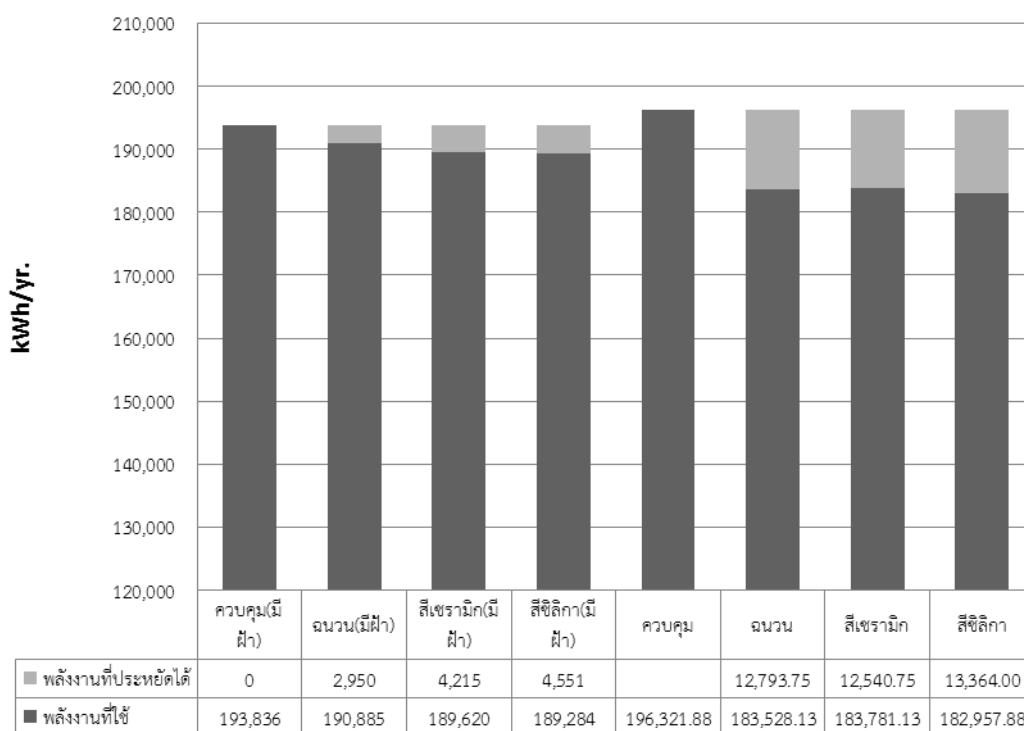
ภาพที่ 4.7 แผนภาพเปรียบเทียบกรณีการจำลองอาคารที่มีฝ้าเพดาน และ ไม่มีฝ้าเพดาน



แผนภูมิที่ 4.30 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้ในกรณีไม่มี ฝ้าเพดาน

เมื่อไม่มีฝ้าเพดาน ประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของฉนวนหนา 2 นิ้ว และ สีผสมอนุภาคเซรามิกมีความใกล้เคียงกันมากขึ้น ในขณะที่สีผสมอนุภาคซิลิกามีประสิทธิภาพสูงกว่าอย่างชัดเจน

แผนภูมิแสดงพลังงานที่ประหยัดได้ในอาคารร้านค้าเปรียบเทียบกับ กรณีมีฝ้าเพดาน

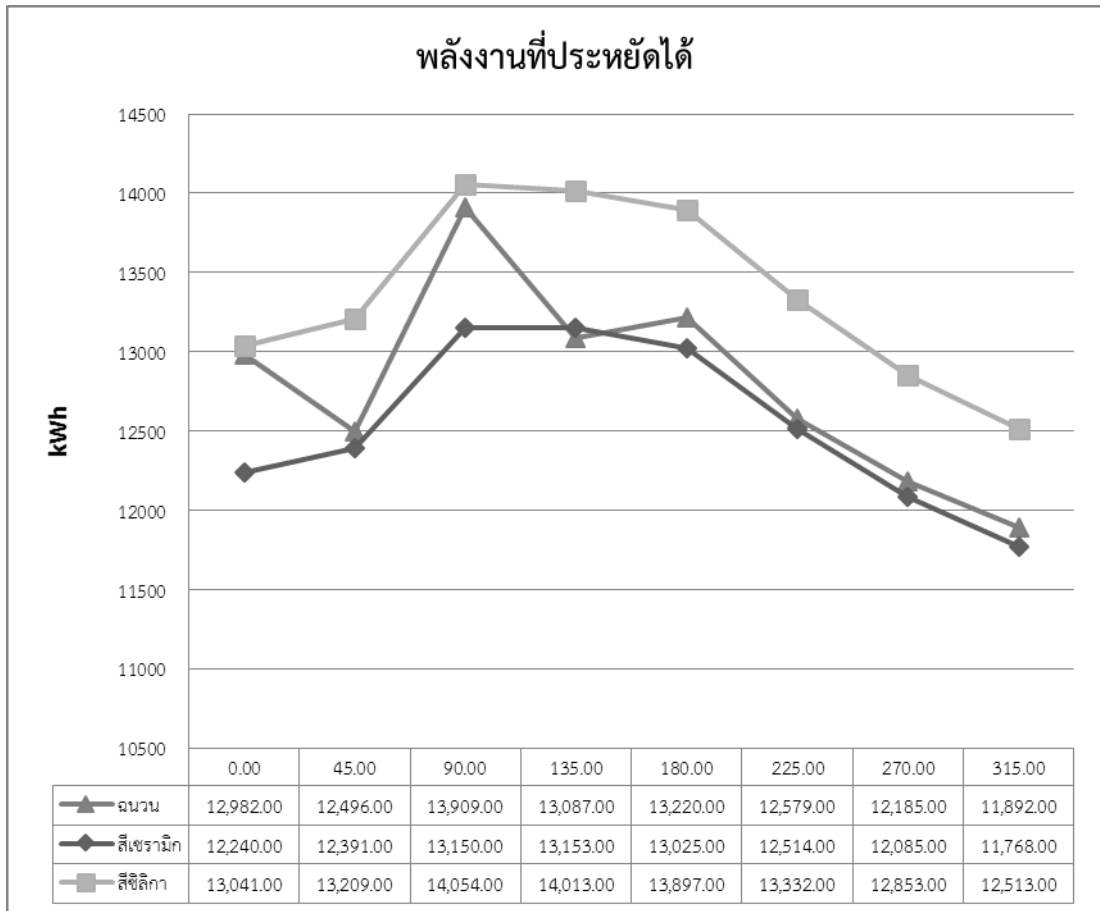


แผนภูมิที่ 4.31 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้เปรียบเทียบ
ระหว่างกรณีมีฝ้าเพดาน และไม่มีฝ้าเพดาน

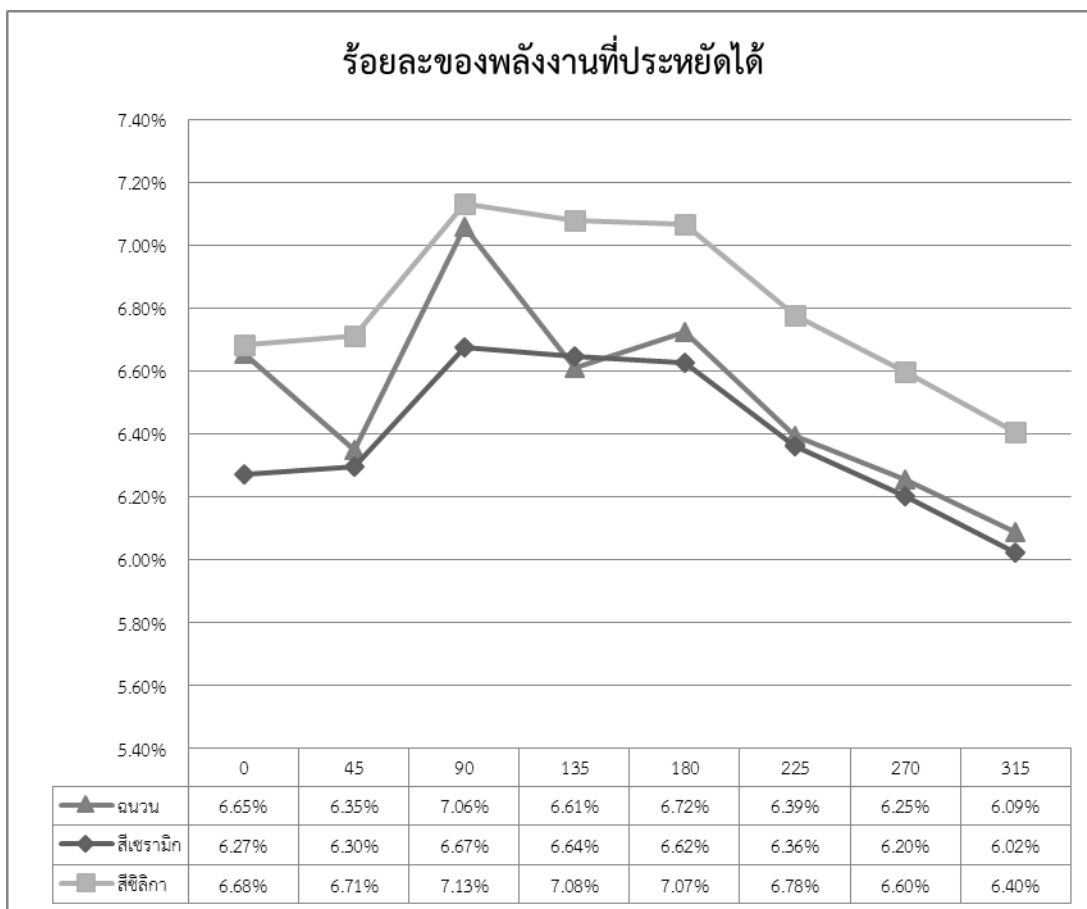
ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราส่วนพลังงานที่ประหยัดได้

	ควบคุม (มีฝ้า)	ฉนวน (มีฝ้า)	สีเซรามิก (มีฝ้า)	สีซิลิกา (มีฝ้า)	ควบคุม	ฉนวน	สีเซรามิก	สีซิลิกา
พลังงานที่ประหยัดได้	0%	1.52%	2.17%	2.40%	0%	6.52%	6.39%	6.80%

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในกรณีเดียวกันของอาคารที่มีฝ้าเพดานพบว่า ในกรณีควบคุม มีการใช้พลังงานสูงกว่าเมื่อไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน วัสดุป้องกันความร้อนมีประสิทธิภาพ ในการทำความร้อนสูงขึ้น และ พบว่ามีการใช้พลังงานต่ำกว่ากรณีที่มีการติดตั้งฝ้าเพดานในวัสดุเดียวกันด้วย จากกรณีควบคุมที่ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดานมีการใช้พลังงานมากกว่ากรณีติดตั้งฝ้าเพดาน แต่เมื่อมีการติดตั้งฉนวน 2 นิ้ว สีเซรามิก และ สีซิลิกา ช่วยลดการใช้พลังงานลงได้ เป็นไปได้ว่าอาคารร้านค้าชั้นเดียว ที่มีการใช้งานในเวลากลางวันบางส่วนจะได้รับประโยชน์จากการระบายความร้อนสู่ภายนอกอาคาร ซึ่งการมีฝ้าเพดานจะปิดกั้นไม่ให้ความร้อนระบายออกไป

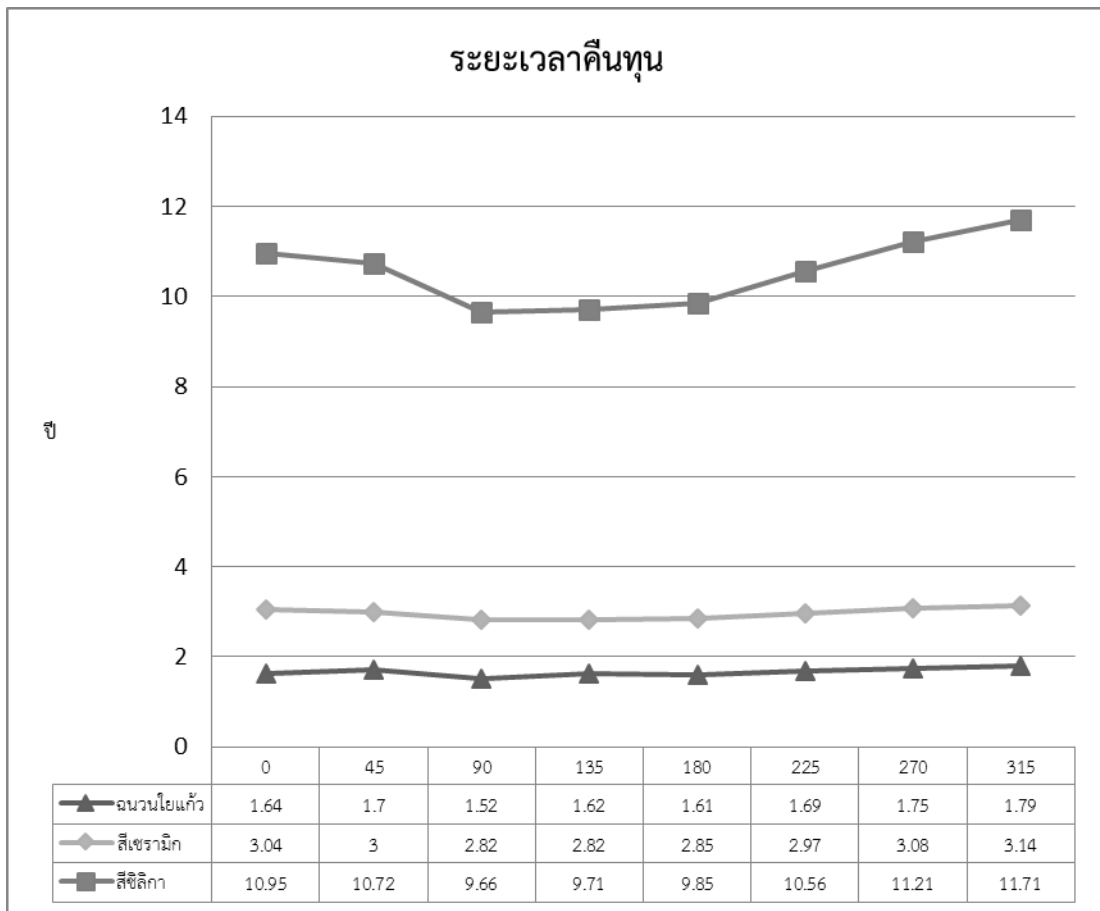


แผนภูมิที่ 4.32 แสดงปริมาณพลังงานที่ใช้และประหยัดได้



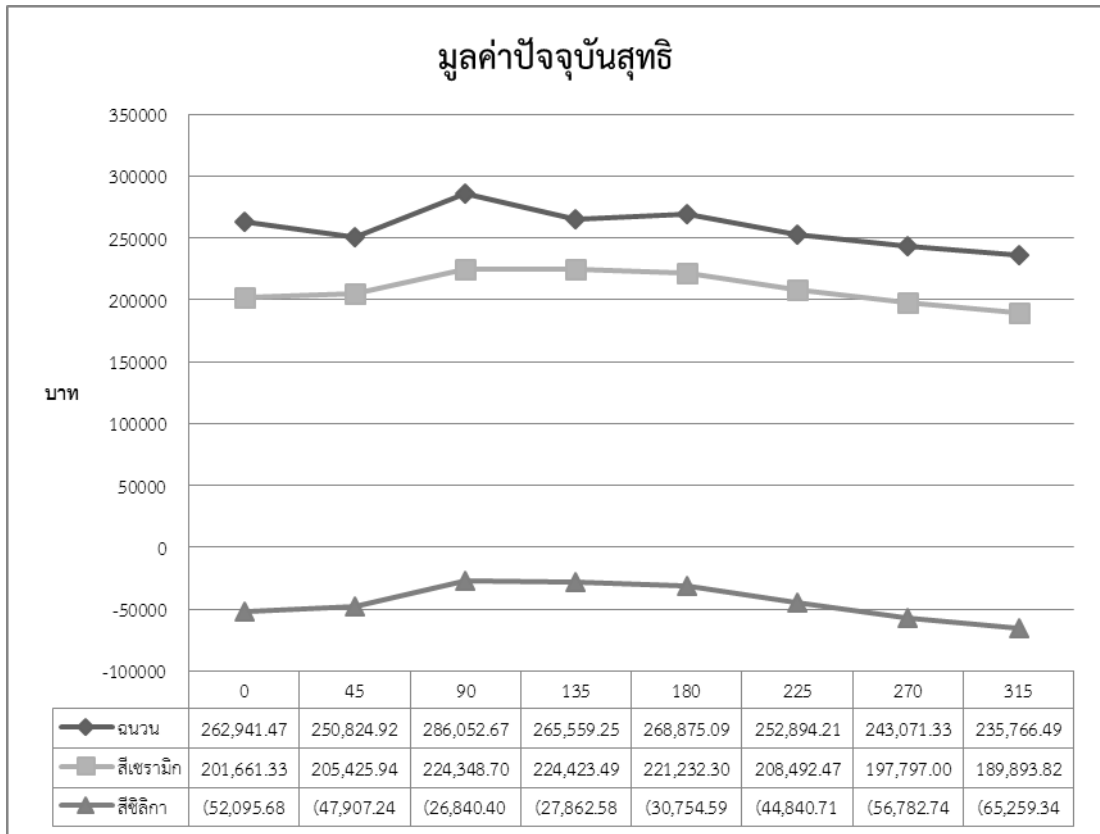
แผนภูมิที่ 4.33 แผนภูมิแสดงปริมาณร้อยละของพลังงานที่ใช้และประหยัดได้

จากกราฟ สีสมนอนุภาคซิลิกามีประสิทธิภาพสูงกว่าวัสดุอื่นในทุกกรณี โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีที่อาคารหันหน้าไปทางทิศตะวันออก เพราะทำให้ผืนหลังคาหันไปทางตะวันตกและทำงานได้อย่างเต็มที่ เช่นเดียวกับ สีสมนอนุภาคเซรามิก ในขณะที่ฉนวนจะมีพฤติกรรมในการป้องกันความร้อนต่างจากสีสะท้อนความร้อนหากไม่มีฝ้าเพดาน โดยทำงานได้ดีเป็นพิเศษในทิศมุมอะซิมุทที่ 90 และ 180 (ตะวันออก และ ใต้)

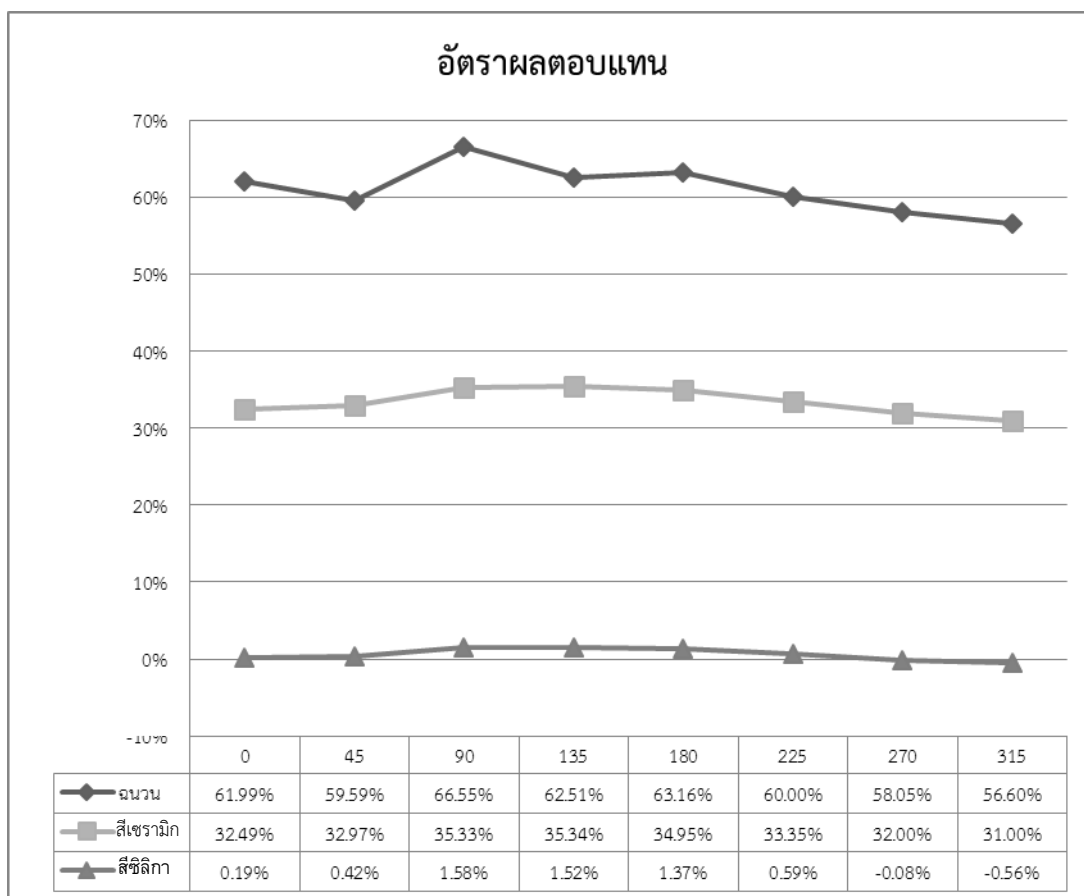


แผนภูมิที่ 4.34 แสดงระยะเวลาคืนทุน

เมื่อนำมาคำนวณระยะเวลาคืนทุนแล้ว วัสดุที่มีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดคือฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว เพราะเมื่อจำลองในกรณีศึกษาที่ไม่มีฝ้าเพดาน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของซี ซีลิกา และ ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว มีความใกล้เคียงกันมากขึ้น เมื่อคำนวณระยะเวลาคืนทุน ฉนวนใยแก้ว 2 นิ้ว ที่มีค่าลงทุนต่ำกว่า ทำให้ฉนวนมีระยะคืนทุนต่ำสุด ในขณะที่แม้จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ก็ยังถือว่า มีราคาสูงกว่าวัสดุอื่นมาก ทำให้มีระยะเวลาคืนทุนนานถึง 10 ปี โดยประมาณ โดยที่การวางตัวอาคารที่มีระยะคืนทุนต่ำสุดคือมุมอะซิมุท 90°(ทิศตะวันออก)



แผนภูมิที่ 4. 35 แสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิ



แผนภูมิที่ 4.36 แสดงอัตราผลตอบแทน (IRR)

จากแผนภูมิ 31 และ 32 มีผลสอดคล้องกันคือ หนุนนโยบาย 2 นิ้ว มีอัตราผลตอบแทนสูงสุด และ ซิลิกามีอัตราผลตอบแทนต่ำสุด โดยต่ำกว่าอัตราเงินเฟ้อของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2555 (3%) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การใช้สัมมนาภาคซิลิกายังไม่คุ้มค่าในการนำมาใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน และ ผลการคำนวณความคุ้มค่าทางการเงิน ของอาคารที่ใช้วัสดุป้องกันความร้อนที่กำหนดไว้ใน การทดลอง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน

วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดคือ สีป้องกันความร้อนผสมอนุภาคซิลิกา และรองลงมาคือ สีผสมอนุภาคเซรามิกและฉนวนใยแก้วตามลำดับ

โดยวัสดุฉนวนจะมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานสูงสุดในทิศทางมุม อะซิมุท 135° ในขณะที่กลุ่มวัสดุสะท้อนความร้อนจะประหยัดที่สุดที่มุมอะซิมุท 180° โดยที่อาคารสำนักงานสามารถประหยัดพลังงานเป็นอัตราส่วนที่สูงกว่า ความสามารถประหยัดพลังงานมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนหน้าต่างอาคาร (WWR) ความชันของหลังคา มีผลกระทบต่อ การประหยัดพลังงานพลังงานน้อยมาก การประหยัดพลังงานของวัสดุป้องกันความร้อนจะสูงขึ้น เมื่อพื้นที่อาคารเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้เพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรง

ตารางที่ 5.1 สรุปผลประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานจากการจำลอง

ทิศทางอาคาร (AZIMUTH)	อัตราส่วน หน้าต่างต่อผนัง	ความชัน หลังคา	พื้นที่	การใช้งาน	ประสิทธิภาพของ วัสดุ
มีผลต่อการ ใช้พลังงาน และ การประหยัด พลังงาน	ยิ่ง WWR เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพ ในการประหยัด พลังงานของ วัสดุก็ยิ่งลดลง	แทบไม่มีผล ต่อการ ประหยัด พลังงาน	ยิ่งพื้นที่มาก ก็ จะประหยัด พลังงาน ได้มากขึ้น	อาคาร สำนักงานมี อัตราการ ประหยัด พลังงานสูง กว่าอาคาร พาณิชยกรรม	สีซิลิกา > สีเซรามิก > ฉนวน

5.2 ความคุ้มค่าในการลงทุน

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้วัสดุสีผสมอนุภาคซิลิกาในอาคารสูงกว่าวัสดุชนิดอื่นมาก ทำให้แม้จะมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่โดยภาพรวมมีความคุ้มค่าต่ำสุดในทุกกรณี และมีระยะคืนทุนยาวนานถึง 50 ปีขึ้นไป

ตัวแปรอื่น ๆ มีผลต่อความคุ้มค่าดังนี้ พบว่าการวางอาคารให้หันหน้าไปทางมุมอะซิมุท 135° มีความคุ้มค่าสูงสุดและมุมอะซิมุท 270° มีความคุ้มค่าต่ำสุด

ปัจจัยของช่องเปิดต่อความคุ้มค่า พบว่าช่องเปิดอาคาร พบว่า โดยที่กรณีที่มีความคุ้มค่าที่สุดคือ กรณีที่ช่องเปิดเป็น ร้อยละ 0 และลดลงจนต่ำสุดที่กรณีที่มีช่องเปิดร้อยละ 75

ความชื้นหลังคามากขึ้น ไม่ได้มีผลต่อประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน แต่การที่ความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่หลังคามักมีมากขึ้นส่งผลให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ความคุ้มค่าจึงต่ำลง

การลงทุนติดตั้งวัสดุจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นเมื่ออาคารมีพื้นที่มากขึ้น แต่ในกรณีของวัสดุ สีส่มอนุภาคซิลิกา พบว่ายิ่งพื้นที่เพิ่มมากขึ้น ก็ยิ่งทำให้ความคุ้มค่าลดลง เนื่องจากมูลค่าการลงทุน เริ่มต้นที่สูงมาก

ตารางที่ 5.2 สรุปผลความคุ้มค่า

ทิศทางการอาคาร (AZIMUTH)	อัตราส่วน หน้าต่างต่อผนัง	ความชื้น หลังคา	พื้นที่	การใช้งาน	ความ คุ้มค่าของ วัสดุ
มุม 135° เป็น มุมที่มีความ คุ้มค่าในการ ใช้วัสดุป้องกัน ความร้อน ที่สุด	ยิ่ง WWR เพิ่มขึ้น ความ คุ้มค่าก็ยิ่ง ลดลง	ความชื้นที่ เพิ่มขึ้น ทำให้ ความคุ้มค่า ลดลง	ยิ่งพื้นที่มาก ก็ จะมีความ คุ้มค่ามากขึ้น	อาคาร สำนักงานมี ความคุ้มค่าสูง กว่าอาคาร พาณิชยกรรม	ฉนวน > สีเซรามิก > สีซิลิกา

5.3 แนวทางในการเลือกใช้วัสดุ

1. ทิศทางของอาคารมีผลต่อการใช้พลังงาน การประหยัดพลังงาน และ ความคุ้มค่าในการ เลือกใช้วัสดุ โดยทิศที่วัสดุสามารถแสดงความคุ้มค่าออกมาได้คือทิศที่วัสดุสามารถทำหน้าที่ในการ ป้องกันความร้อนได้ดีที่สุด(ทิศตะวันออกเฉียงใต้) แต่ไม่ใช่ทิศที่มีการใช้พลังงานต่ำสุด ในการออกแบบ วางแนวอาคารที่ต้องการการใช้พลังงานต่ำ อาจไม่ได้หมายถึงการใช้วัสดุป้องกันความร้อนอย่างคุ้มค่า

2. อัตราส่วนช่องเปิดต่อผนังมีผลต่อความคุ้มค่าในการเลือกใช้วัสดุเป็นอย่างเห็นได้ชัด ยิ่ง ช่องเปิดน้อยเท่าไร วัสดุป้องกันความร้อนก็จะยิ่งแสดงความคุ้มค่าออกมาเด่นชัดขึ้น

3. ความชื้นหลังคา ในการศึกษาที่มีความชื้นตั้งแต่ 0°- 15° ซึ่งเป็นความชื้นที่ไม่มาก และไม่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานเท่าไรนัก ในขณะที่มีผลต่อความคุ้มค่า เพราะความชื้นที่มากขึ้น หมายถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น

4. พื้นที่อาคารที่เพิ่มขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานมากขึ้น และ มีความคุ้มค่าในการติดตั้งวัสดุ มากขึ้น ส่วนหนึ่งเพราะอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หลังคาต่อพื้นที่ใช้งานนั้นคงที่ในขณะที่อัตราส่วน ระหว่างพื้นที่ผนังและพื้นที่ใช้งานลดลง ทำให้สัดส่วนความร้อนที่ผ่านเข้ามาทางหลังคาต่อความร้อนที่ ผ่านเข้ามาในผนังเพิ่มขึ้น จึงทำให้วัสดุแสดงประสิทธิภาพ และ ความคุ้มค่าออกมาเพิ่มขึ้น

5. การใช้งานอาคารสำนักงานมีช่วงเวลาที่ใช้พลังงานในตอนกลางวันเป็นส่วนมาก ในขณะที่อาคารร้านค้ามีการใช้งานในช่วงหัวค่ำ ซึ่งวัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคาไม่มีประโยชน์ จึงทำให้อาคารสำนักงานมีความคุ้มค่าที่จะใช้วัสดุป้องกันความร้อนสูงกว่า

6. วัสดุป้องกันความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือสีผสมอนุภาคซิลิกา แต่ด้วยราคาที่ยังสูงมาก ทำให้เมื่อคำนวณความคุ้มค่า สีชนิดกลับไม่มีความคุ้มค่าด้านการเงินเลยในขณะที่ฉนวนใยแก้วมีประสิทธิภาพต่ำสุด แต่ราคาก็ถูกที่สุดเช่นกัน และมีความคุ้มค่าสูงสุด

7. เมื่อทำการจำลองเพิ่มเติมพบว่าอาคารที่ไม่มีฝ้าเพดาน ทำให้เมื่อติดตั้งวัสดุป้องกันความร้อนแล้ว จะมีความแตกต่างในการใช้พลังงานมากขึ้น มีการประหยัดพลังงานมากขึ้น และทำให้มีการใช้พลังงานมากกว่ากรณีต่ำที่มีฝ้าเพดานด้วย

8. อาคารที่ได้ประโยชน์จากการใช้วัสดุป้องกันความร้อนผ่านทางหลังคามากที่สุดคืออาคารที่ใช้งานในเวลากลางวัน มีพื้นที่ใช้งานอาคารมาก ไม่มีการติดตั้งฝ้าเพดาน และมีการปรับอากาศอาคารดังกล่าวคืออาคารศูนย์กระจายสินค้า และอาคารศูนย์การค้าแบบไฮเปอร์มาร์เก็ต เป็นต้น

9. อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปใช้ในการออกแบบย่อมต้องคำนึงว่าให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพ เช่น โครงการที่ต้องการการรับรองจากเกณฑ์อาคาร หรือกฎหมายพลังงาน หรือเป็นโครงการที่เน้นความคุ้มค่าเป็นหลักอย่างไรก็ตามกฎกระทรวง กำหนดประเภท หรือขนาดของอาคาร และมาตรฐาน หลักเกณฑ์ และวิธีการในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552 ยังไม่มีการให้ค่าประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานแก่วัสดุประเภทสะท้อนความร้อน ทำให้การเลือกใช้วัสดุป้องกันความร้อนไม่สามารถทำให้คำนวณได้ค่า OTTV และ RTTV เป็นไปตามความเป็นจริง จึงต้องพิจารณาถึงส่วนนี้ก่อนเลือกใช้ด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยในครั้งนี้ ยังไม่ครอบคลุมถึงกรณีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่มีประสิทธิภาพและราคาต่างๆ กัน ในการศึกษาต่อยอดควรจะมีการศึกษาวัสดุอื่นๆเพิ่มเติม

ในการวิจัยครั้งนี้ ยังไม่มีการใช้วัสดุร่วมกันหลายๆชนิด ซึ่งอาจทำให้เกิดผลลัพธ์ในการประหยัดพลังงานที่ดีขึ้น

การศึกษาครั้งนี้เน้นไปที่หลังคาเป็นหลัก สามารถศึกษาเพิ่มเติมไปยังส่วนประกอบอื่นๆที่สามารถประหยัดพลังงานได้

จากการจำลองทำให้เห็นว่าการใช้สีผสมอนุภาคเซรามิก และ ซิลิกา มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานได้มากกว่าฉนวนกันความร้อนในกรณีศึกษาส่วนมาก และ สีเซรามิกมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับฉนวนใยแก้วในหนา 2 นิ้วในกรณีร้านค้าขนาด 800 ตารางเมตร ที่ไม่มีช่องเปิด และ ฝ้าเพดานทำให้ต้องมีการเปลี่ยนแปลงวิธีการคำนวณค่า OTTV และ RTTV เพื่อให้เกิดความแม่นยำขึ้น

รายการอ้างอิง

- A. Synnefa , M. Santamouris , H. Akbari,. "Estimating the Effect of Using Cool Coatings on Energy Loads and Thermal Comfort in Residential Buildings in Various Climatic Conditions." *Energy and Buildings* 39 (2007): 1167–74.
- American Society for Testing Materials. "Astm C1313 Standard Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications." edited by American Society for Testing Materials. West Conshohocken , USA, 2010.
- ASHRAE. *Ashrae Handbook Fundamentals*. Atlanta,GA: ASHRAE ,Inc., 2009.
- G.B. Smitha, A. Gentlea, P.D. Swift, A. Earp, N. Mronga,. "Colored Paints Based on Iron Oxide and Silicon Oxide Coated Flakes of Aluminum as the Pigment, for Energy Efficient Paint: Optical and Thermal Experiments." *Energy Materials & Solar Cells* 79 (2003): 179–97.
- Harry Suehrcke, Eric L. Peterson, Neville Selby,. "Effect of Roof Solar Reflectance on the Building Heat Gain in a Hot Climate." *Energy and Buildings* 40, no. 12 (2008): 2224–35.
- J.M. Smith, Hendrick Van Ness, Michael Abbott *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics* New York: The McGraw-Hill Companies, 2005.
- Kai L. Uemoto , Neide M.N. Sato. "Estimating Thermal Performance of Cool Colored Paints." *Energy and Buildings* 42 (2010): 17–22.
- Norbert Lechner. *Heating Cooling Lighting: Design Methods for Architects*. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- Ronnen Levinson, H. Akbari, Pualberdahl,. "Solar Reflectance Part li : Review of Practical Methody." *Heat Island Group Lawrence Berkeley National Laboratory* (2010).
- XiaoxinWang , Chris Kendrick, Ray Ogden, James Maxted,. "Dynamic Thermal Simulation of a Retail Shed with Solar Reflective Coatings." *Applied Thermal Engineering* 28 (2008): 1066–73.
- ธนิต จินดาวณิศ. สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- ผศ. กชกร เฉลิมกาญจนา, ปริญญา มณีโรจน์, ผศ. แพร กิระสุนทรพงษ์, สมพงษ์ พรอุปลัมภ์, ผศ. ดวงสมร อรพินท์,. การบัญชีการเงิน : *Financial Accounting*. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกวิน วิฑูรพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี
สถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิตคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552
และเข้ารับการศึกษต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใน
สาขาวิชาบัณฑิตกรรมการออกแบบนิเวศสถาปัตยกรรม ในภาคปลายการศึกษา 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY