

การศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่ใช้ปล่องรังสีอาทิตย์
A Study of Air Temperature in the Room installed with a Solar Chimney



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 86814
วัน,เดือน,ปี..... 16 ส.ค. 2552

b. 11646019
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

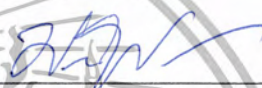
เรื่อง การศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่ใช้ปล่องรังสีอาทิตย์

A Study of Air Temperature in the Room installed with a Solar Chimney

ผู้จัดทำ

- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| 1. นาย กิตติศักดิ์ คอกพิกุล | รหัสประจำตัว 44015368 |
| 2. นาย ธนิต วิไลขำ | รหัสประจำตัว 44015378 |
| 3. นาย นุณฤทธิ์ ชื่นประเสริฐ | รหัสประจำตัว 44015388 |
| 4. นาย วีรยุทธ มากประภา | รหัสประจำตัว 44015407 |





(อ. มณฑล ใจกุศล)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องที่ใช้ปล่องรังสีอาทิตย์

นาย กิตติศักดิ์ คอกพิกุล 44015368

นาย ธนิต วิไลจำ 44015378

นาย บุญฤทธิ์ ชื่นประเสริฐ 44015388

นาย วีรยุทธ มากประภา 44015407

อ. มณฑล ใจกุลศล อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบผลการทดลองของอุณหภูมิอากาศภายในบ้านที่ติดตั้งอุปกรณ์ปล่องรังสีอาทิตย์กับบ้านที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว ในการศึกษาจะอาศัยหลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติซึ่งจะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศภายในบ้าน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะเหนี่ยวนำอากาศภายในห้องเข้าไปยังปล่องรังสีอาทิตย์ ทำให้อากาศมีความหนาแน่นน้อยลง อากาศร้อนจะลอยตัวขึ้นและเคลื่อนที่ออกบริเวณปล่องบนหลังจากการอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ ซึ่งผลดังกล่าวจะทำให้อุณหภูมิภายในบ้านลดลงสูงสุดประมาณ 2 องศาเซลเซียส ในขณะที่เขวคันนี้ยังได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการไหลเวียนของอากาศภายในห้อง เมื่อบ้านมีการติดตั้งอุปกรณ์ปล่องรังสีอาทิตย์ โดยใช้วิธี Finite Volume ภายใต้สมมติที่ว่าอากาศภายในห้องมีความหนาแน่นคงที่ นอกจากนั้นยังเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองพบว่า แนวโน้มของอุณหภูมิที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ มีลักษณะคล้ายกันกับอุณหภูมิจริงที่วัดได้จากการทดลอง เพียงแต่ค่าของอุณหภูมิไม่เท่ากัน อันเนื่องมาจากค่าที่วัดได้จากการทดลองไม่คงที่ เช่น ความเข้มของแสง ความเร็วและทิศทางลม เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนผนังห้องที่สมมติให้เป็นฉนวนนั้นก็ไม่เป็นฉนวนร้อยเปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าที่วัดได้แตกต่างจากโปรแกรมบ้างเล็กน้อย

A Study of Air Temperature in the Room installed with a Solar Chimney

Mr. Kittisak Dokpikul

Mr. Thanit Wilaikom

Mr. Boonnarit Chuenprasert

Mr. Weerayut Makprapa

Mr. Monton Jaikuson Advisor

ABSTRACT

The aim of this research was to study and compare the result of solar chimney in term of distribution temperature of air in the house that use and the house is not use solar chimney, and operated under natural convection. The device induces air in the house into a hot chimney resulting in a decrease in air density. The hot air will flow upward to the ceiling and go to the chimney by buoyancy force. From experimental result, maximum decrease in room temperature is 2 degrees. At the same time, this project involves the development of mathematical model for prediction air circulation in the house and temperature distribution by Finite Volume method. The model assumes constant air density in the house and compare with actual temperature. The temperature in the room from program has tendency same actual temperature, but the value not same the actual temperature. Which arise from the solar density, wind velocity and direction of wind has change every time. The walls insulate is not 100% insulated. And give a result of temperature of actual with program are little difference.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ก็คือ อาจารย์มงคล ใจกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำและช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้คำแนะนำและสนับสนุนอุปกรณ์การทดลอง ขอคุณ คุณเมณฑา เทียมเมือง ที่ทำการเชื่อมสายเทอร์โมคัปเปิ้ลให้ และให้คำแนะนำ คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนอำนวยความสะดวกและอนุญาตให้ใช้อาคารปฏิบัติการ โรงงานนอกเวลา แม้ในยามค่ำคืน ขอคุณพี่เล็ก พี่เหมียว และพี่เดียร์ นักศึกษาปริญญาโทเป็นอย่างสูงสำหรับคำแนะนำดีๆ

ขอขอบคุณ กรมอุตุฯ มหาวิทยาลัยที่อุบลราชธานีสำหรับใช้ในการวิจัย

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



สารบัญ

หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
2.1 ทฤษฎีการนำความร้อน	3
2.1.1 สมการพื้นฐานของการนำความร้อน	3
2.1.2 สมการการกระจายความร้อน	3
2.1.3 การนำความร้อนในสถานะสมมาตรหนึ่งมิติ	6
2.2 ทฤษฎีการพาความร้อน	9
2.2.1 การพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายนอกวัตถุ	9
2.2.2 การพาความร้อนแบบอิสระ	11
2.3 ทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน	16
2.3.1 กำลังในการปล่อยรังสีออก	17
2.3.2 เรดิโอซิตี	17
2.3.3 เอเอรดิเอชัน	18
2.3.4 การแผ่รังสีของวัตถุดำ	19
2.3.5 การดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุของผิว	20
2.4 ทฤษฎีการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์	25
2.4.1 ดวงอาทิตย์	25
2.4.2 ค่าคงที่สุริยะ	25
2.4.3 ตัวกลางกั้นแสงอาทิตย์ที่ชั้นบรรยากาศ	26
2.4.4 ทิศทางของแสงอาทิตย์แบบตรง	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

2.4.5	พลังงานแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศบนระนาบระดับ	29
2.4.6	การวัดค่าและการประเมินค่าพลังงานแสงอาทิตย์	30
2.4.7	การประมาณค่าการแผ่รังสีในวันท้องฟ้าแจ่มใส	31
2.5	ทฤษฎี Solar Passive Cooling	35
2.6	วิธีการปริมาตรต่อเนื่อง	36
2.6.1	การจัดการของผลต่างตรงกลาง	37
2.7	การวิเคราะห์ปล่องรังสีอาทิตย์โดยวิธี Finite Volume	39
2.7.1	หลักการการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์	39
2.7.2	การวิเคราะห์ปล่องรังสีอาทิตย์โดยวิธี Finite Volume	41
บทที่ 3	ขั้นตอนการดำเนินการ	43
3.1	รายละเอียดโครงสร้างแบบจำลองของบ้าน	43
3.1.1	บ้านที่ใช้ทำการทดลอง	43
3.2	เครื่องมือวัด	46
3.2.1	สายเทอร์โมคัปเปิ้ล	46
3.2.2	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	46
3.2.3	สอทวาร์ชแอนนิโมมิเตอร์	47
3.2.4	เครื่องวัดความเข้มของแสง	47
3.3	วิธีการทดลอง	48
บทที่ 4	ผลการทดลอง	50
4.1	การทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	50
4.2	การทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออก	54
4.3	การทดลองกรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและเปิดทางออก	57
4.4	การทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	61
4.5	การทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	64
4.6	การศึกษاثิทธิพลของขนาดช่องเปิดทางเข้าที่มีการเปิดทางออก	68
4.7	การเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์	70
บทที่ 5	สรุปและข้อเสนอแนะ	74
5.1	สรุปผลการทดลอง	74
5.2	ข้อเสนอแนะ	74
ภาคผนวก		
บรรณานุกรม		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้าที่

ตารางที่ 2-1 แสดงจำนวนวันในแต่ละเดือนของปีนั้น	29
ตารางที่ 2-2 แสดงค่าตัวประกอบของสภาวะอากาศต่าง ๆ	32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้าที่

รูปที่ 2-1 แสดงปริมาตรควบคุมเล็กๆ $dx.dy.dz$ ในการวิเคราะห์ในพิกัดคาร์ทีเซียน	4
รูปที่ 2-2 แสดงการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ	7
รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดบวณคาร์ลีเลเซอร์บนแผ่นเรียบ	10
รูปที่ 2-4 แสดงบวคาร์ลีเลเซอร์สำหรับการพาความร้อนอิสระบนแผ่นเรียบวางในแนวนิ่ง	12
รูปที่ 2-5 แสดงค่า Nu สำหรับการพาความร้อนอิสระจากแผ่นเรียบแนวนิ่ง	13
รูปที่ 2-6 แสดงการไหลเนื่องจากการลอยตัวบนแผ่นเรียบในแนวนอน	15
รูปที่ 2-7 แสดงการไหลเนื่องจากแรงลอยตัวบนแผ่นเอียง	16
รูปที่ 2-8 แสดงเรคิโอะซีของผิว	18
รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะของรังสีที่ตกกระทบ	19
รูปที่ 2-10 แสดงกระบวนการดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุของตัวกลางโปร่งแสง	21
รูปที่ 2-11 แสดงค่าการสะท้อนรังสีตั้งฉากและการดูดกลืนรังสีตั้งฉากของผิวเลือก	23
รูปที่ 2-12 แสดงค่าการผ่านทะลุรังสีของผิวที่ความยาวคลื่นใด ๆ ของผิวเลือก	24
รูปที่ 2-13 แสดงการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์	27
รูปที่ 2-14 แสดงมุมที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ตกกระทบลงบนพื้นผิว	28
รูปที่ 2-15 แสดงลักษณะความเย็นภายในที่อยู่อาศัย	35
รูปที่ 2-16 แสดงการกระจายความเย็นในเวลากลางคืน	36
รูปที่ 2-17 แสดงปริมาตรควบคุมรอบจุด P	37
รูปที่ 2-18 แสดงการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์	40
รูปที่ 3-1 แสดงบ้านที่ใช้ทดลอง	44
รูปที่ 3-2 แสดงขนาดของบ้าน	45
รูปที่ 3-3 แสดงบ้านจำลองที่สร้างขึ้นใช้ทำการทดลอง	45
รูปที่ 3-4 แสดงขนาดของปล่องรังสีอาทิตย์	46
รูปที่ 3-5 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ	46
รูปที่ 3-6 แสดงซอฟต์แวร์แอนิเมเตอร์	47
รูปที่ 3-7 แสดงเครื่องวัดความเข้มของแสง	47
รูปที่ 3-8 แสดงการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล	49
รูปที่ 4-1 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	50
รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	51
รูปที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	52
รูปที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	52

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	53
รูปที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	53
รูปที่ 4-7 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและปิดทางออก	54
รูปที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก	55
รูปที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก	55
รูปที่ 4-10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก	56
รูปที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก	56
รูปที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก	57
รูปที่ 4-13 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	57
รูปที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	58
รูปที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	59
รูปที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	59
รูปที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	60
รูปที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก	60
รูปที่ 4-19 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออก	61
รูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	62
รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	62
รูปที่ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	63
รูปที่ 4-23 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	63
รูปที่ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก	64
รูปที่ 4-25 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	64
รูปที่ 4-26 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	65
รูปที่ 4-27 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	66
รูปที่ 4-29 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	
กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	67
รูปที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	
กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด	67
รูปที่ 4-31 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีศึกษาอิทธิพลของขนาดที่แตกต่างกันของช่องเปิดทางเข้า	68
รูปที่ 4-32 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	
กรณีการพิจารณาผลของช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน โดยที่เปิดทางออก	69
รูปที่ 4-33 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	
กรณีการพิจารณาผลของช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน โดยที่เปิดทางออก	69
รูปที่ 4-34 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปรียบเทียบผลการทดลองกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์	70
รูปที่ 4-35 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านจากการทำการทดลองและผลของ	
แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	71
รูปที่ 4-36 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านจากการทำการทดลองและผลของ	
แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในหลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	71
รูปที่ 4-37 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายในห้องที่ติดและไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	72
รูปที่ 4-38 แสดงการกระจายของอุณหภูมิอากาศภายในห้องที่ติดและไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานในปริมาณที่มากขึ้น แต่พลังงานที่มีอยู่ในปริมาณที่จำกัดเริ่มลดลง จึงมีการคิดที่จะลดการใช้พลังงานโดยการนำพลังงานที่มีอยู่ตามธรรมชาติมาใช้ทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ อาคารบ้านเรือนก็เป็นส่วนหนึ่งที่ใช้พลังงาน และพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้คือพลังงานไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้กับเครื่องปรับอากาศ และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุด จึงจำเป็นต้องหาวิธีประหยัดพลังงานในส่วนนี้

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอากาศร้อนและมีความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้เกิดการเก็บสะสมความร้อนของบ้านเมื่อแสงแดดตกกระทบสูง ทำให้อุณหภูมิภายในบ้านมีความร้อนสูงไม่เหมาะที่จะพักอาศัย บ้านเรือนทั่วไปมักใช้เครื่องปรับอากาศในการลดอุณหภูมิภายในบ้าน เพื่อให้เกิดความรู้สึกสบายแก่ผู้พักอาศัย

การใช้พลังงานในอาคารและบ้านพักอาศัยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า แสงสว่าง และความร้อน พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เพื่อการปรับอากาศเพียงอย่างเดียวจะสูงประมาณ 60 % ของจำนวนไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมด เมื่อเราพิจารณาในอดีตบ้านทรงไทยไม่จำเป็นต้องมีเครื่องปรับอากาศ แต่ผู้อยู่อาศัยกลับรู้สึกสบาย เนื่องจากการออกแบบบ้านให้มีลักษณะโปร่งมีการระบายอากาศที่ดี ตัวบ้านมีการสะสมความร้อนน้อย แต่อาคารบ้านเรือนในปัจจุบันมีลักษณะแตกต่างจากในอดีต เนื่องจากบ้านมีการสร้างเลียนแบบทรงยุโรป ซึ่งเป็นบ้านในเขตหนาวต้องการบ้านที่เพิ่มความอบอุ่น เมื่อนำบ้านเมืองหนาวมาใช้กับเมืองไทยทำให้มีการสะสมความร้อนทำให้ในบ้านมีอากาศร้อนขึ้นและมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก และยังสร้างบ้านเรือนเกือบที่จะติดกันจนไม่สามารถใช้ประโยชน์จากลมภายนอกตามธรรมชาติได้ จึงมีแนวทางแก้ไขการสะสมความร้อนภายในบ้านออกไป และดึงอากาศเย็นจากภายนอกมาทดแทน โดยใช้ปล่องรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะทำงาน โดยอาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อน โดยติดแผ่นยิบซัมบอร์ดไว้ใต้หลังคาเพื่อให้มีลักษณะเป็นปล่องมีอากาศไหลเข้ามาเป็นอากาศภายในบ้าน เมื่อแสงอาทิตย์กระทบหลังคา จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านกระเบื้องหลังคาและแผ่รังสีผ่านช่องว่างด้านในตู้แผ่นยิบซัมบอร์ดและเข้าสู่ภายในปล่องทำให้อากาศร้อน เมื่ออากาศภายในปล่องร้อนความหนาแน่นของอากาศจะน้อยลง ทำให้อากาศร้อนลอยตัวและชักนำให้อากาศจากภายในบ้านเข้ามาแทนและอากาศเย็นจากภายนอกจะถูกดูดเข้ามาแทนอากาศภายในบ้านทำให้อากาศภายในบ้านเย็นขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศภายในบ้านที่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์กับบ้านที่ไม่ได้ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์
2. เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณ

3. เพื่อหาลักษณะการไหลของอากาศภายในบ้านที่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. การทดลองใช้บ้านจำลอง 2 หลัง ขนาด 8 ลูกบาศก์เมตร (กว้าง 2 เมตร ยาว 2 เมตร สูง 2 เมตร) หลังแรกไม่มีการติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ (Solar Chimney) มีรายละเอียด ดังนี้ หลังคากระเบื้องซีแพคโมเนีย มีพื้นที่ผิว 4 ด้าน เท่ากับ 3.9 ตารางเมตร เอียง 30 องศา ผังห้องด้านนอกใช้กระเบื้องแผ่นเรียบ ส่วนกลางเป็นโพนนา 1 นิ้ว และด้านในเป็นไม้ฉลิมหา 4 มิลลิเมตร มีหน้าต่างขนาดกว้าง 0.6 เมตร สูง 0.9 เมตร อยู่สูงจากพื้น 0.6 เมตร อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของผนังและแบ่งหน้าต่างเป็น 3 ช่องเท่าๆ กัน คือช่องละ 0.3×0.6 เมตร หลังที่สองติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์มีขนาดเดียวกันกับหลังแรก มีส่วนที่แตกต่างคือติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ที่หลังคาขนาดกว้าง 0.3 เมตร ยาว 0.3 เมตร สูง 0.4 เมตร มีแผ่นคอลเลกเตอร์ (Collector) ลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูรวม 4 ด้าน มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 1.76 ตารางเมตร โดยติดตั้งห่างจากหลังคา 0.145 เมตร

2. ให้อากาศภายในห้องที่ศึกษาเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอและคงที่ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง
3. สร้างแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ และนำผลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัยและอุปกรณ์การทดลอง
3. เตรียมและติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลอง
4. ทดสอบอุปกรณ์และเก็บผลการทดลอง
5. วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง
6. ประเมินและสรุปงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบระบายอากาศแบบธรรมชาติ ของหลังคาปล่องรังสีอาทิตย์ ซึ่งจะช่วยในการลดการสะสมความร้อนภายในห้อง
- 1.5.2 สามารถนำผลงานวิจัยนี้มาช่วยลดการใช้พลังงาน อันเนื่องมาจากการใช้เครื่องปรับอากาศ และลดปัญหามลพิษอันเป็นผลจากเครื่องปรับอากาศด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 ทฤษฎีการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

2.1.1 สมการพื้นฐานของการนำความร้อน (Conduction Equation)

การนำความร้อน เป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงผ่านตัวกลางไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยจะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานกันในแต่ละอนุภาค โดยอนุภาคที่อยู่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะมีระดับพลังงานสูง ซึ่งอนุภาคจะเกิดการสั่นอย่างเร็วและเกิดการชนกันของอนุภาคแล้วจะเกิดการเคลื่อนที่โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานจนกับอนุภาคที่ระดับพลังงานต่ำ ในกรณีของโลหะจะเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอน สำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ค้ำจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อน ไหวอยู่ภายใน โครงสร้างซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่าวัสดุที่นำความร้อน ได้ดีจะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย

ในการวัดการถ่ายเทความร้อน ในตัวกลางไม่สามารถวัดได้โดยตรงดังนั้นจึงใช้วิธีการวัดการกระจายอุณหภูมิของวัตถุแทน ซึ่งจะใช้อุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิ้ล เทอร์มิสเตอร์ และเทอร์โมมิเตอร์ในการวัด โดยการไหลของความร้อนในตัวกลางจะเป็นการคำนวณได้จากการวัดสนามของอุณหภูมิของผนังซึ่งจะเป็นรากฐานของการนำความร้อน จากกฎของฟูริเยร์ (Fourier's law) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่า อัตราการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดได้เป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad W \quad (2.1a)$$

หรือ $q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad W/m^2 \quad (2.1b)$

โดยที่ q_x คือ อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัด A ในทิศทางบวก x

q_x'' คือ พลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity of material) และเป็นค่าบวก

2.1.2 สมการการกระจายความร้อน (The Heat Diffusion Equation)

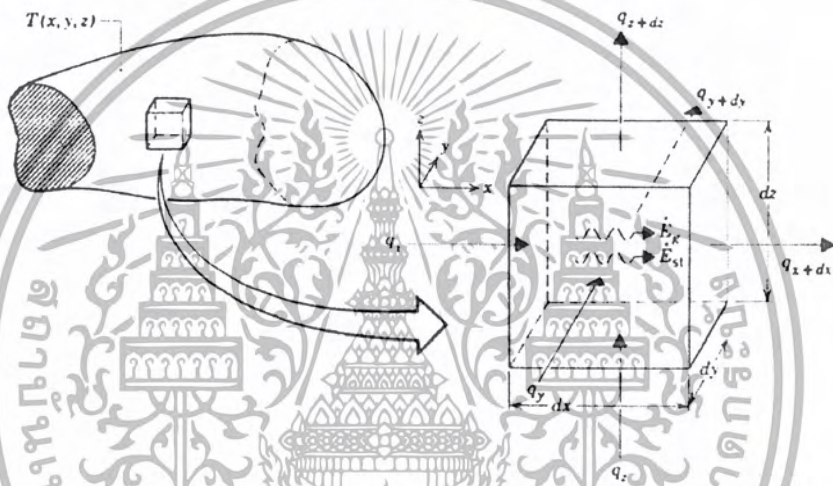
พิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีเกรเดียนต์อุณหภูมิจริง และการกระจายของอุณหภูมิ $T(x, y, z)$ จึงกำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) เรากำหนดปริมาตรควบคุมเล็กมาก dx, dy, dz ตามรูปที่ 2.1 ถ้ามีเกรเดียนต์อุณหภูมิแล้วการนำความร้อนจะเกิดขึ้นบริเวณตรงข้ามของแต่ละอันของผิวควบคุม อัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x, y, z ซึ่งจะแสดงในเทอมของ q_x, q_y, q_z ตามลำดับ อัตราการนำความร้อนที่ผิวตรงข้ามสามารถ

กระจายโดยอนุกรมเทลเลอร์ (Taylor series expansion) โดยไม่คิดเทอมลำดับสูง ๆ (Higher order terms) จะได้

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.2a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2.2b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.2c)$$



รูปที่ 2-1 แสดงปริมาตรควบคุมเล็กๆ $dx \cdot dy \cdot dz$ ในการวิเคราะห์ในพิกัดคาร์ทีเซียน

ในแกน x อัตราการนำความร้อน $x + dx$ จะมีค่าเท่ากับค่าปริมาณความร้อนบนแกน x บวกกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนเทียบกับระยะ dx ที่เวลาใดๆ ในตัวกลางที่มีแหล่งพลังงานความร้อนซึ่งสามารถผลิตความร้อนได้เทอมนี้จะแทนด้วย

$$\dot{E}_g = \dot{q} \, dx \, dy \, dz \quad (2.3)$$

โดยที่ $\dot{q}$ คือ อัตราพลังงานที่ผลิตขึ้นในตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (W / m^3) ในการเกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความร้อนที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุในปริมาตรควบคุม ถ้าวัสดุไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

สถานะโดยที่ผลกระทบของพลังงานที่แฝง (Latent energy) จะไม่มีผลกระทบ พลังงานที่เก็บไว้จะแสดงดังนี้

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.4)$$

โดยที่ $\rho c_p T / \partial t$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของตัวกลางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อเวลาที่เปลี่ยนไป ในขั้นตอนสุดท้ายจะแสดงในรูปทั่วไปของกฎทรงพลังงานจะแสดงดังสมการ

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.5)$$

ดังนั้นจะกล่าวได้ว่าอัตราการนำความร้อนประกอบด้วยการไหลเข้า ($\dot{E}_{in}$) และไหลออก ($\dot{E}_{out}$) ของพลังงานแล้วแทน (2.3) และ (2.4) จะได้

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.6)$$

แทนด้วยสมการ (2.2) จะได้

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.7)$$

จากกฎของฟูริเยร์ อัตราการนำความร้อนสามารถประมาณได้เท่ากับ

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8a)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.8b)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.8c)$$

แทนสมการ(2.8) ลงในสมการ(2.7) และหารตลอดด้วยมิติของปริมาตรควบคุม ($dx dy dz$) จะได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$

จากสมการ(2.9) เป็นรูปทั่วไป(General form) ของสมการการฟุ้งกระจายของความร้อน (Heat diffusion equation) ในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยทั่วไปจะเรียกสมการนี้ว่า สมการความร้อน ซึ่งจะเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์การนำความร้อนสำหรับกรณีค่า k คงที่ สมการความร้อนแสดงดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

โดยที่ $\alpha = k/\rho c_p$ เรียกว่า ค่าการฟุ้งกระจายของความร้อนของวัสดุ (Thermal diffusivity)

2.1.3 การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอหนึ่งมิติ (One Dimensional Steady State)

ในที่นี้จะเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับปัญหาการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอในหนึ่งมิติเพื่อหาการกระจายของอุณหภูมิและความร้อนที่ไหลภายในวัตถุที่รูปร่างเป็นแบบผนังเรียบ ลักษณะการนำความร้อนแบบสม่ำเสมอที่จะกล่าวถึงนี้มีเกรเดียนต์ของอุณหภูมิและการไหลของความร้อนขึ้นอยู่กับทิศทางเพียงทิศทางเดียว โดยที่อุณหภูมิแต่ละจุดของวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

2.1.3.1 การกระจายของอุณหภูมิในผนังเรียบ

การกระจายอุณหภูมิในผนัง หาได้จากสมการการฟุ้งกระจายของความร้อนและเงื่อนไขที่ขอบแบบต่าง ๆ ตามเงื่อนไขดังกล่าว และ ไม่มีการผลิตความร้อนภายในผนัง ดังนั้นจะสามารถลดรูปสมการเป็น

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (2.11)$$

ถ้าสมมุติว่าค่า k คงที่ และทำการอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(x) = C_1 x + C_2 \quad (2.12)$$

ค่าคงที่จากการอินทิเกรต C_1 และ C_2 จำเป็นต้องประยุกต์เงื่อนไขที่ขอบเพื่อหาคำตอบจากการอินทิเกรต ดังนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขที่ขอบเป็น $x = 0$ และ $x = L$ จะได้

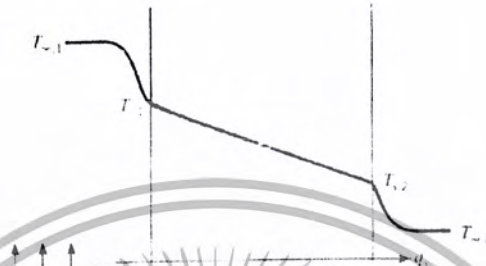
$$T(0) = T_{s,1} \quad \text{และ} \quad T(L) = T_{s,2}$$

ประยุกต์เงื่อนไขที่ $x = 0$ ลงในสมการทั่วไปในสมการ (2.12) จะได้ $T_{s,1} = C_2$ เงื่อนไขที่ขอบเป็นที่ $x = L$ จะได้

$$T_{s,2} = C_1 L + C_2 = C_1 L + T_{s,1}$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่า C_1 ได้

$$C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{L}$$



รูปที่ 2-2 แสดงการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเรียบ

แทนค่าคงที่จากการอินทิเกรตลงในสมการทั่วไปจะได้สมการการกระจายของอุณหภูมิดังนี้

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (2.13)$$

จากสมการการกระจายของอุณหภูมิ (2.13) สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ดังนี้

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = kA(T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (2.14)$$

2.1.3.2 ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

ในที่นี้เรานำสมการ(2.14) ซึ่งให้แนวทางสำคัญมากมาใช้นั้นคือความคล้ายคลึงระหว่างการฟุ้งกระจายของความร้อนและประจุไฟฟ้า โดยความต้านทานทางไฟฟ้านั้นจะเกี่ยวข้องกับการนำทางไฟฟ้า

ดังนั้นความต้านทานทางไฟฟ้าจึงเกี่ยวข้องกับการนำความร้อน จากสมการ(2.14) ความต้านทานการนำความร้อนคือ

$$R_{t,cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการนำความร้อนในระบบที่เหมือนกัน กฎของโอห์มได้ให้รูปแบบความต้านทานทางไฟฟ้าเป็น

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.16)$$

จากสมการ(2.15) และ (2.16) ยังสามารถพิจารณาในส่วนของความต้านทานความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนที่ผิว จากกฎของการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.17)$$

ความต้านทานพาความร้อนสำหรับการพาความร้อนเป็น

$$R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (2.18)$$

วงจรความร้อนสมมูลสำหรับผนังเรียบที่มีการพาความร้อนที่ผิวแสดงในรูปที่ 2-2 อัตราการถ่ายเทความร้อนหาได้จากการแยกพิจารณาในแต่ละช่วงของวงจรซึ่งจะได้

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1 A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/kA} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2 A} \quad (2.19)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อน อาจเขียนแทนด้วยเทอมของผลต่างของอุณหภูมิทั้งหมด $(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})$ และ ความต้านทานความร้อนรวม R_{tot} ดังนี้

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (2.20)$$

เนื่องจากความต้านทานการนำและการพาต่ออนุกรมกัน จึงนำมารวมกันในแต่ละช่วงจึงสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (2.21)$$

นอกจากนี้แล้วยังสามารถพิจารณาในส่วนการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยการแผ่รังสีที่ผิว T_s กับสิ่งแวดล้อม T_{surr} ในลักษณะความต้านทานความร้อนโดยการแผ่รังสีเขียนสมการเป็น

$$R_{t,rad} = \frac{T_s - T_{surr}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A} \quad (2.22)$$

โดย h_r สามารถคำนวณได้จาก $h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{surr})(T_s^2 + T_{surr}^2)$

2.2 ทฤษฎีการพาความร้อน (Convection Heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนอีกรูปแบบหนึ่งที่จะกล่าวในที่นี้ จะเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและผิวของของแข็งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่สัมผัสกับของแข็ง กลไกการถ่ายเทความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อน ในที่นี้จะได้อธิบายลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เรียกว่า การพาความร้อนอิสระ หรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or Natural convection) และการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ซึ่งจะได้หลักการมาประยุกต์ใช้ในส่วนที่นำมาใช้ในการศึกษาอุปกรณ์ปล่องรังสีอาทิตย์ เพื่อให้ลักษณะการคำนวณการถ่ายเทความร้อนง่ายขึ้นและสะดวกระหว่างผิวที่ร้อน T_w และอุณหภูมิของไหลเป็นที่ไหลผ่านบนผิวที่อุณหภูมิ T_f โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h จึงกำหนดสมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะดังสมการนี้

$$q'' = h(T_w - T_f) \quad (2.23)$$

โดยที่ q'' คือ ฟลักซ์ของความร้อนที่มีการถ่ายเทจากของไหลที่ร้อนไปสู่ผนังเย็น โดยที่อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียสหรือเคลวิน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h มีหน่วยเป็น $W / (m^2 \cdot ^\circ C)$

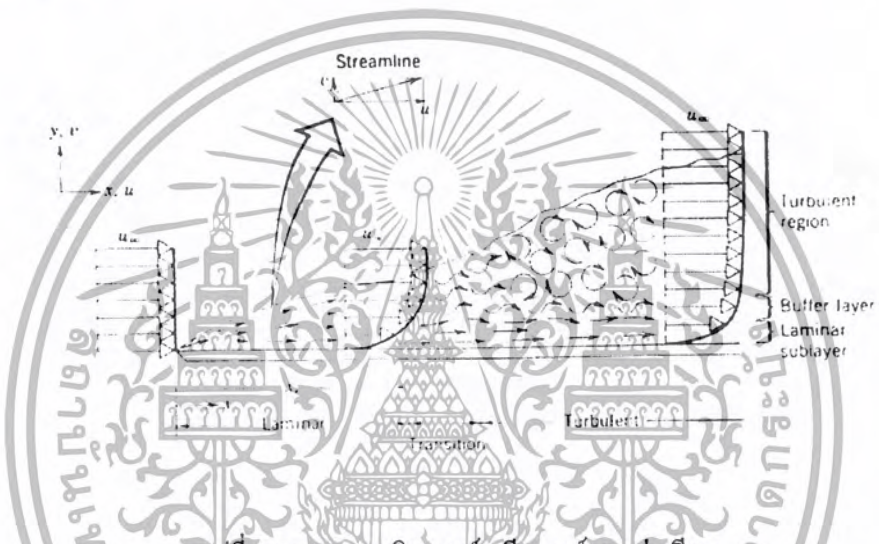
2.2.1 การพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายนอกวัตถุ (Forced Convection For Flow Over Bodies)

การพาความร้อนของของไหลที่เกิดขึ้นและทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะภายในของของไหล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ระหว่างของไหลกับผิวที่ถูกกระทำจากภายนอก เช่น พัดลมเป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะไม่เกิดจากแรงลอยตัวที่กระทำกับของของไหลนั่นเอง ลักษณะการพาความร้อนเช่นนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ดังนั้นปัญหาในการ

คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่หรือออกจากผิวในการไหลแบบไหลภายนอก (External flow) โดยไม่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น ในของไหล สถานการณ์การเคลื่อนที่การสัมผัสระหว่างของไหลและพื้นที่ผิวเรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ ในที่นี้เพื่อต้องการหาค่า h หรือ $\bar{h}$ จากสหพันธ์ (Correlation) ซึ่งได้จากการทดลองทั้งสิ้นเพื่อจะแก้สมการหาค่า q ต่อไป

2.2.1.1 การไหลบนแผ่นราบเรียบ (The Flat Plate In Parallel Flow)

การไหลของของไหลผ่านแผ่นเรียบ ถ้าแผ่นเรียบนั้นยาวมากจะเกิดบาวน์คาร์เลเยอร์ขึ้นทั้งแบบลามินาร์และแบบเทอร์บูเลนต์ โดยลามินาร์บาวน์คาร์เลเยอร์จะเกิดขึ้นก่อนและเมื่อ x เพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่งจากนั้นจะเข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition) แล้วจึงจะเข้าสู่ช่วงเทอร์บูเลนต์ เมื่อ x เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 แสดงการเกิดบาวน์คาร์เลเยอร์บนแผ่นเรียบ

ในการคำนวณหาพฤติกรรมของบาวน์คาร์เลเยอร์นั้นจะสมมุติว่าอยู่ในช่วง Transition เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง x_c ตำแหน่งที่หาได้จากกลุ่มตัวแปรไร้มิติซึ่งเรียกว่า เรโนลด์ส์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re)

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu} \tag{2.24}$$

โดยที่ค่า x (Characteristic length) เป็นระยะทางจากขอบด้านหน้า ค่าเรโนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤต (Critical reynolds number) เป็นค่าของ Re_x ที่ซึ่งเกิด Transition ขึ้น และสำหรับการไหลภายนอกวัตถุจะมีค่าเปลี่ยนแปลงจาก 10^5 ถึง 3×10^6 ขึ้นอยู่กับความหยาบของพื้นผิว สำหรับระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ของกระแสน้ำและธรรมชาติของการแปรเปลี่ยนความดันตามพื้นผิว ตามปกติจะมีค่า Re อยู่ที่ 5×10^5

2.2.1.2 การไหลแบบลามินาร์ (Laminar Flow)

พารามิเตอร์การพาที่เกี่ยวข้องสำหรับการไหลแบบลามินาร์ ได้มาโดยการแก้ปัญหาในรูปแบบที่เหมาะสมของสมการบาวนด์รีเลเยอร์ และความแม่นยำของผลลัพธ์ได้รับการยืนยันจากผลการทดลอง การแก้สมการนี้โดยใช้ Similarity variable ซึ่งจะให้ Similarity solution สำหรับการพาความร้อนที่พื้นผิว โดยมีอุณหภูมิสม่ำเสมอค่าของ Local Nusselt จะถูกกำหนดอยู่ในรูป

$$Nu_x \equiv \frac{h_x x}{k} = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \qquad Pr \geq 0.6 \tag{2.25}$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของการไหลแบบลามินาร์จะแสดงดังนี้

$$\bar{h}_x = \frac{1}{x} \int_0^x h_x dx = 0.322 \left(\frac{k}{x} \right) Pr^{1/3} \left(\frac{u_\infty}{\nu} \right)^{1/2} \int_0^x \frac{dx}{x^{1/2}} \tag{2.26}$$

อินทิเกรตแล้วแทนค่าสมการ (2.25) จะได้ว่า $\bar{h}_x = 2h_x$ แทนค่าสมการ (2.24) จะได้สมการดังนี้

$$Nu_x \equiv \frac{\bar{h}_x x}{k} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \qquad Pr \geq 0.6 \tag{2.27}$$

2.2.1.3 การไหลแบบเทอร์บูเลนต์ (Turbulent Flow)

สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ค่า Re ใดๆ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 5×10^5 และ 10^7 ดังนั้นค่า Nusselt number สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Nu_x \equiv \frac{h_x x}{k} = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \qquad 0.6 < Pr \leq 60 \tag{2.28}$$

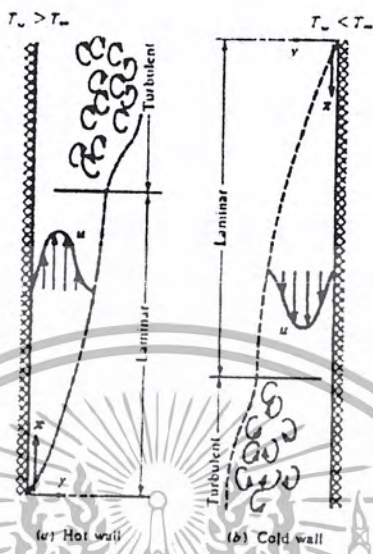
ส่วนการหาค่าเฉลี่ยของ Nusselt Number สามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.26)

$$\bar{h}_x = \frac{1}{(L - L_c)} \int_0^x h_x dx \tag{2.29}$$

2.2.2 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นก่อน โดยความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในของไหล การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิภายในของไหลนี้จะทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นในสนามความโน้มถ่วง ผลก็คืออุณหภูมิที่สูงซึ่งมีความหนาแน่นต่ำจะพยายามลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันการไหลที่อุณหภูมิต่ำซึ่งมีความหนาแน่นมากจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่ แรงที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่พาความร้อนได้

นี้เรียกว่า แรงลอยตัว (Buoyancy force) การเคลื่อนที่ของของไหลโดยการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในของไหล โดยไม่มีการบังคับให้มีการเคลื่อนที่ซึ่งการเคลื่อนที่ของของไหลแบบนี้จะเรียกว่า การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or Natural convection)



รูปที่ 2-4 แสดงว่าวิธีการสำหรับการพาความร้อนอิสระบนแผ่นเรียบวางในแนวนิ่ง

2.2.2.1 สมการเอมไพริคัลสำหรับการไหลภายนอกวัตถุ (External Free Convection Flows)

ในที่นี้จะสรุปสมการเอมไพริคัลที่เหมาะสมซึ่งได้พัฒนาขึ้นสำหรับวัตถุรูปทรงเรขาคณิตที่วางในของไหล ซึ่งจะเป็นสิ่งเหมาะสมในการคำนวณทางวิศวกรรมมากที่สุด สมการทั่วไปจะอยู่ในรูป

$$\frac{Nu_L}{k} = \frac{hL}{k} = C Ra_L^n \tag{2.30}$$

เมื่อ Ra (Rayleigh number) มีค่าเท่ากับ

$$Ra = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \tag{2.31}$$

โดยที่ $Gr_L = g\beta L^3 \frac{(T_s - T_\infty)}{\nu^2}$ และ $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

ซึ่งค่าของ แกรสฮอฟฟ์นัมเบอร์ (Grashof number, Gr_L) เป็นการแทนอัตราส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงจากความหนืดซึ่งกระทำต่อของไหล โดยที่ L เป็นความยาวตามลักษณะของรูปทรง ค่า $n = 1/4$ สำหรับ

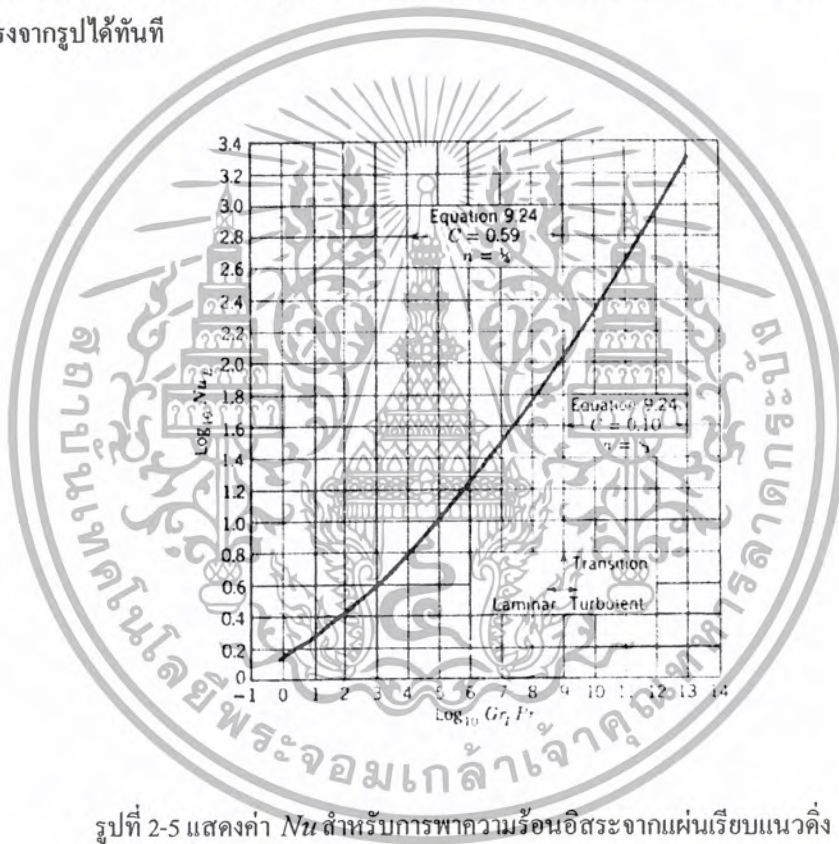
การไหลแบบลามินาร์ ส่วนการไหลแบบเทอร์บูเลนต์นั้นค่า $n = 1/3$ นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ จะต้องอยู่ภายใต้คุณสมบัติ T_f ซึ่งก็คืออุณหภูมิที่บาร์คาร์เลเยอร์เฉลี่ยนั่นเอง หาได้จากสมการดังนี้

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.32)$$

ค่า C เป็นค่าคงที่ การไหลแบบลามินาร์ $C = 0.59$ สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ $C = 0.1$

1) แผ่นเรียบแนวดิ่ง (Vertical plate)

จากสมการสหพันธ์ได้ถูกพัฒนาสำหรับแผ่นเรียบแนวดิ่ง และนำมาพล็อตในรูปที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ของ C และค่ากำลังสอง n จะขึ้นอยู่กับช่วงของค่า Ra สำหรับค่า $Ra \leq 10^4$ ค่าของ Nu สามารถหาได้โดยตรงจากรูปได้ทันที



รูปที่ 2-5 แสดงค่า Nu สำหรับการพาความร้อนอิสระจากแผ่นเรียบแนวดิ่ง

นอกจากนี้ Churchill และ Chu ได้แนะนำสมการซึ่งสามารถใช้ได้ตลอดช่วงทั้งหมดของ Ra_L ในรูป

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{สำหรับ } 10^{-1} < Ra_L < 10^{12} \quad (2.33)$$

สมการ(2.33) นี้ใช้ได้ทั้งลามินาร์และเทอร์บูเลนต์ ส่วนสมการที่ให้ความแม่นยำมากจะใช้เฉพาะในช่วงลามินาร์

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \right\} \quad \text{สำหรับค่า } 0 < Ra_L < 10^9 \quad (2.34)$$

สำหรับสมการทั้งสองสามารถใช้กับกรณีของแผ่นเรียบคงที่ ถ้าเงื่อนไขมีการเปลี่ยนเป็นฟลักซ์ของความร้อนคงที่แทนแล้ว สมการดังกล่าวก็ยังงสามารถใช้ได้และให้ความถูกต้องพอประมาณ

2) แผ่นเรียบในแนวนอน (Horizontal Plate)

ในกรณีนี้รูปแบบของสมการขึ้นอยู่กับว่าแผ่นเรียบเป็นแผ่นร้อนหรือแผ่นเย็น (ตามรูปที่ 2-6) เมื่อเทียบกับของไหลที่ล้อมรอบ และขึ้นอยู่กับว่าแผ่นเรียบหงายหน้าขึ้น หรือคว่ำหน้าลงสัมผัสกับของไหล โดยถือว่าแผ่นเรียบมีหน้าเดียว McAdams ได้แนะนำสหพันธ์เอมไพริคัลที่ใช้กันมาก โดยการปรับปรุงค่า L ใหม่ให้อยู่ในรูปความยาวเฉพาะ กำหนดเป็น

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (2.35)$$

โดยที่ A_s และ P เป็นพื้นที่ผิวและเส้นรอบรูปของแผ่นตามลำดับ สหพันธ์ที่ใช้คือ

ก. สำหรับแผ่นร้อนที่หงายขึ้น หรือแผ่นเย็นที่คว่ำลง (Upper surfaces of heated plate or lower surface of cool plate)

$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (2.36)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (2.37)$$

ข. แผ่นร้อนคว่ำหน้าลงหรือแผ่นเย็นหงายขึ้น (Lower surface of heated plate or upper surface of cool plate)

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (2.38)$$

สมการที่กล่าวมาไว้สำหรับกรณีของผิวคงที่ ส่วนกรณีฟลักซ์ของความร้อนคงที่ ต้องใช้สมการดังต่อไปนี้

ก. สำหรับแผ่นเรียบแนวนอนที่แผ่นร้อนหงายขึ้น

$$\overline{Nu}_L = 0.13 Ra_L^{1/3} \quad (Ra_L < 2 \times 10^8) \quad (2.39)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.16 Ra_L^{1/3} \quad (5 \times 10^8 \leq Ra_L < 10^{11}) \quad (2.40)$$

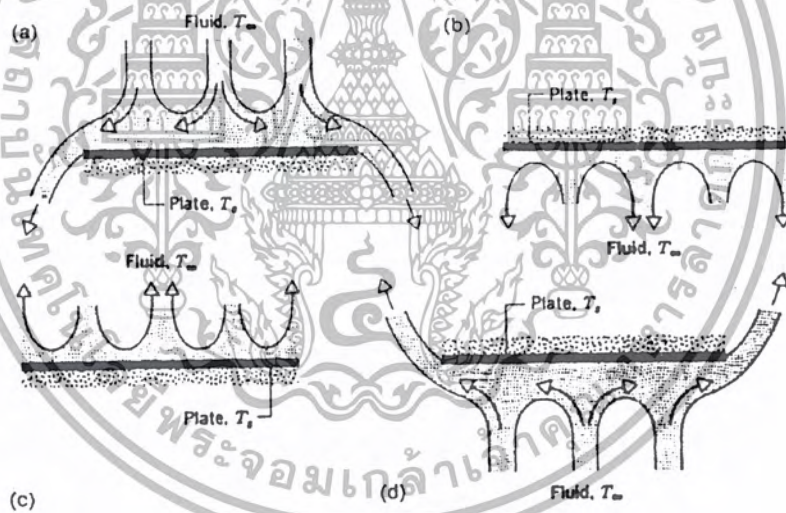
ข. สำหรับแผ่นร้อนคว่ำลง

$$\overline{Nu}_L = 0.58 Ra_L^{1/5} \quad (10^6 \leq Ra_L < 10^{11}) \quad (2.41)$$

สมการ (2.39) และ (2.40) ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้หาที่อุณหภูมิเฉลี่ยซึ่งกำหนดเป็น

$$T_f = T_s - 0.25(T_s - T_\infty) \quad (2.42)$$

โดยที่ β ยังคงหาค่าที่ $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ เหมือนเดิม



รูปที่ 2-6 แสดงการไหลเนื่องจากการลอยตัวบนแผ่นเรียบในแนวนอน

3) แผ่นเรียบวางอยู่ในแนวเอียง (Inclined Plate)

กรณีนี้ Churchill และ Chu แนะนำให้ใช้สมการ (2.33) และ (2.34) สำหรับพื้นผิวที่วางเอียงถึง $\theta = 60^\circ$ ($0 \leq \theta \leq 60^\circ$) จากแนวดิ่ง (ตามรูปที่ 2-7) สำหรับการไหลแบบลามินาร์สมการ (2.34) ใช้ได้โดยการแทนค่า g ด้วย $g \cos \theta$ ในการหาค่า Ra_L สมการเป็นดังนี้

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \right\} \quad 0 < Ra_L < 10^9 \quad (2.43)$$

ส่วนสมการ (2.33) ใช้สำหรับการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ได้เลย โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลง

จากที่กล่าวมาทั้งสามรูปแบบนั้นการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ สามารถหาได้จากการประมาณค่าอุณหภูมิ $T_f = (T_s - T_\infty)/2$



รูปที่ 2-7 แสดงการไหลเนื่องจากแรงลอยตัวบนแผ่นเอียง

2.3 ทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation Method)

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะถูกส่งออกโดยวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสมบูรณ์จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้ การแผ่รังสีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีการแผ่รังสีจากวัตถุใด ๆ ที่อุณหภูมิ T_s จะพิจารณาว่าการปล่อยออกทุกความยาวคลื่นจาก $\lambda = 0$ ถึง $\lambda = \infty$ ที่พบมากที่สุดทางวิศวกรรม พลังงานความร้อนที่ปล่อยออกจะอยู่ในช่วง $\lambda = 0.1$ ถึง $\lambda = 100 \mu m$ โดยที่แถบช่วงความยาวคลื่นสเปกตรัมระหว่าง $\lambda = 0.1$ ถึง $\lambda = 100 \mu m$ จึงถูกอ้างว่าเป็นช่วง “การแผ่รังสีความร้อน” โดยปกติดวงอาทิตย์จะส่งรังสีความร้อนที่อุณหภูมิพื้นผิวประมาณ 5800 K กลุ่มของพลังงานจะอยู่ในช่วงความยาวระหว่าง $\lambda = 0.1$ ถึง $\lambda = 0.3 \mu m$ โดยทั่วไป สเปกตรัมทั่วไปของ “การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์” จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง $\lambda = 0.4$ ถึง $\lambda = 0.7 \mu m$ ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและเรียกสเปกตรัมนี้ว่าเป็น “การแผ่รังสีที่มองเห็นได้”

2.3.1 กำลังในการปล่อยรังสีออก (Emissive Power)

กำลังในการปล่อยออก (E) หมายถึงปริมาณการแผ่รังสีที่มีการปล่อยออกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

2.3.1.1 กำลังปล่อยออกที่ความยาวคลื่นหนึ่ง (Spectral, Hemispherical Emissive Power) ใช้สัญลักษณ์ E_λ นิยามเป็นอัตราการแผ่รังสีของความยาวคลื่น λ ที่ปล่อยออกในทุกทิศทางจากพื้นผิวดต่อหนึ่งหน่วยความยาวคลื่น $d\lambda$ รอบ λ และต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว ดังนั้นจะสามารถหาค่า E ได้ดังนี้

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (W/m^2 \cdot \mu m) \quad (2.44)$$

2.3.1.2 กำลังปล่อยออกทั้งหมด (Total, Hemispherical Emissive Power) ใช้สัญลักษณ์ E คืออัตราการแผ่รังสีทั้งหมดที่ปล่อยออกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ซึ่งก็คือเป็นการรวมกันของ E_λ ทุกความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (W/m^2) \quad (2.45)$$

หรือ

$$E = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi d\lambda \quad (2.46)$$

2.3.2 เรดิโอซิตี (Radiosity)

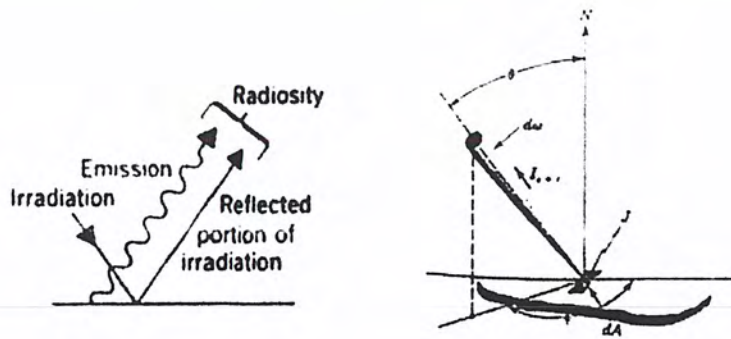
หลักการแผ่รังสีตัวนี้เรียกว่าเรดิโอซิตี (Radiosity, J) คือรังสีทั้งหมดที่ออกไปจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว เนื่องจากการแผ่รังสีจะรวมรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวนั้นและรังสีที่มาจากที่อื่นซึ่งตกกระทบบนพื้นผิวนั้นแล้วสะท้อนออกจากผิว ตามรูปที่ 2-8 โดยทั่วไปแล้วค่าเรดิโอซิตีแตกต่างจากกำลังส่งออก แบ่งเป็น 2 แบบเช่นเดียวกันคือ

2.3.2.1 Spectral Radiosity (J_λ) คืออัตรารังสีที่ความยาวคลื่น λ ออกจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวต่อช่วงความยาวคลื่นหนึ่งหน่วย $d\lambda$ รอบ λ เนื่องจากเป็นรังสีที่ออกไปทุกทิศทางจึงเกี่ยวข้องกับความเข้มของรังสีที่ปล่อยออกรวมกับที่สะท้อนออกจากพื้นผิว $I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi)$ แสดงได้ในรูป

$$J_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (W/m^2 \cdot \mu m) \quad (2.47)$$

2.3.2.2 Total Radiosity เรียกสั้น ๆ ว่า Radiosity (J) คืออัตราการแผ่รังสีทั้งหมดที่ทุกความยาวคลื่นออกจากหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิว

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (W/m^2) \quad (2.48)$$



รูปที่ 2-8 แสดงเรดิโอซิตีของผิว

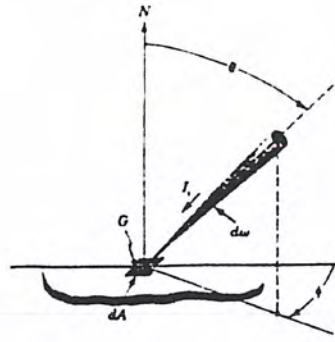
2.3.3 เออริเรชัน (Irradiation)

รังสีที่มากกระทบนั้นอาจเกิดการปล่อยออกและการสะท้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวอื่น และรังสีนี้มี Spectral และ Direction distributions ซึ่งหาได้โดย Spectral intensity, $I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)$ ปริมาณนี้นิยามเป็นพลังงานจากการแผ่รังสีของความยาวคลื่นที่ตกลงมากระทบจากทิศทาง (θ, ϕ) ต่อหน่วยพื้นที่ของผิวน้ำตตั้งฉากกับทิศทางนี้ต่อหน่วยมุมรอบรับรูปกรวยรอบทิศทางนี้และต่อช่วงหนึ่งหน่วยความยาวคลื่น $d\lambda$ รอบ λ โดยความเข้มของรังสีที่ตกลงมากระทบเกี่ยวข้องกับเทอมของฟลักซ์รังสี เรียกว่าเออริเรชัน (Irradiation) โดยค่าเออริเรชันของความยาวคลื่นหนึ่งหรือ Spectral irradiation, G_λ กำหนดเป็นอัตราของรังสีที่ความยาวคลื่น λ ตกกระทบบนผิวน้ำตหนึ่งคือหนึ่งหน่วยของพื้นที่ผิวและต่อช่วงความยาวคลื่นหนึ่งหน่วย $d\lambda$ รอบ λ ดังนั้น

$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (W/m^2 \cdot \mu m) \quad (2.49)$$

ค่าเออริเรชันรวม (Total irradiation) G คือ อัตราที่รังสีตกกระทบบนหนึ่งหน่วยพื้นที่จากทุกทิศทางและทุกความยาวคลื่น ซึ่งก็คือการรวม G_λ ทุกความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (W/m^2) \quad (2.50)$$



รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะของรังสีที่ตกกระทบ

2.3.4 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Radiation)

วัตถุดำคือตัวดูดรังสีความร้อนที่สมบูรณ์โดยไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นหรือทิศทางที่รังสีตกลงบนวัตถุดำ รังสีที่ตกกระทบทั้งหมดจะถูกดูดไว้ วัตถุดำเป็นเพียงวัตถุที่สมมุติขึ้นมาเนื่องจากวัตถุที่แท้จริงทั้งหลายจะสะท้อนรังสีบางส่วนและยอมให้รังสีบางส่วนผ่านทะลุได้

โดยธรรมชาติถึงแม้ว่าจะไม่มีวัตถุดำที่แท้จริงเกิดขึ้นก็ตาม วัตถุนางชนิดก็มีสมบัติใกล้เคียงกับวัตถุดำ เช่น แผ่นคาร์บอนกำหนดค่ารังสีความร้อนที่ตกกระทบทั้งหมดได้ประมาณ 99% อาจถือเป็นวัตถุดำได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัตถุดำมีคุณสมบัติดังนี้

1. วัตถุดำจะดูดกลืนรังสีที่ตกกระทบทั้งหมดไว้ ไม่มีการสะท้อนกลับ โดยจะไม่คำนึงถึงความยาวคลื่นและทิศทาง
 2. วัตถุดำจะแผ่รังสีได้มากกว่าวัตถุอื่น ๆ ทุกชนิดที่อุณหภูมิและความยาวคลื่นเดียวกัน
 3. วัตถุดำจะแผ่รังสีออกโดยไม่ขึ้นกับทิศทาง นั่นคือวัตถุดำเป็น Diffuse emitter
- โดยทั่วไปจึงใช้วัตถุดำเป็นมาตรฐานในการเปรียบเทียบคุณสมบัติการแผ่รังสีของผิวจริงต่างๆ

2.3.4.1 การกระจายของเพลงค์ (Planck Distribution)

การแผ่รังสีของวัตถุดำนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น (Spectral distribution) ซึ่งความเข้มของรังสีที่ความยาวคลื่นใด เป็นดังนี้

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda k_B T)]} \quad (2.51)$$

- โดยที่ h คือ ค่าคงที่สากลของ Planck = 6.6256×10^{-34} J · s
 k_B คือ ค่าคงที่สากลของ Boltzmann = 1.3805×10^{-23} J / K
 c_0 คือ ค่าความเร็วของแสงในสุญญากาศ = 2.998×10^8 m / s
 T คือ ค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ของวัตถุดำ K

เนื่องมาจากวัตถุค้ำเป็น Diffuse emitter ดังนั้น Spectral emissive power อยู่ในรูป

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2.52)$$

โดยที่ $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.7413 \times 10^8 \quad W \cdot \mu m^4 / m^2$
 $C_2 = (hc_0/k) = 1.4388 \times 10^4 \quad \mu m \cdot K$

สมการ (2.52) นี้เรียกว่า Planck distribution

2.3.4.2 กฎของ Stefan-Boltzmann

โดยการแทนค่า Planck distribution สมการ (2.52) ลงในสมการ (2.45) ค่า Total emissive power ของวัตถุค้ำ E_b เขียนได้ในรูป

$$E_b = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (2.53)$$

ตัวแปรของการอินทิเกรตเปลี่ยนจาก λ เป็น λT ผลลัพธ์จะได้เป็น

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.54)$$

โดยที่ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า C_1 และ C_2 มีค่าเป็น

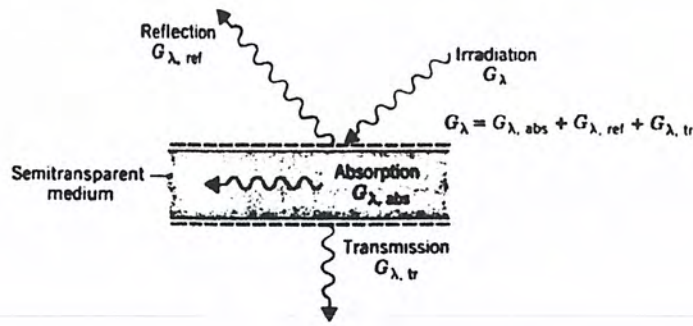
$$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \quad W/m^2 \cdot K^4$$

สำหรับวัตถุค้ำ ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุค้ำหาได้จาก

$$I_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (2.55)$$

2.3.5 การดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุของผิว (Surface Absorption, Reflection And Transmission)

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณากระบวนการอันเป็นผลมาจากการตกกระทบของรังสีโดยตัวกลางที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สำหรับค่าเอเรคเอนซ์ของคลื่นหนึ่ง (G_λ) เมื่อตกกระทบลงบนตัวกลางแต่ละส่วนของรังสีนี้จะสะท้อน ถูกดูดกลืน และผ่านทะลุตัวกลาง



รูปที่ 2-10 แสดงกระบวนการดูดกลืน การสะท้อน และการผ่านทะลุของตัวกลางโปร่งแสง

ซึ่งในแต่ละกระบวนการจะได้อธิบายถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับวัสดุและการตกแต่งผิว อุณหภูมิผิวและความยาวคลื่น และทิศทางของรังสีที่ตกมากระทบ

2.3.5.1 ค่าการดูดกลืนของผิว (Absorptivity)

เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการดูดความร้อนไว้ และยังแสดงลักษณะที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (Directional) และการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น (Spectral) ค่า Spectral directional absorptivity นิยามว่าเป็นเศษส่วนของความเข้มที่ความยาวคลื่นหนึ่งที่ตกกระทบผิว ($I_{\lambda, i}$) ในทิศทาง (θ, ϕ) ซึ่งดูดกลืนโดยผิว ดังนั้น

$$\alpha_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, i, \text{abs}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.56)$$

สำหรับการคำนวณในทางวิศวกรรม คุณสมบัติของผิวจะแทนด้วยค่าเฉลี่ยของทิศทาง เพราะฉะนั้นเรานิยาม Spectral, hemispherical absorptivity $\alpha_\lambda(\lambda)$ เป็น

$$\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda, \text{abs}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (2.57)$$

ส่วน Total, hemispherical absorptivity, α (หรือ Total absorptivity) แทนการรวมค่าเฉลี่ยทั่วทั้งทุกทิศทาง และทุกความยาวคลื่น โดยได้กำหนดเป็นเศษส่วนของ Total irradiation ที่ดูดกลืนโดยผิว

$$\alpha \equiv \frac{G_{\text{abs}}}{G} \quad (2.58)$$

หรือ

$$\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} \quad (2.59)$$

เนื่องจาก α ขึ้นอยู่กับการกระจายคลื่นของเอเรดิชันและค่านี้ขณะที่พื้นผิวได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ จะแตกต่างจากค่าที่ผิวนี้ได้รับจากรังสีคลื่นยาวซึ่งเกิดจากแหล่งอุณหภูมิต่ำ เพราะว่าการกระจายคลื่นของรังสีของดวงอาทิตย์แทบจะเป็นสัดส่วนกับค่าที่ได้จากการปล่อยออกของวัตถุดำที่ 5800 K จากสมการ (2.59) ซึ่งแทน α_s เนื่องจากแสงอาทิตย์ ประมาณว่า

$$\alpha_s \approx \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda}{\int_0^\infty E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda} \quad (2.60)$$

2.3.5.2 ค่าการสะท้อนของผิว (Reflectivity)

Reflectivity (ρ) เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของพื้นผิวในการสะท้อนรังสีที่ตกมากระทบ หาได้จากเศษส่วนของรังสีที่ตกกระทบที่สะท้อนโดยพื้นผิว อย่างไรก็ตามนิยามเฉพาะนี้ให้รูปแบบที่แตกต่างกัน เนื่องจากคุณสมบัตินี้เป็น Bidirectional ตามธรรมชาติ นั่นคือ ขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีตกกระทบและขณะเดียวกันก็ขึ้นอยู่กับทิศทางของรังสีที่สะท้อนซึ่งอาจสะท้อนเป็นแบบกระจาย (Diffuse) หรือเป็นแบบลำรังสีเหมือนก่อนการตกกระทบ (Specular) ตามลักษณะการสะท้อนของรังสี การสะท้อนแบบ Diffuse เกิดขึ้นเมื่อความเข้มของรังสีที่สะท้อนไม่ขึ้นอยู่กับมุมสะท้อนและไม่คำนึงถึงทิศทางของรังสีที่ตกกระทบ ในทางกลับกันถ้าการสะท้อนทั้งหมดอยู่ในทิศทางที่ซึ่งมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบแล้วเรียกว่าการสะท้อนแบบ Specular ตามปกติแล้วไม่มีพื้นผิวใดให้การสะท้อนเป็นแบบ Diffuse หรือ Specular สมบูรณ์แบบ ส่วนมากเป็นการประมาณ

ค่า Specular, directional reflectivity, $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi)$ ของผิว กำหนดเป็นเศษส่วนของความเข้มของรังสีตกกระทบที่คลื่นหนึ่งในทิศทาง (θ, ϕ) ซึ่งถูกสะท้อนโดยผิว ดังนั้น

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.61)$$

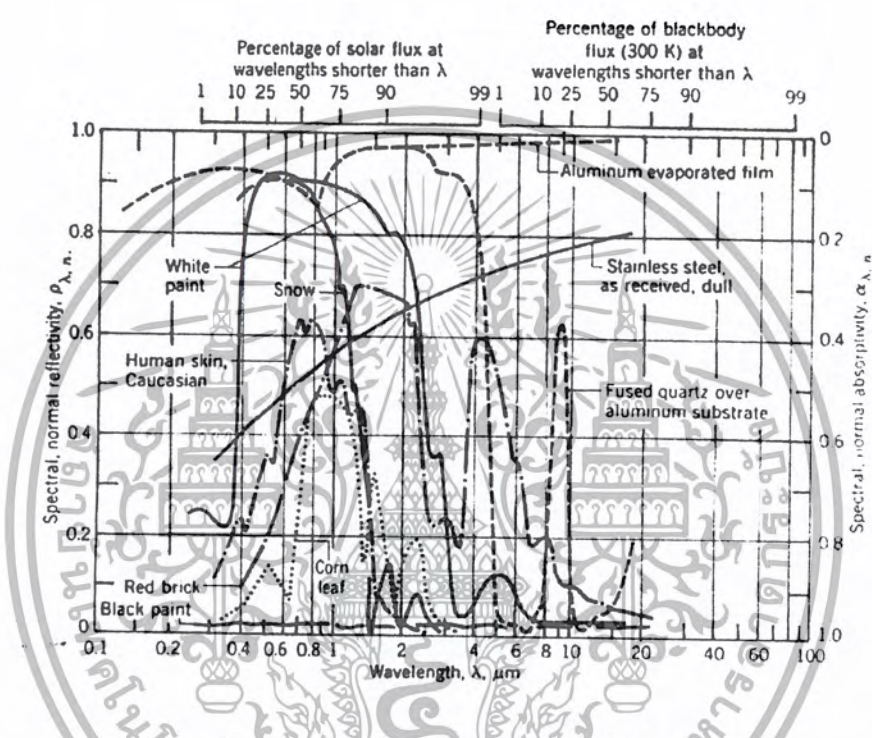
เมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยทั่วทั้งครึ่งทรงกลม นั่นคือจะไม่ขึ้นกับทิศทางเพราะฉะนั้นค่า Specular, hemispherical reflectivity, $\rho_\lambda(\lambda)$ นิยามว่าเป็นเศษส่วนของเอริเอชันของคลื่นหนึ่งที่สะท้อนโดยพื้นผิว

$$\rho_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (2.62)$$

ส่วนค่า Total reflectivity, ρ (ชื่อเต็ม Total, hemispherical reflectivity) กำหนดเป็น

$$\rho \equiv \frac{G_{ref}}{G} \tag{2.63}$$

หรือ
$$\rho = \frac{\int_0^\infty \rho_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} \tag{2.64}$$



รูปที่ 2-11 แสดงค่าการสะท้อนรังสีตั้งฉากและการดูดกลืนรังสีตั้งฉากของผิวเลือก

2.3.5.3 ค่าการผ่านทะลุของผิว (Transmissivity)

เป็นคุณสมบัติของพื้นผิวที่เกิดขึ้นในเฉพาะตัวกลางโปร่งแสง(Semitransparent) เท่านั้น หมายถึงคุณลักษณะอย่างหนึ่งของผิวที่ยอมให้รังสีผ่านทะลุ เรียกว่า Transmissivity (τ) โดยใช้ Hemispherical transmissivity จะได้ค่า Spectral transmissivity ว่าเป็นส่วนหนึ่งของเอเริเอชัน (G) ที่ผ่านทะลุพื้นผิวดังนั้น

$$\tau_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \tag{2.65}$$

ค่าการกระจายตามคลื่นของค่าการสะท้อนตั้งฉากและค่าการดูดกลืนตั้งฉาก ($\rho_{\lambda,n}$ และ $\alpha_{\lambda,n}$) ได้แสดงในรูปที่ 2-11 สำหรับผิวที่เลือก วัตถุเช่นแก้วหรือน้ำที่โปร่งแสงที่ความยาวคลื่นสั้นๆ จะกลายเป็นวัตถุผิวที่ความยาวคลื่นยาวๆ หมายความว่ายอมให้รังสีผ่านทะลุได้เมื่อความยาวคลื่นของรังสีนั้นสั้น และไม่ยอมให้รังสีผ่านทะลุผิวถ้าความยาวคลื่นของรังสีนั้นยาวหรือมีค่าสูง พฤติกรรมนี้ได้แสดงในรูปที่ 2-12 ซึ่งแสดงค่า τ_{λ} ของวัตถุโปร่งแสงทั่วไปหลายๆ อย่าง สังเกตว่าค่า τ ของแก้วจะขึ้นอยู่กับปริมาณเหล็กที่ผสมอยู่กับแก้ว ส่วนค่า τ ของพลาสติก เช่น พวктеดลาร์ (Tedlar) จะมีค่ามากกว่าค่า τ ของแก้วในช่วงอินฟราเรด ซึ่งแฟคเตอร์เหล่านี้มีความสำคัญต่อการเลือกวัสดุที่เป็นฝาปิดแผงรับแสงอาทิตย์

2.4 ทฤษฎีการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

ในที่นี้จะกล่าวถึงพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งส่วนที่รับได้นอกบรรยากาศของโลกและส่วนที่เหลือภายหลังผ่านชั้นบรรยากาศของโลกลงสู่พื้นโลก นอกจากจะแปรผันตามเวลาแล้วปริมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ยังแปรผันตามสถานที่อีกด้วย

2.4.1 ดวงอาทิตย์ (Sun)

ดวงอาทิตย์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.39×10^6 กิโลเมตร หนัก 2.2×10^{27} ตัน ดวงอาทิตย์หมุนรอบตัวเองด้วยอัตรา 1 รอบต่อ 28 วัน พลังงานที่ดวงอาทิตย์แผ่รังสีออกมาได้จากการเปลี่ยนมวลของดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงาน กล่าวคือแก๊สไฮโดรเจนในดวงอาทิตย์ 4 อะตอมรวมกันเป็นแก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุล แต่โดยที่แก๊สฮีเลียม 1 โมเลกุลมีมวลน้อยกว่าไฮโดรเจนจำนวน 4 อะตอม มวลส่วนหนึ่งจะหายไป มวลส่วนนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงาน

2.4.2 ค่าคงที่สุริยะ (Solar Constant)

โลกและดวงอาทิตย์มีความสัมพันธ์กัน โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของโลกและดวงอาทิตย์เท่ากับ 1.495×10^{11} เมตร ดวงอาทิตย์จะมีการแผ่รังสีความร้อนผ่านชั้นบรรยากาศและผ่านมายังโลก ซึ่งจะพิจารณาในรูปค่าคงที่ของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar constant, G_{sc}) เป็นค่าของพลังงานของดวงอาทิตย์ต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยที่การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะเป็นการแผ่รังสีที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับพื้นผิว การประมาณค่าคงที่ของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ทำโดยการวัดค่าที่จากพื้นดินซึ่งการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะแผ่รังสีผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งบางส่วนอาจจะมีการดูดซับและมีการสะท้อนกลับจากชั้นบรรยากาศ Johnson [1954] ทำการวัดค่า Solar constant ได้เท่ากับ 1395 W/m^2 ต่อมา Thekackara และ Drummond [1971] ได้มีการสร้างและพัฒนาเครื่องมือเพื่อทำการศึกษาค่าของ Solar constant จากการทดลองของทั้งสอง ค่า Solar constant เท่ากับ 1353 W/m^2 ค่าดังกล่าวได้รับการยอมรับจากองค์การ NASA [1971] และ American Society for Testing Material [ASTM]

2.4.3 ตัวกลางกันแสงอาทิตย์ที่ชั้นบรรยากาศ

บรรยากาศของโลกประกอบด้วยแก๊สหลายชนิดเช่น O_2, N_2 , ไอน้ำและฝุ่นละออง เป็นตัวกลางกันแสงอาทิตย์ทำให้พลังงานที่ได้รับบนพื้น โลกน้อยกว่าที่ได้รับนอกชั้นบรรยากาศซึ่งพลังงานที่หายไปก็เนื่องมาจากแสงอาทิตย์บางส่วนมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อผ่านชั้นบรรยากาศและแสงอาทิตย์บางส่วนจะถูกดูดเอาไว้โดยแก๊สในบรรยากาศ

แสงอาทิตย์จะผ่านบรรยากาศมากขึ้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการยอมให้แสงผ่านของแก๊สแต่ละชนิดที่ประกอบเป็นบรรยากาศ ซึ่งแก๊สที่ประกอบเป็นบรรยากาศจะยอมให้แสงบางส่วนผ่านและยอมให้แสงผ่านหลังจากที่แก๊สในบรรยากาศดูดพลังงานบางส่วนเอาไว้ ค่าการยอมให้แสงผ่านบางตัวสามารถหาได้จากสมการ

$$\tau_\lambda(s) = [(\tau_{a\lambda})^{p/760} (\tau_{d\lambda})^{d/800} (\tau_{w\lambda})^{w/20}]^m \quad (2.70)$$

เมื่อ $\tau_\lambda(s)$ คือคุณสมบัติของการยอมให้แสงอาทิตย์ความยาวคลื่น λ ผ่านหลังจากแสงบางส่วนเปลี่ยนทิศทางแล้ว, $\tau_{a\lambda}$, $\tau_{d\lambda}$ และ $\tau_{w\lambda}$ คือคุณสมบัติการยอมให้แสงอาทิตย์ความยาวคลื่น λ ผ่านแก๊สในบรรยากาศ (Atmosphere) ผ่านฝุ่นละออง (Dust) และผ่านไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (Water vapor) ตามลำดับ ส่วน P ความดันบรรยากาศ (มิลลิเมตรปรอท), d คือจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองในบรรยากาศต่อลูกบาศก์เซนติเมตร, w คือความสูงของน้ำเป็นมิลลิเมตรที่ได้จากไอน้ำในบรรยากาศเหนือผู้สังเกตการณ์ในแนวตั้งที่กลั่นตัวเป็นน้ำ และ m คือ แอร์มีต (Mist)

คุณสมบัติของการยอมให้ผ่าน $\tau_{a\lambda}$, $\tau_{d\lambda}$ และ $\tau_{w\lambda}$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\tau_{a\lambda} = 10^{-0.00389 \lambda^{-1.4}} \quad (2.71a)$$

$$\tau_{d\lambda} = 10^{-0.0353 \lambda^{-0.78}} \quad (2.71b)$$

$$\tau_{w\lambda} = 10^{-0.0075 \lambda^{-2}} \quad (2.71c)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นเป็นไมโครเมตร (μm), ความดันบรรยากาศเท่ากับ 760 มิลลิเมตรปรอท, ปริมาณของอนุภาคฝุ่นในอากาศเท่ากับ 800 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ m เท่ากับ 1

2.4.4 ทิศทางของแสงอาทิตย์แบบตรง (Direction Of Beam Radiation)

ทิศทางของแสงอาทิตย์ซึ่งจะแปรเปลี่ยนตามเวลาและสถานที่เป็นสิ่งสำคัญ เช่น ตำแหน่งและวงโคจรของดวงอาทิตย์ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2-13 ซึ่งวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เกือบจะเป็นวงกลมจากความสัมพัทธ์ระหว่างระยะนาบที่วางอยู่ที่โลกและได้รับลำแสงการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยตำแหน่ง

ของดวงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กับระนาบ Benford และ Bock [1939] ได้ทำการอธิบายในรูปของมุมต่างๆ โดยมุมและความสัมพันธ์ระหว่างเทอมต่างๆ จะได้อธิบายดังนี้

ϕ ละติจูด (Latitude) เป็นมุมที่อยู่บริเวณด้านเหนือหรือด้านใต้ ของเส้นศูนย์สูตรที่บริเวณด้านเหนือมีค่าเป็นบวก $-90 \leq \phi \leq 90$

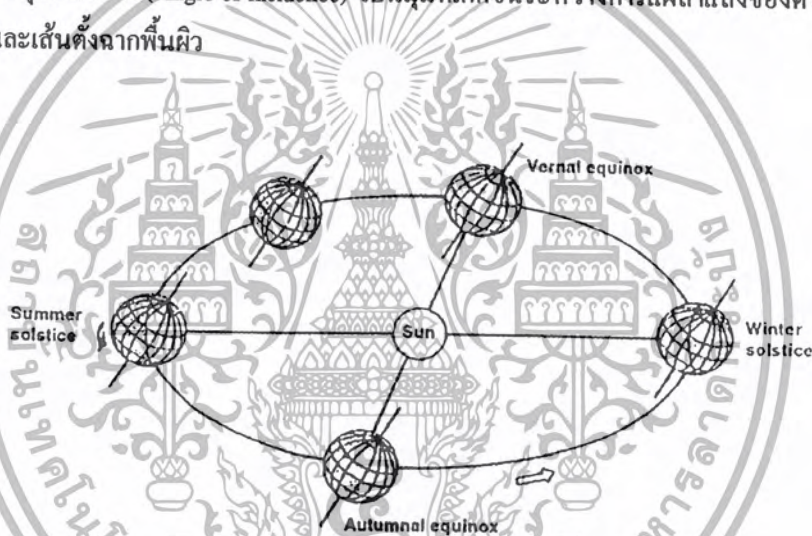
δ มุมลาดเอียง (Declination) เป็นค่าของมุมที่แสดงถึงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงวัน เทียบกับระนาบกับเส้นของเส้นศูนย์สูตร บริเวณทางเหนือมีค่าเป็นบวก $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$

β มุมชัน (Slope) เป็นค่ามุมระหว่างระนาบผิวกับระนาบแนวนอน $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta \leq 90$ หมายความว่าระนาบกับผิวมีการคว่ำหน้าลง)

γ มุมอะซิมูทของผิว (Surface azimuth angle) แสดงถึงค่าเบี่ยงเบนของการตกกระทบบนระนาบแนวนอน ค่าในทางทิศตะวันออกเป็นลบและทางทิศตะวันตกเป็นบวก $-180 \leq \gamma \leq 180^\circ$

ω (Hour angle) แสดงถึงการเคลื่อนที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับแกนหมุนของโลกมีค่าเท่ากับ 15 องศาต่อชั่วโมง สำหรับในตอนเช้าจะมีค่าเป็นลบและในตอนบ่ายมีค่าเป็นบวก

θ มุมอินชเดน (Angle of incidence) เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างการแผ่ลำแสงของดวงอาทิตย์ลงบนพื้นผิวและเส้นตั้งฉากพื้นผิว



รูปที่ 2-13 แสดงการหมุนของโลกรอบดวงอาทิตย์ [Threlkeld 1970]

มุมเซนนิท (Zenith angle, θ_z), มุมชันและมุมอะซิมูทที่ผิวแสดงตามรูปที่ 2-14 สำหรับค่ามุมลาดเอียง δ สามารถหาได้จากสมการของ Cooper [1969]

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.72)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนวันของปีนั้นๆ ; n สามารถหาค่าได้จากตารางที่ 2.1

จากสมการดังต่อไปนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ของมุมระหว่างการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิว θ

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ &\quad + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \tag{2.73}$$



รูปที่ 2-14 แสดงมุมที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ตกกระทบบนพื้นผิว

Solar azimuth angle เป็นมุมที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ตกกระทบบนแนวนอนในทางทิศใต้และแสดงในรูปที่ 2-14 จะเห็นว่ามุมที่เกิดขึ้นที่ด้านข้างได้กำหนดไว้ $(90 - \theta_z)$ สำหรับแผ่นรับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ถูกยึดอยู่กับที่มุมชั้นที่วาดไปทางทิศใต้หรือทิศเหนือ มุมของอะซิมุทที่เกิดขึ้นก็จะมีมุมตั้งแต่ 0° ไปถึง 180° และสำหรับผิวในแนวตั้ง $\beta = 90^\circ$ จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \cos \theta &= -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega \\ &\quad + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \tag{2.74}$$

สำหรับผิวในแนวระดับ $\beta = 0^\circ$ และมีมุมอินชเดนจะเป็นมุมเซนนิทของดวงอาทิตย์ θ_z ดังนั้นจัดสมการใหม่ได้ดังนี้

$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi$ (2.75)

จากสมการ (2.73) ความชันสำหรับ Sunset hour angle, ω , เมื่อ $\theta_z = 90^\circ$

$$\cos \omega_s = - \frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta}$$

$$\cos \omega_s = - \tan \phi \tan \delta$$
 (2.76)

โดยที่จำนวนชั่วโมงของการส่องแสงในแต่ละวันสามารถแสดงดังสมการ

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(\tan \phi \tan \delta)$$
 (2.77)

ตารางที่ 2-1 แสดงจำนวนวันในแต่ละเดือนของปีนั้น Kleim [1976]

Month	n for Ith	For the Average Day of the month		
	Day of Month	Date	N, Day of Year	δ , Declination
January	I	17	17	-20.9
February	31+I	16	47	-13.0
March	59+I	16	75	+2.4
April	90+I	15	105	9.4
May	120+I	15	135	18.8
June	150+I	11	162	23.1
July	181+I	17	198	21.2
August	212+I	16	228	13.5
September	243+I	15	258	2.2
October	273+I	15	288	-9.6
November	304+I	14	318	-18.9
December	334+I	10	334	-23.0

2.4.5 พลังงานแสงอาทิตย์นอกบรรยากาศบนระนาบระดับ

การคำนวณค่าการแผ่รังสีจะเป็นการคำนวณทางทฤษฎีที่สามารถเป็นไปได้ โดยการคำนวณจะคิดว่าไม่มีชั้นของบรรยากาศเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่บริเวณด้านนอกของชั้นบรรยากาศบนระนาบแนวนอนสามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (2.78)$$

เมื่อ G_{sc} คือ ค่า Solar constant 1353 W/m^2

n คือ จำนวนวันของปี

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (2.79)$$

ค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในแต่ละวันบนผิวระนาบแนวนอน H_0 สามารถคำนวณได้โดยการอินทิเกรตสมการ(2.79) ในช่วงเวลาการตกของดวงอาทิตย์ (Sunset) และการขึ้นของดวงอาทิตย์ (Sunrise) H_0 มีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตร

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right] \times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.80)$$

เมื่อ ω_s เป็น Sunset hour angle มีหน่วยเป็นองศาของมุม สิ่งที่น่าสนใจอีกเป็นการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมง I_0 บนระนาบแนวนอนหาได้โดยการอินทิเกรตสมการ(2.79) อินทิเกรตในช่วง Hour angle ω_1 และ ω_2 เมื่อค่าของ ω_2 มีค่าใหญ่มาก ซึ่งจัดสมการได้ดังนี้

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right] \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2.81)$$

2.4.6 การวัดค่าและการประเมินค่าพลังงานแสงอาทิตย์

จากอัตราหรือปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่รับได้นอกชั้นบรรยากาศของโลกต่อหน่วยพื้นที่และเวลา (Extraterrestrial) G_0 คงที่ ส่วนที่รับได้บนพื้นโลกขึ้นกับการยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านบนโลก ณ บริเวณนั้น (Atmospheric transmittance) τ ดังนั้นโดยการคูณ G_0 ด้วยค่าการยอมให้แสงอาทิตย์ผ่านอากาศ ณ บริเวณนั้น τ ซึ่งก็จะทำให้ทราบอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ที่รับได้บนพื้นโลก วิธีการคำนวณอัตราพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีดังกล่าวไม่ได้รับความนิยม เพราะค่าตัวแปรที่ใช้ในการประกอบการคำนวณค่าการยอมให้แสงอาทิตย์ผ่าน เช่น ปริมาณไอน้ำในอากาศและฝุ่นละอองจะผันแปรอยู่ตลอดเวลา ทำให้ยากต่อการประเมินค่าที่ถูกต้องของ τ อย่างยิ่ง

วิธีหาค่าอัตราพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นโลกที่นิยมใช้มี 3 วิธี วิธีแรกโดยการใช้เครื่องมือวัดอัตราพลังงานแสงอาทิตย์โดยตรง วิธีนี้เป็นวิธีตรงที่ให้ค่าที่ดีที่สุด แต่เสียค่าใช้จ่ายสูงเนื่องมาจากเครื่องมือมีราคาแพง ต้องใช้เวลาในการเก็บข้อมูล การวัดและการบันทึกข้อมูลอาจทำเป็นรายวันหรือรายชั่วโมง วิธีที่สองใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ประเมินอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ของสถานที่ที่ต้องการจากอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งวัดและบันทึกของสถานที่ใกล้เคียงที่มีการวัดอัตราพลังงานแสงอาทิตย์อยู่แล้ว เช่น ถ้าต้องการทราบอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งไม่มีสถานีวัดพลังงานแสงอาทิตย์แต่มีที่กรุงเทพฯ ซึ่งเป็นสถานที่ใกล้เคียงมีสถานีวัดอยู่ก็สามารถคำนวณหาได้ ดังนั้นก็จะทราบอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ได้เช่นเดียวกัน วิธีที่สามทำได้โดยการคำนวณจากสมการ ที่ใช้ประกอบค่าตัวแปรและค่าคงที่ สำหรับการเลือกค่าคงที่ก็ต้องเลือกให้เหมาะสมกับกับสถานที่นั้น ๆ ซึ่งอัตราพลังงานแสงอาทิตย์ก็สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกัน

การวัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่รับ (Total or Global solar radiation) แบ่งออกเป็นสองชนิดตามความยาวคลื่นของรังสี ชนิดแรกพลังงานที่ส่งมาตามความยาวคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 3 ไมโครเมตร หรือพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดตรง (Beam solar radiation) พลังงานชนิดนี้ได้จากการแผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์และบริเวณรอบดวงอาทิตย์ ทิศทางของการสะท้อนหรือการหักเหเมื่อกระทบหรือผ่านตัวกลางใด ๆ อาจคำนวณได้ค่อนข้างแน่นอน โดยใช้สมการ ชนิดที่สองพลังงานชนิดรังสีกระจาย (Diffuse solar radiation) พลังงานชนิดนี้ไม่ได้แผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ แต่มาจากแหล่งอื่นที่รับพลังงาน โดยตรงจากดวงอาทิตย์และส่งถ่ายทอดต่ออีกที เช่นกลุ่มเมฆในท้องฟ้าซึ่งจะรับพลังงานจากดวงอาทิตย์แล้วทำให้ตัวมันเองอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิโดยรอบ ความยาวคลื่นของพลังงานแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีความยาวคลื่นมากกว่า 3 ไมโครเมตร วันที่แจ่มใสพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนมากจะเป็นแบบรังสีตรงและวันที่มีปริมาณเมฆมากพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วยชนิดรังสีกระจายมากกว่าชนิดรังสีตรงและวันที่มีเมฆมากจนมองไม่เห็นดวงอาทิตย์ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับจะมีแค่ชนิดรังสีกระจายเท่านั้น

ดังนั้นการออกแบบและการติดตั้งแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) จำเป็นต้องเลือกมุมเอียงของแผงรับให้เหมาะสมกับตำแหน่งที่แผงรับตั้งอยู่และตรงกับงานที่จะนำไปใช้ เช่น ถ้าต้องการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้เพื่อให้ความร้อน ดังนั้นแผงรับแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งเพื่อให้พลังงานสำหรับการทำความร้อนจะต้องเอียง 10 ถึง 20 องศา เพื่อต้องการเลือกมุมเอียงให้ได้ค่าปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดในช่วงที่มีอากาศร้อน เช่น สำหรับกรุงเทพฯ ช่วงที่มีอากาศร้อนสุดจะอยู่ในช่วงเดือนมีนาคมถึงมิถุนายน

2.4.7 การประมาณค่าการแผ่รังสีในวันท้องฟ้าแจ่มใส (Estimation of Clear Sky Radiation)

ผลจากการกระทบจากการสะท้อนกลับและการดูดซับผ่านชั้นบรรยากาศในขณะที่มีการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่เวลาหนึ่งหรือมีการเปลี่ยนแปลงมวลของอากาศจะถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ในวันท้องฟ้าแจ่มใสและในการคำนวณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์รายวันและรายชั่วโมงภายใต้พื้นผิวแนวระนาบก็จะพิจารณาเป็นลักษณะค่าคงที่เช่นกัน

Hottel [1976] ได้แสดงทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประมาณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านเข้ามาชั้นบรรยากาศ โดยมีการแยกสภาวะภูมิอากาศออกเป็น 4 สภาวะภูมิอากาศ ดังนั้นรังสีของดวงอาทิตย์ที่มีการแผ่รังสีผ่านเข้ามาชั้นบรรยากาศ τ_b สามารถแสดงค่าได้ดังสมการ

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{-k/\cos \theta_z} \tag{2.82}$$

a_0^* , a_1^* และ k^* เป็นค่าคงที่ของสภาวะอากาศมาตรฐานและค่า a_0 , a_1 และ k เป็นค่าสภาวะอากาศต่างๆ และ A เป็นระยะทางของผู้สังเกตมีหน่วยเป็นกิโลเมตร

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \tag{2.83}$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \tag{2.84}$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \tag{2.85}$$

ตารางที่ 2-2 แสดงค่าตัวประกอบของสภาวะอากาศต่าง ๆ Hottel [1976]

Climate Type	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Mid-Latitude Summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic Summer	0.99	0.99	1.01
Mid-Latitude Winter	1.03	1.01	1.00

จากค่าตัวประกอบต่าง ๆ จากตารางนำมาประยุกต์ใช้กับค่า a_0^* , a_1^* และ k^* ซึ่งค่าต่าง ๆ นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามสภาวะอากาศต่างๆ โดยที่ค่าตัวประกอบสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r_0 = a_0 / a_0^* \tag{2.86}$$

$$r_1 = a_1 / a_1^* \tag{2.87}$$

$$r_k = k / k^* \tag{2.88}$$

สำหรับการคำนวณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสสามารถหาได้จากสมการ

$$G_b = G_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (2.89)$$

การคำนวณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส โดยการพิจารณาเป็นช่วงเวลา, ชั่วโมง

$$I_b = I_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (2.90)$$

การประมาณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในระนาบแนวนอน การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียง Lui และ Jordan [1960] ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การผ่านทะลุและการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสได้ดังสมการ

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \tau_b \quad (2.91)$$

เมื่อ τ_b คือ อัตราส่วนของการผ่านทะลุของรังสีแบบพุ่งกระจายและสำหรับการแผ่รังสีที่ตกกระทบบนระนาบตามแนวนอน (G_d/G_o หรือ I_d/I_o) นั้น สามารถหาค่าการแผ่รังสีรวมของดวงอาทิตย์ได้จากสมการดังนี้

$$G = G_b + G_d \quad (2.92)$$

สำหรับการแผ่รังสีและการพุ่งกระจายของรังสีดวงอาทิตย์ทุกชั่วโมง Stautter และ Klein [1979] ใช้พารามิเตอร์และพาสีลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) เก็บข้อมูลจากทั้งหมด 5 รัฐของสหรัฐอเมริกาโดยกำหนดค่าการเคลื่อนที่ของลำแสงของดวงอาทิตย์ที่ผ่านทะลุและพุ่งกระจายผ่านชั้นบรรยากาศและหาความสัมพันธ์ของการกระจายกับค่าของรังสีที่ตกกระทบบนจริงดังสมการ

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.1 \frac{I}{I_T} & \text{for } 0 \leq \frac{I}{I_T} < 0.48 \\ 1.11 + 0.0396 \left(\frac{I}{I_T} \right) - 0.789 \left(\frac{I}{I_T} \right)^2 & \text{for } 0.48 \leq \frac{I}{I_T} < 1.10 \\ 0.20 & \text{for } 1.10 \leq \frac{I}{I_T} \end{cases} \quad (2.93)$$

จะพบว่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงมาบนผิวที่เอียงนั้นจะประกอบด้วยส่วนประกอบของรังสีที่เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานความร้อนของรังสีที่ตกกระทบบนผิวเอียงบนระนาบตามแนวนอน ดังนั้นความสัมพันธ์ของรังสีความร้อนเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G \cos \theta}{G \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \tag{2.94}$$

โดยที่ $G_{b,T}$ คือ การแผ่รังสีความร้อนของแสงอาทิตย์บนผิวระนาบ
 G_b คือ การแผ่รังสีรังสีความร้อนของแสงอาทิตย์บนผิวเอียง

เขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \tag{2.95}$$

สำหรับการฟุ้งกระจายในท้องฟ้าจะตกกระทบบนผิวแนวระนาบเช่นเดียวกับการตกกระทบที่เกิดขึ้นบนผิวเอียง สำหรับผิวจะประกอบไปด้วยส่วนของท้องฟ้าและพื้นดิน โดยจะมีแผ่รังสีจากท้องฟ้าเข้าไปกระทบส่วนหนึ่งของที่บริเวณผิว ดังนั้นอัตราส่วนของพื้นที่ผิวที่เป็นส่วนของท้องฟ้า แสดงดังสมการ

$$R_s = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \tag{2.96}$$

การฟุ้งกระจายที่พื้นดินนั้นจะมีการสะท้อนกลับจากกระบวนการแผ่รังสีความร้อนที่ตกกระทบบนผิว ซึ่งจะสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R_g = \frac{(1 - \cos \theta)}{2} = 1 - R_s \tag{2.97}$$

สำหรับการสะท้อนกลับของพื้นดินที่เกิดจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้นจะมีรังสีความร้อนของดวงอาทิตย์การตกกระทบบนพื้นดิน พลังงานที่ตกกระทบบนพื้นดินยังประกอบด้วยการแผ่รังสีและการฟุ้งกระจายของรังสีของดวงอาทิตย์ ดังนั้นพลังงานรวมทั้งหมดของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวเอียงประกอบด้วย

$$G_T = R_b G_b + R_s G_d + \rho' R_g (G_b + G_d) \tag{2.98}$$

โดยที่ ρ' เป็นค่าการสะท้อนกลับของพื้นดินเท่ากับ 1 จากสภาวะอากาศมาตรฐานสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 2-2 ดังนั้นการคำนวณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ในวันท้องฟ้าแจ่มใสหาได้ เมื่อ G_{on} เป็นค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่กระทบบนพื้นในแต่ละวันของปีซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.99)$$

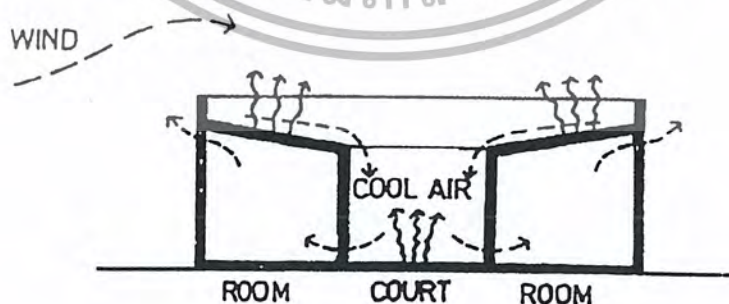
โดยที่ n คือ จำนวนวันของปีนั้นๆ

G_{sc} คือ ค่า Solar constant = 1353 W/m²

2.5 ทฤษฎี Solar Passive Cooling

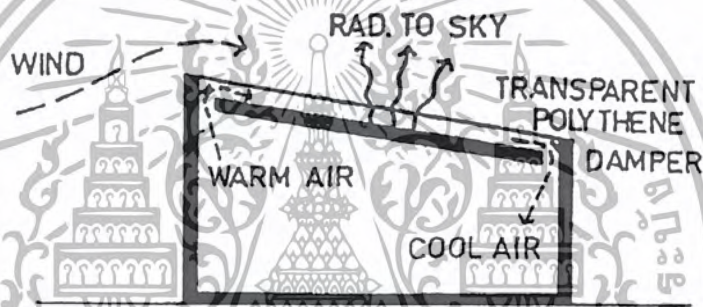
สำหรับการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น โดยการแผ่รังสีของความร้อนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำและสำหรับการกระจายความชื้นสู่ผู้อาศัยนั้นมีความสำคัญอยู่ 2 ประการคือ หนึ่งจะต้องควบคุมการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อมโดยตรงและสองจะต้องควบคุมแหล่งอื่น ๆ ที่มีการปล่อยความร้อนออกมา ส่วนของการกระจายของความชื้นจะพบว่าปริมาณมากในเวลากลางคืน สำหรับผิวแนวระดับต่าง ๆ จะมีผลต่อการกระจายของความชื้นในแต่ละลักษณะภูมิอากาศ สิ่งที่สำคัญในการกั้นการแผ่รังสีความร้อนสู่ท้องฟ้าได้แก่ คันไม้ ผงังและเมฆ เป็นต้น ซึ่งตัวกันนี้จะทำให้เกิดการลดลงของการแผ่รังสีความร้อนได้

สำหรับการพิจารณาบริเวณผิวหลังคาร้อนนั้น อุณหภูมิจะลดลงได้โดยอาศัยการพาความร้อนอิสระ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวหลังคาเท่ากับอุณหภูมิของอากาศภายนอก การเพิ่มขึ้นของความชื้นนั้นเกิดขึ้นได้โดยการกระจายอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในเวลากลางวันซึ่งเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในเวลากลางคืน และจะพบว่าช่วงเวลากลางคืนอุณหภูมิภายในที่อยู่อาศัยจะต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอก ถ้าการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุณหภูมิที่ผิวหลังคาลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ นั้น จะพบว่าจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้นที่บริเวณผิวหลังคาและอนุภาคของความร้อนจะถูกควบแน่นจนกลายเป็นความชื้น ยกตัวอย่างถ้าผิวหลังคามีความชื้นตามรูปที่ 2-15 จะพบว่าความชื้นจะไหลเข้าไปสู่บริเวณที่อยู่อาศัยภายใน โดยผ่านเข้าไปในช่องทางต่าง ๆ ที่เปิดไว้และผนังรอบ ๆ จะทำหน้าที่การป้องกันการรวมตัวของอากาศและไอน้ำ อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้จะทำงานไม่ได้ถ้าปราศจากลมจากสิ่งแวดล้อม สำหรับผลของลมที่เกิดการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาจะก่อให้เกิดการพาอนุภาคของความร้อนออกไปจากผนังและจะทำให้ลดความร้อนได้



รูปที่ 2-15 แสดงลักษณะความชื้นภายในที่อยู่อาศัย

ส่วนหลังคาจะครอบด้วยแผ่นโพลีไทรลีน ซึ่งคุณสมบัติของแผ่นโพลีไทรลีนนั้นจะยอมให้รังสีเกิดการผ่านทะลุได้ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด ในกรณีคลื่นของรังสีมีความยาวหรือมีค่าสูงแต่มีข้อเสียที่มีอายุการใช้งานสั้น ตัวอย่างตามรูปที่ 2-16 ทางเข้าและทางออกจะถูกเปิดไว้สำหรับให้อากาศภายในหลังคาเกิดการหมุนเวียน แต่ยังมีทางเลือกอีกทางสำหรับทฤษฎีนี้โดยการครอบหลังคาด้วยแผ่นเหล็กที่ทำเป็นรอนแล้วทาด้วยสีขาวก็ผลได้เช่นเดียวกัน การเปิดช่องบนหลังคานั้นจะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่และในช่วงเวลากลางวันจะต้องปิดช่องเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนเข้ามาแทนที่ในบริเวณที่อยู่อาศัย แต่สำหรับช่วงเวลากลางคืนจะต้องเปิดช่องเพื่อให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ภายใต้แผ่นเคลือบซึ่งจะช่วยพัดพาความเย็นเข้ามาภายในบริเวณห้องอาศัย ในกรณีนี้แผ่นเหล็กที่เป็นรอนนั้นประสิทธิภาพของการทำความเย็นจะดีก็จะเป็นผลมาจากการพาอนุภาคของความร้อนที่อยู่ด้านนอกไป ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นการพัฒนาโดย Catanoloth [1975] และ Harrisor [1978] โดยผิวที่ออกแบบนั้นจะมีค่าการดูดกลืนของผิวน้อยในช่วงของความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นและกำหนดให้ค่าการส่งออกของพลังงานต่ำในช่วงใกล้เคียงกับความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด



รูปที่ 2-16 การแสดงการกระจายความเย็น ในเวลากลางคืน

2.6 วิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method)

วิธีการปริมาตรสี่เหลี่ยมนี้ ได้ถูกพัฒนามาจากวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method) โดยจะใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical) ศึกษาถึงการไหลของของไหลภายในปริมาตรควบคุมจะหาได้จากสมการการเคลื่อนย้าย (General transport equation)

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.100)$$

จากสมการดังกล่าวสามารถประยุกต์ได้กับลักษณะการไหลแต่ละประเภทที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่าง ๆ แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะส่วนที่จำเป็นที่นำมาใช้ในการคำนวณแบบจำลองปล่องรังสี

อาทิตย์เท่านั้น เพื่อความสะดวกนี้จะใช้การจัดการของผลต่างตรงกลาง (Central differencing scheme) มาวิเคราะห์ระบบที่สนใจ

2.6.1 การจัดการของผลต่างตรงกลาง (Central Differencing Scheme)

การประมาณของผลต่างตรงกลาง (Central differencing approximation) จะเป็นการแสดงถึงเทอมของการแพร่หรือกระจายที่เกิดขึ้น ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการพาและการกระจายในสถานะไม่ขึ้นกับเวลาแบบหนึ่งและสองมิติ (Steady One and Two-dimensional convection and diffusion) ดังนั้นคุณสมบัติของ ϕ (เทอมของการกระจาย) ในลักษณะการไหลแบบหนึ่งมิติในสมการ (2.100) โดยตัดเทอมที่ขึ้นอยู่กับเวลาและ Source เทอมออกจะได้

$$\frac{d}{dx}(\rho u \phi) = \frac{d}{dx}\left(\Gamma \frac{d\phi}{dx}\right) \tag{2.101}$$

การไหลเป็นการไหลแบบต่อเนื่องดังนั้นจะได้

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = 0 \tag{2.102}$$

พิจารณาในปริมาตรควบคุมหนึ่งมิติแสดงดังรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 แสดงปริมาตรควบคุมรอบจุด P

อินทิเกรตสมการ Transport (2.92) ภายในปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 2-17 จะได้

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_w \tag{2.103}$$

อินทิเกรตสมการ (2.101) จะได้

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w = 0 \tag{2.104}$$

Discretised สมการสำหรับปัญหาการพาและการกระจายซึ่งจำเป็นต้องประมาณในเทอมของสมการ (2.103) เพื่อความเหมาะสมจึงกำหนดตัวแปร F และ D ซึ่งแสดงถึง Mass flux ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และการกระจายที่หน้าตัดเซลล์ตามลำดับ ดังนั้นจะได้

$$F = \rho u \quad \text{และ} \quad D = \frac{\Gamma}{\delta x} \tag{2.105}$$

ดังนั้นค่า F และ D ที่หน้าตัดเซลล์จะเท่ากับ

$$F_e = (\rho u)_w \quad \text{และ} \quad D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{wp}} \tag{2.106}$$

$$F_e = (\rho u)_e \quad \text{และ} \quad D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{pe}} \tag{2.107}$$

สามารถเขียนสมการการพาและการกระจาย (Convection and diffusion) จากสมการ (2.103) โดยการกำหนดให้ $A_w = A_e = A$ ดังนั้นจะได้สมการ

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_e - \phi_p) - D_w (\phi_p - \phi_w) \tag{2.108}$$

อินทิเกรตสมการการต่อเนื่อง (Continuity equation) สมการ (2.104) จะได้

$$F_e - F_w = 0 \tag{2.109}$$

สำหรับ Uniform grid จะสามารถเขียนค่าของ Cell-face ได้จากคุณสมบัติของ ϕ ดังนั้นจะได้

$$\phi_e = (\phi_p + \phi_E)/2 \tag{2.110}$$

$$\phi_w = (\phi_w + \phi_p)/2 \tag{2.111}$$

ดังนั้นแทนค่าลงในสมการ (2.108) จะได้

$$\frac{F_e}{2}(\phi_P + \phi_E) - \frac{F_w}{2}(\phi_W + \phi_P) = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) \quad (2.112)$$

แทนค่าสมการ (2.106) และ (2.107) และทำการ Discretised สมการสุดท้ายจะได้สมการดังนี้

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E \quad (2.113)$$

$$a_P = a_W + a_E + (F_e - F_w) \quad (2.114)$$

โดยที่

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2} \quad a_E = D_e + \frac{F_e}{2} \quad (2.115)$$

ถ้ากรณีที่มี Source term เข้ามาเกี่ยวข้องในสมการ (2.113) จะต้องบวก S_u และในสมการที่ (2.114) จะต้องลบออกด้วย S_P สำหรับการพาและการกระจายแบบสองมิติสามารถพิจารณาได้จากหนึ่งมิติแล้วทำการ Discretised สมการจะได้

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S \quad (2.116)$$

$$a_P = a_W + a_E + a_N + a_S + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) \quad (2.117)$$

โดยที่

$$a_W = D_w + \frac{F_w}{2} \quad a_E = D_e + \frac{F_e}{2} \quad (2.118)$$

$$a_S = D_s + \frac{F_s}{2} \quad a_N = D_n + \frac{F_n}{2} \quad (2.119)$$

2.7 การวิเคราะห์ปล่องรังสีอาทิตย์ด้วยวิธี Finite Volume

2.7.1 หลักการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์

ปล่องรังสีอาทิตย์ (Solar chimney) จะเป็นการอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ของอากาศจากภายนอกบ้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในเข้ามาหมุนเวียนภายในบ้าน ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิภายในบ้านลดลง โดยการเคลื่อนที่ของอากาศภายนอกบ้านเข้ามาภายในบ้านนั้นจะไม่ใช่อุปกรณ์ช่วยเหลือ เช่น เครื่องดูดอากาศ หรือ พัดลมดูดอากาศ เป็นต้น แต่จะเป็นเพียงการประยุกต์หลักการของ Solar passive cooling ซึ่งเป็นการดูดอากาศให้มีการเคลื่อนที่ ซึ่งอากาศที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีความหนาแน่นต่ำจะพยายามลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่ผิวกันของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนตัวเข้ามาแทนที่โดยอาศัยแรงลอยตัวของของไหล (Buoyancy force)

จากหลักการทั่วไปที่กล่าวมาข้างต้นปล่องรังสีอาทิตย์จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดอุณหภูมิภายในบ้านให้ต่ำลง ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจะเหมาะสมสำหรับบ้านที่ตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อน

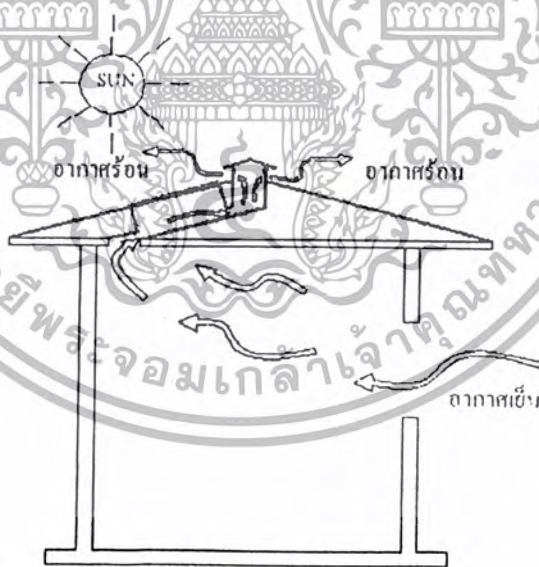
สำหรับการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นการจำลองรูปแบบขึ้นมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ภายในท่ออากาศจะถูกทำให้ร้อน โดยอาศัยการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ โดยลักษณะรูปแบบแล้วท่อจะติดตั้งอยู่ใต้หลังคาบ้าน

2. ขณะที่มีการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์บริเวณแผ่นรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้น จะทำให้อากาศภายในท่อบีบอัดสูงขึ้นซึ่งในทำนองเดียวกันนั้นความหนาแน่นก็จะมีค่าต่ำลง ซึ่งจะทำให้กลุ่มของความวอร์มนั้นเกิดแรงลอยตัวสูงขึ้นและจะถูกปล่อยออกบริเวณปล่องของอากาศที่ด้านบนหลังคา ในขณะที่เดียวกันนั้นอากาศที่อยู่บริเวณใกล้เคียงจะเคลื่อนที่เข้ามาแทนที่โดยวิธีการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

3. อากาศภายในบ้านจะถูกดึงเข้ามาแทนที่อากาศร้อนภายในปล่อง ในขณะที่เดียวกันนั้นอากาศจากภายนอกที่เย็นกว่าจะถูกดึงเข้าไปแทนที่อากาศร้อนภายในบ้านอีกทอดหนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศภายในบ้านเป็นวัฏจักร ซึ่งการไหลเวียนของอากาศจากภายนอกบ้านที่เคลื่อนที่เข้ามาแทนที่อากาศภายในบ้านนั้น จะทำให้อุณหภูมิภายในบ้านลดลง

จากหลักการทำงานที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ สามารถสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของอากาศภายในอุปกรณ์ปล่องรังสีอาทิตย์ในแบบจำลองของบ้านทดลองได้ดังรูป



รูปที่ 2-18 แสดงการทำงานของปล่องรังสีอาทิตย์

2.7.2 การวิเคราะห์ปล่องรังสีอาทิตย์โดยวิธี Finite Volume

สำหรับการคำนวณค่าของการกระจายอุณหภูมิภายในบ้านทางทฤษฎีเมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์ปล่องรังสีอาทิตย์ในบ้านแล้วนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าจากการวัดค่าจากการทดลอง การคำนวณจะใช้วิธี Finite volume ซึ่งจะต้องอาศัยการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical) ควบคู่ไปด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาตามขั้นตอนและเงื่อนไขตามที่กำหนด

ในการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธี Finite volume นั้นจะใช้วิธี TDMA (Tri-diagonal matrix algorithm) ซึ่งจะใช้ในการแก้ปัญหาในระบบสมการสองมิติ และใช้วิธีการแบบ Point by point solve ในการคำนวณค่าการกระจายของอุณหภูมิในแต่ละจุด สำหรับปัญหาการพาและการกระจายนั้นจะใช้วิธีการ Simple algorithm เพื่อต้องการหาความดัน, ความเร็วและอุณหภูมิที่กระจายกระจายในบ้านในสภาวะคงที่ (Steady) โดยโครงสร้างของ Algorithm, โปรแกรมการคำนวณแสดงดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Initial Guess p^*, u^*, v^*, θ^*

ขั้นตอนที่ 2 : Solve Discretised Momentum Equations

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (p_{i-1,j}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j}$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (p_{i,j-1}^* - p_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j}$$

ขั้นตอนที่ 3 : Solve Pressure Correction Equations

$$a_{i,j} p_{i,j}' = a_{i-1,j} p_{i-1,j}' + a_{i+1,j} p_{i+1,j}' + a_{i,j-1} p_{i,j-1}' + a_{i,j+1} p_{i,j+1}' + b_{i,j}'$$

ขั้นตอนที่ 4 : Correct Pressure and Velocity

$$p_{i,j} = p_{i,j}^* + p_{i,j}'$$

$$u_{i,j} = u_{i,j}^* + d_{i,j} (p_{i-1,j}' - p_{i,j}')$$

$$v_{i,j} = v_{i,j}^* + d_{i,j} (p_{i,j-1}' - p_{i,j}')$$

ขั้นตอนที่ 5 : Solve all other Discretised Transport Equation

$$a_{I,J}\phi_{I,J} = a_{I-I,J}\phi_{I-I,J} + a_{I+I,J}\phi_{I+I,J} + a_{I,J-I}\phi_{I,J-I} + a_{I,J+I}\phi_{I,J+I} + b\phi_{I,J}$$

ขั้นตอนที่ 6 : Check Convergence ถ้าไม่ Convergence ให้กำหนด $p^* = p, u^* = u, v^* = v$ และ $\phi^* = \phi$ จากนั้นแทนค่าลงในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาค่าใหม่จนกว่าจะ Convergence และจบโปรแกรม

2.7.2.1 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในบ้าน

สำหรับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในบ้านนั้นจะใช้วิธี Finite Volume ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ระบบนี้ จึงได้มีการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนจะถือเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติขึ้นกับแกน x และ y
2. การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณที่พิจารณาเป็นแบบสภาวะคงที่ (Steady state)
3. ความหนาแน่นของอากาศถูกพิจารณาว่าไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่สามารถหาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่พิจารณา
4. ไม่คิดการรั่วไหลของอากาศภายในบ้าน
5. ภายในตัวกลางไม่มีแหล่งผลิตพลังงานความร้อน
6. การถ่ายเทความร้อนผ่านทั้ง 4 ด้านน้อยมาก
7. ไม่คิดผลของลมภายนอก (Wind effect)
8. ไม่คิดความแตกต่างของค่าความชื้นรังสีอาทิตย์ในแต่ละวัน
9. ไม่คิดผลของผู้ทดลองขณะบันทึกค่าความเร็วอากาศในบ้าน
10. ไม่คิดผลความแตกต่างของเวลาระหว่างการวัดความเร็วอากาศในแต่ละครั้งของการวัด
11. ค่าความเร็วอากาศที่วัดได้เป็นความเร็วอากาศเฉลี่ยในทิศทางเดียว (จากทิศใต้ไปทิศเหนือ)
12. ไม่คิดผลความแตกต่างของระดับความสูงจากพื้นของสถานที่ตั้งบ้านต่อสมบัติของอากาศ
13. ไม่คิดผลของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าบ้านตามรอยรั่วตามรอยต่อต่าง ๆ

จากเงื่อนไขที่พิจารณานั้นสามารถพิจารณาได้จากสมการทั่วไปของการถ่ายเทความร้อน

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการ

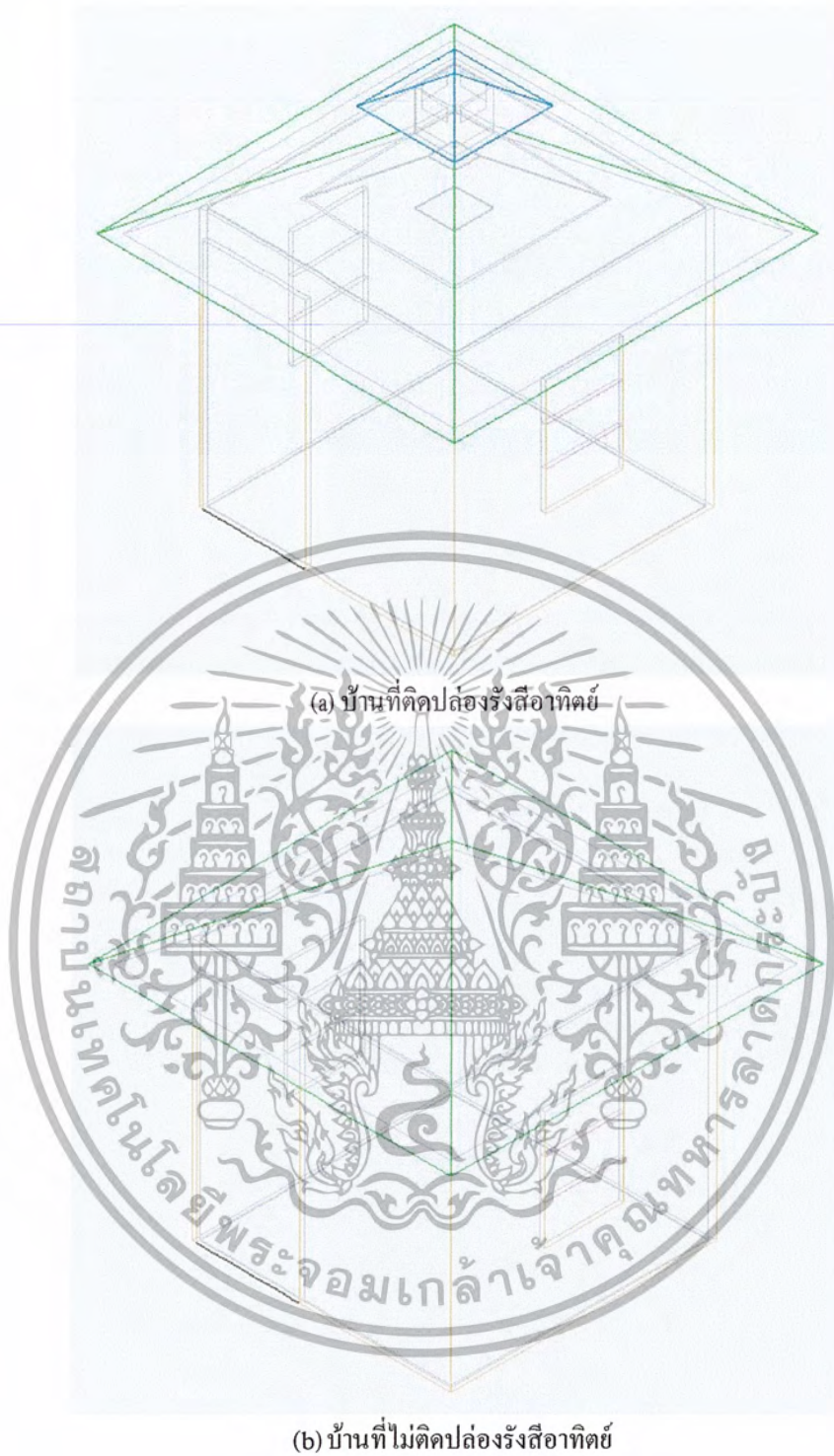
3.1 รายละเอียดโครงสร้างแบบจำลองของบ้าน

แบบจำลองของบ้านถูกออกแบบสำหรับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 8 ลูกบาศก์เมตร (ความกว้าง ขาว และสูงของห้องเท่ากับ 2, 2 และ 2 เมตรตามลำดับ) โดยสร้างขึ้น ณ ชั้น คาเฟ่ (ความสูง 20 เมตร) อาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 บ้านที่ใช้ทำการทดลอง

บ้านที่ใช้ทดลองมีหลังคาบ้านรูปทรงปั้นหยามุมเอียง 30 องศาทั้งสองหลัง ส่วนประกอบของตัวบ้านมีดังนี้

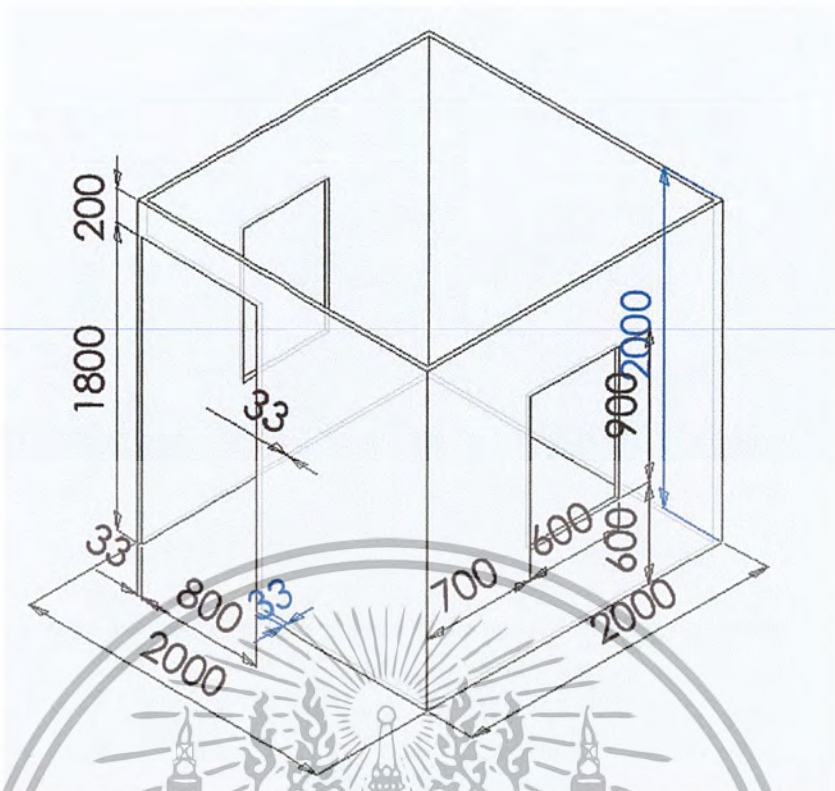
1. กระเบื้องซีแพคโมเนียสีแดงดำ มีขนาดต่อแผ่นคือ ความกว้าง ขาว และหนาเท่ากับ 33, 42 และ 1.5 เซนติเมตรตามลำดับ และมีน้ำหนัก 4.4 กิโลกรัมต่อแผ่น
2. ด้านล่างของหลังคาของหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีแผ่นยิปซัมหนา 0.9 เซนติเมตร วางขนานกัน กระเบื้อง มีช่องว่าง 14.5 เซนติเมตร
3. เพดานบ้านใช้แผ่นยิปซัมติดอลูมิเนียมฟลอยด์หนา 0.9 เซนติเมตร ในหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะเจาะช่องตรงกลางเพดานขนานกว้างและยาว 30 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ
4. ความกว้าง ขาว และสูงของตัวปล่องรังสีอาทิตย์มีขนาด 30, 30 และ 32 เซนติเมตรตามลำดับ ทำจากแผ่นสแตนเลส (Stainless steel) หนา 0.2 มิลลิเมตร ช่องระบายกว้าง 20 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ที่ด้าน มีครอบกันแดดด้านบนซึ่งสามารถคลุมป้องกันฝนสาดได้
5. ผนังห้องทั้งสี่ด้านประกอบด้วยวัสดุจากด้านนอก คือ กระเบื้องแผ่นเรียบตราช้าง หนา 4 มิลลิเมตร โฟมหนา 25 มิลลิเมตร และ ไม้ฉลุนา 4 มิลลิเมตร
6. ผนังด้านทิศเหนือ ได้เจาะช่องหน้าต่างกว้าง 60 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร สูงจากพื้นห้อง 60 เซนติเมตร
7. พื้นห้องเป็น ไม้ฉลุนา 10 มิลลิเมตร



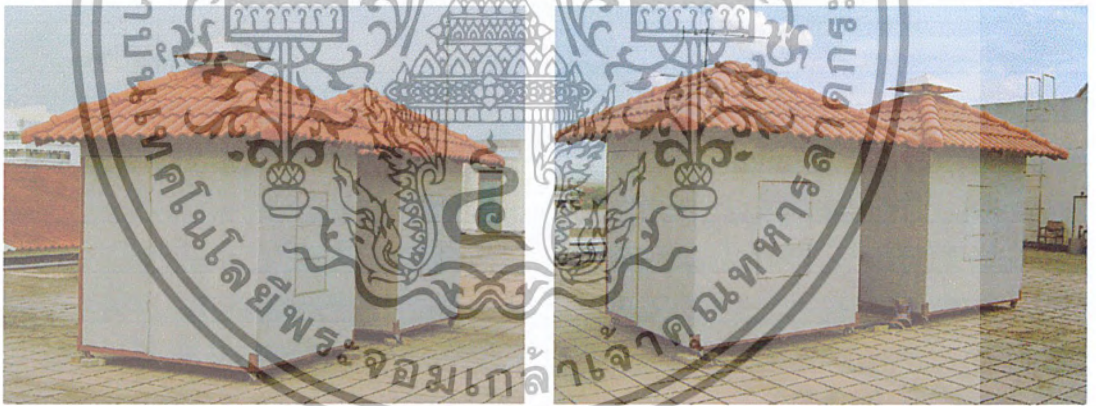
(b) บ้านที่ไม่คิดปล่องรังสีอาทิตย์

รูปที่ 3-1 แสดงบ้านที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 แสดงขนาดของบ้าน

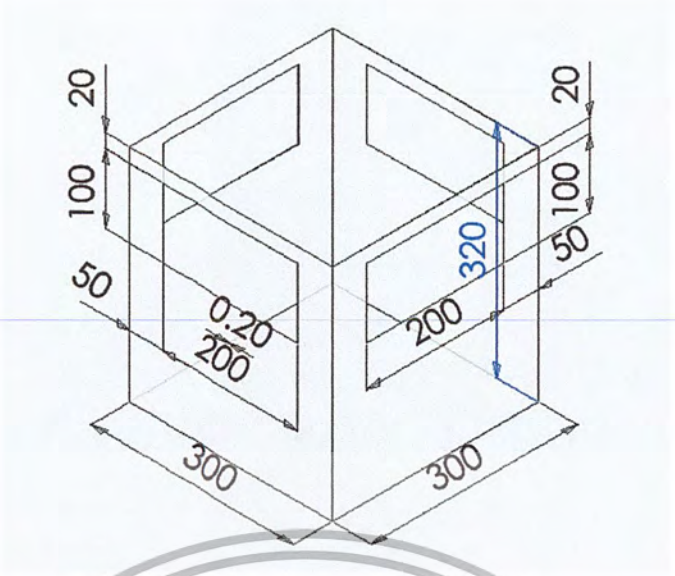


(a) มุมมองด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้

(b) มุมมองด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

รูปที่ 3-3 แสดงบ้านจำลองที่สร้างขึ้นใช้ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-4 แสดงขนาดของกล่องรังสีอาทิตย์

3.2 เครื่องมือวัด

3.2.1 สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple wire)

เป็นชนิด K ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิ -20 ถึง 90 องศาเซลเซียส และทำการสอบเทียบสายเทอร์โมคัปเปิลทุกเส้นที่ใช้ทำการวัดในน้ำเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบตั้งแต่ 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส พบว่าความคลาดเคลื่อนจากการสอบเทียบไม่เกิน 0.28 องศาเซลเซียส

3.2.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

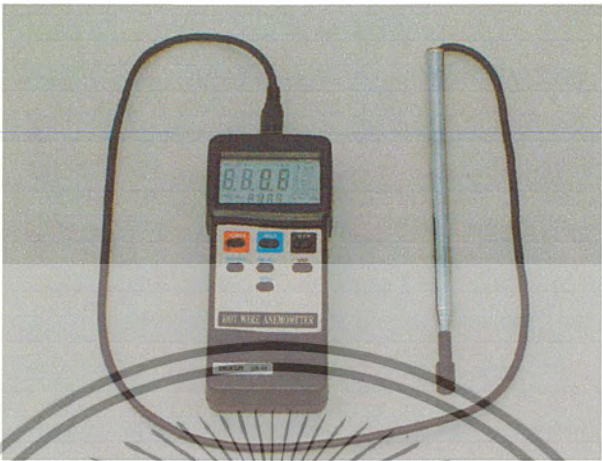
ใช้ในการวัด และอ่านค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งวัดต่างๆ โดยมีสายเทอร์โมคัปเปิลเป็นตัวส่งสัญญาณค่าอุณหภูมินั้นๆ ให้กับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ

3.2.3 ฮอทวาร์ย แอนนิโมมิเตอร์ (Hot wire anemometer)

ใช้ในการวัดความเร็วลมที่ช่องหน้าต่างเข้า – ออก และที่ปล่องรังสีอาทิตย์ สามารถวัดความเร็วลมได้ตั้งแต่ 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที ความละเอียดในการแสดงผลใช้ทศนิยม 1 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 แสดงฮอทวาร์ย แอนนิโมมิเตอร์ (Hot wire anemometer)

3.2.4 เครื่องวัดความเข้มของแสง (Solar integrator)

ใช้วัดค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ในวันที่ทำการทดลอง คัดตั้ง ณ ชั้นดาดฟ้า อาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

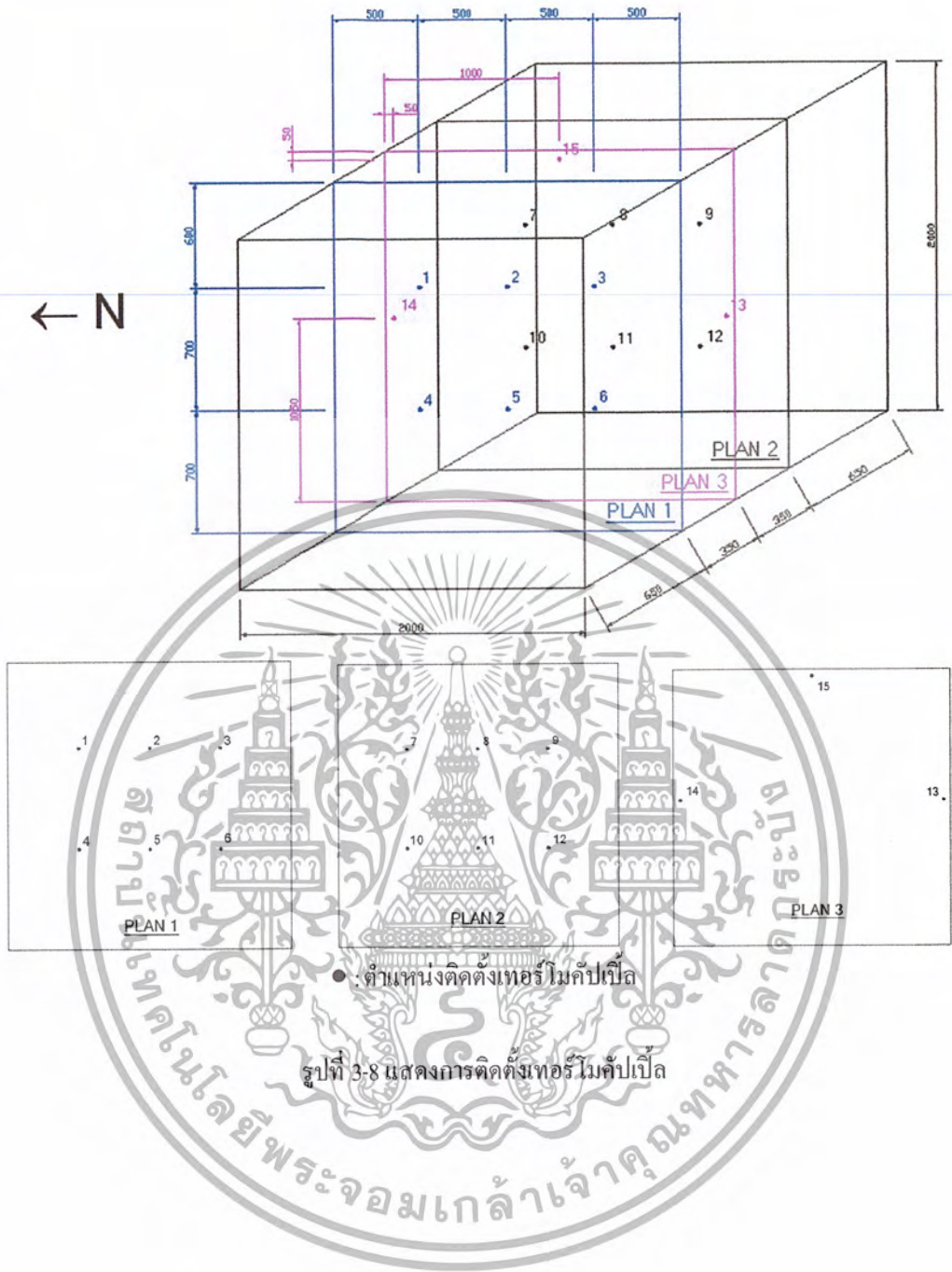


รูปที่ 3-7 แสดงเครื่องวัดความเข้มของแสง (Solar integrator)

3.3 วิธีการทดลอง

1. สร้างบ้านที่ใช้ทำการทดลองจำนวน 2 หลัง หลังหนึ่งติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ ส่วนอีกหลังไม่ติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ โดยหันด้านที่มีช่องหน้าต่างทางเข้าไปทางทิศใต้ ดังรูปที่ 3-8
2. ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลตามจุดต่าง ๆ ภายในห้องของบ้านทั้งสองหลัง ดังรูปที่ 3-8
3. ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ
4. ทำการวัดและบันทึกค่า โดยมีค่าที่บันทึกคืออุณหภูมิที่วัดทั้งหมด 30 จุด, ค่าความเร็วลม 5 จุด ประกอบด้วย ช่องหน้าต่างทางเข้าและทางออกทั้งสองหลัง ทางออกปล่องรังสีอาทิตย์, ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ สุดท้ายคือความเร็วลมและอุณหภูมิภายนอก
5. ทำการทดลองตั้งแต่เวลา 9.00 ถึง 16.00 น. โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 30 นาที กับกรณีศึกษาต่างๆ ดังนี้
 - ปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด
 - เปิดทางเข้าช่องกลางและปิดทางออก
 - เปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก
 - เปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออก
 - เปิดทางเข้าทั้งหมดและเปิดทางออก
6. นำค่าที่บันทึกไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
7. สรุปผลการทดลอง





บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองกรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด



รูปที่ 4-1 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

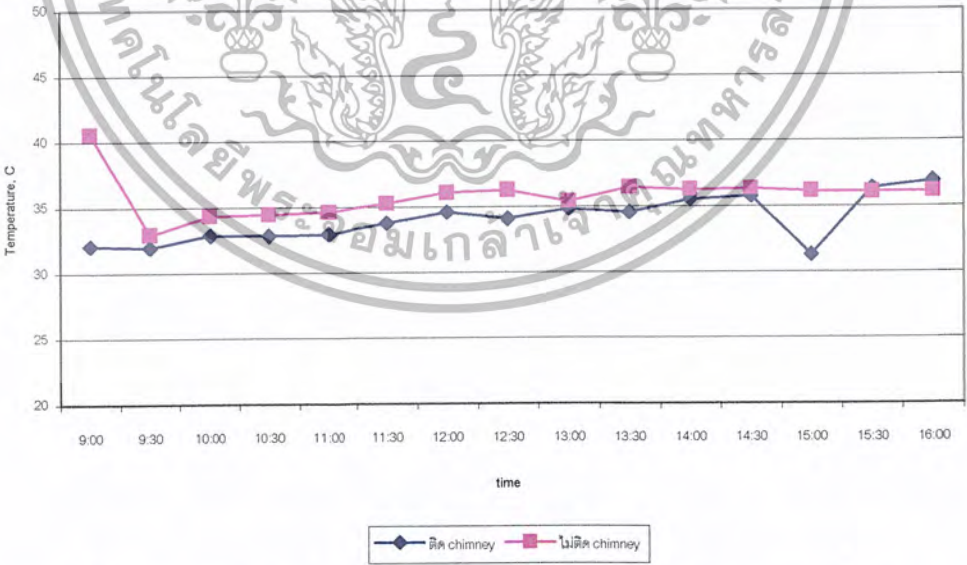
จากรูปที่ 4-2 แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิเฉลี่ยเปรียบเทียบกันระหว่างห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ในกรณีที่ปิดช่องทางเข้าและทางออกทั้งหมดพบว่า ทั้งกรณีที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ค่าของอุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เพราะปริมาณความเข้มของแสงมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อเทียบกันตามเวลาเดียวกันพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของกรณีที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าประมาณ 1 องศาเซลเซียสในเวลาต่าง ๆ นั้นหมายความว่าปล่องรังสีอาทิตย์ได้ช่วยระบายความร้อนสะสมบางส่วนออกจากรูบ้าน โดยที่ไม่ได้ดึงอากาศภายนอกเข้ามาช่วย (เพราะเราปิดทางเข้าและทางออกไว้) แสดงให้เห็นว่าปล่องรังสีอาทิตย์มีความสามารถในการระบายความร้อนสะสมบางส่วนออกจากรูบ้าน โดยไม่มีอากาศเย็นจากภายนอกเข้ามาช่วย จะมีเพียงช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 16.00 น. เท่านั้นที่ปล่องรังสีอาทิตย์ไม่สามารถช่วยได้เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่ความเข้มของแสงน้อย

จากรูปที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดวัดอุณหภูมิด้านบนของห้อง เพื่อศึกษาว่าปล่องรังสีอาทิตย์ช่วยได้แค่ไหน ในส่วนบนของห้องซึ่งโดยปกติอากาศร้อนจะมีการลอยตัวและมีการสะสมอยู่บริเวณด้านบน จากรูปแสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มทำการทดลอง 9.00 น. ถึง 9.30 น. มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่างกันเล็กน้อยประมาณ 0.5 ถึง 1 องศาเซลเซียส ต่อมาเมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าอุณหภูมิจะต่างกันมากขึ้น ประมาณ 1.5 ถึง 2 องศาเซลเซียสในช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น. โดยในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าและค่าความแตกต่างนี้จะลดลงเมื่อหลังจาก 14.00 น. ถึง 16.00 น. เนื่องมาจากเป็นช่วงเวลาที่ความเข้มของแสงลดลง

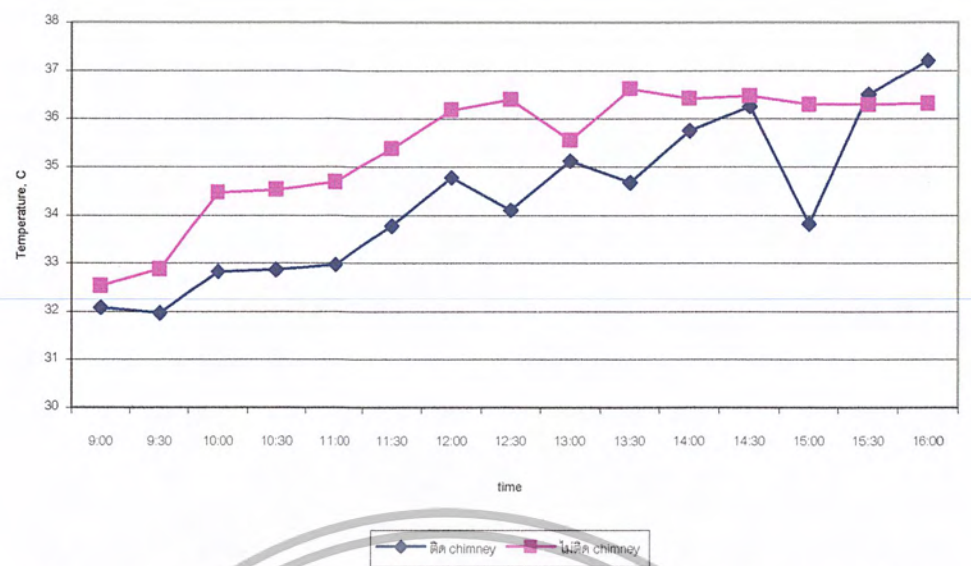
จากรูปที่ 4-4 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าลักษณะกราฟทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา และความแตกต่างของอุณหภูมิจะไม่มากนักในช่วงแรกๆ 9.00 น. ถึง 9.30 น. และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลา 10.00 น. ถึงเวลา 14.00 น. และจะเริ่มลดลงเมื่อเวลา 14.30 น.ถึง 16.00 น. เพราะความเข้มของแสงน้อยลงโดยที่ห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์จะมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยกว่าห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์

จากรูปที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบของอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์พบว่ากราฟของอุณหภูมิที่ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างช่วงเวลา 9.00 น. ถึง 11.30 น. มีค่าเท่ากัน และเริ่มแตกต่างกันในช่วง 11.30 น.ถึง 14.30 น. เพราะช่วงนี้มีความเข้มของแสงมากทำให้การระบายอากาศร้อนทำได้ไม่ทันกับการเพิ่มขึ้นของความร้อนทำให้มีความแตกต่างของอุณหภูมิด้านล่างและด้านบน ต่อมาในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 16.00 น. ความแตกต่างของอุณหภูมิลดลงเนื่องจากความเข้มแสงลดลงนั่นเอง

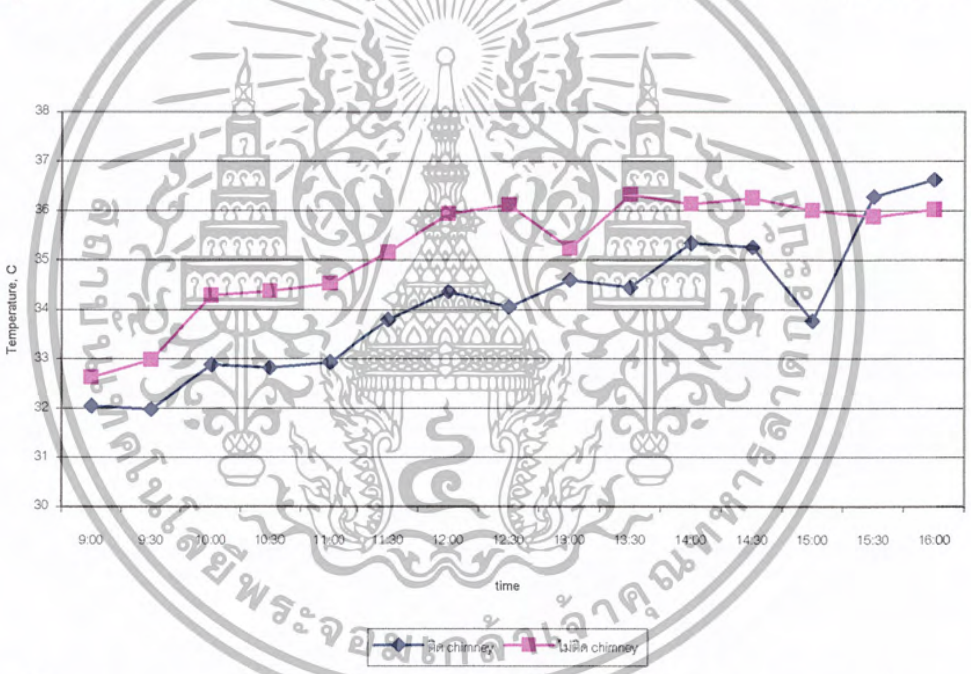
จากรูปที่ 4-6 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์โดยเทียบระหว่างอุณหภูมิด้านล่างและด้านบน จากกราฟอุณหภูมิเฉลี่ย มีค่าต่างกันเล็กน้อยโดยจะต่างกันเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้น 9.00 น. ถึง 10.00 น. และต่างกันมากขึ้นเมื่อเวลา 10.30 น.จนสิ้นสุดการทดลองซึ่งสาเหตุที่อุณหภูมิต่างกันจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเพราะห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีการสะสมความร้อนเพิ่มขึ้น และไม่มีการระบายออก (ผนังเป็นฉนวน) ทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้น แม้จะเป็นช่วงทำๆที่มีค่าความเข้มของแสงน้อยลง



รูปที่ 4-2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

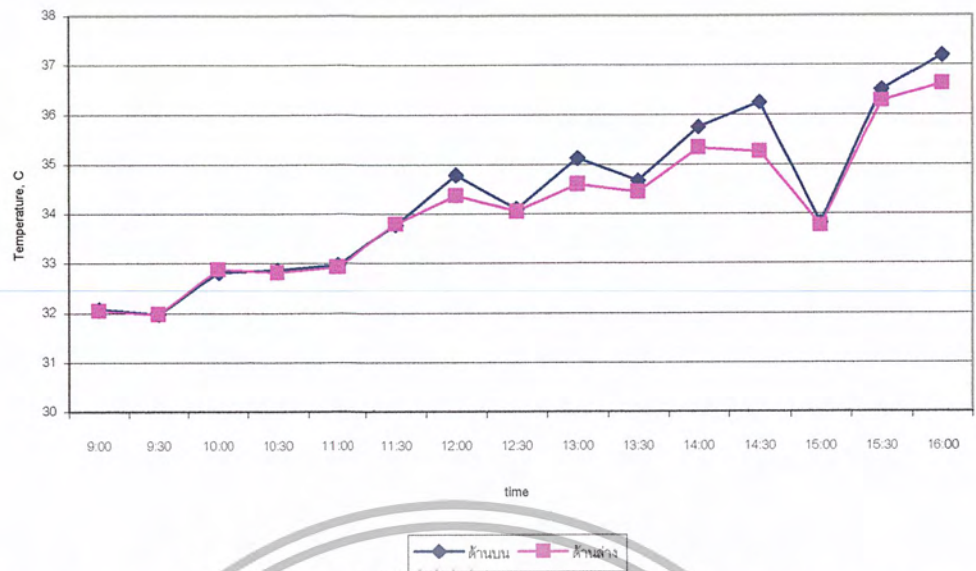


รูปที่ 4-3 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

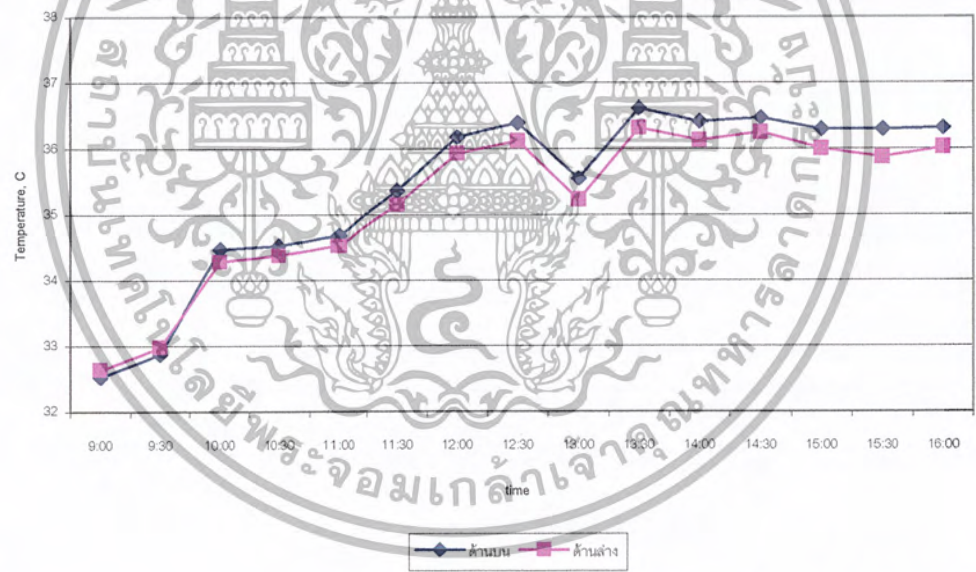


รูปที่ 4-4 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



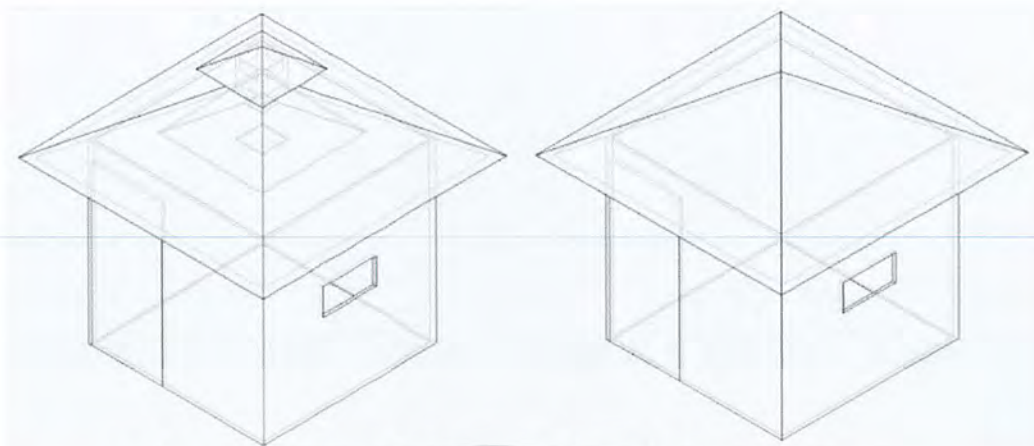
รูปที่ 4-5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด



รูปที่ 4-6 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและปิดทางออก



รูปที่ 4-7 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและปิดทางออก

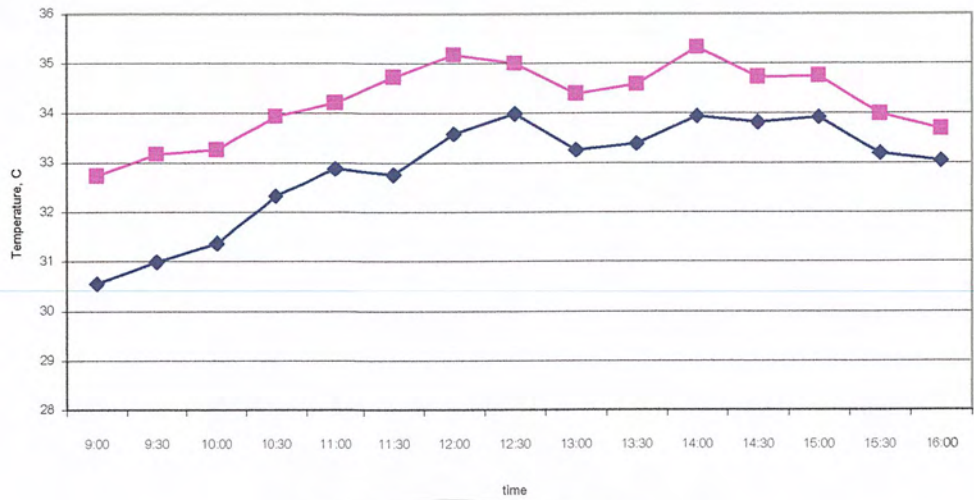
รูปที่ 4-8 เป็นการแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องที่ไม่ติดและกราฟทั้งสองมีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงเวลา 14.00 น. อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าสูงสุดจากนั้นจึงมีค่าลดลง อันเนื่องมาจากความเข้มของแสงน้อยลงจากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าต่างกัน (ประมาณ 2 องศาเซลเซียส)

รูปที่ 4-9 เป็นการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่ากราฟมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจนถึง 14.00 น. เส้นกราฟจะเริ่มลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงลดลง โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยจากกราฟ พบว่ามีค่าต่างกันพอสมควรและห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงกว่าแสดงให้เห็นว่าบริเวณด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีการระบายอากาศร้อนออกได้ดีในกรณีนี้จึงมีอุณหภูมิสูงกว่าห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์

รูปที่ 4-10 แสดงการเปรียบเทียบ อุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จากกราฟพบว่าห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงกว่า โดยที่อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามเวลาและสูงสุดในช่วง 12.00 น. ถึง 14.00 น. และลดลงตามความเข้มแสง

รูปที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบ อุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนักแสดงให้เห็นว่าห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ อากาศส่วนที่ร้อน ได้ถูกระบายออกทำให้อากาศส่วนที่ร้อน ได้ถูกระบายออกทำให้อากาศด้านบนกับด้านล่างมีอุณหภูมิไม่ต่างกัน

รูปที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบ อุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของห้องนี้มีความแตกต่างกัน ด้านบนจะร้อนกว่าด้านล่าง

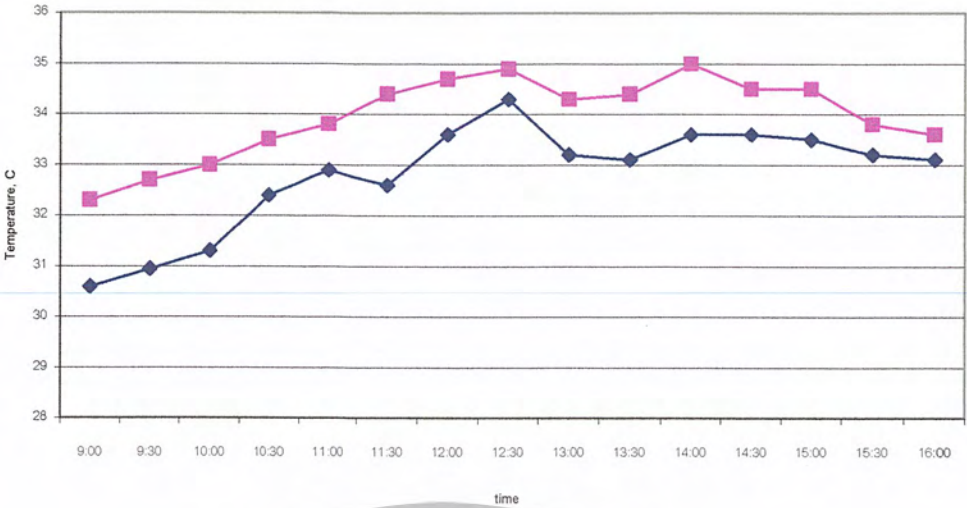


รูปที่ 4-8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก

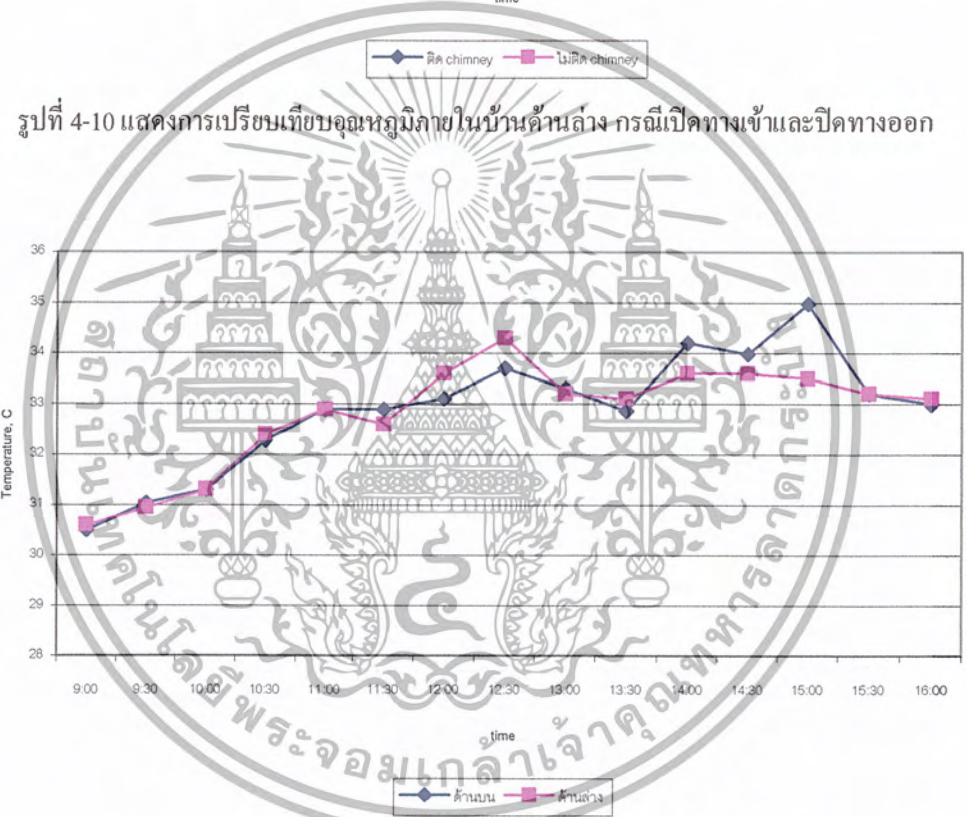


รูปที่ 4-9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก

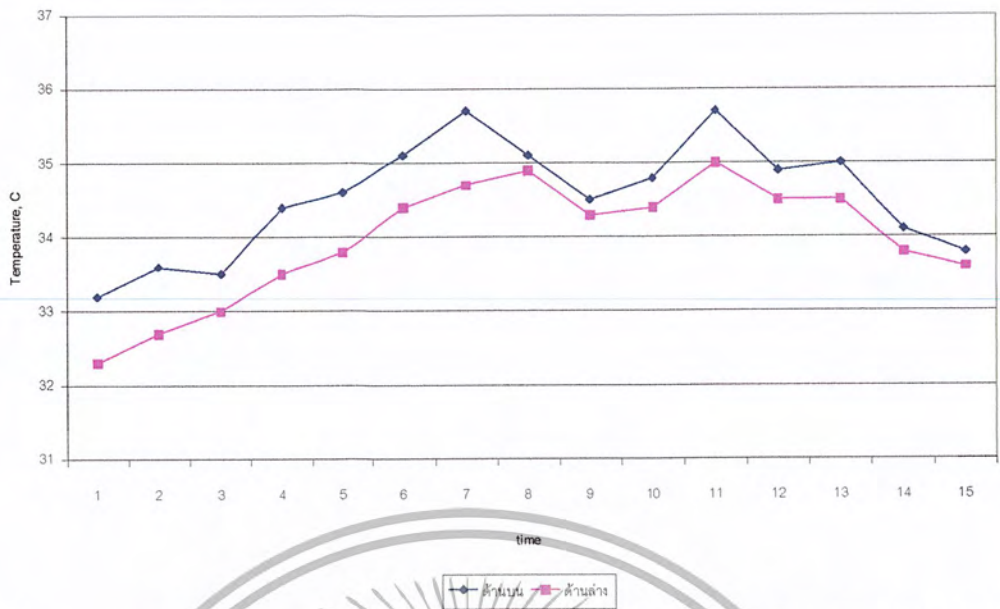
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก



รูปที่ 4-11 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก



รูปที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและปิดทางออก

4.3 การทดลองกรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก



รูปที่ 4-13 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก

จากรูปที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นตามเวลาทั้งสองกรณีแต่ห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดจะมีค่าแตกต่างกันน้อยกว่ากรณีเปิดช่องกลางและปิดทางออก สาเหตุเพราะช่องระบายอากาศใหญ่ขึ้นมีผลทำให้อากาศเข้ามาได้มากขึ้นในห้องจึงระบายความร้อนได้มากขึ้น ในทั้งสองกรณีดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิจึงลดลง

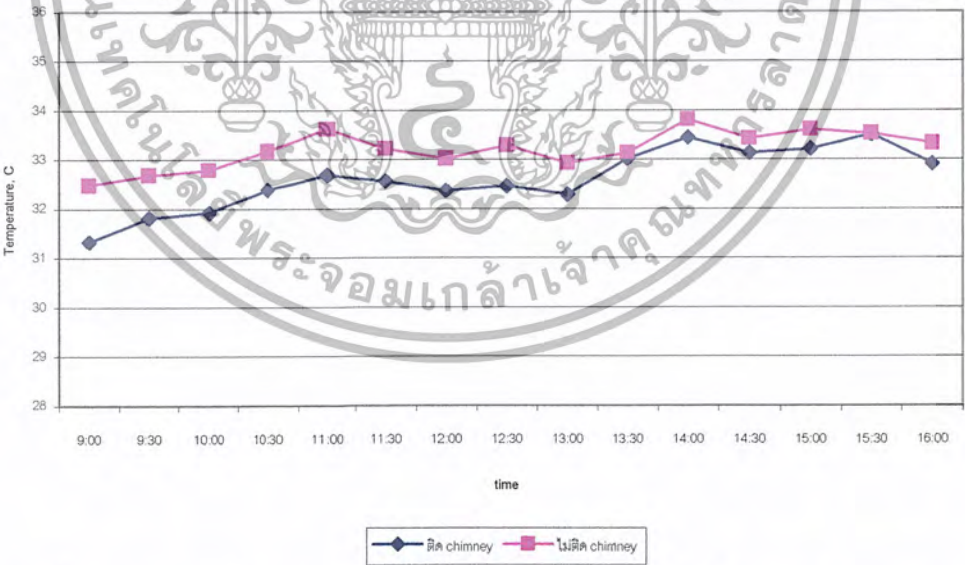
เนื่องจากลดการสะสมความร้อนเพราะช่องระบายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง ที่เวลา13.30 น. ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองกรณีจะลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงลดลง

จากรูปที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่าห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ลักษณะกราฟจะเพิ่มขึ้นตามเวลาอันเนื่องมาจากความเข้มของแสงเพิ่มขึ้น และความแตกต่างของอุณหภูมิลดลงเมื่อเวลา 13.30 น. ถึง 16.00 น. เพราะความเข้มแสงลดลง

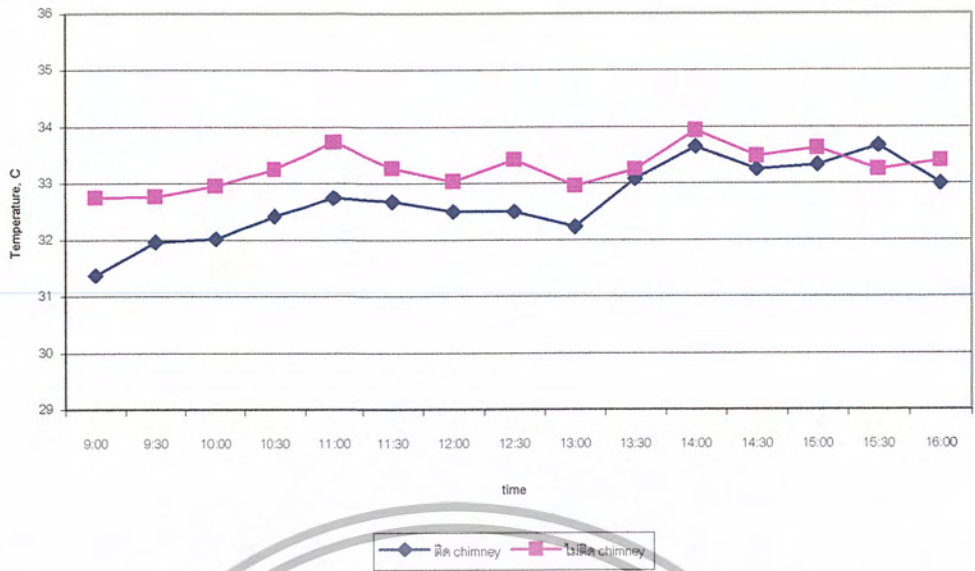
จากรูปที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่าห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ลักษณะกราฟจะเพิ่มขึ้นตามเวลาอันเนื่องมาจากความเข้มของแสง จนถึงเวลา 14.00 น. อุณหภูมิจะคงที่และเริ่มลดลง ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมินั้นแตกต่างกันพอสมควร(ประมาณ 2 องศาเซลเซียส)

จากรูปที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิต่างกันเพียงเล็กน้อย

จากรูปที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก



รูปที่ 4-15 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก

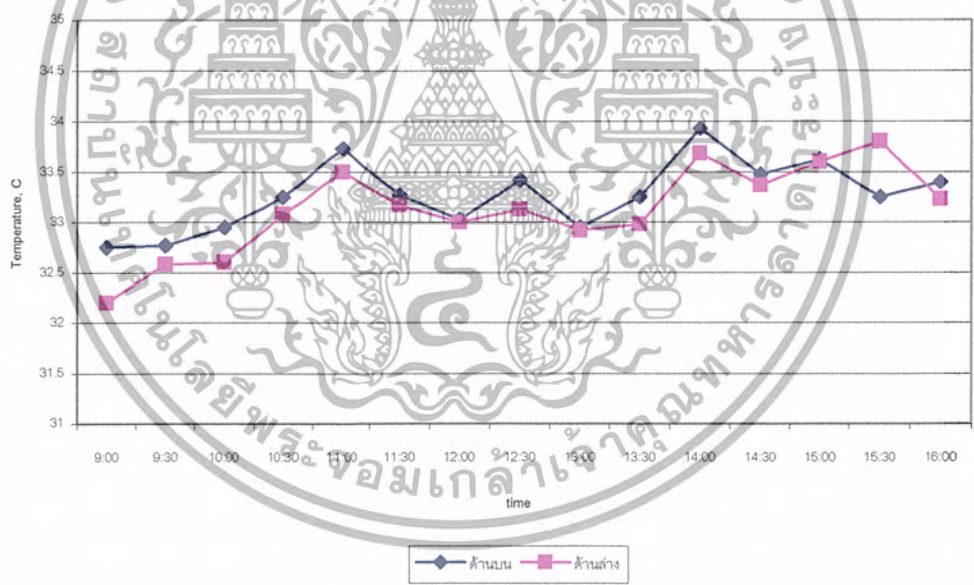


รูปที่ 4-16 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



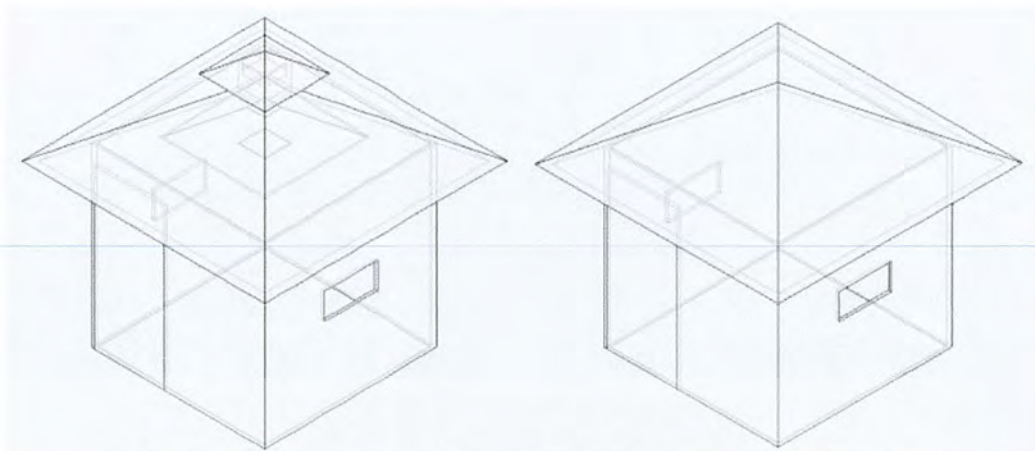
รูปที่ 4-17 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก



รูปที่ 4-18 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออก



รูปที่ 4-19 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออก

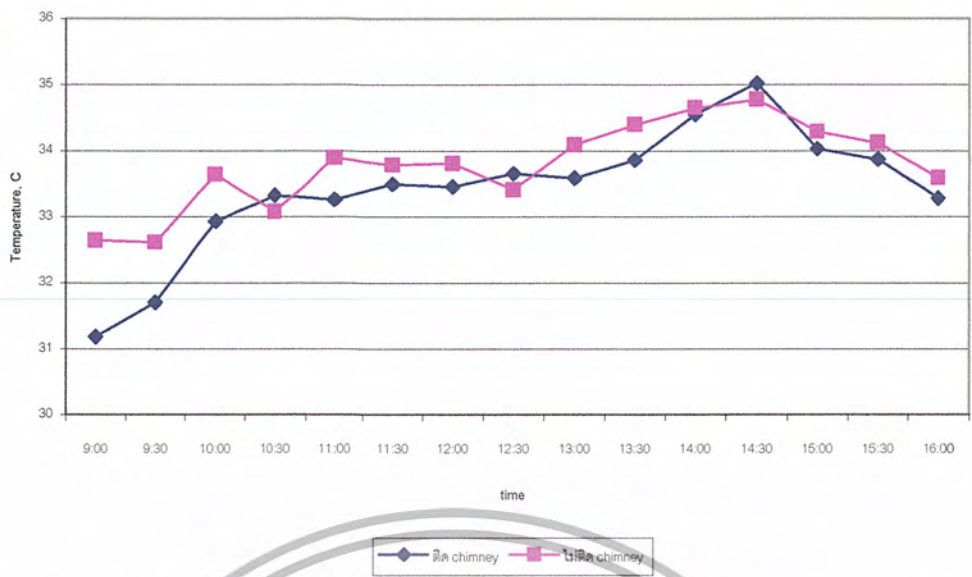
รูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ได้ติด ผลจากการทดลองพบว่า ลักษณะกราฟทั้งสองจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนถึง 14:30 น. จึงจะเริ่มลดลงเนื่องจากความเข้มของแสงลดลง ส่วนความต่างของอุณหภูมิพบว่าไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากช่องเปิดมีผลในการพาความร้อน (Force convection) มากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์ซึ่งเป็นการพาแบบอิสระ (Free convection) จึงทำให้อุณหภูมิทั้งสองห้องไม่แตกต่างกัน

รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และห้องที่ไม่ได้ติดพบว่า อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาและลดลงในช่วงท้ายเนื่องจากอิทธิพลของความเข้มแสง ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมินั้นไม่ต่างกันมากนักเพราะอิทธิพลของช่องเปิดมีผลมากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์

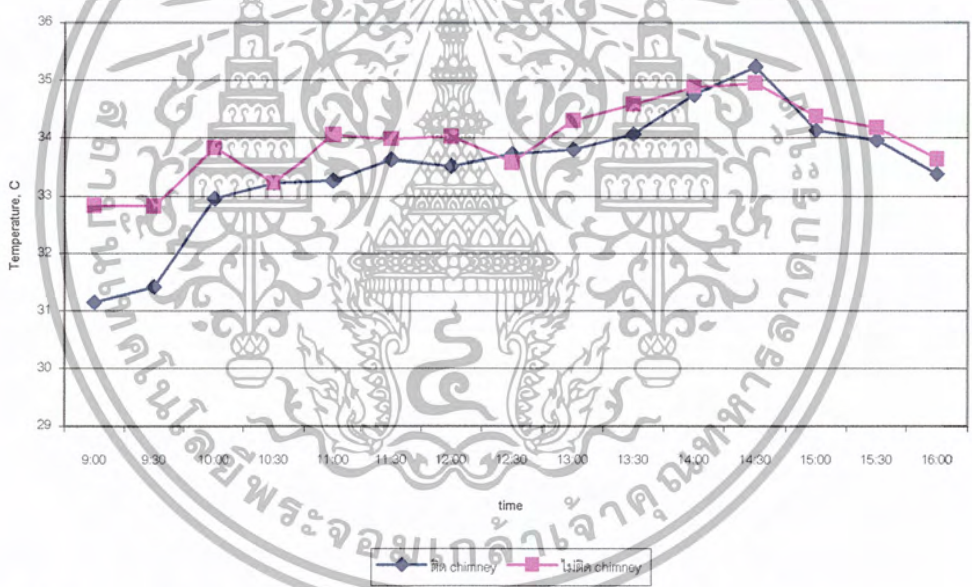
รูปที่ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และห้องที่ไม่ได้ติด พบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของช่องเปิดมีผลมากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์

รูปที่ 4-23 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ได้ติด ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกันทั้งด้านบนและด้านล่าง

รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ได้ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิต่างกัน โดยที่ด้านบนจะสูงกว่าด้านล่างและจะใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มของแสงลดลงในช่วงท้ายๆของการทดลอง

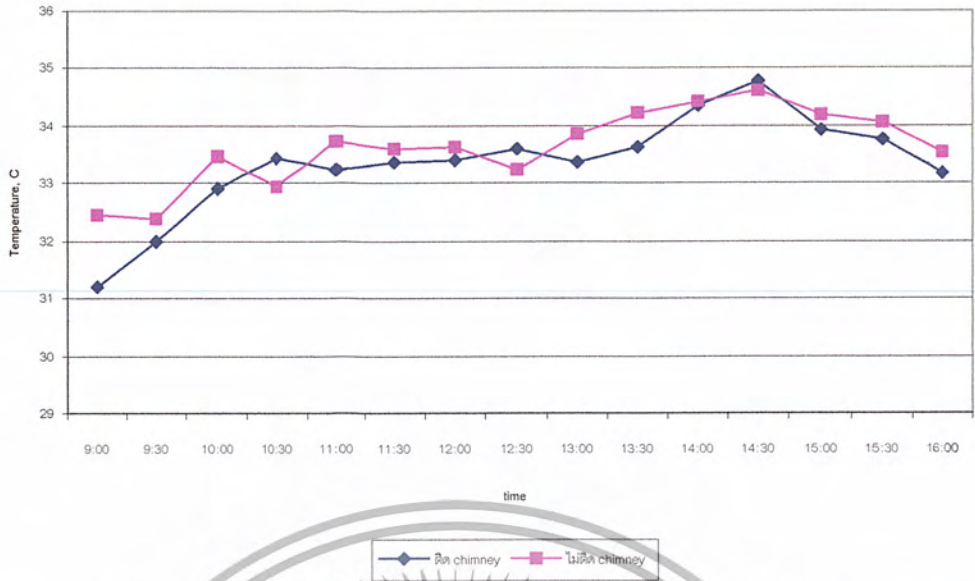


รูปที่ 4-20 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก



รูปที่ 4-21 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก

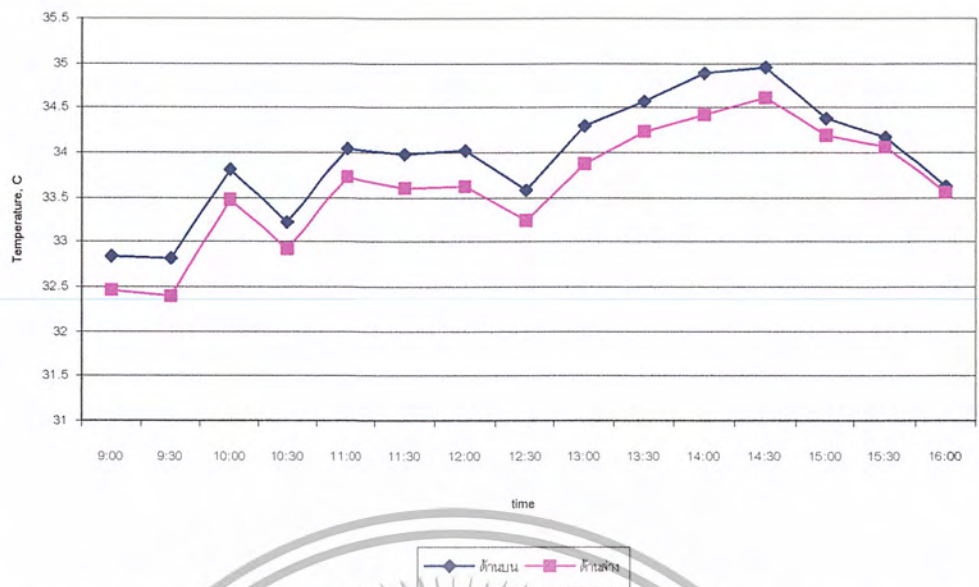
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-22 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก



รูปที่ 4-23 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก



รูปที่ 4-24 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก

4.5 การทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด



รูปที่ 4-25 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

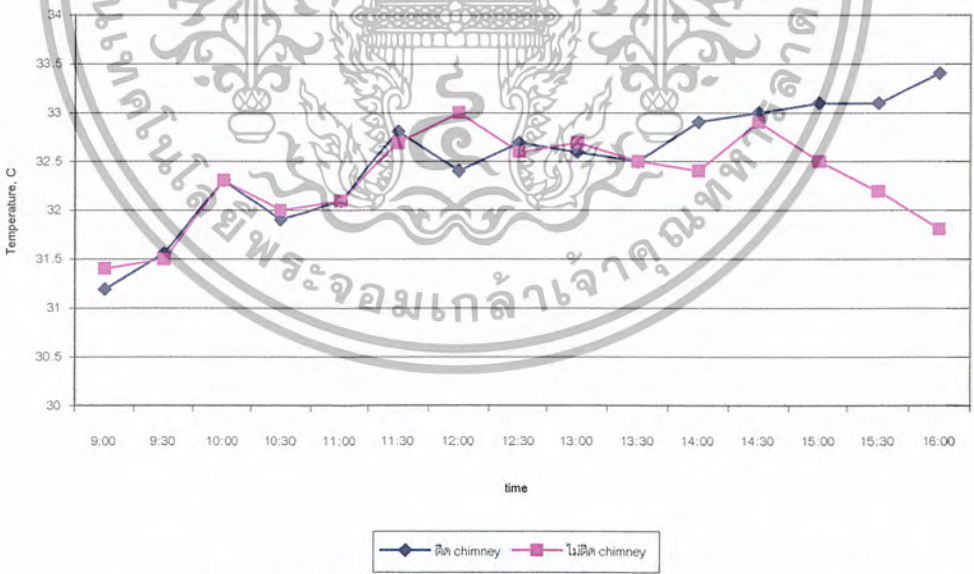
รูปที่ 4-26 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และห้องที่ไม่ได้ติด ในกรณีนี้พบว่าที่เวลาเดียวกันอุณหภูมิทั้งสองห้องไม่ต่างกันเป็นเพราะอิทธิพลของช่องเปิดขนาดใหญ่มีผลมากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์ เนื่องจากช่องเปิดขนาดใหญ่อากาศมีการไหลผ่านในปริมาณที่มากกว่าการไหลผ่านปล่องรังสีอาทิตย์ ทำให้อากาศร้อนถูกระบายออกทางช่องเปิดมากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิทั้งสองห้องใกล้เคียงกัน เพราะมีช่องเปิดที่เหมือนกัน และผลจากปล่องรังสีอาทิตย์ลดลงไป ลักษณะกราฟอุณหภูมิทั้งสองห้องเพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสงและจะลดลงเมื่อแสงมีความเข้มลดลง

รูปที่ 4-27 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และห้องที่ไม่ได้ติด จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกันมากนักเนื่องจากอิทธิพลของช่องเปิดขนาดใหญ่ ทำให้อากาศร้อนที่สะสมในบริเวณด้านบนของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ ถูกระบายออกทางช่องเปิดมากกว่าการไหลในปล่องรังสีอาทิตย์

รูปที่ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์และห้องที่ไม่ได้ติด จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิไม่ต่างกัน เพราะอากาศร้อนบริเวณด้านล่างของทั้งสองห้องถูกระบายออกทางช่องเปิด

รูปที่ 4-29 เปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างเท่ากัน เนื่องจากความร้อนที่สะสมในส่วนบนของห้องถูกระบายออกโดยปล่องรังสีอาทิตย์และช่องเปิด ทำให้อุณหภูมิด้านบนและด้านล่างในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ไม่ต่างกัน

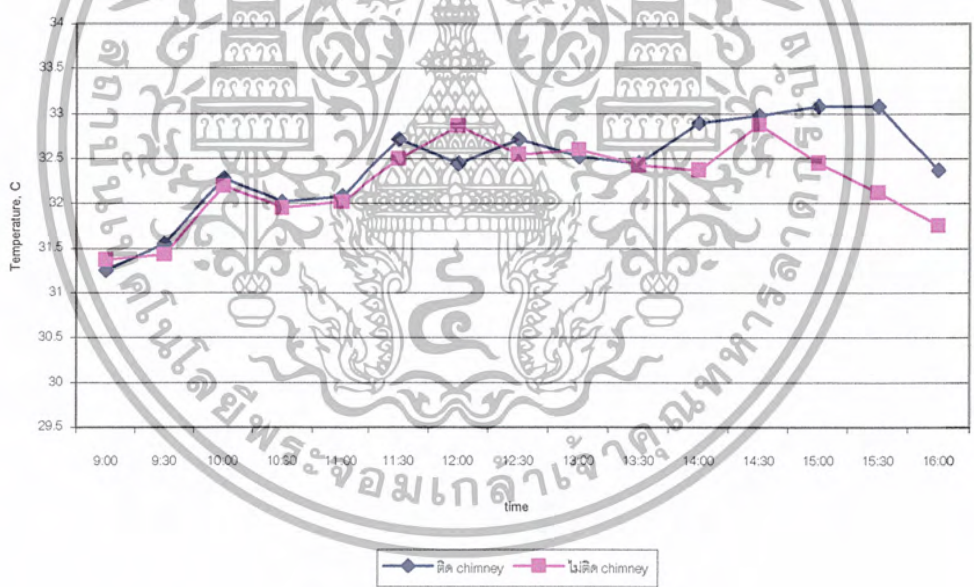
รูปที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ได้ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่าอุณหภูมิด้านบนสูงกว่าด้านล่างเล็กน้อย เพราะ ไม่มีช่องระบายด้านบนเหมือนกับห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ เหตุที่ต่างกันมาจากอากาศร้อนส่วนหนึ่งถูกระบายออกทางช่องเปิด แต่ระบายออกไม่หมด มีอากาศร้อนส่วนหนึ่งตกค้างอยู่



รูปที่ 4-26 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้าน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด



รูปที่ 4-27 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านบน กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

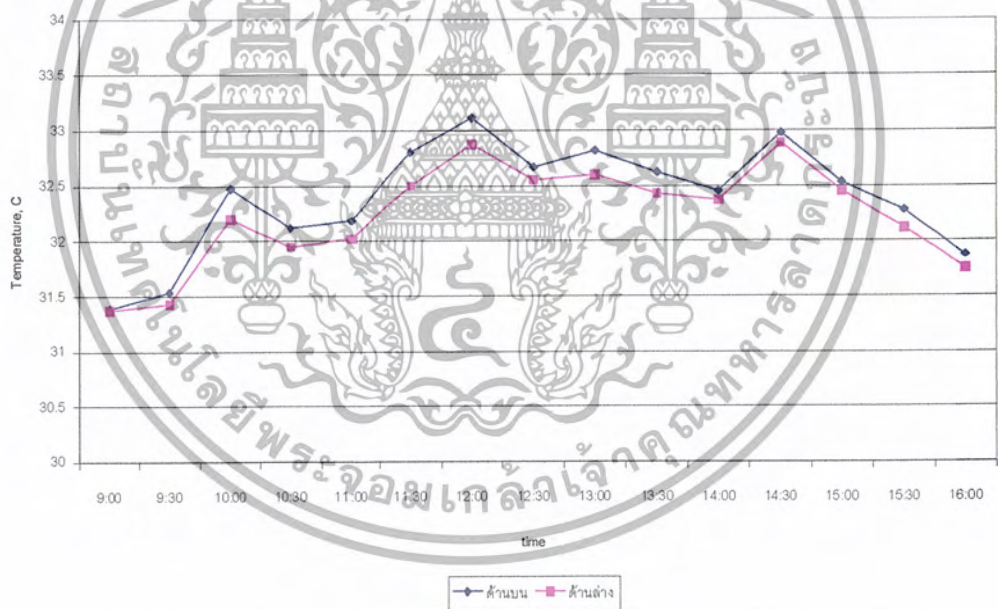


รูปที่ 4-28 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านด้านล่าง กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



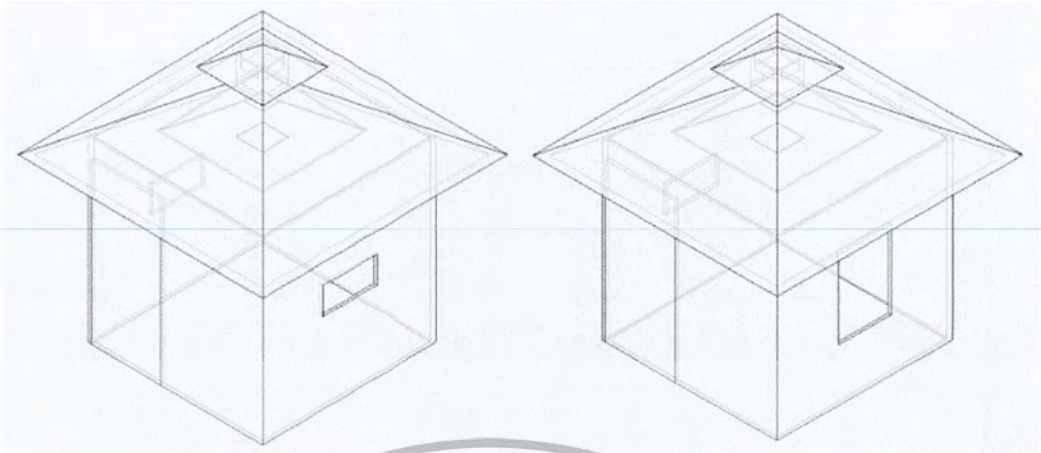
รูปที่ 4-29 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด



รูปที่ 4-30 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนกับด้านล่างของห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีเปิดทางเข้าและทางออกทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

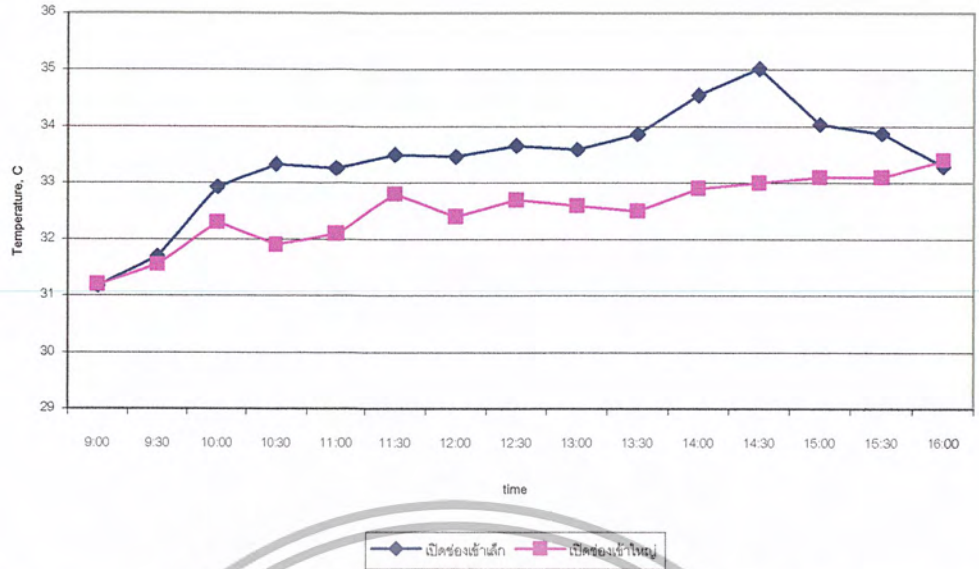
4.6 การศึกษาอิทธิพลของขนาดที่แตกต่างกันของช่องเปิดทางเข้าที่มีการเปิดทางออก



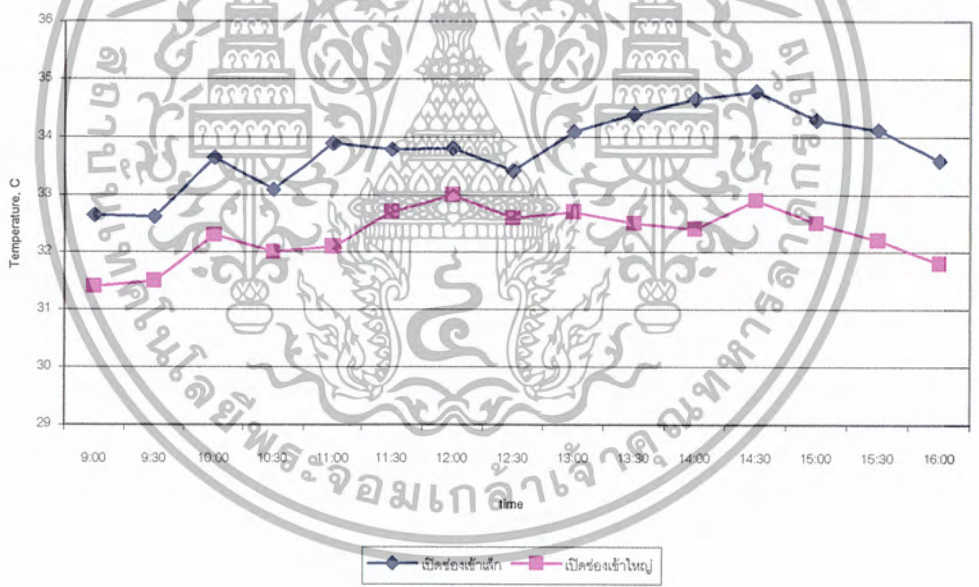
รูปที่ 4-31 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีศึกษาอิทธิพลของขนาดที่แตกต่างกันของช่องเปิดทางเข้า

รูปที่ 4-32 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของช่องเปิดในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่า อุณหภูมิเท่ากันในตอนเริ่มต้นต่อมาจะแตกต่างกัน โดยที่ช่องขนาดใหญ่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า ต่อมาความแตกต่างของอุณหภูมิจะลดลงจนเท่ากันอธิบายได้ดังนี้คือ ในช่วงแรกมีความเข้มของแสงน้อย อุณหภูมิจึงไม่แตกต่างกัน ต่อมาแสงมีความเข้มมากขึ้นทำให้ความร้อนมีมากขึ้น การระบายความร้อนระบายออกได้ไม่เท่ากันห้องที่มีช่องขนาดใหญ่ระบายได้ดีกว่าจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่า ต่อมาความเข้มของแสงลดลงทำให้อุณหภูมิลดลงจนเท่ากัน

รูปที่ 4-33 แสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของช่องเปิดในห้องที่ไม่ได้ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่า อุณหภูมิของช่องเปิดทั้งสองแตกต่างกันมาก โดยที่ช่องเปิดขนาดใหญ่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากการระบายความร้อน ได้มากกว่า



รูปที่ 4-32 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีการพิจารณาผลของช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน โดยที่เปิดทางออก



รูปที่ 4-33 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในห้องที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ กรณีการพิจารณาผลของช่องเปิดที่มีขนาดต่างกัน โดยที่เปิดทางออก

4.7 การเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการทดลองกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

พิจารณากรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออกที่เวลา 14:00 น. วันที่ 16 พฤษภาคม 2547

กำหนด

อุณหภูมิภายนอก 32.38 °C

ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า 1.05 m/s

ความเร็วของอากาศที่ทางออก 0.5 m/s

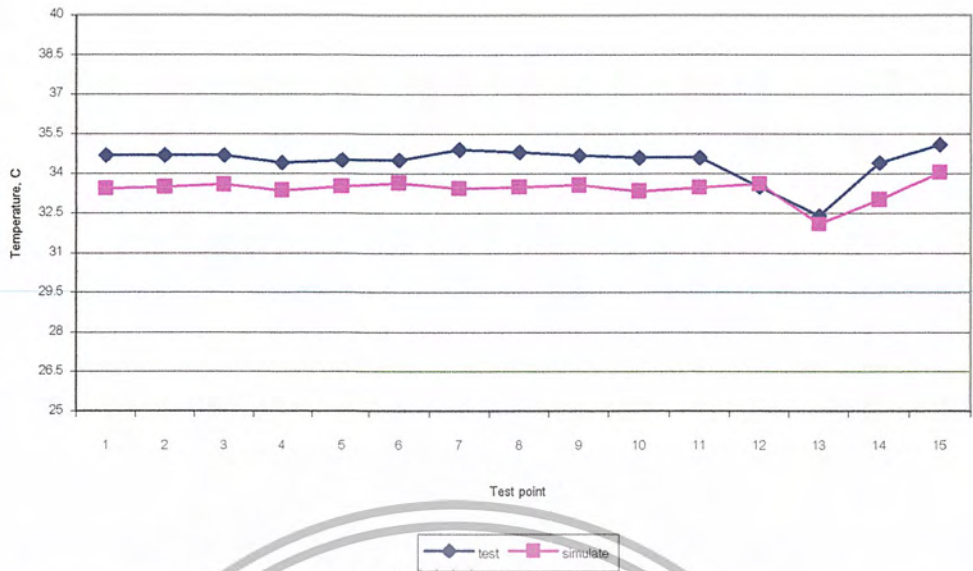
ความเร็วของอากาศที่ปล่อง 0.6 m/s



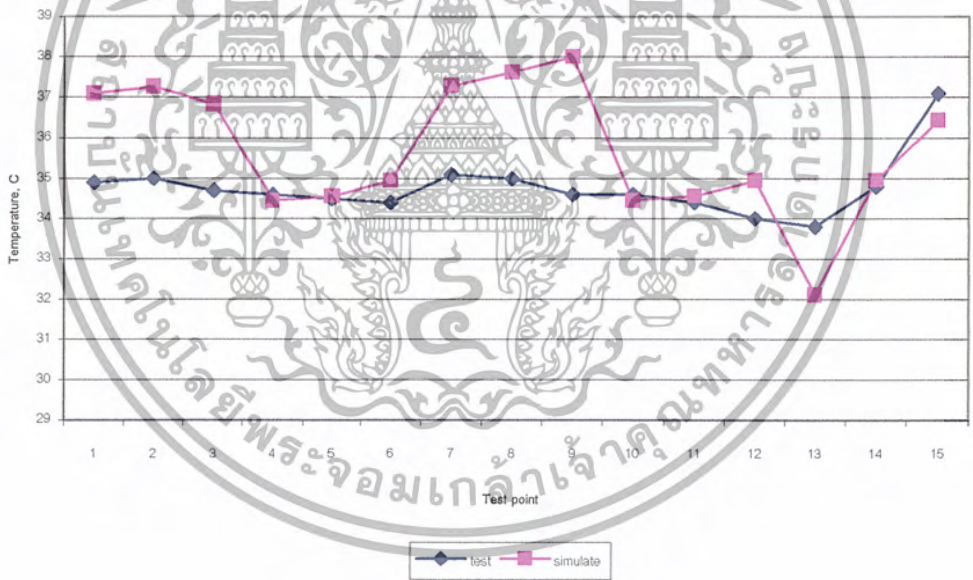
รูปที่ 4-34 แสดงลักษณะของบ้านที่ทดลองกรณีเปรียบเทียบผลการทดลองกับ โปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 4-35 ห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ลักษณะกราฟทั้ง ในการทดลองและจากโปรแกรมจะ คล้ายกัน ค่าที่ตำแหน่งเดียวกันจะไม่เท่ากันโดยที่อุณหภูมิที่ได้จาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากในการทดลองค่าความเข้มของแสง ความเร็วและทิศทางของลมไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลง ตลอดเวลา และผนังที่ใช้โฌมาเป็นฉนวนก็ไม่สามารถเป็นฉนวนได้ร้อยเปอร์เซ็นต์

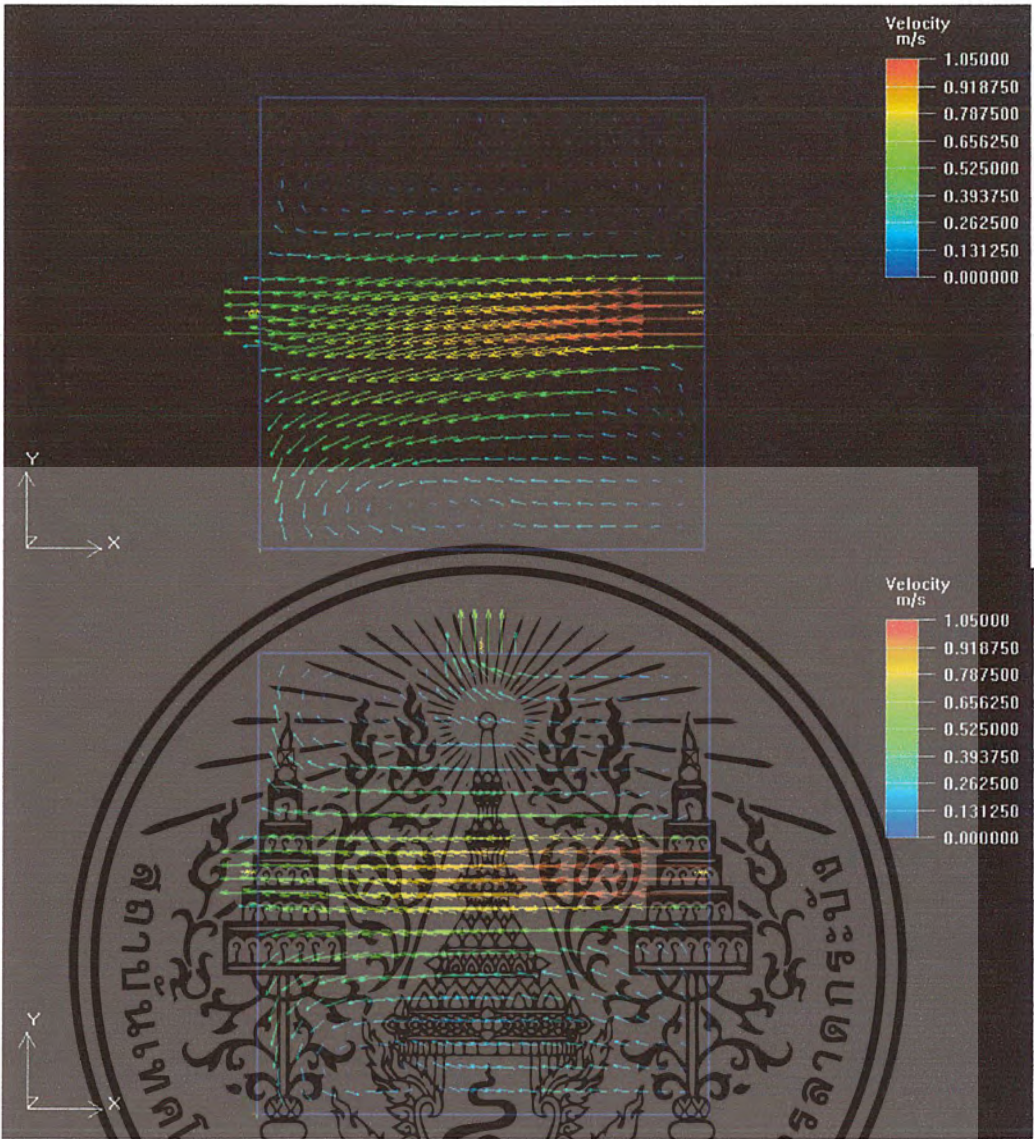
รูปที่ 4-36 ห้องที่ไม่ได้ติดปล่องรังสีอาทิตย์พบว่า กราฟมีความคลาดเคลื่อนบางจุด ค่าจากการ ทดลองมีค่าต่ำกว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุคล้ายกับห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์ และมีอุณหภูมิแตกต่างกันในแต่ละจุดด้วยเพราะอากาศร้อนจะลอยตัวขึ้นข้างบน



รูปที่ 4-35 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านจากการทำการทดลองและผลของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์

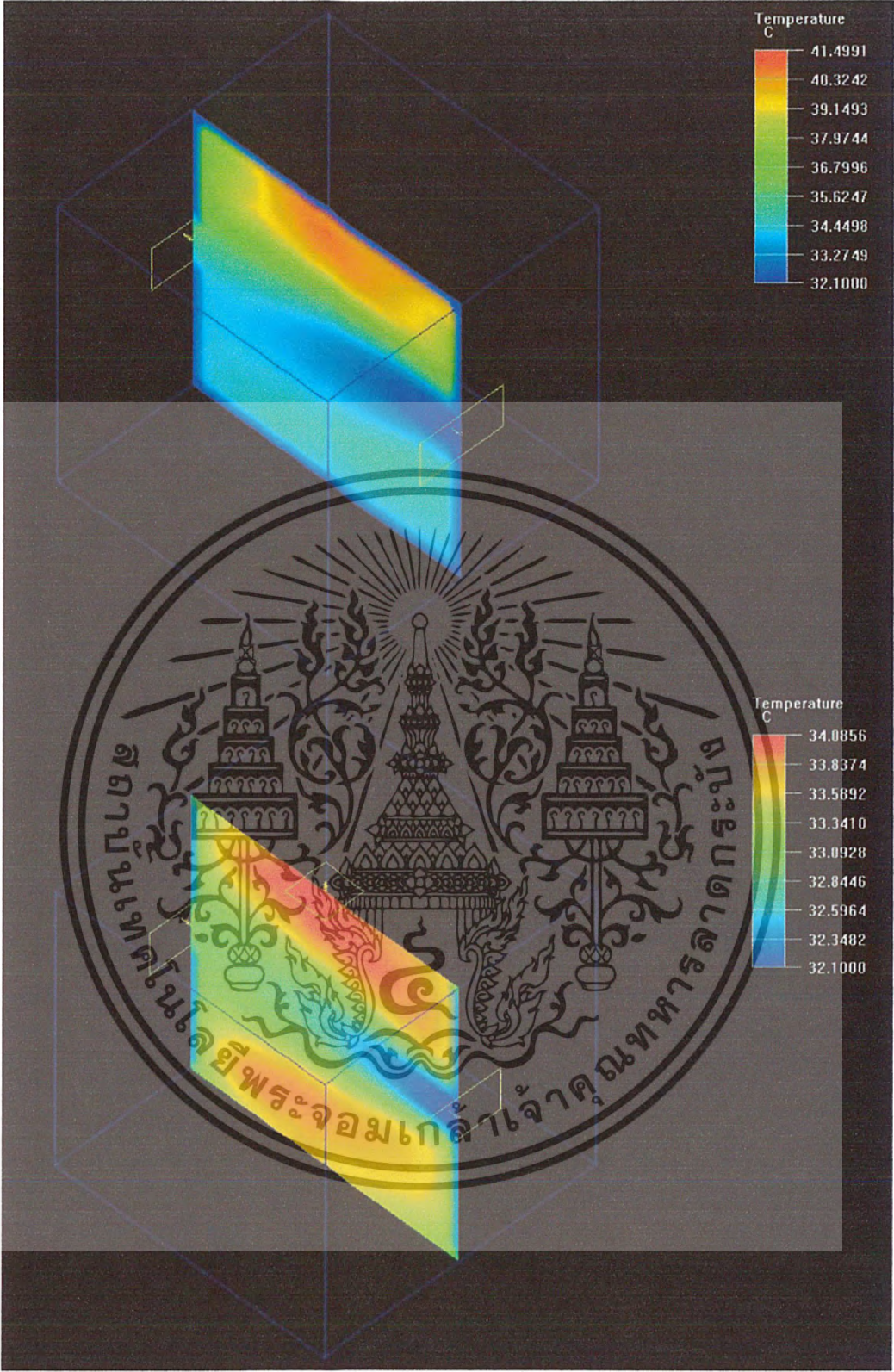


รูปที่ 4-36 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในบ้านจากการทำการทดลองและผลของแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ในหลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์



รูปที่ 4-37 แสดงเวกเตอร์ความเร็วของอากาศภายในห้องที่ติด(ล่าง)และไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์(บน)

จากรูปที่ 4-37 แสดงความเร็วของอากาศในห้องที่เปิดทางเข้าช่องกลางและทางออก เปรียบเทียบกับกันจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระหว่างห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ติด จะเห็นว่าอากาศไหลผ่านช่องเปิดเข้ามาในห้องแล้ว ส่วนหนึ่งจะผ่านช่องทางออกในความเร็วที่ค่อนข้างสูง อีกส่วนหนึ่งจะกระทบกับผนังห้องเกิดการหมุนวนของอากาศ โดยห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์จะมีการไหลวนของอากาศในลักษณะสม่ำเสมอทั้งด้านบนและด้านล่างทำให้อุณหภูมิมีความใกล้เคียงกัน ขณะที่หลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์นั้นการไหลวนจะเกิดในบริเวณด้านล่างของห้องทำให้ด้านบนร้อนกว่าด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 แสดงการกระจายของอุณหภูมิอากาศภายในห้องที่ติด(ล่าง)และไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์(บน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากการศึกษาอุณหภูมิเฉลี่ยเปรียบเทียบกันระหว่างห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์กับห้องที่ไม่ได้ติด เราจะพบว่ากรณีที่ปล่องรังสีอาทิตย์ใช้งานได้ดีคือ กรณีปิดหมด กรณีเปิดแต่ทางเข้าและปิดทางออก ส่วนในกรณีที่เปิดทั้งทางเข้าและทางออกนั้นพบว่า ช่องทางเปิดมีอิทธิพลมากกว่าปล่องรังสีอาทิตย์และสิ่งที่มีผลกับปล่องรังสีอาทิตย์คือความเข้มของแสง ซึ่งมีมากยิ่งขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของปล่องรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น ถ้ามีน้อยก็ช่วยลดความร้อนในห้องได้น้อยลง

2. เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ด้านบนและด้านล่างของห้องพบว่า กรณีเปิดทางเข้าทั้งสองกรณี (ช่องเล็กและช่องใหญ่) และกรณีที่ปิดหมดทั้งทางเข้าและทางออก ห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิต่ำกว่า ส่วนกรณีที่เปิดทางเข้าและเปิดทางออกทั้งสองกรณี (ทางเข้าเล็กและช่องใหญ่) ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิใกล้เคียงกันเนื่องจาก อิทธิพลของช่องเปิดมีผลในการระบายความร้อนมากจึงไม่เห็นความแตกต่าง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์พบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยมากในทุกกรณีที่ทำการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างของห้องที่ไม่ได้ติดปล่องรังสีอาทิตย์ พบว่าอุณหภูมิมีความแตกต่างกันชัดเจนในทุกกรณีที่ทำการทดลอง โดยที่ด้านบนจะมีอุณหภูมิร้อนกว่าด้านล่าง

3. เมื่อพิจารณาขนาดของช่องเปิดในกรณีที่เปิดทั้งทางเข้าและทางออกทั้งสองกรณี (ช่องเปิดขนาดเล็กและใหญ่) พบว่าในห้องที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์มีอุณหภูมิในช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายใกล้เคียง ส่วนในช่วงกลางจะมีความต่างกันช่องขนาดใหญ่กว่าจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเพราะระบายความร้อนได้ดีกว่า (อากาศถ่ายเทตามช่วงได้มากกว่า) ส่วนในห้องปิดจะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในช่องเปิดอากาศเข้าขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยช่องขนาดใหญ่จะมีอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องมาจากระบายอากาศได้มากกว่าเพราะช่องมีขนาดใหญ่

4. การทดลองวัดอุณหภูมิภายในห้องที่มีการติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์ จะพบว่าอุณหภูมิจะลดลงสูงสุดประมาณ 2 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับห้องที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าว

5. การสร้างบ้านเรือนในปัจจุบันมีการสร้างเกือบจะชิดติดกัน จึงทำให้ไม่สามารถนำอิทธิพลของลมมาใช้ในการลดการสะสมความร้อนและการระบายอากาศได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นการประยุกต์ใช้หลักการของปล่องรังสีอาทิตย์ในการลดความร้อนและการระบายอากาศแบบธรรมชาติจึงมีความเหมาะสมกับประเทศไทย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การใช้ปล่องรังสีอาทิตย์กับบ้านพักอาศัยมีสิ่งควรพิจารณาดังนี้

1. การติดตั้งปล่องรังสีอาทิตย์นั้นควรระวังเรื่องการรั่วซึมของน้ำบริเวณรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คัดตั้งกันสาดและตะแกรงที่ช่องทางออกของปล่องรังสีอาทิตย์เพื่อแก้ปัญหาเรื่องฝนและแมลง
3. ความสะอาดของอากาศบริเวณรอบๆ บ้าน หากอากาศไม่สะอาดจะเกิดปัญหาฝุ่นผงขึ้นในบ้านมีมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ก. ข้อมูลผลการทดลอง

ข. ข้อมูลอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก-1 อุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้กรณีเปิดทางเข้าและทางออก วันที่ทดลอง 14 พฤษภาคม 2547

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
จุดวัดหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	1	32.2	32.1	32.9	33	33.1	33.8	35.4	34.8	35.8	35.5	35	36.8	34.2	35.6	38.2
	2	32.1	31.9	32.8	32.8	32.9	34	35.4	34.1	35.6	35.8	35.7	36.6	33.6	34.4	38.1
	3	32.1	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	35.4	33.8	34.5	34.1	36	36.7	33.9	36.8	37.5
	4	32.1	32.1	32.8	32.9	33	33.8	35.1	34.1	35.2	34.6	35.8	36.5	34.1	37.3	37.8
	5	32.1	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	35	33.9	34.1	33.8	35.6	36.5	33.6	36.8	37.6
	6	32	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	34.1	33.9	34.1	33.9	35.7	36.5	33.6	36.2	35.9
	7	32.1	32	32.8	32.9	33	33.9	34.3	34.1	35.5	34.5	36	36.8	33.9	37.4	38
	8	32.1	32	32.8	32.9	33	33.8	34.2	34	35.3	34.3	36	36.7	33.7	37.5	37.9
	9	32.1	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	34	33.8	34	33.8	35.8	33.9	33.6	37.3	33.5
	10	32	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	33.9	33.8	34	33.8	33.7	33.9	33.6	33.4	33.6
	11	32	32	33	32.8	33	34.1	34.1	34.5	35.2	35.4	35.6	34.1	33.8	37	37.4
	12	32.1	32	33.1	32.8	32.9	34.1	34	34.1	35	35.2	35.6	34	33.9	37	37.5
	13	32	31.9	33	32.8	32.9	34.3	34.1	34.1	34.3	35.7	34	34	33.8	36.8	33.9
	14	32	31.9	32.8	32.8	32.9	33.6	33.9	33.8	34	33.9	33.7	33.9	33.8	33.4	33.5
	15	32.1	32	33.1	32.8	33	33.7	34.1	35.1	34.5	36.2	34.2	34.1	34.8	37.4	34
จุดวัดหลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	1	32	32.9	34.5	34.6	34.7	35.4	36.2	36.4	35.6	36.7	36.4	36.3	36.3	36.3	36.4
	2	33	32.7	34.5	34.6	34.7	35.4	36.3	36.5	35.6	36.7	36.5	36.6	36.3	36.4	36.4
	3	32.4	32.6	34.5	34.5	34.7	35.4	36.2	36.5	35.6	36.7	36.5	36.6	36.3	36.4	36.3
	4	32.9	32.6	34.3	34.4	34.6	35.2	36	36.2	35.3	36.3	36.2	36.3	36	35.9	36
	5	32.9	33.2	34.3	34.4	34.5	35.2	35.9	36.2	35.2	36.3	36.1	36.3	36	35.8	36
	6	33	32.8	34.3	34.4	34.6	35.1	35.9	36.1	35.2	36.3	36.1	36.2	36	35.8	36
	7	33.2	33.2	34.5	34.6	34.8	35.5	36.3	36.6	35.6	36.7	36.5	36.6	36.4	36.3	36.4
	8	32.4	32.7	34.4	34.5	34.6	35.3	36.1	36.3	35.5	36.5	36.4	36.4	36.3	36.2	36.3
	9	32.2	33.2	34.4	34.4	34.6	35.2	36	36.1	35.4	36.4	36.2	36.3	36.2	36.2	36.1
	10	32.2	33.2	34.3	34.4	34.5	35.2	36	36.2	35.3	36.4	36.1	36.3	36	35.9	36.1
	11	32.3	33.2	34.3	34.4	34.5	35.1	35.9	36.1	35.2	36.3	36.2	36.2	36	35.9	36
	12	32.5	32.9	34.2	34.3	34.5	35.1	35.9	36.1	35.2	36.3	36.1	36.2	36	35.9	36
	13	32.8	33.2	34.2	34.4	34.6	35.1	35.9	36.2	35.3	36.4	36.2	36.3	36.1	36	36.1
	14	32.6	33.3	34.4	34.5	34.7	35.3	36.2	36.5	35.5	36.6	36.5	36.6	36.4	36.2	36.3
	15	33	33.4	34.4	34.7	34.9	35.5	37	37.6	36.6	37.8	37.7	37.7	37.8	37.7	37.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-2 อุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและปิดทางออก วันที่ทดลอง 15 พฤษภาคม 2547

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
จุดวัดหลังที่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	30.4	30.9	31.5	31.8	33	32.9	33.3	33.3	33	33.2	34.1	33.5	34	33.1	33
	2	30.4	30.9	31.3	32.1	32.7	33	33.5	33.5	33.1	33.2	34.2	33.7	34.1	33.2	33.1
	3	30.3	30.8	31.8	32.5	32.7	32.7	33.6	33.4	33.1	33.4	34.2	33.7	33.9	33.3	33.2
	4	30.5	30.9	31.1	31.8	32.5	32.7	33.1	33.2	32.8	33.1	33.9	33.6	33.7	33	33
	5	30.1	30.5	31.2	32	32.5	32.7	33.6	34	32.9	33.1	33.8	33.6	33.8	33.1	33
	6	30.3	30.7	31.2	32.9	32.5	32.7	33.7	34	32.9	33.2	33.7	33.7	33.8	34.3	33
	7	30.4	30.9	31.3	32.2	32.7	33	33.3	33.6	33.3	33.2	34	33.8	34.2	33.1	32.9
	8	30.2	30.7	31.5	32.2	32.7	32.9	33.2	33.5	33	33.2	33.9	34.2	34.3	33.2	33
	9	31.5	32	31.3	32.9	33.5	32.7	31.7	35	34.4	31	35	35	35.6	33	33
	10	31.5	32	32	32.9	33.4	32.6	34.8	35	34.4	33	33.4	33.6	33.3	32.9	33.3
	11	30.4	30.7	31.1	32.2	33.1	32.7	33.1	34.6	33	33	33.5	33.7	33	33.1	33.2
	12	30.6	30.9	31.1	32.4	33.2	32.4	33.3	34.7	33.1	33	33.4	33.6	33.2	33	32.8
	13	30.8	31.1	31.4	32.8	33.3	33	33.9	34.8	33.2	32.5	32.6	33.6	32.5	32.5	32.4
	14	31.6	32	31.2	32.9	33.5	34	32.9	35	34.6	33.1	34.8	33.7	33.3	33.3	33.2
	15	30.5	31.1	31.3	32.6	33.2	33.3	35.3	34.8	33.1	33.1	33.8	34.2	33.6	33.2	33.3
จุดวัดหลังที่ไม่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	32.6	33.1	33.1	34.3	34.2	35	35.5	35	34.5	34.7	35.1	34.5	35	33.9	33.7
	2	33.1	33.5	33.3	34.2	34.7	35	35.5	35	34.5	34.8	35.4	34.9	34.9	34.1	33.7
	3	33.3	33.6	33.6	34.4	34.7	35	35.7	35	34.4	34.7	35.6	35.1	34.8	34.1	33.7
	4	32.1	32.6	32.9	33.4	33.7	34.3	34.7	34.6	34.2	34.3	34.9	34.5	34.5	33.7	33.5
	5	32.3	32.7	32.9	33.4	33.9	34.3	34.7	34.6	34.2	34.4	34.9	34.6	34.5	33.9	33.6
	6	32.2	32.8	32.9	33.5	33.9	34.4	34.7	34.7	34.2	34.5	35	34.7	34.4	33.9	33.5
	7	33.5	33.9	33.6	34.5	34.4	35.2	35.7	35.3	34.6	35	35.9	35	35.2	34.1	33.9
	8	33.5	33.8	33.7	34.5	34.6	35.2	35.8	35.3	34.5	34.9	36.1	35	35.1	34.3	33.9
	9	33.3	33.7	33.8	34.5	35	35.2	35.8	35	34.4	34.7	36	35	34.9	34.3	34
	10	32.3	32.8	33	33.6	33.9	34.4	34.7	35.7	34.6	34.4	35	34.4	34.8	33.8	33.5
	11	32.4	32.7	33.2	33.3	33.8	34.4	34.6	34.9	34.3	34.3	35.1	34.5	34.5	33.8	33.6
	12	32.2	32.8	33.1	33.5	33.8	34.3	34.7	35	34.3	34.4	35	34.5	34.4	33.9	33.6
	13	32.1	32.5	32.6	33.5	33.9	34	34.8	34.3	33.6	34.1	34.9	34.2	34	34	33.2
	14	32.8	33.2	33.4	33.4	33.9	34.7	35.1	35.1	34.7	34.7	35.2	34.6	34.8	34.4	33.8
	15	34.5	34.7	34.9	35.8	36.3	37.2	37.6	37.2	36.3	36.4	37.8	37.4	37.5	36.8	35.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 อุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้กรณีเปิดทางเข้าช่องกลางและเปิดทางออกวันที่ทดลอง 16 พฤษภาคม 2547

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
จุดวัดหลังที่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	31.2	31.9	32.6	32.8	33.2	33.6	33.3	34	33.8	34.2	34.7	35.2	34.4	34	33.6
	2	31.1	31.8	32.8	32.4	33.2	33.8	33.3	34.2	33.9	34.1	34.7	35.4	34	34.1	33.5
	3	31.1	31.7	32.9	33.6	33.1	33.7	33.3	33.3	33.9	34	34.7	35.3	34.2	34.1	33.5
	4	30.9	31.5	32.7	33.2	32.8	33.6	33.3	33.3	33.7	33.7	34.4	35.1	34	33.8	33.3
	5	31.2	31.4	32.8	33.7	32.7	33.2	33.3	33.3	33.8	33.7	34.5	35.3	34.1	33.8	33.4
	6	29.7	32.8	32.7	33.8	33.8	33.4	33.6	33.4	33	33.6	34.5	35.3	33.9	33.5	33.2
	7	31.1	31.5	33	33.3	33.2	33.5	33.5	33.3	34	34	34.9	35.3	34	33.7	33.3
	8	31.2	31.4	32.8	33.4	33.1	33.4	33.6	33.3	33.9	33.8	34.8	35.1	33.9	33.7	33.2
	9	31.2	30.2	33.6	33.8	33.8	33.8	34.1	34.2	33.3	34.3	34.7	35.1	34.3	34.1	33.2
	10	33.2	33.7	33.6	33.8	33.8	33.8	34.1	34.2	33	34	34.6	34.5	33.8	33.9	32.9
	11	31.1	31.3	33.1	33	33.1	33.2	33.2	33.8	33.5	33.5	34.6	34.5	33.8	33.8	33.1
	12	31.1	31.2	32.5	33.1	33.3	33	32.9	33.6	33.3	33.4	33.5	34.1	33.9	33.9	33.1
	13	31.1	31.5	32.6	33.4	32.5	32.8	32.9	33.6	33.4	33.2	32.4	33.8	33.4	33.4	32.9
	14	31.1	31.9	33.5	33.7	33.8	33.7	33.6	34.2	33.6	33.9	34.4	34.9	34.4	34.4	33.5
	15	31.6	33	32.9	33.7	33.7	34.4	34.5	33.8	34.3	35.1	35.1	35.5	34.2	34.4	33.8
จุดวัดหลังที่ไม่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	32.8	33.1	34	33.4	34.1	34.1	34	33.8	34.2	34.5	34.9	35.3	34.4	34	33.5
	2	32.9	32.8	33.7	33.3	34	34	34.1	33.8	34.3	34.5	35	35	34.5	34.1	33.6
	3	32.6	32.6	33.7	32.9	34	33.8	34.2	33.6	34.3	34.4	34.7	34.8	34.3	34.2	33.7
	4	32.6	32.6	33.5	32.9	33.7	33.5	33.9	33.4	34	34.2	34.6	34.7	34.5	34.2	33.6
	5	32.5	32.4	33.6	33	33.8	33.6	33.8	33.2	34.1	34.2	34.5	34.6	34.5	34	33.6
	6	32.4	32.4	33.5	32.8	33.8	33.6	33.6	33.2	34	34.2	34.4	34.5	34.5	34.1	33.6
	7	33	32.8	33.8	33.5	34.3	34.1	34.2	33.6	34.4	34.7	35.1	35.2	34.5	34.2	33.6
	8	32.8	32.8	33.8	33.2	34	34	34	33.4	34.3	34.6	35	34.8	34.3	34.2	33.7
	9	32.9	32.8	33.9	33	33.9	33.9	33.6	33.3	34.3	34.8	34.6	34.6	34.2	34.3	33.7
	10	32.5	32.4	33.4	33.1	33.7	33.7	33.8	33.4	34	34.3	34.6	34.9	34.1	34.1	33.5
	11	32.5	32.3	33.4	33	33.7	33.6	33.7	33.4	34.1	34.2	34.4	34.7	33.9	34.1	33.5
	12	32.2	32.3	33.4	32.8	3.7	33.6	32.9	32.9	33.1	34.3	34	34.3	33.8	33.9	33.5
	13	31.1	31.4	32.9	33.1	33.7	33.2	32.2	32.6	32.2	34.4	33.8	34.3	34.3	33.6	32.8
	14	32.9	33.2	34.1	34.2	34.2	34.3	34	33.8	33.9	34.9	34.8	35.5	34.3	34.6	33.4
	15	34.1	34.2	35.6	35.8	36.3	35.9	35.5	35.3	35.6	37.6	37.1	37.2	36.7	36.3	35.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-4 อุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและปิดทางออก วันที่ทดลอง 18 พฤษภาคม 2547

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
จุดวัดหลังที่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	31.7	31.9	32	32.3	32.5	32.8	32.5	32.3	32	33	34	33.2	33.3	33.8	33.1
	2	31.7	31.9	32.1	32.4	32.6	32.8	32.6	32.4	32.3	33.1	33.8	33.2	33.5	33.8	32.8
	3	31.7	32	32.1	32.5	32.7	32.9	32.6	32.5	32.4	33.2	33.7	33.3	33.6	33.9	33.1
	4	31.7	31.7	31.8	32.2	32.6	32.7	32.3	32.3	32.2	32.9	33.4	33.1	33.1	33.3	32.8
	5	31.3	31.8	32	32.4	32.7	32.6	32.4	32.3	32.3	33.1	33.3	33.2	33.3	33.3	33
	6	31.4	31.8	31.9	32.6	32.8	32.7	32.6	32.6	32.4	33.1	33.3	33.3	33.4	33.5	33.1
	7	31.5	32	31.9	32.4	33	32.7	32.5	32.7	32.2	33.2	33.5	33.3	33.3	33.4	33
	8	31.2	32	31.9	32.4	32.9	32.5	32.4	32.8	32.2	33	33.5	33.3	33.3	33.5	33
	9	30.5	32	32.1	32.5	32.8	32.4	32.4	32.3	32.3	33	33.4	33.2	33	33.6	33
	10	31	31.6	31.7	32.3	32.6	32.2	32.2	32.5	32.3	32.9	33.2	32.8	33.1	33.3	32.6
	11	31.1	31.5	31.7	32.3	32.5	32.2	32.1	32.4	32.2	32.9	33.2	32.8	33	33.3	32.7
	12	31.1	31.6	31.8	32.4	32.5	32.2	31.8	32.4	32.6	32.8	33.1	32.8	32.6	33.4	32.7
	13	31.1	31.9	32	31.8	32.8	31.6	31.4	32.5	32.7	32.5	33	32.2	33.3	33.3	32.5
	14	31.4	31.7	32.1	32.2	32.8	32.3	32.3	32.5	33.2	33	33.8	33	33.4	33.8	33
	15	31.5	31.8	32.2	32.3	32.8	32.4	32.2	33	33	33.1	33.6	32.9	33.6	34.7	33.4
จุดวัดหลังที่ไม่เปิดปล่องรังสีอาทิตย์	1	32.9	32.5	33	33.3	33.6	33.1	32.9	33.2	32.9	33.2	33.9	33.3	33.7	33.8	33.2
	2	32.8	32.8	33	33.3	33.7	33.2	33	33.3	32.9	33.2	34	33.4	33.8	33.9	33.3
	3	33	32.9	33.1	33.4	34	33.3	33	33.1	33	33.3	34.1	33.4	33.5	30.1	33.3
	4	32.4	32.5	32.7	33	33.5	33.2	32.8	33.1	32.9	32.9	33.7	33.3	33.6	33.8	33.2
	5	32.4	32.5	32.6	33.2	33.6	33.2	32.9	33.2	33	33	33.8	33.3	33.6	33.8	33.2
	6	32.2	32.5	32.6	33.2	33.5	33.3	32.9	33	33	33.1	33.7	33.3	33.7	33.9	33.2
	7	32.6	32.8	32.9	33.2	33.7	33.3	33.3	33.7	33	33.3	33.9	33.7	33.6	33.9	33.6
	8	32.6	32.8	32.8	33.1	33.5	33.3	33.1	33.7	32.9	33.2	33.8	33.5	33.6	33.8	33.5
	9	32.6	32.8	32.9	33.2	33.9	33.4	32.9	33.5	33	33.3	33.9	33.6	33.5	34	33.5
	10	32.2	32.6	32.5	33	33.3	33.1	33.1	33.1	32.8	32.9	33.6	33.4	33.7	33.7	33.2
	11	32.1	32.7	32.6	33.1	33.5	33.2	33.2	33.2	32.9	33	33.7	33.5	33.6	33.7	33.3
	12	31.9	32.7	32.6	33	33.6	33	33.1	33.2	32.9	33	33.6	33.4	33.4	33.9	33.3
	13	32	32.8	31.7	32.8	32.5	32.3	32.2	32.7	32.5	31.6	33.1	32.7	33.8	33.3	32.9
	14	32.5	32.9	32.8	33.1	33.4	33	33	33.4	33	33	33.8	33.7	33.8	34.1	33.5
	15	34.1	34.4	34.6	35.1	36.1	35.4	34.9	35.7	35.4	34.7	36.5	35.9	35.9	36.5	35.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 อุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้กรณีเปิดทางเข้าทั้งหมดและเปิดทางออก วันที่ทดลอง 19 พฤษภาคม 2547

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
จุดวัดหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	1	31.1	31.3	32.3	31.5	31.8	32.9	32.5	32.7	32.4	32.4	32.8	32.8	33.1	33.2	32.5
	2	31.2	31.2	32.4	31.5	32.2	33	32.5	32.9	32.6	32.5	32.7	33.1	33	33	32
	3	31.3	31.6	32.4	31.5	32.3	33	32.5	32.3	32.5	32.7	33	33	33	33.1	32.4
	4	31	31.5	32	31.5	31.9	32.8	32.2	32.2	32.4	32.2	32.7	32.8	32.7	32.8	32
	5	31.1	31.7	32.2	31.6	32.4	32.8	32.3	32.9	32.4	32.4	32.9	33.1	33.1	33.3	32.8
	6	31.1	31.9	32.4	32.5	32.6	32.9	32.1	32.9	32.9	32.7	33	33.2	33.2	33.3	32.8
	7	31	31.6	32.2	31.5	32	33	32.3	32.5	32.6	32.3	33	32.9	33.2	33.2	32.2
	8	30.9	31.7	32.2	31.9	32.1	32.9	32.3	32.8	32.7	32.4	33	33	33.3	33.2	32.5
	9	31.9	32	32.4	32.6	32.7	32.8	32.3	32.9	32.9	32.9	33	33.2	33.3	33.3	32.8
	10	31.4	31.5	32.4	32.4	32.2	32.6	32.8	32.7	32.9	32.9	33	33	33.3	33.3	32.6
	11	31.4	31.4	32.3	31.9	31.7	32.6	32.7	32.8	32.4	32.3	32.9	32.9	33.2	33.1	31.9
	12	31.5	31.3	32.4	32.2	31.7	32.6	32.6	32.8	32.1	32.2	32.9	32.9	33	32.7	32.1
	13	31.4	31.6	32.4	32	32.4	32.8	32.6	32.8	32.2	32.3	32.6	33	32.6	32.5	32.2
	14	31.8	31.9	32.4	32.8	32.6	33	32.8	32.9	32.3	32.6	32.9	33.3	33.3	33	32.8
	15	31	31.6	32.5	31.9	31.9	32.8	32.8	32.7	32.4	32.6	32.6	33.1	33.1	32.1	32.1
จุดวัดหลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์	1	31.4	31.5	32.6	32.3	32.3	32.9	32.9	32.6	32.9	32.6	32.3	33	32.2	32.6	32.1
	2	31.3	31.5	32.7	32.3	32	32.7	33	32.5	32.9	32.6	32.4	33	32.4	32.3	31.9
	3	31.3	31.5	32.5	32.3	32.3	32.7	33.1	32.6	32.8	32.6	32.5	32.9	32.5	32.2	31.9
	4	31.4	31.4	32.4	32.2	32.1	32.5	32.9	32.5	32.6	32.4	32.3	32.9	32.2	32.1	31.8
	5	31.4	31.5	32.5	32.1	32.1	32.7	33	32.6	32.6	32.5	32.4	33	32.3	31.9	31.8
	6	31.3	31.5	32.2	31.8	32.1	32.7	33	32.6	32.6	32.4	32.3	32.8	32.4	32.1	31.8
	7	31.5	31.7	32.4	31.9	32.2	32.9	33.3	32.8	32.9	32.7	32.5	33	32.6	32.2	31.8
	8	31.4	31.5	32.3	31.9	32.1	32.8	33.2	32.7	32.8	32.6	32.5	33	32.6	32.2	31.8
	9	31.4	31.5	32.3	32	32.2	32.8	33.2	32.8	32.6	32.6	32.5	33	32.9	32.2	31.7
	10	31.5	31.5	32.1	31.9	32	32.5	32.8	32.6	32.6	32.5	32.4	32.9	32.8	32.2	31.7
	11	31.3	31.5	32.1	31.9	31.9	32.4	32.8	32.6	32.7	32.6	32.4	32.9	32.5	32.2	31.7
	12	31.3	31.2	31.9	31.8	31.9	32.2	32.7	32.4	32.5	32.2	32.4	32.8	32.5	32.2	31.7
	13	31.2	31.1	32	31.7	31.1	32	32.1	31.9	32	32.1	32.7	31.7	32.3	32.1	31.5
	14	31.7	31.7	32.6	32.8	32	32.6	32.6	32.7	33.1	32.7	33	32.5	33	32.3	32
	15	32.1	32.2	33.2	33.2	33	33.4	33.8	34	34	34.2	34.4	34.1	34	33.6	33.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-6(ต่อ) ความเร็วลมที่ช่องเปิด อุณหภูมิบรรยากาศ ความเร็วลมและทิศทางที่ลมพัดเข้าหาบ้าน

เวลา		9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
เปิดทางทั้งหมดและเปิดทางออก	1*	0.8	0.6	0.3	0.6	0.2	0.5	1.2	1.3	0.9	0.7	1	1	0.6	1	0.8
	2*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3*	0.4	0.6	0.4	0.8	1	0.6	0.9	0.8	0.6	1.9	1.3	0.3	0.6	0.8	0.3
	4*	0.6	0.8	0.7	0.2	1	0.6	1.4	1	1.2	1.3	1.1	0.5	0.3	1.5	0.7
	5*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	T	31	31.7	31.5	31.6	32.3	31.5	31.1	32.3	32.4	31.3	32.8	32.1	33	33.1	32.3
	V	2	2	2	1.5	2	1	2.5	2.5	5	3	2.5	2	2.5	2.5	2.5
	D	S	SW	S	SW	S	SW	S	S	S	S	S	SW	SW	S	S
เปิดทางทั้งหมดและเปิดทางออก	1*	1.6	0.5	0.6	0.8	0.6	2.3	0.3	0.6	0.8	0.8	1.7	0.4	1.5	1.2	0.6
	2*	1.5	0.2	0.2	0.6	0.4	1.4	0.5	0.5	0.2	0.6	1.3	0.1	0.6	0.5	0.5
	3*	2.3	1.2	1.1	1.3	2.7	0.7	0.4	1.3	1.1	2.2	2	0.8	1.1	1	1
	4*	1.7	0.7	3.2	1.2	4	2.7	2.3	1.1	1.2	1.1	1.7	0.9	1.9	1.3	0.4
	5*	0.4	0.4	0.7	0.8	2.1	0.8	0.4	0.7	0.2	0.6	1	2.7	1.6	0.5	1.6
	T	31	30.2	31.8	31.5	30.9	31.7	31.9	31.7	31.8	32	32.4	31.5	32.1	31.9	31.4
	V	2.5	4	4.5	5	5.5	5.5	5.7	6	6.5	6.5	5	4.5	6	5	7
	D	S	S	S	S	S	S	SW	S	S	S	S	S	S	S	S

หน่วย อุณหภูมิ (°C), ความเร็วลม (m/s)

1*, 2* และ 3* คือ ความเร็วลมที่ช่องทางเข้า, ช่องทางออก และปล่องรังสีอาทิตย์ตามลำดับ ของบ้านหลังที่ติดปล่องรังสีอาทิตย์

4* และ 5* คือ ความเร็วลมที่ช่องทางเข้าและช่องทางออกตามลำดับ ของบ้านหลังที่ไม่ติดปล่องรังสีอาทิตย์

T, V และ D คือ อุณหภูมิบรรยากาศ, ความเร็วลม และทิศทางที่ลมพัดเข้าหาตัวบ้านตามลำดับ

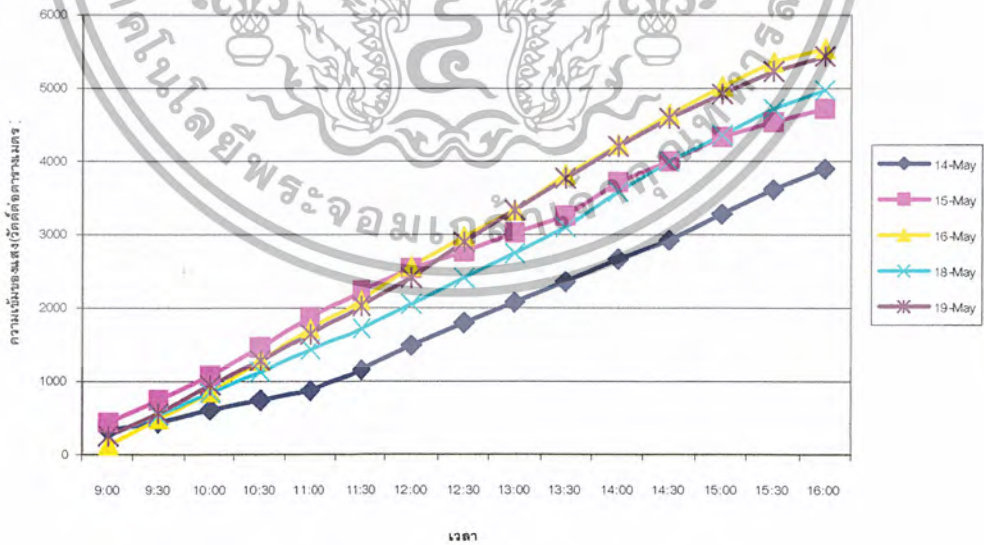
ตารางที่ ก-7 แสดงผลของอุณหภูมิที่คำนวณได้กับการทดลอง (°C)

Test pt.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Chimney	Exp.	34.7	34.7	34.7	34.4	34.5	34.5	34.9	34.8	34.7	34.6	34.6	33.5	32.4	34.4	35.1
	Sim.	33.43	33.50	33.58	33.36	33.50	33.64	33.44	33.49	33.57	33.34	33.46	33.61	32.11	33.02	34.05
Non	Exp.	34.9	35	34.7	34.6	34.5	34.4	35.1	35	34.6	34.6	34.4	34	33.8	34.8	37.1
	Sim.	37.09	37.26	36.84	34.44	34.56	34.95	37.29	37.62	38.01	34.46	34.56	34.95	32.11	34.96	36.44

ตารางที่ ก-8 ค่าความเข้มของแสงอาทิตย์

เวลา	เปิดทางเข้าและ ทางออกทั้งหมด		เปิดทางเข้าช่อง กลางและปิด ทางออก		เปิดทางเข้าช่อง กลางและ เปิดทางออก		เปิดทางเข้า ทั้งหมดและปิด ทางออก		เปิดทางเข้า ทั้งหมดและเปิด ทางออก	
		รวม		รวม		รวม		รวม		รวม
9:00	325	325	437	437	136	136	267	267	252	252
9:30	115	440	299	736	343	479	266	533	320	572
10:00	187	627	348	1084	372	851	319	852	364	936
10:30	122	749	370	1454	422	1273	271	1123	343	1279
11:00	131	880	423	1877	447	1720	310	1433	352	1631
11:30	272	1152	346	2223	388	2108	284	1717	390	2021
12:00	348	1500	310	2533	461	2569	339	2056	388	2409
12:30	307	1807	248	2781	393	2962	345	2401	481	2890
13:00	266	2073	237	3018	373	3335	338	2739	447	3337
13:30	287	2360	239	3257	476	3811	375	3114	427	3764
14:00	301	2661	456	3713	429	4240	475	3589	431	4195
14:30	271	2932	299	4012	410	4650	408	3997	396	4591
15:00	347	3279	331	4343	368	5018	365	4362	344	4935
15:30	342	3621	207	4550	346	5364	349	4711	300	5235
16:00	266	3887	179	4729	183	5547	274	4985	204	5439

หน่วย (W/m²)



รูปที่ ก-1 แสดงค่าความเข้มของแสงในวันที่ทำการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ข้อมูลอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยา

ตารางที่ ข-1 Monthly Sunshine Duration (hrs.)

Station: 455201 BANGKOK METROPOLISES

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2000	217.4	196.5	221.7	165.4	203.6	116.7	130.5	168.8	125.8	135.6	210.4	229.4	2121.8
2001	209.6	234.8	197.8	256.8	205.1	158	181.3	142.4	166	154.9	217.2	219.8	2343.7
2002	241.1	227.6	234.9	249.8	194.7	168.9	-	111.1	138.9	187.6	184.1	200.4	-
2003	249.4	228.2	206.1	277.4	236.4	184.1	172.9	164.6	117.4	189.4	234.8	257.7	2518.4
mean	229.4	221.8	215.1	237.4	210	156.9	161.6	146.7	137	166.9	211.6	226.8	2321.2

Computer Section

Climatology division

Meteorological department

30-Apr-2004

ตารางที่ ข-2 Extreme Maximum Wind (Knots)

Station: 455201 BANGKOK METROPOLISES

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2000	18	17	16	24	22	25	23	21	23	25	13	14	25
2001	15	15	20	16	22	21	27	18	17	30	15	14	30
2002	14	14	20	20	24	24	24	19	21	20	16	15	24
2003	17	16	16	15	21	28	25	22	27	14	15	15	28
Ext.	18	17	20	24	24	28	27	22	27	30	16	15	30

Computer Section

Climatology division

Meteorological department

30-Apr-2004

ตารางที่ ข-3 Monthly Mean Wind Speed (knots) and Prevailing Wind

Station: 455201 BANGKOK METROPOLISES

YEAR		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	spd.	2.4	2.2	2.9	2.6	2.2	2.1	2.5	2.4	1.9	1.3	1.7	1.5
	prev.	S	S	S	S	S	S	SW	SW	SW	S	N	NE
2001	spd.	2.1	2.3	2.2	2.6	2.6	2.9	2.8	2.9	1.7	1.1	1.4	1.5
	prev.	S	S	S	S	S	W	SW	W	W	E	NE	NE
2002	spd.	1.6	2.5	3.1	2.8	2.5	2.1	2.8	2.5	2.5	1.4	1.6	1.3
	prev.	S, E	S	S	S	S	SW	SW	SW	SW	E	NW	E
2003	spd.	1.9	2.7	2.5	3.3	3	2.8	2.3	2.7	2	1.9	1.6	2
	prev.	E	S	S	S	SW	SW	S	W	W	E	E	E
mean spd.		2	2.4	2.7	2.8	2.6	2.5	2.6	2.6	2	1.4	1.6	1.6
prev. wind		S	S	S	S	S	SW	S, SW	S, SW	SW, S	E		NE, N

“-” is missing value/incomplete data

Data Processing sub-division
Climatology division
Meteorological department
30-Apr-2004



ตารางที่ ข-4 Monthly Temperature in Celsius

Station: 455201 BANGKOK METROPOLISES

YEAR		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2000	mean	28	28.1	29.7	29.5	29.9	28.9	28.8	29	28.5	28.4	27.8	28.5	28.8
	m max.	33	33.5	34.3	33.5	34	32.6	32.5	32.6	32.8	32.6	32.6	33.4	33.1
	maximum	35.5	35.7	37	37.1	36.1	34.4	35.1	34.8	35.1	35.1	35	35.6	37.1
	day	5	28	14	8	29	8	31	1, 12	26	26	28	2	8-Apr
	m min.	24.1	23.7	26	26.2	26.3	25.9	26	25.6	25.4	25.3	24.3	24.3	25.3
	minimum	20.4	18.6	22.6	23.4	23.2	23.4	24.2	23.5	24	23.9	20.4	20	18.6
	day	29	2	24	17	4	21	6	13	3	8	4	25	2-Feb
2001	mean	28.6	29.2	29	31.6	29.5	29.5	29.7	29.2	29	28.2	26.9	27.4	29
	m max.	33.3	33.8	33.1	35.7	33.4	33.2	33.1	32.7	33.5	32.6	31.7	32.1	33.2
	maximum	35.7	36.9	36.4	37.4	36.2	35.5	35.7	35.5	35.9	35.8	35.6	35.2	37.4
	day	20	13	29	20	7	6	25	25	17	15	6	7	20-Apr
	m min.	25.1	25.4	25.8	28.3	25.9	26.3	26.8	26.4	25.7	25.3	22.9	23.3	25.6
	minimum	22.2	22	22.1	26.2	24	24.2	24.2	24.5	23.9	24	19.4	18.6	18.6
	day	2	17	11	1	3	7	12	16	19	6, 27	22,	23	23-Dec
2002	mean	27.4	29	29.6	31.2	29.8	29.9	29.9	29	28.7	28.6	28.3	28.7	29.2
	m max.	32.4	33.6	33.5	35.7	33.7	33.6	33.3	32.5	32.5	32.9	32.7	33.2	33.3
	maximum	34.6	35.5	36	38	36.6	34.9	34.7	34.5	34.2	35.2	35.2	35.4	38
	day	18	20	24	9	1	8	12	27	7, 10	3	13	5	9-Apr
	m min.	23.3	25.7	26.4	27.4	25.8	25.3	25.5	24.5	23.9	23.1	24.1	25.2	25.1
	minimum	19.5	23.8	21.5	25.2	23.5	22.5	22.4	22.3	21.5	19.8	19.2	22.4	19.2
	day	3	26	9	12	21	23	29	21	30	11	6	29	6-Nov
2003	mean	27.4	29.1	29.4	31.4	30.7	29.9	29	29.4	28.3	29.1	30.8	27	29.2
	m max.	32.5	33.9	33.8	35.8	35	34	32.7	33.1	32.1	33.2	34.7	32.4	33.6
	maximum	35	35.5	36.3	38.2	38.6	35.8	35.8	35.8	33.9	35.2	36.9	35.2	38.6
	day	31	2	5	28	7	10	18	29	25	6	9	25	7-May
	m min.	23.1	25.4	25.8	27.7	27.1	26.4	26	26.6	25.5	25.5	25.5	22.4	25.6
	minimum	19.3	20.5	22.6	24.7	24.2	23	23.6	23.6	23.5	23.3	22.6	18.1	18.1
	day	13	6	15	2	11	22	25	17	19	14	30	21	21-Dec
mean	mean	27.9	28.9	29.4	30.9	30	29.6	29.4	29.2	28.6	28.6	28.2	27.9	29.1
mean	m max.	32.8	33.7	33.7	35.2	34	33.4	32.9	32.7	32.7	32.8	32.9	32.8	33.3
ext.	maximum	35.7	36.9	37	38.2	38.6	35.8	35.8	35.8	35.9	35.8	36.9	35.6	38.6
mean	m min.	23.9	25.1	26	27.4	26.3	26	26.1	25.8	25.1	24.8	24.1	23.8	25.4
ext.	minimum	19.3	18.6	21.5	23.4	23.2	22.5	22.4	22.3	21.5	19.8	19.2	18.1	18.1

remarks : in line day, if the number of days with maximum or minimum temperature greater than 2 days, the number of days is shown in parenthesis, other number(s) showing the day with maximum or minimum temperature in that month.

Computer Section

Climatology division

Meteorological department

30-Apr-2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 Monthly Relative Humidity (%)

Station: 455201 BANGKOK METROPOLISES

YEAR		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
2000	mean	67	67	69	78	75	78	76	75	77	80	64	63	72
	m max.	82	84	85	90	89	91	89	88	89	93	78	78	86
	m min.	49	47	50	63	60	63	60	61	60	63	49	47	56
	minimum	31	27	27	48	48	55	40	52	40	55	35	40	27
2001	mean	70	70	77	72	77	73	72	73	79	82	65	65	73
	m max.	84	85	90	85	90	87	84	84	92	94	79	78	86
	m min.	52	50	59	55	62	60	59	60	61	65	50	50	57
	minimum	32	29	42	36	39	50	50	51	50	50	32	40	29
2002	mean	66	73	74	71	78	78	77	74	77	76	73	71	74
	m max.	82	88	86	84	90	89	88	86	89	89	87	84	87
	m min.	46	52	59	52	64	66	66	60	61	60	57	55	58
	minimum	36	35	46	31	53	60	51	51	53	36	48	48	31
2003	mean	68	70	75	70	70	72	79	75	79	74	62	58	71
	m max.	80	82	88	83	85	86	91	87	90	88	78	72	84
	m min.	54	52	56	53	54	56	64	61	64	58	45	44	55
	minimum	39	33	39	41	44	47	51	43	52	43	21	34	21
mean	mean	68	70	74	73	75	75	76	74	78	78	66	64	73
mean	m max.	82	85	87	86	89	88	88	86	90	91	81	78	86
mean	m min.	50	50	56	56	60	61	62	61	62	62	50	49	57
ext.	minimum	31	27	27	31	39	47	40	43	40	36	21	34	21

Data Processing sub-division
Climatology division
Meteorological department
30-Apr-2004

ตารางที่ ข-6 Daily Radiation (sun and sky) T, MJ.m⁻²

Station: 455201 BANGKOK METROPOLIS Year: 2000

Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	19.38	20.01	-	23.52	25.72	17.98	21.84	-	10.73	14.28	21.04	13.72
2	18.87	20.09	-	22.03	19.55	15.49	9.29	-	12.75	17.07	21.2	18.53
3	17.56	19.5	-	21.48	23.55	12.71	15.51	-	11.42	18.1	20.58	18.09
4	18.55	19.87	-	20.83	16.78	8.8	19.3	-	14.08	18.47	20.8	18.5
5	17.19	19.27	-	19.51	22.73	10.66	14.29	-	10.92	12.28	21.3	18.18
6	17.41	20.2	20.57	15.84	17.6	14.83	13.8	-	12.68	12.48	20.1	17.64
7	14.55	17.17	22.32	20.58	20.29	22.13	12.81	-	15.61	12.19	21.36	17.52
8	14.34	20.22	20.79	15.79	20.09	15.36	16.43	-	22.14	16.14	19.75	13.85
9	14.66	19.37	22.33	20.77	22.65	15.07	16.4	-	17.57	18.34	19.51	12.48
10	16.54	17.67	21.93	8.52	23.71	19.73	14.71	16.55	19.4	13.81	19.72	17.8
11	16.22	18.02	22.8	17.49	22.85	3.37	10.57	23.5	11.07	7.4	19.57	16.02
12	15.59	17.78	24.38	12.08	16.62	18.08	8.32	23.4	15.64	9.41	19.54	16.26
13	14.84	16.98	23.62	14.48	17.21	15.54	14.91	22.88	18.31	11.36	16.04	18.7
14	17.04	16.64	21.26	4.88	17.44	18.26	16.21	23.14	17.5	10.84	17.92	16.33
15	15.26	13.69	24.39	8.75	16.62	20.24	14.28	20.82	12.02	10.87	18.32	4.96
16	16.21	16.29	24.81	17.62	17.98	12.92	11.45	20.42	19.03	15.33	17.57	17.71
17	11.64	13.95	24.73	15.8	16.52	13.55	12.47	19.11	21.64	8.4	10.85	17.33
18	15.83	17.45	22.49	13.47	16.81	14.67	17.04	19.36	12.78	14.43	9.98	15.74
19	12.59	17.34	21.75	15.59	19.39	15.17	16.31	17.67	14.92	9.28	15.9	16.22
20	17.09	16.13	21.14	9.16	15.38	17.63	17.09	20.86	11.48	16.46	19.82	15.25
21	18.41	20.59	21.35	22.69	8.4	19.65	18.63	18.8	16.42	19.77	12.89	17.09
22	18.57	20.18	20.36	10.51	20.23	10.59	20.92	11.67	15.7	11.65	15.97	17.74
23	18.51	21.18	19.24	16.83	10.27	10.16	17.26	11.22	22.7	11.97	14.61	16.59
24	16.96	18.51	6.11	21.29	12.5	9.73	19.16	6.53	17.02	18.76	16.18	17.15
25	13.25	17.7	18.85	18.37	20.91	-	15.11	12.77	14.58	18.58	14.72	17.65
26	19.1	14.8	15.41	23.37	21.6	14.32	21.14	16.54	21.76	17.11	8.13	15.08
27	18.58	19.41	15.19	21.68	21.46	5.31	21.64	14.91	18.53	15.3	16.66	17.54
28	18.58	20.04	18.48	17.88	-	16.13	19.67	14.72	9.51	12.86	17.13	11.72
29	18.44	10.9	10.7	20.17	22.29	23.77	22.91	14.59	17.23	14.69	13.23	16.99
30	15.97		18.43	18.47	20.08	11.89	24.35	16.26	17.48	15.37	16.14	15.39
31	19.76		18.83		9.82		24.76	11.17		10.95		18.02
N	31	29	26*	30	30*	29*	31	22*	30	31	30	31
Total	517.49	520.95	522.26	509.45	557.05	423.54	518.58	376.89	472.62	433.95	516.53	501.79
Mean	16.69	17.96	20.09	16.98	18.57	14.6	16.73	17.13	15.75	14	17.22	16.19

Annual total =5871.1* Annual mean = 16.83* (มีต่อ)

"-" is missing value or no data reported

"*" means incomplete data in the specified month and annual values

ตารางที่ ข-6(ต่อ) Daily Radiation (sun and sky) T, MJ.m⁻²

Station: 455201 BANGKOK METROPOLIS Year: 2001

Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	18.16	16.75	17.53	20.26	13.6	-	-	-	-	-	-	-
2	18.87	14.8	16.66	19.68	12.15	-	-	-	-	-	-	-
3	17.19	18.65	18.85	23.59	10.85	-	-	-	-	-	-	-
4	17.34	14.34	14.69	23.39	12.86	-	-	-	-	-	-	-
5	15.16	15.01	17.71	21.69	12.77	-	-	-	-	-	-	-
6	9.1	16.4	19.61	23.05	-	-	-	-	-	-	-	-
7	16.62	17.08	17.91	23.57	-	-	-	-	-	-	-	-
8	14.56	12.56	17.57	25.85	-	-	-	-	-	-	-	-
9	17.37	14.04	11.16	22.81	-	-	-	-	-	-	-	-
10	15.46	4.12	6.79	23.18	-	-	-	-	-	-	-	-
11	14.7	15.99	7.46	23.79	-	-	-	-	-	-	-	-
12	16.08	17.42	6.19	14.61	-	-	-	-	-	-	-	-
13	12.75	17.91	11.86	20.25	-	-	-	-	-	-	-	-
14	5.65	10.59	16.76	23.82	-	-	-	-	-	-	-	-
15	13.27	20.23	20.07	19.54	-	-	-	-	-	-	-	-
16	18.02	19.65	21.92	21.93	-	-	-	-	-	-	-	-
17	17.92	19.09	22.41	22.7	-	-	-	-	-	-	-	-
18	14.36	18.33	21.96	18.76	-	-	-	-	-	-	-	-
19	9.08	17.41	18.71	23.41	-	-	-	-	-	-	-	-
20	17.83	17.53	16.56	25.26	-	-	-	-	-	-	-	-
21	12.3	18.23	10.53	24.7	-	-	-	-	-	-	-	-
22	17.17	16.21	8.81	23.29	-	-	-	-	-	-	-	-
23	18.19	18.7	18.96	23.88	-	-	-	-	-	-	-	-
24	19.69	21.66	22.95	23.94	-	-	-	-	-	-	-	-
25	20.3	22.69	18.66	22.08	-	-	-	-	-	-	-	-
26	18.61	20.5	23.2	15.34	-	-	-	-	-	-	-	-
27	19.12	19.81	22.06	16.59	-	-	-	-	-	-	-	-
28	20.61	19.25	22.41	21.49	-	-	-	-	-	-	-	-
29	10.24		21.68	17.78	-	-	-	-	-	-	-	-
30	17.69		18.15	10.84	-	-	-	-	-	-	-	-
31	14.31		14.26		-	-	-	-	-	-	-	-
N	31	28	31	30	5*	*	*	*	*	*	*	*
Total	487.72	474.95	524.05	641.07	62.23	-	-	-	-	-	-	-
Mean	15.73	16.96	16.9	21.37	12.45	-	-	-	-	-	-	-

Annual total = 2190.02* Annual mean = 16.68* (มีต่อ)

"-" is missing value or no data reported
"*" means incomplete data in the specified month and annual values

ตารางที่ ข-6(ต่อ) Daily Radiation (sun and sky) T, MJ.m⁻²

Station: 455201 BANGKOK METROPOLIS Year: 2003

Date	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	16.64	16.91	7.53	22.25	14.26	14.09	5.6	17.86	20.33	-	18.84	4.09
2	18.02	17.69	20.38	22.53	20.43	14.58	19.68	18.63	17.04	18.63	19.89	5.37
3	15.68	20.38	8.88	23.19	19.38	9.09	14.61	17.78	14.25	20.04	21.27	4.82
4	7.22	20.85	18.41	23.23	23.84	14.65	14.91	13.18	20	15.62	-	3.95
5	-	20.08	23.39	26.4	22.7	24.06	10.82	16.73	20.23	16.19	18.11	4.1
6	-	19.13	21.94	24.78	21.97	25.16	14.41	12.83	15.61	19.68	18.8	4.07
7	17.25	18.5	24.25	25.66	21.76	25.23	12.66	15	14.6	14	17.44	3.44
8	17.47	18.29	18.25	22.73	20.05	5.07	17.73	17.44	16.76	13.69	18.66	4.85
9	18.06	13.79	13.73	22.21	17.45	21.12	16.19	16.61	18.71	-	20.66	4.61
10	17.99	-	19.24	22.83	15.06	23.43	23.5	18.09	13.97	20.22	20.46	6.83
11	19.51	-	17.82	23.73	21.88	21.87	19.35	15.85	11.79	23.35	20.17	8.65
12	18.58	-	15.18	23.39	14.4	23.34	17.71	16.21	16.17	11.91	16.51	4.73
13	14.06	13.98	15.2	23.23	12.49	18.96	12.31	17.19	6.91	15.32	-	3.45
14	18.71	13.72	6.97	23.46	20.72	21.05	12.85	22.03	11.61	17.49	-	5.22
15	18.3	17.93	19.46	21.57	23.83	19.71	16.43	21.93	16.47	12.82	15.81	5.48
16	19.12	18.65	19.08	22.74	17.83	17.78	22.99	20.09	14.05	-	17.08	4.69
17	19.09	20.69	24.05	22.76	22.17	17.11	21.16	7.22	11.27	-	18.75	5.1
18	18.09	16.58	23.16	25.74	18.66	13.9	24.61	13.96	14.58	-	17.11	5.91
19	19.06	20.55	23.19	22.25	19.46	15.03	22.07	20.47	17.02	-	9.85	7.69
20	17.84	21.09	22.8	24.35	21.14	11.73	16.59	16.39	17.02	-	17.4	6.8
21	16.7	22.21	17.72	25.39	21.38	13.03	18.31	17.5	7.08	-	12.59	4.64
22	17.7	19.48	16.23	23.33	23.05	9.34	13.26	18.39	21.09	-	20.02	5.46
23	18.08	20.18	10.34	17.64	24.58	8.26	11.93	14.62	11.02	-	19.9	4.03
24	20.01	18.44	17.9	14.81	20.17	23.48	6.06	16.13	11.9	-	18.59	4.21
25	18.67	12.79	20.29	23.78	14.72	24.09	4.19	19.2	17.51	-	15.66	4.24
26	7.58	5.51	6.43	23.1	18.5	23.85	3.95	14.47	18.67	-	14.61	4.55
27	-	15.73	19.75	25.31	24.01	20.96	20.26	18.68	12.05	-	20.68	5.86
28	-	17.86	20.66	17.44	21.52	17.87	20.24	23.17	10.09	19.32	19.37	6.05
29	-	-	11.58	9.93	21.39	17.18	19.11	25.84	10.88	22.44	19.5	5.44
30	-	-	12.5	23.89	17.88	9.61	15.19	12.63	8.5	21.67	16.99	5.18
31	-	-	12.5	-	1.56	-	20.39	7.68	-	21.67	-	5.08
N	24*	25*	31	30	31	30	31	31	30	17*	27*	31
Total	409.43	441.01	528.81	672.65	598.24	524.63	489.07	523.8	437.18	304.06	304.06	158.54
Mean	17.06	17.64	17.06	22.42	19.3	17.49	15.78	16.9	14.57	17.89	17.89	5.11

Annual total = 5572.14*

Annual mean = 16.6*

"-" is missing value or no data reported

"**" means incomplete data in the specified month and annual values

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] บุญเลิศ บุญศรี, “การศึกษาอิทธิพลของช่องเปิดต่ออุณหภูมิภายในและการถ่ายเทอากาศแบบธรรมชาติโดยปล่องรังสีอาทิตย์”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปี พ.ศ.254
- [2] ปราโมทย์ เศรษฐอำไพ, “ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม”, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี พ.ศ. 2538
- [3] พงษ์เจต พรหมวงศ์, “การถ่ายเทความร้อน”, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิเจ ประรินทร์, ปี พ.ศ.2542, หน้า 197-219
- [4] มานิจ ทองประเสริฐ และ สมศรี จรุงเรือง, “พลังงานแสงอาทิตย์ทฤษฎีและการใช้ประโยชน์ทางความร้อน”, พิมพ์ครั้งที่ 1, คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ปี พ.ศ. 2524
- [5] รังสรรค์ พันธพิเชษฐ์, “โซลาร์คูลลิ่งซิมนี้”, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปี พ.ศ. 2543
- [6] John D. Anderson, Jr., “Computational Fluid Dynamics the basics with applications”, McGraw-Hill Inc., Singapore, 1995, pp.49 –72
- [7] Robert W. Fox and Alan T. McDonald, “Introduction to Fluid Mechanics”, 5th ed., John Willey & Sons, New York, 1998, pp.195-231
- [8] Versteeg, H. K. and Malalaskera, W. , “An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method”, Longman Group Ltd, 1995