

อิทธิพลของมุมมองต่อการถ่ายทอดความร้อนผ่านระบบหลังคา

นายวิศกร นภีรงค์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

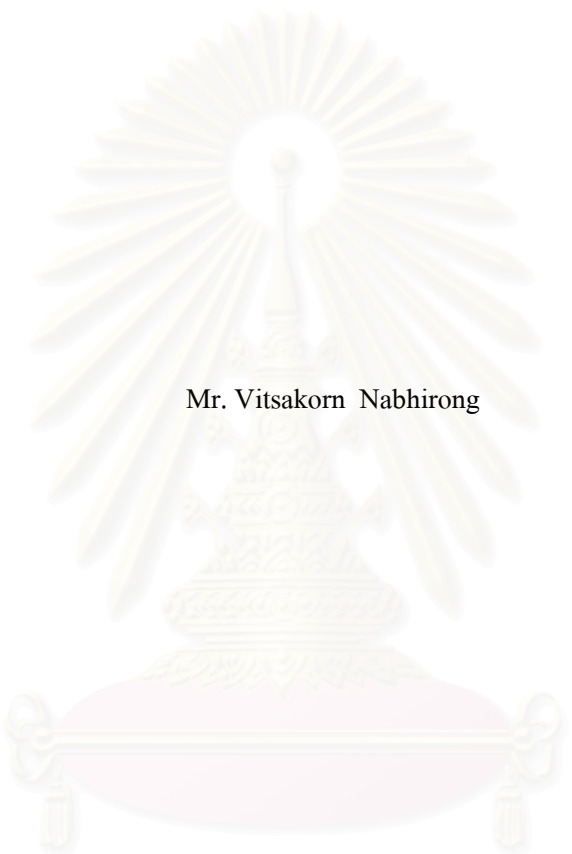
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ROOF ANGLE ON HEAT TRANSFER THROUGH A BUILDING ROOF SYSTEM



Mr. Vitsakorn Nabhirong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

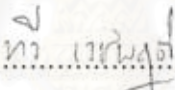
Academic Year 2006

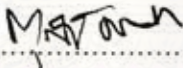
หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา
โดย	นาย วิศกร นกิร์งค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา

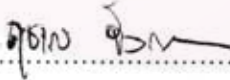
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ศิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ทวี เวชพฤติ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จีรกาลวสาน)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิศวกร นทีรงค์ : อิทธิพลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา.

(EFFECTS OF ROOF ANGLE ON HEAT TRANSFER THROUGH A BUILDING ROOF SYSTEM)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ศุภย์ มณีวัฒนา, 111 หน้า.

ในอดีตได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัสดุผนังหลังคา, มุมเอียงหลังคา, รูปทรงของหลังคา, อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคา, ทิศทางการวางตัวของอาคาร เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆเหล่านี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบหลังคา เพื่อการประหยัดพลังงาน แต่ยังไม่มีการศึกษาใดที่ระบุแน่ชัดว่าอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา มีผลอย่างไรต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เน้นในส่วนของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุผนังหลังคาเป็นฟังก์ชันของมุม โดยนำวิธีสมมูลความร้อน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการหาภาระความร้อน มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการหาปริมาณความร้อนรายชั่วโมงรวมตลอดทั้งปี สำหรับระบบหลังคา 2 รูปทรง คือ ระบบหลังคาทรงหน้าจั่วและระบบหลังคาทรงปั้นหยามีช่องใต้หลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาดังแต่ 0 ถึง 100 ACH ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไปจากเดิม 90 องศา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา

ผลจากการศึกษา พบว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาจะลดลงประมาณ 3 ถึง 7% กล่าวคือ ที่มุมเอียงหลังคา 10 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 3% และที่มุมเอียงหลังคา 40 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 7% นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกด้วยว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่ใช้ในการคำนวณ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม นั้น ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2549.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4670498021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: ROOF ANGLE / HEAT TRANSFER / ROOF SYSTEM

VITSAKORN NABHIRONG : EFFECTS OF ROOF ANGLE ON HEAT TRANSFER
THROUGH A BUILDING ROOF SYSTEM. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. DR. TUL
MANEWATTANA., Ph.D, 111 pp.

There are many previous studies in the past on the factors effecting heat transfer through building roof system such as the effect of roof materials, roof angles, roof shapes, ventilation rate through attic space, and building direction, etc. Those results could be applied to the design of building roof system for energy saving; however, it has not been any particular study on how the roof angle affects the heat transfer through building roof system.

The purpose of this thesis is to study the mechanism of heat transfer through building roof system emphasizing on the effect of roof angle when emissivity is also a function of angle. Heat Balance Method, which is the method for calculating heat transmission load, was applied to calculate heat transfer through building roof system. Computer program to analyze the effect of roof angle was created to calculate the summation of heat transfer for each hour all year round for two types of roof system, i.e., the gable roof and the hip roof system. For each roof system, the ventilation rate was varied from 0 to 100 ACH, building orientation was also vary in two directions, the insulation thickness was varied from 0 to 5 inches, and the installation position of insulation was also varied for two locations, i.e., above the ceiling or beneath the roof tile.

Results from the study show that as the roof angle increases, the heat transfer through building roof system decreases from about 3 to 7%, i.e., at 10 degree of roof angle the heat transfer decreases 3% and at 40 degree of roof angle the heat transfer decreases 7%. Moreover, the results also indicated that the emissivity value used in the calculation does not need to be a function of angle. This is because the results from the calculation using the angle-dependent and angle-independent emissivity differ only very slightly.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2006 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ. ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านคอยให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ถ่ายทอดความรู้ และข้อคิดเห็นต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำปรึกษาที่มีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และในการทำงานในอนาคต

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทวี เวชพฤติ คุณธีระ สุทธิญา และคุณกฤษณะ มานิตย์ นิสิตปริญญาโทรุ่นพี่ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ และแนะแนวทางตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่ได้สนับสนุนการศึกษาอย่างดียิ่ง รวมทั้งเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมดุลความร้อน	5
2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน	6
2.3 กระบวนการนำความร้อน 1 มิติในสถานะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น	17
2.4 การหาค่า Conduction Transfer Function	27
2.5 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน	32
2.6 สมดุลความร้อนที่พิจารณาอากาศภายในหลังคาหรือโชนเป็นปริมาตรควบคุม	35
2.7 ขั้นตอนการคำนวณในระเบียบวิธีสมดุลความร้อน	37
2.8 การแผ่รังสีความร้อน	39
2.9 การแผ่รังสีของวัตถุดำ	40
2.10 การแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริง	42
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเปล่งรังสี สภาพการดูดกลืนรังสีและสภาพการสะท้อนรังสี	45

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการคำนวณโปรแกรม	48
3.1 วิธีการคำนวณของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น	48
3.2 โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้สำหรับคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนที่พิจารณา	50
3.3 ความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	52
บทที่ 4 ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ	60
4.1 ลักษณะทั่วไปของระบบหลังคาที่ทำการศึกษา	61
4.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH	65
4.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง	67
4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา	69
4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม	72
4.6 เปรียบเทียบค่า U ของระบบหลังคา ในกรณีที่ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุผนังหลังคาไม่เป็นฟังก์ชันของมุมกับกรณีที่ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุผนังหลังคาเป็นฟังก์ชันของมุม	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการวิจัย	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก	84
ภาคผนวก ก แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วย (Conversion Factors)	85
ภาคผนวก ข คุณสมบัติของวัสดุ	86
ภาคผนวก ค รายละเอียดโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น	87
รายละเอียดและตัวอย่างอินพุตไฟล์	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ทิศทางของระนาบและมุมเอซิมุรของระนาบ เมื่อเทียบกับทิศใต้	10
ตารางที่ 2.2 Time Zone Meridians ของประเทศอเมริกาและแคนาดา	10
ตารางที่ 2.3 Extraterrestrial Solar Radiation Intensity and Related Data	12
ตารางที่ 2.4 ค่าการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ของพื้นผิวต่างๆ	13
ตารางที่ 2.5 ความขรุขระของวัสดุ	16
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 1	52
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 2	53
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 3	54
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 4	55
ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าภาระทางความร้อนจากคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ โปรแกรม ASHRAE ที่เข้าสู่โซนตัวอย่าง ทั้ง 4 โซน	56
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่อัตราการระบายอากาศ ผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้ หลังคา	72
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่อัตราการระบายอากาศ ผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้ หลังคา	73
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ทิศทางการวางตัว ของอาคารทั้ง 2 ทิศทาง	74
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาฉนวนกัน ความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา	75

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา	76
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา	77
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา	78

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในหนึ่งห้องหรือโซน	6
รูปที่ 2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน	7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับดวงอาทิตย์และพื้นผิว	10
รูปที่ 2.4 ตัวกลางของการนำความร้อนหลายชั้น	17
รูปที่ 2.5 Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น	20
รูปที่ 2.6 Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 2 ชั้น	21
รูปที่ 2.7 Boundary Condition สำหรับตัวกลางหลายชั้น	22
รูปที่ 2.8 กำหนด Boundary Condition ของพื้นผนังด้านนอกและด้านในสำหรับ ตัวกลางหลายชั้น	25
รูปที่ 2.9 Superposition of Unit Triangular Pulse Excitation	28
รูปที่ 2.10 Unit Triangular Pulse Excitation	28
รูปที่ 2.11 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน	33
รูปที่ 2.12 สมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโซน	36
รูปที่ 2.13 การออบรังสีของวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน	39
รูปที่ 2.14 การออบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุมิติทาง ($Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T)$)	46
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วย วิธีสมดุลความร้อน	49
รูปที่ 3.2 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 1	52
รูปที่ 3.3 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 2	53
รูปที่ 3.4 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 3	54
รูปที่ 3.5 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 4	55
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ โปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 1	58
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ โปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 2	58
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ โปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 3	59
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับ โปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 4	59

	หน้า
รูปที่ 4.1 Floor Plan แสดงลักษณะการวางตัวของอาคารที่พิจารณา	61
รูปที่ 4.2 รูปทรงของหลังคา ก.หลังคาทรงหน้าจั่ว ข.หลังคาทรงปั้นหยา	61
รูปที่ 4.3 หลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา	62
รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นวัสดุสำหรับหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา	62
รูปที่ 4.5 ปริมาตรควบคุมของโซนหลังคาที่พิจารณา	63
รูปที่ 4.6 ค่าสภาพเปล่งรังสี $\varepsilon(\theta, T)$ ของวัสดุตัวนำ(Conducting Material)ชนิดต่างๆ เปลี่ยนแปลงกับ θ	64
รูปที่ 4.7 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาดังแต่ 0 ถึง 100 ACH	65
รูปที่ 4.8 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง	67
รูปที่ 4.9 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้ง ฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคารูปทรงหน้าจั่ว แบบมีช่องใต้หลังคา	69
รูปที่ 4.10 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้ง ฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคารูปทรงปั้นหยา แบบมีช่องใต้หลังคา	70

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	Area (m^2)
A_{MRTi}	=	พื้นที่ของพื้นผิวสมมุติโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ (m^2)
ASI	=	Apparent Solar Irradiation (W / m^2)
AST	=	เวลาสุริยะ (Hours)
B	=	Atmospheric Extinction Coefficient
c_p	=	ค่าความร้อนจำเพาะ ($J / kg.K$)
C	=	Sky Diffuse Factor
C_n	=	ค่าความจุความร้อน ($J / m^2.K$)
E_b	=	กำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ ($W / m^2.Sr$)
$E_{b\lambda}$	=	กำลังของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมระบุนุทิศทาง ($W / m^2.\mu m.Sr$)
ET	=	สมการเวลา (Minutes)
F	=	Flux Conduction Transfer Function
F_{gr}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างของพื้นดิน
F_{MRT}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับพื้นผิวสมมุติ
F_a	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับอากาศ
F_{sky}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับท้องฟ้า
h_{ci}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือ โชน ($W / m^2.K$)
h_{co}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคา หรือโชน ($W / m^2.K$)
h_f	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบบังคับ ($W / m^2.K$)
h_{fg}	=	เอนทัลปีในการควบแน่นของไอน้ำ ณ อุณหภูมิของอากาศภายในหลังคาหรือ โชน (J / kg)
h_{gr}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นดิน ($W / m^2.K$)
h_n	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติ ($W / m^2.K$)
h_{sky}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของท้องฟ้า ($W / m^2.K$)
h_{MRT}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวด้านใน ด้วยกันเองของหลังคาหรือโชน ($W / m^2.K$)
H	=	มุมชั่วโมง (องศา)

I_b	=	ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำ ($W / m^2 .Sr$)
$I_{b\lambda}$	=	ความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำ ($W / m^2 .\mu m.Sr$)
I_d	=	ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยการกระจายตัวจากท้องฟ้า (W / m^2)
I_r	=	ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยการกระจายจากสะท้อนกลับจากพื้นดิน (W / m^2)
I_t	=	ฟลักซ์การแผ่รังสีคลื่นสั้นรวม (W / m^2)
I_D	=	ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ (W / m^2)
I_{DN}	=	ฟลักซ์การแผ่รังสีที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว (W / m^2)
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W / m.K$)
L	=	ละติจูด (องศา)
LON	=	ลองจิจูด (องศา)
LSM	=	Local Standard Time Meridian (องศา)
LST	=	เวลาท้องถิ่น ($Hours$)
n	=	จำนวนเต็ม
P	=	เส้นรอบรูป (m)
q_{conv}	=	ความร้อนโดยการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโชนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน (W)
q_{IVs}	=	ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและการระบายอากาศในส่วนของการความร้อนสัมผัส (W)
q_{IVl}	=	ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและการระบายอากาศในส่วนของการความร้อนแฝง (W)
q_{sys}	=	ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือดึงออกจากระบบปรับอากาศ (W)
q''_{conv}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นผิว (W / m^2)
q''_{gr}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนกับพื้นดิน (W / m^2)
q''_{ki}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน (W / m^2)
q''_{ko}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน (W / m^2)
q''_{oa}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนกับอากาศภายนอก (W / m^2)
q''_{sky}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนกับท้องฟ้า (W / m^2)

q''_{sol}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนดูดซับไว้ (W / m^2)
q''_{LWR}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับสิ่งแวดล้อม (W / m^2)
q''_{LWX}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซนด้วยกันเอง (W / m^2)
Q	=	อัตราการไหลของอากาศ (m^3 / s)
R_{bal}	=	ค่าแก้ไขความไม่สมดุลของพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนรวม
R_n	=	ค่าความต้านทานความร้อน ($m^2 .K / W$)
R_f	=	ค่าแก้ไขเนื่องจากความหยาบผิว
t	=	เวลา (Seconds)
T_{avg}	=	อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{gr}	=	อุณหภูมิพื้นดิน ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{oa}	=	อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{sky}	=	อุณหภูมิท้องฟ้า ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{si}	=	อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{so}	=	อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
T_{MRTi}	=	อุณหภูมิพื้นผิวสมมุติ ($^{\circ}C$) หรือ ($^{\circ}K$)
U	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($W / m^2 .K$)
V_{az}	=	ความเร็วลม (m / s)
V_o	=	ความเร็วลมที่สภาวะมาตรฐาน (m / s)
W_f	=	ค่าแก้ไขเนื่องจากทิศทางของลม
x	=	ตำแหน่ง (m)
X	=	Internal Conduction Transfer Function
Y	=	Cross Conduction Transfer Function
z	=	ความสูงของพื้นผิวเมื่อเทียบกับพื้นดิน (m)
z_o	=	ความสูงที่ความเร็วลมมาตรฐาน (m)
Z	=	External Conduction Transfer Function

ตัวอักษรกรีก

α	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน
g	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (m^2 / s)
τ	=	Terrain-dependent Coefficient
β	=	Solar Altitude (องศา)
ε	=	ค่าสภาพเปล่งรังสีทั้งหมดคลุมครึ่งทรงกลม
ξ	=	Declination (องศา)
ϕ	=	Solar Azimuth (องศา)
ψ	=	Surface Azimuth (องศา)
γ	=	Surface Solar Azimuth (องศา)
θ	=	มุมตกกระทบของรังสีเทียบกับเส้นตั้งฉากของพื้นผิว (องศา)
Σ	=	มุมเอียงของระนาบเมื่อเทียบกับระนาบระดับ (องศา)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg / m^3)
ρ_g	=	ค่าการสะท้อนของพื้นดิน
σ	=	ค่าคงตัวของ Stefan-Boltzmann
ω	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg_w / kg_a)

ตัวอักษรห้อย

i	=	พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน
j	=	คาบของเวลาในแต่ละขั้นเวลา δ
MRT	=	ถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่
o	=	พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน
t	=	เวลา ณ ปัจจุบัน
δ	=	ช่วงของเวลา

ศูนย์วิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

ในอดีตได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัสดุผนังหลังคา , มุมเอียงหลังคา, รูปทรงของหลังคา , อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคา , ทิศทางการวางตัวของอาคาร เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆเหล่านี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบหลังคา เพื่อการประหยัดพลังงานภายในตัวอาคาร เนื่องจากว่าความร้อนส่วนหนึ่งภายในตัวอาคาร ได้มาจากการส่งผ่านความร้อนจากดวงอาทิตย์ผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ภายในตัวอาคารนั่นเอง แต่ยังไม่มีการศึกษาใดที่ระบุแน่ชัดว่าอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา มีผลอย่างไรต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เน้นในส่วนของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อค่าสภาพการเปลี่ยนแปลงรังสีของวัสดุผนังหลังคาเป็นฟังก์ชันของมุม โดยนำวิธีสมดุลความร้อน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการหาภาระความร้อน มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการหาปริมาณความร้อนรายชั่วโมงรวมตลอดทั้งปี สำหรับระบบหลังคา 2 รูปทรง คือ ระบบหลังคาทรงหน้าจั่ว และระบบหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา โดยการประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์

1.2.2 เพื่อศึกษาความหมายและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพการเปลี่ยนแปลงรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลเชิงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปลี่ยนแปลงรังสีของวัสดุผนังหลังคาที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ในการคำนวณ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและกลไกเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ คือ การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Heat Conduction) การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Heat Convection) และการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Heat Radiation) อย่างละเอียด เพื่อก่อให้เกิดความเข้าใจที่จะสามารถนำความรู้ที่นำมาประยุกต์ใช้หาการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาได้นั่นเอง

1.3.2 ศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม กล่าวคือ เมื่อมุมที่เกิดจากแนวรังสีตกกระทบเทียบกับเส้นตั้งฉากของระนาบมีเปลี่ยนแปลง ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมจะมีเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

1.3.3 ประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาด้วยภาษาฟอร์แทรน(FORTRAN) และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับผลที่ได้จากโปรแกรมที่เป็นมาตรฐาน(ASHRAE)

1.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุของหลังคาที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม

1.3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุของหลังคาที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ในการคำนวณ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ก่อให้เกิดความเข้าใจในความหมายทางกายภาพและกลไกต่างๆของกระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบ คือ การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน และสามารถนำความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบนี้ มาประยุกต์ใช้ในศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาได้

1.4.2 ก่อให้เกิดความเข้าใจถึงอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เพื่อสามารถนำความเข้าใจดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบระบบหลังคาที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงานในอาคารได้

1.4.3 คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการเขียนคอมพิวเตอร์โปรแกรมในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอนาคต

1.5 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hittle, Douglas C. (1979) ศึกษาและพัฒนาวิธีในการคำนวณหาภาระการทำความเย็นด้วยวิธีสมดุลความร้อน (Heat Balance) โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณฟังก์ชันการนำความร้อน (Conduction Transfer Function, CTF) ในหนึ่งมิติผ่านผนังหลายชั้น (Multilayered Slab) ซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์กระบวนการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้น ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญของวิธีสมดุลความร้อน

Hittle, Douglas C. (1983) ปรับปรุงวิธีการหาคำตอบของสมการทางความร้อนที่ได้จากการแปลงลาปลาซผกผันซึ่งอยู่ในรูปของเมทริกซ์การถ่ายโอน (Transmission Matrix) เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันการนำความร้อน (Conduction Transfer Function, CTF) โดย Hittle นำวิธีเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาค่าของสมการที่มีค่าใกล้เคียงกันมาก

Pedersen, C.O. (1997) แสดงรูปแบบของสมดุลความร้อนที่เหมาะสมต่อการคำนวณหาภาระการทำความเย็นของระบบ รวมทั้งข้อสมมุติฐานที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย ซึ่งภายในงานวิจัยมีการอธิบายถึงภาพรวมของระเบียบวิธีสมดุลความร้อนและแสดงให้เห็นว่าสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้น ณ กรอบอาคารนั้นประกอบด้วยสมดุลความร้อนทั้ง 4 แห่ง ได้แก่ สมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอก สมดุลความร้อนที่ผนังด้านใน การนำความร้อนผ่านระบบผนังหลายชั้น และสมดุลความร้อนของอากาศภายในบริเวณควบคุม โดยสมดุลความร้อนดังกล่าวได้พัฒนามาจาก ASHRAE research project RP-175 ในงานวิจัยนี้ยังแสดงถึงกระบวนการแก้ปัญหาโดยแสดงเป็น pseudo-code ด้วยและตัวอย่างวิธีการหาภาระการทำความเย็นสำหรับอาคาร

Liesen, R.J. (1997) แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับสมดุลความร้อนภายในอาคาร ซึ่งภายในงานวิจัยมีการพิจารณาเกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อนของอากาศภายในปริมาตรควบคุม และได้ทำการศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึงความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองแต่ละแบบ และพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมต่อการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิว (Longwave Radiation Exchange) ก็คือ วิธี MRT Balance และวิธี MRT

McClellan, T.M. (1997) แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับสมดุลความร้อนภายนอกอาคาร ประกอบด้วยความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้น การพาความร้อน และความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นยาวที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกันระหว่างท้องฟ้า พื้นดิน และอากาศภายนอก งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆหลายรูปแบบ จากนั้นจึงศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึงความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเหล่านั้นและนำผลการคำนวณที่ได้จากแต่ละรูปแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับกันอีกด้วย

Somboon Tirasit (2000) แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับสมดุลความร้อนมาคำนวณหาภาระทางความร้อนผ่านระบบหลังคา และวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา รวมถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

Akara Kitkrancharearnsin (2001) ศึกษาถึงอิทธิพลของกันสาดและช่องเปิดที่มีผลต่อสภาวะสบายเชิงความร้อนของบ้านจำลองที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องปรับอากาศในกรุงเทพมหานคร โดยคำนวณและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในรอบหนึ่งปีของค่า PMV และ SET* ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยนำวิธีสมดุลความร้อนและแบบจำลองการไหลของอากาศอย่างง่ายมาใช้ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของพื้นผิวผนัง อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และความเร็วลมเป็นรายชั่วโมง จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาดัชนีความสบาย รวมถึงค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีดังกล่าว ผลการคำนวณที่ได้ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสะดวกสบายเชิงความร้อนของผู้อาศัยในบ้านจำลอง

Teera Sutunya (2004) ศึกษาในส่วนของการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร โดยนำโรงเรือนเลี้ยงไก่พันธุ์เนื้อระบบปิด กว้าง 12 เมตรที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทยเปรียบเทียบกับโรงเรือนเลี้ยงไก่พันธุ์เนื้อระบบปิด กว้าง 24 เมตร นอกจากนั้นจะตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรโรงเรือนต่างๆ ได้แก่ ความสูงหลังคา ทิศทางการวางตัวของโรงเรือน การติดกันสาดและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่มีผลต่อความเร็วลม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณตัวแปรทางสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนโดยการใส่ระเบียบวิธีสมดุลความร้อน จากนั้นจึงวิเคราะห์ร่วมกับความเร็วลมตามตำแหน่งต่างๆ ในโรงเรือนที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีทาง CFD

Kritsana Manit (2004) แสดงวิธีการคำนวณค่า Cooling Load Temperature Different (CLTD) สำหรับผนังและหลังคาโดยใช้ค่า Periodic Response Factors (PRF) และ Radiant Time Factors (RTF) ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Radiant Time Series Method (RTSM) โดยวิธี RTSM นั้นถูกพัฒนามาจากวิธีสมดุลความร้อน (Heat Balance Method)

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมดุลความร้อน (Heat Balance Method)

วิธีสมดุลความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าภาระความร้อนของห้องหรือโซน ซึ่งถูกดัดแปลงมาจากกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ (กฎการอนุรักษ์พลังงาน) กระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในวิธีสมดุลความร้อนนี้ ประกอบด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนหลายรูปแบบ มีทั้งการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีคลื่นสั้นและคลื่นยาวที่พื้นผิวของห้องหรือโซน การพาความร้อนที่พื้นผิวของห้องหรือโซน และการนำความร้อนผ่านชั้นผนังต่างๆของห้องหรือโซน

ในการคำนวณหาภาระความร้อนด้วยวิธีสมดุลความร้อนนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆโดยมีข้อสมมุติฐานที่จำเป็น ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของพื้นผิวแต่ละพื้นผิวมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
2. การแผ่รังสีคลื่นสั้นและคลื่นยาวของแต่ละพื้นผิวมีความสม่ำเสมอ
3. พื้นผิวมีการแผ่รังสีแบบกระจาย
4. อากาศภายในห้องหรือโซนมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ
5. เป็นการนำความร้อนแบบ 1 มิติ ที่สภาวะไม่คงตัว ผ่านผนังหลายชั้น

กระบวนการในวิธีสมดุลความร้อน(Heat Balance) แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ คือ สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอก, กระบวนการนำความร้อนผ่านชั้นผนัง, สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านใน โดยใน 3 ส่วนแรกนี้จะพิจารณาที่กรอบของห้องหรือโซน ซึ่งได้แก่ ผนัง พื้น หลังคา และสมดุลความร้อนเมื่อคิดอากาศภายในห้องหรือโซนเป็นปริมาตรควบคุม ซึ่งรูปที่ 2.1 จะแสดงกระบวนการสมดุลความร้อน โดยส่วนบนของรูปที่ล้อมกรอบสำหรับสมดุลในแต่ละพื้นผิวที่ปิดล้อมเป็นห้องหรือโซน ลูกศรแสดงทิศทางการถ่ายเทความร้อน กรอบวงกลมแทนแหล่งความร้อนต่างๆ และกรอบสี่เหลี่ยมแทนกระบวนการสมดุลทางความร้อนทั้ง 4 กระบวนการ



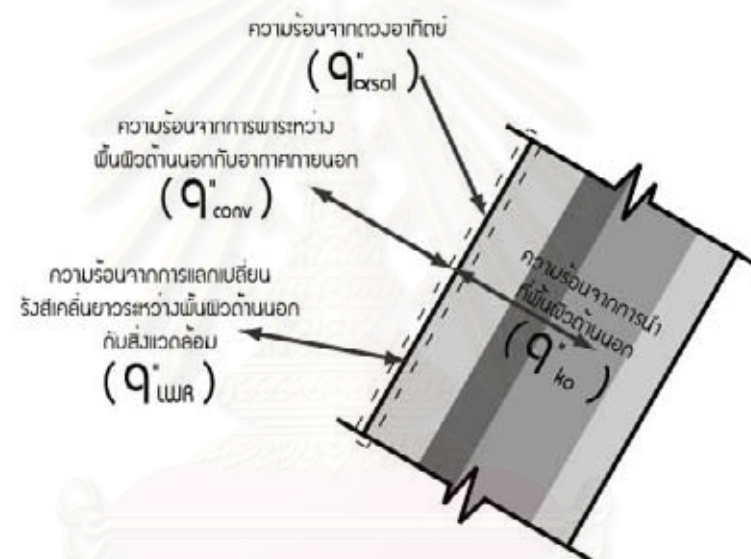
รูปที่ 2.1 กระบวนการสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นในหนึ่งห้องหรือโซน

2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (Outside Heat Balance)

พิจารณาที่หลังคาหรือโซนใดๆ ที่มีพื้นผิวด้านใดด้านหนึ่งติดกับสิ่งแวดล้อมภายนอก พื้นผิวดังกล่าวจะได้รับความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนกับแหล่งความร้อนต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ การพาความร้อนออกจากพื้นผิวของผนัง การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างท้องฟ้า พื้นดิน และอากาศ ภายนอก ความสัมพันธ์ของสมดุลทางความร้อนที่พื้นผิวของผนังด้านนอกแสดงในรูปที่ 2.2 และมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$q_{ko}'' = q_{asol}'' + q_{LWR}'' + q_{conv}'' \quad (2.1)$$

- โดย q_{ko}'' คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการนำที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน (W/m^2)
- q_{asol}'' คือ ฟลักซ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนดูดซับไว้ (W/m^2)
- q_{LWR}'' คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนกับสิ่งแวดล้อม (W/m^2)
- q_{conv}'' คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนกับอากาศภายนอก (W/m^2)



รูปที่ 2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน

2.2.1 ฟลักซ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชนดูดซับไว้ (q_{asol}'') คำนวณได้ตามแบบจำลองใน ASHRAE Fundamental Handbook (ASHRAE 2001) ได้ดังสมการ

$$q_{asol}'' = \alpha I_t \quad (2.2)$$

โดยแบ่งฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ออกเป็น การแผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์, การแผ่รังสีโดยการกระจายกับไอน้ำในอากาศ และการแผ่รังสีโดยการกระจายหลังจากสะท้อนกับพื้น

$$I_t = I_D + I_d + I_r \quad (2.3)$$

โดย	α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อน (Absorptivity)
	I_t	คือ ฟลักซ์การแผ่รังสีคลื่นสั้นรวม (Total Short-wave Solar Radiation Flux, W/m^2)
	I_D	คือ ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct Solar Radiation Flux, W/m^2)
	I_d	คือ ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยการกระจายจากท้องฟ้า (Sky Diffuse Radiation Flux, W/m^2)
	I_r	คือ ฟลักซ์การแผ่รังสีโดยการกระจายจากการสะท้อนกลับจากพื้นดิน (Ground-Reflected Radiation Flux, W/m^2)

2.2.1.1 การหาฟลักซ์ความร้อนที่ดวงอาทิตย์แผ่รังสีออกมาตกกระทบพื้นผิวโดยตรง (Direct Solar Radiation, I_D) ในทิศทางต่าง ๆ นั้น จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว คือ

$$I_D = I_{DN} \cos \theta \quad (2.4)$$

เมื่อ I_{DN} คือ ฟลักซ์ของรังสีที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว (Direct Normal Irradiation, W/m^2)
 $\cos \theta$ คือ ค่าโคไซน์ของมุมตกกระทบของรังสีที่ทำกับพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน

2.2.1.2 เวลาสุริยะ (Solar Time) คือ เวลาที่เปรียบเทียบกับเวลาที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับเวลาท้องถิ่น (Local Time) ที่อ่านได้จากนาฬิกา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเวลาท้องถิ่นให้เป็นเวลาสุริยะก่อนที่จะนำไปคำนวณหาพลังงานจากแสงอาทิตย์ เวลาสุริยะจะต่างกับเวลาท้องถิ่นมากขึ้นกับตำแหน่งของสถานที่และวันที่จะคำนวณหาพลังงานจากแสงอาทิตย์ ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งสองสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$AST = LST + ET / 60 + (LSM - LON) / 15 \quad (2.5)$$

หรือสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของมุมชั่วโมง (H) ได้คือ

$$H = 15(AST - 12) \quad (2.6)$$

โดย AST คือ เวลาสุริยะ (Apparent Solar Time, ชั่วโมง)
 LST คือ เวลาท้องถิ่น (Local Standard Time, ชั่วโมง)
 ET คือ สมการเวลา (Equation of Time, นาที) แสดงไว้ในตารางที่ 2.3
 LSM คือ เส้นแวงมาตรฐานที่ท้องถิ่นอ้างอิง (Local Standard Time Meridian, องศา)
 LON คือ เส้นแวงที่สถานที่นั้นตั้งอยู่ (Local Longitude, องศา)

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบที่ทิศทางเฉพาะใดๆ เมื่อเทียบกับโลกที่เวลาใดๆ กับพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้รับ คือ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยมุมต่างๆ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งความหมายของมุมต่างๆ มีดังนี้

L เส้นรุ้ง (Latitude) คือ ตำแหน่งเชิงมุมทางเหนือหรือใต้ของเส้นศูนย์สูตร โดยทางเหนือของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ มีค่าระหว่าง $-90^\circ \leq L \leq 90^\circ$

δ เคคิเณชัน (Declination) คือ มุมที่เกิดระหว่างแนวต่อศูนย์กลางโลกกับดวงอาทิตย์ ทำกับระนาบศูนย์สูตร เมื่อเวลาเที่ยงสุริยะ (Solar Noon) โดยทางทิศเหนือของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ มีค่าระหว่าง $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ ซึ่งหาได้จากตารางที่ 2.3

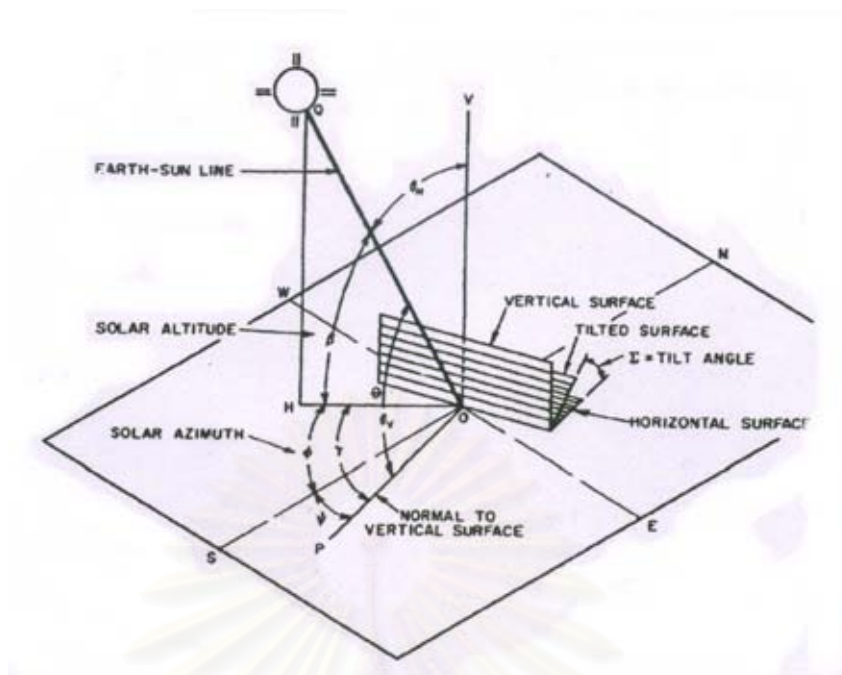
Σ มุมเอียงของระนาบ (Tilt) เป็นมุมของระนาบที่ทำกับแนวระดับมีค่าระหว่าง $0^\circ \leq \Sigma \leq 180^\circ$ (เกิน 90 องศา แสดงว่าระนาบหันหน้าลง)

ψ มุมเอซิมุทของระนาบ (Surface azimuth angle) คือ มุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแนวฉายบนระนาบระดับของเส้นตั้งฉากกับผิวของระนาบจากแนวเมริเดียน (Local Meridian) มุมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าแนวของรูปฉายชี้ไปทางทิศใต้ มีค่าเป็นบวกเมื่อแนวฉายชี้ไปทางทิศตะวันตก มีค่าเป็นลบเมื่อแนวฉายชี้ไปทางทิศตะวันออก มีค่าระหว่าง $-180^\circ \leq \psi \leq 180^\circ$ หาได้จากตารางที่ 1

H มุมชั่วโมง (Hour Angle) คือ มุมที่เกิดจากแนวฉายของเส้นที่ลากจากศูนย์กลางโลกไปยังตำแหน่งใดๆ บนผิวโลกทำกับแนวต่อระหว่างศูนย์กลางโลกและดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงของเวลาสุริยะ ที่เวลาสุริยะตอนเที่ยง มุมนี้จะเป็น 0° และจะเพิ่มขึ้น 15° ต่อชั่วโมง โดยก่อนเที่ยงจะมีค่าเป็นลบและหลังเที่ยงจะมีค่าเป็นบวก

β Solar Altitude คือ มุมระหว่างลำแสงแดดกับเส้นตั้งฉากของแนวระดับ

θ มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ (Angle of Incidence) คือ มุมที่เกิดจากแนวของแสงอาทิตย์ทำกับแนวของเส้นตั้งฉากของระนาบ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับดวงอาทิตย์และพื้นผิว

ตารางที่ 2.1 ทิศทางของระนาบและมุมเอซิมูทของระนาบ เมื่อเทียบกับทิศใต้

Orientation	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Surface azimuth ψ	180°	-135°	-90°	-45°	0°	45°	90°	135°

ที่มา : 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook

ตารางที่ 2.2 Time Zone Meridians ของประเทศอเมริกาและแคนาดา

Time Zone	Standard Meridian
Atlantic	60
Eastern	75
Central	90
Mountain	105
Pacific	120
Alaska	135
Hawaii	150

ที่มา : 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook

และความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆมีดังนี้

$$\sin \beta = \cos L \cos \xi \cos H + \sin L \sin \xi \quad (2.7)$$

$$\cos \phi = \frac{\sin \beta \sin L - \sin \xi}{\cos \beta \cos L} \quad (2.8)$$

$$\gamma = \phi - \psi \quad (2.9)$$

ดังนั้นค่าโคไซน์ของมุมตกกระทบของรังสีที่ทำกับกรอบของโชนนั้นๆ จะมีค่าเท่ากับ

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (2.10)$$

2.2.1.3 ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิว (Direct Normal Irradiation, I_{DN}) หาได้จากสมการ

$$I_{DN} = \frac{ASI}{\exp(B / \sin \beta)} \quad (2.11)$$

เมื่อ ASI คือ Apparent Solar Irradiation ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ หาได้จากตารางที่ 2.3
 B คือ Atmospheric Extinction Coefficient หาได้จากตารางที่ 2.3

2.2.1.4 ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีที่เกิดการกระจายกับไอน้ำในอากาศ (Sky Diffuse Irradiation, I_d) แบ่งออกได้เป็น

เมื่อ I_d ตกกระทบบนพื้นผิวที่ตั้งฉากกับระนาบระดับ (Vertical Surfaces)

$$I_d = CYI_{DN} \quad (2.12)$$

โดย C คือ Sky Diffuse Factor หาได้จากตารางที่ 2.3

Y คือ อัตราส่วนระหว่างการกระจายของท้องฟ้า

$$Y = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad \text{สำหรับ } \cos \theta > -0.2$$

$$Y = 0.45 \quad \text{สำหรับ } \cos \theta \leq -0.2 \quad (2.13)$$

เมื่อ I_d ตกกระทบกับพื้นผิวที่ไม่ตั้งฉากกับระนาบระดับ (Surfaces Other than Vertical)

$$I_d = CI_{DN} \left(\frac{1 + \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.14)$$

ตารางที่ 2.3 Extraterrestrial Solar Radiation Intensity and Related Data

	Equation of time, min	Declination, degree	ASI W/m ²	B (Dimensionless ratio)	C
Jan	-11.2	-20.0	1230	0.142	0.058
Feb	-13.9	-10.8	1215	0.144	0.060
Mar	-7.5	0.0	1186	0.156	0.071
Apr	1.1	11.6	1136	0.180	0.097
May	3.3	20.0	1104	0.196	0.121
Jun	-1.4	23.45	1088	0.205	0.134
Jul	-6.2	20.6	1085	0.207	0.136
Aug	-2.4	12.3	1107	0.201	0.122
Sep	7.5	0.0	1151	0.177	0.092
Oct	15.4	-10.5	1192	0.160	0.073
Nov	13.8	-19.8	1221	0.149	0.063
Dec	1.6	-23.45	1233	0.142	0.057

ที่มา : 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook

2.2.1.5 พลั๊กซ์ความร้อนจากรังสีที่เกิดการกระจายหลังจากสะท้อนกลับจากพื้นดิน
(Ground-Reflected Irradiation, I_r)

$$I_r = I_{DN} (C + \sin \beta) \rho_g \left(\frac{1 - \cos \Sigma}{2} \right) \quad (2.15)$$

โดย β คือ มุมระหว่างลำแสงแดดกับเส้นตั้งฉากของแนวระดับ (Solar Altitude)

ρ_g คือ ค่าสภาพการสะท้อนแสง (Ground reflectivity) โดยปกติมีค่าเท่ากับ 0.2

สำหรับพื้นผิวผสม (Mixture of Ground Surfaces) และสำหรับพื้นผิวอื่นๆ หาได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ของพื้นผิวต่างๆ

Foreground Surface	Incident Angle θ					
	20°	30°	40°	50°	60°	70°
New concrete	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
Old concrete	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.25
Bright green grass	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31
Crushed rock	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31
Bitumen and gravel roof	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Bituminous parking lot	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12

ที่มา : 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook

2.2.2 พลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับสิ่งแวดล้อม (ท้องฟ้า พื้นดิน อากาศ) แบ่งได้เป็น 3 ส่วน (Walton, 1983) คือ

$$q_{LWR}'' = q_{oa}'' + q_{sky}'' + q_{gr}'' \quad (2.16)$$

และการที่จะหาค่าดังกล่าวจะสมมุติว่าพื้นผิวมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมหรือท้องฟ้าหรือพื้นดิน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจะอยู่ในรูปของสมการไม่เชิงเส้น แต่ในที่นี้จะแปลงสมการต่างๆให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยจะใช้วิธี MRT ในการจำลองสมการ (McClellan, 1997)

2.2.2.1 พลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับท้องฟ้า

$$q_{sky}'' = \sigma \epsilon F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{so}^4) \quad (2.17)$$

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

$$q_{sky}'' = h_{sky} (T_{sky} - T_{so}) \quad (2.18)$$

โดย	q''_{sky}	คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวกับท้องฟ้า (W/m ²)
	h_{sky}	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของท้องฟ้า มีค่าประมาณ $4\sigma\epsilon F_{sky} T_{avg}^3$ (W/m ² K)
	σ	คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} (W/(m ² K ⁴))
	ϵ	คือ ค่าสภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน(Emissivity)
	T_{sky}	คือ อุณหภูมิท้องฟ้า(BLAST Model) มีค่าเท่ากับ $T_{oa} - 6.0$ (°K)
	T_{so}	คือ อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (°K)
	T_{oa}	คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°K)
	T_{avg}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิท้องฟ้ากับอุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของ หลังคาหรือโซน (°K)
	F_{sky}	คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของท้องฟ้า มีค่าเท่ากับ $\left[\frac{(1 + \cos \Sigma)}{2} \right] \cos\left(\frac{\Sigma}{2}\right)$

2.2.2.2 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับพื้นดิน

$$q''_{gr} = \sigma\epsilon F_{gr} (T_{gr}^4 - T_{so}^4) \quad (2.19)$$

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

$$q''_{gr} = h_{gr} (T_{gr} - T_{so}) \quad (2.20)$$

โดย	q''_{gr}	คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของ หลังคาหรือโซนกับพื้นดิน (W/m ²)
	h_{gr}	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นดิน มีค่าประมาณ $4\sigma\epsilon F_{gr} T_{avg}^3$ (W/m ² K)
	T_{gr}	คือ อุณหภูมิพื้นดิน(BLAST model) มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิของอากาศภายนอก (°K)
	T_{avg}	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิพื้นดินกับอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคา หรือโซน (°K)
	F_{gr}	คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของพื้นดิน มีค่าเท่ากับ $\left[\frac{(1 - \cos \Sigma)}{2} \right]$

2.2.2.3 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก

$$q''_{oa} = \sigma \varepsilon F_a (T_{oa}^4 - T_{so}^4) \quad (2.21)$$

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

$$q''_{oa} = h_{oa} (T_{oa} - T_{so}) \quad (2.22)$$

โดย q''_{oa} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)
 h_{oa} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอากาศภายนอกมีค่าประมาณ $4\sigma \varepsilon F_a T_{avg}^3$ ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 T_{avg} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกกับอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน ($^{\circ}\text{K}$)
 F_a คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของอากาศ มีค่าเท่ากับ $1 - F_{sky} - F_g$

2.2.3 ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก

$$q''_{conv} = h_{co} (T_{oa} - T_{so}) \quad (2.23)$$

โดย q''_{conv} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)
 h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน ($\text{W/m}^2\text{K}$)
 T_{oa} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก ($^{\circ}\text{K}$)
 T_{so} คือ อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน ($^{\circ}\text{K}$)

ในการหาค่า h_c ใช้แบบจำลองของ BLAST Detailed Convection Model ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็น Force Convection และ Natural Convection ดังนี้ (McClellan, 1997)

$$h_c = h_f + h_n \quad (2.24)$$

2.2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบบังคับ (Force Convection Coefficient)

$$h_f = 2.537 W_f R_f \sqrt{\frac{P V_{az}}{A}} \quad (2.25)$$

โดย h_f คือ Force Convection Coefficient (W/m²K)

W_f คือ ค่าแก้ไขเนื่องจากทิศทางของลม (Wind Direction Modifier)

สำหรับ Leeward Surfaces , W_f มีค่าเท่ากับ 0.5

สำหรับ Windward Surfaces , W_f มีค่าเท่ากับ 1.0

จะเป็น Leeward เมื่อมุมตกกระทบของลมมีค่ามากกว่า 100 องศาเมื่อเทียบกับแนวรังสีตกกระทบตั้งฉาก

R_f คือ ค่าแก้ไขเนื่องจากความหยาบผิว (Surface Roughness Multiplier) หาค่าจากตารางที่ 2.7

P คือ ความยาวรอบรูปของพื้นผิว (m)

A คือ พื้นที่ผิว (m²)

V_{az} คือ ความเร็วลม มีค่าเท่ากับ $V_o \left[\frac{z}{z_o} \right]^{1/\tau}$

โดย V_o คือ ความเร็วลมที่สภาวะมาตรฐาน (m/s)

z คือ ความสูงของพื้นผิวเมื่อเทียบกับพื้นดิน (m)

z_o คือ ความสูงที่ความเร็วลมมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 9.14 m

τ คือ Terrain-dependent Coefficient (Walton, 1981)

สำหรับ พื้นผิวเรียบหรือพื้นที่โล่ง , τ มีค่าเท่ากับ 7.0

สำหรับ พื้นผิวขรุขระหรือพื้นที่มีป่าปกคลุม , τ มีค่าเท่ากับ 3.5

สำหรับ ตึกหรือในเมือง , τ มีค่าเท่ากับ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความขรุขระของวัสดุ (Surface Roughness , Walton, 1981)

ชนิดของวัสดุ	R_f	ชนิดของวัสดุ	R_f
แก้ว	1	ไม้สน	1.13
อิฐ	1.67	ปูนฉาบเรียบ	1.11
คอนกรีต	1.52	ปูนฉาบขรุขระ	2.17

2.2.3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติ(Natural Convection Coefficient)

$$h_n = 9.482 \frac{\sqrt[3]{|T_{so} - T_{oa}|}}{7.238 - |\cos \Sigma|} \quad \text{สำหรับความร้อนไหลขึ้น(Heat Flow is up)} \quad (2.26)$$

$$h_n = 1.810 \frac{\sqrt[3]{|T_{so} - T_{oa}|}}{1.382 + |\cos \Sigma|} \quad \text{สำหรับความร้อนไหลลง(Heat Flow is down)} \quad (2.27)$$

โดย h_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบธรรมชาติ ($\text{W/m}^2\text{K}$)

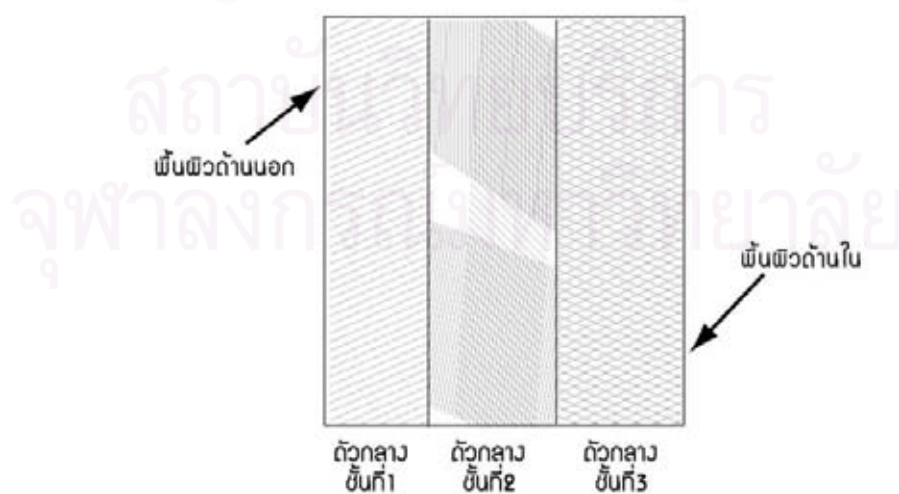
T_{oa} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก ($^{\circ}\text{K}$)

T_{so} คือ อุณหภูมิของผิวด้านนอกของกรอบของโซล (°K)

2.3 กระบวนการนำความร้อน 1 มิติ ในสถานะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น

ซึ่งจะพิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการนำความร้อน 1 มิติในสถานะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.4 ตัวกลางของการนำความร้อนหลายชั้น

สมมติให้ k เป็นค่าคงที่จะได้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \partial T(x, t) = \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t) \quad (2.29)$$

โดย $g = \frac{k}{\rho c_p}$

จากสมการ Fourier's Law

$$q(x, t) = -k \frac{\partial}{\partial x} T(x, t) \quad (2.30)$$

- โดย T คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และเวลา t ใดๆ ($^{\circ}\text{K}$)
 x คือ ตำแหน่ง (เมตร)
 t คือ เวลา (วินาที)
 g คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ทางความร้อน (Thermal Diffusivity, m^2/s)
 q คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ตำแหน่ง x และเวลา t ใดๆ (W)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity, W/m.K)
 ρ คือ ความหนาแน่น (Kg/m^3)
 c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat, J/Kg.K)

แก้สมการที่ (2.31) โดยใช้ Laplace Transform

$$L\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \partial T(x, t)\right] = L\left[\frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial t} T(x, t)\right] \quad (2.31)$$

จาก Appendix F ของ Poulidakos (1994)

$$L[aT_1(x, t) + bT_2(x, t)] = aT_1(x, s) + bT_2(x, s) \quad (2.32)$$

$$L\left[\frac{\partial}{\partial t} T(x, t)\right] = sT(x, s) - T(x, 0) \quad (2.33)$$

$$L\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}T(x,t)\right] = \frac{d^2}{dx^2}[T(x,s)] \quad (2.34)$$

แทนสมการ (2.33) และ (2.34) ลงในสมการ (2.31) จะได้

$$\frac{d^2}{dx^2}[T(x,s)] = \frac{1}{\alpha}[sT(x,s) - T(x,0)] \quad (2.35)$$

สมมติให้ Initial Condition $T(x,0) = 0$ (Hittle, 1981)

$$\frac{d^2}{dx^2}[T(x,s)] = \frac{1}{\alpha}sT(x,s) \quad (2.36)$$

จัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\frac{d^2}{dx^2}[T(x,s)] - \frac{1}{\alpha}sT(x,s) = 0 \quad (2.37)$$

จากรูปแบบของสมการที่ (2.37) จะเป็นสมการ Second Order Ordinary Differential Equation ผลเฉลยของสมการจะอยู่ในรูปของ

$$T(x,s) = A \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.38)$$

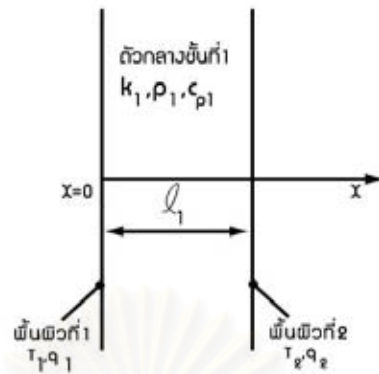
ทำการ Differentiate สมการ (2.38) เทียบกับ x จะได้เป็น

$$\frac{d}{dx}T(x,s) = A\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.39)$$

จากสมการ Fourier's Law สมการที่ (2.30) จะได้

$$q(x,s) = -kA\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) - kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.40)$$

เริ่มต้นโดยการพิจารณา Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น

$$T_1(0, s) \text{ และ } q_1(0, s) \text{ สำหรับ พื้นผิวที่ 1} \quad (2.41)$$

$$T_2(L, s) \text{ และ } q_2(L, s) \text{ สำหรับ พื้นผิวที่ 2} \quad (2.42)$$

แทนค่าสมการ Boundary Condition (2.41) และ (2.42) ลงในสมการ (2.38) และ (2.40) จะได้

$$T_1(0, s) = A \quad (2.43)$$

$$q_1(0, s) = -kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \quad (2.44)$$

$$T_2(L, s) = A \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B \sinh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.45)$$

$$q_2(L, s) = -kA\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) - kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.46)$$

จัดรูปสมการ (2.43) ถึง (2.46) ให้อยู่ในรูป

$$T_1(s) = A(s) \times T_2(s) + B(s) \times q_2(s) \quad (2.47)$$

$$q_1(s) = c(s) \times T_2(s) + D(s) \times q_2(s) \quad (2.48)$$

โดยใช้คุณสมบัติของ Hyperbolic Function $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ ช่วยในการจัดรูปสมการจะได้

$$A(s) = \cosh\left(\frac{L}{\sqrt{s/\alpha}}\right) \quad (2.49)$$

$$B(s) = \frac{1}{k} \sqrt{s/\alpha} \sinh\left(\frac{L}{\sqrt{s/\alpha}}\right) \quad (2.50)$$

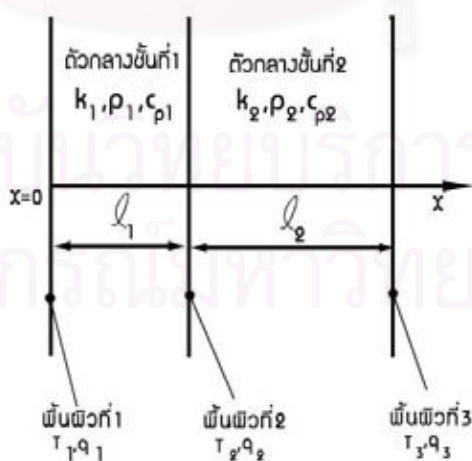
$$C(s) = k \sqrt{s/\alpha} \sinh\left(\frac{L}{\sqrt{s/\alpha}}\right) \quad (2.51)$$

$$D(s) = \cosh\left(\frac{L}{\sqrt{s/\alpha}}\right) \quad (2.52)$$

และจัดสมการ (2.47) และ (2.48) ให้อยู่ในรูปของ Matrix ดังนี้

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2(s) \\ q_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

สมการที่ (2.53) เราเรียก Matrix $\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ ว่า Transmission Matrix สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น



รูปที่ 2.6 Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 2 ชั้น

เพราะฉะนั้นในทำนองเดียวกันสำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติสำหรับวัสดุ 2 ชั้น ตามรูปที่ 2.6 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สำหรับตัวกลางชั้นที่ 1

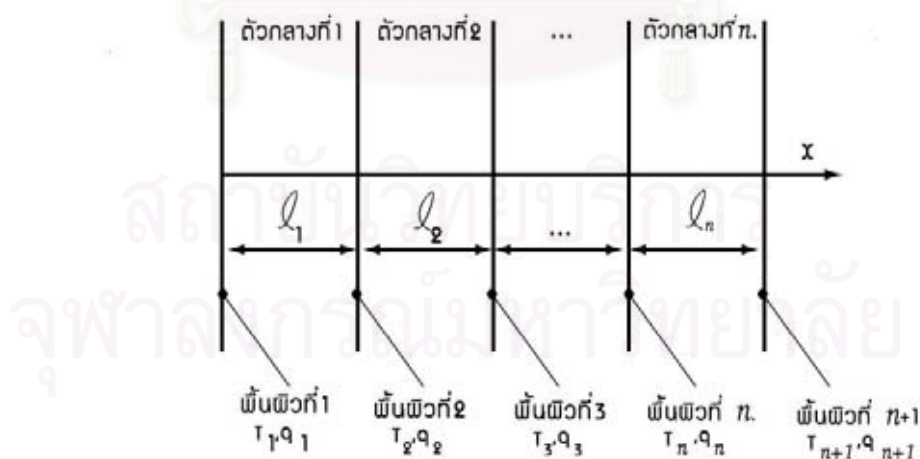
$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2(s) \\ q_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

สำหรับตัวกลางชั้นที่ 2

$$\begin{bmatrix} T_2(s) \\ q_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_3(s) \\ q_3(s) \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

จากสมการที่ (2.54) และ (2.55) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในหนึ่งมิติสำหรับตัวกลาง 2 ชั้น ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_3(s) \\ q_3(s) \end{bmatrix} \quad (2.56)$$



รูปที่ 2.7 Boundary Condition สำหรับตัวกลางหลายชั้น

และในทำนองเดียวกันนี้สามารถพัฒนาเป็นความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในหนึ่งมิติ สำหรับตัวกลางหลายชั้น ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{n+1}(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{n+1}(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

ถ้ากำหนดให้

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

โดยเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ $A(s)$, $B(s)$, $C(s)$, $D(s)$ เรียกว่า Total Transmission Matrix มีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(L_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}) & \frac{1}{k_1} \sqrt{s/\alpha_1} \sinh(L_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}) \\ k_1 \sqrt{s/\alpha_1} \sinh(L_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}) & \cosh(L_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha_1}}) \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\sqrt{sR_1C_1}) & \frac{R_1}{\sqrt{sR_1C_1}} \sinh \sqrt{sR_1C_1} \\ \frac{\sqrt{sR_1C_1}}{R_1} \sinh \sqrt{sR_1C_1} & \cosh(\sqrt{sR_1C_1}) \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

โดย $R_1 = L_1 / k_1$ สำหรับวัสดุชั้นที่ 1 และ $R_n = L_n / k_n$ สำหรับวัสดุชั้นที่ n
 $C_1 = L_1 \rho_1 C_{p1}$ สำหรับวัสดุชั้นที่ 1 และ $C_n = L_n \rho_n C_{pn}$ สำหรับวัสดุชั้นที่ n

เมื่อ R_n คือ ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance, $m^2.K/W$)
 C_n คือ ค่าความจุความร้อน (Thermal Capacitance, $J/m^2.K$)

โดยทั่วไปแล้วเราต้องการทราบอัตราการถ่ายเทความร้อน(Heat Flux) ดังนั้นเราจะให้อุณหภูมิที่พื้นผิวเป็นค่าที่ขอบเขต สมการ (2.60) สามารถเขียนเป็นสมการได้ 2 สมการ คือ

$$T_1(s) = A(s)T_{n+1}(s) + B(s)q_{n+1}(s) \quad (2.62)$$

$$q_1(s) = C(s)T_{n+1}(s) + D(s)q_{n+1}(s) \quad (2.63)$$

จัดรูปสมการ (2.62) ใหม่ได้เป็น

$$q_{n+1}(s) = \frac{1}{B(s)}T_1(s) - \frac{A(s)}{B(s)}T_{n+1}(s) \quad (2.64)$$

แทนสมการ (2.64) ลงในสมการ (2.63) จะได้

$$q_1(s) = C(s)T_{n+1}(s) + D(s)\left[\frac{1}{B(s)}T_1(s) - \frac{A(s)}{B(s)}T_{n+1}(s)\right] \quad (2.65)$$

$$q_1(s) = C(s)T_{n+1}(s) + \frac{D(s)}{B(s)}T_1(s) - \frac{A(s)D(s)}{B(s)}T_{n+1}(s) \quad (2.66)$$

$$q_1(s) = \frac{D(s)}{B(s)}T_1(s) + \left[C(s) - \frac{A(s)D(s)}{B(s)}\right]T_{n+1}(s) \quad (2.67)$$

$$q_1(s) = \frac{D(s)}{B(s)}T_1(s) + \left[\frac{B(s)C(s) - A(s)D(s)}{B(s)}\right]T_{n+1}(s) \quad (2.68)$$

จาก Hittle (1979) กล่าวไว้ว่า Total Transmission Matrix นั้นจะมีค่า Det เท่ากับ 1 เสมอ นั่นคือ

$$A(s)D(s) - B(s)C(s) = 1 \quad (2.69)$$

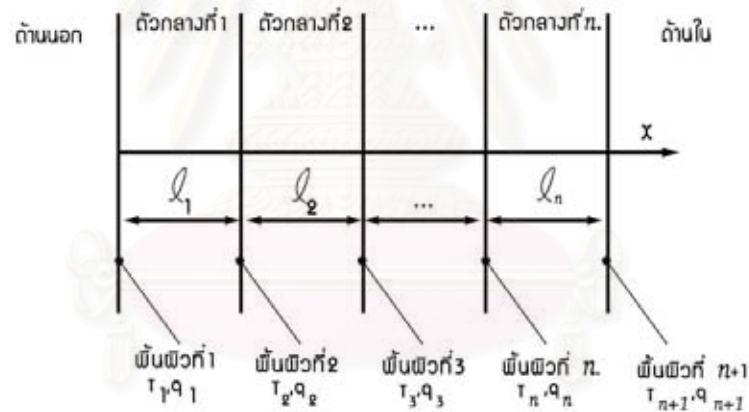
เมื่อแทนสมการ (2.69) ลงในสมการ (2.68) จะได้เป็น

$$q_1(s) = \frac{D(s)}{B(s)} T_1(s) - \frac{1}{B(s)} T_{n+1}(s) \quad (2.70)$$

$$q_{n+1}(s) = \frac{1}{B(s)} T_1(s) - \frac{A(s)}{B(s)} T_{n+1}(s) \quad (2.71)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} q_1(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{B(s)} & -\frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & -\frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(s) \\ T_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.72)$$



รูปที่ 2.8 กำหนด Boundary Condition ของพื้นผนังด้านนอกและด้านในสำหรับตัวกลางหลายชั้น

ถ้ากำหนดให้ $T_1 = T_o$, $q_1 = q_o$ และ $T_{n+1} = T_i$, $q_{n+1} = q_i$ ตามรูปที่ 2.8 จะสามารถเขียนสมการ (2.73) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_o(s) \\ q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D(s)}{B(s)} & -\frac{1}{B(s)} \\ \frac{1}{B(s)} & -\frac{A(s)}{B(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o(s) \\ T_i(s) \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

เรานิยามค่าสัมประสิทธิ์ของ Transmission Matrix ให้เป็น $D(s)/B(s) = X(s)$, $1/B(s) = Y(s)$, $A(s)/B(s) = Z(s)$ ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_o(s) \\ q_i(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & -Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o(s) \\ T_i(s) \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

หลังจากที่ได้ความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในหนึ่งมิติแล้วจึงทำการแปลงลาปลาซย้อนกลับ และจัดรูปสมการใหม่โดยใช้ Conduction Transfer Function (Hittle,1979) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่พิจารณาฟลักซ์ความร้อน ณ เวลาปัจจุบันให้ขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อน ณ เวลาในอดีต ซึ่งจะได้สมการดังนี้

สำหรับฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน

$$q_{ki}'' = -X_o T_{i,t} + Y_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q_{ki,t-j\delta}'' \quad (2.75)$$

สำหรับฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน

$$q_{ko}'' = -Y_o T_{i,t} + Z_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q_{ko,t-j\delta}'' \quad (2.76)$$

- โดย q_{ki}'' คือ ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน (W/m^2K)
 q_{ko}'' คือ ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน (W/m^2K)
 X_j คือ Internal Conduction Transfer Function โดย $j = 0,1,2,\dots,nz$
 Y_j คือ Cross Conduction Transfer Function โดย $j = 0,1,2,\dots,nz$
 Z_j คือ External Conduction Transfer Function โดย $j = 0,1,2,\dots,nz$
 F_j คือ Flux Conduction Transfer Function โดย $j = 0,1,2,\dots,nq$
 T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน ($^{\circ}K$)
 T_o คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโชน ($^{\circ}K$)

และ m เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดที่เข้าสู่สมการ

k แทนลำดับออเดอร์ของ Conduction Transfer Function

ตัวห้อย i แทนลำดับของพื้นผิวและตัวห้อย j แทนคาบเวลาของแต่ละชั้นเวลา δ โดยในเทอมแรกของแต่ละชุดสมการแยกออกมาเพื่อความสะดวกต่อการหาค่าของอุณหภูมิที่พื้นผิว ค่าลิมิตของผลบวกแต่ละชุด คือ nz และ nq โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ (Hittle, 1979)

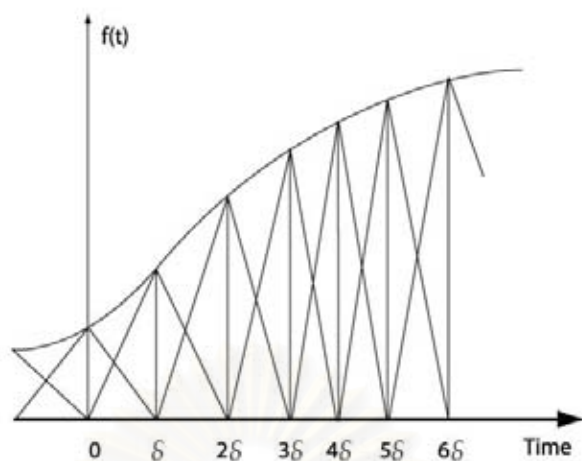
2.4 การหาค่า Conduction Transfer Function

ในทางทฤษฎี การคำนวณค่า Conduction Transfer Function สามารถหาได้โดยวิธี Inverse Laplace Transform ถ้าสามารถหารากของ $B(s) = 0$ ได้อย่างแม่นยำแล้ว คำตอบที่ได้จากวิธีนี้จะ เป็นคำตอบที่แม่นยำด้วย แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วสมการของ $B(s)$ จะซับซ้อนมาก ถ้าตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมีหลายชั้น พิจารณาได้จากสมการ (2.59)

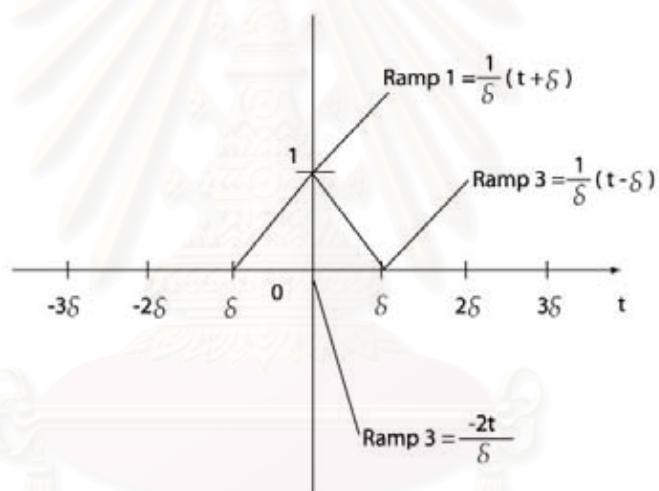
ดังนั้นการหาค่าราก (s) ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ $B(s) = 0$ นั้น จะใช้วิธีที่เรียกว่า Direct Roots Finding (Hittle and Bishop, 1983)

2.4.1 Unit Triangular Pulse Excitation ซึ่งจะพิจารณาฟังก์ชันของอุณหภูมิภายนอกที่แปรผันตามเวลา, $f(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องนั้นให้มีลักษณะเป็น Triangular Pulse ที่มีความสูงเท่ากับ อุณหภูมิที่เวลา t และมีฐานเท่ากับ 2 เท่าของช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้, (δ) ผลรวมของ Triangular Pulse ที่ซับซ้อนกันดังรูป 2.9 จะประมาณเท่ากับฟังก์ชันต่อเนื่อง, $f(t)$ ถึงแม้ว่าการจำลองฟังก์ชันของอุณหภูมิก็ตามแต่ ผลที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงมาก (Gupta, C.L. et al., 1974)

ค่า Conduction Transfer Function คือ ชุดคำตอบตั้งแต่เวลา $\delta = 0, 1, 2, \dots, m$ ที่เป็นผลมาจาก Unit Triangular Pulse ที่มีความสูงเท่ากับ 1 ที่เวลา $t = 0$ และมีฐานเท่ากับ 2δ ช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้ คือ ($\delta = 3600$ วินาที) พิจารณาได้จากรูปที่ 2.10 ซึ่งจะกระทำที่พื้นผิวด้านนอก ค่า Conduction Transfer Function ของชั่วโมงที่ $\delta = 0$ มีผลจาก ramp 1 ค่า Conduction Transfer Function ของชั่วโมงที่ $\delta = 1$ จะมีผลจาก ramp 1 + ramp 2 และค่า Conduction Transfer Function ของชั่วโมงที่ $\delta = 2, 3, \dots, m$ จะมีผลจาก ramp 1 + ramp 2 + ramp 3



รูปที่ 2.9 Superposition of Unit Triangular Pulse Excitation



รูปที่ 2.10 Unit Triangular Pulse Excitation

พิจารณาจาก รูปที่ 2.10 Unit Triangular Pulse จะมีค่าเท่ากับ ramp 1 + ramp 2 + ramp 3 สามารถเขียนได้เป็น

$$f(t) = \frac{1}{\delta}(t + \delta) - \frac{2t}{\delta} + \frac{1}{\delta}(t - \delta) \quad (2.77)$$

2.4.2 การแปลงลาปลาซย้อนกลับแบบทั่วไป จะต้องใช้ทฤษฎี Residue Theorem ดังต่อไปนี้ ถ้ามี Function ที่อยู่ใน Domain ของ s , $F(s)$ โดยที่

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.78)$$

เมื่อ $D(s)$ เป็น Polynomial Degree n ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ $s = \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ และ $N(s)$ เป็น Polynomial Degree $n-1$ (หรือน้อยกว่า) ผลการแปลงลาปลาซย้อนกลับของ $F(s)$ จะเป็น

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{N(s)}{D(s)} \right] = \sum_{n=1}^m \frac{N(\beta_n)}{D'(\beta_n)} e^{\beta_n t} \quad (2.79)$$

โดย $\frac{N(\beta_n)}{D'(\beta_n)}$ เรียกว่า Residue และรากของสมการ $D(s) = 0$ เรียกว่า Pole และถ้า $D(s)$ มีรากที่ $s = 0$ จำนวน 1 ค่า จะได้ $f(t)$ เป็น

$$f(t) = \left[\frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^m \frac{N(\beta_n)}{\beta_n D'(\beta_n)} e^{\beta_n t} \quad (2.80)$$

และเมื่อ $D(s)$ มีรากที่ $s = 0$ จำนวน 2 ค่า จะได้ $f(t)$ เป็น

$$f(t) = \left[\frac{D(s)t}{B(s)} \right]_{s=0} + \left[\frac{d}{ds} \frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^m \frac{N(\beta_n)}{\beta_n^2 D'(\beta_n)} e^{\beta_n t} \quad (2.81)$$

2.4.3 การหาค่า Conduction Transfer Function จากการแปลงลาปลาซย้อนกลับโดยใช้ ทฤษฎี Residue Theorem ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.2 จะหาชุดสัมประสิทธิ์ X (Internal Conduction Transfer Function) , Y (Cross Conduction Transfer Function) , Z (External Conduction Transfer Function) ได้ดังต่อไปนี้

ผลการแปลงลาปลาซสำหรับ Unit Triangular Pulse, $f(t)$ คือ $\frac{1}{s^2}$ ดังนั้นถ้าพิจารณา สัมประสิทธิ์ของ X - Conduction Transfer Function จะได้เป็น

$$X_m = \frac{1}{s^2} \frac{D(s)}{B(s)} \quad (2.82)$$

เนื่องจาก Root ที่ $s = 0$ มี 2 ค่า ซึ่งพิจารณาได้จาก s^2 ดังนั้น การแปลงลาปลาซย้อนกลับ สำหรับสมการ 2.81 จะได้เป็น

$$\xi(t) = \left[\frac{D(s)}{B(s)} t \right]_{s=0} + \left[\frac{d}{ds} \frac{D(s)}{B(s)} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\beta_n t} D(s)}{\beta_n^2 B'(\beta_n)} \quad (2.83)$$

สัมประสิทธิ์ X - Conduction Transfer Function จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$X_0 = \xi(\delta) \quad (2.84)$$

$$X_1 = \xi(2\delta) - 2\xi(s) \quad (2.85)$$

$$X_m = \xi[(m+1)\delta] - 2\xi(m\delta) + \xi[(m-1)\delta] \quad (2.86)$$

แทนสมการ (2.77) และ (2.83) ลงในสมการ (2.84) ถึงสมการ (2.86) จะได้ ชุดสัมประสิทธิ์ ของ X (Internal Conduction Transfer Function) ส่วนชุดสัมประสิทธิ์ของ Y (Cross Conduction Transfer Function) และ Z (External Conduction Transfer Function) สามารถหาได้ทำนองเดียวกัน และรูปแบบของสมการในการหาค่า Conduction Transfer Function ในออเดอร์ 0 ดังนี้

ค่าชุดสัมประสิทธิ์ X Conduction Transfer Function

$$X_0 = \left[\frac{D(s)}{B(s)} + \frac{D'(s)}{\delta B(s)} + \frac{D(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_n} D(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.87)$$

$$X_1 = - \left[\frac{D'(s)}{\delta B(s)} - \frac{D(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right]_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_n} (1 - 2e^{\delta\beta_n}) D(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.88)$$

$$X_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-(m+1)\delta\beta_n} (1 - e^{\delta\beta_n})^2 D(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.89)$$

ค่าชุดลัมประสิทธิ์ Y Conduction Transfer Function

$$Y_0 = \left[\frac{1}{B(s)} - \frac{B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Big|_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_n} D(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.90)$$

$$Y_1 = \left[\frac{B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Big|_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_n} (1 - 2e^{\delta\beta_n})}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.91)$$

$$Y_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-(m+1)\delta\beta_n} (1 - e^{\delta\beta_n})^2}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.92)$$

ค่าชุดลัมประสิทธิ์ Z Conduction Transfer Function

$$Z_0 = \left[\frac{A(s)}{B(s)} + \frac{A'(s)}{\delta B(s)} + \frac{D(s)A'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Big|_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_n} A(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.93)$$

$$Z_1 = - \left[\frac{A'(s)}{\delta B(s)} - \frac{A(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Big|_{s=0} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_n} (1 - 2e^{\delta\beta_n}) A(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.94)$$

$$Z_m = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-(m+1)\delta\beta_n} (1 - e^{\delta\beta_n})^2 A(s)}{\delta\beta_n^2 B'(s)} \Big|_{s=-\beta_n} \quad (2.95)$$

โดยที่ $A'_i(s) = \frac{d(A_i(s))}{ds} = \frac{1}{2} \frac{R_i C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh(\sqrt{s R_i C_i})$ (2.96)

$$B'_i(s) = \frac{d(B_i(s))}{ds} = \frac{R_i}{2s} \cosh(\sqrt{s R_i C_i}) - \frac{R_i}{2s \sqrt{s R_i C_i}} \sinh(\sqrt{s R_i C_i}) \quad (2.97)$$

$$C'_i(s) = \frac{d(C_i(s))}{ds} = \frac{C_i}{2} \cosh(\sqrt{s R_i C_i}) + \frac{1}{2} \frac{C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh(\sqrt{s R_i C_i}) \quad (2.98)$$

$$D'_i(s) = \frac{d(D_i(s))}{ds} = \frac{1}{2} \frac{R_i C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh(\sqrt{s R_i C_i}) \quad (2.99)$$

และให้ $\lambda_n = e^{-\delta\beta_n}$ ซึ่ง $-\beta_n$ เป็นรากของสมการ $B(s) = 0$ และในการหาค่าอนุพันธ์ของสัมประสิทธิ์ $A'(s), B'(s), C'(s)$ และ $D'(s)$ ใน Total Transmission Matrix หาได้โดยกฎลูกโซ่ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{dA(s)}{ds} & \frac{dB(s)}{ds} \\ \frac{dC(s)}{ds} & \frac{dD(s)}{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'(s) & B'(s) \\ C'(s) & D'(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A'_1(s) & B'_1(s) \\ C'_1(s) & D'_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_2(s) & B'_2(s) \\ C'_2(s) & D'_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \\ &+ \cdots + \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A'_n(s) & B'_n(s) \\ C'_n(s) & D'_n(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.100)$$

และสำหรับออเดอร์ k ใดๆมีรูปแบบดังนี้

$$X_{k,1} = X_{k-1,1} \quad (2.101)$$

$$X_{k,m} = X_{k-1,m} - \lambda_k X_{k-1,m-1} \quad \text{เมื่อ } m \geq 1 \quad (2.102)$$

$$Y_{k,1} = Y_{k-1,1} \quad (2.103)$$

$$Y_{k,m} = Y_{k-1,m} - \lambda_k Y_{k-1,m-1} \quad \text{เมื่อ } m \geq 1 \quad (2.104)$$

$$Z_{k,1} = Z_{k-1,1} \quad (2.105)$$

$$Z_{k,m} = Z_{k-1,m} - \lambda_k Z_{k-1,m-1} \quad \text{เมื่อ } m \geq 1 \quad (2.106)$$

$$F_k = (-1)^{k+1} \prod_{n=1}^k (\lambda_n) \quad (2.107)$$

2.5 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน (Inside Heat Balance)

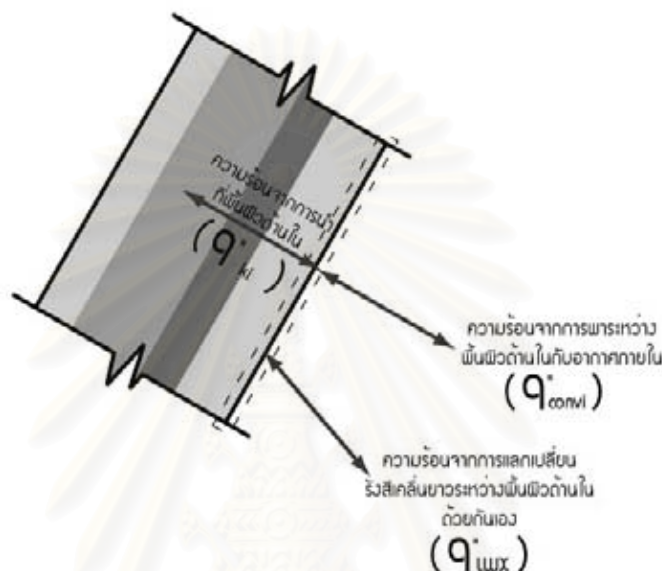
พิจารณาที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน ณ พื้นผิวด้านในนี้จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการพาความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชนด้วยกันเอง ดังนั้นสมการของสมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของกรอบโชนนี้ คือ

$$q_{LWX}'' + q_{ki}'' + q_{conv}'' = 0 \quad (2.108)$$

โดย q''_{LWX} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชนด้วยกันเอง (W/m^2)

q''_{ki} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการนำที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน (W/m^2)

q''_{convl} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชนกับอากาศภายในหลังคาหรือโชน (W/m^2)



รูปที่ 2.11 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน

2.5.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน จะใช้แบบจำลอง MRT ในการคำนวณหา ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น โดยมีหลักการ คือ พิจารณาพื้นผิวของหลังคาหรือโชนเป็น 2 ส่วน คือ พื้นผิวนึ่งเป็นส่วนที่เป็นปริมาตรควบคุม และอีกส่วนหนึ่งคือพื้นผิวที่เหลือทั้งหมดซึ่งคิดเสมือนพื้นผิวสมมุติอีกหนึ่งพื้นผิว การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกันนั้นจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนของพื้นผิวเพียง 2 พื้นผิวเท่านั้น (Walton, 1980)

$$q''_{LWX} = h_{MRT} (T_{MRTi} - T_i) \quad (2.109)$$

โดย h_{MRT} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชนด้วยกันเอง (W/m^2K)

T_{MRTi} คือ อุณหภูมิพื้นผิวสมมุติ ($^{\circ}K$)

T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน ($^{\circ}K$)

ซึ่งค่า h_{MRT} และ T_{MRTi} หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_{MRTi} = \sum_{j \neq i}^n A_j \quad (2.110)$$

$$\varepsilon_{MRTi} = \sum_{j \neq i}^n \frac{A_j \varepsilon_j}{A_{MRTi}} \quad (2.111)$$

$$T_{MRTi} = \sum_{j \neq i}^n \frac{A_j \varepsilon_j T_j}{A_{MRTi} \varepsilon_{MRTi}} \quad (2.112)$$

$$T_{avg i} = \frac{(T_i + T_{MRTi})}{2} \quad (2.113)$$

$$F_{MRTi} = \frac{1.0}{\left[\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + 1 + \frac{A_i (1 - \varepsilon_{MRTi})}{A_{MRTi} \varepsilon_{MRTi}} \right]} \quad (2.114)$$

$$h_{MRT} = 4\sigma F_{MRTi} T_{avg i}^3 \quad (2.115)$$

โดย σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} (W/(m²K⁴))

ε_{MRTi} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวสมมุติโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่

A_{MRTi} คือ พื้นที่ของพื้นผิวสมมุติโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ (m²)

F_{MRTi} คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับพื้นผิวสมมุติ

เนื่องจากสูตรในการหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature) ข้างต้น เป็นเหตุให้เกิดความไม่สมดุลในค่าพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนรวม เนื่องมาจากค่าตัวประกอบรูปร่างและอุณหภูมิของการแผ่รังสีเฉลี่ย (T_{MRTi}) ไม่ใช่ค่าแม่นยำ ดังนั้นความไม่สมดุลของค่าพลังงานดังกล่าวสามารถแก้ไขให้ถูกต้องได้โดยการคำนวณค่าความไม่สมดุลทั้งหมดและเฉลี่ยกันไปทุกพื้นผิว ค่าดังกล่าวหาได้จาก (Richard, 1997)

$$R_{bal} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma A_i F_{MRTi} (T_{MRTi}^4 - T_i^4)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2.116)$$

ดังนั้นค่าฟลักซ์ของการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวด้านในด้วยตัวเองของหลังคาหรือโชนที่แก้ไขแล้ว คือ

$$q_{LWX}'' = h_{MRT} (T_{MRTi} - T_i) - R_{bal} \quad (2.117)$$

2.5.2 ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโชนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน

$$q_{convi}'' = h_{ci} (T_a - T_{si}) \quad (2.118)$$

โดย h_{ci} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชนกับอากาศภายในหลังคาหรือโชน ($W/(m^2K)$)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในหลังคาหรือโชน ($^{\circ}K$)

T_{si} คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโชน ($^{\circ}K$)

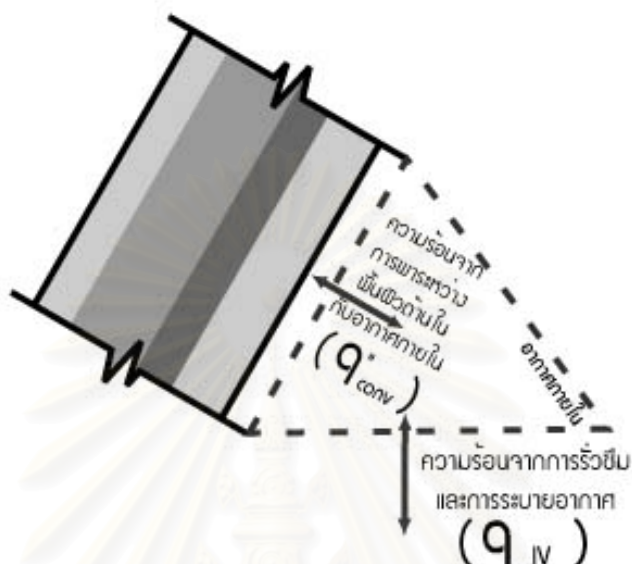
2.6 สมดุลความร้อนที่พิจารณาอากาศภายในหลังคาหรือโชนเป็นปริมาตรควบคุม (Inside Air Heat Balance)

ในวิธีสมดุลความร้อนนั้นมีจุดมุ่งหมายในการที่จะหาภาระทางความร้อน โดยจะไม่พิจารณาความจุความร้อนของอากาศ และการพิจารณาสมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโชนเป็นปริมาตรควบคุมนั้นจะกำหนดให้อยู่ในสภาวะเกือบคงที่ (Quasi-steady) ซึ่งในแต่ละช่วงเวลา สมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโชนจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้ คือ

$$q_{conv} + q_{IV} = 0 \quad (2.119)$$

โดย q_{conv} คือ ความร้อนจากการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (W)

q_{IV} คือ ความร้อนจากการรั่วซึมและการระบายอากาศ (W)



รูปที่ 2.12 สมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโซน

2.6.1 ความร้อนโดยการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (q_{conv}) จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พื้นที่ของพื้นผิวและผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอากาศภายใน ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$q_{conv} = A_i h_{ci} (T_{si} - T_a) \quad (2.120)$$

2.6.2 ความร้อนจากการรั่วซึมและการระบายอากาศ (q_{IV}) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ซึ่งจะหาได้จากสมการ (2.121) และ (2.122) ตามลำดับ

$$q_{IV_s} = Q \rho c_p (t_o - t_i) \quad (2.121)$$

โดย q_{IV_s} คือ ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและการระบายอากาศในส่วน of ความร้อนสัมผัส (W)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

c_p คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ ($J/kg.K$)

- t_i คือ อุณหภูมิอากาศภายในหลังคาหรือโชน (°K)
 t_o คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกที่รั่วเข้ามาในโชน (°K)

$$q_{IVl} = Qph_{fg}(\omega_o - \omega_i) \quad (2.122)$$

โดย q_{IVl} คือ ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและการระบายอากาศในส่วนของการ
ความร้อนแฝง (W)

h_{fg} คือ เอนทัลปีในการควบแน่นของไอน้ำ ณ อุณหภูมิภายในโชน (J/kg)

ω_i คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโชน (kg_w/kg_a)

ω_o คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอกที่รั่วเข้ามาในโชน (kg_w/kg_a)

2.7 ขั้นตอนการคำนวณในระเบียบวิธีสมดุลความร้อน

การคำนวณภาระความเย็นด้วยระเบียบวิธีสมดุลความร้อนจำเป็นต้องเกิดสมดุลความร้อนทั้ง 4 ประการ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว โดยสมการหลักที่ใช้ในการคำนวณสมดุลความร้อนจะมีหลักๆอยู่ 5 สมการด้วยกัน คือ สมการ (2.1) , สมการ (2.75) , สมการ (2.76) , สมการ (2.108) และสมการ (2.119) ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในระเบียบวิธีสมดุลความร้อนก็คือ อุณหภูมิพื้นผิวผนังทั้งด้านในและด้านนอกในแต่ละชั่วโมง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีสมดุลจึงจำเป็นต้องจัดรูปของสมการที่ได้จากแบบจำลองต่างๆ เพื่อให้เทอมที่มีตัวแปรเป็นอุณหภูมิของพื้นผิวผนังสามารถรวมอยู่ด้วยกันได้ ซึ่งการจัดรูปสมการมีขั้นตอนดังนี้

พิจารณาสมการ (2.1)
$$q''_{ko} = q''_{a.sol} + q''_{LWR} + q''_{conv}$$

พิจารณาแยกในแต่ละเทอมตามสมการ (2.1) ได้ดังนี้

$$q''_{a.sol} = \alpha I_t$$

$$q''_{LWR} = q''_{oa} + q''_{sky} + q''_{gr}$$

$$q''_{LWR} = h_{oa}(T_{oa} - T_{so}) + h_{sky}(T_{sky} - T_{so}) + h_{gr}(T_{gr} - T_{so})$$

$$q_{conv}'' = h_{co} (T_{oa} - T_{so})$$

สมการ (2.1) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\alpha I_t + h_{oa} (T_{oa} - T_{so}) + h_{sky} (T_{sky} - T_{so}) + h_{gr} (T_{gr} - T_{so}) + h_{co} (T_{oa} - T_{so}) = q_{ko}'' \quad (2.123)$$

พิจารณาสมการ (2.108) $q_{LWX}'' + q_{ki}'' + q_{convi}'' = 0$

พิจารณาแยกในแต่ละเทอมตามสมการ (2.108) ได้ดังนี้

$$q_{LWX}'' = h_{MRT} (T_{MRTi} - T_i) - R_{bal}$$

$$q_{convi}'' = h_{ci} (T_{zone} - T_{si})$$

สมการ (2.108) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$q_{ki}'' + h_{MRT} (T_{MRTi} - T_i) - R_{bal} + h_{ci} (T_{zone} - T_{si}) = 0 \quad (2.124)$$

รวมสมการ (2.75) และ (2.124) เพื่อทำการแก้สมการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านในจะได้

$$T_{si,j} = \frac{\left[Y_{oj} T_{soi,j} - \sum_{k=1}^{nz} X_{ki} T_{si-k\delta,j} + \sum_{k=1}^{nz} Y_{ki} T_{soi-k\delta,j} + \sum_{k=1}^{nq} F_{kj} q_{ki-k\delta,j} \right] + h_{MRTi,j} T_{MRTi} - R_{bal} + h_{ci,j} T_{zone} + q_{SW}'' + q_{sol}'' + q_{LWS}''}{\left[X_{oj} + h_{MRTi,j} + h_{ci,j} \right]} \quad (2.125)$$

รวมสมการ (2.76) และ (2.123) เพื่อทำการแก้สมการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกจะได้

$$T_{soi,j} = \frac{\left[Y_{oj} T_{si,j} + \sum_{k=1}^{nz} Y_{ki} T_{si-k\delta,j} - \sum_{k=1}^{nz} Z_{ki} T_{soi-k\delta,j} - \sum_{k=1}^{nq} F_{kj} q_{ko-k\delta,j} \right] + \alpha_j I_{ti,j} + h_{oa,j} T_{oa} + h_{sky,j} T_{sky} + h_{gr,j} T_{gr} + h_{co,j} T_{oa}}{\left[Z_{oj} + h_{oa,j} + h_{sky,j} + h_{gr,j} + h_{co,j} \right]} \quad (2.126)$$

พิจารณาสมการ (2.119) $q_{conv}'' + q_{IV}'' = 0$

พิจารณาแยกในแต่ละเทอมตามสมการ (2.119) ได้ดังนี้

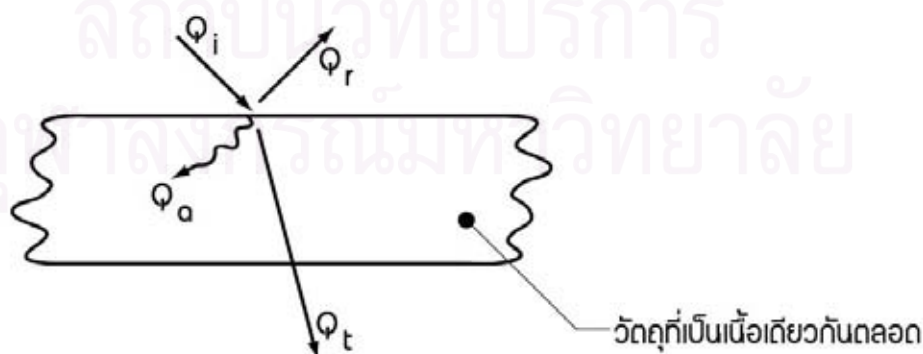
$$\sum_{j=1}^{ns} A_j h_{ci,j} (T_{si,j} - T_{zone_i}) + q_{IV} = 0 \quad (2.127)$$

โดย i คือ ชั่วโมงที่ทำการคำนวณ
 j คือ พื้นผิวที่ทำการคำนวณ
 ns คือ จำนวนของผนัง

2.8 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

กลไกการถ่ายเทพลังงานโดยการแผ่รังสี สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางกายภาพได้จาก ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell ในการพิจารณาพฤติกรรมของกลไกการแผ่รังสีเพื่อใช้ทำนาย คุณสมบัติการแผ่รังสีของวัตถุใดๆ โดยพิจารณาพฤติกรรมกลไกการแผ่รังสีเป็นพฤติกรรมของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า ขณะเดียวกันก็อาศัยทฤษฎีของ Plack ซึ่งจะพิจารณาพฤติกรรมกลไกการแผ่รังสีเป็น พฤติกรรมของโฟตอน เพื่อใช้ทำนายปริมาณของพลังงานที่ถูกปล่อยออกจากวัตถุที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง

การแผ่รังสีความร้อนนั้น ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งต่างกับการนำ ความร้อนหรือการพาความร้อน เมื่อวัตถุใดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นจะแผ่ รังสีความร้อนออกมา



รูปที่ 2.13 การอาบรังสีของวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน

เมื่อพิจารณาการอาบรังสีของวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Body) ดังรูปที่ 2.13 พลังงานจากการอาบรังสี (Q_i) ที่พื้นผิววัตถุนั้น บางส่วนสะท้อนกลับโดยเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า “พลังงานสะท้อนกลับ (Reflected Energy ; Q_r)” พลังงานส่วนที่เหลือจะผ่านพื้นผิวเข้าไปภายในวัตถุ พลังงานส่วนนี้บางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้โดยเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า “พลังงานดูดกลืน (Absorbed Energy ; Q_a)” และบางส่วนจะทะลุผ่านวัตถุออกไป โดยเรียกพลังงานส่วนนี้ว่า “พลังงานส่งผ่าน (Transmitted Energy ; Q_t)” ซึ่งคุณสมบัติในการสะท้อนกลับ , การดูดกลืน และการส่งผ่านพลังงานของวัตถุใด ๆ นั้น จะแตกต่างกัน กล่าวคือ

วัตถุดำ (Black Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานจากการอาบรังสีไว้ได้ทั้งหมดในทุกๆทิศทางและทุกๆความยาวคลื่นของการอาบรังสี โดยไม่มีการสะท้อนกลับและการส่งผ่านพลังงาน

วัตถุทึบแสง (Opaque Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนและการสะท้อนกลับพลังงานจากการอาบรังสีโดยไม่มีการส่งผ่านพลังงาน

วัตถุขาว (White Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถสะท้อนกลับพลังงานจากการอาบรังสีได้ทั้งหมด

วัตถุโปร่งใส (Transparent Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานจากการอาบรังสีได้ทั้งหมด

วัตถุกึ่งโปร่งใส (Semitransparent Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนและส่งผ่านพลังงานจากการอาบรังสี

2.9 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Radiation of Black Body)

วัตถุดำถูกกำหนดให้เป็นวัตถุในอุดมคติของการแผ่รังสีความร้อน กล่าวคือ วัตถุดำสามารถดูดกลืนรังสีเอาไว้ได้ทั้งหมด (โดยไม่มีพลังงานสะท้อนกลับและส่งผ่าน) ขณะอาบรังสีสำหรับทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทางการอาบรังสี นั้นแสดงว่าวัตถุดำเป็นตัวดูดกลืนรังสีสมบูรณ์ และวัตถุดำยังเป็นตัวเปล่งรังสีสมบูรณ์อีกด้วย

2.9.1 ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody of Intensity)

ความเข้มการแผ่รังสีของวัตถุดำที่อุณหภูมิพื้นผิวค่าหนึ่ง (T) ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทาง (θ, ϕ) ในการแผ่รังสี (จากหนังสือการแผ่รังสีความร้อน) ดังนั้นความเข้มการแผ่รังสีของวัตถุดำแบ่งออกเป็นความเข้มการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำ (Hemispherical Spectral Radiation Intensity)

of Blackbody ; $I_{b\lambda}(\lambda, T)$) และความเข้มการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ (Hemispherical Total Radiation Intensity of Blackbody ; $I_b(T)$) โดย $I_{b\lambda}(\lambda, T)$ และ $I_b(T)$ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{1}{\pi} \sigma T^4 \quad (2.128)$$

โดย $I_{b\lambda}(\lambda, T)$ คือ ความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำ (Hemispherical Spectral Radiation Intensity of Blackbody ; $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$)

$I_b(T)$ คือ ความเข้มของการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ (Hemispherical Total Radiation Intensity of Blackbody ; $W/(m^2 \cdot sr)$)

2.9.2 กำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody Emissive Power)

เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุดำสามารถแผ่รังสีออกมาได้สูงสุด ณ อุณหภูมิหนึ่ง (T) แบ่งออกเป็น

2.9.2.1 กำลังของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (Directional Spectral Emissive Power ; $E_{b\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)$) คือ พลังงานการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและทิศทางในการแผ่รังสี

2.9.2.2 กำลังของการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ (Directional Total Emissive Power ; $E_b(\theta, \phi, T)$) คือ พลังงานการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นแต่ขึ้นอยู่กับทิศทางในการแผ่รังสี ซึ่ง $E_{b\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)$ และ $E_b(\theta, \phi, T)$ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_b(\theta, \phi, T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda \quad (2.129)$$

โดย $E_{b\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)$ คือ กำลังของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (Directional Spectral Emissive Power ; $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$)

$E_b(\theta, \phi, T)$ คือ กำลังของการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ (Directional Total Emissive Power ; $W/(m^2 \cdot sr)$)

2.9.2.3 กำลังของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมกลุ่มครึ่งวงกลมของวัตถุดำ (Hemispherical Spectral Emissive Power ; $E_{b\lambda}(\lambda, T)$) คือ พลังงานการแผ่รังสีที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น แต่ไม่ขึ้นกับทิศทางในการแผ่รังสี

2.9.2.4 กำลังของการแผ่รังสีทั้งหมดคลุมครึ่งวงกลมของวัตถุดำ (Hemispherical Total Emissive Power ; $E_b(T)$) คือ พลังงานการแผ่รังสีที่ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและทิศทางในการแผ่รังสี ซึ่ง $E_{b\lambda}(\lambda, T)$ และ $E_b(T)$ มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_b(T) = \int_{\lambda=0}^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.130)$$

2.9.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีกับกำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ

พิจารณาการแผ่รังสีที่อุณหภูมิพื้นผิว (T) เป็นรัศมีครอบคลุมครึ่งวงกลม จากสมการ (2.128) และสมการ (2.130) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีกับกำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ ดังนี้

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \pi I_{b\lambda}(\lambda, T) \quad (2.131)$$

$$E_b(T) = \pi I_b(T) \quad (2.132)$$

2.10 การแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริง (Radiation of Real Surface)

พฤติกรรมและคุณสมบัติการแผ่รังสีของพื้นผิวจริงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของพื้นผิว , ความเรียบหรือขรุขระของผิว , อุณหภูมิของพื้นผิว , ความยาวคลื่นของการแผ่รังสี , ทิศทางการแผ่รังสีและมุมของการแผ่รังสี ดังนั้นในการพิจารณาค่าต่างๆจะอาศัยพฤติกรรมการแผ่รังสีของวัตถุดำเป็นพฤติกรรมอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบพิจารณาหาพฤติกรรมการแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริง

2.10.1 ค่าของสภาพการเปล่งรังสีของวัตถุ(Emissivity ; ε)

สภาพการเปล่งรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการปล่อยพลังงานการแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริงโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ ความสามารถในการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิว , ความยาวคลื่นขณะแผ่รังสี และทิศทางหรือมุมของการแผ่รังสี ดังนั้นค่าของสภาพการเปล่งรังสีจึงสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.10.1.1 สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมทิศทาง (Directional Spectral Emissivity) เป็นค่าของสภาพการเปล่งรังสีที่มีการแจกแจงตามความยาวคลื่น กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) และตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda b}(\lambda, \theta, T)} \quad (2.133)$$

2.10.1.2 สภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดทิศทาง (Directional Total Emissivity) เป็นค่าสภาพการเปล่งรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่น กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\varepsilon(\theta, \phi, T) = \frac{I(\theta, \phi, T)}{I_b(\theta, T)} = \frac{E(\theta, \phi, T)}{E_b(\theta, T)} \quad (2.134)$$

2.10.1.3 สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมครึ่งทรงกลม (Hemispherical Spectral Emissivity) เป็นค่าการสภาพเปล่งรังสีที่รวมค่าจากทุกทิศทาง กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ไม่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{I_\lambda(\lambda, T)}{I_{\lambda b}(\lambda, T)} = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (2.135)$$

2.10.1.4 สภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดครึ่งทรงกลม (Hemispherical Total Emissivity) เป็นค่าสภาพการเปล่งรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่นและค่าจากทุกทิศทาง กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรแสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\varepsilon(T) = \frac{I(T)}{I_b(T)} = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.136)$$

2.10.2 ค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีของวัตถุ (Absorptivity ; α)

สภาพการดูดกลืนรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของพื้นผิว แท้จริงขณะอาบรังสี (Incident Radiation) กล่าวคือ เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานการดูดกลืนรังสี โดยพื้นผิวจริงกับพลังงานการอาบรังสีบนพื้นผิวจริง และเนื่องจากการอาบรังสีของพื้นผิวแท้จริง

ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดรังสี พฤติกรรมเชิงสเปกตรัมและระนาบทิศทางของการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดรังสี เป็นผลทำให้การพิจารณาสภาพดูดกลืนรังสีของพื้นผิวแท้จริง (พื้นผิวอาบรังสี) ยุ่งยากมาก

ในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถหาค่าสภาพเปล่งรังสีได้ง่ายกว่าสภาพดูดกลืนรังสี โดยใช้กฎของ Kirchhoff ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปล่งรังสีกับสภาพดูดกลืนรังสีของวัตถุใดๆ

2.10.2.1 สภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมระนาบทิศทาง (Directional Spectral Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่มีการแจกแจงตามความยาวคลื่น กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) และตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\alpha_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) \quad (2.137)$$

สมการ (2.137) เรียกว่า “กฎของ Kirchhoff” กล่าวคือ สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมระนาบทิศทางที่อุณหภูมิ T ของพื้นผิวแท้จริงเท่ากับสภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมระนาบทิศทางโดยดูดกลืนรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีที่เป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิ T เดียวกัน

2.10.2.2 สภาพการดูดกลืนรังสีทั้งหมดระนาบทิศทาง (Directional Total Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่น กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\alpha(\theta, \phi, T) = \varepsilon(\theta, \phi, T) \quad (2.138)$$

สมการ (2.138) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า” ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระนาบทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิ T ใดๆ”

2.10.2.3 สภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมครึ่งวงกลม (Hemispherical Spectral Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าจากทุกทิศทาง กล่าวคือ เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ไม่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\alpha_\lambda(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \quad (2.139)$$

สมการ (2.139) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า” ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัม ระบุทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง”

2.10.2.4 สภาพการดูดกลืนรังสีทั้งหมดคลุมครึ่งวงกลม (Hemispherical Total Emissivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่นและค่าจากทุกทิศทาง กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชันของตัวแปรแสดงทิศทาง (θ, ϕ)

$$\alpha(T) = \varepsilon(T) \quad (2.140)$$

สมการ (2.140) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า” ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัม ระบุทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ T โดยไม่ขึ้นกับทิศทางการอาบรังสี”

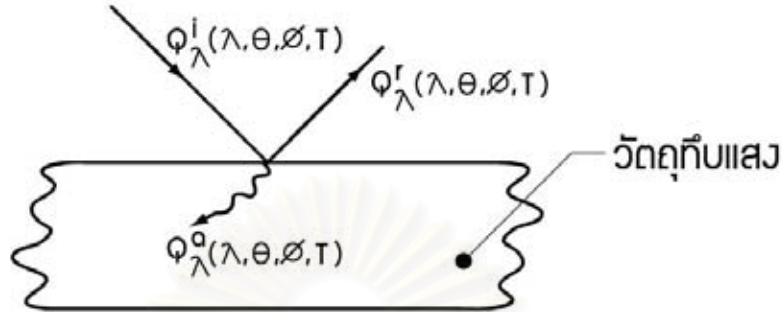
2.10.3 ค่าของสภาพการสะท้อนรังสีของวัตถุ (Reflectivity ; ρ)

สภาพของการสะท้อนรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการสะท้อนพลังงานของพื้นผิว แท้จริงขณะอาบรังสี (Incident Radiation) กล่าวคือ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มการสะท้อนรังสี กับพลังงานในการอาบรังสี และการหาค่าของสภาพสะท้อนรังสีมีความซับซ้อนในการพิจารณา มากกว่าค่าของสภาพการเปล่งรังสีหรือค่าของสภาพการดูดกลืนรังสี เนื่องจากพลังงานการสะท้อนรังสีไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศทางการอาบรังสีในทิศทาง (θ, ϕ) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับทิศทางการสะท้อนรังสีในทิศทาง (θ_r, ϕ_r) อีกด้วย

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเปล่งรังสี สภาพการดูดกลืนรังสีและสภาพการสะท้อนรังสี

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายถึงคำจำกัดความของสภาพการเปล่งรังสี สภาพการดูดกลืนรังสีและสภาพสะท้อนรังสี พลังงานการอาบรังสีบนพื้นผิวจริงของวัตถุทึบแสง บางส่วนพื้นผิวจะดูดกลืนไว้และบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับ (โดยไม่มีพลังงานส่งผ่าน) และใช้กฎของ Kirchhoff อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเปล่งรังสีกับสภาพการดูดกลืนรังสีโดยมีเงื่อนไขต่างๆตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

2.11.1 พิจารณาพลังงานการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (θ, ϕ) บนพื้นผิวแท้จริง $(Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T))$ ที่อุณหภูมิ T ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง $(Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T))$

จากสมดุลพลังงาน จะได้

$$Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T) = Q_\lambda^a(\lambda, \theta, \phi, T) + Q_\lambda^r(\lambda, \theta, \phi, T) \quad (2.141)$$

หรือ

$$\frac{Q_\lambda^a(\lambda, \theta, \phi, T)}{Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T)} + \frac{Q_\lambda^r(\lambda, \theta, \phi, T)}{Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T)} = 1 \quad (2.142)$$

โดย $Q_\lambda^i(\lambda, \theta, \phi, T)$ คือ พลังงานการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (θ, ϕ) ที่อุณหภูมิ T
 $Q_\lambda^a(\lambda, \theta, \phi, T)$ คือ พลังงานการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (θ, ϕ) ที่อุณหภูมิ T
 $Q_\lambda^r(\lambda, \theta, \phi, T)$ คือ พลังงานการสะท้อนรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (θ, ϕ) ที่อุณหภูมิ T

ดังนั้นจะได้

$$\alpha_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) + \rho_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) = 1 \quad (2.143)$$

อาศัยกฎของ Kirchhoff แทนสมการ (2.137) ลงในสมการ (2.143) จะได้

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) + \rho_\lambda(\lambda, \theta, \phi, T) = 1 \quad (2.144)$$

2.11.2 พิจารณาพลังงานการอาบรังสีทั้งหมดกระบอกทิศทาง (θ, ϕ) บนพื้นผิวแท้จริง $(Q^i(\theta, \phi, T))$ ที่อุณหภูมิ T โดยพิจารณาในทำนองเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\varepsilon(\theta, \phi, T) + \rho(\theta, \phi, T) = 1 \quad (2.145)$$

2.11.3 พิจารณาพลังงานการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมครอบคลุมครึ่งวงกลมบนพื้นผิวแท้จริง $(Q_\lambda^i(\lambda, T))$ ที่อุณหภูมิ T โดยพิจารณาในทำนองเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) + \rho_\lambda(\lambda, T) = 1 \quad (2.146)$$

2.11.4 พิจารณาพลังงานการอาบรังสีทั้งหมดครอบคลุมครึ่งวงกลมบนพื้นผิวแท้จริง $(Q^i(T))$ ที่อุณหภูมิ T โดยพิจารณาในทำนองเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\varepsilon(T) + \rho(T) = 1 \quad (2.147)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีการคำนวณโปรแกรม

3.1 วิธีการคำนวณของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น

คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมีขั้นตอนการคำนวณหลักๆประกอบด้วย

3.1.1 ป้อนค่าข้อมูลของระบบหลังคาหรือโซน เช่น จำนวนด้านของผนัง สถานที่ตั้ง พื้นที่เส้นรอบรูปและลักษณะทางกายภาพของผนัง ทิศทางการวางตัวของผนัง ข้อมูลของสภาพอากาศใน 1 ปี เป็นต้น

3.1.2 ป้อนค่าข้อมูลจำนวนของชั้นผนังและคุณสมบัติของแต่ละชั้นผนังในแต่ละด้าน และอุณหภูมิของพื้นผิวผนังด้านในและพื้นผิวด้านนอก รวมทั้งอุณหภูมิของอากาศภายในระบบหลังคาหรือโซนในแต่ละด้านตลอด 24 ชั่วโมง

3.1.3 คำนวณหาค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม

3.1.4 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ Conduction Transfer Function (X, Y, Z) ของผนังแต่ละด้านที่ประกอบขึ้นเป็นหลังคาหรือโซน

3.1.5 คำนวณหาความร้อนจากแสงแดดที่พื้นผิวด้านนอกของผนังแต่ละด้านที่ประกอบขึ้นเป็นหลังคาหรือโซนตลอด 24 ชั่วโมง

3.1.6 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

3.1.7 คำนวณหาภาระความร้อนจากการรั่วซึมหรือการระบายอากาศ

3.1.8 ทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวแปรอุณหภูมิของพื้นผิวผนังด้านในและพื้นผิวด้านนอกในแต่ละด้าน แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กำหนดขึ้นในข้อ 3.1.2

3.1.9 ถ้าตัวแปรอุณหภูมียังไม่เข้าสู่สมดุล ให้ทำซ้ำข้อ 3.1.6 เพื่อหาตัวแปรอุณหภูมิแล้วเปรียบเทียบกับตัวแปรที่ได้กับค่าตัวแปรก่อนหน้านี้ จนกระทั่งตัวแปรอุณหภูมิเข้าสู่สมดุล

3.1.10 ถ้าให้อากาศภายในไม่มีความจุความร้อนจำเพาะ ไปข้อที่ 3.1.13

3.1.11 ถ้าให้อากาศภายในมีความจุความร้อนจำเพาะ คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศภายในใหม่

3.1.12 คำนวณว่าความร้อนเข้าสู่สมดุลหรือไม่ ถ้าความร้อนเข้าสู่สมดุล ไปข้อที่ 3.1.13 แต่ถ้าความร้อนไม่เข้าสู่สมดุล ไปทำซ้ำข้อ 3.1.6

3.1.13 คำนวณหาภาระความร้อนจากส่วนต่างๆที่เข้าสู่หลังคาหรือโซนและค่า U ของหลังคาหรือโซน

3.1.14 แสดงผลลัพธ์ที่ต้องการ

3.2 โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้สำหรับคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนที่พิจารณา

ประกอบด้วยโปรแกรมหลัก (Main Program) และโปรแกรมย่อยๆ (Sub Program) ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนี้

3.2.1 โปรแกรมหลัก Load ใช้ในการคำนวณหาคำตอบของระบบสมการ โดยใช้วิธีสมดุลความร้อน (Heat Balance Method) ซึ่งคำตอบหรือตัวแปรของระบบสมการดังกล่าว จะเป็นค่าอุณหภูมิของพื้นผิวด้านในและด้านนอกของกรอบโซน และโปรแกรมหลักยังใช้ในการคำนวณหาภาระความร้อนในส่วนต่างๆที่เข้าสู่โซนรวมทั้งค่า U อีกด้วย

3.2.2 โปรแกรมป้อนค่า Input ใช้ในการป้อนค่าข้อมูลต่างๆที่โปรแกรมหลักต้องการ เช่น ข้อมูลของโซนและข้อมูลของผนังหรือหลังคา เป็นต้น

3.2.3 โปรแกรมย่อย LUDECOM ใช้ในการแก้ระบบสมการที่มีอยู่ในโปรแกรมหลัก Load เพื่อหาค่าตัวแปร อันได้แก่ อุณหภูมิด้านในและด้านนอกของพื้นผิวต่างๆ

3.2.4 โปรแกรมย่อย EMITT ใช้คำนวณหาค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม

3.2.5 โปรแกรมย่อย PSYCHROMETRICS และ PSYCHROMETRICS1 ใช้ในการคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆของอากาศภายนอกและอากาศภายในโซน ตามลำดับ อันได้แก่ ความดันของอากาศ, อัตราส่วนความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น

3.2.6 โปรแกรมย่อย H_VAPORIZATION ใช้ร่วมกับโปรแกรม PSYCHROMETRICS และ PSYCHROMETRICS1 เพื่อคำนวณหาค่า Vapor Pressure ของอากาศ

3.2.7 โปรแกรมย่อย SOLARE ใช้คำนวณหาฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของกรอบอาคารสามารถดูดซับไว้ได้จากดวงอาทิตย์ มีการใช้ร่วมกับ โปรแกรมย่อย SOLAR และ โปรแกรมย่อย ERSI

3.2.8 โปรแกรมย่อย SOLAR ใช้คำนวณหาฟลักซ์ความร้อนที่ดวงอาทิตย์ (Incident Solar) แผ่ความร้อนให้กับกรอบของโซน

3.2.9 โปรแกรมย่อย ERSI ใช้จัดข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2.3 Extraterrestrial Solar Radiation Intensity and Related Data

3.2.10 โปรแกรมย่อย CUBE_IN ใช้ร่วมกับโปรแกรมย่อย ERSI เพื่อคำนวณหาค่าประมาณในช่วงของข้อมูลในตารางที่ 2.3 Extraterrestrial Solar Radiation Intensity and Related Data

3.2.11 โปรแกรมย่อย CTF ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ Conduction Transfer Function (X, Y, Z) และค่า Flux History (F) ของทุกพื้นผนังที่ประกอบขึ้นเป็นโซน

3.2.12 โปรแกรมย่อย ABCD ใช้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ใน Transmission Matrix อันได้แก่ ค่า $A(s)$, $B(s)$, $C(s)$ และ $D(s)$ ตามสมการ (2.55) และสมการ (2.62)

3.2.13 โปรแกรมย่อย PIME ใช้คำนวณหาอนุพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ใน Transmission Matrix อันได้แก่ ค่า $A'(s)$, $B'(s)$, $C'(s)$ และ $D'(s)$ ตามสมการ (2.97) ถึงสมการ (2.100)

3.2.14 โปรแกรมย่อย FR ใช้คำนวณหาค่ารากหรือคำตอบของสมการ $B(s) = 0$ ซึ่งค่ารากหรือคำตอบของสมการดังกล่าวจะนำไปใช้ในการคำนวณหา Conduction Transfer Function (X, Y, Z) และค่า Flux History (F) ในโปรแกรมย่อย CTF

3.2.15 โปรแกรมย่อย FALSE_POSITION ใช้ในการคำนวณหาค่ารากหรือคำตอบของสมการ $B(s) = 0$ ด้วยวิธีการวางตัวผิดที่ (False Position) ใช้ควบคู่กับโปรแกรมย่อย FR



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ความถูกต้องของคอมพิวเตอร์โปรแกรม

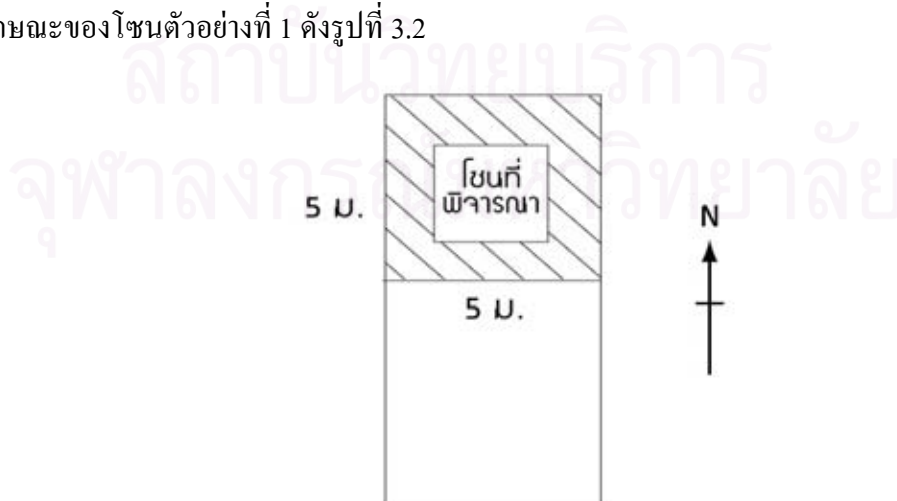
การตรวจสอบความถูกต้องของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น โดยนำคอมพิวเตอร์โปรแกรมดังกล่าวไปแก้ปัญหาคำนวณ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโปรแกรม ASHRAE Load Principles ในปัญหาเดียวกัน ปัญหาที่ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องคอมพิวเตอร์โปรแกรม ได้แก่ โซนตัวอย่าง 4 โซน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 โซนตัวอย่างที่ 1 เป็นโซนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5 ม. X 5 ม. X 3 ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาแต่ละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โซนที่พิจารณาเป็นโซนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโซนที่ติดกับโซนที่พิจารณาเป็นโซนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมทั้งถ่ายเทเข้าสู่โซน ในวันที่ 21 มกราคม และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 1

ทิศทาง	พื้นผิว	พื้นที่ (ม. ²)
เหนือ	ผนังด้านนอก	15.0
ใต้	Partition	15.0
ตะวันออก	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันตก	ผนังด้านนอก	15.0
ด้านบน	เพดาน	25.0
ด้านล่าง	พื้น	25.0

มีลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 1 ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 1

3.3.2 โชนตัวอย่างที่ 2 เป็นโชนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาแต่ละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โชนที่พิจารณาเป็นโชนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโชนที่ติดกับโชนที่พิจารณาเป็นโชนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โชน ในวันที่ 21 เมษายน และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโชนตัวอย่างที่ 2

ทิศทาง	พื้นผิว	พื้นที่ (ม. ²)
เหนือ	ผนังด้านนอก	15.0
ใต้	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันออก	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันตก	Partition	15.0
ด้านบน	เพดาน	25.0
ด้านล่าง	พื้น	25.0

มีลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 2 ดังรูปที่ 3.3



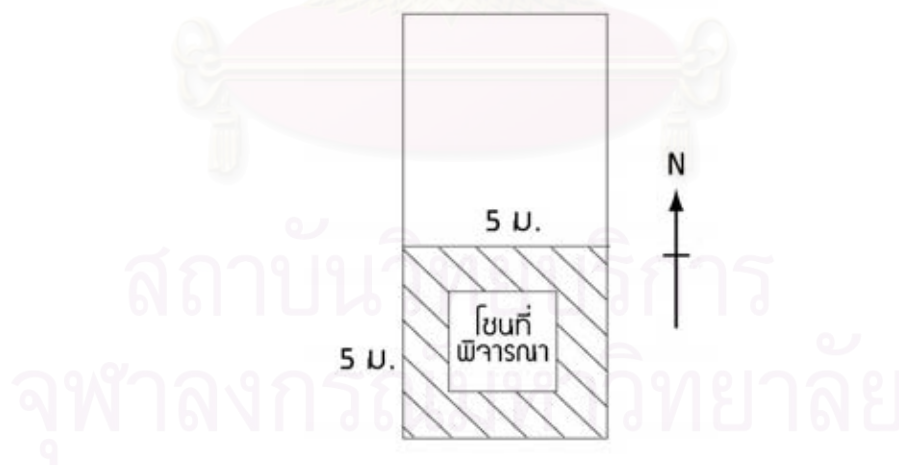
รูปที่ 3.3 Floor Plan แสดงลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 2

3.3.3 โชนตัวอย่างที่ 3 เป็นโชนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาแต่ละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โชนที่พิจารณาเป็นโชนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโชนที่ติดกับโชนที่พิจารณาเป็นโชนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โชน ในวันที่ 21 กรกฎาคม และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโชนตัวอย่างที่ 3

ทิศทาง	พื้นผิว	พื้นที่ (ม. ²)
เหนือ	Partition	15.0
ใต้	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันออก	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันตก	ผนังด้านนอก	15.0
ด้านบน	เพดาน	25.0
ด้านล่าง	พื้น	25.0

มีลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 3 ดังรูปที่ 3.4



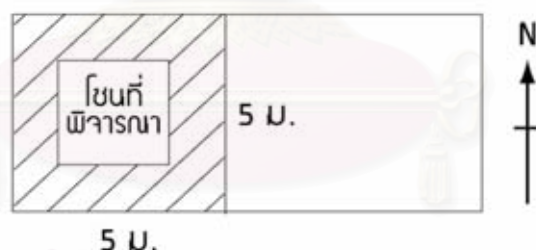
รูปที่ 3.4 Floor Plan แสดงลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 3

3.3.4 โชนตัวอย่างที่ 4 เป็นโชนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาแต่ละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โชนที่พิจารณาเป็นโชนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโชนที่ติดกับโชนที่พิจารณาเป็นโชนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โชน ในวันที่ 21 ตุลาคม และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโชนตัวอย่างที่ 4

ทิศทาง	พื้นผิว	พื้นที่ (ม. ²)
เหนือ	ผนังด้านนอก	15.0
ใต้	ผนังด้านนอก	15.0
ตะวันออก	Partition	15.0
ตะวันตก	ผนังด้านนอก	15.0
ด้านบน	เพดาน	25.0
ด้านล่าง	พื้น	25.0

มีลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 4 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Floor Plan แสดงลักษณะของโชนตัวอย่างที่ 4

3.4 ผลการคำนวณภาระความร้อนของแต่ละโชนตัวอย่าง

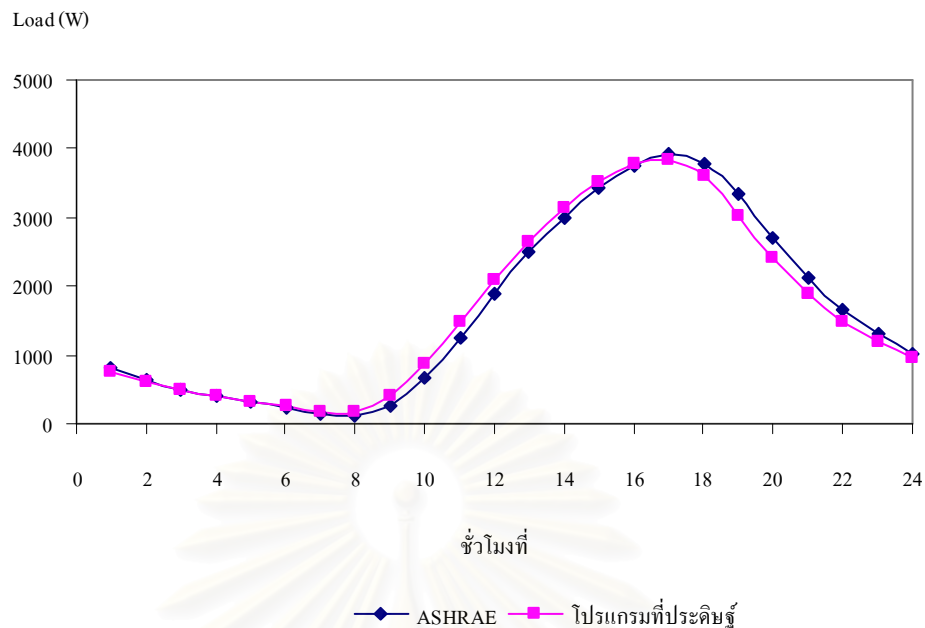
ตารางที่ 3.5 แสดงผลการคำนวณค่าภาระความร้อนเป็นรายชั่วโมงตลอดทั้งวันของโชนตัวอย่างทั้ง 4 โชน ที่คำนวณได้จากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles แล้วนำผลการคำนวณที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าภาระความร้อนที่ได้จากทั้ง 2 โปรแกรมมีค่าแตกต่างกันพอสมควร แต่มีแนวโน้มของค่าภาระความร้อนที่ความสอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.9

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าภาระความร้อนจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE ที่เข้าสู่โซนตัวอย่างทั้ง 4 โซน

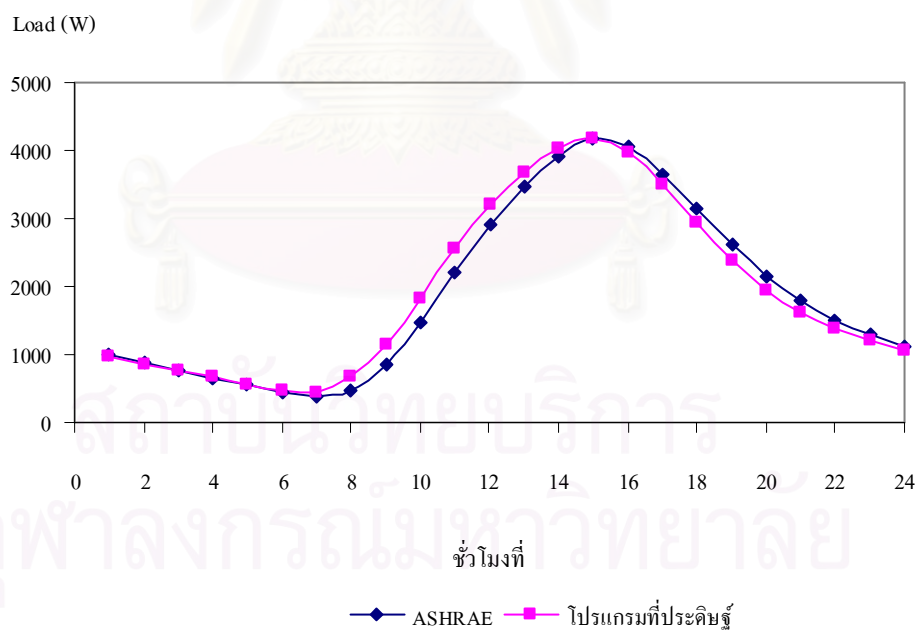
โซนตัวอย่างที่1				โซนตัวอย่างที่2			
ชั่วโมง ที่	โปรแกรมที่			ชั่วโมง ที่	โปรแกรมที่		
	ASHRAE	ประดิษฐ์	%Error		ASHRAE	ประดิษฐ์	%Error
1	811	759	6.3	1	986	956	3.1
2	643	615	4.4	2	869	856	1.6
3	507	497	1.9	3	763	763	0.1
4	397	401	-0.9	4	658	668	-1.5
5	307	320	-4.4	5	554	572	-3.2
6	229	249	-9.0	6	448	472	-5.4
7	154	181	-18.1	7	380	449	-18.2
8	122	182	-49.5	8	473	666	-40.9
9	268	416	-55.3	9	854	1152	-34.8
10	664	886	-33.4	10	1480	1825	-23.3
11	1239	1484	-19.8	11	2217	2550	-15.0
12	1881	2099	-11.6	12	2920	3195	-9.4
13	2488	2651	-6.6	13	3480	3671	-5.5
14	3004	3132	-4.3	14	3923	4025	-2.6
15	3434	3519	-2.5	15	4182	4191	-0.2
16	3761	3780	-0.5	16	4054	3982	1.8
17	3913	3841	1.8	17	3643	3496	4.0
18	3789	3593	5.2	18	3151	2934	6.9
19	3337	3030	9.2	19	2630	2390	9.1
20	2701	2418	10.5	20	2154	1952	9.4
21	2121	1896	10.6	21	1785	1630	8.7
22	1662	1493	10.1	22	1506	1392	7.6
23	1308	1187	9.2	23	1292	1213	6.2
24	1027	945	8.0	24	1124	1072	4.6
Total	39763	39574	0.5	Total	45527	46069	-1.2

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าภาระความร้อนจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE ที่เข้าสู่โซนตัวอย่างทั้ง 4 โซน (ต่อ)

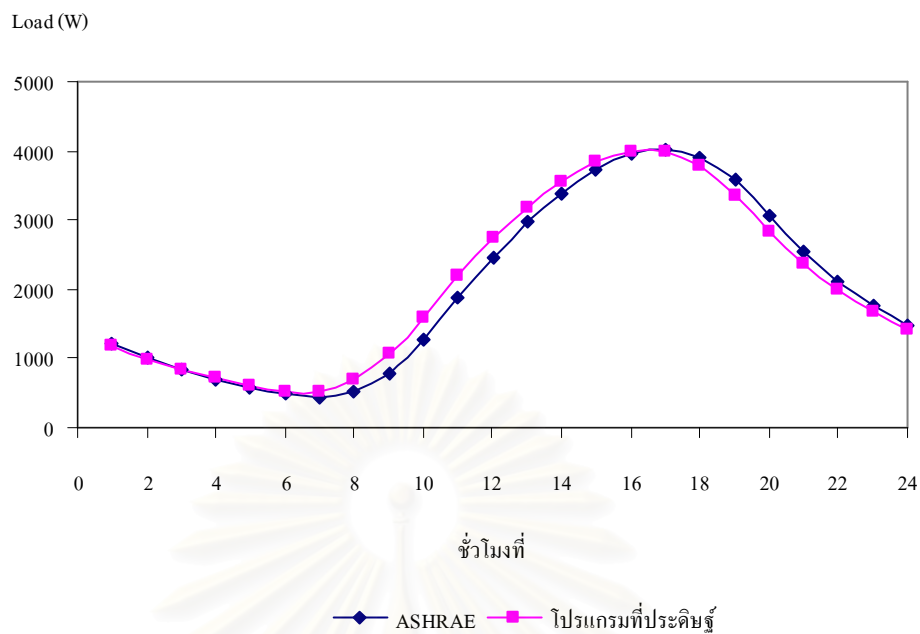
โซนตัวอย่างที่3				โซนตัวอย่างที่4			
ชั่วโมง	โปรแกรมที่			ชั่วโมง	โปรแกรมที่		
ที่	ASHRAE	ประดิษฐ์	%Error	ที่	ASHRAE	ประดิษฐ์	%Error
1	1220	1183	3.0	1	452	423	6.4
2	1008	993	1.5	2	299	289	3.4
3	840	840	0.0	3	189	193	-2.1
4	704	716	-1.7	4	104	119	-13.7
5	591	612	-3.5	5	41	61	-46.3
6	499	526	-5.5	6	-16	7	140.8
7	441	510	-15.7	7	-56	-4	92.0
8	506	687	-35.8	8	-31	53	273.2
9	786	1067	-35.7	9	71	234	-229.1
10	1272	1604	-26.1	10	333	578	-73.5
11	1868	2196	-17.6	11	811	1103	-36.0
12	2461	2739	-11.3	12	1412	1703	-20.6
13	2978	3186	-7.0	13	2016	2270	-12.6
14	3388	3547	-4.7	14	2594	2800	-8.0
15	3728	3836	-2.9	15	3085	3224	-4.5
16	3951	3996	-1.1	16	3429	3476	-1.4
17	4018	3983	0.9	17	3521	3448	2.1
18	3914	3777	3.5	18	3294	3102	5.8
19	3583	3366	6.1	19	2756	2511	8.9
20	3056	2845	6.9	20	2143	1927	10.1
21	2549	2376	6.8	21	1638	1469	10.3
22	2120	1989	6.2	22	1227	1103	10.1
23	1761	1668	5.3	23	896	811	9.5
24	1468	1406	4.2	24	649	595	8.3
Total	48711	49648	-1.9	Total	30859	31493	-2.1



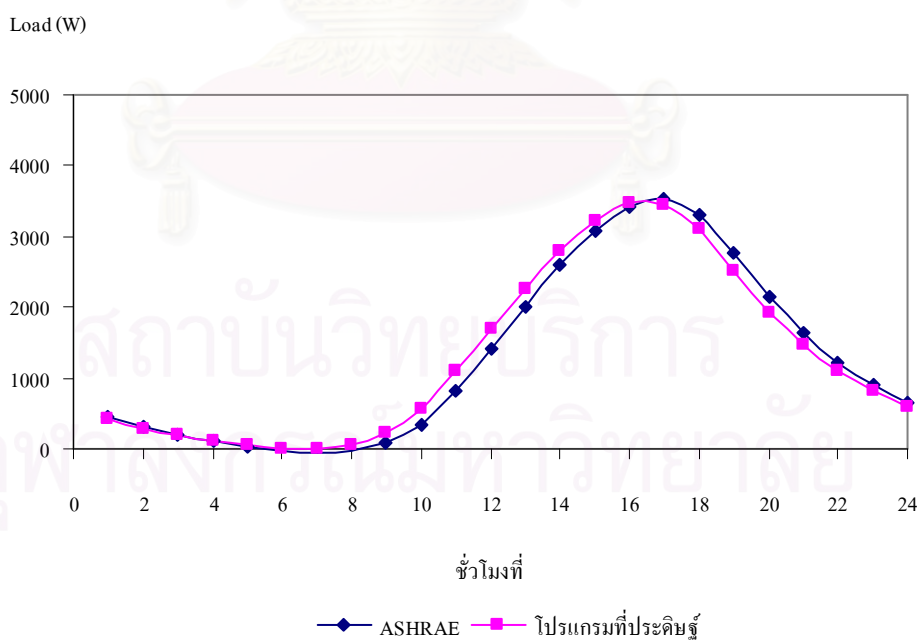
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าภาระความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์
ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโชนตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบค่าภาระความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์
ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโชนตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบภาระค่าความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์
ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบภาระค่าความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์
ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 4

บทที่ 4

ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ

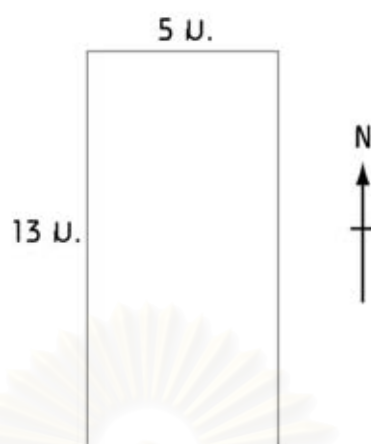
ในการวิจัยฉบับนี้ได้นำวิธีสมดุลความร้อน(Heat Balance Method) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการหาภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องหรือโซน โดยจะนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับโซนที่มีรูปแบบเป็นระบบหลังคา เพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนต่างๆผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นถูกมาใช้คำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทจากระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร เน้นศึกษาในส่วนของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น

1. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาดังแต่ 0 ถึง 100 ACH
2. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไปจากทิศทางเดิม 90 องศา
3. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา
4. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุผนังหลังคาที่เป็นฟังก์ชันของมุม ในการคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา

4.1 ลักษณะทั่วไปของระบบหลังคาที่ทำการศึกษา

4.1.1 อาคารตัวอย่าง

อาคารตัวอย่างที่ใช้ทำการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนจากระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารนั้น เป็นอาคารตัวอย่างที่มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 13ม. X 3ม. ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ ใช้ข้อมูลสภาพอากาศในปี ค.ศ.1991 และทิศทางการวางตัวของอาคารตัวอย่างเป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Floor Plan แสดงลักษณะการวางตัวของอาคารที่พิจารณา

4.1.2 ระบบหลังคา

4.1.2.1 ระบบหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ดังรูปที่ 4.2ก โดยมีการจัดเรียงวัสดุของระบบหลังคาตามรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โซนที่พิจารณามีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 13ม. X 3ม. เป็นโซนที่เป็นช่องใต้หลังคาและติดกับห้องที่ปรับอากาศ 25°C คงที่

4.1.2.2 ระบบหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ดังรูปที่ 4.2ข โดยมีการจัดเรียงวัสดุของระบบหลังคาตามรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 โซนที่พิจารณามีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 13ม. X 3ม. เป็นโซนที่เป็นช่องใต้หลังคาและติดกับห้องที่ปรับอากาศ 25°C คงที่

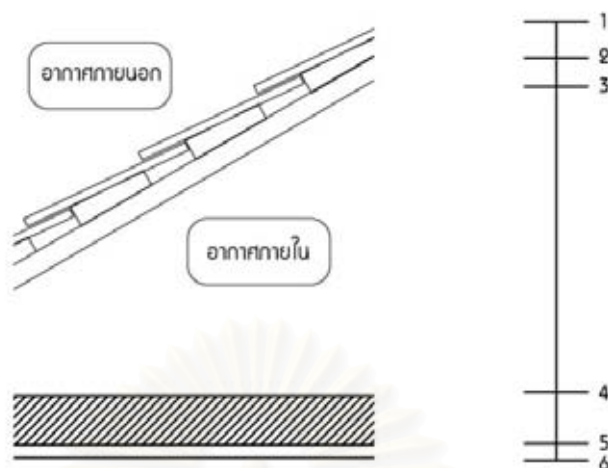


ก.



ข.

รูปที่ 4.2 รูปทรงของหลังคา ก.หลังคาทรงหน้าจั่ว ข.หลังคาทรงปั้นหยา



รูปที่ 4.3 หลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

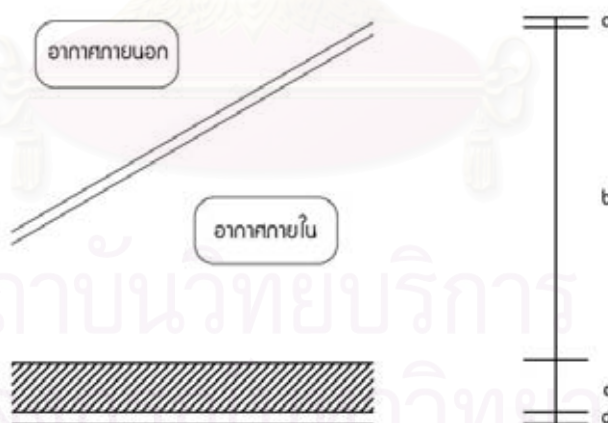
1-2 : กระเบื้องมุงหลังคาบนระแนง

2-3 : จันทัน

3-4 : ช่องว่างใต้หลังคา

4-5 : ฉนวนกันความร้อน

5-6 : ฝ้าเพดาน



รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นวัสดุสำหรับหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

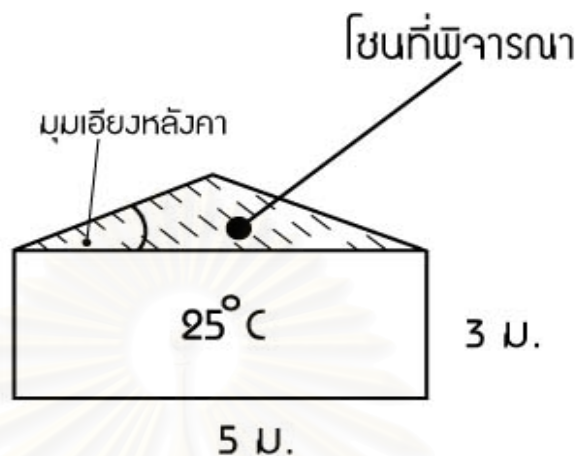
a : ชั้นวัสดุมุงหลังคา ได้แก่ กระเบื้องคอนกรีต ซีเมนต์ใยหิน และเซรามิก

b : ชั้นของอากาศหรือช่องใต้หลังคา

c : ชั้นของฉนวนกันความร้อน ได้แก่ ฉนวนใยแก้ว

d : ฝ้าเพดาน

4.1.3 ปริมาตรควบคุมของระบบหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา มีลักษณะตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ปริมาตรควบคุมของโซนหลังคาที่พิจารณาของระบบหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

4.1.4 วัสดุผนังหลังคา

ใช้กระเบื้องคอนกรีต ทำมาจากปูนซีเมนต์ เช่น กระเบื้องว่าวรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน และกระเบื้องกลัดลอน

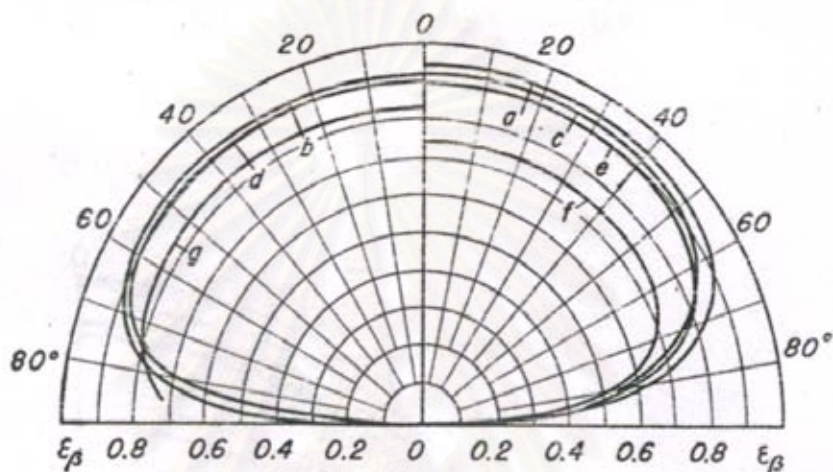
4.1.5 ฉนวน

ใช้ฉนวนใยแก้ว มีลักษณะแบบลูสฟิลล์ แบบเส้นใยอัดเป็นแผ่นหรือแบบคลุมห่ม นอกจากจะสามารถกันความร้อนแล้วยังสามารถกันเสียงได้ด้วย และมีค่าการทนไฟได้สูงประมาณ 300°C แต่ไม่ทนทานต่อความเปียกชื้น โดยทั่วไปจะนำมาใช้งานเป็นฉนวนหลังคาของอาคาร ผัง พื้น และระบบท่อ

4.1.6 ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม (ε)

ในการหาสมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกและพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซนนั้น มีการคำนวณค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาว ดังนั้นค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อนที่นำมาใช้ในสมดุลความร้อนนี้ ควรใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (Directional Spectral Emissivity) แต่เนื่องจากค่าสภาพการเปล่งรังสีดังกล่าวของวัสดุใดๆ แทบไม่มีข้อมูลที่ได้อาจการศึกษาและทดลองเลย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดระบุทิศทาง (Directional Total Emissivity) ซึ่งพอที่จะหาข้อมูลได้บ้าง มาใช้ในการคำนวณแทนค่าสภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง

การสร้างแบบจำลองในการหาค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุที่ใช้ในการมุงหลังคา จะใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดระบุทิศทาง ณ ทิศทางของการแผ่รังสีที่ตั้งฉากกับระนาบ หรือ ($\beta = 0$) มาทำการคำนวณ โดยสมมุติให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพการเปล่งรังสีตามทิศทางของการเปล่งรังสีของวัสดุหลังคา เหมือนหรือคล้ายกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุที่พอจะหาข้อมูลได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าสภาพเปล่งรังสี $\varepsilon(\theta, \phi, T)$ ของวัสดุเปลี่ยนแปลงกับ θ

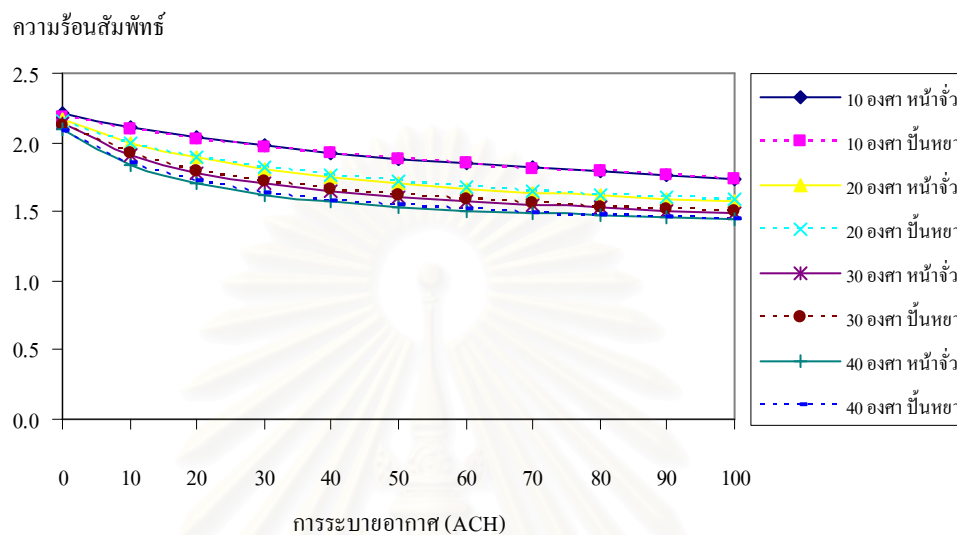
(a) น้ำแข็ง (b) ไม้ (c) แก้ว (d) กระดาษ (e) ดิน (f) คอปเปอร์ออกไซด์

(g) อะลูมิเนียมออกไซด์ (E. Schmidt and E. Eckert, 1935)

ในรูปที่ 4.6 $\varepsilon(\theta, T)$ มีค่าสูงสุดที่ $\theta = 0$ โดย $\varepsilon(\theta, T)$ ก่อนข้างคงที่ตลอดมุม ($0^\circ < \theta < 45^\circ$) และ $\varepsilon(\theta, T)$ จะมีค่าลดลงเมื่อ θ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45° ขึ้นไปโดย $\varepsilon(\theta, T)$ เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ $\theta = 90^\circ$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

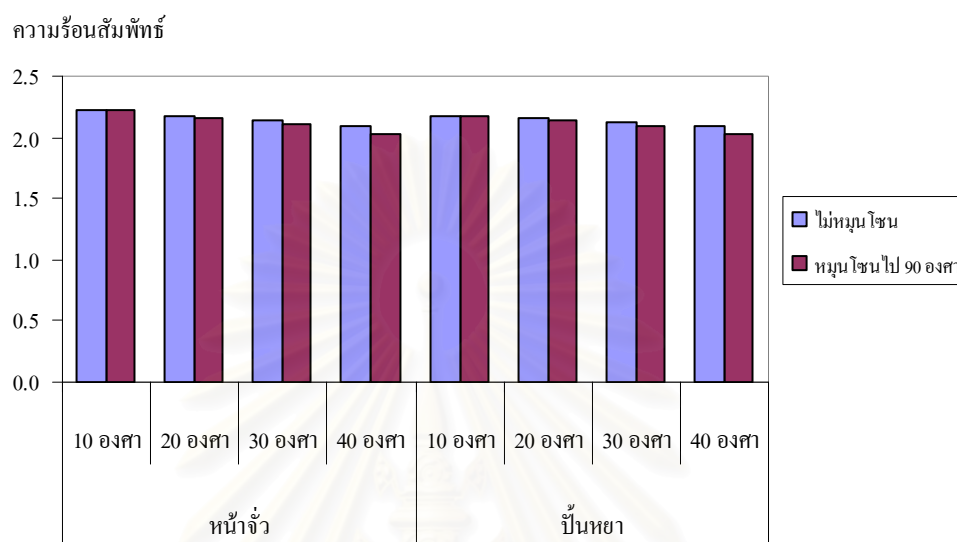
4.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH (ต่อ)

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาค่าใดค่าหนึ่ง มุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารพอสมควร นั่นคือ เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนสัมพัทธ์จะลดลง เนื่องจากว่าวิธีสมดุลความร้อนนั้น สูตรที่ใช้คำนวณในส่วนของการระบายอากาศจะคำนึงถึงปริมาณในช่องใต้หลังคา และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายในช่องใต้หลังคา กับอากาศภายนอก ถ้าพิจารณาในระบบหลังคาที่มีพื้นที่ฐานเท่ากัน เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ปริมาตรภายในระบบหลังคา ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาตรที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวสามารถช่วยลดซับความร้อนบางส่วนได้ และช่วงที่หลังคาได้รับความร้อนโดยตรงจากดวงอาทิตย์นั้น เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น จะทำให้ อุณหภูมิของพื้นผิวด้านใน อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอก และอุณหภูมิของอากาศภายในของระบบหลังคา ลดลง ส่งผลให้ความร้อนที่ผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารลดลงด้วย

และเมื่อพิจารณาถึงรูปทรงของหลังคาในแต่ละมุมเอียงหลังคา พบว่า แนวโน้มของค่าความร้อนสัมพัทธ์สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วและทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคานั้น มีแนวโน้มลดลงในสัดส่วนเดียวกัน เนื่องจากสมการการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวภายในด้วยกันเองนั้น จะใช้แบบจำลอง MRT ที่ให้ความสำคัญในเรื่องของพื้นที่ของแต่ละพื้นผิวภายใน (พื้นผิวปิดล้อม) โดยไม่คำนึงถึงรูปทรงของพื้นผิวปิดล้อม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง



รูปที่ 4.8 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โชนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

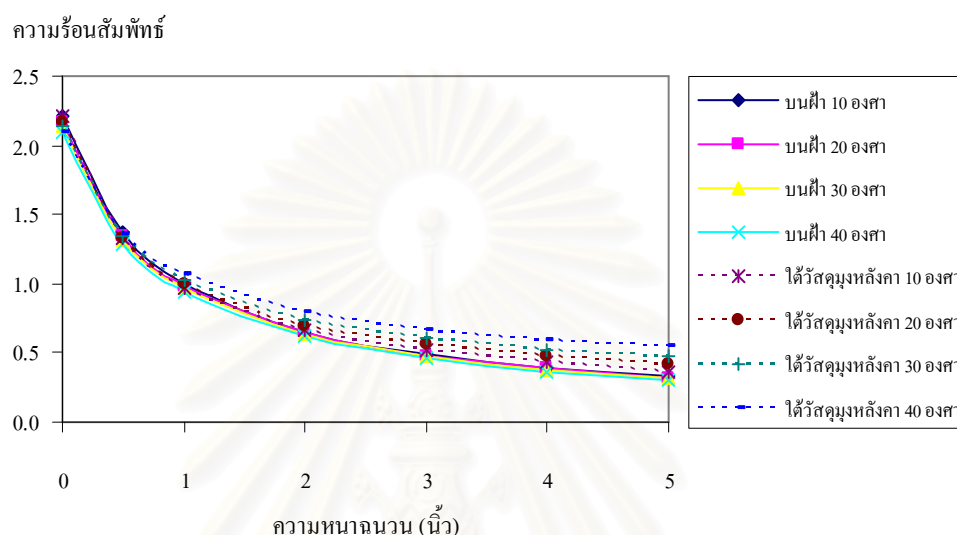
4.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง (ต่อ)

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวางตัวของอาคาร สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วและทรงปั้นหยา มีช่องใต้หลังคา มุมเอียงหลังคา มีผลต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารไม่มากนัก

โดยทิศทางการวางตัวของอาคารที่ศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 จะพิจารณาการวางตัวของอาคารตามรูปที่ 4.1 และกรณีที่ 2 จะพิจารณากาวางตัวของอาคาร เมื่อหมุนตัวของอาคารตามรูปที่ 4.1 ไป 90 องศา นั่นคือ เมื่อทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนแปลง จะทำให้ทิศทางการวางตัวของระบบหลังคาเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในกรณีที่ 1 จะมีทิศทางการวางตัวของระบบหลังคาอยู่ในแนวทิศตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งระบบหลังคาในลักษณะนี้ จะได้รับความร้อนโดยตรงจากดวงอาทิตย์มากกว่าในกรณีที่ 2 ที่มีทิศทางการวางตัวของระบบหลังคาอยู่ในแนวทิศเหนือ-ใต้

ผลต่างของค่าความร้อนสัมผัสในกรณีที่หมุนทิศทางการวางตัวของอาคารกับกรณีที่หมุนทิศทางการวางตัวของอาคารไป 90 องศา พบว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันไม่มากนัก (ประมาณไม่เกิน 20 องศา) ผลต่างของค่าความร้อนสัมผัสมีค่าน้อยมาก และเมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น (ประมาณ 20 องศาขึ้นไป) ผลต่างของค่าความร้อนสัมผัสจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากว่า ถ้ามุมเอียงหลังคามีค่าความชันไม่มากนัก ไม่ว่าจะหมุนตัวของอาคารไปในทิศทางใดก็ตาม ความร้อนที่ระบบหลังคาได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์แทบจะมีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุฉนวนหลังคา

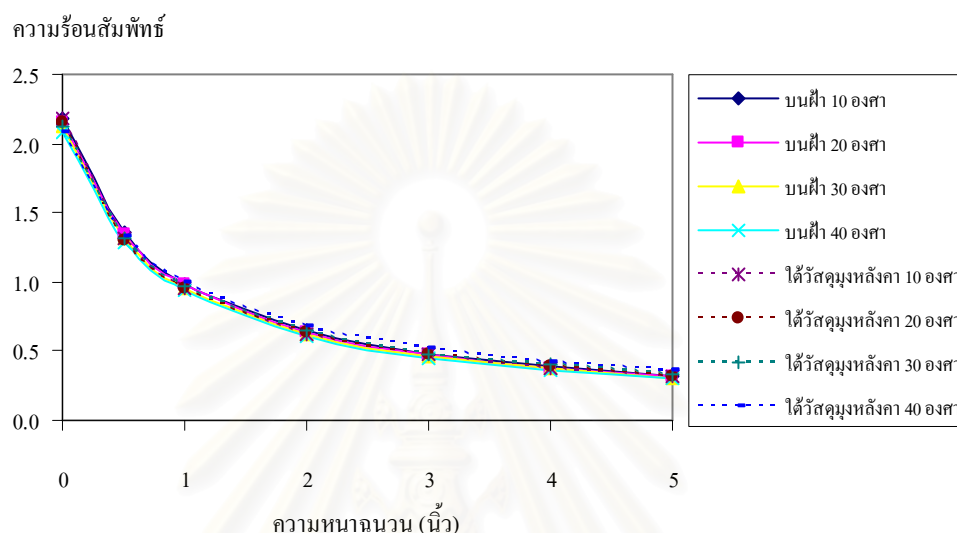


รูปที่ 4.9 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุฉนวนหลังคา ในหลังคารูปทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุฉนวนหลังคา (ต่อ)



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุฉนวนหลังคา ในหลังคารูปทรงปั้นหยามีช่องใต้หลังคา

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุฉนวนหลังคา (ต่อ)

เมื่อพิจารณาค่าแห่งติดตั้งฉนวนกันความร้อน จากรูปที่ 4.9 สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา แสดงให้เห็นว่า มุมเอียงหลังคามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารพอสมควร และรูปที่ 4.10 สำหรับหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา แสดงให้เห็นว่า มุมเอียงหลังคามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารน้อยมาก

โดยตำแหน่งของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ศึกษา จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานและกรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุฉนวนหลังคา

จากรูปที่ 4.9 ที่ความหนาฉนวนค่าใดค่าหนึ่ง ในแต่ละมุมเอียงหลังคา แสดงให้เห็นว่า กรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝานั้น ค่าความร้อนสัมพัทธ์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในกรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุฉนวนหลังคา ค่าความร้อนสัมพัทธ์จะมีค่าแตกต่างกันพอสมควร และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของทั้ง 2 กรณี พบว่า ค่าความร้อนสัมพัทธ์ความแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากในการคำนวณความร้อนในส่วนที่มาจากหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคานั้น จะคิดจากโซนที่ประกอบด้วยหลังคา ผนัง และฝ้าเพดาน ซึ่งผนังของโซนดังกล่าวคิดเป็นผนังที่ไม่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อนและคิดเป็นผนังที่อยู่ภายนอกอาคาร ซึ่งได้รับความร้อนโดยตรงจากแสงอาทิตย์เช่นกัน ดังนั้นผนังดังกล่าวจะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนในลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการแผ่รังสี เนื่องจากผลต่างอุณหภูมิของแต่ละพื้นผิวที่แตกต่างกันระหว่างพื้นผิวภายในโซนเดียวกัน รวมถึงเมื่อมุมเอียงหลังคาเพิ่มขึ้น พื้นที่ของผนังดังกล่าวก็จะมากขึ้นด้วย จึงมีความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคารได้มากขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.10 ที่ความหนาฉนวนค่าใดค่าหนึ่ง ในแต่ละมุมเอียงหลังคา แสดงให้เห็นว่า ไม่ว่ากรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าหรือกรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุฉนวนหลังคา ค่าความร้อนสัมพัทธ์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของทั้ง 2 กรณี พบว่า มีความแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องมาจากในการคำนวณความร้อนในส่วนที่มาจากหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคานั้น จะคิดจากโซนที่ประกอบด้วยหลังคา และฝ้าเพดานเท่านั้น จึงไม่มีความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคาร

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคา ตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา								
การระบายอากาศ (ACH)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0	2.210	2.170	2.134	2.099	2.211	2.172	2.137	2.103
10	2.107	1.997	1.911	1.835	2.108	1.999	1.913	1.837
20	2.038	1.889	1.784	1.702	2.038	1.890	1.786	1.704
30	1.979	1.809	1.702	1.623	1.980	1.810	1.704	1.625
40	1.928	1.750	1.645	1.571	1.928	1.750	1.646	1.572
50	1.884	1.704	1.603	1.534	1.885	1.704	1.604	1.535
60	1.847	1.667	1.571	1.506	1.847	1.668	1.572	1.507
70	1.814	1.637	1.546	1.484	1.815	1.638	1.547	1.486
80	1.786	1.612	1.525	1.467	1.787	1.613	1.526	1.468
90	1.761	1.591	1.508	1.453	1.762	1.592	1.509	1.454
100	1.739	1.573	1.494	1.442	1.739	1.574	1.495	1.443

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคา ตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา								
อัตราการระบาย อากาศ (ACH)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0	2.178	2.153	2.121	2.088	2.179	2.154	2.124	2.091
10	2.088	1.996	1.918	1.843	2.089	1.997	1.920	1.846
20	2.021	1.897	1.797	1.714	2.022	1.898	1.799	1.716
30	1.969	1.820	1.716	1.635	1.970	1.822	1.718	1.636
40	1.922	1.762	1.659	1.581	1.922	1.763	1.660	1.583
50	1.881	1.717	1.616	1.543	1.881	1.717	1.617	1.544
60	1.845	1.680	1.582	1.514	1.845	1.681	1.583	1.515
70	1.813	1.649	1.556	1.491	1.813	1.650	1.557	1.492
80	1.785	1.623	1.534	1.473	1.786	1.624	1.535	1.474
90	1.761	1.602	1.516	1.458	1.761	1.602	1.517	1.459
100	1.738	1.583	1.501	1.446	1.739	1.583	1.502	1.447

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารทั้ง 2 ทิศทาง

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา								
ทิศทางการวางตัวของอาคาร	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
	ไม่ห่มนวลตัวของอาคาร	2.222	2.179	2.134	2.099	2.211	2.172	2.137
ห่มนวลตัวของอาคารไป 90 องศา	2.210	2.170	2.114	2.024	2.223	2.180	2.116	2.028
หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา								
ทิศทางการวางตัวของอาคาร	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
	ไม่ห่มนวลตัวของอาคาร	2.181	2.153	2.121	2.088	2.179	2.154	2.124
ห่มนวลตัวของอาคารไป 90 องศา	2.178	2.147	2.095	2.018	2.182	2.149	2.098	2.022

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดาน								
ความหนาแน่น (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0.0	2.210	2.170	2.134	2.099	2.211	2.172	2.137	2.103
0.5	1.372	1.346	1.320	1.293	1.373	1.347	1.322	1.295
1.0	1.003	0.983	0.963	0.942	1.003	0.984	0.965	0.944
2.0	0.656	0.643	0.630	0.616	0.657	0.644	0.631	0.617
3.0	0.490	0.480	0.470	0.459	0.490	0.480	0.470	0.460
4.0	0.391	0.383	0.375	0.366	0.391	0.384	0.376	0.367
5.0	0.326	0.319	0.312	0.305	0.326	0.320	0.313	0.306

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งกันความร้อนใต้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนใต้วัสดุผนังหลังคา								
ความหนาแน่น (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0.0	2.210	2.170	2.134	2.099	2.211	2.172	2.137	2.103
0.5	1.325	1.327	1.338	1.363	1.326	1.328	1.340	1.366
1.0	0.972	0.993	1.020	1.066	0.972	0.994	1.022	1.068
2.0	0.659	0.700	0.739	0.799	0.659	0.700	0.740	0.800
3.0	0.514	0.562	0.606	0.667	0.514	0.563	0.606	0.667
4.0	0.427	0.478	0.524	0.590	0.427	0.478	0.524	0.591
5.0	0.367	0.425	0.470	0.543	0.367	0.425	0.471	0.544

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งจนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งจนวนบนฝ้าเพดาน								
ความหนาแน่น (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0.0	2.178	2.153	2.121	2.088	2.179	2.154	2.124	2.091
0.5	1.354	1.337	1.312	1.284	1.354	1.338	1.315	1.287
1.0	0.989	0.975	0.957	0.935	0.990	0.976	0.958	0.937
2.0	0.649	0.638	0.626	0.611	0.649	0.639	0.627	0.612
3.0	0.484	0.477	0.467	0.455	0.484	0.477	0.467	0.456
4.0	0.387	0.380	0.373	0.363	0.387	0.381	0.373	0.364
5.0	0.323	0.318	0.311	0.302	0.323	0.318	0.311	0.303

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมผัสของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม ที่ความหนาแน่นกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนได้วัสดุผนังหลังคา ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนได้วัสดุผนังหลังคา								
ความหนาแน่น (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชันของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมผัส							
0.0	2.178	2.153	2.121	2.088	2.179	2.154	2.124	2.091
0.5	1.308	1.307	1.316	1.336	1.309	1.308	1.317	1.339
1.0	0.951	0.954	0.971	1.002	0.951	0.955	0.972	1.004
2.0	0.626	0.633	0.652	0.684	0.626	0.634	0.654	0.685
3.0	0.473	0.478	0.473	0.522	0.473	0.479	0.473	0.523
4.0	0.380	0.384	0.398	0.424	0.380	0.385	0.398	0.425
5.0	0.316	0.320	0.333	0.354	0.316	0.320	0.334	0.355

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมผัส คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการแปลงรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม (ต่อ)

จากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพการแปลงรังสีที่ใช้ในการคำนวณ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการแปลงรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม เนื่องจากค่าความร้อนสัมผัสที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการแปลงรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุนั้น ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ เนื่องจากในรูปที่ 4.6 ค่าสภาพการแปลงรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุนั้น ค่อนข้างจะมีค่าคงที่ ในช่วงของมุมของการแปลงรังสีที่ $0^\circ < \theta < 45^\circ$ และ ค่าสภาพการแปลงรังสีจะมีค่าลดลง เมื่อ θ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45° ขึ้นไป และค่าสภาพการแปลงรังสี เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อ $\theta = 90^\circ$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยที่ได้รูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.10 สรุปได้ว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาจะลดลงประมาณ 3 ถึง 7% นั่นคือ ที่มุมเอียงหลังคา 10 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 3% และที่มุมเอียงหลังคา 40 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 7% และจากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม พบว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาน้อยมาก เมื่อเทียบกับกรณีที่ใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีไม่เป็นฟังก์ชันของมุม

การศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา สำหรับระบบหลังคาออกเป็น 2 รูปทรง คือ ระบบหลังคาทรงหน้าจั่วและระบบหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาดังแต่ 0 ถึง 100 ACH ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไปจากเดิม 90 องศา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

5.1.1 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาดังแต่ 0 ถึง 100 ACH จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาเดียวกัน เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะมีค่าลดลง

5.1.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ผลต่างของความร้อนที่ได้จากการคำนวณเมื่อทิศทางการวางตัวของอาคารเป็นดังรูปที่ 4.1 กับทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไป 90 องศา จากทิศทางในรูปที่ 4.1 มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา จากรูปที่ 4.9 สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วมีช่องใต้หลังคา พบว่า ถ้าติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุผนังหลังคา เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และจากรูปที่ 4.10 สำหรับหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา พบว่า ไม่ว่าจะติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุผนังหลังคา

เมื่อมุมเอียงหลังคาที่ค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

5.1.4 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม จากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่ใช้ในการคำนวณ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุม เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชันของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชันของมุมนั้น ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น เป็นเพียงโปรแกรมพื้นฐานที่มีความสามารถในการคำนวณหาปริมาณความร้อนรวมที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนที่พิจารณานั้น ได้เพียงคราวละ 1 โซนเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยต่อไป ควรมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โซนหลายๆ โซนผ่านระบบหลังคาเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2538). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มนตรี อึ้งเจริญ. (2527). การแผ่รังสีความร้อน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.
- Akara Kitkrancharearnsin. (2001). A Thermal Comfort Study on the Effects of Openings and Shadings for a House in Bangkok. Master Thesis. Chulalongkorn University.
- ASHRAE. (1993). ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, Inc.
- ASHRAE. (1997). ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, Inc.
- ASHRAE. (2001). ASHRAE Handbook Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, Inc.
- Hittle, D.C. (1979). Calculating Building Heating and Cooling Loads Using The Frequency Response of Multilayered Slabs, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana- Champaign.
- Hittle, D.C. and Bishop, R. (1983). An Improved Root-Finding Procedure for Use in Calculating Transient Heat Flow Through Multilayered Slabs. International Journal of Heat and Mass Transfer 26: 1685-1693.
- Liesen, R.J. and Pedersen, C.O. (1997). An Evaluation of Inside Surface Heat Balance Model for Cooling Load Calculations. ASHRAE Transactions 103(2): 485-502.
- Kritsana Manit. (2004). Recalculation of CLTD for Walls and Roofs from Periodic Response Factors. Master Thesis. Chulalongkorn University.
- McQuiston, F.C. And Parker, J.D. and Spitler, J.D. (2000). Heating, Ventilating, Air Conditioning Analysis and Design. 5th Ed. New York, NY: John Wiley & Son, Inc.
- McClellan, T.M. (1997). Investigation of Outside Heat Balance Model for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure. ASHRAE Transactions 103(2): 469-484.
- Pederson, C.O., Fisher, D.E. and Liesen, R.J. (1997). Development of a Heat Balance Procedure for Cooling Loads. ASHRAE Transactions 103(2): 459-468.
- Pederson, C.O., Fisher, D.E., Spitler J.D. and Liesen, R.J. (1998). Cooling and Heating Load Calculation Principles. ASHRAE, Atlanta.

Somboon Tirasit. (2000). Analytical Study on Heat Transfer Through a Building Roof System.

Master Thesis. Chulalongkorn University.

Teera Sutunya. (2004). A Design if Appropriate Building Envelopes for Broiler House.

Master Thesis. Chulalongkorn University.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วย (Conversion Factors)

ความยาว (Length)					
1 mm	=	0.001 m	=	0.1 cm	1 ft = 12 in
1 cm	=	0.01 m	=	10 mm = 0.3970 in	1 in = 0.0254 m
1 m	=	3.28084 ft	=	39.370 in	1 ft = 0.3048 m
พื้นที่ (Area)					
1 cm ²	=	1.0 x 10 ⁻⁴ m ²	=	0.1550 in ²	1 in ² = 6.4516 x 10 ⁻⁴ m ²
1 m ²	=	10.7639 ft ²		1 ft ²	= 0.092903 m ²
ปริมาตร (Volume)					
1 m ³	=	35.3147 ft ³		1 ft ³	= 2.831685 x 10 ⁻² m ³
1 L	=	0.001 m ³		1 in ³	= 1.6387 x 10 ⁻⁵ m ³
ค่าแรงโน้มถ่วง (Gravitation)					
g	=	9.80665 m/s ²		g	= 32.17405 ft/s ²
ค่าความหนาแน่น (Density)					
1 kg/m ³	=	0.06242797 lbm/ft ³		1 lbm/ft ³	= 16.01846 kg/m ³
ความดัน (Pressure)					
1 Pa	=	1 N/m ²	=	1 kg/m-s ²	1 lbf/in ² = 6.894757 kPa
1 bar	=	1.0 x 10 ⁻⁵ Pa	=	100 kPa	1 atm = 14.69594 lbf/in ²
1 atm	=	101.325 kPa			= 29.921 in.Hg [32°F]
อุณหภูมิ (Temperature)					
TC	=	TK - 273.15	=	(TF - 32)/1.8	TF = 1.8TC + 32
ค่าการนำความร้อน (Conductivity)					
1 W/m-K	=	1 J/s-m-K		1 Btu/hr-ft-R	= 1.73074 W/m-K
	=	0.5777789 Btu/hr-ft-R			
ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity)					
1 kgJ/Kg-K	=	0.238846 Btu/lbm-R		1 Btu/lbm-R	= 4.1868 kJ/kg-K
ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat Flux)					
1 W/m ²	=	0.316998 Btu/hr-ft ²		1 Btu/hr-ft ²	= 3.15459 W/m ²
สัมประสิทธิ์ทางความร้อน (Heat Transfer Coefficient)					
1 W/m ² -K	=	0.17611 Btu/hr-ft ² -R		1 Btu/hr-ft ² -R	= 5.6783 W/m ² -K

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างหลังคาและผนังกำแพง

วัสดุ	k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)
กระเบื้องคอนกรีต	1.731	2243	840
กระเบื้องกระดาษ	0.600	1922	1005
กระเบื้องเซรามิก	0.836	1890	795
ฉนวนใยแก้ว	0.036	64	960
ฉนวนใยหิน	0.045	32	837
ฉนวนโพลียูรีเทนโฟม	0.023	32	1590
ฉนวนเซลลูโลส	0.039	37	1380
อิฐมอญ	0.692	1922	837
ปูนฉาบ	0.722	1858	837
แผ่นยิปซัม	0.160	801	1089

ความต้านทานอากาศ 0.176 m²K/W

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการดูดกลืนรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์และการเปล่งรังสีจากพื้นผิว

วัสดุ	ค่าการดูดกลืนความร้อน	ค่าการเปล่งรังสีความร้อนที่ 50°C
อิฐแดง , กระเบื้อง , คอนกรีต	0.80	0.90
อิฐเหลือง , พลาสติก	0.45	0.90
ทองแดง	0.50	0.25
ทองแดงขัดเงา	0.40	0.02
สีอะลูมิเนียม	0.40	0.50
อะลูมิเนียมขัดเงา	0.20	0.03
สี	ค่าการดูดกลืนความร้อน	ค่าการเปล่งรังสีความร้อนที่ 50°C
ดำ	0.97	0.96
แดง	0.74	0.96
เขียว	0.73	0.95
ขาว	0.15	0.89

ภาคผนวก ค

รายละเอียดโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้น

```

PROGRAM LOAD
PARAMETER
(MSURF=10,NVAR=20,NHR1=24,NHR2=48,MDAY=366,
ORDER=6)
REAL AREA(MSURF),PE(MSURF),TOA(NHR2),TSKY(NHR2),
WSPPED(NHR2),
*WDIR(NHR2),SAZ(MSURF)
REAL QS(MSURF,NHR2),R(MSURF,NHR2),QI(MSURF,NHR2),
ROUGH(MSURF),
*SWABSO(MSURF),SWABSI(MSURF),LWEMIR(MSURF),
LWEMOR(MSURF)
REAL LWEMI(MSURF),LWEMO(MSURF),ACH(NHR2),
DT(NVAR,NHR2),LSM,LLT,LON
REAL X(MSURF,NHR1),Y(MSURF,NHR1),Z(MSURF,NHR1),
CR(MSURF,NHR1),
*RSURF(MSURF),HRT(MSURF)
REAL TFF(MSURF,NHR2),TAVGG(MSURF,NHR2),
RBALL(MSURF,NHR2)
REAL FIFF(MSURF,NHR2),HRR(MSURF,NHR2),
QCON(NHR2)
REALHCOO(MSURF,NHR2),HCII(MSURF,NHR2),
HRGG(MSURF,NHR2)
REAL HRAOO(MSURF,NHR2),HRSS(MSURF,NHR2),
KONDUCT(MSURF,MSURF)
REAL FILMIN(NHR2),FILMOUT(NHR2),UROOF(NHR2),
FLUXX(NHR2),DELTAT(NHR2)
REAL DELTAR(NHR2)
REAL FILM_IN(MDAY,NHR2),FILM_OUT(MDAY,NHR2),
U_ROOF(MDAY,NHR2),
* Q_ZONE(MDAY,NHR2),EMIT(MSURF)
REAL TII(MSURF,NHR2),TOO(MSURF,NHR2),
TAA(MSURF,NHR2),DELTA(MSURF)
REAL RI(MSURF),CI(MSURF),HF(NHR2),HN(NHR2)
REAL XM(MSURF,ORDER,NHR1),YM(MSURF,ORDER,NHR1),
ZM(MSURF,ORDER,NHR1)
REAL FLUX(MSURF,ORDER),F(ORDER)
DIMENSION A(NVAR,NVAR),B(NVAR),XX(NVAR),TA(NHR2)
DIMENSION G(MSURF),TAVG(MSURF),TF(MSURF),
DTF(MSURF)
DIMENSION
TI(MSURF,NHR2),TO(MSURF,NHR2),TGR(NHR2),H(MSURF)
DIMENSION
TZONE(NHR2),QSYS(NHR2),QCONV(MSURF,NHR2)
DIMENSION SUMA(MSURF),SUMAE(MSURF),FIF(MSURF),
HR(MSURF),
* SUMXTI(MSURF),SUMYTO(MSURF),SUMFQI(MSURF)
DIMENSION SUMZTO(MSURF),SUMYTI(MSURF),
SUMFQO(MSURF)
DIMENSION QO(MSURF,NHR2),TILT(MSURF)
DIMENSION RRI(MSURF,MSURF),CCI(MSURF,MSURF),
NOL(MSURF)
DIMENSION THICK(MSURF,MSURF),RHO(MSURF,MSURF)
DIMENSION CONDUCT(MSURF,MSURF),QQ(MSURF),
QR(MSURF)
DIMENSION CP(MSURF,MSURF),ORDERS(MSURF)
DIMENSION DBTOA(MDAY,NHR2),WBTOA(MDAY,NHR2),
DN_IR(MDAY,NHR2)
DIMENSION DIF_IR(MDAY,NHR2),HUMID(MDAY,NHR2)
DIMENSION WIND_VEL(MDAY,NHR2),
WIND_DIR(MDAY,NHR2),WSPEED(NHR2),
* D(NHR2),JB(11),WIND_VELL(MDAY,NHR2),
WIND_DIRR(MDAY,NHR2)
REAL NUMDAY(12)
DATA(NUMDAY(NM),NM=1,12)/0.,31.,59.,90.,120.,151.,181.,212.,
* 243.,273.,304.,334./
REAL MEW,P,RHOA(365,NHR2),CPA(365,NHR2)
REAL RH(365,NHR2),RHOZ(365,NHR2),CPZ(365,NHR2),
WA(365,NHR2)
* WZ(365,NHR2),HFG(365,NHR2),TAV(365,NHR2)
REAL Q(NHR2),QSEN(NHR2),QLA(NHR2),HVAC(365,NHR2),
QQTOZONE(365)
REAL QTOTAL,QTOZONE(NHR2),QPERDAY(365)
C*****
C.....INPUT FILE
C*****
OPEN(3,FILE='input01.10.TXT')
OPEN(7,FILE='Weather.TXT')
OPEN(4,FILE='Out_input01.10.TXT')
C.....END INPUT FILE.....
C*****
C.....READ INPUT
C*****
READ(3,*) N1,N2
NALL=N1+N2
WRITE(4,*) 'NALL=',NALL
READ(3,*) LSM,LON,LLT
WRITE(4,421)
421 FORMAT(/,5X,'LSM LON LLT')
WRITE(4,422) LSM,LON,LLT
422 FORMAT(3F10.2)

```

```

READ(3,*) DAYSTD,MONTHSTD
READ(3,*) DAYEND,MONTHEND
NUMSTD=NUMDAY(MONTHSTD)+DAYSTD
NUMEND=NUMDAY(MONTHEND)+DAYEND
WRITE(4,*) ' '
WRITE(4,*)'NUMSTD=',NUMSTD
WRITE(4,*)'NUMEND=',NUMEND
NUMDATE=NUMEND-NUMSTD+1
C...KIND IS GROUND TYPE ,USED TO FIND GROUND
REFLECTION
C...NWIN = 1 FOR AVERAGE WIND SPEED
C...NWIN = 2 FOR REAL WIND SPEED
C...NUM = 1 FOR CONSTANT TA AND LAM = 1 FIND ONLY
COOLING LOAD BOTH NO PATITION AND PATITION
ROOM
C...FOR NO PARTITION AND PARTITION ROOM (VERSUS
ASHRAE COOLING LOAD)
C...NUM = 1 FOR CONSTANT TA AND      LAM = 2 FIND
COOLING LOAD AND CONVECTIVE FROM ROOF FOR NO
PATITION ROOM
C...NUM = 2 FOR VARY TA AND LAM =1&2 FIND
CONVECTIVE FROM ROOF FOR PARTITION
READ(3,*) NWIND,NUM,LAM
C.....CONSEMITT = 1 THEN USE CONSTANT EMISSIVITY
(NOT VARY WITH TILT ANGLE)
C.....CONSEMITT = 2 THEN USE VARY EMISSIVITY (VARY
WITH TILT ANGLE)
C.....REF IS CHANGE EMISSIVITY DUPLICATE WITH THAT
MATERIAL WE USE
READ(3,*) CONSEMITT,REF
DO 1200 I=1,NALL
READ(3,*) TILT(I),SAZ(I),AREA(I),PE(I),ROUGH(I),
* SWABSI(I),SWABSO(I),LWEMI(I),LWEMO(I)
1200      CONTINUE
WRITE(4,2001)
2001 FORMAT(/,'NO.  TILT  SAZ  AREA  PR  ROUGH',
* 3X,'SWABSI SWABSO LWEMI LWEMO')
DO 1005 I=1,NALL
WRITE(4,2002)
I,TILT(I),SAZ(I),AREA(I),PE(I),ROUGH(I),SWABSI(I),
* SWABSO(I),LWEMI(I),LWEMO(I)
2002 FORMAT(I2,9F8.2)
1005 CONTINUE
C.....
C...REF IS TYPE OF MATERIAL THAT WE ARE REFER
WITH EMISSIVITY
C...REF = 1 REFER WITH WET ICE
C...REF = 2 REFER WITH WOOD
C...REF = 3 REFER WITH GLASS

```

```

C...REF = 4 REFER WITH PAPER
C...REF = 5 REFER WITH CLAY
C...REF = 6 REFER WITH CUO
C...REF = 7 REFER WITH ALO
IF(CONSEMITT.NE.1)THEN
  IF(REF.EQ.1)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS WET ICE'
  ELSEIF(REF.EQ.2)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS WOOD'
  ELSEIF(REF.EQ.3)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS GLASS'
  ELSEIF(REF.EQ.4)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS PAPER'
  ELSEIF(REF.EQ.5)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS CLAY'
  ELSEIF(REF.EQ.6)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS CUO'
  ELSEIF(REF.EQ.7)THEN
    WRITE(4,*) 'EMISSIVITY IS VARY TILT ANGLE'
    WRITE(4,*) 'BY VERSUS ALO'
  ENDIF
ENDIF
IF(CONSEMITT.EQ.1)THEN
  GOTO 543
ELSE
DO 532 I=1,NALL
  IF((TILT(I).EQ.0.).OR.(TILT(I).EQ.90.).OR.(TILT(I).EQ.180.))T
  HEN
    GOTO 532
  ELSE
    CALL EMITT(REF,TILT(I),LWEMI(I),LWEMIR(I))
    LWEMI(I)=LWEMIR(I)
    CALL EMITT(REF,TILT(I),LWEMO(I),LWEMOR(I))
    LWEMO(I)=LWEMOR(I)
  ENDIF
  532      CONTINUE
ENDIF
  543      CONTINUE
WRITE(4,*) "
WRITE(4,*) '      SURF LWEMIR      LWEMOR'
DO 533 I=1,NALL
WRITE(4,*) I,LWEMI(I),LWEMO(I)

```

```

533      CONTINUE
C.....
READ(3,*) ROTATE
WRITE(4,*) '
WRITE(4,*)'ROTATE FROM NORTH CW EAST=' ,ROTATE
423      FORMAT(F10.2)
C.....ROTATION FROM NORTH CW EAST
IF(ROTATE.NE.0.)THEN
DO 1655 I=1,NALL
ROTA=ROTATE
IF(SAZ(I).EQ.-180.) THEN
    SAZ(I)=180.
ENDIF
IF((TILT(I).EQ.0.).OR.(TILT(I).EQ.180.).OR.(TILT(I).EQ.360.))
THEN
ROTA=0.
ENDIF
SAZ(I)=SAZ(I)+ROTA
IF (SAZ(I).GT.180.)THEN
SAZ(I)=SAZ(I)-360.
ENDIF
1655      CONTINUE
ENDIF
C      WRITE(4,*)'SUR  SAZ'
DO 1656 I=1,NALL
WRITE(4,424) I,SAZ(I)
424      FORMAT(I2,F10.2)
1656      CONTINUE
C.....
READ(3,*) (TZONE(IA),IA=25,48)
C      WRITE(4,*)'   IA  TZONE'
DO 100 IA=25,48
    TZONE(IA)=TZONE(IA)+273.
C      WRITE(4,*) IA,TZONE(IA)
100      CONTINUE
C.....WIND_IN IS INSIDE WIND VELOCITY
C.....HEIGHT IS WALL HEIGHT ABOVE GROUND
C.....TERRAIN IS TYPE OF SURROUNDING WHICH
BUILDING IS LOCATED
READ(3,*)(ACH(IA),IA=25,48)

READ(3,*) WIND_IN
READ(3,*) HEIGHT
READ(3,*) VOLUME
READ(3,*) TERRAIN
READ(3,*) REFLEX
READ(3,*) PRESSURE
C      WRITE(4,*) '
C      WRITE(4,*) 'SUR  LAYER  THICK  CONDUCT
RHO    CP'

DO 1000 I=1,NALL
READ(3,*) NOL(I)
DO 1001 J=1,NOL(I)
READ(3,*) THICK(I,J),CONDUCT(I,J),RHO(I,J),CP(I,J)
C      WRITE(4,500)
I,J,THICK(I,J),CONDUCT(I,J),RHO(I,J),CP(I,J)
C 500      FORMAT(2I5,F10.4,F10.3,2F10.1)
RRI(I,J)=THICK(I,J)/CONDUCT(I,J)
CCI(I,J)=THICK(I,J)*RHO(I,J)*CP(I,J)
1001      CONTINUE
1000      CONTINUE
IF(NUM.EQ.1)THEN
IF(LAM.EQ.1)THEN
WRITE(4,*)'WE ARE CHECKING COOLING LOAD WITH
ASHRAE PROGRAM BY
*SET WIND SPEED EQ 0'
ENDIF
ENDIF
C.....INPUT WIND_DIR FROM NORTH CW EAST
DO 5001 I=1,365
READ(7,*) NDATE,MONTH,YEAR
READ(7,*)(DBTOA(I,IA),IA=25,48)
READ(7,*)(WBTOA(I,IA),IA=25,48)
READ(7,*)(WIND_VEL(I,IA),IA=25,48)
READ(7,*)(WIND_DIR(I,IA),IA=25,48)
C.....FOR CHECK WITH ASHRAE PROGRAM WHEN WIND
VELOCITY EQ 0
C.....NUM&LAM EQUAL 1
IF(NUM.EQ.1)THEN
IF(LAM.EQ.1)THEN
DO 1111 IA=25,48
    WIND_VEL(I,IA)=0.
    WIND_DIR(I,IA)=0.
1111      CONTINUE
ENDIF
ENDIF
C.....
5001      CONTINUE
C.....END READ INPUT.....
C*****

C.....CAL_AVERAGE_WIND_SPEED
C*****
WDUMMY=0.
DO 5100 I=NUMSTD,NUMEND
DO 5110 IA=25,48
WDUMMY=WDUMMY+WIND_VEL(I,IA)
5110      CONTINUE
5100      CONTINUE
WDUMMY=WDUMMY/(NUMDATE*24)

```

```

C          WRITE(4,*)
'AVERAGE_WIND_SPEED=',WDUMMY
C.....END OF FIND AVERAGE WIND SPEED.....
C*****
C.....CAL_RESPONSE FACTOR
C*****
DO 7 II=1,NALL
C          WRITE(4,*) ''
C          WRITE(4,*) ' SUR LAYER  RI    CI'
N=NOL(II)
DO 6 JJ=1,N
RI(JJ)=RRI(II,JJ)
CI(JJ)=CCI(II,JJ)
C          WRITE(4,1002) II,JJ,RI(JJ),CI(JJ)
1002 FORMAT(2I5,F10.4,3X,F10.1)
6 CONTINUE
CALL CTF(N,RI,CI,X,Y,Z,CR,F,IK)
ORDERS(II)=IK+1
C          WRITE(4,*) '          NUM      X
          Y          Z'
DO 11 KK=1,24
XM(II,ORDERS(II),KK)=X(ORDERS(II),KK)
YM(II,ORDERS(II),KK)=Y(ORDERS(II),KK)
ZM(II,ORDERS(II),KK)=Z(ORDERS(II),KK)
C          WRITE(4,*)
KK,XM(II,ORDERS(II),KK),YM(II,ORDERS(II),KK),
C *          ZM(II,ORDERS(II),KK)
11 CONTINUE
C          WRITE(4,*) '          NUM  FLUX'
DO 12 LL=1,ORDERS(II)
FLUX(II,LL)=F(LL)
C          WRITE(4,*) LL,FLUX(II,LL)
12 CONTINUE
7 CONTINUE
C.....END CAL_RESPONSE FACTOR.....
C*****
QTOTAL=0.
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN
GOTO 127
ELSE
IF (NWIND.EQ.1)THEN
WRITE(4,*)'NOW WE USE AVERAGE WIND SPEED'
ELSE
WRITE(4,*)'NOW WE USE REAL WIND SPEED'
ENDIF
ENDIF
127 CONTINUE
WRITE(4,*)''
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN

```

```

GOTO 128
ELSE
WRITE(4,*)'          DATE  QTOZONE'
ENDIF
128 CONTINUE
C.....START DAY OF YEAR
C.....CAL INCIDENT SOLAR AND FIND KNOWN TEMP AND
CONVERT TO USE
DO 6001 ID=NUMSTD,NUMEND
DATE=ID
C          WRITE(4,*)'DATE=',DATE
CALL
SOLARE(NALL,TILT,SAZ,AREA,SWABSO,SWABSI,DATE,
LSM,LON,LLT,QS,R,REFLEX)
C.....DEFINE TSKY EQ TOUTSIDE MINUS 6
C.....DEFINE TGR EQ TOUTSIDE
C.....WIND_DIR VERSUS NORTH CONVERT TO VERSUS
SOUTH
DO 6002 IA=25,48
TOA(IA)=DBTOA(ID,IA)+273.
TSKY(IA)=TOA(IA)-6.
TGR(IA)=TOA(IA)
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN
WSPEED(IA)=WIND_VEL(ID,IA)
ELSEIF (NWIND.EQ.1)THEN
WSPEED(IA)=WDUMMY
ELSE
WSPEED(IA)=WIND_VEL(ID,IA)
ENDIF
WDIR(IA)=WIND_DIR(ID,IA)-180.
IF(WDIR(IA).EQ.-180)THEN
WDIR(IA)=180.
ENDIF
C          WRITE(4,*) ID,IA,WSPEED(IA),WDIR(IA)
6002 CONTINUE
C*****
C          PRESUME INITIAL VALUE
C*****
DO 1020 I=1,NALL
DO 1021 J=1,48
TI(I,J)=400.
TO(I,J)=400.
TA(J)=298.
QI(I,J)=10.
QO(I,J)=10.
1021 CONTINUE
DO 1022 J=1,24
QS(I,J+24)=QS(I,J)

```

```

C      WRITE(4,*) I,J,QS(L,J+24)
1022 CONTINUE
1020 CONTINUE
C.....START ITERATION.....
      DO 66 MM=1,100
      DO 1 IA=25,48
C*****
C.....CAL HMRT AND TMRT EACH SURFACE
C*****
      DO 2 II=1,100
      SUMAREA=0.
      SUMAREAE=0.
      SUMAET=0.
      RBAL=0.
      DO 1025 M=1,NALL
      SUMAREA=SUMAREA+AREA(M)
      SUMAREAE=SUMAREAE+AREA(M)*LWEMI(M)
      SUMAET=SUMAET+AREA(M)*LWEMI(M)*TI(M,
IA)
1025 CONTINUE
      DO 1322 M=1,NALL
      SPARE=AREA(M)*LWEMI(M)
      TERM1=SUMAREAE-SPARE
      TF(M)=(SUMAET-SPARE*TI(M,IA))/TERM1
      TAVGGG=0.5*(TF(M)+TI(M,IA))
      TERM2=(1.-LWEMI(M))/LWEMI(M)
      TERM3=AREA(M)*(1.-TERM1/(SUMAREA-
AREA(M)))/TERM1
      TERM4=TAVGGG*TAVGGG*TAVGGG
      FMRT=1./(TERM2+1.+TERM3)
      HR(M)=4.*5.67E-8*FMRT*TERM4
      DELT=TF(M)-TI(M,IA)
      RBAL=RBAL+HR(M)*AREA(M)*DELT
      HRT(M)=HR(M)*DELT
C      WRITE(4,*)'HR=',HR(M),'DELT=',DELT
1322 CONTINUE
      RBAL=RBAL/SUMAREA
C      WRITE(4,*) 'RBAL=',RBAL
      DO 1032 I=1,NALL
      TFF(I,IA)=TF(I)
HRR(I,IA)=HR(I)
C      WRITE(4,*)
I,TF(I),TAVG(I),FIF(I),HR(I),DTF(I),RBAL(I)
1032 CONTINUE
C.....END OF FINDING HMRT AND TMRT.....
C*****
***
C...CONDUCTIVE FLUX
C...SUMMATION OF PRODUCT BETWEEN CTF AND THEIR
COMPONENTS
C*****
***
      DO 1033 M=1,NALL
      SUMXTI(M)=0.
      SUMYTI(M)=0.
      SUMYTO(M)=0.
      SUMZTO(M)=0.
      SUMFQI(M)=0.
      SUMFQO(M)=0.
      DO 1034 KK=2,24
      SUMXTI(M)=SUMXTI(M)+XM(M,ORDERS(M),KK)*TI(M,IA-
KK+1)
      SUMYTI(M)=SUMYTI(M)+YM(M,ORDERS(M),KK)*TI(M,IA-
KK+1)
      SUMYTO(M)=SUMYTO(M)+YM(M,ORDERS(M),KK)*TO(M,I
A-KK+1)
      SUMZTO(M)=SUMZTO(M)+ZM(M,ORDERS(M),KK)*TO(M,IA
-KK+1)
1034 CONTINUE
C      WRITE(4,*) 'M IA SUMXTI(M) SUMYTI(M)
SUMYTO(M) SUMZTO(M)'
C      WRITE(4,*)
M,IA,SUMXTI(M),SUMYTI(M),SUMYTO(M),SUMZTO(M)
      DO 1555 LL=1,ORDERS(M)
C      WRITE(4,*) FLUX(M,LL)
      SUMFQI(M)=SUMFQI(M)+FLUX(M,LL)*QI(M,IA-LL)
      SUMFQO(M)=SUMFQO(M)+FLUX(M,LL)*QO(M,IA-LL)
1555 CONTINUE
C      WRITE(4,*) M,IA,SUMFQI(M),SUMFQO(M)
1033 CONTINUE
C.....END OF FINDING SUMMATION.....
C*****
C      ESTIMATE HEAT TRANSFER COEFFICIENT
C*****
      DO 1035 M=1,NALL
C.....H OF GROUND
      HRG(M)=HRGR(TO(M,IA),TGR(IA),TILT(M),LWEMO(M))
      HRGG(M,IA)=HRGR(TO(M,IA),TGR(IA),TILT(M),LWEMO(M)
)
C.....H OF SKY
      HRS(M)=HRSKY(TO(M,IA),TSKY(IA),TILT(M),LWEMO(M))
      HRSS(M,IA)=HRSKY(TO(M,IA),TSKY(IA),TILT(M),LWEMO(
M))
C.....H OF OUTSIDE AIR
      HRAO(M,IA)=HRAO(TO(M,IA),TOA(IA),TILT(M),LWEMO(
M))
C.....HCO EQ HFO + HNO

```

```

HCO(M)=HFO(WSPEED(IA),WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROU
GH(M),PE(M),HEIGHT,AREA(M),TERRAIN)
*
+HNO(TILT(M),SAZ(M),TO(M,IA),TOA(IA))
HCOO(M,IA)=HFO(WSPEED(IA),WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),
ROUGH(M), PE(M),HEIGHT,AREA(M),TERRAIN)
*
+HNO(TILT(M),SAZ(M),TO(M,IA),TOA(IA))
C.....GENERALLY HCI EQ HFI + HNI BUT ASHRAE
PROGRAM HCI EQ HNI
C.....HCI EQ HFI+HNI
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN
HCI(M)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
HCII(M,IA)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
ELSE
HCI(M)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
* PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),
TA(IA))
HCII(M,IA)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
* PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),
TA(IA))
ENDIF
IF((TILT(M).EQ.180.).AND.(SAZ(M).EQ.0.)) THEN
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN
HCO(M)=500.
HCOO(M,IA)=500.
HCI(M)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
HCII(M,IA)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
ELSE
HCO(M)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
*
PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNO(TILT(M),SAZ(M),TO(M,IA),
TOA(IA))
HCOO(M,IA)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
*
PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNO(TILT(M),SAZ(M),TO(M,IA),
TOA(IA))
HCI(M)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
* PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),
TA(IA))
HCII(M,IA)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(M),
* PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),
TA(IA))
ENDIF
ENDIF
1035 CONTINUE
IF(N2.NE.0.)THEN
DO 1036 M=N1+1,NALL,1
QS(M,IA)=0.
HRGG(M,IA)=0.
HRSS(M,IA)=0.
HRAOO(M,IA)=0.
IF((NUM.EQ.1).AND.(LAM.EQ.1))THEN
HCO(M)=0.001
HCOO(M,IA)=0.001
HCI(M)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
HCII(M,IA)=HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),TA(IA))
))
ELSE
HCO(M)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH
(M),*
PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNO(TILT(M),SAZ(M),TO(M,IA),
TZONE(IA))
HCOO(M,IA)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROU
UGH(M),PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNO(TILT(M),SAZ(M),
* TO(M,IA),TZONE(IA))
HCI(M)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROUGH(
M),
* PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(M,IA),
TA(IA))
HCII(M,IA)=HFI(WDIR(IA),TILT(M),SAZ(M),ROU
GH(M),PE(M),AREA(M),WIND_IN)+HNI(TILT(M),SAZ(M),TI(
M,IA),
TA(IA))
ENDIF
1036 CONTINUE
ENDIF
C.....END OF FINDING HSKY,HGR,HAIR,HC.....
C*****
***
C START SETTING MATRIX FOR FIND TEMPERATURE
UNKNOWNNS
C*****
***
NNP1=NALL+NALL
DO 1050 IR=1,NNP1
DO 1051 IC=1,NNP1
A(IR,IC)=0.
B(IR)=0.
1051 CONTINUE
1050 CONTINUE
DO 1052 IR=1,NALL
A(IR,IR)=XM(IR,ORDERS(IR),1)+HRR(IR,IA)+HCII(IR,IA)
A(IR,IR+NALL)=YM(IR,ORDERS(IR),1)
B(IR)=
SUMXTI(IR)+SUMYTO(IR)+SUMFQI(IR)+HRR(IR,IA)*TF(I
*
-RBAL+HCII(IR,IA)*TA(IA)
A(IR+NALL,IR)=YM(IR,ORDERS(IR),1)

```

```

A(IR+NALL,IR+NALL)=ZM(IR,ORDERS(IR),1)+HRAOO(IR,IA
)
*
+HRSS(IR,IA)+HRGG(IR,IA)+HCOO(IR,IA)
B(IR+NALL)=SUMYTI(IR)-SUMZTO(IR)-SUMFQO(IR)
*
+QS(IR,IA)+HRAOO(IR,IA)*TOA(IA)+HRSS(IR,IA)*TSKY(IA)
* +HRGG(IR,IA)*TGR(IA)+HCOO(IR,IA)*TOA(IA)
IF(IR.GT.N1) THEN
A(IR+NALL,IR+NALL)=ZM(IR,ORDERS(IR),1)+HCOO(IR,IA)
B(IR+NALL)=SUMYTI(IR)-SUMZTO(IR)-
SUMFQO(IR)+HCOO(IR,IA)*TZONE(IA)
ENDIF
C WRITE(4,*) IR,A(IR,IR),A(IR,IR+NALL),A(IR+NALL,IR),
A(IR+NALL,IR+NALL)
C WRITE(4,*) IR,B(IR),B(IR+NALL)
1052 CONTINUE
C.....END OF SET MATRIX.....
C*****
***
C.....FIND TEMPERATURE UNKNOWN BY SOLVE
SIMUTANEOUS EQUATION
C*****
***
CALL LUDECOM(NALL+NALL,A,B,XX)
C CALL GAUSS(NALL+NALL,A,B,XX)
DO 1059 M=1,NALL
TI(M,IA) = XX(M)
C WRITE(4,*) TI(M,IA)
1059 CONTINUE
DO 1056 M=NALL+1,NALL+NALL
TO(M-NALL,IA) = XX(M)
C WRITE(4,*) TO(M-NALL,IA)
1056 CONTINUE
C TA(IA) = XX(NNP1)
C WRITE(4,*) TA(IA)
C.....END OF FINDING TEMPERATURE UNKNOWN.....
DO 1057 M=1,NALL
QI(M,IA) = -(XM(M,ORDERS(M),1)*TI(M,IA)+SUMXTI(M)
* -YM(M,ORDERS(M),1)*TO(M,IA)-SUMYTO(M)-
SUMFQI(M))
QO(M,IA) = -(YM(M,ORDERS(M),1)*TI(M,IA)+SUMYTI(M)
* -ZM(M,ORDERS(M),1)*TO(M,IA)-SUMZTO(M)-
SUMFQO(M))
C WRITE(4,*) M,IA,QI(M,IA),QO(M,IA)
1057 CONTINUE
DO 1070 M=1,NALL
DT(M,IA) = ABS((TI(M,IA)-TI(M,IA-24))/TI(M,IA)*100.)
DT(M+NALL,IA) = ABS((TO(M,IA)-TO(M,IA-
24))/TO(M,IA)*100.)
C DT(NNP1,IA) = ABS((TA(IA)-TA(IA-
24))/TA(IA)*100.)
C WRITE(4,*) M,IA,DT(M,IA),DT(M+NALL,IA)
1070 CONTINUE
DO 1058 M=1,NALL
TO(M,IA-24) = TO(M,IA)
TI(M,IA-24) = TI(M,IA)
TA(IA-24) = TA(IA)
QO(M,IA-24) = QO(M,IA)
QI(M,IA-24) = QI(M,IA)
1058 CONTINUE
TOL = DT(1,25)
DO 1073 IB=25,48
DO 1074 M=1,NALL+NALL
IF(DT(M,IB).GT.TOL) THEN
TOL=DT(M,IB)
ENDIF
1074 CONTINUE
1073 CONTINUE
IF(TOL.LE.0.01) GOTO 3
2 CONTINUE
3 CONTINUE
C.....ENDING CONVERGE FOR TEMPERATURE.....
C.....IF NUM EQ 1 MEAN NOT CHANGE OF TA
IF(NUM.EQ.1) GOTO 1
C*****
C.....CAL TA WHEN TA HAVE CP
C*****
SUMHA=0.
SUMAHT=0.
TERM10=0.
TERM11=0.
DO 323 M=1,NALL
SUMHA=SUMHA+AREA(M)*HCII(M,IA)
SUMAHT=SUMAHT+AREA(M)*HCII(M,IA)*TI(M,
IA)
323 CONTINUE
C WRITE(4,*) IA,M,SUMHA,SUMAHT
Q(IA)=ACH(IA)*VOLUME/3600.
CALL
PSYCHROMETRICS(DBTOA(ID,IA),WBTOA(ID,IA),PRESSUR
E,
* CPA(ID,IA),RHOA(ID,IA),RH(ID,IA),WA(ID,IA))
TERM10=Q(IA)*RHOA(ID,IA)*CPA(ID,IA)
TERM11=Q(IA)*RHOA(ID,IA)*CPA(ID,IA)*TOA(I
A)
TA(IA)=(SUMAHT+TERM11)/(SUMHA+TERM10)
C.....ENDING OF FIND TA.....
1 CONTINUE

```

C.....IF SUMQI EQ SUMQO FOR EACH DAY THEN
CONVERGE.....

SUMQI=0.
SUMQO=0.

DO 321 IA=25,48

DO 322 M=1,NALL

SUMQI=SUMQI+QI(M,IA)
SUMQO=SUMQO+QO(M,IA)

322 CONTINUE

321 CONTINUE

C WRITE(4,*) 'SUMQI=',SUMQI,'SUMQO=',SUMQO
EA=(SUMQI-SUMQO)*100./SUMQO
IF (ABS(EA).LE.0.01) GOTO 55

66 CONTINUE

55 CONTINUE

C.....END OF GET TEMPERATURE WHICH

CONVERGE.....

DO 1060 IA =1,24
QSYS(IA) = 0.
TA(IA) = TA(IA+24)-273.
TZONE(IA) = TZONE(IA+24)-273.
DO 1061 M=1,NALL
TO(M,IA)=TO(M,IA)-273.
TI(M,IA)=TI(M,IA)-273.
QCONV(M,IA)=0.

1061 CONTINUE

1060 CONTINUE

DO 1212 M=1,NALL
DO 1213 IA=1,24

C WRITE(4,344) M,IA,TI(M,IA),TO(M,IA),TA(IA)

344 FORMAT(I2,2X,I2,3F10.4)

1213 CONTINUE

1212 CONTINUE

SUMQI=0.
SUMQO=0.
DO 1087 M=1,NALL

DO 1088 IA=25,48

SUMQI=SUMQI+QI(M,IA-24)
SUMQO=SUMQO+QO(M,IA-24)

1088 CONTINUE

1087 CONTINUE

C.....

C.....FOR NUM=1

IF(NUM.EQ.1)THEN

C.....FOR LAM=1

IF(LAM.EQ.1)THEN

C.....NUM&LAM = 1 FOR CHECK COOLING LOAD FROM
PROGRAM VERSUS ASHRAE PROGRAM

DO 1672 IA=25,48

CALL PSYCHROMETRICS(DBTOA(ID,IA),WBTOA(ID,IA),

PRESSURE,CPA(ID,IA),RHOA(ID,IA),RH(ID,IA),WA(ID,IA))

1672 CONTINUE

DO 1673 IA=25,48

CALL PSYCHROMETRICS1(TA(IA)-
273.,RH(ID,IA),PRESSURE,CPZ(ID,IA)

* ,RHOZ(ID,IA),WZ(ID,IA))

WRITE(4,*) TA(IA)-273.,RH(ID,IA),PRESSURE,CPZ(ID,IA)

C * ,RHOZ(ID,IA),WZ(ID,IA)

1673 CONTINUE

DO 1674 IA=25,48

TAV(ID,IA)=0.5*(DBTOA(ID,IA)+(TA(IA)-273.))

CALL H_VAPORIZATION(TAV(ID,IA),HFG(ID,IA))

C WRITE(4,*) TAV(ID,IA),HFG(ID,IA)

1674 CONTINUE

DO 1062 IA =25,48

QCON(IA)=0.

Q(IA)=ACH(IA)*VOLUME/3600.

QSEN(IA)=Q(IA)*RHOA(ID,IA)*CPA(ID,IA)*(DBTOA(ID,IA)-
(TA(IA)-273.))

QLA(IA)=Q(IA)*RHOA(ID,IA)*HFG(ID,IA)*(WA(ID,IA)-
WZ(ID,IA))

QCONV(M,IA) = HCH(M,IA)*(TI(M,IA)-

TZONE(IA))*AREA(M)

QCON(IA) = QCON(IA)+QCONV(M,IA)

1063 CONTINUE

1062 CONTINUE

DO 1621 IA=25,48

HVAC(ID,IA)=QCON(IA)+QSEN(IA)+QLA(IA)

WRITE(4,*) ID,HVAC(ID,IA)

1621 CONTINUE

ELSE

C.....FOR LAM=2

C.....NUM =1 & LAM = 2 FOR FIND COOLING LOAD FOR
HAVE NOT AIR SPACE ON ROOF

C.....AND FIND CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM
ROOF TO ZONE

C.....(ROOF TYPE IS CARTEDOOR)

QPERDAY(ID)=0.

DO 1162 IA =25,48

QCON(IA)=0.

DO 1163 M=1,NALL

IF((TILT(M).EQ.90.).OR.(TILT(M).EQ.180.))THEN

QCONV(M,IA)=0.

ELSE

QCONV(M,IA) = HCH(M,IA)*AREA(M)*(TI(M,IA)-

TZONE(IA))

ENDIF

C WRITE(4,*) M,QCONV(M,IA)

QCON(IA) = QCON(IA)+QCONV(M,IA)

1163 CONTINUE

```

C      WRITE(4,*) 'QTOZONE=',QCON(IA)
QPERDAY(ID)=QPERDAY(ID)+QCON(IA)
1162 CONTINUE
C      WRITE(4,*) ID,QPERDAY(ID)
      QTOTAL=QTOTAL+QPERDAY(ID)
      ENDIF
C.....
      ELSE
C.....FOR  NUM=2
C.....NUM = 2 & LAM = 1 OR 2 MEAN FIND COOLING LOAD
FOR HAVE AIR SPACE ON ROOF
C.....AND FIND CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM
PARTITION(FAHR) TO ZONE
C.....(ROOF TYPE IS PANYARR)
IF(LAM.EQ.1)THEN
LAM=2
ENDIF
QPERDAY(ID)=0.
DO 1262 IA=25,48
QTOZONE(IA)=HCOO(NALL,IA)*AREA(NALL)*(TO(NALL,I
A)-TZONE(IA))
C      WRITE(4,*) IA,QTOZONE(IA)
QPERDAY(ID)=QPERDAY(ID)+QTOZONE(IA)
1262 CONTINUE
C      WRITE(4,*) ID,QPERDAY(ID)
QTOTAL=QTOTAL+QPERDAY(ID)
ENDIF
C.....END OF FIND COOLING LOAD & CONVECTIVE HEAT
TRANSFER.....
C*****
***
C.....CALCULATE U OF ROOF
UAVG = 0.
C      WRITE(4,*)'HOUR U_ROOF FILMIN
FILMOUT 1/FILMIN 1/FILMOUT
DO 3001 IA=25,48
KCOUNT = 0
AREAA=0.
FILMIN(IA) = 0.
FILMOUT(IA) = 0.
DO 3002 M=1,NALL
RSURF(M) = 0.
DO 3003 J=1,NOL(M)
RSURF(M) = RSURF(M) + RRI(M,J)
3003 CONTINUE
IF ((TILT(M).NE.90.).AND.(TILT(M).NE.180.)) THEN
KCOUNT = KCOUNT + 1
AREAA=AREAA+AREA(M)
C.....NUM =1 THEN FIND FILMIN OF ROOF TYPE IS
CARTEDOOR
C.....NUM =2 THEN FIND FILMIN OF ROOF TYPE IS
PANYARR
IF(NUM.EQ.1)THEN
FILMIN(IA) = FILMIN(IA) + HCH(M,IA)
ELSE
FILMIN(IA) = HCOO(NALL,IA)
ENDIF
FILMOUT(IA) = FILMOUT(IA) + HCOO(M,IA)
ENDIF
3002 CONTINUE
C.....CALCULATE AVERAGE FILMIN & FILMOUT
IF(NUM.EQ.1)THEN
FILMIN(IA)=FILMIN(IA)/KCOUNT
ENDIF
FILMOUT(IA) = FILMOUT(IA)/KCOUNT
DO 3004 M=1,NALL
C.....IF SURFACES ARE ROOF DO LOOP
IF ((TILT(M).NE.90.).AND.(TILT(M).NE.180.)) THEN
C.....NUM = 1 THEN FIND U OF ROOF FOR ROOF TYPE IS
CARTEDOOR
IF(NUM.EQ.1)THEN
UROOF(IA) = 1./((1./FILMIN(IA)) + (1./FILMOUT(IA)) +
*
RSURF(M))
RTOTAL=RSURF(M)
FLUXX(IA) = QCON(IA)/AREAA
C.....NUM = 2 THEN FIND U OF ROOF FOR ROOF TYPE IS
PANYARR
ELSE
RAIR=0.176
UROOF(IA) = 1./((1./FILMIN(IA)) + (1./FILMOUT(IA)) +
*
RSURF(M)+RSURF(NALL)+RAIR)
RTOTAL=RSURF(M)+RSURF(NALL)+RAIR
FLUXX(IA) = QTOZONE(IA)/AREA(NALL)
ENDIF
GOTO 3006
ENDIF
3004 CONTINUE
3006 CONTINUE
WRITE(4,3007) ID,IA,UROOF(IA),FILMIN(IA),FILMOUT(IA),
*
1./FILMIN(IA),1./FILMOUT(IA),RTOTAL
3007 FORMAT(I3,5X,I2,6F10.4)
UAVG = (UAVG+UROOF(IA))
FILM_IN(ID,IA) = FILMIN(IA)
FILM_OUT(ID,IA) = FILMOUT(IA)
U_ROOF(ID,IA) = UROOF(IA)
3001 CONTINUE
C.....END OF FIND U ROOF & FILMIN & FILMOUT
C*****
C.....CALCULATE AVERAGE U ROOF PER HOUR
UAVG = UAVG/24.

```

```

DO 3005 IA=25,48
DELTAT(IA) = FLUXX(IA)/(UAVG)
C      WRITE(4,756)
IA,U_ROOF(ID,IA),UAVG,FILM_IN(ID,IA),FILM_OUT(ID,IA),
C *    DELTAT(IA)
C 756   FORMAT(I2,3X,5F10.4)
3005 CONTINUE
C.....END OF CALCULATE DELTAT.....
6001    CONTINUE
C.....END OF DAY LOOP.....
C*****
**
C.....FIND SUMMATION OF U & FILMIN & FILMOUT.....
DO 900 ID=1,NUMEND
DO 901 IA=25,48
SUM_U=SUM_U+U_ROOF(ID,IA)
SUM_IN=SUM_IN+FILM_IN(ID,IA)
SUM_OUT=SUM_OUT+FILM_OUT(ID,IA)
901    CONTINUE
900    CONTINUE
C.....CALCULATE AVERAGE OF U & FILMIN &
FILMOUT.....
AVG_U=SUM_U/(NUMDATE*24)
AVG_IN=SUM_IN/(NUMDATE*24)
AVG_OUT=SUM_OUT/(NUMDATE*24)
C.....FIND MIN & MAX OF U & FILMIN & FILMOUT.....
TOLUMIN=U_ROOF(NUMSTD,25)
TOLUMAX=U_ROOF(NUMSTD,25)
TOLFILMINMIN=FILM_IN(NUMSTD,25)
TOLFILMINMAX=FILM_IN(NUMSTD,25)
TOLFILMOUTMIN=FILM_OUT(NUMSTD,25)
TOLFILMOUTMAX=FILM_OUT(NUMSTD,25)
DO 902 ID=NUMSTD,NUMEND
DO 903 IA=25,48

IF(TOLFILMOUTMIN.GE.FILM_OUT(ID,IA))THE
N
TOLFILMOUTMIN=FILM_OUT(ID,IA)
ENDIF
IF(TOLFILMOUTMAX.LE.FILM_OUT(ID,IA))TH
EN
TOLFILMOUTMAX=FILM_OUT(ID,IA)
ENDIF
903    CONTINUE
902    CONTINUE
WRITE(4,*)"
WRITE(4,*) ' UMIN UAVG UMAX'
WRITE(4,1900) TOLUMIN,AVG_U,TOLUMAX
WRITE(4,*)"
WRITE(4,*) ' FILMINMIN FILMINAVG FILMINMAX'
WRITE(4,1900) TOLFILMINMIN,AVG_IN,TOLFILMINMAX
WRITE(4,*)"
WRITE(4,*) ' FILMOUTMIN FILMOUTAVG FILMOUTMAX'
WRITE(4,1900)
TOLFILMOUTMIN,AVG_OUT,TOLFILMOUTMAX
1900    FORMAT(3F10.4)
WRITE(4,*)"
C.....END OF FIND MIN & AVERAGE & MAX OF U & FILMIN
& FILMOUT.....
C*****
C.....FIND TOTAL QTOZONE PER YEAR
IF(LAM.NE.1)THEN
WRITE(4,*) 'QTOZONEPERYEAR=',QTOTAL
ENDIF
END
C*****
SUBROUTINE LUDECOM(N,A,B,X)
PARAMETER(NVAR=20)
DIMENSION A(NVAR,NVAR),B(NVAR),X(NVAR),Y(NVAR)
DIMENSION AL(NVAR,NVAR),AU(NVAR,NVAR)
DO 1 I=1,N
DO 2 J=1,N
AL(I,J)=0.
AU(I,J)=0.
2    CONTINUE
1    CONTINUE
DO 3 I=1,N
AL(I,1)=A(I,1)
3    CONTINUE
DO 4 J=2,N
AU(1,J)=A(1,J)/AL(1,1)
4    CONTINUE
DO 5 J=2,N-1
DO 6 I=J,N

```

```

SUM=0.
DO 7 K=1,J-1
    SUM=SUM+AL(I,K)*AU(K,J)
7    CONTINUE
    AL(I,J)=A(I,J)-SUM
6    CONTINUE
DO 8 K=J+1,N
    SUM=0.
    DO 9 I=1,J-1
        SUM=SUM+AL(I,I)*AU(I,K)
9    CONTINUE
        AU(J,K)=(A(J,K)-SUM)/AL(J,J)
8    CONTINUE
5 CONTINUE
SUM=0.
DO 10 K=1,N-1
    SUM=SUM+AL(N,K)*AU(K,N)
10   CONTINUE
    AL(N,N)=A(N,N)-SUM
    Y(1)=B(1)/AL(1,1)
DO 11 I=2,N
    SUM=0.
DO 12 J=1,I-1
    SUM=SUM+AL(I,J)*Y(J)
12   CONTINUE
    Y(I)=(B(I)-SUM)/AL(I,I)
11   CONTINUE
    X(N)=Y(N)
DO 13 I=N-1,1,-1
    SUM=0.
DO 14 J=I+1,N
    SUM=SUM+AU(I,J)*X(J)
14   CONTINUE
    X(I)=Y(I)-SUM
13   CONTINUE
RETURN
END
C*****
SUBROUTINE GAUSS(N,A,B,X)
PARAMETER(NVAR=20)
DIMENSION A(NVAR,NVAR),B(NVAR),X(NVAR)
DO 10 IE=1,N
    BIG=ABS(A(IE,1))
DO 20 IC=2,N
    AMAX=ABS(A(IE,IC))
    IF(AMAX.GT.BIG) BIG=AMAX
20 CONTINUE
DO 30 IC=1,N
    A(IE,IC)=A(IE,IC)/BIG
30 CONTINUE
    B(IE)=B(IE)/BIG
10 CONTINUE
    DO 100 IP=1,N-1
        BIG=ABS(A(IP,IP))
        JP=IP
        DO 110 I=IP+1,N
            AMAX=ABS(A(I,IP))
            IF(AMAX.GT.BIG)THEN
                BIG=AMAX
                JP=I
            ENDIF
110 CONTINUE
        IF(JP.NE.IP)THEN
            DO 120 J=IP,N
                DUMY=A(JP,J)
                A(JP,J)=A(IP,J)
                A(IP,J)=DUMY
120 CONTINUE
                DUMY=B(JP)
                B(JP)=B(IP)
                B(IP)=DUMY
            ENDIF
            DO 200 IE=IP+1,N
                RATIO=A(IE,IP)/A(IP,IP)
                DO 300 IC=IP+1,N
                    A(IE,IC)=A(IE,IC)-RATIO*A(IP,IC)
300 CONTINUE
                B(IE)=B(IE)-RATIO*B(IP)
200 CONTINUE
            DO 400 IE=IP+1,N
                A(IE,IP)=0
400 CONTINUE
100 CONTINUE
    X(N)=B(N)/A(N,N)
DO 500 IE=N-1,1,-1
    SUM=0.
DO 600 IC=IE+1,N
    SUM=SUM+A(IE,IC)*X(IC)
600 CONTINUE
    X(IE)=(B(IE)-SUM)/A(IE,IE)
500 CONTINUE
RETURN
END
C*****
SUBROUTINE SCALE(N,A,B)
DIMENSION A(20,20),B(20)
DO 10 IE=1,N
    BIG=ABS(A(IE,1))

```

```

DO 20 IC=2,N
      AMAX=ABS(A(IE,IC))
      IF(AMAX.GT.BIG) BIG=AMAX
20 CONTINUE
      DO 30 IC=1,N
      A(IE,IC)=A(IE,IC)/BIG
30 CONTINUE
      B(IE)=B(IE)/BIG
10 CONTINUE
      RETURN
      END
C*****
      SUBROUTINE PIVOT(N,A,B,IP)
      DIMENSION A(20,20),B(20)
      JP=IP
      BIG=ABS(A(IP,IP))
      DO 10 I=IP+1,N
      AMAX=ABS(A(I,IP))
      IF(AMAX.GT.BIG)THEN
        BIG=AMAX
        JP=I
      ENDIF
10 CONTINUE
      IF(JP.NE.IP)THEN
        DO 20 J=IP,N
        DUMY=A(JP,J)
        A(JP,J)=A(IP,J)
        A(IP,J)=DUMY
20 CONTINUE
        DUMY=B(JP)
        B(JP)=B(IP)
        B(IP)=DUMY
      ENDIF
      RETURN
      END
C*****
      SUBROUTINE EMITT(REF,TILT,LWEM,LWEMR)
      PARAMETER (NR=20,NGLE=100)
      REAL TILT,LWEM,LWEMR
      DIMENSION
      CE(NR),WOOD(NR),GLASS(NR),PAPER(NR),CLAY(NR),CUO(
NR),ALO(NR)
      DIMENSION X(NR),FX(NR),EMISS(NGLE),RATIO(NGLE)
      DIMENSION A(NR),B(NR),C(NR),D(NR),E(NR)

      DATA(CE(NM),NM=1,10)/0.950,0.948,0.946,0.944,0.942,0.940,
        * 0.920,0.840,0.650,0./
      DATA(WOOD(NM),NM=1,10)/0.920,0.919,0.918,0.916,0.914,0.912,
        * 0.910,0.880,0.750,0./
      DATA(GLASS(NM),NM=1,10)/0.922,0.921,0.920,0.918,0.916,0.912,
        * 0.880,0.760,0.550,0./
      DATA(PAPER(NM),NM=1,10)/0.905,0.904,0.903,0.902,0.901,0.900,
        * 0.898,0.850,0.800,0./
      DATA(CLAY(NM),NM=1,10)/0.904,0.903,0.902,0.901,0.900,0.890,
        * 0.850,0.790,0.600,0./
      DATA(CUO(NM),NM=1,10)/0.755,0.754,0.753,0.752,0.751,0.750,
        * 0.740,0.690,0.500,0./
      DATA(ALO(NM),NM=1,10)/0.825,0.824,0.823,0.822,0.821,0.820,
        * 0.810,0.805,0.760,0.665/

      N=10
      DO 8 K=1,91
      XX=K-1
      IF(REF.EQ.1)THEN
        N=10
        DO 1 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=CE(I)
1      CONTINUE
      ELSEIF (REF.EQ.2)THEN
        N=10
        DO 2 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=WOOD(I)
2      CONTINUE
      ELSEIF (REF.EQ.3)THEN
        N=10
        DO 3 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=GLASS(I)
3      CONTINUE
      ELSEIF (REF.EQ.4)THEN
        N=10
        DO 4 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=PAPER(I)
4      CONTINUE
      ELSEIF (REF.EQ.5)THEN
        N=10
        DO 5 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=CLAY(I)
5      CONTINUE
      ELSEIF (REF.EQ.6)THEN
        N=10
        DO 6 I=1,N
        X(I)=(10.*I)-10.
        FX(I)=CUO(I)
6      CONTINUE
      ELSE
        N=10

```

```

DO 7 I=1,N
X(I)=(10.*I)-10.
FX(I)=ALO(I)
7 CONTINUE
ENDIF
DO 20 I=2,N-1
A(I)=X(I)-X(I-1)
B(I)=2.*(X(I+1)-X(I-1))
C(I)=X(I+1)-X(I)
D(I)=6.*(FX(I+1)-FX(I))/(X(I+1)-X(I))
* +6.*(FX(I-1)-FX(I))/(X(I)-X(I-1))
20 CONTINUE
B(1)=1.
C(1)=0.
D(1)=0.
A(N)=0.
B(N)=1.
D(N)=0.
DO 30 I=2,N
A(I)=A(I)/B(I-1)
B(I)=B(I)-A(I)*C(I-1)
30 CONTINUE
DO 35 I=2,N
D(I)=D(I)-A(I)*D(I-1)
35 CONTINUE
E(N)=D(N)/B(N)
DO 40 I=N-1,1,-1
E(I)=(D(I)-C(I)*E(I+1))/B(I)
40 CONTINUE
DO 50 I=2,N
IF((XX.GE.X(I-1)).AND.(XX.LE.X(I))) THEN
D1=X(I)-XX
D2=XX-X(I-1)
DD=X(I)-X(I-1)
T1=E(I-1)*D1*D1/(6.*DD)
T2=E(I)*D2*D2/(6.*DD)
T3=(FX(I-1)/DD-E(I-1)*DD/6.)*D1
T4=(FX(I)/DD-E(I)*DD/6.)*D2
FF=T1+T2+T3+T4
ENDIF
50 CONTINUE
EMISS(K)=FF
C WRITE(4,*) XX,FF,EMISS(K)
8 CONTINUE
C.....RATIO BETWEEN EMISS(0) AND EMISS(K)
DO 9 L=1,91
RATIO(L)=EMISS(L)/EMISS(1)
C WRITE(4,*) 'RATIO=',RATIO(L)
9 CONTINUE
LWEMR=LWEMR*RATIO(TILT+1)

C WRITE(4,*) LWEMR
RETURN
END
C*****
FUNCTION HRSKY(TO,TSKY,TILT,E)
DEG=ATAN(1.)/45.
TAVG=0.5*(TO+TSKY)
FSKY=0.5*(1.+COS(TILT*DEG))*COS((TILT*DEG
)/2.)
HRSKY=(4.*5.67E-8*E*TAVG**3.)*FSKY
RETURN
END
C*****
FUNCTION HRGR(TO,TOA,TILT,E)
DEG=ATAN(1.)/45.
TAVG=0.5*(TO+TOA)
FGR=(1.-COS(TILT*DEG))/2.
HRGR=(4.*5.67E-8*E*TAVG**3.)*FGR
RETURN
END
C*****
FUNCTION HRAO(TO,TOA,TILT,E)
DEG=ATAN(1.)/45.
TAVG=0.5*(TO+TOA)
FSKY=0.5*(1.+COS(TILT*DEG))*COS((TILT*DEG
)/2.)
FGR=(1.-COS(TILT*DEG))/2.
FAO=(1.-FSKY-FGR)
HRAO=(4.*5.67E-8*E*TAVG**3.)*FAO
RETURN
END
C*****
FUNCTION HFO(WSPEED,WDIR,TILT,SAZ,RF,PE,HEIGHT,AREA,TY)
IF(TY.EQ.1)THEN
ALP=7.0
ELSEIF(TY.EQ.2)THEN
ALP=3.5
ELSE
ALP=2.5
ENDIF
V=WSPEED*((HEIGHT/9.14)**(1./ALP))
DEG=ATAN(1.)/45.
DELTA=ABS(SAZ-WDIR)
C WRITE(4,*) 'DELTA=',DELTA
IF(DELTA.EQ.360.) THEN
DELTA=0.
ENDIF
IF(ABS(TILT-90.),LE.100.)THEN
WF=1.0

```

```

ELSE
    WF=0.5
ENDIF
IF((DELTA.GT.105).AND.(DELTA.LE.255))THEN
C.....WINDWARD
C        WF=1.0
C        ELSE
C.....LEEWARD
        WF=0.5
ENDIF
IF((TILT.EQ.0.).OR.(TILT.EQ.180.).OR.(TILT.EQ.3
60.)) THEN
        WF=1.0
ENDIF
C        WRITE(4,*) 'WF=',WF
        HFO=2.537*WF*RF*(SQRT(PE*V/AREA))
        RETURN
    END
C*****
    FUNCTION
HFI(WDIR,TILT,SAZ,RF,PE,AREA,VAIR)
    IN_TILT=TILT+180.
    IF(IN_TILT.GT.360.) THEN
        IN_TILT=IN_TILT-360.
    ENDIF
    IN_SAZ=SAZ+180.
    IF(IN_SAZ.GT.180.) THEN
        IN_SAZ=IN_SAZ-360.
    ENDIF
    DEG=ATAN(1.)/45.
    DELTA=ABS(IN_SAZ-WDIR)
    IF(DELTA.EQ.360.) THEN
        DELTA=0.
    ENDIF
    IF((ABS(TILT-
90.).LE.100.).AND.(DELTA.LT.105).AND.(DELTA.GE.255))THE
N
C        WINDWARD
C        WF=1.0
C        ELSE
C        LEEWARD
        WF=0.5
    ENDIF
    IF((TILT.EQ.0.).OR.(TILT.EQ.180.).OR.(TILT.EQ.3
60.)) THEN
        WF=1.0
    ENDIF
    HFI=2.537*WF*RF*(SQRT(PE*VAIR/AREA))
    RETURN
END

END
C*****
FUNCTION HNO(TILT,SAZ,TSO,TO)
DEG=ATAN(1.)/45.
IF((TILT.LT.90.).OR.(TILT.GE.270.))THEN
    IF(TO.LT.TSO)THEN
        TCASE=1.
    ELSE
        TCASE=2.
    ENDIF
ELSE
    IF(TO.LT.TSO)THEN
        TCASE=2.
    ELSE
        TCASE=1.
    ENDIF
ENDIF
IF(TCASE.EQ.1)THEN
    HNO=9.482*((ABS(TSO-TO))**(1./3.))/(7.238-
ABS(COS(TILT*DEG)))
ELSE
    HNO=1.810*((ABS(TSO-
TO))**(1./3.))/(1.382+ABS(COS(TILT*DEG)))
ENDIF
RETURN
END
C*****
FUNCTION HNI(TILT,SAZ,TSI,TA)
    IN_TILT=TILT+180.
    IF(IN_TILT.GT.360.) THEN
        IN_TILT=IN_TILT-360.
    ENDIF
    DEG=ATAN(1.)/45.
    IF((IN_TILT.LT.90.).OR.(IN_TILT.GE.270.))THEN
        IF(TA.LT.TSI)THEN
            TCASE=1.
        ELSE
            TCASE=2.
        ENDIF
    ELSE
        IF(TA.LT.TSI)THEN
            TCASE=2.
        ELSE
            TCASE=1.
        ENDIF
    ENDIF
    IF(TCASE.EQ.1)THEN
        HNI=9.482*((ABS(TSI-TA))**(1./3.))/(7.238-
ABS(COS(IN_TILT*DEG)))
    ELSE

```

```

      HNI=1.810*((ABS(TSI-
TA))**(1./3.))/(1.382+ABS(COS(IN_TILT*DEG)))

```

```

      ENDIF

```

```

      RETURN

```

```

      END

```

```

C*****

```

```

      FUNCTION HRAI(T,TZONE,E)

```

```

      DEG=ATAN(1.)/45.

```

```

      TAVG=0.5*(T+TZONE)

```

```

      HRAI=4.*5.67E-8*E*TAVG**3.

```

```

      RETURN

```

```

      END

```

```

C*****

```

```

      SUBROUTINE

```

```

PSYCHROMETRICS(DBTOA,WBTOA,P,CPA,RHOA,RH,W)

```

```

      REAL MEW,P,RHOA,CPA,HFG

```

```

C      DBTOA=30.

```

```

C      WBTOA=28.

```

```

C      P=101.325

```

```

      DB=DBTOA+273.15

```

```

      WB=WBTOA+273.15

```

```

      C8=-5.8002206E+3

```

```

      C9=-5.516256

```

```

      C10=-4.8640239E-2

```

```

      C11=4.1764768E-5

```

```

      C12=-1.4452093E-8

```

```

      C13=6.5459673

```

```

      PWSDB=EXP(C8/DB+C9+C10*DB+C11*DB*DB

```

```

      * +C12*DB*DB*DB+C13*LOG(DB))

```

```

      PWSWB=EXP(C8/WB+C9+C10*WB+C11*WB*WB

```

```

      * +C12*WB*WB*WB+C13*LOG(WB))

```

```

C      WRITE(*,*) PWSDB,PWSWB

```

```

      WSDB=0.62198*PWSDB/(P-PWSDB)

```

```

      WSWB=0.62198*PWSWB/(P-PWSWB)

```

```

C      WRITE(*,*) WSDB,WSWB

```

```

      W=((2501-2.381*WBTOA)*WSWB-(DBTOA-

```

```

WBTOA))/

```

```

      * (2501+1.805*DBTOA-4.186*WBTOA)

```

```

      MEW=W/WSDB

```

```

      RH=MEW/(1-(1-MEW)*(PWSDB/P))

```

```

      V=(0.082*DBTOA+22.436)*(1/29.+W/18.)

```

```

C      V=83144.41*DB*(1+1.6078*W)/(P)

```

```

      HA=1.006*DBTOA

```

```

      HG=2501+1.825*DBTOA

```

```

      H=HA+W*HG

```

```

      CPA=(1.9327E-10)*(DB**4.)-(7.9999E-

```

```

7)*(DB**3.)+(1.140E-3)*(DB**2.)

```

```

      * -(4.489E-1)*DB+(1.0575E+3)

```

```

      RHOA=1./V

```

```

C      WRITE(*,*) FRY,V,RHOA,W,H,HFG,CPA

```

```

      RETURN

```

```

      END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

CCC

```

```

SUBROUTINE

```

```

PSYCHROMETRICS1(DBTOA,RH,P,CPZ,RHOZ,W)

```

```

REAL MEW,P,RHOZ,CPZ,HFG

```

```

      DB=DBTOA+273.15

```

```

      C8=-5.8002206E+3

```

```

      C9=-5.516256

```

```

      C10=-4.8640239E-2

```

```

      C11=4.1764768E-5

```

```

      C12=-1.4452093E-8

```

```

      C13=6.5459673

```

```

      PWSDB=EXP(C8/DB+C9+C10*DB+C11*DB*DB

```

```

      * +C12*DB*DB*DB+C13*LOG(DB))

```

```

      PW=RH*PWSDB

```

```

      W=0.62198*PW/(P-PW)

```

```

      WS=0.62198*PWSDB/(P-PWSDB)

```

```

      MEW=W/WS

```

```

      V=(0.082*DBTOA+22.436)*(1/29.+W/18.)

```

```

      HA=1.006*DBTOA

```

```

      HG=2501+1.825*DBTOA

```

```

      H=HA+W*HG

```

```

      CPZ=(1.9327E-10)*(DB**4.)-(7.9999E-

```

```

7)*(DB**3.)+(1.140E-3)*(DB**2.)

```

```

      * -(4.489E-1)*DB+(1.0575E+3)

```

```

      RHOZ=1./V

```

```

      RETURN

```

```

      END

```

```

CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```

```

SUBROUTINE H_VAPORIZATION(DBTOA,HFG)

```

```

REAL HFG

```

```

HFG=2502.535259-2.38576424*DBTOA

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

C.....CORRECT SECTION.....

```

```

C*****

```

```

SUBROUTINE

```

```

SOLARE(NALL,TILT,SAZ,AREA,SWABSO,SWABSI,DATE,LS

```

```

M,LON,LLT,QS,R,REFLEX)

```

```

PARAMETER(MSURF=10,NHR1=24,NHR2=48)

```

```

REAL

```

```

DATE,LSM,LON,LLT,TILT(MSURF),SAZ(MSURF),AREA(MS

```

```

URF)

```

```

REAL SWABSO(MSURF),SWABSI(MSURF)

```

```

REAL INCANG(MSURF,NHR1),ED(MSURF,NHR1)

```

```

REAL EDFG(MSURF,NHR1),EDFG(MSURF,NHR1)

```

```

REAL TBS(MSURF,NHR1),TDS(MSURF,NHR1)

```

```

REAL ABBS(MSURF,NHR1),ABBD(MSURF,NHR1)

```

```

REAL R(MSURF,NHR2),QS(MSURF,NHR2),QR(MSURF,NHR2)
      DO 1 I=1,NALL
      DO 2 J=1,NHR1
      CALL
SOLAR( DATE,LSM,LON,LLT,TILT(I),SAZ(I),
      *
      INCANG(I,J),ED(I,J),EDFS(I,J),EDFG(I,J),J,REFLE
X)
      2 CONTINUE
      1 CONTINUE
C....QR IS NOT MULTI ALPHA
C....QS IS MULTI SWABSO
      DO 1014 J=1,NHR1
      DO 1015 I=1,NALL
      QR(I,J)=ED(I,J)+EDFS(I,J)+EDFG(I,J)
      QS(I,J)=(ED(I,J)+EDFS(I,J)+EDFG(I,J))*SWABSO(I
)
      IF(TILT(I).GE.180.)THEN
      QR(I,J)=0.
      QS(I,J)=0.
      ENDIF
1015 CONTINUE
1014 CONTINUE
      DO 1016 I=1,NALL
      DO 1017 J=1,NHR1
1017 CONTINUE
C WRITE(4,*)"
1016 CONTINUE
      RETURN
      END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
SUBROUTINE
SOLAR( DATE,LSM,LON,LLT,TILT,SAZ,INCANG,ED,EDFS,E
DFG,J,REFLEX)
PARAMETER (NHR1=24)
REAL
DATE,LSM,LON,LLT,TILT,SAZ,DECL,SALT,AST,HANG,INC
ANG,SAZI
REAL EDN,ED,EDFS,EDFG,CINC,REFLEX
      DEG=ATAN(1.)/45.
      CALL ESRI( DATE,A,B,C,ET,DECL)
C WRITE(4,110)A,B,C,ET,DECL
C 110 FORMAT('A=',F10.3,/, 'B=',F10.3,/, 'C=',F10.3,/, 'ET=',
C * F10.3,/, 'DECLINATION=',F10.3)
C WRITE(4,111)LSM,LON,LLT,TILT,SAZ
C 111 FORMAT('LSM=',F8.2,/, 'LON=',F8.2,/, 'LLT=',F8.2,/,
C * 'TILT=',F8.2,/, 'SAZ=',F8.2)
C WRITE(4,121)

```

```

C 121 FORMAT(/, 'TIME',3X, 'INCIDENT ANGLE',3X, 'SOLAR
TIME',3X,
C * 'EDN ED EDFS EDFG EDT')
C WRITE(4,*)'LST AST HANG SALT CINC
INCANG'
C DO 7 I=1,NHR1
LST=J
AST=LST+(ET/60.)+(LSM-LON)/15.
HANG=(AST-12.)*15.
SALT=(ASIN(COS(LLT*DEG)*COS(DECL*DEG))*
COS(HANG*DEG)
* +SIN(LLT*DEG)*SIN(DECL*DEG))/DEG
SAZZ=(SIN(SALT*DEG)*SIN(LLT*DEG)-
SIN(DECL*DEG))
* /(COS(SALT*DEG)*COS(LLT*DEG))
IF(SAZZ.LT.-1.)THEN
SAZZ=SAZZ+0.000001
ELSEIF(SAZZ.GT.1.)THEN
SAZZ=SAZZ-0.000001
ENDIF
IF(AST.LT.12)THEN
SAZI=-(ACOS(SAZZ))/DEG
ELSE
SAZI=(ACOS(SAZZ))/DEG
ENDIF
SSAZI=ABS(SAZI-SAZ)
CINC=COS(SALT*DEG)*COS(SSAZI*DEG)*SIN(T
ILT*DEG)
* +SIN(SALT*DEG)*COS(TILT*DEG)
INCANG=ACOS(CINC)/DEG
IF((SALT*DEG).LT.0.005)THEN
EDN=0.
ELSE
EDN=A/(EXP(B/SIN(SALT*DEG)))
ENDIF
ED=0
IF(CINC.GT.0.)THEN
ED=EDN*CINC
ENDIF
IF(CINC.GT.-0.2)THEN
Y=0.55+0.437*CINC+0.313*CINC**2
ELSE
Y=0.45
ENDIF
IF(TILT.EQ.90.)THEN
EDFS=C*Y*EDN
ELSE
EDFS=C*EDN*0.5*(1.+COS(TILT*DEG))
ENDIF

```

```

      EDFG=EDN*(C+SIN(SALT*DEG))*REFLEX*0.5*(1
.-COS(TILT*DEG))
      EDFT=EDFS+EDFG
      EDT=ED+EDFS+EDFG
      RETURN
      END
C*****
SUBROUTINE ESRI(DATE,A,B,C,DECL,ET)
REAL STDDATE(14),AA(14),BB(14),CC(14),DD(14),EE(14)
REAL DATE,A,B,C,DECL,ET
DATA(AA(NM),NM=1,14)/1230.,1215.,1186.,1136.,1104.,1088.,
  * 1085.,1107.,1151.,1192.,1221.,1233.,1230.,1215./
DATA(BB(NM),NM=1,14)/0.142,0.144,0.156,0.180,0.196,
  * 0.205,0.207,0.201,0.177,0.160,0.149,0.142,0.142,0.144/
DATA(CC(NM),NM=1,14)/0.058,0.060,0.071,0.097,0.121,
  * 0.134,0.136,0.122,0.092,0.073,0.063,0.057,0.058,0.060/
DATA(DD(NM),NM=1,14)/-20.,-10.8,0.0,11.6,20.,23.45,20.6,
  * 12.3,0.0,-10.5,-19.8,-23.45,-20.,-10.8/
DATA(EE(NM),NM=1,14)/-11.2,-13.9,-7.5,1.1,3.3,-1.4,-6.2,-2.4,
  * 7.5, 15.4,13.8,1.6,-11.2,-13.9/
DATA(STDDATE(NM),NM=1,14)/21.,52.,80.,111.,141.,172.,202.,23
3.      * 264.,294.,325.,355.,386.,417./
      DO 10 I=1,1
      CALL CUBE_IN(DATE,A,STDDATE(I),AA(I))

      CALL CUBE_IN(DATE,B,STDDATE(I),BB(I))
      CALL CUBE_IN(DATE,C,STDDATE(I),CC(I))
      CALL CUBE_IN(DATE,DECL,STDDATE(I),DD(I))
      CALL CUBE_IN(DATE,ET,STDDATE(I),EE(I))
10      CONTINUE
      RETURN
      END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
      SUBROUTINE CUBE_IN(XX,FF,X,FX)
      PARAMETER (NR=20)
      DIMENSION X(NR),FX(NR)
      DIMENSION A(NR),B(NR),C(NR),D(NR),E(NR)
      IF(XX.LT.21) THEN
      XX=XX+365.
      ENDIF
      DO 20 I=2,13
      A(I)=X(I)-X(I-1)
      B(I)=2.*(X(I+1)-X(I-1))
      C(I)=X(I+1)-X(I)
      D(I)=6.*(FX(I+1)-FX(I))/(X(I+1)-X(I))
      *      +6.*(FX(I-1)-FX(I))/(X(I)-X(I-1))
20      CONTINUE
      B(1)=1.
      C(1)=0.
      D(1)=0.
      A(14)=0.
      B(14)=1.
      D(14)=0.
      DO 30 I=2,14
      A(I)=A(I)/B(I-1)
      B(I)=B(I)-A(I)*C(I-1)
30      CONTINUE
      DO 35 I=2,14
      D(I)=D(I)-A(I)*D(I-1)
35      CONTINUE
      E(14)=D(14)/B(14)
      DO 40 I=13,1,-1
      E(I)=(D(I)-C(I)*E(I+1))/B(I)
40      CONTINUE
      DO 50 I=2,14
      IF((XX.GE.X(I-1)).AND.(XX.LE.X(I))) THEN
      D1=X(I)-XX
      D2=XX-X(I-1)
      DD=X(I)-X(I-1)
      T1=E(I-1)*D1*D1*D1/(6.*DD)
      T2=E(I)*D2*D2*D2/(6.*DD)
      T3=(FX(I-1)/DD-E(I-1)*DD/6.)*D1
      T4=(FX(I)/DD-E(I)*DD/6.)*D2
      FF=T1+T2+T3+T4
      ENDIF
50      CONTINUE
      IF(XX.GT.365) THEN
      XX=XX-365.
      ENDIF
      RETURN
      END
C*****
SUBROUTINE CTF(N,RI,CI,X,Y,Z,CR,F,IK)
PARAMETER (MSURF=10,MLAYER=10,NHR1=24,ORDER=6)
REAL
RI(MLAYER),CI(MLAYER),XNEW(NHR1),S(NHR1),SIXMA(O
RDER),F(ORDER)
REAL
X(MSURF,NHR1),Y(MSURF,NHR1),Z(MSURF,NHR1),CR(MSU
RF)
REAL
SUMMX(ORDER,NHR1),SUMMY(ORDER,NHR1),SUMMZ(OR
DER,NHR1),LAMDA(ORDER)
      SUMR=0.
      DO 1004 I=1,N
      SUMR=SUMR+RI(I)
1004      CONTINUE
      C.....FIND U OF WALL

```

```

      U=1./SUMR
      DEL=3600.
C.....FIND ROOT OF B(S)=0.....
      CALL FR(RI,CI,N,XNEW,NX)
C.....FIND LAMDA WHICH ORDER OF LAMDA LESS THAN 5
      IF(NX.EQ.0.)THEN
        DO 119 IK=1,5
          LAMDA(IK)=0.
119 CONTINUE
        ELSE
          DO 11 IK=1,NX
            IF(IK.GT.5) GOTO 111
            LAMDA(IK)=EXP(-DEL*XNEW(IK))
11 CONTINUE
111 CONTINUE
          ENDIF
C.....FIND PRODUCT OF U AND SUM(1-LAMDA)
          SIXMA(1)=U*(1-LAMDA(1))
          DO 122 IK=2,NX
            IF(IK.GT.5)GOTO 112
            SIXMA(IK)=SIXMA(IK-1)*(1-LAMDA(IK))
122 CONTINUE
112 CONTINUE
C.....FIND CTF ORDER ZERO
          CALL ABCD(0.,RI,CI,N,A,B,C,D)
          CALL
PIME(0.,RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
          X(1,1)=(D/B)+DPIME/(DEL*B)-
(I*BPIIME)/(DEL*B**2.)
          X(1,2)=-DPIME/(DEL*B)+(I*BPIIME)/(DEL*B**2.)
          Y(1,1)=(1/B)-(BPIME/(DEL*B**2.))
          Y(1,2)=BPIME/(DEL*B**2.)
          Z(1,1)=(A/B)+APIME/(DEL*B)-
(A*BPIIME)/(DEL*B**2.)
          Z(1,2)=-APIME/(DEL*B)+(A*BPIIME)/(DEL*B**2.)
          SUMX=0.
          DO 1 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMX=SUMX+EXP(-
DEL*XNEW(I))*D/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
1 CONTINUE
          X(1,1)=X(1,1)+SUMX
          SUMX=0.
          DO 2 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMX=SUMX+EXP(-2.*DEL*XNEW(I))*(1-
2.*EXP(DEL*XNEW(I)))*D
*
/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
2 CONTINUE
          X(1,2)=X(1,2)+SUMX
          SUMY=0.
          DO 3 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMY=SUMY+EXP(-
DEL*XNEW(I))/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
3 CONTINUE
          Y(1,1)=Y(1,1)+SUMY
          SUMY=0.
          DO 4 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMY=SUMY+EXP(-2.*DEL*XNEW(I))*(1-
2.*EXP(DEL*XNEW(I)))*
*
/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
4 CONTINUE
          Y(1,2)=Y(1,2)+SUMY
          SUMZ=0.
          DO 5 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMZ=SUMZ+A*EXP(-
DEL*XNEW(I))/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
5 CONTINUE
          Z(1,1)=Z(1,1)+SUMZ
          SUMZ=0.
          DO 6 I=1,NX
            CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
            CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
            SUMZ=SUMZ+A*EXP(-2.*DEL*XNEW(I))*(1-
2.*EXP(DEL*XNEW(I)))*
*
/(DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
6 CONTINUE
          Z(1,2)=Z(1,2)+SUMZ
          SUMX=0.
          SUMY=0.
          SUMZ=0.
          DO 7 M=3,NHR1
            DO 8 I=1,NX
              CALL ABCD(XNEW(I),RI,CI,N,A,B,C,D)
              CALL
PIME(XNEW(I),RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)

```

```

SUMX=SUMX+D*EXP(-DEL*XNEW(I)*M)*((1-
EXP(DEL*XNEW(I)))**2,)/
*      (DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
SUMY=SUMY+EXP(-DEL*XNEW(I)*M)*((1-
EXP(DEL*XNEW(I)))**2,)/
*      (DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
SUMZ=SUMZ+A*EXP(-DEL*XNEW(I)*M)*((1-
EXP(DEL*XNEW(I)))**2,)/
*      (DEL*XNEW(I)*XNEW(I)*BPIME)
8 CONTINUE
X(1,M)=SUMX
Y(1,M)=SUMY
Z(1,M)=SUMZ
SUMX=0.
SUMY=0.
SUMZ=0.
7 CONTINUE
WRITE(4,*)"
DO 3003 M=1,NHRI
c      WRITE(4,*) X(1,M),Y(1,M),Z(1,M)
3003    CONTINUE
C.....FIND CTF SINCE 1 TO 5

DO 12 I=2,6
X(I,1)=X(I-1,1)
Y(I,1)=Y(I-1,1)
Z(I,1)=Z(I-1,1)
DO 13 J=2,NHRI
X(I,J)=X(I-1,J)-LAMDA(I-1)*X(I-1,J-1)
Y(I,J)=Y(I-1,J)-LAMDA(I-1)*Y(I-1,J-1)
Z(I,J)=Z(I-1,J)-LAMDA(I-1)*Z(I-1,J-1)
13 CONTINUE
12 CONTINUE
DO 899 I=1,6
DO 898 J=1,NHRI
C      WRITE(4,*) I,J,X(I,J),Y(I,J),Z(I,J)
898    CONTINUE
899    CONTINUE
C.....CALCULATATE ORDER OF USE AND CTF SERIES
EPS=1.E-5
DO 15 J=2,NHRI
DO 16 I=2,6
SUMMX(I,1)=X(I,1)
SUMMY(I,1)=Y(I,1)
SUMMZ(I,1)=Z(I,1)
SUMMX(I,J)=SUMMX(I,J-1)+X(I,J)
SUMMY(I,J)=SUMMY(I,J-1)+Y(I,J)
SUMMZ(I,J)=SUMMZ(I,J-1)+Z(I,J)
DXX=ABS(SUMMX(I,J)-SIXMA(I-1))
DXY=ABS(SUMMY(I,J)-SIXMA(I-1))
DXZ=ABS(SUMMZ(I,J)-SIXMA(I-1))
IK=I-1
JK=J
IF((DXX.LE.EPS).AND.(DXY.LE.EPS).AND.(DXZ.LE.EPS))
*      GOTO 17
DXX=0.
DXY=0.
DXZ=0.
16 CONTINUE
15 CONTINUE
17 CONTINUE
C.....CALCULATATE ORDER & HEAT FLUX HISTORY
IF (IK.EQ.1) THEN
DO 201 M=1,JK
201    CONTINUE
F(1)=LAMDA(1)
ELSEIF (IK.EQ.2) THEN
DO 202 M=1,JK
202    CONTINUE
F(1)=LAMDA(1)+LAMDA(2)
F(2)=-LAMDA(1)*LAMDA(2)
ELSEIF (IK.EQ.3) THEN
DO 203 M=1,JK
203    CONTINUE
F(1)=LAMDA(1)+LAMDA(2)+LAMDA(3)
F(2)=-
(LAMDA(1)*LAMDA(2)+LAMDA(1)*LAMDA(3)+LAMDA(2)*L
AMDA(3))
F(3)=LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)
ELSEIF (IK.EQ.4) THEN
DO 204 M=1,JK
204    CONTINUE
F(1)=LAMDA(1)+LAMDA(2)+LAMDA(3)+LAMDA(4)
F(2)=-
(LAMDA(1)*LAMDA(2)+LAMDA(1)*LAMDA(3)+LAMDA(1)*L
AMDA(4)+
*LAMDA(2)*LAMDA(3)+LAMDA(2)*LAMDA(4)+LAMDA(3)*L
AMDA(4))
F(3)=LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)+LAMDA(1)*LAMDA(
2)*LAMDA(4)+
*LAMDA(1)*LAMDA(3)*LAMDA(4)+LAMDA(2)*LAMDA(3)*L
AMDA(4)
F(4)=-LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)*LAMDA(4)
ELSEIF (IK.EQ.5) THEN
DO 205 M=1,JK
205    CONTINUE

```

```

F(1)=LAMDA(1)+LAMDA(2)+LAMDA(3)+LAMDA(4)+LAMDA(
5)
F(2)=-
(LAMDA(1)*LAMDA(2)+LAMDA(1)*LAMDA(3)+LAMDA(1)*L
AMDA(4)+
*LAMDA(1)*LAMDA(5)+LAMDA(2)*LAMDA(3)+LAMDA(2)*L
AMDA(4)+
*LAMDA(2)*LAMDA(5)+LAMDA(3)*LAMDA(4)+LAMDA(3)*L
AMDA(5)+
* LAMDA(4)*LAMDA(5))
F(3)=LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)+LAMDA(1)*LAMDA(
2)*LAMDA(4)+
*LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(5)+LAMDA(2)*LAMDA(3)*L
AMDA(4)+
*LAMDA(2)*LAMDA(3)*LAMDA(5)+LAMDA(3)*LAMDA(4)*L
AMDA(5)
F(4)=-
LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)*LAMDA(4)*LAMDA(5)
F(5)=LAMDA(1)*LAMDA(2)*LAMDA(3)*LAMDA(
4)*LAMDA(5)
ENDIF
RETURN
END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
SUBROUTINE ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
PARAMETER(MLAYER=10)
REAL RI(MLAYER),CI(MLAYER)
REAL
AA(MLAYER),BB(MLAYER),CC(MLAYER),DD(MLAYER)
REAL
AAA(MLAYER),BBB(MLAYER),CCC(MLAYER),DDD(MLAYE
R)
REAL A,B,C,D
DO 1 I=1,N
Z=X*RI(I)*CI(I)
AA(I)=COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
IF(X.EQ.0.OR.CI(I).EQ.0.)THEN
BB(I)=RI(I)
ELSE
BB(I)=RI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/SQRT(X*RI(I)*CI(I))
ENDIF
CC(I)=-SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))*SQRT(X*RI(I)*CI(I))/RI(I)
DD(I)=COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
1 CONTINUE
DO 2 I=2,N
AAA(I)=AA(I-1)*AA(I)+BB(I-1)*CC(I)
BBB(I)=AA(I-1)*BB(I)+BB(I-1)*DD(I)
CCC(I)=CC(I-1)*AA(I)+DD(I-1)*CC(I)
DDD(I)=CC(I-1)*BB(I)+DD(I-1)*DD(I)
AA(I)=AAA(I)
BB(I)=BBB(I)
CC(I)=CCC(I)
DD(I)=DDD(I)
2 CONTINUE
A=AA(N)
B=BB(N)
C=CC(N)
D=DD(N)
C WRITE(4,*) A,B,C,D
RETURN
END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C
SUBROUTINE
PIME(X,RI,CI,N,APIME,BPIME,CPIME,DPIME)
PARAMETER(MLAYER=10)
REAL ADAT(MLAYER,MLAYER),BDAT(MLAYER,MLAYER)
REAL CDAT(MLAYER,MLAYER),DDAT(MLAYER,MLAYER)
REAL A(MLAYER,MLAYER),B(MLAYER,MLAYER)
REAL
C(MLAYER,MLAYER),D(MLAYER,MLAYER),RI(MLAYER),
CI(MLAYER)
REAL AA(MLAYER,MLAYER),BB(MLAYER,MLAYER)
REAL CC(MLAYER,MLAYER),DD(MLAYER,MLAYER)
DO 1 J=1,N
DO 2 I=1,N
IF(X.EQ.0.OR.CI(I).EQ.0.) THEN
ADAT(J,I)=RI(I)*CI(I)/2.
BDAT(J,I)=(RI(I)**2.)*CI(I)/6.
CDAT(J,I)=CI(I)
DDAT(J,I)=RI(I)*CI(I)/2.
ELSE
ADAT(J,I)=0.5*RI(I)*CI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/
* SQRT(X*RI(I)*CI(I))
BDAT(J,I)=-0.5*RI(I)*COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/X
*
+0.5*RI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/(X*SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
CDAT(J,I)=0.5*CI(I)*COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
*
+0.5*CI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/SQRT(X*RI(I)*CI(I))
DDAT(J,I)=0.5*RI(I)*CI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/
* SQRT(X*RI(I)*CI(I))
ENDIF
2 CONTINUE
1 CONTINUE
DO 3 J=1,N
DO 4 I=1,N
A(J,I)=COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
IF(X.EQ.0.OR.CI(I).EQ.0.)THEN

```

B(J,I)=RI(I)	CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
ELSE	Y=B
B(J,I)=RI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/SQRT(X*RI(I)*CI(I))	DO 1 I=1,24
ENDIF	IF(Y.GT.0.)THEN
C(J,I)=-SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))*SQRT(X*RI(I)*CI(I))/RI(I)	DO 2 J=1,10000000
D(J,I)=COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))	X=X+DX
4 CONTINUE	CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
3 CONTINUE	Y=B
APIME=0.	IF(Y.LT.0.) GOTO 3
BPIME=0.	IF(Y.GT.0.AND.J.EQ.10000000)THEN
CPIME=0.	WRITE(8,101)
DPIME=0.	101 FORMAT(/,'SOLUTION NOT FOUND YET')
DO 5 I=1,N	GOTO 1
A(I,I)=ADAT(I,I)	ENDIF
B(I,I)=BDAT(I,I)	2 CONTINUE
C(I,I)=CDAT(I,I)	3 CONTINUE
D(I,I)=DDAT(I,I)	XR(I)=X
5 CONTINUE	XL(I)=X-DX
DO 6 J=1,N	ELSE
DO 7 I=1,N-1	DO 4 K=1,10000000
AA(J,I+1)=A(J,I)*A(J,I+1)+B(J,I)*C(J,I+1)	X=X+DX
BB(J,I+1)=A(J,I)*B(J,I+1)+B(J,I)*D(J,I+1)	CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
CC(J,I+1)=C(J,I)*A(J,I+1)+D(J,I)*C(J,I+1)	Y=B
DD(J,I+1)=C(J,I)*B(J,I+1)+D(J,I)*D(J,I+1)	IF(Y.GT.0.) GOTO 5
A(J,I+1)=AA(J,I+1)	IF(Y.LT.0.AND.J.EQ.10000000)THEN
B(J,I+1)=BB(J,I+1)	GOTO 1
C(J,I+1)=CC(J,I+1)	ENDIF
D(J,I+1)=DD(J,I+1)	4 CONTINUE
7 CONTINUE	5 CONTINUE
APIME=APIME+A(J,N)	XR(I)=X
BPIME=BPIME+B(J,N)	XL(I)=X-DX
CPIME=CPIME+C(J,N)	ENDIF
DPIME=DPIME+D(J,N)	XXR=XR(I)
6 CONTINUE	XXL=XL(I)
C WRITE(4,*) APIME,BPIME,CPIME,DPIME	CALL FALSE_POSITION(XXR,XXL,XN,RI,CI,N)
RETURN	XNN=SQRT(XN)
END	IF(XNN.GE.0.11) GOTO 10
CC	XNEW(I)=XN
C FIND OF ROOT BY DIRECT INPUT VARIABLE	1 CONTINUE
AND	10 CONTINUE
C FIND THE POINTS THAT GRAPH IS CHAINGING	NX=I-1
C FROM POSITIVE AND NEGATIVE VALUE OF	RETURN
B(S)	END
CC	CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
SUBROUTINE FR(RI,CI,N,XNEW,NX)	C FALSE_POSITION METHOD
PARAMETER(NHR1=24,MLAYER=10)	CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
REAL	SUBROUTINE
XR(NHR1),XL(NHR1),XNEW(NHR1),S(NHR1)	FALSE_POSITION(XR,XL,XN,RI,CI,N)
X=1.E-8	PARAMETER(MLAYER=10)
DX=1.E-6	REAL RI(MLAYER),CI(MLAYER)

```

ES=0.0000000001
DO 100 ITER=1,500
CALL ABCD(XL,RI,CI,N,A,B,C,D)
YL=B
CALL ABCD(XR,RI,CI,N,A,B,C,D)
YR=B
XM=(XL*YR-XR*YL)/(YR-YL)
CALL ABCD(XM,RI,CI,N,A,B,C,D)
YM=B
AA=YM*YR
IF(AA.LT.0.)THEN
XL=XM
ELSE
XR=XM

ENDIF
TOL=ABS(XM-XMOLD)*100./XM
IF(TOL.LT.ES) GOTO 200
XMOLD=XM
100 CONTINUE
WRITE(4,110)
110 FORMAT(/,'ROOT CANNOT BE REACHED FOR',
* 'THE GIVEN CONDITIONS')
GOTO 300
200 CONTINUE
XN=XM
300 CONTINUE
RETURN
END

```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างอินพุตไฟล์

(จำนวนพื้นที่ผิวที่โดนแสงแดดส่องทั้งหมด, จำนวนพื้นที่ผิวที่เป็น Partition)

4. 1.

(LSM คือ Local Standard Meridian)

(LON คือ Longitude)

(LLT คือ Latitude)

(LSM, LON, LLT)

-105 -100.5 13.73

(วันและเดือนที่เริ่มต้นในการคำนวณ)

1. 1.

(วันและเดือนที่สิ้นสุดในการคำนวณ)

31. 12.

(Condition เกี่ยวกับความเร็วลม, Condition เกี่ยวกับอุณหภูมิภายในโซนที่พิจารณา, Condition เกี่ยวกับพื้นที่ผิวที่เป็น Partition)

(Condition เกี่ยวกับความเร็วลม เท่ากับ 1 คือ ใช้ความเร็วลมเฉลี่ย, เท่ากับ 2 คือ ใช้ความเร็วลมตามจริง)

(Condition เกี่ยวกับอุณหภูมิภายในโซนที่พิจารณา เท่ากับ 1 คือ ให้อุณหภูมิภายในคงที่, เท่ากับ 2 คือ ให้อุณหภูมิภายในเปลี่ยนแปลงหรืออากาศภายในมีค่าความจุความร้อน)

(Condition เกี่ยวกับพื้นที่ผิวที่เป็น Partition เท่ากับ 1 คือ ไม่มีพื้นผิวใดเลยเป็น Partition, เท่ากับ 2 คือ มีพื้นผิวนั่งพื้นผิวใดเป็น Partition)

2 2 2

(Condition เกี่ยวกับค่า Emissivity, Condition เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้เทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Emissivity)

(Condition เกี่ยวกับค่า Emissivity เท่ากับ 1 คือ ค่า Emissivity คงที่ทุกมุมเอียงหลังคา, เท่ากับ 2 คือ ค่า Emissivity เปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงหลังคา)

(Condition เกี่ยวกับวัสดุที่ใช้เทียบการเปลี่ยนแปลงค่า Emissivity เท่ากับ 1 คือ น้ำแข็ง, เท่ากับ 2 คือ ไม้, เท่ากับ 3 คือ แก้วหรือกระจก, เท่ากับ 4 คือ กระดาษ, เท่ากับ 5 คือ ดินเหนียว, เท่ากับ 6 คือ คอปเปอร์ออกไซด์, เท่ากับ 7 คือ อลูมิเนียมออกไซด์)

2 5

(Tilt คือ มุมเอียงของระนาบเทียบกับระนาบระดับ, องศา)

(Saz คือ Surface Azimuth)

(Area คือ พื้นที่ของระนาบ, m^2)

(Pe คือ เส้นรอบรูปของระนาบ, m)

(Rough คือ ค่าความขรุขระของระนาบ)

(SWABSI และ SWABSO คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของพื้นผิวด้านในและด้านนอก)

(LWEMI และ LWEMO คือ ค่าการเปล่งรังสีของพื้นผิวด้านในและด้านนอก)

(Tilt, Saz, Area, Pe, Rough, SWABSI, SWABSO, LWEMI, LWEMO)

10.	180.	6.4	12.1	1.52	0.65	0.65	0.95	0.95
10.	-90.	26.7	28.1	1.52	0.65	0.65	0.95	0.95
10.	0.	6.4	12.1	1.52	0.65	0.65	0.95	0.95
10.	90.	6.4	12.1	1.52	0.65	0.65	0.95	0.95
180	0.	65.0	36.0	1.52	0.65	0.65	0.95	0.95

(องค์การหมุนเวียนจากทิศเหนือหมุนไปทางทิศตะวันออก, องศา)

90.

(อุณหภูมิของอากาศภายในโซนตลอด 24 ชม. , °C)

25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25.

25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25. 25.

(การระบายอากาศตลอด 24 ชม. , ACH)

0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

(ความเร็วลมภายในโซน , m/s)

0.0762

(ความสูงของโซนเหนือระดับพื้น , m)

3.

(ปริมาตรภายในของโซน , m³)

12.5

(Terrain เกี่ยวกับสภาพแวดล้อม ณ ที่ตั้งของโซน เท่ากับ 1 คือ ที่โล่ง, เท่ากับ 2 คือ มีป่าทึบ, เท่ากับ 3 คือ มีตึกหรืออยู่ในเมือง)

3.

(ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน)

0.2

(ความดันบรรยากาศ, kPa)

101.325

(N คือ จำนวนชั้นต่อหนึ่งพื้นผิวผนัง)

(Thickness คือ ความหนาของชั้น, m)

(Conductivity คือ ค่าการนำความร้อน, W/m.K)

(Density คือ ค่าความหนาแน่น, kg/m³)

(Specific Heat คือ ค่าความจุความร้อน, J/kg.K)

(N)

(Thickness, Conductivity, Density, Specific Heat)

1

0.0150 1.731 2243 840

1

0.0150 1.731 2243 840

1

0.0150 1.731 2243 840

1

0.0150 1.731 2243 840

1

0.0090 0.160 801 1089

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิศกร นธิรงค์ เกิดที่ เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2524 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย