

การพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
ของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น

นายพงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและเพิ่มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 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.

The development of correction factor coefficient of roof thermal
transfer value for buildings with shaded roof

Mr. Pongpitch Jongsupangkarat

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

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น

โดย นายพงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต จุลาสัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ พรรณชัช สุริโยธิน)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ อึ้งใจจันทร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.ณรงศ์วิทย์ อารีมิตร)

พงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์ : การพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น. (The development of correction factor coefficient of roof thermal transfer value for buildings with shaded roof) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.อรรจน์ เศรษฐบุญตร, 87 หน้า

หลังคาเป็นส่วนประกอบของอาคารที่รับ อิทธิพลจากแสงอาทิตย์มากที่สุด หากไม่มีการป้องกัน แสงอาทิตย์เข้ามากระทำโดยตรงแล้ว ย่อมส่งผลกระทบต่อค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น

อาคารที่ใช้ ในการวิจัยเป็นอาคารสำนักงานพื้นที่ไม่เกิน 10,000 ตารางเมตร หลังคาชั้นบนเป็นคสล.หนา 0.10 เมตร WWR 50% เปิดเครื่องปรับอากาศระบบ VAV (Variable Air Volume) วันจันทร์-ศุกร์ 8.00-17.00 คำนวณการบังเงาและการใช้พลังงานด้วยการจำลองในโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 และโปรแกรม VisualDOE 4.0 โดยแบ่งชั้นตอนออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง โดยการสร้างแบบจำลองที่มีหลังคาสองชั้นรูปทรงต่างๆ พบว่าหลังคาสองชั้นมีรูปทรงแบน (Flat Roof) สูงจากหลังคาชั้นล่างขึ้นมา 1.5 เมตร ระยะยื่นชายคา 3 เมตร มีประสิทธิภาพในการบังเงาให้กับหลังคา คสล. ชั้นล่างได้ดีที่สุด ส่วนที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพของหลังคาสองชั้น โดยสร้างแบบจำลองอาคารที่มีหลังคาสองชั้นรูปทรงต่างๆ แล้วเพิ่มฉนวนใต้หลังคาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร พบว่าหลังคาสองชั้นที่รูปทรงแบน (Flat Roof) ที่มีค่าการบังเงาหลังคาคสล.ชั้นล่างสูง มีประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารได้มากที่สุด ส่วนที่ 3 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น โดยการเปรียบเทียบค่าพลังงานในการทำความเย็นของอาคารที่มีหลังคาสองชั้นกับค่าพลังงานของอาคารที่ใช้ฉนวนใต้หลังคา พบว่าการเพิ่มหลังคาที่มีลักษณะสองชั้น ในอาคารที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (RTTV) สูงจะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารได้มากกว่าหลังคาที่มี RTTV ต่ำ ซึ่งสามารถแสดงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ออกมาในรูปแบบตารางค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น และสมการ (4)

$$RTTV_s = A_s * RTTV + B_s \quad (4)$$

สรุปผลการวิจัยตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร ที่มีลักษณะสองชั้นในรูปแบบตารางเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน แต่ค่าสัมประสิทธิ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณได้เฉพาะอาคารสำนักงานที่มีลักษณะตรงกับตัวแปรควบคุมที่กำหนดไว้เท่านั้น จึงจำเป็นจะต้องมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อให้ครอบคลุมอาคารที่มีลักษณะและการใช้งานที่หลากหลายต่อไป

ภาควิชา.....สถาปัตยกรรมศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....สถาปัตยกรรม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
 ปีการศึกษา....2554.....

5473337325 : MAJOR: ARCHITECT

KEYWORDS : ROOF THERMAL TRANSFER VALUE/ RTTV/ RTTVs/ SHADED ROOF/ %SHADING/
COOLING ENERGY REDUCTION

PONGPITCH JONGSUPANGKARAT : THE DEVELOPMENT OF CORRECTION FACTOR
COEFFICIENT OF ROOF THERMAL TRANSFER VALUE FOR BUILDINGS WITH SHADED
ROOF. ADVISOR : ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTHA, Ph.D. 87 pp.

Roof is a building components that are influenced by the sun. If there is no protection from the sun, solar radiation will have an affect on cost of cooling energy as much. This research aims to study the performance of shaded roof. To be used in the development of correction factor coefficient of roof thermal transfer value for buildings with shaded roof.

Simulate models were used as office that has 10,000 square meters WWR 50% use VAV (Variable Air Volume) air conditioning systems from Monday to Friday 8.00 a.m. – 17.00 p.m. Simulation program Ecotect Analysis 2011 and VisualDOE 4.0 were used for calculate shading and cooling energy by 3 sections: Section 1 Study %shading on the slab roof by Ecotect Analysis 2011 simulate model of shaded roofs to find %shaded on slab roof below shaded roof. The results show that flat roof with 1.5 meters height above slab roof and eaves offset 3 meters from slab roof give highest %shaded on slab roof. Section 2 study cooling energy by using VisualDOE4.0 calculate office building with shaded roof models that add insulation below slab roof for reduce cooling energy in order to compare cooling energy reduction performance of shaded roof and insulation. The results show that flat roof with high %shaded has the most effective in reducing cooling energy. Section 3 Analyze the data to develop the correction factor coefficient of roof thermal transfer value for buildings with shaded roof by comparing the cooling energy cost of building with shaded roof and building with insulation below slab roof. Found that shaded roof can give better performance in reducing cooling energy for building that has high roof thermal transfer value than building that has low roof thermal transfer value. This can be seen in relationship of cooling energy and Roof thermal transfer value chart and equation (4).

$$RTTV_s = A_s * RTTV + B_s \quad (4)$$

The result of correction factor coefficient of roof thermal transfer value for buildings with shaded roof was adjusted in to table format for easy deployment. But the coefficient can be calculated only building with the same condition as control variables in this research. So it needs to be developed further to cover the building type with alternative use.

Department :.....Architecture..... Student's Signature :.....
Field of study :Architecture..... Advisor's Signature :.....
Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษา แก้ไขข้อบกพร่อง และข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างมาก ผู้วิจัยขอขอบพระคุณในความกรุณา มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ และดร.พร วิรุฬห์รักษ์ ตลอดจนคณาจารย์คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และแง่คิดอันเป็นประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนสตูดิโอ 74 รุ่นพี่ที่ร่วมเรียนปริญญาโท และผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวถึง สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และประสบการณ์ที่ได้รับ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากบริษัท ดี ไอ ดี ไซน์ส์ จำกัด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่คอยสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	4
1.5 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.6 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 อิทธิพลจากดวงอาทิตย์.....	6
2.2 การถ่ายเทพลังงานรังสีความร้อน.....	7
2.3 ประเภทของหลังคา.....	8
2.4 พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนของหลังคา.....	9
2.6 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	23
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	23
3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล	23
3.3 รายละเอียดของตัวแปร	24
3.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	26
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	30

หน้า	
4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ห้ข้อมูลจากการคำนวณ.....	30
4.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ห้ข้อมูล.....	40
4.3 วิเคราะห์ห้ข้อมูลเพื่อพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการคำนวณค่า การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs).....	48
4.4 วิเคราะห์ห้ข้อมูลเพื่อพัฒนาสมการพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Room).....	55
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	63
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	67
ภาคผนวก ข.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงบังแดดแนวนอนที่มีระยะยื่น 1.0 และ 2.0 เมตร	15
ตารางที่ 2.2	แสดงประสิทธิภาพร้อยละการลดพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคาร.....	18
ตารางที่ 2.3	แสดงพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคารตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	19
ตารางที่ 2.4	แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	20
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการคำนวณร้อยละการบังเงาหลังคาคสล.ชั้นล่างตลอดปี (% Shaded)..	31
ตารางที่ 4.2	แสดงพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)	34
ตารางที่ 4.3	แสดงพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof).....	36
ตารางที่ 4.4	แสดงพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof).....	38
ตารางที่ 4.5	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาแบน (Flat Roof) ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา	41
ตารางที่ 4.6	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof) ในแต่ละ ระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา.....	43
ตารางที่ 4.7	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ในแต่ละ ระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา.....	45
ตารางที่ 4.8	แสดงตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น.....	51
ตารางที่ 4.9	แสดงตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคา คสล.ชั้นล่าง	54

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมการพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy) โดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น	56
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมการพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy) โดยพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาสล.ชั้นล่าง (%shaded)	57

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 รูปตัดแสดงลักษณะหลังคาสองชั้น	2
ภาพที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคาในช่วงเวลากลางวัน	9
ภาพที่ 2.2 แสดงอาคารที่ใช้ทดสอบ.....	11
ภาพที่ 2.3 แสดงตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิผนังทดสอบ.....	11
ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะอาคารจำลอง.....	13
ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะแผงกันแดด.....	14
ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่มีป้อนน้ำ.....	16
ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะแบบจำลองหลังคาเขียว	20
ภาพที่ 3.1 แสดงรูปทรงหลังคาสองชั้นที่ใช้ในการวิจัย	25
ภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการวิจัย.....	29
ภาพที่ 4.1 แสดงผลการจำลองหลังคาด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011	30
ภาพที่ 4.2 แสดงแบบจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 ในการคำนวณพลังงาน.....	33
ภาพที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา (RTTV) กับค่า พลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (CER).....	59
ภาพที่ 5.2 แสดงประสิทธิภาพในการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา และ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารของอาคารที่มีการเพิ่มหลังคาสองชั้น.....	60

สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 2.1	แสดงอุณหภูมิภายในวัสดุ	17
แผนภูมิที่ 2.2	แสดงปริมาณความร้อนผ่านหลังคาในแต่ละช่วงเวลา	18
แผนภูมิที่ 2.3	แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดอุณหภูมิที่ระดับชั้นพื้นพื้นที่	21
แผนภูมิที่ 2.4	แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดอุณหภูมิภายในอาคาร	22
แผนภูมิที่ 2.5	แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดการถ่ายเทความร้อนภายในอาคาร	22
แผนภูมิที่ 4.1	แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)	35
แผนภูมิที่ 4.2	แสดงพลังงานการทำความเย็นของหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) เฟิงหมาแหงน (Lean to Roof) ทางทิศเหนือ	37
แผนภูมิที่ 4.3	แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ทางทิศเหนือ	39
แผนภูมิที่ 4.4	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving Cooling Energy, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา	42
แผนภูมิที่ 4.5	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving Cooling Energy, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาเฟิงหมาแหงน (Lean to Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา	44
แผนภูมิที่ 4.6	แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving Cooling Energy, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา	46
แผนภูมิที่ 4.7	แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)	48
แผนภูมิที่ 4.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) กับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)	50
แผนภูมิที่ 4.9	แสดงการคำนวณสมการเชิงเส้นโดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น	51
แผนภูมิที่ 4.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) กับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการรณรงค์ในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทางกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานได้ออกพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2535 เพื่อส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตและใช้เครื่องจักร ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อลดการใช้ พลังงานภายในประเทศ ซึ่งจะส่งผลดีต่อประเทศชาติในการลดการขาดดุล ทางการเงิน เนื่องจากการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ และเป็นการลดการนำเข้าทรัพยากรทางธรรมชาติมาใช้ในการผลิตพลังงาน จนเป็นเหตุให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมและสภาวะโลกร้อนขึ้น

กฎกระทรวง พ .ศ.2552 ที่ออกตามพระราชบัญญัติ การส่งเสริม การอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ .ศ.2550 ได้กำหนดค่ามาตรฐานของอาคารควบคุมทางด้าน การถ่ายเทความร้อนรวม โดยคิดค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value: RTTV) และค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังด้านนอกของอาคาร (Overall Thermal Transfer Value: OTTV) ค่าทั้ง 2 นี้ได้มาจากการคำนวณโดยใช้วิธีคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์และค่าสัมประสิทธิ์ตามประกาศของทางกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและ สิ่งแวดล้อม

การคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของอาคารทำได้โดยการวิเคราะห์รายละเอียด ของ ส่วนประกอบ ต่างๆของอาคารแล้วนำมาเข้าสมการคำนวณโดยอ้างอิงจากสัมประสิทธิ์ตาม ประกาศ ที่กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมกำหนดไว้ แต่เนื่องจากอาคารมี ลักษณะรูปทรง การใช้วัสดุที่แตกต่างกันตามแต่สถาปนิกผู้ออกแบบ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมได้ประกาศออกมานั้น ไม่สามารถครอบคลุม อาคารได้ทั้งหมด ทำให้ขาดความแม่นยำในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของอาคาร

สมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (RTTV)

$$RTTV_i = \frac{(U_r)(1 - SRR)(TD_{eq})}{\text{หลังคาที่บ}} + \frac{(U_f)(SRR)(\Delta T) + (SRR)(SHGC)(SC)(ESR)}{\text{หลังคาโปร่งแสง}}$$

$$RTTV = \frac{(A_{r1})(RTTV_1) + (A_{r2})(RTTV_2) + \dots + (A_{ri})(RTTV_i)}{A_{r1} + A_{r2} + \dots + A_{ri}}$$

$RTTV_i$ = ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาด้านที่พิจารณา หน่วยเป็น W/m^2

U_r = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหลังคาทึบ หน่วยเป็น $W/m^2.C^{\circ}$

SRR = อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างโปร่งแสง และ/หรือ ผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคา
ด้านที่พิจารณา

TD_{eq} = ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า C°

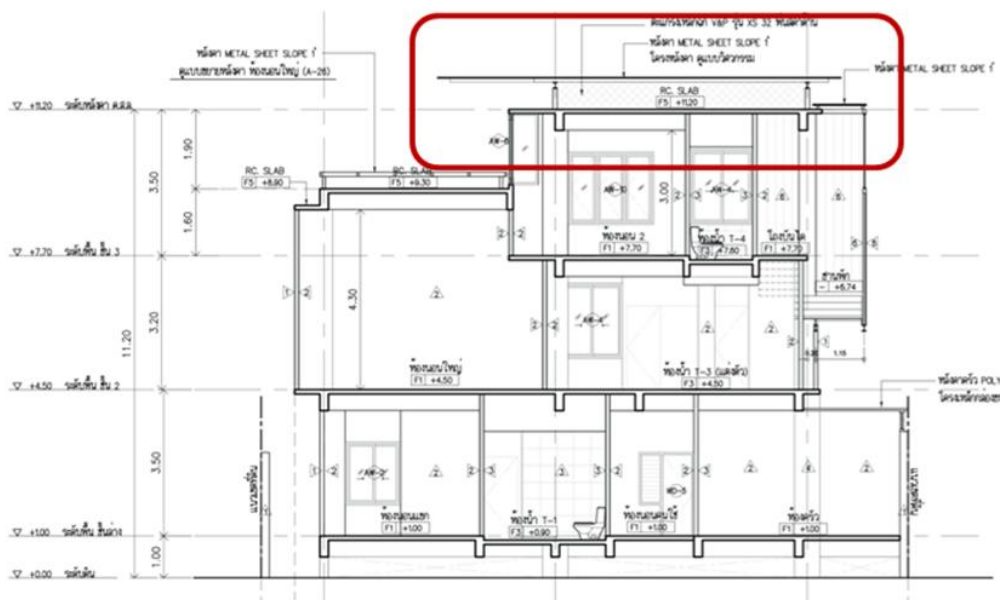
$SHGC$ = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง

SC = ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด

ESR = รังสีดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน W/m^2

A_{ri} = พื้นที่ของหลังคาที่พิจารณา ซึ่งรวมพื้นที่หลังคาทึบและโปร่งแสง หน่วยเป็น m^2

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยพบว่าได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการลดการถ่ายเทความร้อนของหลังคาด้วยวิธีต่างๆ โดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาด้วยวิธี Passive ซึ่งเห็นได้ว่าการบังเงามีส่วนในการช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยการออกแบบในลักษณะหลังคาสองชั้นที่มีให้หลังคาชั้นล่างเป็นหลังคาคลส .พื้นเรียบแล้วเพิ่มหลังคาชั้นที่สองซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถบังเงาให้กับหลังคาคลส .ชั้นล่างได้ การลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารโดยอาศัยหลังคาชั้นบนช่วยบังเงาให้กับหลังคาคลส .ชั้นล่าง ในประเทศไทย นั้นยังขาดผลงานการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพ และความสามารถในการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารอยู่ ทำให้ไม่สามารถนำมาคำนวณในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550 ได้



ภาพที่ 1.1 รูปตัดแสดงลักษณะหลังคาสองชั้น

ในการศึกษาหาประสิทธิภาพการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาของหลังคาประเภทสองชั้นนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่หลายปัจจัย เช่น ลักษณะรูปทรง ขนาด มุมเอียงของหลังคา และความทึบแสงของหลังคาชั้นบน ระยะความสูงของหลังคาชั้นบนจากหลังคาชั้นล่าง รวมทั้งลักษณะการใช้งานอาคารที่เหมาะสมกับการใช้หลังคาประเภทนี้

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยเพื่อค้นหาวิธีการในการที่จะพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น เพื่อให้สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาในลักษณะดังกล่าวได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำขึ้น ตลอดจนสามารถให้ความรู้ และความเข้าใจแก่สถาปนิก ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบอาคารได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในการศึกษาการพัฒนา ตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น ได้กำหนดวัตถุประสงค์ในการทำวิจัยเพื่อศึกษาหา ตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์ของหลังคาสองชั้นที่สามารถนำไปเพิ่มเติมในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550 ได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยเรื่องการศึกษาการพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้นดำเนินไปจนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์และสมมติฐาน จึงได้กำหนดขอบเขตในการวิจัย ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 อาคารสำนักงานที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นอาคารสำนักงานที่เปิดใช้งานในเวลากลางวัน โดยกำหนดเงื่อนไขตามงานวิจัย Surapong Chirattananon, Juntakan Taveekun. An OTTV-based energy estimation model for commercial building in Thailand. 2004. และ อรรถจันทร์ เศรษฐบุตร . การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำนักงานสำหรับประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. กองทุนวิจัยและส่งเสริมพัฒนาผลงานวิจัย สกว. 2552
- 1.3.2 การวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารสำนักงานที่มีการปรับอากาศ เท่านั้น ไม่รวมพื้นที่ส่วนกลาง เช่น โถงลิฟท์ ห้องเครื่อง

- 1.3.3 ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้โปรแกรม VisualDOE-4.0 ในการจำลองอาคารที่ใช้หลังคาสองชั้น และใส่ค่าตัวแปรต้นในการคำนวณ เพื่อหาผลการลดค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา
- 1.3.4 หลังคาชั้นล่างของอาคารเป็นหลังคาคสล. พื้นเรียบ และวัสดุฉนวนหลังคาชั้นที่สองที่นำมาใช้ในการคำนวณจะพิจารณาเป็นระนาบที่บังเงาให้กับหลังคาคสล. ชั้นล่างโดยจะไม่ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของวัสดุ
- 1.3.5 การวิจัยครั้งนี้ไม่รวมปัจจัยการไหลเวียนอากาศบริเวณช่องว่างระหว่างหลังคาทั้งสองชั้น

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

- 1.4.1 การวิจัยนี้ศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองอาคารต้นแบบด้วยโปรแกรม VisualDOE-4.0 เท่านั้นเนื่องจากต้องการคำนวณค่าการใช้พลังงานเฉลี่ยในการทำควมเย็นให้กับอาคารตลอดระยะเวลาหนึ่งปี
- 1.4.2 การวิจัยครั้งนี้กำหนดตัวแปรควบคุมเพื่อจำกัดลักษณะอาคารสำนักงาน เนื่องจากระยะเวลาในการวิจัยมีจำกัด ทำให้การวิจัยอาจไม่ครอบคลุมอาคารที่มีความหลากหลาย

1.5 สมมติฐานการวิจัย

การออกแบบหลังคาสองชั้นโดยใช้หลักการบังเงาให้กับหลังคาชั้นล่างจะช่วยลดภาระการทำความเย็นอาคารลงได้ และส่งผลต่อการคำนวณ ในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ .ศ.2550 โดยสามารถแบ่งสมมติฐานในการวิจัยออกดังนี้

- 1.5.1 การเพิ่มหลังคาชั้นที่สองเข้าไปบนหลังคาคสล. จะสามารถลดอัตราการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในอาคารได้
- 1.5.2 รูปทรง และ มุมเอียงที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของหลังคาสองชั้น

1.6 ระเบียบวิธีการวิจัย

- 1.6.1 ทบทวนวรรณกรรม และศึกษา พระราชบัญญัติส่งเสริมอนุรักษ์พลังงานปี พ .ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ.ศ.2550 เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และอิทธิพลที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารทางหลังคา

- 1.6.2 เตรียมอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการ วิจัย เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทำแบบจำลอง โดยในกา วิจัย ครั้งนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ecotect Analysis 2011 และ VisualDOE 4.0
- 1.6.3 ดำเนินการวิจัย โดยแบ่งขั้นตอนการทดลองตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยมีขั้นตอนการวิจัยตามรูปที่ 3.1
- 1.6.4 วิเคราะห์ข้อมูลผลการวิจัย แสดงผลในรูปแบบภูมิ เเชิงเส้น และหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรออกมาเป็นตารางข้อมูลที่จะนำไป วิเคราะห์หาตัวแปรปรับแก้ เสริมในสมการ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550
- 1.6.5 สรุปผล และนำผลจากการวิเคราะห์มาสรุปผลหาแนวทางการออกแบบหลังคาสองชั้นที่มีประสิทธิภาพภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นในกรุงเทพมหานคร และแนวทางการคำนวณ ้นการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น แ ล้วนำเสนอข้อมูลเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาและผู้ทำวิจัยต่อจากนี้

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาการพัฒนา ตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ ดังต่อไปนี้

- 1.8.1 จากการวิจัยทำให้ทราบถึงผลดี และประสิทธิภาพของการใช้หลังคาสองชั้นในการช่วยลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารจากหลังคาของอาคาร สำนักงานที่ใช้งานในเวลากลางวัน
- 1.8.2 นำผลที่ได้มาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบหลังคาสองชั้นให้มีประสิทธิภาพภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นในกรุงเทพมหานคร
- 1.8.3 พัฒนาค่าสัมประสิทธิ์ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาตามพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2550 ให้ครอบคลุมหลังคาสองชั้น
- 1.8.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาหาค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของอาคารในปีจจัยต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณ ้นได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อิทธิพลจากดวงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Radiation) ที่ส่องมายังพื้นโลก รังสีส่วนหนึ่งจะถูกชั้นบรรยากาศกรองไว้ โดยรังสีบางส่วนถูกสะท้อนกลับด้วยโมเลกุลของชั้นบรรยากาศ และบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ในชั้นบรรยากาศ รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นโลกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

รังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรง (Direct Radiation) เป็นรังสีที่ส่องเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศโลกมีค่า $434.29 \text{ Btu/h.ft}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่นิยมนำมาใช้กันโดยทั่วไป และจากการที่การโคจรของดวงอาทิตย์เป็นวงรีจะมีปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ค่ามากสุดในวันที่ 3 มกราคม เมื่อโลกมีการโคจรใกล้กับดวงอาทิตย์มากที่สุด ค่าการแผ่รังสีจะเท่ากับ $449.60 \text{ Btu/h.ft}^2$ และน้อยที่สุดในวันที่ 6 กรกฎาคม เมื่อโลกมีการโคจรห่างจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ค่าการแผ่รังสีจะเท่ากับ 419.9 Btu/h.ft^2 (ASHRAE, 1989)

รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีที่เกิดจากการสะท้อนของแสงกับเมฆ ฝุ่นละออง หรือไอน้ำในอากาศ การกระจายที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอ แต่จะมีความเข้มสูงในบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ปริมาณของรังสีจะมีค่า 10-90% ของปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้าสู่ตัวอาคาร

รังสีสะท้อน (Reflected Radiation) เป็นรังสีที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นดิน หรืออาคารข้างเคียง จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า Reflectivity ของพื้นผิว สี ของวัสดุที่อยู่รอบๆอาคาร

หลังคาเป็นส่วนที่ได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งประกอบด้วย 2 ประเภทคือ

1. รังสีคลื่นสั้น (Short Wave Radiation) เป็นรังสีที่มากจากดวงอาทิตย์โดยตรง สามารถทะลุผ่านกระจกใสได้
2. รังสีคลื่นยาว (Long Wave Radiation) เกิดจากรังสีคลื่นสั้นที่ตกกระทบกับวัตถุ แล้วเปลี่ยนเป็นรังสีคลื่นยาวในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งจะไม่สามารถทะลุผ่านกระจกออกไปได้ (วิกิกรม จํานงคจิตต์, 2545)

รังสีจากดวงอาทิตย์ หรือรังสีคลื่นสั้นที่ส่องมาถึงพื้นโลกจะเป็นรังสีในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.29-3.5 ไมโครเมตร โดยพลังงานในส่วนนี้จะประกอบไปด้วย พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆกัน ดังนี้

1. รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet: UV) เป็นพลังงานในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.29-0.4 ไมโครเมตร เป็นรังสีที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสีของวัสดุ อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ

รวมทั้งผิวหนังของมนุษย์ด้วย ดังจะเห็นได้จากวัสดุ เครื่องใช้ต่างๆ ที่โดนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาหนึ่ง สีที่ผิวของวัสดุจะซีดจางลง โดยจะมีสัดส่วนเป็น 9 % ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด

2. แสงที่มองเห็น (Visible Light) เป็นพลังงานในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.4-0.7 ไมโครเมตร พลังงานที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ ซึ่งจะปรากฏในรูปแบบของแสง ที่ทำให้มนุษย์สามารถมองเห็นได้ โดยแสงที่มองเห็นได้นั้น จะมีสัดส่วนเป็น 25 % ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด
3. รังสีอินฟราเรดคลื่นสั้น (Near Infrared Ray: NIR) เป็นพลังงานในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.7-3.5 ไมโครเมตร เป็นพลังงานในรูปของความร้อน จะเห็นได้ว่าเมื่อเราสัมผัสกับรังสีจากดวงอาทิตย์โดยตรง เราจะรู้สึกร้อนขึ้นมาทันที เนื่องจากรังสีอินฟราเรดนี้ และมีสัดส่วนเป็น 53 % ซึ่งมีสัดส่วนที่มากที่สุดของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด ดังนั้นรังสีในช่วงความยาวคลื่นนี้จึงเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้เกิดความร้อนจากดวงอาทิตย์เข้าสู่อาคาร

2.2 การถ่ายเทพลังงานรังสีความร้อน

รังสีความร้อนเป็นรังสีในรูปแบบคลื่นยาว และมีพลังงานต่ำ รังสีเมื่อกระทบวัสดุใดๆ จะสะท้อน ส่งผ่าน และดูดซึมไว้ในวัสดุนั้นๆ วัสดุแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสี ส่งผ่านรังสี และดูดซึมรังสีที่ตกกระทบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ทิศทาง (มุม) ของการแผ่รังสี การคายรังสีจะมีค่าสูงที่ทิศทางตั้งฉาก
2. ความยาวคลื่นของการแผ่รังสี การคายรังสีเชิงสเปกตรัมทิศทางตั้งฉากของโลหะจะลดลง เมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น
3. อุณหภูมิของพื้นผิว การคายรังสีของโลหะจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนการคายรังสีของอโลหะจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น
4. ความขรุขระของพื้นผิว เนื่องจากผลของความขรุขระที่ไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวเสมือนโพรง จึงทำให้เกิดการสะท้อนรังสีได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้การดูดซึมรังสีมีค่าสูงขึ้น นั่นคือการคายรังสีมีค่าสูงขึ้น
5. การเจือปนผิว สารปนเปื้อนบนพื้นผิวทำให้คุณสมบัติการแผ่รังสีเปลี่ยนไป โดยทำให้การแผ่รังสีมีค่าสูงขึ้น

ลักษณะของพื้นผิวจะมีอิทธิพลสูงต่อการแผ่รังสี และการดูดซึมรังสี วัสดุต่างๆจะมีค่าการดูดซึมรังสี (Absorptivity) และค่าการสะท้อนรังสี (Reflectivity) แตกต่างกันไปตามลักษณะของ

ผิววัสดุ วัสดุที่มีค่าการดูดซึมรังสีสูงก็จะมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ คุณสมบัตินี้เรียกว่า การแผ่รังสี (Emittance) ค่าการแผ่รังสีจะบ่งบอกถึงความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสี ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับสภาพพื้นผิวของวัสดุที่คายรังสี และของวัสดุที่ดูดซึมรังสี

ค่าการสะท้อนรังสี ค่าการดูดซึมรังสี และค่าการส่งผ่านรังสี เป็นคุณสมบัติของวัสดุในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับช่วงสเปกตรัม คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหนึ่งๆ ผลรวมของการสะท้อนรังสี การดูดซึมรังสี และการส่งผ่านรังสีจะเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ตกกระทบลงมาสำหรับวัสดุทึบตัน (Opaque) พลังงานที่ถูกส่งผ่านจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นผลรวมของค่าการสะท้อนรังสี การดูดซึมรังสี และการส่งผ่านรังสีจะเท่ากับพลังงานรังสี เมื่อถูกดูดซึมโดยวัสดุจะเปลี่ยนเป็นรูปความร้อน ความร้อนนี้จะถูกนำไป หรือแผ่รังสีออกมาในรูปแบบคลื่นยาวจากวัสดุนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ค่าการสะท้อนรังสี (Reflectivity) วัสดุผิวมัน และมีสีอ่อนจะสามารถสะท้อนรังสีความร้อน และแสงได้ดีสำหรับวัสดุทึบตัน วัสดุที่มีค่าการสะท้อนรังสีสูง จะมีค่าการดูดซึมรังสีต่ำ
2. ค่าการส่งผ่านรังสี (Transmissivity) จะเป็นคุณสมบัติของวัสดุโปร่งใส (Transparent) และโปร่งแสง (Translucent) ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุประเภทนี้จึงต้องระวังถึงความร้อนที่จะเข้ามาภายในอาคาร
3. ค่าการดูดซึมรังสี (Absorptivity) เป็นตัวแสดงความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของผิววัสดุ วัสดุที่สีเข้มจะดูดกลืนรังสีความร้อนได้ดีกว่า วัสดุที่มีสีอ่อนกว่า

ค่าการคายรังสี (Emissivity) เป็นตัวแสดงความสามารถของวัสดุในการปล่อยรังสีคลื่นยาวของผิว วัสดุโลหะผิวมัน เงามัน จะมีค่าการคายรังสีต่ำกว่าวัสดุผิวหยาบ วัสดุผิวสีขาวจะมีความสามารถในการสะท้อนสูง แต่ในกรณีที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นหลังคาที่ต้องรับความร้อนจากดวงอาทิตย์เป็นเวลานานจะมีผลใกล้เคียงกับหลังคาสีขาวชนิดอื่น เนื่องจากภายในเนื้ออลูมิเนียมสามารถเก็บความร้อนไว้ได้มากกว่าวัสดุสีขาวหลายเท่า ดังนั้นการใช้แผ่นอลูมิเนียมบางๆเป็นตัวสกัดกั้นความร้อนจะได้ผลดี เพราะมีมวลน้อยจึงทำหน้าที่ในการสะท้อนความร้อนออกไปได้ดี

2.3 ประเภทของหลังคา

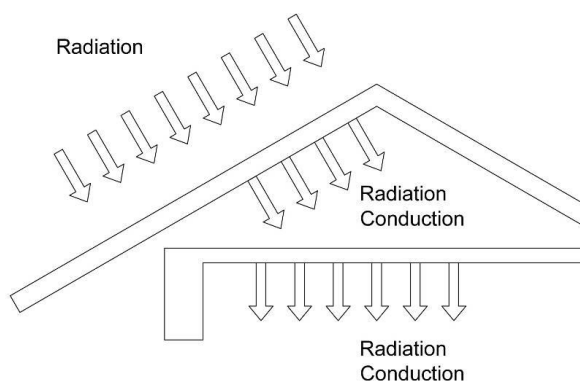
หลังคา เป็นส่วนที่ได้รับความร้อนโดยตรงจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ความร้อนจากดวงอาทิตย์จะถูกดูดซึม (Absorption) และส่งผ่าน (Transmittance) พลังงานความร้อนลงมาสู่ด้านล่าง โดยการแผ่รังสีความร้อนจากหลังคา สำหรับอาคารทั่วไปในเขตร้อน หลังคาเป็นองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมที่จะได้รับผลกระทบโดยตรงจากการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์ เพราะหลังคา

มีพื้นที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อมมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรอบอาคารด้านต่างๆ ดังนั้นสภาวะนำสบายของอาคารชั้นเดียว หรือห้องใต้หลังคาจะได้รับอิทธิพลจากกรอบอาคารส่วนนี้มากที่สุด ระบบหลังคาจะประกอบด้วยด้านส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ ส่วนหลังคาภายนอก ส่วนช่องอากาศภายใน และส่วนฝ้าเพดาน

ประเภทของวัสดุผนังหลังคา แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. หลังคาประเภท Heavyweight solid โดยทั่วไปมีลักษณะแบนเรียบ เช่น หลังคาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Flat Slab) มีความสามารถในการสะสมความร้อนสูง การส่งผ่านความร้อนที่ถูกดูดซึมไว้จากพื้นผิวภายนอกหลังคามีผลจากการนำความร้อนผ่านมวลสารของหลังคา ช่องอากาศ ส่วนของฝ้าเพดาน ดังนั้นปัจจัยหลักของการถ่ายเทความร้อนของหลังคา คือ สีภายนอก ความต้านทานความร้อน และความสามารถในการถ่ายเทความร้อน และการเพิ่มฉนวนกันความร้อนให้กับหลังคา
2. หลังคาประเภท Lightweight เป็นแผ่นหลังคาภายนอกบนโครงสร้างหลังคา วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นหลังคาก็จะแตกต่างกันออกไป เช่น แผ่นกระเบื้องซีเมนต์ใยหิน แผ่นแอสเบสตอท แผ่นโลหะต่างๆ ฯลฯ
- 3.

2.4 พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคา



ภาพที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคาในช่วงเวลากลางวัน

จากการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของหลังคาทั่วไปพบว่า ในช่วงเวลากลางวัน หลังคาจะเป็นส่วนที่ได้รับอิทธิพลจากแสงอาทิตย์มากที่สุดเกือบตลอดทั้งวัน วัสดุผนังหลังคาจะดูดซับรังสีความร้อนที่มาจากดวงอาทิตย์ จึงทำให้อุณหภูมิผิวของวัสดุผนังหลังคาสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศภายนอก ความร้อนที่สะสมในวัสดุผนังหลังคาจะถูกถ่ายเทไปยังช่องว่างอากาศใต้หลังคา เมื่อช่องอากาศใต้หลังคามีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะถ่ายเทความร้อนไปสู่ฝ้าเพดานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

และเมื่อฝ้าเพดานมอดูมสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิห้อง ก็จะทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนให้กับห้องส่งผลให้ภายในห้องมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามไปด้วย (จุไรพร ตุมพสุวรรณ, 2550)

2.5 ฉนวนกันความร้อน

อิทธิพลจากแสงแดด ความชื้น และความร้อนจากภายนอกอาคาร มีผลต่อการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างอาคารเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศไทยซึ่งอยู่ในเขตร้อนชื้น มีฝนตกชุกและอุณหภูมิสูงเกือบตลอดปี ทำให้ต้องมีการพิจารณาเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติในการลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทางหนึ่ง คือการเลือกใช้วัสดุที่สามารถป้องกันความร้อนถ่ายเทเข้าสู่อาคาร หรือมีค่า R-value สูง ฉนวน คือวัสดุที่มีคุณสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อน โดยมีค่าการหน่วงเหนี่ยวความร้อน (Time Lag) น้อย ทำให้อิทธิพลภายนอกสามารถเข้ามาภายในอาคารค่อนข้างมาก ซึ่งมีทางแก้โดยการเพิ่มความหนาของฉนวนให้มากขึ้น แต่จะทำให้มีราคาแพง ดังนั้นการออกแบบโดยการผสมผสานการใช้ฉนวนและมวลสาร จะเป็นผลดีในการหน่วงเหนี่ยวความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในอาคารไม่เปลี่ยนแปลงรุนแรงเหมือนภายนอก และถ้าสามารถหน่วงเหนี่ยวเวลาได้อย่างเหมาะสม คือทำให้ปริมาณความร้อนเข้ามาภายในอาคารในช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายนอกต่ำลงมากที่สุด ก็จะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากยิ่งขึ้น (วิกรม จานงคจิตต์, 2545)

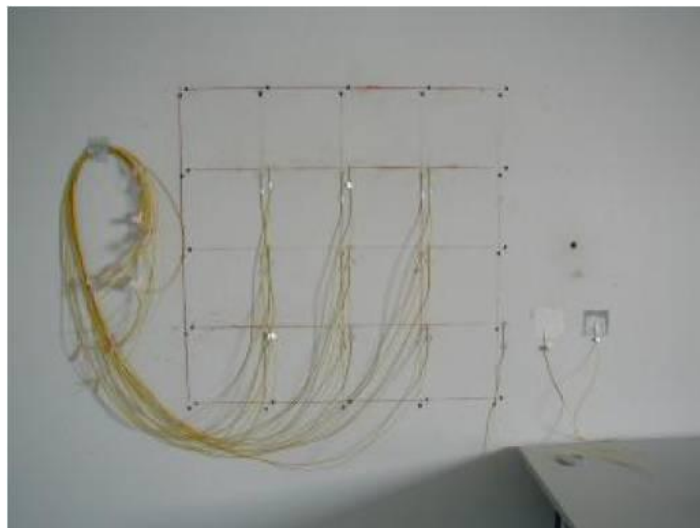
2.6 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

จากการศึกษา งานวิจัยภายในประเทศที่ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของการบังเงาเพื่อช่วยในการลดการถ่ายเทความร้อน โดย สิริวรินทร์ เพชรรัตน์. อิทธิพลของการบังเงาต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต , คณะพลังงานและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 2545. ได้ศึกษาอิทธิพลของการบังเงาต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังทึบ โดยการคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้หลักการของวิธี Finite Difference และการเก็บข้อมูลจริงจากผนังทดสอบ ซึ่งในการวิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น เพื่อทดสอบคุณลักษณะ 1.การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากการบังเงาให้กับผนังที่มีการถ่ายเทความร้อนจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่อุณหภูมิต่ำ 2.ถ่ายเทความร้อนในระนาบผนังระหว่างส่วนที่ไม่มีเงา และมีเงา โดยทำการสร้างหุ่นจำลองจากห้องทดสอบที่เป็นอาคาร 3 ชั้น ขนาดกว้าง 6 เมตร ยาว 6 เมตร ความสูงแต่ละชั้นเท่ากับ 3 เมตร ด้านหน้าอาคารหันไปทางทิศใต้ แล้วเก็บข้อมูลที่ผนังด้านทิศตะวันตก ซึ่งเป็นผนังคอนกรีตที่ใช้ผ้าใบสีขาว เป็นอุปกรณ์บังเงา งานวิจัยครั้งนี้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดและบันทึกข้อมูลขนาด 60 ช่องสัญญาณ เทอร์

โมดัลเปิด ไพรานอมิเตอร์ และชุดตรวจวัดและบันทึกข้อมูลภูมิอากาศในการเก็บรวบรวมและบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 2.2 แสดงอาคารที่ใช้ทดสอบ



ภาพที่ 2.3 แสดงตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิผนังทดสอบ

รูปแบบการทดลองได้มีการกำหนดรูปแบบออกเป็น 4 กรณี ได้แก่

1. กรณีที่ไม่มีงบบังเงา ในวันที่ทำการทดลอง จะถอดม้วนผ้าใบออก เพื่อป้องกันไม่ให้มีเงาเกิดขึ้นบนผนัง
2. กรณีที่มีงบบังตลอดเวลา ทดลองโดยการหมุนผ้าใบลงบังพื้นที่ทดสอบทั้งหมดตลอดเวลา เพื่อไม่ให้แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นที่ทดสอบได้

3.กรณีที่มีการบังเงาบางส่วน กโหนดให้ครึ่งบนของพื้นที่ผนังทดสอบมีเงาบังตลอดเวลา ส่วนพื้นที่อีกครึ่งหนึ่งด้านล่างไม่มีการบังเงา ในการทดลองจะต้องปรับผ้าใบเพื่อให้ตำแหน่งของเงาคงที่ตลอดเวลา

4.กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีในเวลาใดเวลาหนึ่ง จะทดลองใน 2 กรณีคือ

- กรณีผนังเดิมไม่มีการบังเงา ทดลองโดยทำให้มีเงาเกิดขึ้นบนผนัง ในเวลา 15.00 น. โดยการหมุนผ้าใบลง
- กรณีผนังเดิมมีผ้าใบบังพื้นที่ทดสอบอยู่ตลอดเวลา จะหมุนผ้าใบขึ้นเพื่อทำให้ไม่มีเงาบนผนัง ในเวลา 15.00 น.

ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการเก็บข้อมูลจริงมาเปรียบเทียบ พบว่าในกรณีผนังไม่มีการบังเงาฟลักซ์ความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สูงกว่าผนังจริงอยู่ในช่วง 0.29-3.46 วัตต์/ตารางเมตร และฟลักซ์ความร้อนใน 1 วันที่คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสูงกว่าผนังจริงอยู่ 12.9 % หรือ 18 วัตต์/ตารางเมตร

ในกรณีผนังมีการบังเงาตลอดเวลา พบว่าฟลักซ์ความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สูงกว่าผนังจริงอยู่ในช่วง 0.2-4.6 วัตต์/ตารางเมตร และฟลักซ์ความร้อนใน 1 วันที่คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสูงกว่าผนังจริงอยู่ 31.7 % หรือ 26.8 วัตต์/ตารางเมตร

ในกรณีผนังมีการบังเงาบางส่วนพบว่าฟลักซ์ความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์สูงกว่าผนังจริงอยู่ในช่วง 0.5-6.1 วัตต์/ตารางเมตร และฟลักซ์ความร้อนใน 1 วันที่คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะสูงกว่าผนังจริงอยู่ 29.4 % หรือ 23.1 วัตต์/ตารางเมตร

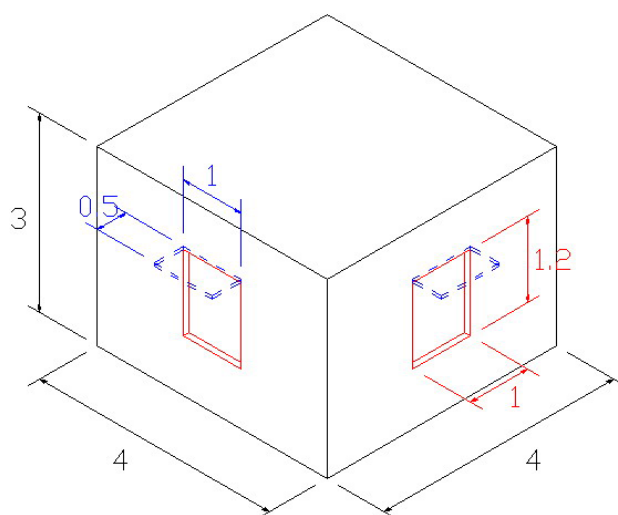
และในกรณีผนังมีการบังเงาเปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นแทบไม่มีความแตกต่างกันมากนัก จึงทำให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่าผนังที่บั้งจะมีผลให้ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารมีค่าลดลงได้ โดยในกรณีที่ผนังมีการบังเงาทั้งหมดฟลักซ์ความร้อนรวมใน 1 วัน ที่ถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารจะลดลงเฉลี่ย 56.3 % และในกรณีของผนังที่มีเงาบางส่วนโดยตำแหน่งของเงามีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ฟลักซ์ความร้อนรวมใน 1 วัน จะลดลงเฉลี่ย 35.1 %

โปรแกรมคำนวณการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ และ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้คำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่บั้งที่มีเนื้อเดียวได้ ผลที่ได้จากโปรแกรมจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังจริงจากการตรวจวัดพบว่า ผลที่ได้จากโปรแกรมจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิผนังจริงมากที่สุด ในกรณีที่ผนังไม่มีการบังเงา ส่วนกรณีที่ผนังมีการบังเงาทั้งหมดหรือมีการบังเงาบางส่วน ผลต่างอุณหภูมิจะมีค่ามากขึ้น โดยอาจมีสาเหตุมาจากสมมุติฐานที่กำหนดขึ้นยังไม่สอดคล้องกับ

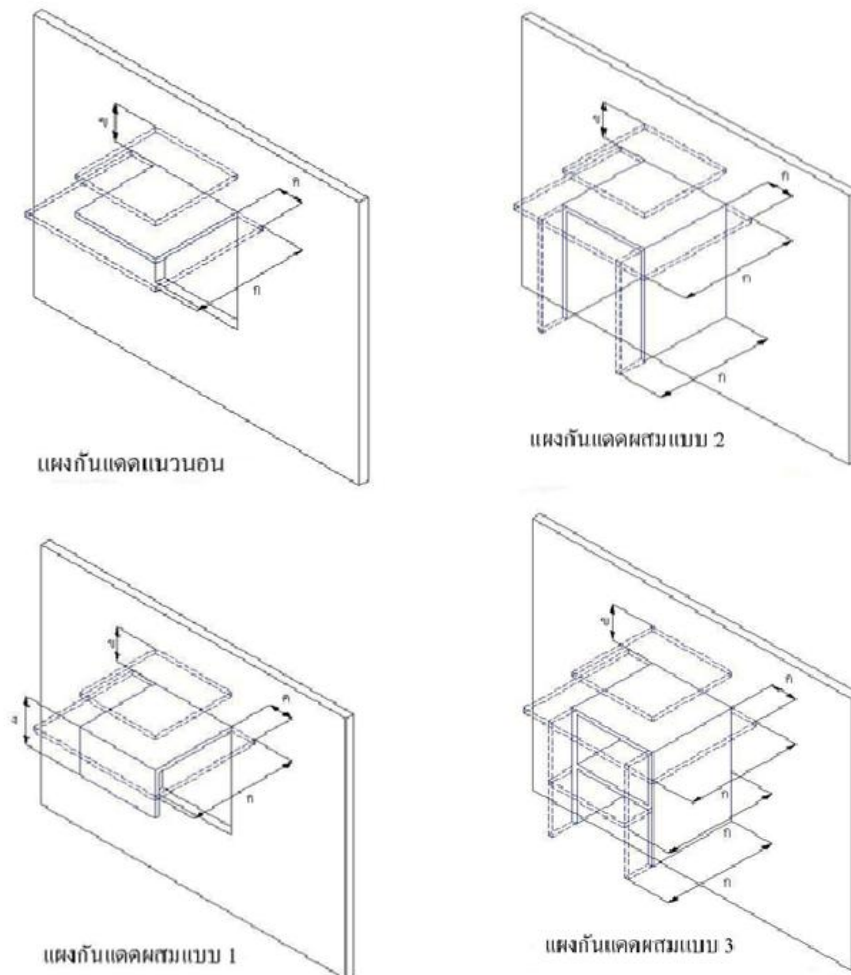
กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงเมื่อผนังมีการบังเงา รวมทั้งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ

สัการ ราชสีสุทธิ. การศึกษาและวิจัยเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์การประเมินการใช้แผงกันแดดกับอาคารเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น , 2550. ได้ศึกษาและวิจัยเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์การประเมินการใช้แผงกันแดดกับอาคารเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร โดยได้ทำการการศึกษาและวิจัยเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์การประเมินการใช้แผงกันแดดกับอาคารเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคารในประเทศไทย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกันแดดของแผงกันแดดรูปแบบต่างๆ ต่อผนัง-ช่องเปิดของอาคารในทิศทางต่างๆ และเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์การประเมินและการให้ค่าคะแนนการใช้แผงกันแดดกับอาคารที่เข้ารับการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ด้วยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficient, SC) โดยได้ใช้วิธีการศึกษาการจำลองอาคารในคอมพิวเตอร์ (Thermal Building Simulation) โดยโปรแกรม DOE-2 จำลองแผงกันแดดรูปแบบต่างๆต่อผนัง-ช่องเปิดของอาคารใน 8 ทิศทาง ดังนี้

1. แผงบังแดดแนวนอน
2. แผงบังแดดผสมแผงบังแดด 1. แผงบังแดดแนวตั้งเป็นแผงบังแดดคู่ด้านข้างของช่องเปิด
3. แผงบังแดดผสมแบบที่ 2 เป็นแผงบังแดดแนวนอน และ แนวตั้ง
4. แผงบังแดดผสมแบบที่ 3 เป็นแผงบังแดดแนวนอนที่มีแผงบังแดดแนวตั้งปิดด้านหน้า



ภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะอาคารจำลอง



ภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะแผงกันแดด

ในการจำลองอาคารในโปรแกรม DOE-2 แบบจำลองได้ถูกแยกออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 มีผนัง 4 ด้านหันไปสู่ทิศหลักทั้งสี่คือ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ส่วนแบบที่ 2 มีผนัง 4 ด้านเช่นกัน ผนังหันไปสู่สี่ทิศคือ ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และทิศตะวันตกเฉียงใต้ แล้วนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม DOE-2

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดได้ใช้ผลการคำนวณรายชั่วโมงใน 4 วันคือวันที่ 21 มีนาคม 21 มิถุนายน 21 กันยายน และ 21 ธันวาคมมาเฉลี่ย ซึ่งถือเป็นค่าเฉลี่ยตลอดปีของค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด จากนั้นนำผลที่ได้จากการคำนวณอาคารต้นแบบ (base case) ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง อาคารที่ติดตั้งแผงบังแดด รูปแบบต่างๆ ตามทฤษฎีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด ตามคู่มืออนุรักษ์พลังงานในอาคาร พ.ศ.2538

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงบังแดดที่ระยะยื่นมากจะมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงบังแดดที่มีระยะยื่นน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการคำนวณค่า SC เมื่อนำมาเปรียบเทียบพบว่ามีความแตกต่างกันของผลการคำนวณค่า SC ของทั้งสองวิธี ซึ่งมีค่าความแตกต่างกันประมาณร้อยละ 9

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงบังแดดแนวนอนที่มีระยะยื่น 1.0 และ 2.0 เมตร

วิธีการคำนวณ	ค่า SC เฉลี่ยของผนัง*		
	ระยะยื่น (เมตร)		ค่าเฉลี่ย
	1.0	2.0	
คู่มือการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร 2538	0.88	0.79	
DOE-2	0.94	0.88	
ความแตกต่างของ SC	-0.06	-0.09	0.08
% ความแตกต่าง	6.78	11.90	9.34

* ผนัง 4 ด้านคือ ด้านทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และ ตะวันตก

จากนั้นจึงได้นำผลการวิจัยที่ได้มาวิเคราะห์เป็นแบบประเมินค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดของอาคาร ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วนคือ

แบบประเมินที่ 1 ตารางการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงกันแดดรวม

แบบประเมินที่ 2 ตารางค่าคะแนน

แบบประเมินที่ 3 ตารางการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงกันแดดเฉลี่ยในแต่ละทิศ

แบบประเมินที่ 4 ตารางบันทึกรูปแบบแผงบังแดด

แบบประเมินที่ 5 ตารางข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของแผงกันแดดประเภทแนวนอน และแบบผสม

ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดที่ได้กล่าวข้างต้นใน 8 ทิศทางของผนังอาคาร ได้ผลการคำนวณคือค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดจำนวน 1,440 ค่า ซึ่งแต่ละค่าเป็นค่าเฉพาะสำหรับอุปกรณ์บังแดดแบบหนึ่ง ที่มีระยะของตัวแปรต่างๆค่าหนึ่ง และอยู่ในทิศทางหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณในสมการได้ โดยผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องรู้

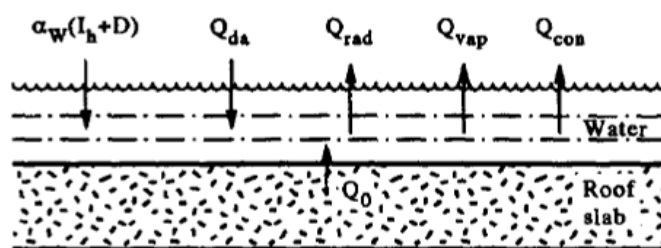
วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดดอย่างละเอียด แต่ผู้ออกแบบต้องเข้าใจหลักการและวิธีการอ่านค่า สัมประสิทธิ์การบังแดดจากตาราง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยเกี่ยวกับการลดการถ่ายเทความร้อนของหลังคาด้วยวิธีต่างๆ โดยในงานวิจัยต่างประเทศจะมุ่งเน้นศึกษาถึงประสิทธิภาพการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาด้วยวิธี Passive ดังเช่นที่พบในงานวิจัยต่อไปนี้

Soona Raeissi and Mansour Taheri. Cooling load reduction of building using passive roof options. Chemical Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran, 1995. งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของอาคารที่มีการบังเงาหลังคา และป้อนน้ำบนหลังคา โดยการเขียนโปรแกรมคำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารจากสมการ Energy Balance เปรียบเทียบกับผลการสำรวจอาคารพักอาศัยทั่วไปในเมือง Shiraz ประเทศอิรัก แล้วทำการจำลองอาคารเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอาคารที่มีการใช้วิธี passive cooling บนหลังคารูปแบบต่างๆ

การคำนวณพลังงานความร้อนผ่านหลังคา (Heat flux through roof) พิจารณาหลังคาแนวราบ 4 รูปแบบ ได้แก่

- หลังคาอาคารพักอาศัยทั่วไป
- หลังคาอาคารพักอาศัยที่ปกคลุมด้วยบ่อน้ำ (pond roof)
- หลังคาอาคารพักอาศัยทั่วไปที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาให้กับหลังคาอาคารทั้งหมดโดยติดตั้งสูงเพียงพอให้อากาศไหลผ่านบริเวณช่องกลางระหว่างอุปกรณ์บังเงากับหลังคาอาคาร
- หลังคาอาคารที่ผสมอุปกรณ์บังเงาและบ่อน้ำ โดยติดตั้งอุปกรณ์บังเงาให้สูงเพียงพอให้อากาศและความชื้นระบายผ่านออกได้เพื่อป้องกันการสะสมของความชื้นใต้หลังคา



ภาพที่ 2.6 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนของหลังคาที่มีบ่อน้ำ

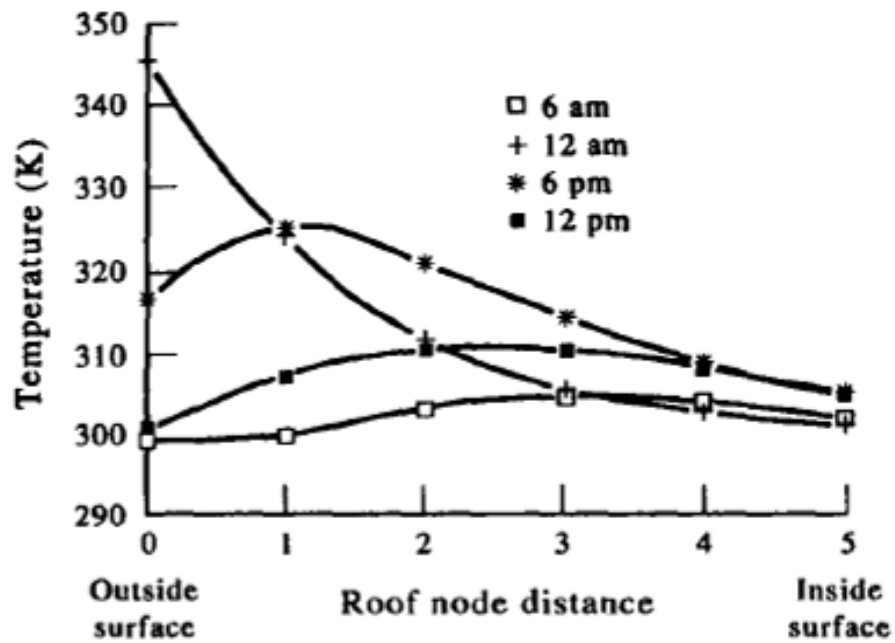


Fig. 4. Temperature profile of the bare roof slab.

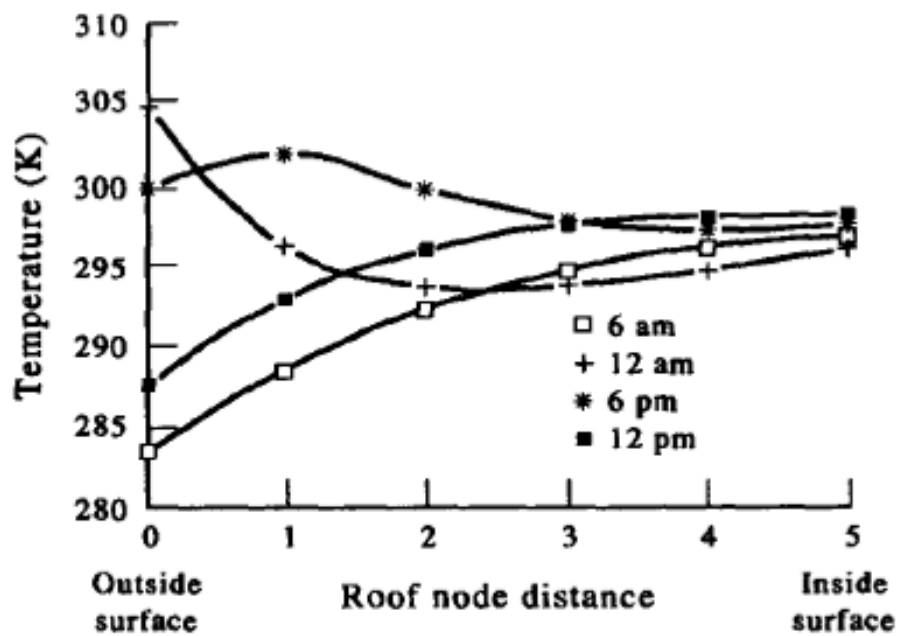


Fig. 5. Temperature profile of the pond roof slab.

แผนภูมิที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิภายในวัสดุ

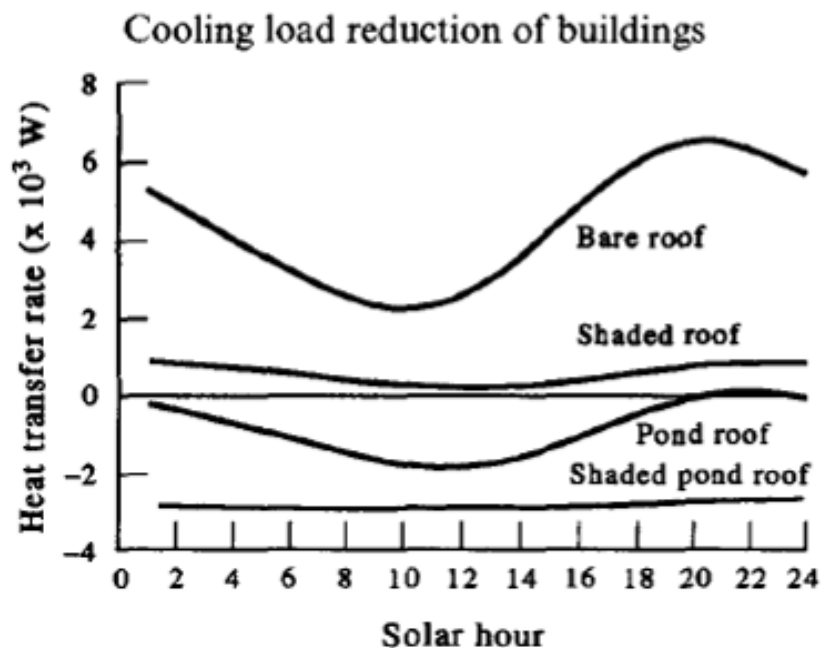


Fig. 6. Heat transfer rate through roof for different roof options.

แผนภูมิที่ 2.2 แสดงปริมาณความร้อนผ่านหลังคาในแต่ละช่วงเวลา

จากแผนภูมิที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารด้วยรูปแบบหลังคาต่างๆเปรียบเทียบกับหลังคาทั่วไป ซึ่งหลังคา passive cooling ที่มีการบังเงาจะสามารถลดอัตราการถ่ายเทความร้อนจากภายนอก (Outside surface) หลังคาเข้ามาสู่ภายในหลังคา (Inside surface) ได้

หลังคาที่ใช้วิธีแบบบ่อน้ำ (pond roof) นอกจากจะลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารแล้วยังส่งผลให้ความร้อนภายในอาคารถ่ายเทสู่บ่อน้ำด้านบนหลังคาด้วย เห็นได้จากแผนภูมิที่ 2.1 ค่าความร้อนด้านในหลังคา จะมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าด้านบนนอกในแต่ละช่วงเวลาของวัน

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพพร้อมลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร

Table 3. Comparison of overall daily cooling demand of the test building with different roof options

Type of roof option	Daily cooling load (joules)	% Cooling load reduction
Bare roof	7.086×10^8	—
Pond roof	2.970×10^8	58.09
Shaded roof	3.994×10^8	43.63
Shaded pond roof	1.490×10^8	78.97

อย่างไรก็ตามการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาด้วยวิธี pond roof ต้องมีการคำนึงถึงความลึกของบ่อน้ำด้านบนด้วย การเพิ่มระดับความลึกของบ่อน้ำจะเป็นการเพิ่มภาระการทำความเย็นอาคาร เพราะเป็นการลดอัตราการระเหยของน้ำต่อปริมาตรของบ่อน้ำ เนื่องจากบ่อน้ำที่มีความลึกน้อยอุณหภูมิจะสูงขึ้นเร็วกว่าบ่อน้ำที่มีความลึกมากกว่า ทำให้มีอัตราการระเหยสูง ลดการสะสมความร้อนในน้ำ และทำให้ความร้อนจากภายในอาคารสามารถถ่ายเทไปยังบ่อน้ำได้มากกว่า

ตารางที่ 2.3 แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารตามค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

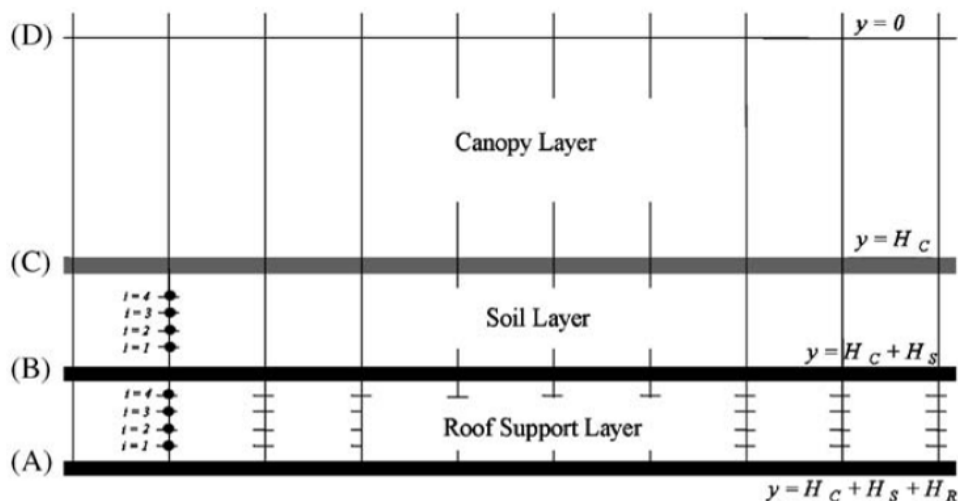
Table 4. Overall daily demands, in joules, as affected by relative humidity for different roof options

Roof option	Relative humidity 24%	Relative humidity 70%
Bare roof	7.086×10^8	6.905×10^8
Pond roof	2.970×10^8	4.188×10^8
Shaded roof	3.994×10^8	3.979×10^8
Shaded pond roof	1.490×10^8	2.291×10^8

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแบบ pond roof เป็นอย่างมาก เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะส่งผลต่ออัตราการระเหยของน้ำในบ่อน้ำหลังคาทำให้ไม่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นการลดการถ่ายเทความร้อนทางหลังคาด้วยวิธี pond roof นั้นให้ประสิทธิภาพสูงในสภาพอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ประกอบกับการบังเงาให้กับบ่อน้ำจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นอาคารได้ดียิ่งขึ้น

Rakesh Kumar, S.C. Kaushik. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology. 2004. ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพการลดภาระการทำความเย็นอาคารของหลังคาเขียว และการหลังคาบังเงาแสงอาทิตย์ด้วยวิธีคำนวณ finite difference methods โดยเปรียบเทียบผลการวิจัยกับหุ่นจำลองที่มีหลังคาเขียว เพื่อเป็นการสนับสนุน และรณรงค์ให้มีการเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับเมือง เป็นการลดภาระการทำความเย็นอาคาร และลดการเกิด Urban Heat Island



ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะแบบจำลองหลังคาเขียว

แบบจำลองหลังคาเขียวประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ประการ ได้แก่ โครงสร้างหลังคา ชั้นดิน ชั้นพืชพันธุ์สีเขียว โดยมีตัวแปรสำคัญคือดัชนีพื้นที่ใบของพืชพันธุ์ต่อพื้นที่เพาะปลูก (leaf area index, LAI) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำพื้นที่ใบหารด้วยพื้นที่ผิวดิน บนอาคารจำลองขนาด กว้าง 5 เมตร ยาว 6 เมตร สูง 4 เมตร

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

Planted roof parameters and properties

Element	Effective conductivity (λ_z)	Thickness	Specific heat (J/kg K)
Green canopy	Varying (on foliage characteristics)	0.4 m	Variable
Soil	1.21 W/m K		840
Sieve layer	0.4 W/m K	0.002	1340
Wash off layer	0.035 W/m K	0.03	Varying
Reinforced Concrete	1.58 W/m K	0.006	880
Roof plaster	0.72 W/m-K	0.018	820

นำผลการคำนวณด้วยสมการที่สร้างขึ้นมาตรวจสอบด้วยผลการเก็บข้อมูลจากหุ่นจำลองที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นอากาศ โดยติดตั้งบริเวณมุมและศูนย์กลางของหลังคาเขียว ที่ความสูง 0.20 0.40 0.60 และ 1.0 เมตรจากระดับชั้นดิน ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของดินทำการติดตั้งเซนเซอร์ที่ระดับ 0.10 และ 0.20 เมตรจากระดับโครงสร้างหลังคา และติดตั้งเซนเซอร์วัดค่าอุณหภูมิและความชื้นที่ระดับ 0.50 1.50 2.50 เมตรภายในห้อง เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการลดภาระการทำความเย็นของหลังคาเขียวในแต่ละปัจจัยต่างๆ

จากการเปรียบเทียบผลการวิจัยของสมการคำนวณที่สร้างขึ้นกับหุ่นจำลองพบว่าที่ระดับชั้นพืชพันธุ์สีเขียวอุณหภูมิอากาศมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 3.3 % ภายในอาคารอุณหภูมิอากาศมีความแตกต่างอยู่ในช่วง 6.1% และลดลงจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 7.2 องศาเซลเซียส

ตัวแปรสำคัญในการลดอุณหภูมิอากาศภายในอาคารได้แก่ค่า LAI การปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร LAI จะส่งผลต่ออุณหภูมิอากาศระดับชั้นพืชพันธุ์สีเขียว โดยการปรับค่าตัวแปร LAI จาก 0.5 ไปเป็น 3.5 ในช่วงวันที่ 1-8 มิถุนายนจะสามารถลดอุณหภูมิอากาศได้สูงสุด 9.3 องศาเซลเซียส และลดค่าการผันผวนของอุณหภูมิอากาศจาก 11.6 องศาเซลเซียสลงเหลือ 3.6 องศาเซลเซียส

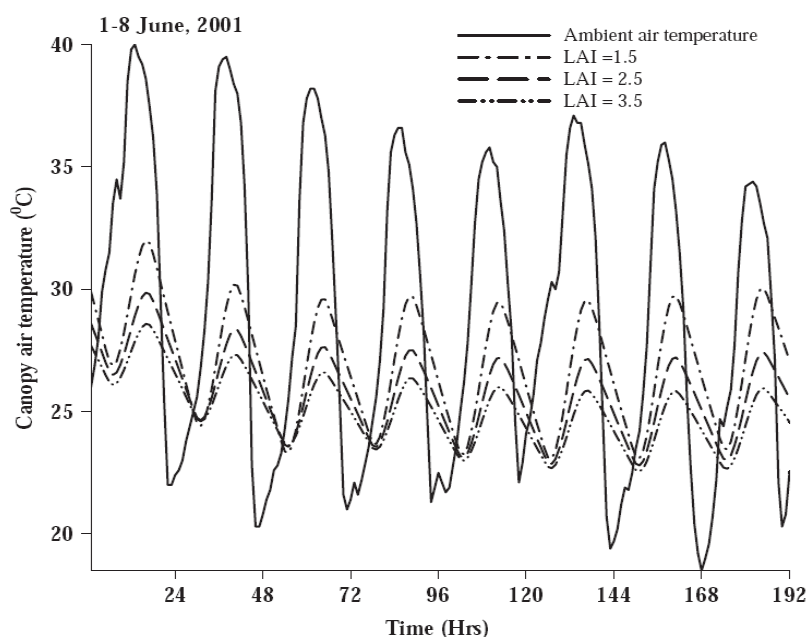
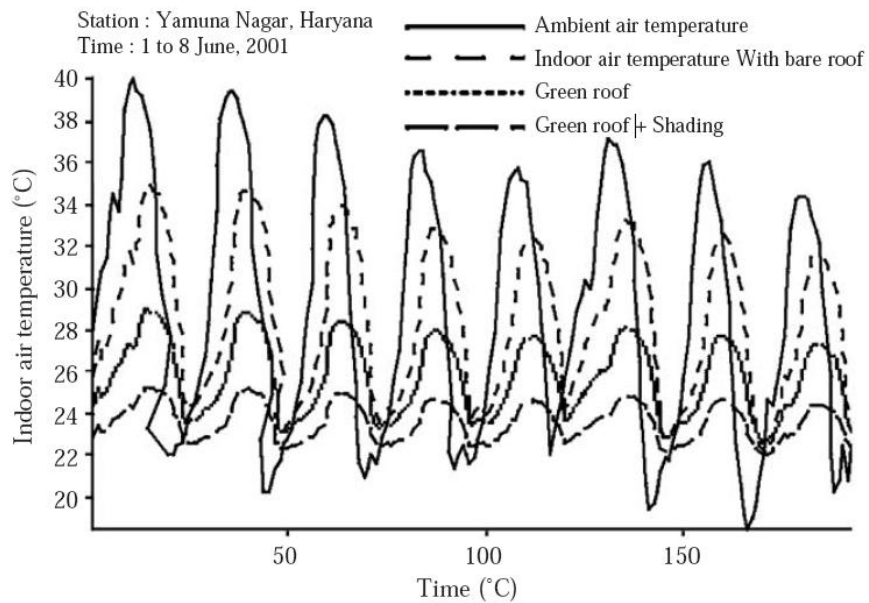


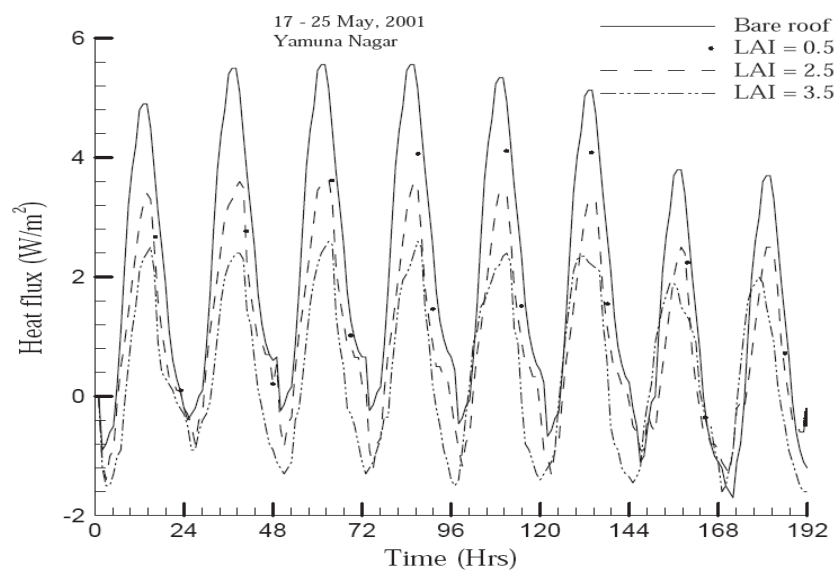
Fig. 7. Effect of various LAI on canopy air temperature.

แผนภูมิที่ 2.3 แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดอุณหภูมิที่ระดับชั้นพื้นพันธุ์

จากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในอาคารที่ไม่ใช้ระบบหลังคาเขียวอยู่ที่ 28.47 องศาเซลเซียส ค่าความผันผวนของอุณหภูมิภายในอาคารอยู่ที่ 10.2 องศาเซลเซียส แต่เมื่อมีการใช้ระบบหลังคาเขียวอุณหภูมิภายในอาคารเฉลี่ยอยู่ที่ 25.7 องศาเซลเซียส ลดลง 3.3 องศาเซลเซียส ค่าความผันผวนของอุณหภูมิภายในอาคารอยู่ที่ 5.1 องศาเซลเซียส และหากเพิ่มหลังคาที่มีการบังเงาให้กับหลังคาเขียวจะสามารถลดอุณหภูมิภายในอาคารลงเหลือ 23.6 องศาเซลเซียสซึ่งลดลงจากอุณหภูมิภายในอาคารของอาคารที่ใช้ระบบหลังคาเขียวอีก 2.1 องศาเซลเซียส ค่าความผันผวนของอุณหภูมิภายในอาคารอยู่ที่ 2.1 องศาเซลเซียส



แผนภูมิที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดอุณหภูมิภายในอาคาร



แผนภูมิที่ 2.5 แสดงประสิทธิภาพของหลังคาเขียวในการลดการถ่ายเทความร้อนภายในอาคาร

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าค่า LAI และความสูงของพืชพันธุ์ของหลังคาเขียวจะมีผลต่ออุณหภูมิอากาศของระดับชั้นพืชพันธุ์และภายในอาคาร โดยการเพิ่มค่า LAI ให้กับหลังคาเขียวจะสามารถลดอุณหภูมิอากาศ ลดค่าความผันผวนของอุณหภูมิอากาศ และช่วยลดการถ่ายเทความร้อนลงได้ถึง 4 วัตต์/ ตารางเมตร

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เน้นการวิจัยเชิงจำลองสถานการณ์จริง (Simulation Research) เป็นสำคัญ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือ หลักในการวิจัย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์ของหลังคาสองชั้นที่สามารถนำไปเพิ่มเติมในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550 ได้อย่างเหมาะสม โดยอาศัยข้อมูลผลสำรวจอาคารสำนักงาน รายละเอียด และองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรมจากงานวิจัย “การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำนักงานสำหรับประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์” (อรรจน์ เศรษฐบุตร, 2552)

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้โปรแกรม Ecotect Analysis 2011 เป็นเครื่องมือในการคำนวณ และเก็บรวบรวมข้อมูลการบังเงาของหลังคาชั้นบนที่เกิดขึ้นกับหลังคาคสล. ชั้นล่าง โดยเฉลี่ยรายชั่วโมง ตั้งแต่ 8.00 -17.00 น. ของวันที่ 21 มีนาคม (March Equinox) 21 มิถุนายน (Summer Solstice) 21 กันยายน (September Equinox) และ 21 ธันวาคม (Winter Solstice) และโปรแกรม VisualDOE-4.0 ในการคำนวณค่าการใช้พลังงานการทำความเย็นอาคาร จากหลังคา (Cooling Energy from Roof) เฉลี่ยต่อปี

3.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 และโปรแกรม VisualDOE-4.0 มาจัดเรียงในรูปแบบตาราง เพื่อสรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลหาค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารของแต่ละรูปทรงที่ได้กำหนด

นำผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง กับค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร จากหลังคา ที่ลดลงเพื่อหาประสิทธิภาพของหลังคาสองชั้นในแต่ละรูปทรง

จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาสร้างสมการเชิงเส้นของแต่ละรูปทรงหลังคาเพื่อพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารให้ครอบคลุมหลังคาที่มีลักษณะสองชั้น

3.3 รายละเอียดของตัวแปร

ตัวแปรต้น

กำหนดรูปทรงหลังคาสองชั้นจากลักษณะรูปทรงหลังคาพื้นฐานที่พบเห็นได้โดยทั่วไปในการวิจัย โดยแบ่งหลังคาสองชั้นออกเป็น 3 รูปทรง ได้แก่

- หลังคาแบน (Flat Roof) มีลักษณะแบนราบ
- หลังคาเพิงหมาแหงน มุม 15 องศา (Lean to Roof 15°) มีลักษณะแบน โดยยกด้านหนึ่งของหลังคาให้สูงเงยขึ้นจากแนวราบ เพื่อให้เกิดความลาดชัน ทำมุม 15 องศากับแนวราบ
- หลังคาจั่วมุม 15 องศา (Gable Roof 15°) มีลักษณะเหมือนหลังคาเพิงหมาแหงนสองส่วนหันด้านที่ยกสูงชันชนกัน ทำมุม 15 องศากับแนวราบ

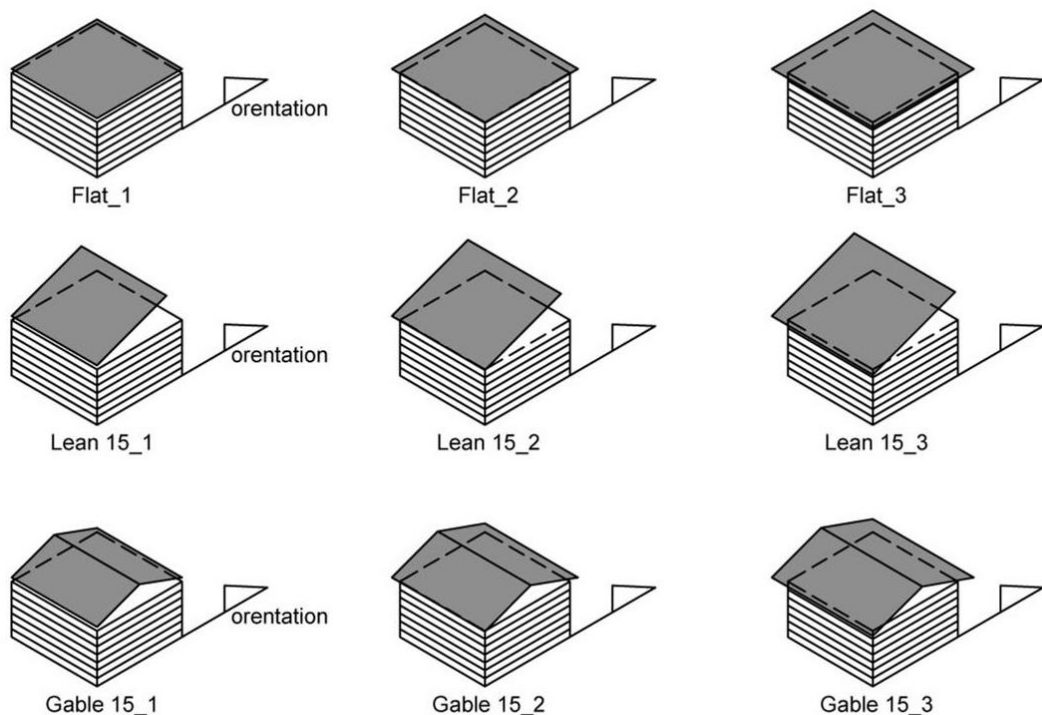
เพิ่มตัวแปรในทุกูรูปทรงหลังคาอีก 6 ลักษณะในส่วนของระยะยื่นชายคา และความโปร่งแสง (Transparence) ของหลังคาสองชั้น เพื่อคำนวณหาลักษณะการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาสล. ชั้นล่าง ได้แก่

- Roof_1 ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 1 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ระยะยื่นชายคาเสมอขอบอาคาร และหลังคาเป็นวัสดุทึบแสง
- Roof_2 ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 2 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ชายคามีระยะยื่น 1.50 เมตร จากขอบอาคาร
- Roof_3 ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 3 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ชายคามีระยะยื่น 3.00 เมตร จากขอบอาคาร
- Roof_0.25% ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 4 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ชายคามีระยะยื่น 3.00 เมตร จากขอบอาคาร และหลังคาเป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสง 0.25%
- Roof_0.50% ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 5 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ชายคามีระยะยื่น 3.00 เมตร จากขอบอาคาร และหลังคาเป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสง 0.50%

- Roof_0.75% ลักษณะตัวแปรประเภทที่ 6 คือ หลังคาชั้นบนติดตั้งสูงจากหลังคาคสล. ด้านล่าง 1.50 เมตร ชายคามีระยะยื่น 3.00 เมตร จากขอบอาคาร และหลังคาเป็นวัสดุที่มีความโปร่งแสง 0.75%

ในการวิจัยได้มีการกำหนดขนาดได้หลังคาอาคารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนวัสดุแตกต่างกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาอาคารของหลังคาสองชั้น โดยกำหนดประเภทขนาดอาคาร ดังต่อไปนี้

- หลังคา คสล.หนา 10 cm. ปูกระเบื้องคอนกรีต (RTTV = 62.08 ,u = 3.253W/m².C°)
- หลังคา คสล.หนา 10 cm. ปูกระเบื้องคอนกรีต ติดฝ้าเพดานยิปซัมบอร์ดหนา 12 mm. (RTTV = 28.02 ,u = 1.467W/m².C°)
- หลังคา คสล.หนา10 cm. ปูกระเบื้องคอนกรีต ติดฉนวน EPS หนา 2 นิ้ว (RTTV = 10.22 ,u = 0.535 W/m².C°)
- หลังคา คสล.หนา10 cm. ปูกระเบื้องคอนกรีต ติดฉนวน EPS หนา 2 นิ้ว ฝ้ายิปซัมบอร์ดหนา 12 mm. ฉนวนใยแก้วหนา 3 นิ้วชนิด non-reflective air space (RTTV = 4.57 , u = 0.239 W/m².C°)



ภาพที่ 3.1แสดงรูปทรงหลังคาสองชั้นที่ใช้ในการวิจัย

ตัวแปรควบคุม

ในการจำลองอาคารสำนักงานได้มีการกำหนดลักษณะทางสถาปัตยกรรมโดยอ้างอิงจากงานวิจัย “การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำนักงานสำหรับประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์” (อรรจน์ เศรษฐบุตร , 2552) ที่ได้จากการสำรวจวารสารสมาคมสถาปนิกสยาม “อาสา” ภายในระยะเวลา 5 ปี เพื่อวิเคราะห์หาแนวโน้มการออกแบบ การเลือกใช้วัสดุอาคาร โดยเลือกอาคารสำนักงานมาศึกษาทั้งสิ้น 12 อาคารที่มีพื้นที่ใช้สอยระหว่าง 1 ,000 – 10,000 ตารางเมตร พบว่าโดยส่วนใหญ่จะเป็นอาคารสูงไม่เกิน 7 ชั้นเพื่อไม่ให้อาคารสูงเกิน 23 เมตรตามกฎหมายควบคุมอาคารขนาดใหญ่พิเศษ จึงได้มีการกำหนดค่าสภาพแวดล้อมในอาคารที่ศึกษาดังนี้

- อาคารที่มีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 10,000 ตารางเมตร
- ตั้งค่าอุณหภูมิปรับอากาศ 25 องศาเซลเซียส
- กำหนดเวลาการใช้อาคาร ในวันจันทร์-ศุกร์ เวลา 8.00-17.00 น.
- จำนวนผู้ใช้งาน 7 ตารางเมตรต่อคน
- ใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง 16 วัตต์ต่อตารางเมตร
- ใช้พลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์ 16 วัตต์ต่อตารางเมตร
- ค่าสัดส่วนพื้นที่กระจกต่อพื้นที่ผนังภายนอกอาคารเท่ากับ 50%
- ช่องเปิดอาคารใช้กระจกเขียวสองชั้น ($U = 2.74 \text{ W/sq.m.}^{-\circ\text{C}}$, $\text{SHGC} = 0.491$)

ตัวแปรตาม

ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 ได้ค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคาหลังคาคล. ชั้นล่าง (%shaded) ของหลังคารูปทรงต่างๆ และผลการคำนวณจากโปรแกรม VisualDOE 4.0 ได้ค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-Yr)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาพระราชบัญญัติส่งเสริมอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ.ศ.2550

ศึกษาทฤษฎี บทความ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคารทางหลังคา จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อทำ

การคัดเลือกตัวแปรเพียงบางตัวที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการวิจัยเพื่อให้เหมาะสมกับช่วงระยะเวลาในการทำการทดลอง รวมทั้งกำหนดวิธีการ ขั้นตอนการทดลองให้เหมาะสมกับตัวแปรที่ได้เลือกมา

3.4.2 เตรียมอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทำแบบจำลอง โดยในการทดลองครั้งนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ecotect Analysis 2011 ในการคำนวณร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาคลส.ชั้นล่าง (%Shaded) และโปรแกรม VisualDOE 4.0 ในการจำลองอาคารสำนักงาน เพื่อหาค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof)

3.4.3 ทดสอบความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ และเครื่องมือในการวิจัย

ทำการจำลองอาคารต้นแบบที่มีหลังคาสองชั้นด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์แนวโน้มของตัวแปรต่างๆกับผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัย “An OTTV-based energy estimation model for commercial building in Thailand” (Surapong Chirattananon, Juntakan Taveekun, 2004)

3.4.4 ดำเนินการทดลอง โดยแบ่งการทดลองเป็นดังนี้

ใช้โปรแกรม Ecotect Analysis 2011 จำลองลักษณะเงาที่หลังคาชั้นบนบังเงาให้กับหลังคาคลส.ชั้นล่าง โดยคำนวณลักษณะเงาที่เกิดขึ้นตั้งแต่เวลา 8.00-17.00 น. ใน 4 วันต่อปี ได้แก่ 21 มีนาคม (March Equinox) 21 มิถุนายน (Summer Solstice) 21 กันยายน (September Solstice) และ 21 ธันวาคม (Winter Solstice)

จากสมมติฐาน	การเพิ่มหลังคาชั้นที่สองเข้าไปบนหลังคาคลส.จะสามารถลดอัตรา การถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ภายในอาคารได้
การทดลองที่ 1	การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของอาคารที่มีหลังคาสอง ชั้น โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 ระหว่างอาคารหลังคาคลส.พื้นเรียบทั่วไป กับ อาคารที่มีหลังคาสองชั้น เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเท ความร้อนสู่อาคารจากหลังคาของหลังคาสองชั้น

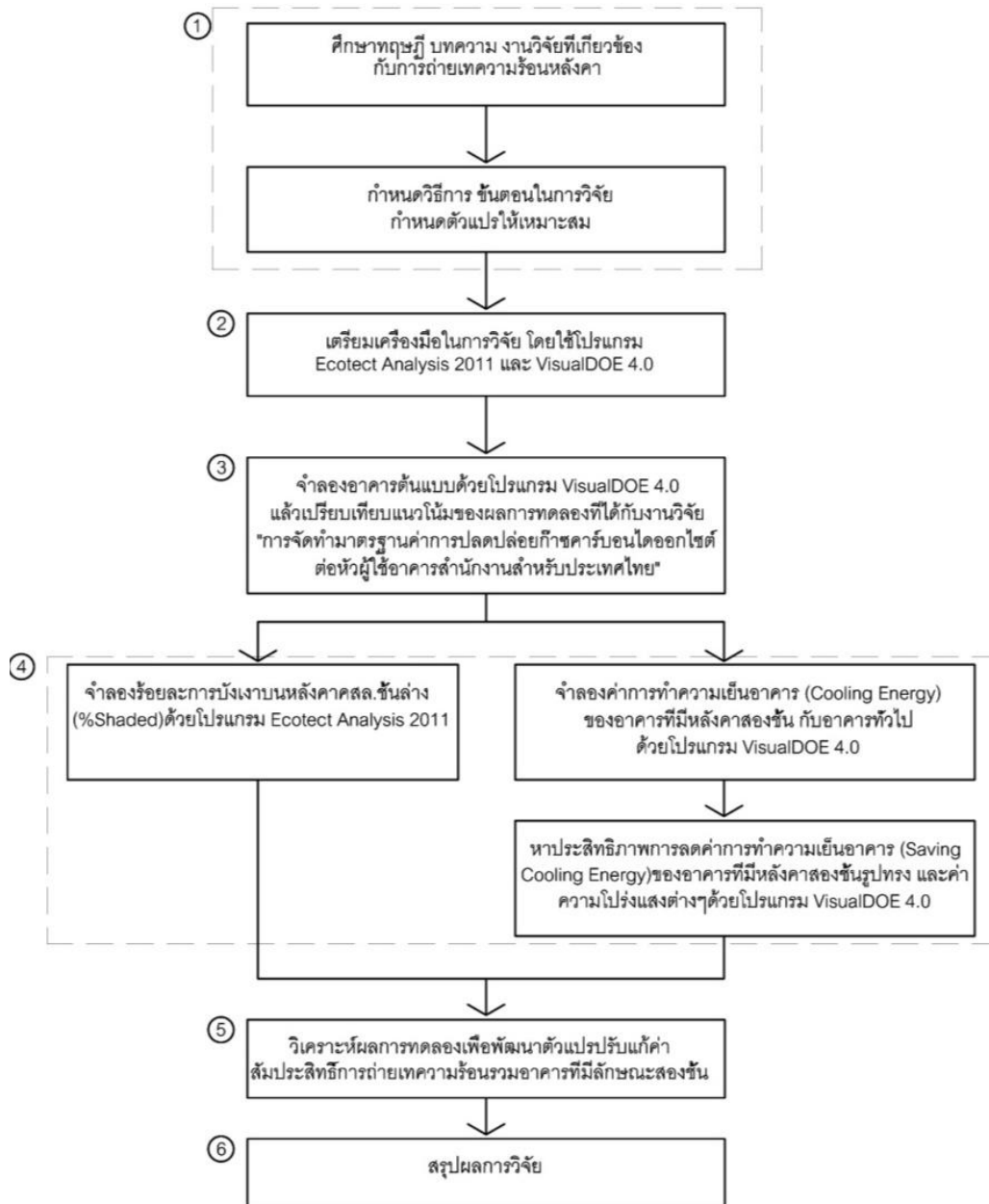
จากสมมติฐาน	รูปทรง และ ความทึบแสง ที่แตกต่างกัน ของหลังคาชั้นบนให้ประสิทธิภาพในการบังเงาที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อนของหลังคาสองชั้น
การทดลองที่ 2	ทำการจำลองหลังคาสองชั้นที่มีมุมเอียงของหลังคาชั้นบน 0° 15° 30° ที่ระยะยื่นและความโปร่งแสง 0.25% 0.50% และ 0.75% ด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 และ VisualDOE 4.0 แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ หาประสิทธิภาพการลดการถ่ายเทความร้อนในแต่ละค่าปริมาณร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาสล.ชั้นล่าง

3.4.5 วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

นำผลการทดลองในแต่ละรูปทรงหลังคาอาคารมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงผลในรูปแบบภูมิเชิงเส้น และตาราง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550 เพื่อหา ตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรออกมาเป็นตารางข้อมูลที่จะนำไปเสริมในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2550

3.4.6 สรุปผล และเสนอแนะ

นำผลจากการวิเคราะห์มาสรุปผลหาแนวทางการออกแบบหลังคาสองชั้นที่มีประสิทธิภาพภายใต้สภาพภูมิอากาศร้อนชื้นในกรุงเทพมหานคร และแนวทางการคำนวณ การถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น รวมทั้งอธิบายข้อจำกัดในการวิจัย ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการวิจัย และเสนอแนวทางแก้ไขเพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาและผู้ทำวิจัยในแนวทางนี้ต่อไป



ภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการวิจัย

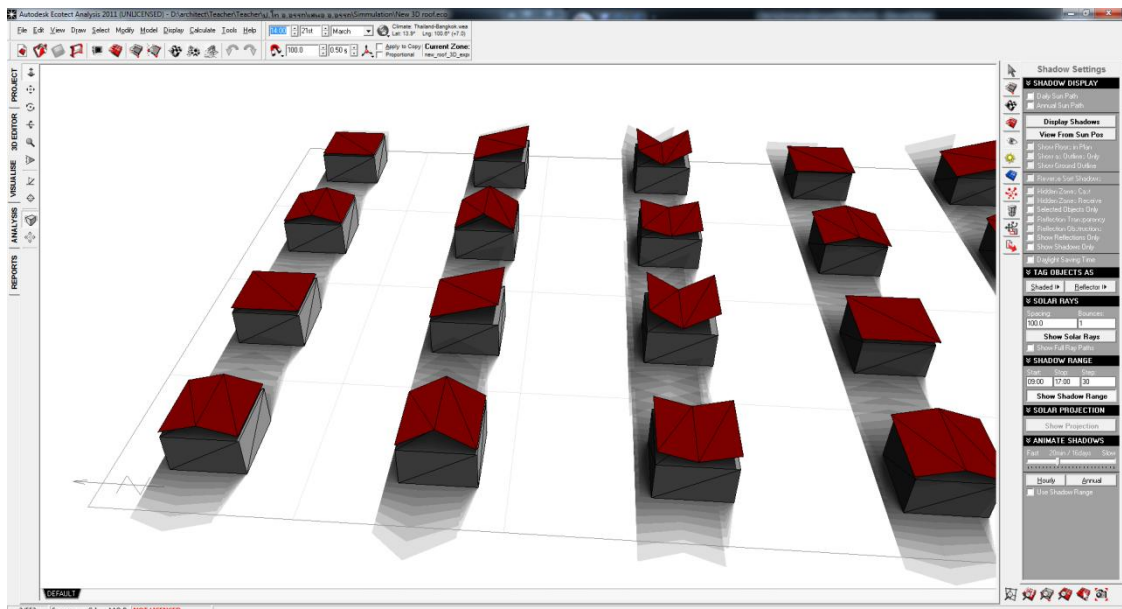
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการคำนวณ

สรุปผลการคำนวณจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Ecotect Analysis 2011 ในการคำนวณร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง (%Shaded) และโปรแกรม VisualDOE 4.0 ในการจำลองอาคารสำนักงาน เพื่อหาค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof)

4.1.1 การจำลองสภาพการบังเงาหลังคา คสล. ชั้นล่าง

ใช้โปรแกรม Ecotect Analysis 2011 ในการคำนวณการบังเงาที่เกิดขึ้นกับหลังคาคสล.ชั้นล่าง โดยกำหนดช่วงเวลาดังแต่ 8.00-17.00 น. ใน 4 วันตลอดปี ได้แก่ 21 มีนาคม 21 มิถุนายน 21 กันยายน และ 21 ธันวาคม แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยออกมาเป็นร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคา คสล. (% Shaded) ตลอดปีในแต่ละทิศ



ภาพที่ 4.1 แสดงผลการจำลองหลังคาด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณร้อยละการบังเงาหลังคาคสล.ชั้นล่างตลอดปี (% Shaded)

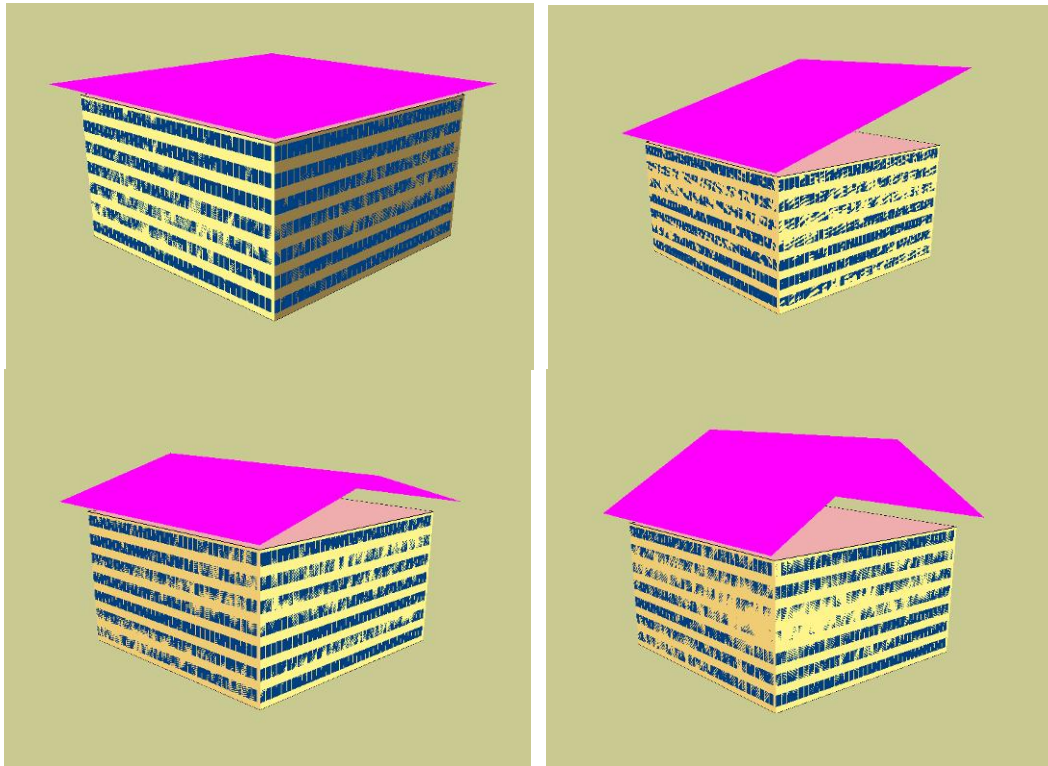
Roof Type	North					East					West					South				
	March	June	Sept.	Dec.	Total Shaded	March	June	Sept.	Dec.	Total Shaded	March	June	Sept.	Dec.	Total Shaded	March	June	Sept.	Dec.	Total Shaded
	Flat_1	92.80	89.00	93.50	90.70	91.50	91.80	90.90	92.00	89.30	91.00	90.60	92.40	91.20	87.00	90.30	89.00	93.70	89.30	85.70
Flat_2	98.10	98.70	98.00	98.90	98.43	97.30	97.90	97.10	96.90	97.30	97.40	97.90	97.30	96.90	97.38	98.20	98.70	98.20	96.00	97.78
Flat_3	99.50	99.50	99.40	99.40	99.45	98.90	98.60	98.90	99.00	98.85	99.20	99.30	98.90	98.90	99.08	99.60	98.90	99.60	99.40	99.38
Flat_0.25%	74.63	74.63	74.55	74.55	74.59	74.18	73.95	74.18	74.25	74.14	74.40	74.48	74.18	74.18	74.31	74.70	74.18	74.70	74.55	74.53
Flat_0.50%	49.75	49.75	49.70	49.70	49.73	49.45	49.30	49.45	49.50	49.43	49.60	49.65	49.45	49.45	49.54	49.80	49.45	49.80	49.70	49.69
Flat_0.75%	24.88	24.88	24.85	24.85	24.86	24.73	24.65	24.73	24.75	24.71	24.80	24.83	24.73	24.73	24.77	24.90	24.73	24.90	24.85	24.84
lean 15_1	80.20	71.20	80.40	80.90	78.18	76.70	78.20	80.20	66.40	75.38	74.30	77.70	72.70	67.40	73.03	70.50	83.50	72.10	54.10	70.05
lean 15_2	85.00	75.80	84.70	87.30	83.20	81.80	84.50	85.20	70.90	80.60	79.80	82.20	78.10	71.90	78.00	75.30	88.60	76.40	57.30	74.40
lean 15_3	86.90	81.10	87.00	90.00	86.25	84.20	87.80	87.10	73.90	83.25	83.40	84.70	81.10	77.40	81.65	79.70	90.60	83.60	59.60	78.38
lean 15_0.25%	65.18	60.83	65.25	67.50	64.69	63.15	65.85	65.33	55.43	62.44	62.55	63.53	60.83	58.05	61.24	59.78	67.95	62.70	44.70	58.78
lean 15_0.50%	43.45	40.55	43.50	45.00	43.13	42.10	43.90	43.55	36.95	41.63	41.70	42.35	40.55	38.70	40.83	39.85	45.30	41.80	29.80	39.19
lean 15_0.75%	21.73	20.28	21.75	22.50	21.56	21.05	21.95	21.78	18.48	20.81	20.85	21.18	20.28	19.35	20.41	19.93	22.65	20.90	14.90	19.59
Gable 15_1	86.60	83.20	86.90	84.20	85.23	90.00	88.20	90.80	83.20	88.05	88.60	90.60	89.30	79.80	87.08	82.50	88.20	83.00	79.40	83.28
Gable 15_2	91.10	92.30	91.20	90.40	91.25	96.10	96.50	97.10	90.60	95.08	96.90	97.10	97.30	87.60	94.73	91.30	93.00	91.10	89.30	91.18
Gable 15_3	92.80	94.30	93.20	92.60	93.23	98.30	99.30	98.90	94.40	97.73	99.20	99.10	98.90	91.90	97.28	93.00	95.10	93.00	93.20	93.58
Gable 15_0.25%	69.60	70.73	69.90	69.45	69.92	73.73	74.48	74.18	70.80	73.29	74.40	74.33	74.18	68.93	72.96	69.75	71.33	69.75	69.90	70.18
Gable 15_0.50%	46.40	47.15	46.60	46.30	46.61	49.15	49.65	49.45	47.20	48.86	49.60	49.55	49.45	45.95	48.64	46.50	47.55	46.50	46.60	46.79
Gable 15_0.75%	23.20	23.58	23.30	23.15	23.31	24.58	24.83	24.73	23.60	24.43	24.80	24.78	24.73	22.98	24.32	23.25	23.78	23.25	23.30	23.39

จากการคำนวณ การบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาคสล. ชั้นล่างด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 พบว่าในหลังคารูปทรงเดียวกันที่มีระยะยื่นชายคาเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ร้อยละ การบังเงา ต่อตารางเมตรบนหลังคาคสล. ชั้นล่างสูงขึ้น แต่ค่าความโปร่งแสงของหลังคาชั้นบนจะทำให้ร้อยละ การบังเงาบนหลังคา คสล. ชั้นล่างลดลง โดยสรุปได้ดังนี้

- หลังคาแบน (Flat Roof) รูปทรง Flat_3 ให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างสูงสุด (96.45%) เมื่อเทียบกับหลังคารูปทรงอื่นในทุกทิศทางหลังคา หลังคารูปทรง Flat_0.75% ให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างต่ำสุด (24.71%)
- หลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof) รูปทรง Lean 15_3 ทิศทางมุมเงยชายคาไปทางทิศเหนือให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างสูงสุด (86.25%) หลังคารูปทรง Lean 15_0.75% ทิศทางมุมเงยชายคาไปทางทิศใต้ให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างต่ำสุด (19.59%)
- หลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) รูปทรง Gable 15_3 ทิศทางชายคาไปทางทิศตะวันออกให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างสูงสุด (97.73%) หลังคารูปทรง Gable 15_0.75% ทิศทางชายคาไปทางทิศเหนือให้พื้นที่บังเงากับหลังคาคสล. ชั้นล่างต่ำสุด (23.31%)

4.1.2 การจำลองสภาพการถ่ายเทความร้อนและการใช้พลังงานทำความเย็นอาคาร

ใช้โปรแกรม VisualDoe 4.0 คำนวณพลังงานทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof หรือ CER) จากปัจจัยภายนอกได้แก่ การนำความร้อนจากภายนอก อิทธิพลจากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ผ่านหลังคา และปัจจัยภายในได้แก่ ความร้อนจากผู้ใช้อาคาร ความร้อนจากแสงสว่างและอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า เมื่อนำภาระการทำความเย็นภายนอกรวมกับภาระการทำความเย็นภายในแล้ว โปรแกรม VisualDoe 4.0 จะสามารถคำนวณค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร จากนั้นจึงนำสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านทางหลังคา และขนาดพื้นที่ของหลังคามาคำนวณ เพื่อหาค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (CER, kW-hr/sq.m.-yr) ต่อพื้นที่หลังคาอาคารได้

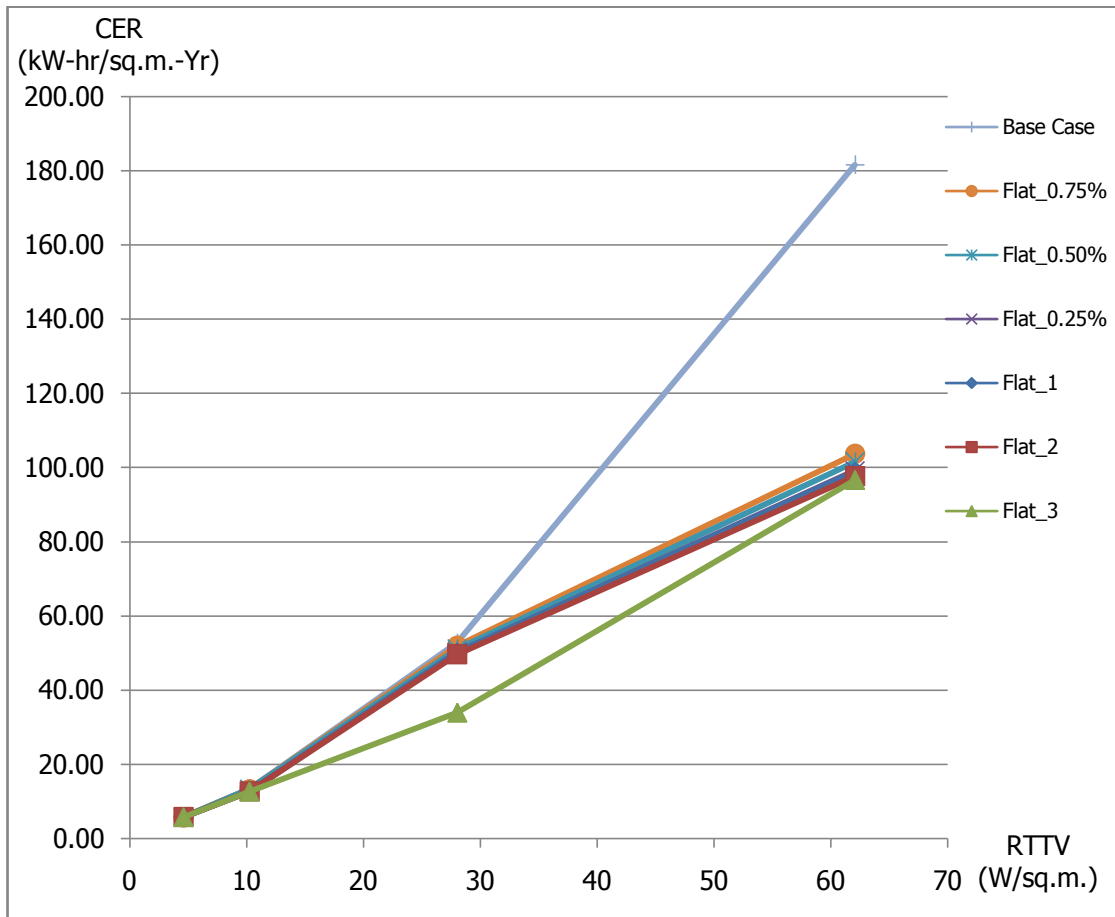


ภาพที่ 4.2 แสดงแบบจำลองด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0 ในการคำนวณพลังงาน
การทำความเย็นอาคาร

นำค่าพลังงานการทำความเย็นจากหลังคา (Cooling Energy from Roof) ที่ได้จากโปรแกรม VisualDOE4.0 มาจัดเรียงในรูปตารางเพื่อแสดงค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้นในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาคสล. ชั้นล่าง เพื่อแสดงให้เห็นระดับค่า CER ของหลังคาสองชั้นแต่ละรูปทรง

ตารางที่ 4.2 แสดงพลังงานการทำงานทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)

		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
NORTH	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
Base Case	0.00	181.67	52.70	13.37	5.69
Flat_1	91.50	98.87	50.13	12.69	5.77
Flat_2	98.43	97.68	49.66	12.68	5.77
Flat_3	99.45	96.65	33.89	12.63	5.75
Flat_0.25%	74.59	99.15	50.21	12.63	5.75
Flat_0.50%	49.73	101.52	51.09	13.31	5.73
Flat_0.75%	24.86	103.71	51.92	13.35	5.72
East	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
Flat_1	91.00	98.39	49.92	12.65	5.76
Flat_2	97.30	97.94	49.79	12.72	5.79
Flat_3	98.85	96.44	33.85	11.73	5.74
Flat_0.25%	74.14	99.01	50.12	12.62	5.74
Flat_0.50%	49.43	101.42	51.03	13.30	5.73
Flat_0.75%	24.71	103.66	51.89	13.34	5.72
West	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
Flat_1	90.30	98.38	49.91	12.65	5.75
Flat_2	97.38	98.05	49.79	12.72	5.79
Flat_3	99.08	96.43	33.85	12.61	5.74
Flat_0.25%	74.31	99.00	50.12	12.62	5.74
Flat_0.50%	49.54	101.41	51.03	13.30	5.73
Flat_0.75%	24.77	103.64	51.89	13.34	5.72
South	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
Flat_1	89.43	98.87	50.13	12.69	5.77
Flat_2	97.78	97.68	49.66	12.68	5.77
Flat_3	99.38	96.65	33.89	12.63	5.75
Flat_0.25%	74.53	99.15	50.21	12.63	5.75
Flat_0.50%	49.69	101.52	51.09	13.31	5.73
Flat_0.75%	24.84	103.71	51.92	13.35	5.72

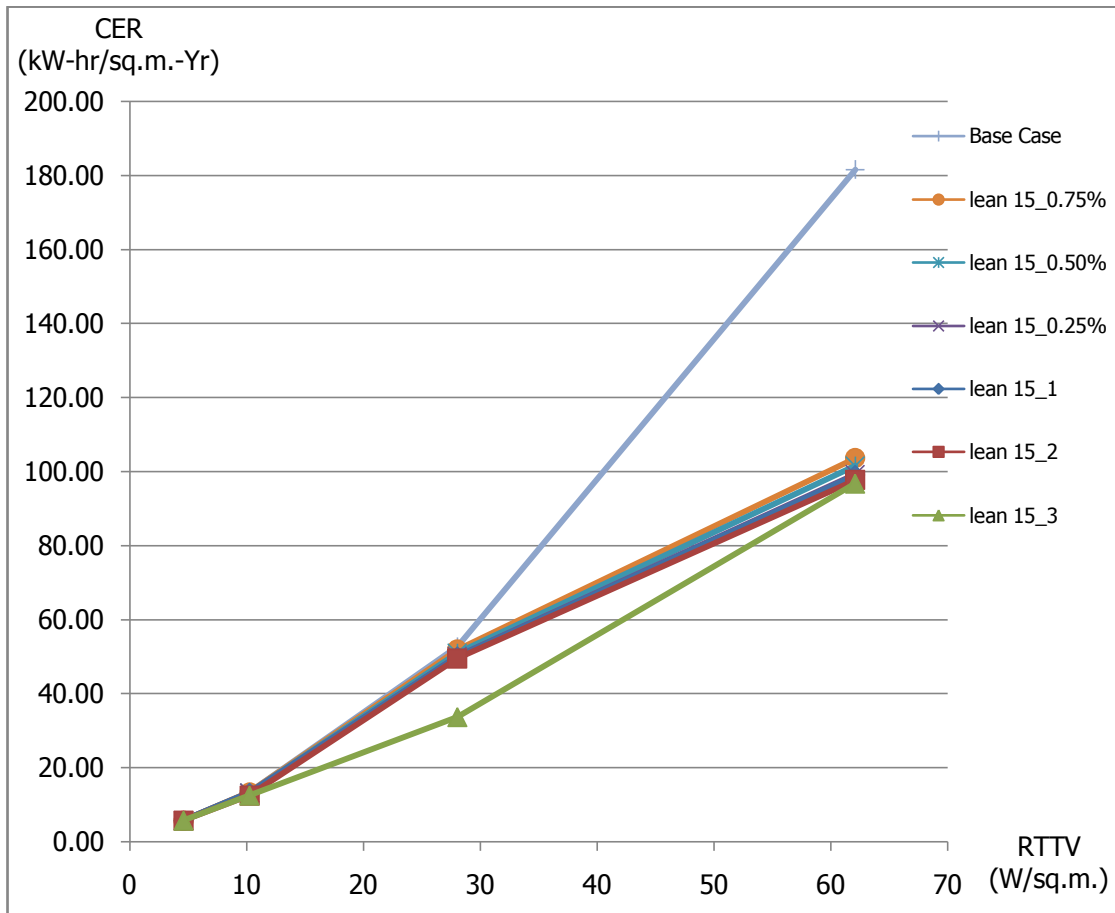


แผนภูมิที่ 4.1 แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)

จากตารางที่ 4.2 พบว่า หลังคา Flat_3 มีค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาต่ำสุดในทุกทิศทาง การหันชายคาหลังคา และทุกระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) เนื่องจากชายคาของหลังคา Flat_3 มีลักษณะแบนราบไม่ยกเงยขึ้นในทิศทางใด ทำให้สามารถป้องกันอิทธิพลจากแสงอาทิตย์เข้ามากระทำกับหลังคาคสล. โดยตรงได้ทุกทิศทาง และมีค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างต่อตารางเมตรสูง

ตารางที่ 4.3 แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof)

		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
NORTH					
Base Case	0.00	181.67	52.70	13.37	5.69
lean 15_1	78.18	99.08	50.09	13.22	5.72
lean 15_2	83.20	97.75	49.55	12.52	5.70
lean 15_3	86.25	96.83	33.70	12.47	5.67
lean 15_0.25%	64.69	99.26	50.12	13.17	5.69
lean 15_0.50%	43.13	101.57	51.04	13.25	5.69
lean 15_0.75%	21.56	103.66	51.89	13.32	5.70
East					
lean 15_1	75.38	98.94	50.07	12.62	5.74
lean 15_2	80.60	98.50	49.93	12.65	5.76
lean 15_3	83.25	97.13	49.29	12.58	5.72
lean 15_0.25%	62.44	99.47	50.24	12.59	5.72
lean 15_0.50%	41.63	101.70	51.10	13.25	5.72
lean 15_0.75%	20.81	103.79	51.92	13.32	5.71
West					
lean 15_1	73.03	100.94	50.95	12.83	5.84
lean 15_2	78.00	100.66	50.90	12.88	5.86
lean 15_3	81.65	100.17	50.72	12.88	5.86
lean 15_0.25%	61.24	101.72	51.27	13.50	5.83
lean 15_0.50%	40.83	103.18	51.79	13.47	5.78
lean 15_0.75%	20.41	167.07	52.26	13.42	5.74
South					
lean 15_1	70.05	101.72	51.33	12.95	5.89
lean 15_2	74.40	101.43	51.26	12.98	5.90
lean 15_3	78.38	101.12	51.17	13.62	5.92
lean 15_0.25%	58.78	102.44	51.61	13.57	5.87
lean 15_0.50%	39.19	103.64	52.00	13.51	5.81
lean 15_0.75%	19.59	167.71	52.36	13.45	5.74

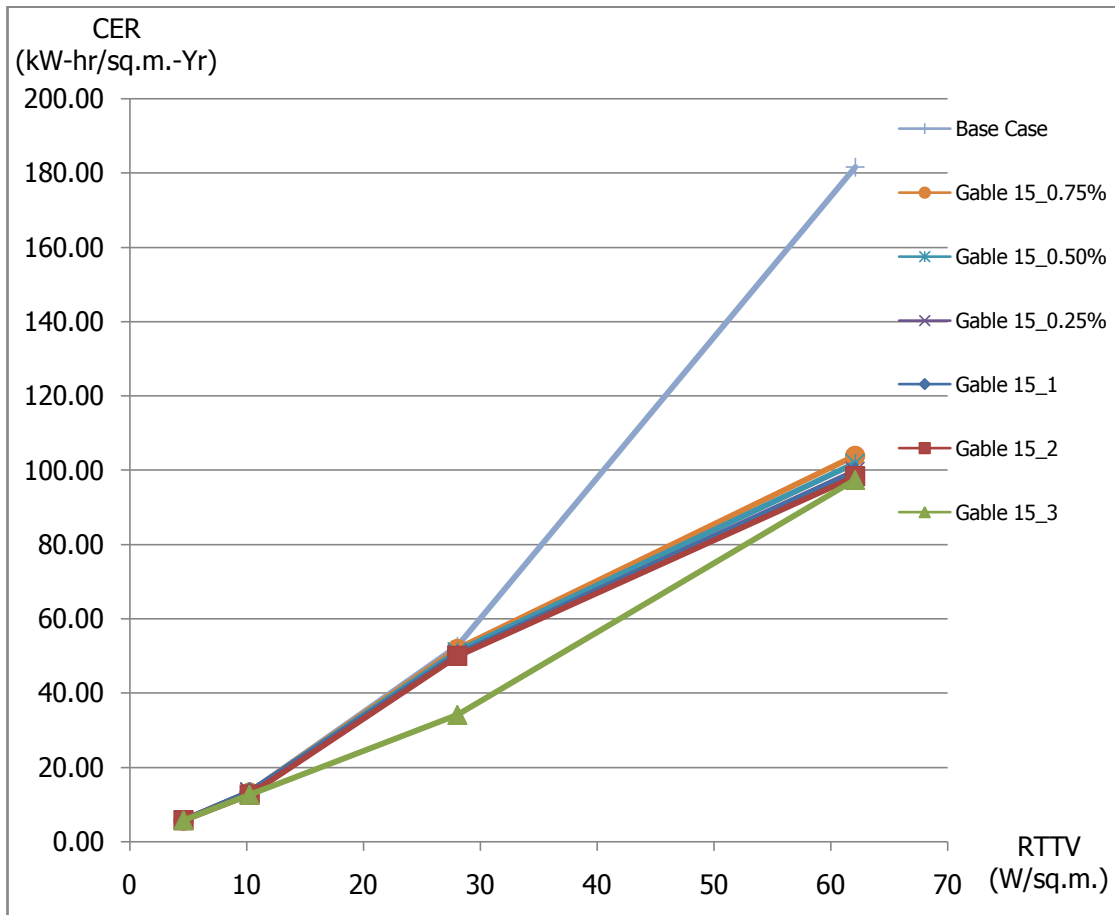


แผนภูมิที่ 4.2 แสดงพลังงานการทำความเย็นของหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) เฝิงหมาแหงน (Lean to Roof) ทางทิศเหนือ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าหลังคา Lean 15_3 ที่หันมุมเงยชายคาไปทางทิศเหนือให้มีค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาต่ำสุด เนื่องจากหลังคา Lean 15_3 หันมุมเงยชายคาไปทางทิศเหนือมีชายคาส่วนที่ต่ำสุดของหลังคาหันไปทางทิศใต้ ทำให้สามารถป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ที่โคจรอ้อมทิศใต้ไม่ให้ส่องผ่านมากกระทบกับหลังคาคสล. ชั้นล่างได้ จึงมีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับหลังคา Lean 15_75% ที่หันมุมเงยชายคาไปทางทิศตะวันตก และทิศใต้จะมีค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาสูง เนื่องจากหลังคาไม่สามารถป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ที่โคจรอ้อมใต้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างต่ำ

ตารางที่ 4.4 แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof)

		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
	%shaded	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m	CER/sq.m
NORTH					
Base Case	0.00	181.67	52.70	13.37	5.69
Gable 15_1	85.23	99.49	50.37	13.35	5.78
Gable 15_2	91.25	98.39	49.93	12.70	5.78
Gable 15_3	93.23	97.45	34.14	12.65	5.76
Gable 15_0.25%	69.92	99.75	50.42	13.30	5.75
Gable 15_0.50%	46.61	101.90	51.23	13.34	5.74
Gable 15_0.75%	23.31	103.90	51.99	13.36	5.72
East					
Gable 15_1	88.05	98.75	50.07	12.67	5.77
Gable 15_2	95.08	98.37	49.98	12.75	5.80
Gable 15_3	97.73	96.95	33.93	12.66	5.76
Gable 15_0.25%	73.29	99.37	50.28	12.65	5.75
Gable 15_0.50%	48.86	101.64	51.13	13.31	5.74
Gable 15_0.75%	24.43	103.76	51.94	13.35	5.72
West					
Gable 15_1	87.08	98.74	50.04	12.67	5.77
Gable 15_2	94.73	98.37	49.97	12.75	5.80
Gable 15_3	97.28	96.94	33.92	12.66	5.76
Gable 15_0.25%	72.96	99.36	50.27	12.65	5.75
Gable 15_0.50%	48.64	101.64	51.12	13.31	5.74
Gable 15_0.75%	24.32	103.75	51.61	13.35	5.72
South					
Gable 15_1	83.28	99.49	50.37	13.35	5.78
Gable 15_2	91.18	98.39	49.93	12.70	5.78
Gable 15_3	93.58	97.45	34.14	12.65	5.76
Gable 15_0.25%	70.18	99.75	50.42	13.30	5.75
Gable 15_0.50%	46.79	101.90	51.23	13.34	5.74
Gable 15_0.75%	23.39	103.90	51.99	13.36	5.72



แผนภูมิที่ 4.3 แสดงพลังงานการทำความเย็น อาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ทางทิศเหนือ

จากตารางที่ 4.4 พบว่าหลังคา Gable 15_3 ที่มีชายคาหันไปทางทิศตะวันตก และตะวันออก มีค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาต่ำกว่าหลังคา Gable 15_3 ที่มีชายคาหันไปทางทิศเหนือ และได้ทุกระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) เนื่องจากหลังคา Gable 15_3 มีลักษณะสมมาตรชายคาที่อยู่ตรงข้ามกันทั้งสองฝั่งลาดลงทำให้หลังคา Gable 15_3 ที่มีชายคาหันไปทางทิศตะวันตก และตะวันออกสามารถป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างสูง ส่วนหลังคา Gable 15_3 ที่มีชายคาหันไปทางทิศเหนือและใต้ แสงจากดวงอาทิตย์สามารถผ่านหน้าจั่วของหลังคาทางทิศตะวันออกและตะวันตกไปยังหลังคาคสล. ด้านล่างได้ ทำให้มีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างต่ำ และค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารสูง

4.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ข้อมูล

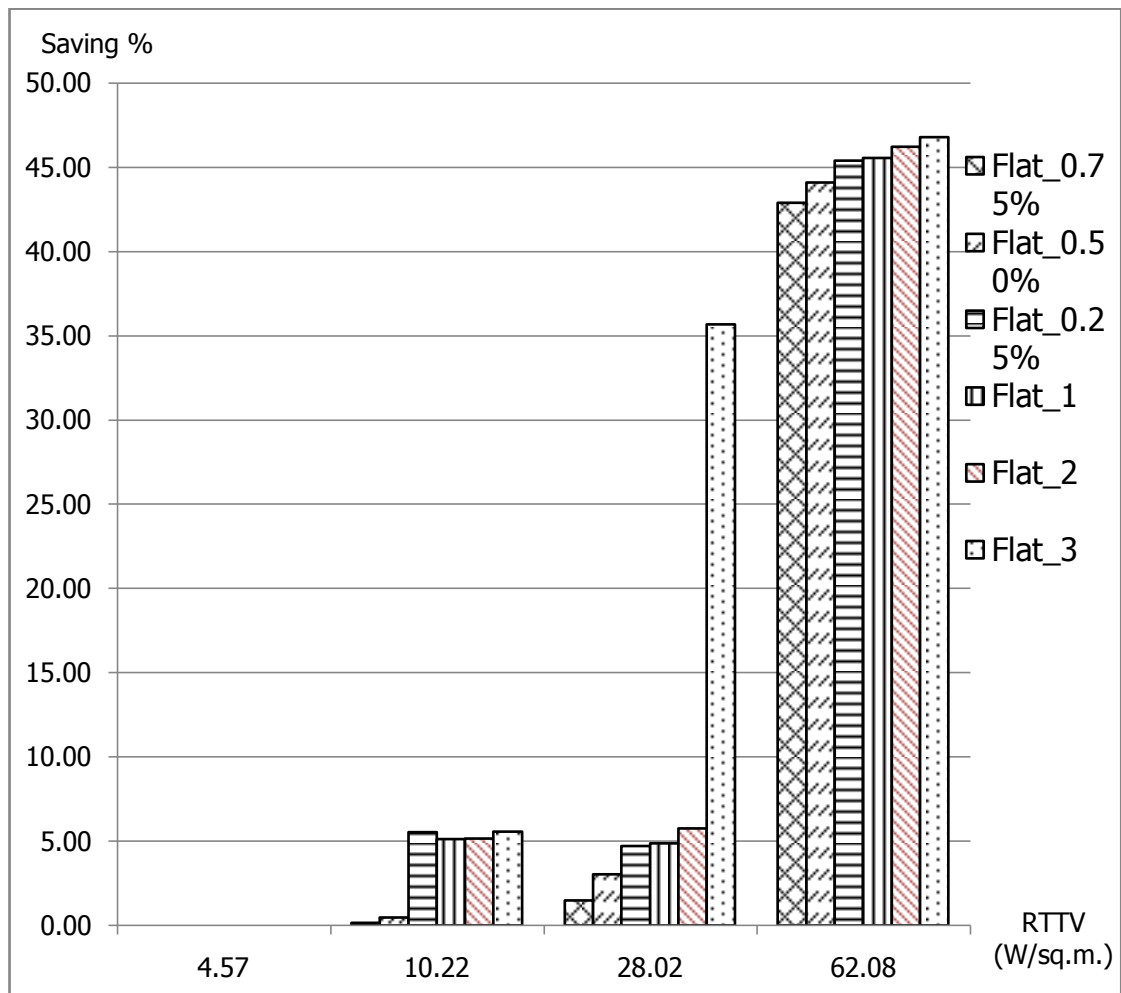
เปรียบเทียบข้อมูลค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ที่ได้จากโปรแกรม VisualDOE 4.0 ของอาคารที่ใช้ฉนวนกันความร้อนติดตั้งใต้หลังคาคสล .เพียงอย่างเดียวกับอาคารที่มีการติดตั้งหลังคาสองชั้นเพิ่ม เพื่อหาประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Saving Cooling Energyfrom Roof, Saving %) ของหลังคาสองชั้นในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV)

North	RTTV = 62.08	Basecase	CER = 181.67 kW-hr/sq.m.-yr
		Flat_3	CER = 96.65 kW-hr/sq.m.-yr
		Reduce	CER = 85.02 kW-hr/sq.m.-yr
		Saving	= 46.80 %

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Saving %) สามารถช่วยผู้สนใจเห็นถึงประสิทธิภาพของหลังคาแต่ละรูปทรงภายใต้สภาวะเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ เช่น ทิศทางของหลังคาอาคาร ระยะเวลา ค่าความโปร่งแสง และฉนวนใต้หลังคาอาคาร เป็นต้น ทำให้สามารถนำข้อมูลผลการวิจัยไปช่วยประกอบการออกแบบ หรือการตัดสินใจในการเลือกรูปทรงหลังคาสองชั้นเข้ากับการเลือกใช้ฉนวนใต้หลังคาประเภทต่างๆ ได้เหมาะสมกับลักษณะอาคาร เป็นการช่วยลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร ลดต้นทุนค่าก่อสร้างด้วยการเลือกใช้ฉนวนอาคารให้เหมาะสม และเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ

ตารางที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาแบน (Flat Roof) ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

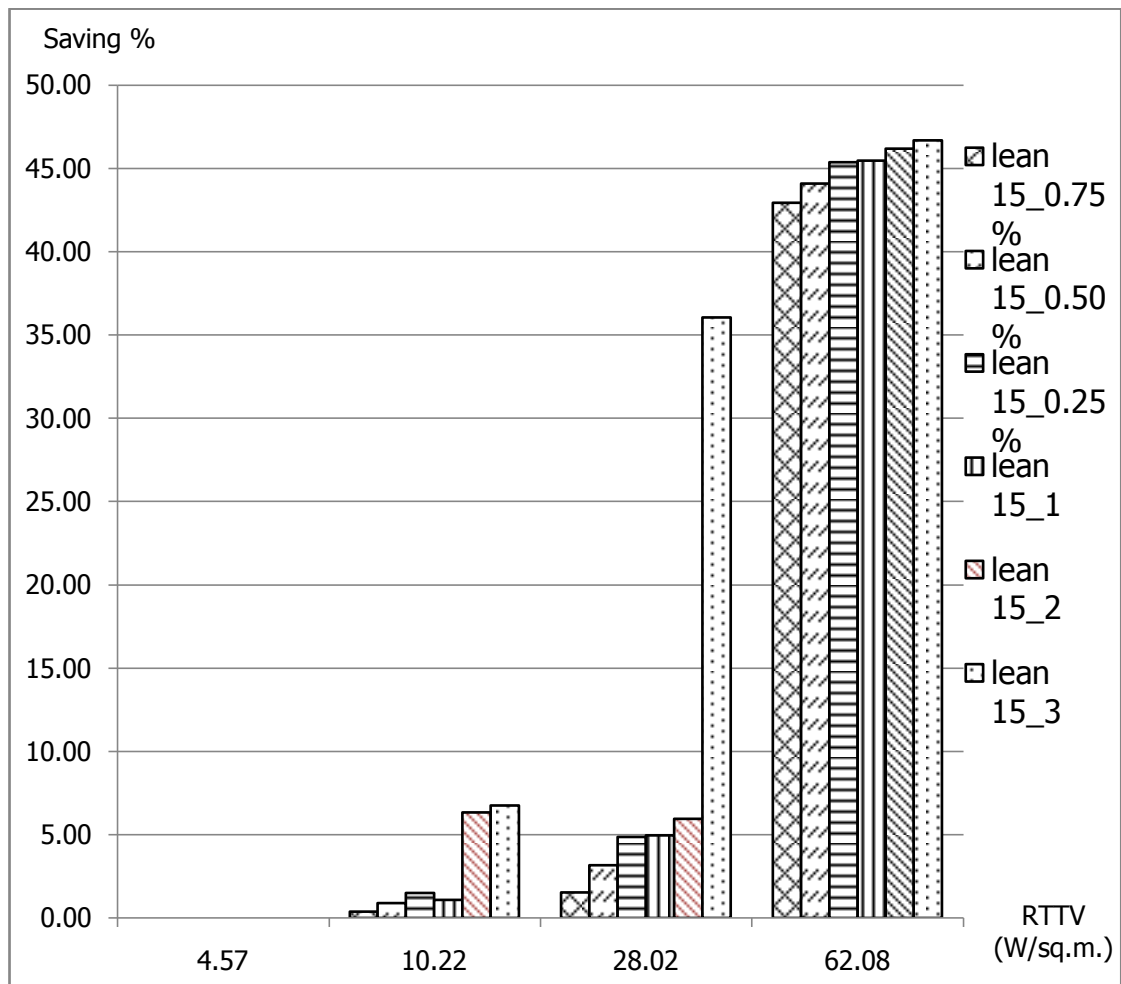
		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
NORTH	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Flat_1	91.50	45.58	4.86	5.12	0.00
Flat_2	98.43	46.23	5.75	5.14	0.00
Flat_3	99.45	46.80	35.68	5.56	0.00
Flat_0.25%	74.59	45.42	4.71	5.54	0.00
Flat_0.50%	49.73	44.12	3.05	0.47	0.00
Flat_0.75%	24.86	42.91	1.47	0.17	0.00
East	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Flat_1	91.00	45.84	5.28	5.41	0.00
Flat_2	97.30	46.09	5.51	4.87	0.00
Flat_3	98.85	46.91	35.75	12.24	0.00
Flat_0.25%	74.14	45.50	4.88	5.60	0.00
Flat_0.50%	49.43	44.18	3.15	0.52	0.00
Flat_0.75%	24.71	42.94	1.53	0.19	0.00
West	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Flat_1	90.30	45.84	5.28	5.42	0.00
Flat_2	97.38	46.02	5.51	4.87	0.00
Flat_3	99.08	46.92	35.75	5.66	0.00
Flat_0.25%	74.31	45.50	4.88	5.60	0.00
Flat_0.50%	49.54	44.18	3.15	0.52	0.00
Flat_0.75%	24.77	42.95	1.52	0.19	0.00
South	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Flat_1	89.43	45.58	4.86	6.96	0.00
Flat_2	97.78	46.23	5.76	6.98	0.00
Flat_3	99.38	46.80	35.68	7.39	0.00
Flat_0.25%	74.53	45.42	4.71	7.37	0.00
Flat_0.50%	49.69	44.12	3.05	2.40	0.00
Flat_0.75%	24.84	42.91	1.48	2.10	0.00



แผนภูมิที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Saving %) ของหลังคาแบน (Flat Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

ตารางที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof) ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

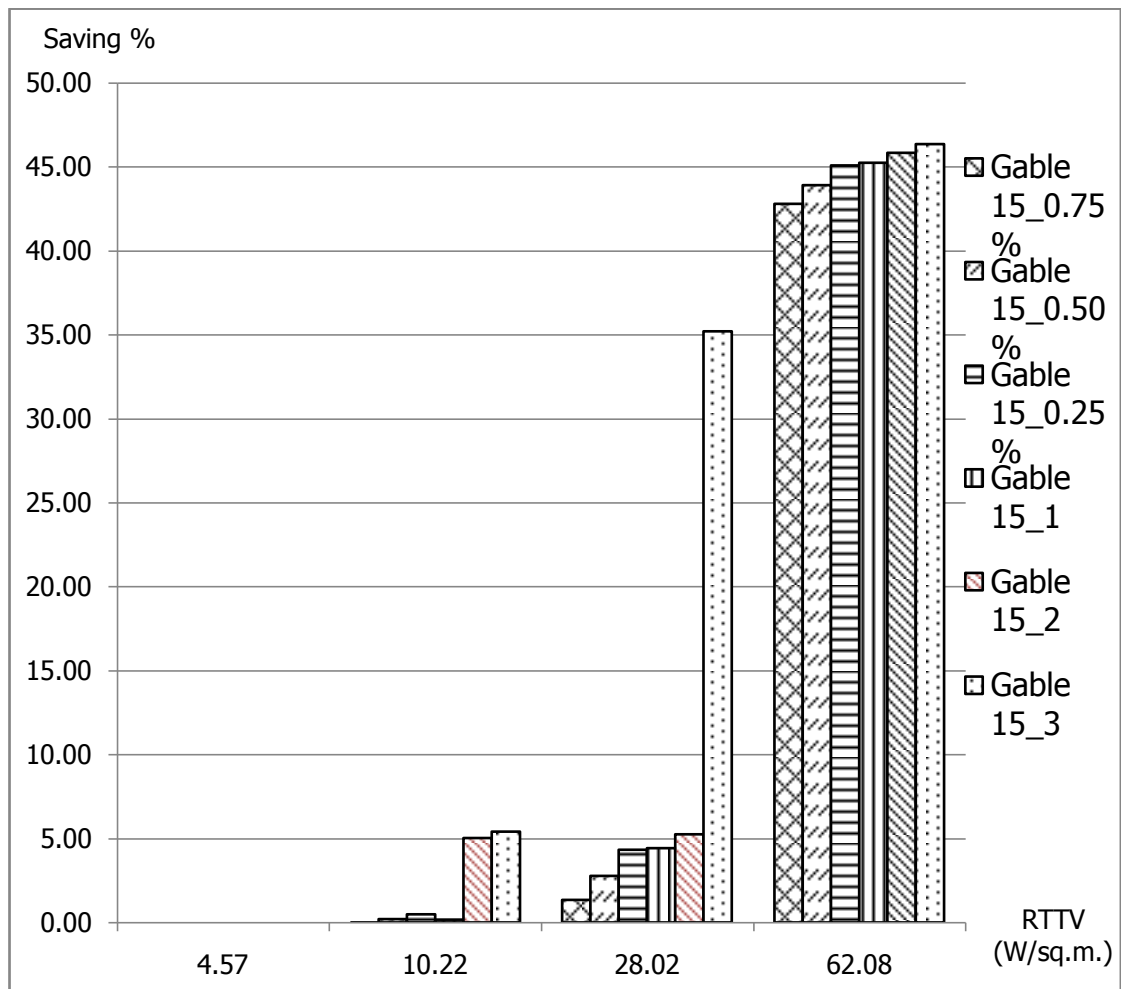
		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
NORTH	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
lean 15_1	78.18	45.46	4.95	1.08	0.00
lean 15_2	83.20	46.19	5.97	6.33	0.00
lean 15_3	86.25	46.70	36.06	6.76	0.00
lean 15_0.25%	64.69	45.36	4.88	1.51	0.00
lean 15_0.50%	43.13	44.09	3.15	0.89	0.00
lean 15_0.75%	21.56	42.94	1.53	0.38	0.00
East	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
lean 15_1	75.38	45.54	4.98	5.61	0.00
lean 15_2	80.60	45.78	5.25	5.39	0.00
lean 15_3	83.25	46.53	6.46	5.93	0.00
lean 15_0.25%	62.44	45.24	4.65	5.87	0.00
lean 15_0.50%	41.63	44.02	3.03	0.87	0.00
lean 15_0.75%	20.81	42.87	1.47	0.39	0.00
West	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
lean 15_1	73.03	44.43	3.30	4.04	0.00
lean 15_2	78.00	44.59	3.40	3.65	0.00
lean 15_3	81.65	44.86	3.74	3.64	0.00
lean 15_0.25%	61.24	44.00	2.69	0.00	0.00
lean 15_0.50%	40.83	43.20	1.72	0.00	0.00
lean 15_0.75%	20.41	8.03	0.83	0.00	0.00
South	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
lean 15_1	70.05	44.01	2.60	5.03	0.00
lean 15_2	74.40	44.17	2.72	4.81	0.00
lean 15_3	78.38	44.34	2.89	0.09	0.00
lean 15_0.25%	58.78	43.61	2.07	0.44	0.00
lean 15_0.50%	39.19	42.95	1.32	0.87	0.00
lean 15_0.75%	19.59	7.68	0.64	1.38	0.00



แผนภูมิที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

ตารางที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

		RTTV			
		62.08	28.02	10.22	4.57
NORTH	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Gable 15_1	85.23	45.23	4.41	0.16	0.00
Gable 15_2	91.25	45.84	5.24	5.03	0.00
Gable 15_3	93.23	46.36	35.22	5.41	0.00
Gable 15_0.25%	69.92	45.09	4.32	0.49	0.00
Gable 15_0.50%	46.61	43.91	2.78	0.19	0.00
Gable 15_0.75%	23.31	42.81	1.35	0.04	0.00
East	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Gable 15_1	88.05	45.64	4.98	5.21	0.00
Gable 15_2	95.08	45.85	5.16	4.62	0.00
Gable 15_3	97.73	46.63	35.62	5.33	0.00
Gable 15_0.25%	73.29	45.30	4.59	5.38	0.00
Gable 15_0.50%	48.86	44.05	2.97	0.47	0.00
Gable 15_0.75%	24.43	42.88	1.44	0.18	0.00
West	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Gable 15_1	87.08	45.64	5.04	5.22	0.00
Gable 15_2	94.73	45.85	5.16	4.62	0.00
Gable 15_3	97.28	46.63	35.62	5.33	0.00
Gable 15_0.25%	72.96	45.30	4.59	5.38	0.00
Gable 15_0.50%	48.64	44.05	2.97	0.47	0.00
Gable 15_0.75%	24.32	42.88	2.05	0.18	0.00
South	%shaded	Saving%	Saving%	Saving%	Saving%
Gable 15_1	83.28	45.23	4.42	2.09	0.00
Gable 15_2	91.18	45.84	5.24	6.86	0.00
Gable 15_3	93.58	46.36	35.22	7.24	0.00
Gable 15_0.25%	70.18	45.09	4.32	2.41	0.00
Gable 15_0.50%	46.79	43.91	2.78	2.12	0.00
Gable 15_0.75%	23.39	42.81	1.35	1.97	0.00



แผนภูมิที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Saving %) ของหลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) ทางทิศเหนือ ในแต่ละระดับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา

จากตารางแสดงประสิทธิภาพในการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Saving %) พบว่าประสิทธิภาพในการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาแปรผันตามร้อยละการบังเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง (%Shaded) และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) โดยหลังคาสองชั้นสามารถลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพในอาคารที่ไม่มีการติดตั้งฉนวนใต้หลังคา หรืออาคารที่มีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารสูง และประสิทธิภาพในการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารของหลังคาสองชั้นมีแนวโน้มลดลงตามประสิทธิภาพของฉนวนใต้หลังคาอาคารที่เพิ่มขึ้นและค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารลดลง

เนื่องจากแสงจากดวงอาทิตย์มีรังสีความร้อนเมื่อกระทำเข้ากับหลังคาคสล. โดยตรงทำให้เกิดการสะสมความร้อนภายในหลังคาคสล. แล้วถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในอาคาร ส่งผลให้ค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารสูงขึ้น ฉนวนที่ติดตั้งใต้หลังคาคสล. สามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาคสล. เข้ามาภายในอาคาร ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารไม่สูงขึ้นตามปัจจัยภายนอก ส่งผลให้ค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารลดลง

หลังคาสองชั้น (Shaded Roof) สามารถป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ไม่ให้กระทำต่อหลังคาคสล. โดยตรงเป็นการลดการสะสมความร้อนของหลังคาคสล. ที่เกิดจากอิทธิพลของแสงจากดวงอาทิตย์ส่งผลให้ความร้อนถ่ายเทจากหลังคาเข้าสู่ภายในอาคารลดลง จึงสามารถลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาได้ ทำให้การเพิ่มหลังคาสองชั้นในอาคารที่ไม่มีการติดตั้งฉนวนใต้หลังคาคสล. หรืออาคารที่ติดตั้งฉนวนประสิทธิภาพต่ำสามารถแสดงประสิทธิภาพการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารลงได้มากกว่าในอาคารที่มีการติดตั้งฉนวนประสิทธิภาพสูงใต้หลังคาคสล.

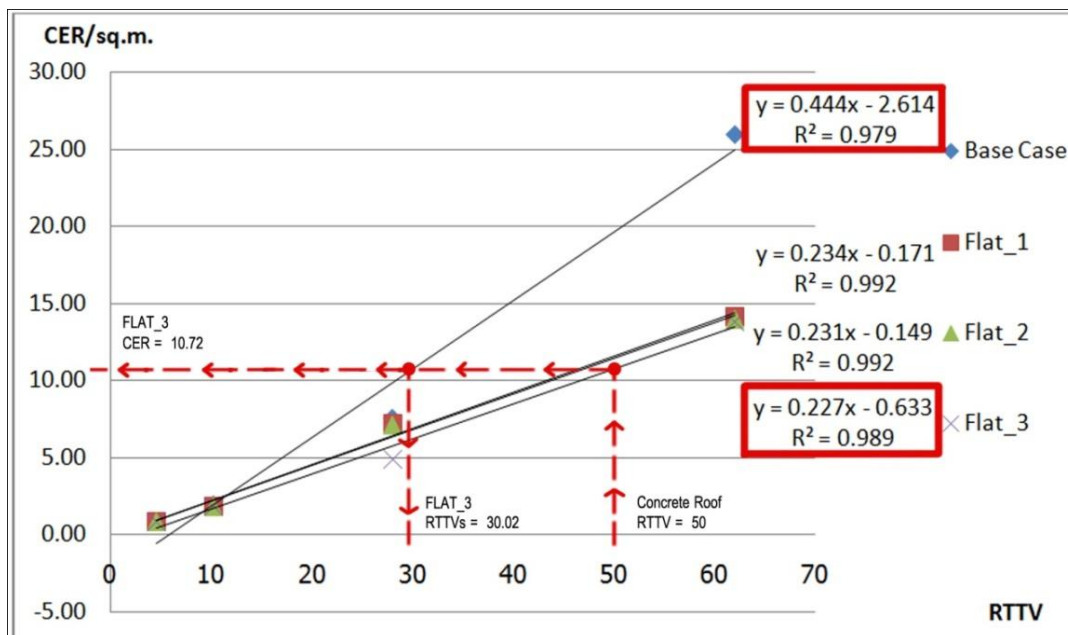
ส่วนร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง (%shaded) แสดงถึงประสิทธิภาพของหลังคาสองชั้นในการบังเงาให้กับหลังคาคสล. ชั้นล่าง ซึ่งส่งผลต่อการป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์มากระทำต่อหลังคาคสล. ชั้นล่าง ทำให้หลังคาสองชั้นที่มีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างสูงมีประสิทธิภาพการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารสูงเช่นกัน แต่ในหลังคาเพิงหมาแหงน Lean 15_75% ที่ทำมุมเงยทางทิศตะวันตก และทิศใต้มีค่าการบังเงาเฉลี่ย 20% ใกล้เคียงกับหลังคารูปทรงอื่น แต่หลังคาเพิงหมาแหงนไม่สามารถป้องกันแสงจากดวงอาทิตย์ที่โคจรเข้ามาได้ซึ่งมีความเข้มแสงทางทิศใต้ และทิศตะวันตกสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีประสิทธิภาพการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารต่ำ

4.3 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)

ในการพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์สมการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) ได้มีการหาสมการเชิงเส้น (Simple Linear Regression) ที่ได้จากแผนภูมิแสดงค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาของหลังคาคสล.ติดตั้งฉนวนใต้หลังคา เปรียบเทียบกับอาคารที่เพิ่มหลังคาสองชั้นรูปทรงต่างๆ เพื่อหาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ให้สามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) ได้ โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ประเภท คือพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น และพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง

วิธีการสร้างสมการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น เริ่มจากการวิเคราะห์ลักษณะหลังคาคสล.ชั้นล่าง (Base Case) เพื่อนำไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารตาม พระราชบัญญัติ การ ส่งเสริม การอนุรักษ์พลังงานฉบับปรับปรุง พ.ศ.2550 และวิเคราะห์ลักษณะหลังคาสองชั้น (Design Case) เพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ A และ B ในแผนภูมิที่ 4.7 ด้วยสมการเชิงเส้น

$$Y = A * X + B$$



แผนภูมิที่ 4.7 แสดงพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr) ของหลังคาแบน (Flat Roof)

จากนั้นนำค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารและค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากแผนภูมิที่ 4.7 มาใส่ในสมการ (1) เพื่อคำนวณค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy from Roof, CER) ของหลังคาสองชั้นที่พิจารณา

$$CER = A * RTTV + B \quad (1)$$

$$A = 0.227, B = 0.633;$$

$$CER = 0.227 * 50 - 0.633$$

$$CER = 10.72 \text{ kW-hr/sq.m.-yr}$$

จากนั้นให้นำค่าสัมประสิทธิ์ a และ b จากแผนภูมิที่ 4.7 รวมทั้งค่า CER ของหลังคาสองชั้นที่พิจารณามาใส่ในสมการ (2) ซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นตรงที่ได้จากค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารตาม พระราชบัญญัติส่งเสริมอนุรักษ์พลังงานปี พ .ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ .ศ.2550 (Base Case) เพื่อเปรียบเทียบหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น

$$CER = a * RTTVs + b \quad (2)$$

$$a = 0.444, b = 2.614;$$

$$10.72 = 0.444 * RTTVs - 2.614$$

$$RTTVs = 30.02 \text{ W/sq.m.}$$

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารกับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น โดยการนำสมการ (1) และ (2) มาจัดเรียงใหม่ในรูปสมการ (3) เพื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณมาจัดเรียงเป็นแผนภูมิที่ 4.8

$$(1) = (2) \quad a * RTTVs + b = A * RTTV + B$$

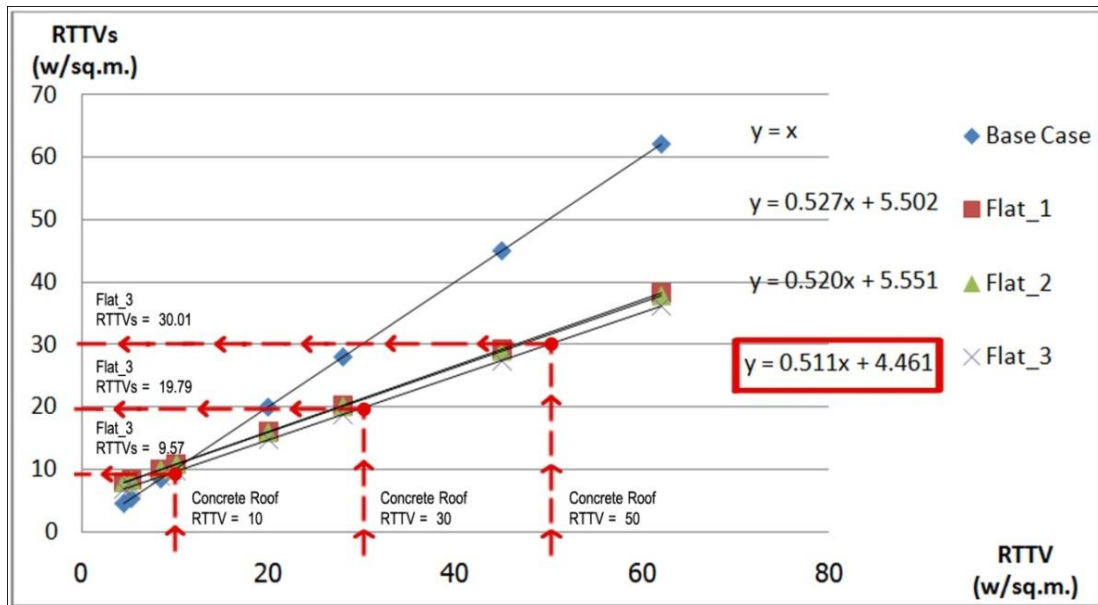
$$RTTVs = \frac{(A * RTTV) + B - b}{a} \quad (3)$$

$$A = 0.227, B = 0.633;$$

$$RTTVs = \frac{(0.227 * 50) - 0.633 + 2.614}{0.444}$$

$$a = 0.444, b = 2.614;$$

$$RTTVs = 30.02 \text{ W/sq.m.}$$



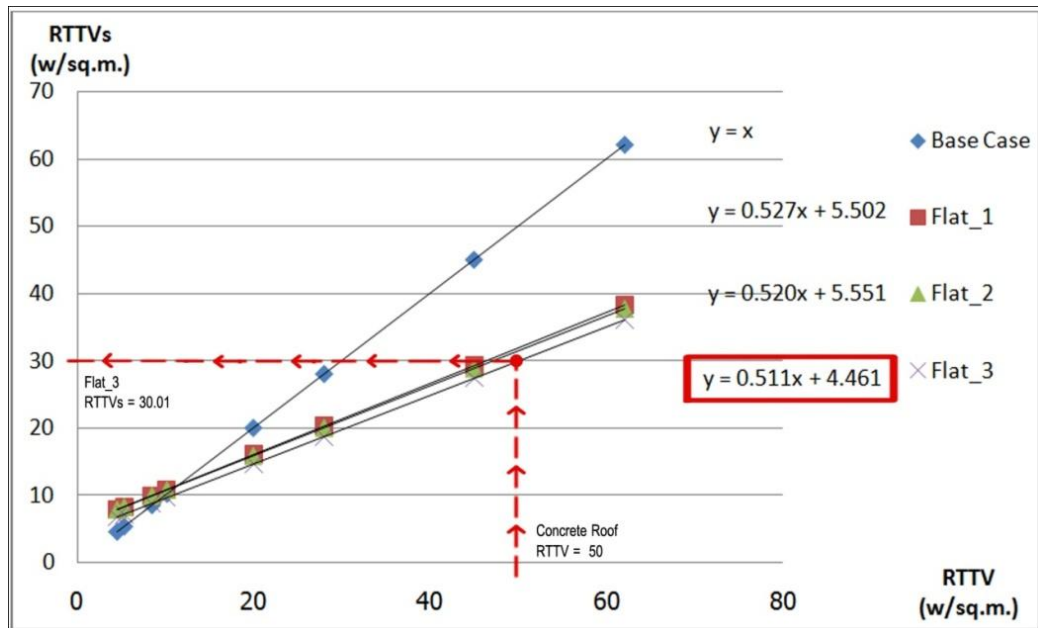
แผนภูมิที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) กับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)

จากแผนภูมิที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร กับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์ออกมาในรูปแบบสมการเชิงเส้นสามการ (4) เพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น ดังนี้

$$RTTVs = A_s * RTTV + B_s \quad (4)$$

4.3.1 พิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้นโดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น โดยการเปรียบเทียบลักษณะหลังคาสองชั้นที่พิจารณากับลักษณะหลังคาสองชั้นในตารางที่ 4.8 แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์จากตาราง และค่าการถ่ายเทความร้อนของหลังคาแต่ละชั้นลงมาใส่ในสมการ (4) เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)



แผนภูมิที่ 4.9 แสดงการคำนวณสมการเชิงเส้นโดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

สมการตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ RTTVs

$$RTTVs = A_s * RTTV + B_s \quad (4)$$

ตัวอย่างการคำนวณหลังคา Flat_3, RTTV = 50

$$A_s = 0.511, B_s = 4.461;$$

$$RTTVs = 0.511 * 50 + 4.461$$

$$RTTVs = 30.01 \text{ W/sq.m.}$$

ตารางที่ 4.8 แสดงตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

Type	%shaded	North		East		West		South	
		A _s	B _s	A _s	B _s	A _s	B _s	A _s	B _s
Flat_0.75%	24.86	0.554	5.382	0.554	5.382	0.554	5.385	0.554	5.344
Flat_0.50%	49.73	0.540	5.473	0.540	5.473	0.540	5.475	0.540	5.434
Flat_0.25%	74.59	0.529	5.475	0.529	5.475	0.529	5.477	0.529	5.436
Flat_1	91.50	0.527	5.502	0.524	5.511	0.524	5.511	0.527	5.464
Flat_2	98.43	0.520	5.551	0.522	5.549	0.522	5.542	0.520	5.513
Flat_3	99.45	0.511	4.461	0.511	4.340	0.509	4.470	0.511	4.423

Type	%shaded	North		East		West		South	
		A _S	B _S	A _S	B _S	A _S	B _S	A _S	B _S
lean 15_0.75%	21.56	0.554	5.376	0.554	5.371	0.916	1.002	0.921	0.927
lean 15_0.50%	43.13	0.542	5.450	0.542	5.450	0.549	5.439	0.554	5.396
lean 15_0.25%	64.69	0.529	5.531	0.531	5.445	0.542	5.515	0.545	5.470
lean 15_1	78.18	0.527	5.556	0.527	5.477	0.538	5.450	0.542	5.412
lean 15_2	83.20	0.522	5.502	0.524	5.506	0.536	5.477	0.540	5.434
lean 15_3	86.25	0.511	4.398	0.518	5.538	0.533	5.500	0.538	5.545
Gable 15_0.75%	23.31	0.554	5.378	0.554	5.380	0.554	5.358	0.554	5.340
Gable 15_0.50%	46.61	0.542	5.461	0.542	5.468	0.542	5.468	0.542	5.423
Gable 15_0.25%	69.92	0.531	5.549	0.531	5.470	0.529	5.470	0.531	5.511
Gable 15_1	85.23	0.529	5.574	0.527	5.504	0.527	5.502	0.529	5.536
Gable 15_2	91.25	0.524	5.524	0.524	5.540	0.524	5.540	0.524	5.486
Gable 15_3	93.23	0.515	4.427	0.511	4.448	0.511	4.450	0.515	4.389

ตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการ พิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 4.8 สามารถคำนวณได้เฉพาะหลังคาสองชั้นที่มีรูปทรงหรือความโปร่งแสง อยู่ในช่วงที่ระบุไว้ในตารางเท่านั้น ไม่สามารถใช้คำนวณหลังคาที่มีลักษณะแตกต่างออกไปจากในตารางได้ หากหลังคาสองชั้นมีรูปทรงตามที่ระบุในตารางแต่มีระยะยื่น หรือค่าความโปร่งแสง ระหว่างค่าที่ตารางกำหนดให้ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation)

ตัวอย่างการหา RTTVs หลังคา Flat_60%, RTTV = 30

โดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น

$$f(x) = \text{RTTVs} = A_S * \text{RTTV} + B_S$$

สมการ Linear Interpolation เมื่อ $x_0 < x_i < x_1$

$$f(x_i) = f(x_0) + \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} (x_i - x_0)$$

คำนวณ RTTVs ของหลังคา Flat_50% โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.8

$$A_s = 0.540, B_s = 5.473; \quad f(50\%) = 0.540 * 30 + 5.473$$

$$= 21.673$$

คำนวณ RTTVs ของหลังคา Flat_75% โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.8

$$A_s = 0.554, B_s = 5.382; \quad f(75\%) = 0.554 * 30 + 5.382$$

$$= 22.002$$

ดังนั้น RTTVs ของหลังคา Flat_60% โดยวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น

$$f(60\%) = f(50\%) + \frac{f(75\%) - f(50\%)}{75 - 50} (60 - 50)$$

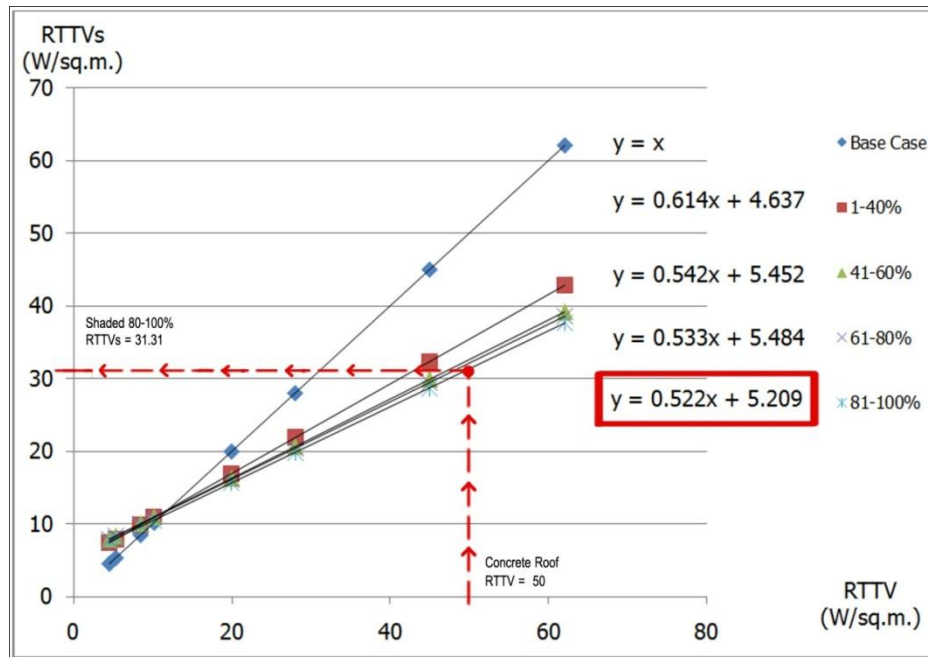
$$= 21.805$$

$$F(60\%) = \text{RTTVs} = 21.805 \text{ W/sq.m.}$$

4.3.2 พิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง (%shaded)

พัฒนา ตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการเปรียบเทียบ สมการเชิงเส้น จากแผนภูมิที่ 4.10 แล้ววิเคราะห์ สมการเชิงเส้นจากแผนภูมิที่ 4.10 เพื่อหาตัวแปรปรับแก้ ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น ออกมาในตารางที่ 4. 9 เพื่อใช้ในการคำนวณตามสมการ (4)

$$\text{RTTVs} = A_s * \text{RTTV} + B_s \quad (4)$$



แผนภูมิที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) กับค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)

ตัวอย่างการคำนวณหลังคา Shaded 90%, RTTV = 50

$$A_s = 0.522, B_s = 5.209;$$

$$RTTVs = 0.522 * 50 + 5.209$$

$$RTTVs = 31.31 \text{ W/sq.m.}$$

ตารางที่ 4.9 แสดงตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) โดยการพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง

Type	%shaded	coefficient	
		A	B
Shaded = 0-40	0-40	0.614	4.637
Shaded = 41-60	41-60	0.542	5.452
Shaded = 61-80	61-80	0.533	5.484
Shaded = 81-100	81-100	0.522	5.209

การพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง (%shaded) จะให้ความมียืดหยุ่นในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)

เนื่องจากสมการไม่จำกัดรูปทรงของหลังคาสองชั้น แต่จะคำนึงถึงร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างเท่านั้น ทำให้สามารถนำค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างของหลังคาอาคารที่พิจารณามาเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 4.9 แล้วสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ในตารางไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้นตามสมการ (4)

การนำไปใช้งานจำเป็นต้องทราบค่า ร้อยละการบังเงา บนหลังคาคสล. ชั้นล่างของหลังคาสองชั้นในแต่ละรูปทรงหลังคา ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรม Ecotect Analysis 2011 คำนวณร้อยละการบังเงา บนหลังคาคสล. ชั้นล่าง โปรแกรม Google SketchUP (shadow tool) หรือ Sun Chart คำนวณภาพเงาที่เกิดขึ้นบนหลังคา คสล. แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์ไปใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs)

4.4 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อพัฒนาสมการพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Room)

นำผลการคำนวณร้อยละพื้นที่บังเงาบนหลังคาคสล. ชั้นล่างจากโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 และค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร จากหลังคาที่ได้จากโปรแกรม VisualDOE 4.0 มาวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรง (Multiple Linear Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรออกมาในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นตรง โดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น และพิจารณาจากร้อยละการบังเงาหลังคาคสล. ชั้นล่าง

สมการเชิงเส้น Multi Linear Regression

$$y = a * x_1 + b * x_2 + c$$

$$CER = (C_s * \%shaded) + (C_r * RTTV) + C_o \quad (5)$$

CER คือ พลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (kW.-h / sq.m.-Yr)

C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของร้อยละพื้นที่บังเงาต่อตารางเมตรบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง

$\%shaded$ คือ ร้อยละพื้นที่บังเงาต่อตารางเมตรบนหลังคาคสล. ชั้นล่าง

C_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาสองชั้น

RTTV คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคา (W/sq.m.)

C_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งมาจากปัจจัยภายในอาคาร เช่น OTTV LPD EPD

4.4.1 พิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

การพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้นสามารถนำลักษณะหลังคาสองชั้นของอาคารที่ใช้ในการคำนวณไปตรวจสอบค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง (%Shaded) จากตารางที่ 4.1 นำมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 4.10 แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ในตารางและค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาคสล.ชั้นล่างมาคำนวณค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาได้ทันที แต่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เนื่องจากสามารถค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 4.1 0 สามารถใช้คำนวณได้เฉพาะหลังคาที่มีรูปทรงที่ระบุไว้ในตารางเท่านั้น ไม่สามารถใช้คำนวณหลังคาที่มีรูปทรงแตกต่างออกไปจากรูปทรงในตารางได้

$$\text{CER} = (C_s * \%shaded) + (C_r * \text{RTTV}) + C_o \quad (5)$$

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมการพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy) โดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

Type		CER = (C _s x %shaded) + (C _r x RTTV) + C _o						R ²				
Flat	North	CER =	-0.0077	x	%shaded	+	0.2360	x	RTTV	+	0.3027	0.99
	East	CER =	-0.0080	x	%shaded	+	0.2452	x	RTTV	+	-0.1769	0.99
	West	CER =	-0.0078	x	%shaded	+	0.2451	x	RTTV	+	-0.1781	0.99
	South	CER =	-0.0079	x	%shaded	+	0.2454	x	RTTV	+	-0.1752	0.99
Lean	North	CER =	-0.0091	x	%shaded	+	0.2362	x	RTTV	+	0.3135	0.99
	East	CER =	-0.0052	x	%shaded	+	0.2465	x	RTTV	+	-0.3603	0.99
	West	CER =	-0.0336	x	%shaded	+	0.2792	x	RTTV	+	0.9125	0.93
	South	CER =	-0.0345	x	%shaded	+	0.2809	x	RTTV	+	0.8801	0.93
Gable 15	North	CER =	-0.0078	x	%shaded	+	0.2371	x	RTTV	+	0.2823	0.99
	East	CER =	-0.0079	x	%shaded	+	0.2459	x	RTTV	+	-0.1897	0.99
	West	CER =	-0.0078	x	%shaded	+	0.2459	x	RTTV	+	-0.1987	0.99
	South	CER =	-0.0080	x	%shaded	+	0.2465	x	RTTV	+	-0.1962	0.99

4.4.2 พิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง (%shaded)

พิจารณาร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่างเพียงอย่างเดียว ไม่มีการจำแนกรูปทรงของหลังคา ให้ความยืดหยุ่นในการคำนวณหาค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา เนื่องจากเงื่อนไขของสมการไม่ถูกจำกัดด้วยรูปทรงของหลังคาสองชั้น แต่คำนึงถึงร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่างเท่านั้น แต่ในการคำนวณจำเป็นต้องทราบค่า ร้อยละการบังเงา

บนหลังคาคาสล .ชั้นล่างของหลังคาสองชั้นที่นำมาพิจารณา เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ในตารางที่ 4.1 1 แล้วนำค่าสัมประสิทธิ์ในตารางไปคำนวณค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารได้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สมการพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy) โดยพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาคาสล.ชั้นล่าง (%shaded)

CER	=	(C_s	x	%shaded)	+	(C_R	x	RTTV)	+	C_o		R^2
CER	=		-0.0119	x	%shaded	+		0.2488	x	RTTV	+		0.1362	0.99

ตัวอย่างการคำนวณคำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy from Roof)

สมการพลังงานการทำความเย็นอาคาร

$$CER = (C_s * \%shaded) + (C_R * RTTV) + C_o \quad (5)$$

ร้อยละการบังเงาของหลังคากรณีศึกษา

$$\text{Lean}_3 \text{ North ค่า RTTV} = 50$$

$$\%shaded = 86.25$$

คำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารโดยพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้น

ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.10

$$C_s = -0.0091$$

$$C_R = 0.2362$$

$$C_o = 0.3135$$

$$CER = (-0.0091 * 86.25) + (0.2362 * 50) + 0.3135$$

$$CER = 11.34 \text{ kW-hr/sq.m.-yr}$$

คำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารโดยพิจารณาจากร้อยละการบังเงา

ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 4.11

$$C_s = -0.0119$$

$$C_R = 0.2488$$

$$C_o = 0.1362$$

$$CER = (-0.0119 * 86.25) + (0.2488 * 50) + 0.1362$$

$$CER = 11.55 \text{ kW-hr/sq.m.-yr}$$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

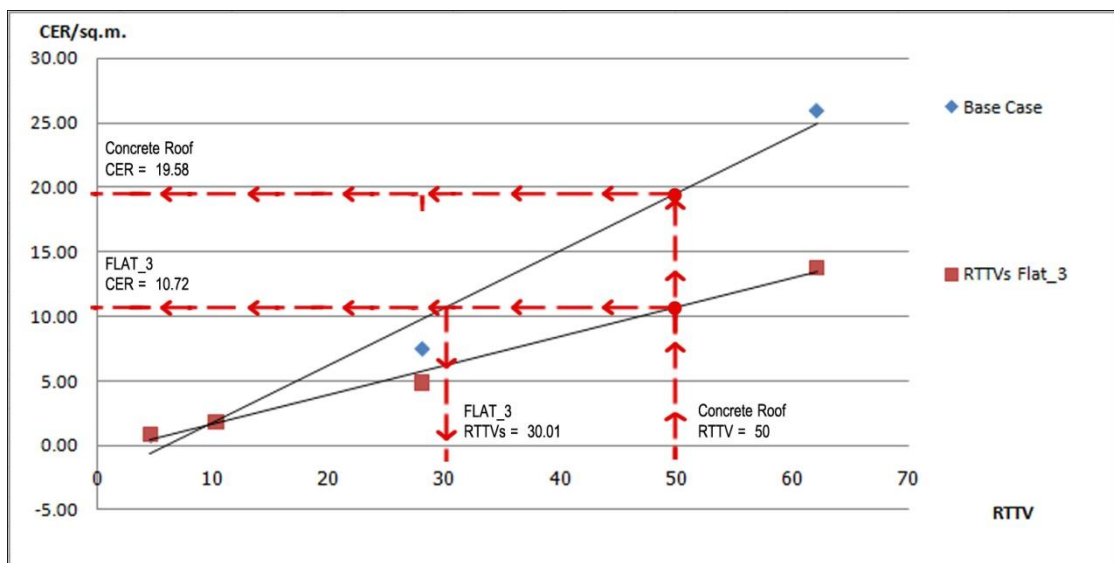
การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ในพัฒนาตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (RTTVs) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof) ของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบหลังคาอาคารสำนักงานที่ใช้งานในเวลากลางวัน และสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร (RTTV) ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมอนุรักษ์พลังงานปี พ.ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ.ศ.2550 ที่ต้องให้ความสำคัญกับการเลือกวิธีการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาอาคาร ผู้ออกแบบอาจประยุกต์ใช้หลังคาสองชั้นผนวกเข้ากับการใช้ฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาให้มีความเหมาะสมสูงสุด

ดังนั้นการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน ต้องมีการคำนึงถึงประเภทของฉนวน หรือวิธีการออกแบบรูปทรงหลังคาให้มีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งการออกแบบหลังคาสองชั้นที่เหมาะสมกับลักษณะอาคารจะช่วยลดการใช้ฉนวนใต้หลังคาลงได้ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สามารถเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ออกแบบหลังคาอาคารใหม่ๆ หรือนำไปใช้แก้ปัญหาอาคารสำนักงานที่ต้องการลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา หรือพัฒนาอาคารเดิมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ ทางกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานได้มีการออกพระราชบัญญัติไว้ได้

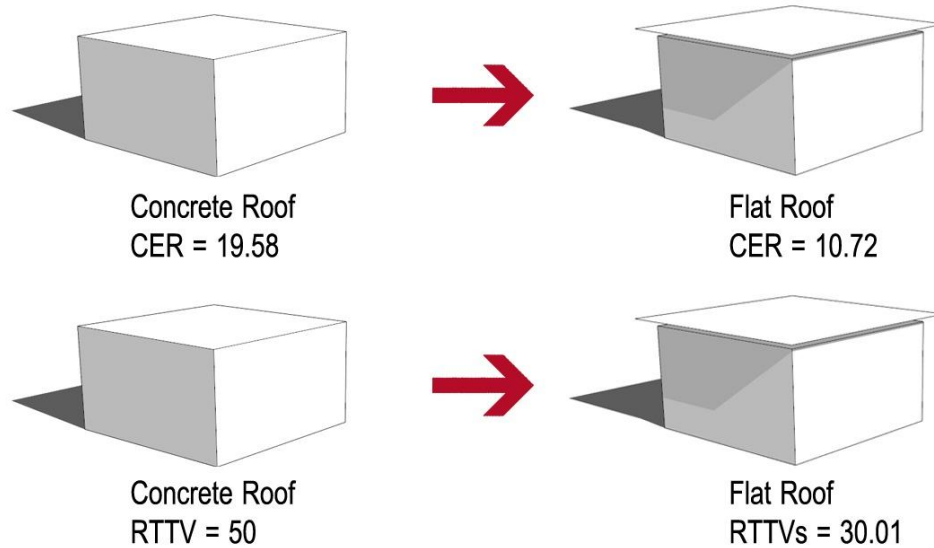
ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการกำหนดรูปทรงหลังคาสองชั้นออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ หลังคาแบน (Flat Roof) หลังคาเพิงหมาแหงน (Lean to Roof) หลังคาจั่ว 15 องศา (Gable 15° Roof) จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม Ecotect Analysis 2011 เพื่อหาร้อยละเฉลี่ยการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง (%shaded) และโปรแกรม VisualDOE 4.0 เพื่อคำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof, kW-hr/sq.m.-yr)

จากการศึกษาประสิทธิภาพการลดพลังงานการทำความเย็น อาคารที่มีหลังคาสองชั้นกับอาคารที่มีหลังคาคสล.พื้นเรียบทั่วไป พบว่าประสิทธิภาพในการลด พลังงานทำความเย็นอาคารของหลังคาสองชั้นจะสัมพันธ์กับร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่าง โดยหลังคาสองชั้นที่มีร้อยละการบังเงาบนหลังคาคสล.ชั้นล่างสูงก็จะมีประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นอาคารสูงเช่นกัน ส่วนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารของ

อาคารที่มีการติดตั้งฉนวนใต้หลังคาเพียงอย่างเดียวกับอาคารที่ติดตั้งหลังคาสองชั้นเพิ่มเข้าไปจะพบว่าประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารของหลังคาสองชั้นจะแปรผกผันกับประสิทธิภาพของฉนวนใต้หลังคาคล. ยิ่งอาคารมีการติดตั้งฉนวนที่มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น ประสิทธิภาพในการลดพลังงานการทำความเย็นอาคารของหลังคาสองชั้นก็จะยิ่งลดลง เห็นได้จากอาคารที่มีการติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาตั้งแต่ 10.22 ลงมา ส่งผลให้หลังคาสองชั้นไม่สามารถช่วยลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาได้ แต่หลังคาสองชั้นที่มีระยาระย่นชายคาสูง จะสามารถบังเงาให้กับผนังอาคารได้ ส่งผลให้ในภาพรวมยังสามารถช่วยลดพลังงานการทำความเย็นอาคารจากผนังและช่องเปิดได้



ภาพที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคา (RTTV) กับค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (CER)



ภาพที่ 5.2 แสดงประสิทธิภาพในการลดค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารของอาคารที่มีการเพิ่มหลังคาสองชั้น

การวิเคราะห์ผลและสรุปการวิจัยได้พัฒนาค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรปรับแก้เสริมเข้าไปในสมการการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารโดยใช้การเปรียบเทียบสมการเชิงเส้นของอาคารที่ติดฉนวนใต้หลังคา กับอาคารที่มีการติดตั้งหลังคาสองชั้น โดยแบ่งลักษณะการพิจารณาออกเป็น 2 ประเภท คือพิจารณาจากรูปทรงหลังคาสองชั้นซึ่งสะดวกต่อการคำนวณหลังคาสองชั้นของอาคารที่มีลักษณะตรงกับที่ระบุไว้ในตาราง 4.8 และพิจารณาจากร้อยละการบังเงาบนหลังคาสล .ชั้นล่าง ซึ่งสามารถคำนวณหลังคาสองชั้นได้หลากหลายรูปแบบ แต่จะต้องมีการคำนวณค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคาสล .ชั้นล่างเสียก่อนถึงจะสามารถเลือกค่าสัมประสิทธิ์จากตาราง 4.9 มาใส่ในสมการ (4)

$$RTTVs = A_s * RTTV + B_s \quad (4)$$

สมการคำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาเพื่อใช้คำนวณพลังงานความเย็นอาคารจากหลังคาของหลังคาสองชั้นรูปทรงต่างๆและหลังคาสองชั้นที่มีร้อยละการบังเงาต่างๆโดยไม่จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณด้วยสมการ (5) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากตารางที่ 10, 11

$$CER = (c_s * \%shaded) + (c_r * RTTV) + c_o \quad (5)$$

จากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น และการคำนวณพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา พบว่าผลการคำนวณ มีความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากการพื้นฐานของสมการเชิงเส้น Simple Linear Regression ในงานวิจัยครั้งนี้ มีค่าสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ (R Square, Coefficient of Determinant: แสดงสัดส่วนที่ตัวแปร x สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y ได้) เป็นตัวแสดงประสิทธิภาพของสมการ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.92-0.99 อันเกิดจากสมการเชิงเส้น ที่สร้างขึ้นมาจาก การเฉลี่ยข้อมูลเป็นแกนเส้นตรงทำให้ในข้อมูลบางจุดมีความคลาดเคลื่อนไปจากแกนเส้นตรง และเนื่องจากการพิจารณาจากร้อยละการบังเงาของหลังคาสองชั้นไม่ได้คำนึงถึงทิศทางของรูปทรงหลังคา แต่เฉลี่ยความสัมพันธ์ของค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา กับค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคา คสล. ชั้นล่าง ทำให้ หลังคา Lean_75% ที่หันมุมเงยขึ้นทางทิศตะวันตก และทิศใต้ซึ่งมีร้อยละการบังเงาใกล้เคียงกับหลังคาที่หันมุมเงยขึ้นทางทิศเหนือ ทิศตะวันออก แต่มีค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคาต่างกันเนื่องจาก อิทธิพลจากแสงอาทิตย์ทางทิศตะวันตกและใต้สูงกว่าทิศตะวันออกและทิศเหนือ

ตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น และสัมประสิทธิ์สมการพลังงานการทำความเย็นอาคารในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการครอบคลุมอาคารสำนักงานที่มีคุณลักษณะตรงกับตัวแปรควบคุมที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 3.3 รายละเอียดตัวแปร เพื่อให้ผลการคำนวณด้วยสมการที่กำหนดมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 มากที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้

ผู้ออกแบบสามารถนำผลการวิจัยครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบหลังคาสองชั้นสำหรับอาคารสำนักงาน และการเลือกใช้นวนใต้หลังคา คสล. โดยต้องคำนึงถึงเกณฑ์มาตรฐานการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานด้วย การออกแบบจำเป็นต้องพิจารณาถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหลังคาสองชั้น ได้แก่ รูปทรง ทิศทาง และค่าความโปร่งแสงของวัสดุผนังหลังคาชั้นบน ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละการบังเงาบนหลังคา คสล. ชั้นล่าง และค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร ตลอดจนลักษณะสถานที่ตั้ง อิทธิพลจากสิ่งแวดล้อม และความเหมาะสม สวยงามของอาคารในภาพรวม

ในส่วนการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น การนำไปใช้คำนวณควรมีความรู้ ความเข้าใจในรายละเอียดทางสถาปัตยกรรมของอาคาร เนื่องจาก

ต้องนำรายละเอียดเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์จากตารางเพื่อนำไปใช้ในสมการในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคารที่ลักษณะสองชั้นได้อย่างถูกต้อง

5.2.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะกรณีอาคารสำนักงานที่มีลักษณะตรงกับตัวแปรควบคุม อันเนื่องจากข้อจำกัดเนื่อด้านระยะเวลาในการวิจัย ทำให้ยังมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ให้ครอบคลุมลักษณะอาคารได้ครบทุกประเภท ทั้งในตัวแปรด้านระยะเวลาการใช้งานอาคาร พื้นที่อาคาร ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าอุปกรณ์ รวมถึงองค์ประกอบทางสถาปัตยกรรม เช่น ชนิดกระจก ฉนวน เป็นต้น ดังนั้นในการวิจัยครั้งต่อไปอาจมีการศึกษาลักษณะอาคารให้มีหลากหลายครอบคลุมมากยิ่งขึ้นโดยปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการเชิงเส้นให้มีความละเอียดและแม่นยำยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ศึกษาและผู้ออกแบบให้สามารถนำสมการไปประยุกต์ใช้ได้โดยไม่ต้องจำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับผู้ที่มีความสนใจในงานวิจัยครั้งนี้ และต้องการศึกษาค้นคว้าต่อยอดวิธีการลดการถ่ายเทความร้อนหลังคาแบบ Passive Cooling ต่อไป ก็สามารถพิจารณาการออกแบบหลังคาที่มีบ่อน้ำ หรือการปลูกพืชคลุมหลังคา เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการลดการถ่ายเทความร้อน และตัวแปรปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหลังคาอาคาร หรืออาจศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยครั้งนี้โดยพิจารณาถึงความโปร่งแสงของวัสดุผนังหลังคาชั้นบน เพื่อให้แสงธรรมชาติสามารถส่องผ่านเข้ามาในกรณีหลังคาคสล. ชั้นล่างมีช่องแสง และศึกษาถึงผลกระทบของแสงที่ลอดผ่านเข้ามาภายในอาคารว่าส่งผลต่อค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Load) ค่าพลังงานการส่องสว่าง (LPD) และค่าความร้อนสะสม (Storage Load) อย่างไร และศึกษาในส่วนของหลังคาสองชั้นที่มีวัสดุผนังหลังคาชั้นบนเป็น Solar cell ว่าสามารถลดพลังงานการทำความเย็นอาคารและสร้างพลังงานไฟฟ้ากลับสู่อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- โครงการส่งเสริมและการอนุรักษ์พลังงานในอาคารที่จะก่อสร้างหรือดัดแปลง. การประเมินประสิทธิภาพพลังงานของกรอบอาคาร. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2552
- จุไรพร ตุ่มพสุพรรณ. พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุผนังหลังคาบ้านพักอาศัยในเขตร้อนชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต , สาขาวิชาสถาปัตยกรรม , คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- โชติวิทย์ พงษ์เสริมผล. การปรับปรุงหลังคา เพื่อลดภาระการทำทความเย็น กรณีศึกษาอาคารของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต , สาขาวิชาสถาปัตยกรรม , คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- ประกาศกระทรวงพลังงาน เรื่องหลักเกณฑ์และวิธีการคำนวณในการออกแบบอาคารแต่ละระบบการใช้พลังงานโดยรวมของอาคาร และการใช้พลังงานหมุนเวียนในระบบต่างๆของอาคาร. 2552.
- ปฐวี ประคองใจ. การศึกษาเพื่อการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคารและหลังคา กับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทรานเฟอร์ฟังก์ชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2547
- ปฎิวัติ อ่อนพุทธา , ณัฐ กาศยปนนันท์ , พัฒนะ รักความสุข. ผลของลักษณะหลังคาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนโดยใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3, สายวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน , คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550 พฤษภาคม 23-25.
- อรรถจน์ เศรษฐบุตตร. การจัดทำมาตรฐานค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหัวของผู้ใช้อาคารสำนักงานสำหรับประเทศไทย ด้วยวิธี Life Cycle Assessment (LCA) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์. กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช, 2552.

พระราชบัญญัติ การ ส่งเสริม การ อนุรักษ์พลังงานปี พ .ศ.2535 และฉบับปรับปรุง พ .ศ.2550.

สำนักงานคณะกรรมการกฤษฎีกา. [ออนไลน์]. 2555. <http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/upload/nov50/june51/lawHeadPDF.pdf> [2555, เมษายน 8]

รายการประมาณราคาปีงบประมาณ 2555 สำหรับงานก่อสร้าง ปรับปรุง ซ่อมแซม สถานศึกษาในสังกัดสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน (สพฐ.). สำนักมาตรฐานการจัดซื้อจัดจ้างภาครัฐ, กระทรวงพาณิชย์, 2555.

วิกรม จำนงค์จิตต์. ประสิทธิผลของการออกแบบการระบายอากาศของใต้หลังคาเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากหลังคา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

วิชุดา ออยู่งค์, พัฒนะ รักความสุข . การประเมินเทคโนโลยีเพื่ออาคารสำนักงานที่มีประสิทธิภาพพลังงานสูง. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน , คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551 มกราคม 28-29.

วิรัตน์ ตั้งคุณาพันธ์, สมนึก ธีรกุลพิศุทธิ , ประพันธ์ สันติวารกร , การใช้วิธีการคำนวณ OTTV และ RTTV สำหรับการประมาณการประหยัดพลังงาน . คณะวิศวกรรมศาสตร์ , มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2549 ตุลาคม 18-20.

สักการ ราชิสุทธิ. การศึกษาและวิจัยเพื่อจัดทำหลักเกณฑ์การประเมินการใช้แสงกันแดดกับอาคารเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานในอาคาร . วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต , คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2550.

สิริวรินทร์ เพชรรัตน์. อิทธิพลของการบังเงาต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่บ . วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะพลังงานและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545.

108 วิธีปรับปรุง-ซ่อมแซมบ้านด้วยตนเอง. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา : <http://baannaifun.blogspot.com/2011/07/lean-to.html> [2555, เมษายน 8]

ภาษาอังกฤษ

Gabriel Perez, Lidia Rincon, Anna Vila, Josep M. Gonzalez, Luisa F. Cabeza. Energy Efficiency of green roofs and green facades in Mediterranean continental climate. Dept. Construccions Arquitectoniques, Universitat Politecnica de Catalunya. 2007.

Hashem Akbari, Dan M. Kurn, Sarah E. Bretz, James W. Hanford. Peak power and cooling energy saving of shade trees. Heat Island Project, Lawrence Barkley National Laboratory Berkeley, 1997.

Rakesh Kumar, S.C. Kaushik. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology. 2004.

Soona Raeissi and Mansour Taheri. Cooling load reduction of building using passive roof options. Chemical Engineering Department, Shiraz University, Shiraz, Iran, 1995.

Surapong Chirattananon, Juntakan Taveekun. An OTTV-based energy estimation model for commercial building in Thailand. Energy Program, Asian Institute of Technology. 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
นิตยสารศัพท์

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร (Overall Thermal Transfer Value หรือ OTTV) หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคาร (Roof Thermal Transfer Value หรือ RTTV) หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาแต่ละส่วนที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาอาคารที่มีลักษณะสองชั้น (Roof Thermal Transfer Value of Shaded Roof หรือ RTTVs) หมายถึง ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหลังคาที่มีลักษณะสองชั้น มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Coefficient of Heat Transmission หรือ U value) หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของวัสดุส่วนที่พิจารณา หรือส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวม มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส (W/(sq.m.-°C))

ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance หรือ R value) หมายถึง สัดส่วนของความหนาของวัสดุ (Δx) ต่อสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (k) มีหน่วยเป็นตารางเมตร-องศาเซลเซียสต่อวัตต์ ((sq.m.-°C)/W)

SRR หมายถึง อัตราส่วนพื้นที่ของหลังคาโปร่งแสงต่อพื้นที่ทั้งหมดของหลังคาส่วนที่พิจารณา

ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า (Temperature Different Equivalent หรือ TD_{eq}) หมายถึง ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่าระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งรวมถึงผลการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของหลังคาส่วนที่บ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

ค่าความแตกต่างอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร (ΔT) หมายถึง ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายในอาคารบริเวณปรับอากาศกับอุณหภูมิอากาศภายนอกอาคาร หน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient หรือ SHGC) หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหลังคาโปร่งแสง

ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด (Shading Coefficient หรือ SC) หมายถึง อัตราส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านอุปกรณ์บังแดดไปกระทบส่วนโปร่งแสงของหลังคา

ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน (Effective Solar Radiation หรือ ESR) หมายถึง รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคาที่มีมุมเอียงแตกต่างกัน ในแต่ละทิศทาง ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาโปร่งแสง และ/หรือ หลังคาทึบแสง มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

Occupancy Rate (OCCU) หมายถึง ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารในพื้นที่ มีหน่วยเป็น คนต่อตารางเมตร (Person/sq.m.)

Light Power Density (LPD) หมายถึง กำลังไฟฟ้าส่องสว่างที่ติดตั้งเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่อาคาร มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

Equipment Power Density (EPD) หมายถึง กำลังไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆต่อหน่วยพื้นที่อาคาร มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/sq.m.)

Ventilation Rate (VENT) หมายถึง อัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่ มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที (l/s)

Window to Wall Ration (WWR) หมายถึง อัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างโปร่งแสง และ/หรือ ผนังโปร่งแสงต่อพื้นที่ผนังด้านที่พิจารณา

ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (Coefficient of Performance หรือ COP) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขีดความสามารถทำความเย็นรวมสุทธิของระบบปรับอากาศ กับพิกัดกำลังไฟฟ้า

ผลคูณของความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะ (Density Specific Heat หรือ DSH) หมายถึง ผลคูณของความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะของวัสดุ มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อตารางเมตร-องศาเซลเซียส (kJ/(sq.m.-°C))

ค่าพลังงานการทำความเย็นอาคาร (Cooling Energy หรือ CE) หมายถึง ค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม VisualDOE4.0 ต่อพื้นที่อาคารที่มีการปรับอากาศ มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตารางเมตร-ปี ((kW-hr)/(sq.m.-Yr))

ร้อยละการบังเงาบนหลังคาสล. (%Shaded) หมายถึง ค่าเฉลี่ยร้อยละการบังเงาบนหลังคาสล.ที่คำนวณจากการบังเงาของหลังคาสองชั้นที่เกิดขึ้นบนหลังคาสล.ชั้นล่าง โดยใช้ค่าเฉลี่ยช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00-17.00 น. ใน 4 วันตลอดปี ได้แก่ 21 มีนาคม 21 มิถุนายน 21 กันยายน และ 21 ธันวาคม

ภาคผนวก ข

ผลการคำนวณค่าพลังงานการทำความเย็นอาคารจากหลังคา (Cooling Energy from Roof)

ตาราง ข-1 แสดงค่าพลังงานทำความเย็นอาคารที่ระดับค่า RTTV = 62.03 ในแต่ละทิศ

North	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	679,030	292,801	49,119	5,538	1,026,488	-	0.00	104.28	208.117	836.222	24.888	25.95
Flat_1	649,166	282,653	47,010	5,320	984,149	42,339	4.30	99.97	114.381	809.663	14.127	14.12
Flat_2	645,282	282,269	46,811	5,304	979,666	46,822	4.78	99.52	113.382	808.665	14.021	13.95
Flat_3	641,658	281,913	46,593	5,275	975,439	51,049	5.23	99.09	112.553	807.745	13.934	13.81
Flat_0.25%	651,270	282,644	47,350	5,370	986,634	39,854	4.04	100.23	114.421	809.631	14.132	14.16
Flat_0.50%	660,556	283,308	48,107	5,460	997,431	29,057	2.91	101.32	116.125	811.358	14.312	14.50
Flat_0.75%	669,260	283,909	48,656	5,505	1,007,330	19,158	1.90	102.33	117.699	812.956	14.478	14.82
lean 15_1	651,972	282,610	47,213	5,337	987,132	39,356	3.99	100.28	114.260	809.542	14.114	14.15
lean 15_2	648,547	282,140	47,045	5,322	983,054	43,434	4.42	99.86	113.030	808.313	13.983	13.96
lean 15_3	645,774	281,819	46,824	5,297	979,714	46,774	4.77	99.52	112.222	807.459	13.898	13.83
lean 15_0.25%	654,252	282,560	47,527	5,385	989,724	36,764	3.71	100.54	114.155	809.403	14.104	14.18
lean 15_0.50%	662,395	283,238	48,232	5,470	999,335	27,153	2.72	101.52	115.942	811.201	14.293	14.51
lean 15_0.75%	668,045	283,908	48,257	5,431	1,005,641	20,847	2.07	102.16	117.875	813.149	14.496	14.81
Gable 15_1	650,590	282,880	47,185	5,338	985,993	40,495	4.11	100.16	114.972	810.254	14.190	14.21
Gable 15_2	646,959	282,531	47,008	5,325	981,823	44,665	4.55	99.74	114.050	809.334	14.092	14.05
Gable 15_3	643,693	282,225	46,770	5,300	977,988	48,500	4.96	99.35	113.298	808.551	14.012	13.92
Gable 15_0.25%	652,836	282,873	47,519	5,387	988,615	37,873	3.83	100.43	114.961	810.222	14.189	14.25
Gable 15_0.50%	661,491	283,445	48,204	5,471	998,611	27,877	2.79	101.44	116.479	811.746	14.349	14.56
Gable 15_0.75%	669,733	283,986	48,677	5,507	1,007,903	18,585	1.84	102.39	117.875	813.149	14.496	14.84

EAST	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	679,030	292,801	49,119	5,538	1,026,488	-	0.00	104.28	208.117	836.222	24.888	25.95
Flat_1	648,907	282,426	47,027	5,324	983,684	42,804	4.35	99.93	113.798	809.079	14.065	14.05
Flat_2	645,395	282,402	46,830	5,304	979,931	46,557	4.75	99.55	113.706	808.989	14.055	13.99
Flat_3	641,762	281,819	46,570	5,265	975,416	51,072	5.24	99.09	112.270	807.462	13.904	13.78
Flat_0.25%	651,436	282,568	47,196	5,343	986,543	39,945	4.05	100.22	114.234	809.444	14.113	14.14
Flat_0.50%	660,555	283,265	48,013	5,443	997,276	29,212	2.93	101.31	116.012	811.245	14.300	14.49
Flat_0.75%	669,248	283,894	48,588	5,497	1,007,227	19,261	1.91	102.32	117.648	812.905	14.473	14.81
lean 15_1	653,164	282,483	47,244	5,352	988,243	38,245	3.87	100.39	113.928	809.210	14.079	14.13
lean 15_2	650,525	282,405	47,054	5,336	985,320	41,168	4.18	100.09	113.727	809.011	14.058	14.07
lean 15_3	647,721	281,855	46,690	5,276	981,542	44,946	4.58	99.71	112.380	807.566	13.916	13.88
lean 15_0.25%	655,670	282,576	47,385	5,369	991,000	35,488	3.58	100.67	114.259	809.465	14.115	14.21
lean 15_0.50%	663,312	283,245	48,147	5,460	1,000,164	26,324	2.63	101.60	115.999	811.229	14.299	14.53
lean 15_0.75%	670,614	283,874	48,602	5,493	1,008,583	17,905	1.78	102.46	117.629	812.884	14.471	14.83
Gable 15_1	649,937	282,541	47,149	5,346	984,973	41,515	4.21	100.06	114.113	809.395	14.099	14.11
Gable 15_2	646,620	282,534	46,981	5,330	981,465	45,023	4.59	99.70	114.080	809.363	14.095	14.05
Gable 15_3	643,195	281,985	46,623	5,270	977,073	49,415	5.06	99.26	112.737	807.927	13.954	13.85
Gable 15_0.25%	652,435	282,689	47,326	5,364	987,814	38,674	3.92	100.35	114.549	809.758	14.146	14.20
Gable 15_0.50%	661,217	283,325	48,110	5,456	998,108	28,380	2.84	101.39	116.205	811.437	14.321	14.52
Gable 15_0.75%	669,556	283,935	48,586	5,496	1,007,573	18,915	1.88	102.35	117.737	812.993	14.482	14.82

West	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	678,960	292,798	49,120	5,538	1,026,416	-	0.00	104.27	208.117	836.200	24.888	25.95
Flat_1	648,834	282,426	47,027	5,324	983,611	42,805	4.35	99.92	113.798	809.087	14.065	14.05
Flat_2	645,333	282,403	46,796	5,304	979,836	46,580	4.75	99.54	113.706	808.007	14.072	14.01
Flat_3	641,692	281,819	46,553	5,265	975,329	51,087	5.24	99.08	112.270	807.470	13.904	13.78
Flat_0.25%	651,374	282,574	47,179	5,343	986,470	39,946	4.05	100.21	114.234	809.452	14.113	14.14
Flat_0.50%	660,485	283,265	48,012	5,442	997,204	29,212	2.93	101.30	116.012	811.253	14.300	14.49
Flat_0.75%	669,108	283,895	48,591	5,497	1,007,091	19,325	1.92	102.31	117.648	812.912	14.472	14.81
lean 15_1	652,834	283,439	47,893	5,441	989,607	36,809	3.72	100.53	116.434	811.723	14.344	14.42
lean 15_2	649,842	283,465	47,778	5,429	986,514	39,902	4.04	100.21	116.477	811.768	14.349	14.38
lean 15_3	647,127	283,386	47,420	5,385	983,318	43,098	4.38	99.89	116.254	811.553	14.325	14.31
lean 15_0.25%	655,298	283,701	48,006	5,449	992,454	33,962	3.42	100.82	117.096	812.392	14.414	14.53
lean 15_0.50%	663,176	283,986	48,433	5,494	1,001,089	25,327	2.53	101.70	117.859	813.153	14.494	14.74
lean 15_0.75%	669,331	286,064	48,426	5,459	1,009,280	17,136	1.70	102.53	190.555	818.606	23.278	23.87
Gable 15_1	649,866	282,560	47,149	5,346	984,921	41,495	4.21	100.05	114.113	809.403	14.098	14.11
Gable 15_2	646,550	282,539	46,980	5,330	981,399	45,017	4.59	99.70	114.080	809.371	14.095	14.05
Gable 15_3	643,121	281,990	46,624	5,270	977,005	49,411	5.06	99.25	112.737	807.935	13.954	13.85
Gable 15_0.25%	652,365	282,689	47,325	5,364	987,743	38,673	3.92	100.34	114.549	809.766	14.146	14.19
Gable 15_0.50%	661,146	283,325	48,110	5,456	998,037	28,379	2.84	101.39	116.205	811.444	14.321	14.52
Gable 15_0.75%	669,489	283,935	48,589	5,497	1,007,510	18,906	1.88	102.35	117.737	813.001	14.482	14.82

South	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	679,030	292,805	49,119	5,538	1,026,492	-	0.00	104.28	208.117	836.222	24.888	25.95
Flat_1	649,166	282,653	47,010	5,320	984,149	42,343	4.30	99.97	114.381	809.663	14.127	14.12
Flat_2	645,282	282,269	46,811	5,304	979,666	46,826	4.78	99.52	113.382	808.665	14.021	13.95
Flat_3	641,658	281,913	46,593	5,275	975,439	51,053	5.23	99.09	112.553	807.745	13.934	13.81
Flat_0.25%	651,270	282,644	47,350	5,370	986,634	39,858	4.04	100.23	114.421	809.631	14.132	14.16
Flat_0.50%	660,556	283,308	48,107	5,460	997,431	29,061	2.91	101.32	116.125	811.358	14.312	14.50
Flat_0.75%	669,260	283,909	48,656	5,505	1,007,330	19,162	1.90	102.33	117.699	812.956	14.478	14.82
lean 15_1	654,506	283,736	47,936	5,451	991,629	34,863	3.52	100.73	117.203	812.485	14.425	14.53
lean 15_2	651,904	283,736	47,770	5,434	988,844	37,648	3.81	100.45	117.199	812.482	14.425	14.49
lean 15_3	649,173	283,737	47,611	5,425	985,946	40,546	4.11	100.16	117.189	812.493	14.423	14.45
lean 15_0.25%	656,890	283,951	48,172	5,478	994,491	32,001	3.22	101.03	117.773	813.072	14.485	14.63
lean 15_0.50%	664,261	284,150	48,450	5,504	1,002,365	24,127	2.41	101.82	118.294	813.587	14.540	14.81
lean 15_0.75%	669,985	286,366	48,438	5,464	1,010,253	16,239	1.61	102.63	191.284	819.363	23.345	23.96
Gable 15_1	650,590	282,880	47,185	5,338	985,993	40,499	4.11	100.16	114.972	810.254	14.190	14.21
Gable 15_2	646,960	282,531	47,008	5,325	981,824	44,668	4.55	99.74	114.050	809.334	14.092	14.05
Gable 15_3	643,693	282,225	46,770	5,300	977,988	48,504	4.96	99.35	113.298	808.551	14.012	13.92
Gable 15_0.25%	652,836	282,873	47,519	5,387	988,615	37,877	3.83	100.43	114.961	810.222	14.189	14.25
Gable 15_0.50%	661,491	283,445	48,204	5,471	998,611	27,881	2.79	101.44	116.479	811.747	14.349	14.56
Gable 15_0.75%	669,733	283,986	48,677	5,507	1,007,903	18,589	1.84	102.39	117.875	813.149	14.496	14.84

ตาราง ข-2 แสดงค่าพลังงานทำความเย็นอาคารที่ระดับค่า RTTV = 28.02 ในแต่ละทิศ

North	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	652,444	274,141	47,102	5,323	979,010	-	0.00	99.45	58.982	779.233	7.569	7.53
Flat_1	639,270	273,326	45,952	5,174	963,722	15,288	1.59	97.90	56.847	777.099	7.315	7.16
Flat_2	637,240	273,163	45,862	5,166	961,431	17,579	1.83	97.67	56.418	776.672	7.264	7.09
Flat_3	634,042	273,050	45,710	5,154	957,956	21,054	2.20	97.31	38.629	776.386	4.975	4.84
Flat_0.25%	640,050	273,317	46,026	5,198	964,591	14,419	1.49	97.99	56.884	777.062	7.320	7.17
Flat_0.50%	644,107	273,620	46,405	5,241	969,373	9,637	0.99	98.47	57.650	777.851	7.411	7.30
Flat_0.75%	648,344	273,897	46,769	5,283	974,293	4,717	0.48	98.97	58.344	778.570	7.494	7.42
lean 15_1	640,115	273,283	46,056	5,182	964,636	14,374	1.49	97.99	56.733	776.985	7.302	7.16
lean 15_2	638,734	273,079	45,959	5,175	962,947	16,063	1.67	97.82	56.185	776.438	7.236	7.08
lean 15_3	636,036	272,955	45,889	5,165	960,045	18,965	1.98	97.53	38.306	776.099	4.936	4.81
lean 15_0.25%	641,130	273,269	46,143	5,206	965,748	13,262	1.37	98.11	56.706	776.922	7.299	7.16
lean 15_0.50%	644,986	273,588	46,466	5,246	970,286	8,724	0.90	98.57	57.528	777.756	7.397	7.29
lean 15_0.75%	648,784	273,873	46,791	5,285	974,733	4,277	0.44	99.02	58.282	778.522	7.486	7.41
Gable 15_1	640,019	273,426	46,014	5,183	964,642	14,368	1.49	97.99	57.079	777.331	7.343	7.20
Gable 15_2	638,185	273,274	45,919	5,177	962,555	16,455	1.71	97.78	56.679	776.932	7.295	7.13
Gable 15_3	635,024	273,169	45,830	5,166	959,189	19,821	2.07	97.44	38.873	776.688	5.005	4.88
Gable 15_0.25%	640,585	273,424	46,099	5,207	965,315	13,695	1.42	98.06	57.093	777.322	7.345	7.20
Gable 15_0.50%	644,600	273,677	46,452	5,247	969,976	9,034	0.93	98.53	57.787	778.023	7.427	7.32
Gable 15_0.75%	648,526	273,932	46,792	5,286	974,536	4,474	0.46	99.00	58.412	778.656	7.502	7.43

EAST	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	652,444	274,141	47,102	5,323	979,010	-	0.00	99.45	58.982	779.233	7.569	7.53
Flat_1	639,128	273,235	45,954	5,176	963,493	15,517	1.61	97.88	56.596	776.848	7.285	7.13
Flat_2	637,321	273,228	45,849	5,167	961,565	17,445	1.81	97.68	56.568	776.821	7.282	7.11
Flat_3	634,100	273,041	45,635	5,135	957,911	21,099	2.20	97.31	38.584	776.341	4.970	4.84
Flat_0.25%	640,056	273,276	46,026	5,184	964,542	14,468	1.50	97.98	56.779	776.956	7.308	7.16
Flat_0.50%	644,128	273591	46,364	5,232	969,315	9,695	1.00	98.47	57.586	777.787	7.404	7.29
Flat_0.75%	648,350	273875	46,733	5,279	974,237	4,773	0.49	98.97	58.315	778.541	7.490	7.41
lean 15_1	641,113	273,267	46,057	5,190	965,627	13,383	1.39	98.09	56.653	776.905	7.292	7.15
lean 15_2	639,824	273,228	45,956	5,182	964,190	14,820	1.54	97.95	56.571	776.825	7.282	7.13
lean 15_3	638,120	272934	45,779	5,152	961,985	17,025	1.77	97.72	55.922	776.075	7.206	7.04
lean 15_0.25%	642,204	273,276	46,094	5,197	966,771	12,239	1.27	98.21	56.784	776.958	7.309	7.18
lean 15_0.50%	645,505	273,590	46,438	5,241	970,774	8,236	0.85	98.62	57.573	777.771	7.402	7.30
lean 15_0.75%	649,019	273,874	46,768	5,282	974,943	4,067	0.42	99.04	58.302	778.527	7.489	7.42
Gable 15_1	639,641	273,285	46,013	5,187	964,126	14884	1.54	97.94	56.744	776.996	7.303	7.15
Gable 15_2	637,963	273,285	45,890	5,179	962,317	16,693	1.73	97.76	56.744	776.997	7.303	7.14
Gable 15_3	634,701	273,069	45,740	5,150	958,660	20,350	2.12	97.39	38.638	776.391	4.977	4.85
Gable 15_0.25%	640,560	273,326	46,065	5,195	965,146	13,864	1.44	98.04	56.928	777.101	7.326	7.18
Gable 15_0.50%	644,450	273,627	46,403	5,239	969,719	9291	0.96	98.51	57.675	777.875	7.414	7.30
Gable 15_0.75%	648,506	273,902	46,760	5,282	974,450	4,560	0.47	98.99	58.356	778.581	7.495	7.42

West	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	652,372	274,146	47,101	5,323	978,942	-	0.00	99.45	58.982	779.241	7.569	7.53
Flat_1	639,053	273,239	45,953	5,176	963,421	15,521	1.61	97.87	56.596	776.856	7.285	7.13
Flat_2	637,250	273,233	45,849	5,167	961,499	17,443	1.81	97.67	56.568	776.829	7.282	7.11
Flat_3	634,019	273,011	45,634	5,135	957,799	21,143	2.21	97.30	38.584	776.269	4.970	4.84
Flat_0.25%	639,992	273,277	46,009	5,184	964,462	14,480	1.50	97.97	56.779	776.964	7.308	7.16
Flat_0.50%	644,055	273,592	46,363	5,232	969,242	9,700	1.00	98.46	57.586	777.795	7.404	7.29
Flat_0.75%	648,279	273,894	46,732	5,279	974,184	4,758	0.49	98.96	58.315	778.549	7.490	7.41
lean 15_1	640,712	273,668	46,318	5,233	965,931	13,011	1.35	98.12	57.711	777.971	7.418	7.28
lean 15_2	639,383	273,670	46,263	5,227	964,543	14,399	1.49	97.98	57.736	777.997	7.421	7.27
lean 15_3	637,822	273,633	46,075	5,205	962,735	16,207	1.68	97.80	57.632	777.902	7.409	7.25
lean 15_0.25%	641,614	273,788	46,348	5,236	966,986	11,956	1.24	98.23	58.032	778.299	7.456	7.32
lean 15_0.50%	645,330	273,932	46,613	5,266	971,141	7,801	0.80	98.65	58.389	778.653	7.499	7.40
lean 15_0.75%	648,919	274,052	46,853	5,295	975,119	3,823	0.39	99.06	58.704	778.966	7.536	7.47
Gable 15_1	639,051	273,286	46,012	5,187	963,536	15,406	1.60	97.88	56.744	777.004	7.303	7.15
Gable 15_2	637,892	273,286	45,889	5,179	962,246	16,696	1.74	97.75	56.744	777.005	7.303	7.14
Gable 15_3	634,624	273,039	45,724	5,149	958,536	20,406	2.13	97.37	38.638	776.320	4.977	4.85
Gable 15_0.25%	640,497	273,345	46,032	5,195	965,069	13,873	1.44	98.04	56.925	777.109	7.325	7.18
Gable 15_0.50%	644,378	273,631	46,403	5,239	969,651	9,291	0.96	98.50	57.675	777.882	7.414	7.30
Gable 15_0.75%	642,435	273,903	46,759	5,282	968,379	10,563	1.09	98.37	58.356	778.589	7.495	7.37

South	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	652,444	274,141	47,120	5,323	979,028	-	0.00	99.45	58.982	779.233	7.569	7.53
Flat_1	639,270	273,362	45,952	5,174	963,758	15,270	1.58	97.90	56.847	777.099	7.315	7.16
Flat_2	637,240	273,163	45,862	5,166	961,431	17,597	1.83	97.67	56.418	776.671	7.264	7.09
Flat_3	634,042	273,050	45,710	5,154	957,956	21,072	2.20	97.31	38.629	776.385	4.975	4.84
Flat_0.25%	640,050	273,317	46,026	5,198	964,591	14,437	1.50	97.99	56.884	777.062	7.320	7.17
Flat_0.50%	644,107	273,620	46,405	5,241	969,373	9,655	1.00	98.47	57.650	777.851	7.411	7.30
Flat_0.75%	648,344	273,897	46,769	5,283	974,293	4,735	0.49	98.97	58.344	778.570	7.494	7.42
lean 15_1	641,820	273,797	46,344	5,238	967,199	11,829	1.22	98.25	58.087	778.338	7.463	7.33
lean 15_2	640,665	273,816	46,261	5,230	965,972	13,056	1.35	98.13	58.088	778.341	7.463	7.32
lean 15_3	639,036	273,818	46,198	5,225	964,277	14,751	1.53	97.96	58.088	778.362	7.463	7.31
lean 15_0.25%	642,596	273,911	46,441	5,251	968,199	10,829	1.12	98.35	58.361	778.629	7.495	7.37
lean 15_0.50%	645,980	274,011	46,662	5,276	971,929	7,099	0.73	98.73	58.599	778.862	7.524	7.43
lean 15_0.75%	649,195	274,089	46,893	5,299	975,476	3,552	0.36	99.09	58.805	779.062	7.548	7.48
Gable 15_1	640,019	273,426	46,014	5,183	964,642	14,386	1.49	97.99	57.079	777.331	7.343	7.20
Gable 15_2	638,185	273,274	45,919	5,177	962,555	16,473	1.71	97.78	56.679	776.932	7.295	7.13
Gable 15_3	635,024	273,169	45,830	5,166	959,189	19,839	2.07	97.44	38.873	776.688	5.005	4.88
Gable 15_0.25%	640,585	273,424	46,099	5,207	965,315	13,713	1.42	98.06	57.093	777.322	7.345	7.20
Gable 15_0.50%	644,600	273,677	46,452	5,247	969,976	9,052	0.93	98.53	57.787	778.024	7.427	7.32
Gable 15_0.75%	648,526	273,932	46,792	5,286	974,536	4,492	0.46	99.00	58.412	778.656	7.502	7.43

ตาราง ข-3 แสดงค่าพลังงานทำความเย็นอาคารที่ระดับค่า RTTV = 10.22 ในแต่ละทิศ

North	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	639,252	272,730	45,752	5,142	962,876	-	0.00	97.81	15.051	770.824	1.953	1.91
Flat_1	634,143	272,736	45,327	5,087	957,293	5,583	0.58	97.25	14.364	770.844	1.863	1.81
Flat_2	633,425	272,756	45,283	5,084	956,548	6,328	0.66	97.17	14.372	770.856	1.864	1.81
Flat_3	632,246	272,725	45,214	5,078	955,263	7,613	0.80	97.04	14.326	770.780	1.859	1.80
Flat_0.25%	634,048	272,718	45,350	5,095	957,211	5,665	0.59	97.24	14.300	770.761	1.855	1.80
Flat_0.50%	636,095	272,725	45,495	5,111	959,426	3,450	0.36	97.46	15.033	770.777	1.950	1.90
Flat_0.75%	637,647	272,728	45,650	5,127	961,152	1,724	0.18	97.64	15.052	770.810	1.953	1.91
lean 15_1	634,919	272,697	45,354	5,089	958,059	4,817	0.50	97.32	14.961	770.734	1.941	1.89
lean 15_2	633,946	272,679	45,345	5,087	957,057	5,819	0.61	97.22	14.181	770.664	1.840	1.79
lean 15_3	633,079	272,640	45,269	5,082	956,070	6,806	0.71	97.12	14.129	770.557	1.834	1.78
lean 15_0.25%	634,984	272,677	45,378	5,098	958,137	4,739	0.49	97.33	14.894	770.651	1.933	1.88
lean 15_0.50%	636,377	272,697	45,512	5,113	959,699	3,177	0.33	97.49	14.965	770.727	1.942	1.89
lean 15_0.75%	637,856	272,725	45,659	5,128	961,368	1,508	0.16	97.66	15.016	770.784	1.948	1.90
Gable 15_1	634,666	272,763	45,324	5,090	957,843	5,033	0.53	97.30	15.107	770.880	1.960	1.91
Gable 15_2	633,665	272,757	45,301	5,088	956,811	6,065	0.63	97.20	14.386	770.869	1.866	1.81
Gable 15_3	632,658	272,727	45,238	5,083	955,706	7,170	0.75	97.09	14.343	770.794	1.861	1.81
Gable 15_0.25%	634,583	272,734	45,378	5,098	957,793	5,083	0.53	97.30	15.057	770.830	1.953	1.90
Gable 15_0.50%	636,289	272,736	45,513	5,114	959,652	3,224	0.34	97.49	15.074	770.847	1.956	1.91
Gable 15_0.75%	637,741	272,736	45,659	5,128	961,264	1,612	0.17	97.65	15.071	770.844	1.955	1.91

EAST	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof%	CER/sq.m
Base Case	639,252	272,730	45,752	5,142	962,876	-	0.00	97.81	15.051	770.824	1.953	1.91
Flat_1	634,109	272,727	45,303	5,088	957,227	5,649	0.59	97.24	14.320	770.800	1.858	1.81
Flat_2	633,452	272,764	45,285	5,084	956,585	6,291	0.66	97.17	14.414	770.897	1.870	1.82
Flat_3	632,270	272,720	45,168	5,071	955,229	7,647	0.80	97.04	13.313	770.767	1.727	1.68
Flat_0.25%	634,067	272,718	45,306	5,090	957,181	5,695	0.59	97.23	14.292	770.752	1.854	1.80
Flat_0.50%	636,105	272,720	45,466	5,108	959,399	3,477	0.36	97.46	15.026	770.771	1.949	1.90
Flat_0.75%	637,653	272,727	45,636	5,125	961,141	1,735	0.18	97.64	15.049	770.807	1.952	1.91
lean 15_1	634,858	272,718	45,347	5,092	958,015	4,861	0.51	97.32	14.278	770.758	1.852	1.80
lean 15_2	634,418	272,727	45,321	5,090	957,556	5,320	0.56	97.27	14.319	770.802	1.858	1.81
lean 15_3	633,521	272,686	45,234	5,078	956,519	6357	0.66	97.17	14.250	770.688	1.849	1.80
lean 15_0.25%	634,972	272,685	45,352	5,095	958,104	4,772	0.50	97.33	14.236	770.684	1.847	1.80
lean 15_0.50%	636,687	272,690	45,496	5,111	959,984	2,892	0.30	97.52	14.962	770.699	1.941	1.89
lean 15_0.75%	637,936	272,720	45,650	5,127	961,433	1,443	0.15	97.67	15.014	770.769	1.948	1.90
Gable 15_1	634,292	272,734	45,337	5,092	957,455	5,421	0.57	97.26	14.347	770.828	1.861	1.81
Gable 15_2	633,711	272,775	45,309	5,089	956,884	5,992	0.63	97.20	14.448	770.931	1.874	1.82
Gable 15_3	632,540	272,728	45,215	5,076	955,559	7,317	0.77	97.07	14.358	770.808	1.863	1.81
Gable 15_0.25%	634,262	272,725	45,340	5,094	957,421	5,455	0.57	97.26	14.322	770.779	1.858	1.81
Gable 15_0.50%	636,230	272,720	45,488	5,111	959,549	3,327	0.35	97.48	15.031	770.773	1.950	1.90
Gable 15_0.75%	637,714	272,727	45,646	5,127	961,214	1,662	0.17	97.64	15.050	770.807	1.952	1.91

West	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	639,171	272,718	45,752	5,142	962,783	-	0.00	97.80	15.051	770.751	1.953	1.91
Flat_1	634,032	272,718	45,302	5,088	957,140	5,643	0.59	97.23	14.320	770.757	1.858	1.81
Flat_2	633,374	272,756	45,284	5,084	956,498	6,285	0.66	97.17	14.414	770.855	1.870	1.82
Flat_3	632,192	272,697	45,168	5,071	955,128	7,655	0.80	97.03	14.313	770.725	1.857	1.80
Flat_0.25%	633,990	272,690	45,305	5,090	957,075	5,708	0.60	97.22	14.292	770.710	1.854	1.80
Flat_0.50%	636,026	272,686	45,466	5,108	959,286	3,497	0.36	97.45	15.026	770.698	1.950	1.90
Flat_0.75%	637,574	272,697	45,635	5,125	961,031	1,752	0.18	97.63	15.049	770.734	1.953	1.91
lean 15_1	634,521	272,796	45,468	5,109	957,894	4,889	0.51	97.31	14.521	770.958	1.884	1.83
lean 15_2	633,970	272,808	45,446	5,107	957,331	5,452	0.57	97.25	14.589	771.030	1.892	1.84
lean 15_3	633,164	272,834	45,385	5,098	956,481	6,302	0.66	97.16	14.604	771.067	1.894	1.84
lean 15_0.25%	635,047	272,804	45,473	5,109	958,433	4,350	0.45	97.36	15.274	770.992	1.981	1.93
lean 15_0.50%	636,434	272,770	45,574	5,121	959,899	2,884	0.30	97.51	15.211	770.923	1.973	1.92
lean 15_0.75%	637,798	272,736	45,656	5,132	961,322	1,461	0.15	97.66	15.136	770.842	1.964	1.92
Gable 15_1	634,213	272,725	45,337	5,092	957,367	5,416	0.57	97.25	14.347	770.784	1.861	1.81
Gable 15_2	633,631	272,763	45,308	5,089	956,791	5,992	0.63	97.20	14.448	770.889	1.874	1.82
Gable 15_3	632,462	272,720	45,215	5,076	955,473	7,310	0.77	97.06	14.358	770.766	1.863	1.81
Gable 15_0.25%	634,186	272,697	45,339	5,094	957,316	5,467	0.57	97.25	14.322	770.736	1.858	1.81
Gable 15_0.50%	636,151	272,690	45,487	5,110	959,438	3,345	0.35	97.46	15.031	770.700	1.950	1.90
Gable 15_0.75%	637,634	272,697	45,645	5,127	961,103	1,680	0.17	97.63	15.050	770.734	1.953	1.91

South	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof%	CER/sq.m
Base Case	639,252	272,730	45,752	5,142	962,876	-	0.00	97.81	15.348	770.824	1.991	1.95
Flat_1	634,143	272,736	45,327	5,087	957,293	5,583	0.58	97.25	14.364	770.845	1.863	1.81
Flat_2	633,425	272,756	45,283	5,084	956,548	6,328	0.66	97.17	14.372	770.855	1.864	1.81
Flat_3	632,246	272,725	45,214	5,078	955,263	7,613	0.80	97.04	14.326	770.780	1.859	1.80
Flat_0.25%	634,048	272,718	45,350	5,095	957,211	5,665	0.59	97.24	14.300	770.760	1.855	1.80
Flat_0.50%	636,095	272,725	45,495	5,111	959,426	3,450	0.36	97.46	15.033	770.777	1.950	1.90
Flat_0.75%	637,647	272,728	45,650	5,127	961,152	1,724	0.18	97.64	15.052	770.811	1.953	1.91
lean 15_1	635,021	272,849	45,500	5,111	958,481	4,395	0.46	97.37	14.649	771.130	1.900	1.85
lean 15_2	634,502	272,876	45,458	5,108	957,944	4,932	0.51	97.31	14.692	771.176	1.905	1.85
lean 15_3	633,979	272,886	45,420	5,106	957,391	5,485	0.57	97.26	15.430	771.238	2.001	1.95
lean 15_0.25%	635,520	272,855	45,523	5,115	959,013	3,863	0.40	97.42	15.349	771.148	1.990	1.94
lean 15_0.50%	636,771	272,815	45,606	5,124	960,316	2,560	0.27	97.55	15.259	771.049	1.979	1.93
lean 15_0.75%	638,021	272,776	45,673	5,134	961,604	1,272	0.13	97.68	15.159	770.941	1.966	1.92
Gable 15_1	634,666	272,763	45,324	5,090	957,843	5,033	0.53	97.30	15.107	770.879	1.960	1.91
Gable 15_2	633,664	272,757	45,301	5,088	956,810	6,066	0.63	97.20	14.386	770.869	1.866	1.81
Gable 15_3	632,658	272,727	45,238	5,083	955,706	7,170	0.75	97.09	14.343	770.794	1.861	1.81
Gable 15_0.25%	634,582	272,734	45,378	5,098	957,792	5,084	0.53	97.30	15.057	770.830	1.953	1.90
Gable 15_0.50%	636,289	272,736	45,513	5,114	959,652	3,224	0.34	97.49	15.074	770.847	1.956	1.91
Gable 15_0.75%	637,741	272,736	45,659	5,128	961,264	1,612	0.17	97.65	15.071	770.844	1.955	1.91

ตาราง ข-4 แสดงค่าพลังงานทำความเย็นอาคารที่ระดับค่า RTTV = 4.57 ในแต่ละทิศ

North	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	635,322	272,606	45,324	5,082	958,334	-	0.00	97.35	6.424	768.902	0.835	0.81
Flat_1	633,314	272,647	45,151	5,057	956,169	2,165	0.23	97.13	6.529	769.007	0.849	0.82
Flat_2	632,816	272,648	45,121	5,055	955,640	2,694	0.28	97.08	6.533	769.014	0.850	0.82
Flat_3	632,096	272,620	45,059	5,052	954,827	3,507	0.37	97.00	6.512	768.963	0.847	0.82
Flat_0.25%	632,952	272,619	45,130	5,060	955,761	2,573	0.27	97.09	6.500	768.958	0.845	0.82
Flat_0.50%	633,804	272,613	45,197	5,067	956,681	1,653	0.17	97.18	6.481	768.946	0.843	0.82
Flat_0.75%	634,547	272,611	45,262	5,075	957,495	839	0.09	97.27	6.456	768.927	0.840	0.82
lean 15_1	633,557	272,613	45,164	5,058	956,392	1,942	0.20	97.15	6.467	768.945	0.841	0.82
lean 15_2	633,146	272,611	45,151	5,057	955,965	2,369	0.25	97.11	6.446	768.927	0.838	0.81
lean 15_3	632,511	272,577	45,095	5,054	955,237	3,097	0.32	97.04	6.423	768.848	0.835	0.81
lean 15_0.25%	633,349	272,580	45,144	5,062	956,135	2,199	0.23	97.13	6.432	768.870	0.837	0.81
lean 15_0.50%	633,913	272,600	45,222	5,069	956,804	1,530	0.16	97.20	6.435	768.866	0.837	0.81
lean 15_0.75%	634,588	272,606	45,282	5,075	957,551	783	0.08	97.27	6.432	768.897	0.837	0.81
Gable 15_1	633,465	272,647	45,149	5,058	956,319	2,015	0.21	97.15	6.534	769.011	0.850	0.83
Gable 15_2	632,980	272,649	45,136	5,057	955,822	2,512	0.26	97.10	6.539	769.020	0.850	0.83
Gable 15_3	632,301	272,620	45,078	5,054	955,053	3,281	0.34	97.02	6.520	768.968	0.848	0.82
Gable 15_0.25%	633,126	272,620	45,143	5,062	955,951	2,383	0.25	97.11	6.505	768.961	0.846	0.82
Gable 15_0.50%	633,831	272,613	45,221	5,069	956,734	1,600	0.17	97.19	6.484	768.947	0.843	0.82
Gable 15_0.75%	634,528	272,611	45,265	5,075	957,479	855	0.09	97.27	6.457	768.927	0.840	0.82

EAST	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	635,322	272,606	45,324	5,082	958,334	-	0.00	97.35	6.424	768.902	0.835	0.81
Flat_1	633,299	272,641	45,139	5,057	956,136	2,198	0.23	97.13	6.509	768.987	0.846	0.82
Flat_2	632,828	272,649	45,122	5,055	955,654	2,680	0.28	97.08	6.552	769.032	0.852	0.83
Flat_3	632,103	272,619	45,031	5,048	954,801	3,533	0.37	96.99	6.506	768.957	0.846	0.82
Flat_0.25%	632,955	272,619	45,109	5,057	955,740	2,594	0.27	97.09	6.497	768.954	0.845	0.82
Flat_0.50%	633,800	272,613	45,200	5,066	956,679	1,655	0.17	97.18	6.479	768.944	0.843	0.82
Flat_0.75%	634,536	272,611	45,271	5,074	957,492	842	0.09	97.27	6.455	768.926	0.839	0.82
lean 15_1	633,628	272,620	45,175	5,059	956,482	1,852	0.19	97.16	6.490	768.968	0.844	0.82
lean 15_2	633,319	272,641	45,146	5,058	956,164	2,170	0.23	97.13	6.509	768.989	0.846	0.82
lean 15_3	632,650	272,608	45,079	5,052	955,389	2,945	0.31	97.05	6.478	768.912	0.842	0.82
lean 15_0.25%	633,467	272,608	45,133	5,060	956,268	2,066	0.22	97.14	6.471	768.917	0.842	0.82
lean 15_0.50%	634,069	272,608	45,215	5,067	956,959	1,375	0.14	97.21	6.460	768.916	0.840	0.82
lean 15_0.75%	634,699	272,607	45,278	5,075	957,659	675	0.07	97.28	6.444	768.911	0.838	0.82
Gable 15_1	633,384	272,646	45,154	5,059	956,243	2,091	0.22	97.14	6.522	768.999	0.848	0.82
Gable 15_2	632,990	272,651	45,140	5,057	955,838	2,496	0.26	97.10	6.567	769.048	0.854	0.83
Gable 15_3	632,179	272,639	45,052	5,051	954,921	3,413	0.36	97.01	6.526	768.973	0.849	0.82
Gable 15_0.25%	633,062	272,620	45,125	5,059	955,866	2,468	0.26	97.10	6.510	768.965	0.847	0.82
Gable 15_0.50%	633,868	272,618	45,210	5,067	956,763	1,571	0.16	97.19	6.487	768.950	0.844	0.82
Gable 15_0.75%	634,569	272,612	45,276	5,074	957,531	803	0.08	97.27	6.458	768.928	0.840	0.82

West	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	635,248	272,579	45,323	5,082	958,232	-	0.00	97.34	6.424	768.859	0.836	0.81
Flat_1	633,191	272,613	45,138	5,057	955,999	2,233	0.23	97.11	6.509	768.944	0.846	0.82
Flat_2	632,754	272,641	45,121	5,055	955,571	2,661	0.28	97.07	6.552	768.990	0.852	0.83
Flat_3	632,031	272,608	45,030	5,048	954,717	3,515	0.37	96.98	6.506	768.914	0.846	0.82
Flat_0.25%	632,883	272,607	45,109	5,057	955,656	2,576	0.27	97.08	6.497	768.911	0.845	0.82
Flat_0.50%	633,727	272,606	45,099	5,066	956,498	1,734	0.18	97.17	6.479	768.901	0.843	0.82
Flat_0.75%	634,459	272,599	45,270	5,074	957,402	830	0.09	97.26	6.455	768.883	0.840	0.82
lean 15_1	633,514	272,649	45,221	5,067	956,451	1,781	0.19	97.16	6.600	769.034	0.858	0.83
lean 15_2	633,210	272,658	45,210	5,065	956,143	2,089	0.22	97.13	6.631	769.069	0.862	0.84
lean 15_3	632,601	272,679	45,239	5,061	955,580	2,652	0.28	97.07	6.638	769.098	0.863	0.84
lean 15_0.25%	633,303	272,651	45,187	5,067	956,208	2,024	0.21	97.14	6.590	769.044	0.857	0.83
lean 15_0.50%	633,848	272,640	45,233	5,072	956,793	1,439	0.15	97.20	6.538	768.986	0.850	0.83
lean 15_0.75%	634,552	272,611	45,295	5,077	957,535	697	0.07	97.27	6.483	768.924	0.843	0.82
Gable 15_1	633,310	272,619	45,154	5,059	956,142	2,090	0.22	97.13	6.522	768.956	0.848	0.82
Gable 15_2	632,891	272,647	45,139	5,057	955,734	2,498	0.26	97.09	6.567	769.005	0.854	0.83
Gable 15_3	632,106	272,612	45,052	5,051	954,821	3,411	0.36	97.00	6.526	768.931	0.849	0.82
Gable 15_0.25%	632,990	272,611	45,124	5,059	955,784	2,448	0.26	97.09	6.510	768.922	0.847	0.82
Gable 15_0.50%	633,795	272,606	45,209	5,067	956,677	1,555	0.16	97.18	6.487	768.907	0.844	0.82
Gable 15_0.75%	634,508	272,600	45,259	5,074	957,441	791	0.08	97.26	6.458	768.885	0.840	0.82

South	Cooling	Fan	Tower	Pump	Total CE	CE Reduce	Reduce%	CE/sq.m	Roof Con.	total Con.	Roof Con.%	CER/sq.m
Base Case	635,322	272,606	45,324	5,082	958,334	0	0.00	97.35	6.424	768.903	0.835	0.81
Flat_1	633,314	272,647	45,151	5,057	956,169	2,165	0.23	97.13	6.529	769.007	0.849	0.82
Flat_2	632,816	272,648	45,121	5,055	955,640	2,694	0.28	97.08	6.533	769.013	0.850	0.82
Flat_3	632,095	272,620	45,059	5,052	954,826	3,508	0.37	97.00	6.512	768.963	0.847	0.82
Flat_0.25%	632,952	272,619	45,130	5,060	955,761	2,573	0.27	97.09	6.500	768.958	0.845	0.82
Flat_0.50%	633,804	272,613	45,197	5,067	956,681	1,653	0.17	97.18	6.481	768.946	0.843	0.82
Flat_0.75%	634,547	272,611	45,262	5,075	957,495	839	0.09	97.27	6.456	768.927	0.840	0.82
lean 15_1	633,801	272,690	45,228	5,067	956,786	1,548	0.16	97.19	6.658	769.137	0.866	0.84
lean 15_2	633,460	272,697	45,200	5,066	956,423	1,911	0.20	97.16	6.678	769.158	0.868	0.84
lean 15_3	632,896	272,720	45,123	5,065	955,804	2,530	0.26	97.10	6.699	769.191	0.871	0.85
lean 15_0.25%	633,622	272,686	45,063	5,069	956,440	1,894	0.20	97.16	6.634	769.123	0.863	0.84
lean 15_0.50%	634,156	272,656	45,233	5,074	957,119	1,215	0.13	97.23	6.567	769.052	0.854	0.83
lean 15_0.75%	634,679	272,639	45,287	5,078	957,683	651	0.07	97.29	6.479	768.978	0.843	0.82
Gable 15_1	633,465	272,648	45,149	5,058	956,320	2,014	0.21	97.15	6.534	769.012	0.850	0.83
Gable 15_2	632,980	272,649	45,136	5,057	955,822	2,512	0.26	97.10	6.539	769.020	0.850	0.83
Gable 15_3	632,301	272,620	45,078	5,054	955,053	3,281	0.34	97.02	6.520	768.968	0.848	0.82
Gable 15_0.25%	633,126	272,620	45,143	5,062	955,951	2,383	0.25	97.11	6.505	768.961	0.846	0.82
Gable 15_0.50%	633,831	272,613	45,221	5,069	956,734	1,600	0.17	97.19	6.484	768.947	0.843	0.82
Gable 15_0.75%	634,528	272,611	45,265	5,075	957,479	855	0.09	97.27	6.457	768.927	0.840	0.82

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พงษ์พิชญ์ จงศุภางค์รัตน์ เกิดวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2531 จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย เข้าศึกษาต่อระดับอุดมศึกษาในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2549 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิตเมื่อ พ.ศ. 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ภาควิชาสถาปัตยกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2554