อิทธิพลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

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 นภีรงค์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราภิชาน ทวี เวชพฤติ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แตงเที่ยง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิศกร นภีรงค์ : อิทธิพลของมุมเอียงต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา.
(EFFECTS OF ROOF ANGLE ON HEAT TRANSFER THROUGH A BUILDING ROOF SYSTERM)
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา, 111 หน้า.

ในอดีตได้มีการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ไม่ว่าจะเป็นชนิดของวัสดุมุงหลังคา , มุมเอียงหลังคา, รูปทรงของหลังคา , อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคา , ทิศทางการวางตัวของอาคาร เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาถึงอิทธิพลต่างๆเหล่านี้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบหลังคา เพื่อการประหยัดพลังงาน แต่ยังไม่มีการศึกษาใดที่ระบุแน่ชัดว่าอิทธิพลของมุมเอียงหลังคามีผลอย่างไรต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เน้นในส่วนของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาเป็นฟังก์ชั่นของมุม โดยนำวิธีสมดุลความร้อน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการหาภาระความร้อน มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการหาปริมาณความร้อนรายชั่วโมงรวมตลอดทั้งปี สำหรับระบบหลังคา 2 รูปทรง คือ ระบบหลังคาทรงหน้าจั่วและระบบหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไปจากเดิม 90 องศา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา

ผลจากการศึกษา พบว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาจะลดลงประมาณ 3 ถึง 7% กล่าวคือ ที่มุมเอียงหลังคา 10 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 3% และที่มุมเอียงหลังคา 40 องศา ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะลดลง 7% นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกด้วยว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่ใช้ในการคำนวณ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุมนั้น 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 ศาสตราภิชาน ทวี เวชพฤติ คุณธีระ สุธัญญา และคุณกฤษณะ มานิตย์ นิสิตปริญญาโทรุ่นพี่ ที่ได้ให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ และแนะแนวทางตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัว ที่ได้สนับสนุนการศึกษาอย่างดียิ่ง รวมทั้งเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ... จ

กิตติกรรมประกาศ ... ฉ

สารบัญ ... ช

สารบัญตาราง ... ฌ

สารบัญภาพ ... ฎ

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 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน ... 6

2.3 กระบวนการนำความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น ... 17

2.4 การหาค่า Conduction Transfer Function ... 27

2.5 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน ... 32

2.6 สมดุลความร้อนที่พิจารณาอากาศภายในหลังคาหรือโซนเป็นปริมาตรควบคุม ... 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 และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา 69
4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม 72
4.6 เปรียบเทียบค่า U ของระบบหลังคา ในกรณีที่ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับกรณีที่ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาเป็นฟังก์ชั่นของมุม 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
รายละเอียดและตัวอย่างอินพุทไฟล์ 109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ **111**

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ทิศทางของระนาบและมุมแอซิมุธของระนาบ เมื่อเทียบกับทิศใต้ ……..……. 10

ตารางที่ 2.2 Time Zone Merridians ของประเทศอเมริกาและแคนนาดา 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 โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE ที่เข้าสู่โซนตัวอย่าง ทั้ง 4 โซน ………………………………………………………………………… 56

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่อัตราการระบายอากาศ ผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้ หลังคา ……………………………………………………………………..… 72

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่อัตราการระบายอากาศ ผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้ หลังคา …………………………………………………………………….…... 73

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ทิศทางการวางตัว ของอาคารทั้ง 2 ทิศทาง ………………………………………………………. 74

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสี ที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกัน ความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ……………………………………. 75

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา 76

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา 77

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา 78

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 ของพื้นผนังด้านนอกและด้านในสำหรับตัวกลางหลายชั้น …………………………………………………………………	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	การอาบรังสีของวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ………………………………………	39
รูปที่ 2.14	การอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง ($Q^i_\lambda(\lambda,\theta,\phi,T)$) ……………………	46
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยวิธีสมดุลความร้อน …………………………………………………………..	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	เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 1 ………………..	58
รูปที่ 3.7	เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 2 ………………..	58
รูปที่ 3.8	เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 3 ………………..	59
รูปที่ 3.9	เปรียบเทียบภาระทางความร้อนรายชั่วโมงระหว่างโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม 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 Meterial)ชนิดต่างๆ เปลี่ยนแปลงกับ θ 64

รูปที่ 4.7 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH 65

รูปที่ 4.8 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง 67

รูปที่ 4.9 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้ง ฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคารูปทรงหน้าจั่ว แบบมีช่องใต้หลังคา 69

รูปที่ 4.10 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้ง ฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคารูปทรงปั้นหยา แบบมีช่องใต้หลังคา 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 $(W/m^2.Sr)$
$E_{b\lambda}$	=	กำลังของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง $(W/m^2.\mu m.Sr)$
ET	=	สมการเวลา $(Minutes)$
F	=	Flux Conduction Transfer Function
F_{gr}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างของพื้นดิน
F_{MRT}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับพื้นผิวสมมุติ
F_a	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับอากาศ
F_{sky}	=	ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับท้องฟ้า
h_{ci}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน $(W/m^2.K)$
h_{co}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน $(W/m^2.K)$
h_f	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบบังคับ $(W/m^2.K)$
h_{fg}	=	เอนทาลปีในการควบแน่นของไอน้ำ ณ อุณหภูมิของอากาศภายในหลังคาหรือโซน (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}	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวด้านในด้วยกันเองของหลังคาหรือโซน $(W/m^2.K)$
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}	=	ความร้อนโดยการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (W)
$q_{IV\,s}$	=	ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและจากการระบายอากาศในส่วนของความร้อนสัมผัส (W)
$q_{IV\,l}$	=	ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและจากการระบายอากาศในส่วนของความร้อนแฝง (W)
q_{sys}	=	ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่หรือดึงออกจากระบบปรับอากาศ (W)
q''_{conv}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างอากาศกับพื้นผิว (W/m^2)
q''_{gr}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับพื้นดิน (W/m^2)
q''_{ki}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (W/m^2)
q''_{ko}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการนำความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (W/m^2)
q''_{oa}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)
q''_{sky}	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับท้องฟ้า (W/m^2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$q''_{\alpha sol}$	=	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 (^oC) หรือ (^oK)
T_{gr}	=	อุณหภูมิพื้นดิน (^oC) หรือ (^oK)
T_{oa}	=	อุณหภูมิอากาศภายนอก (^oC) หรือ (^oK)
T_{sky}	=	อุณหภูมิท้องฟ้า (^oC) หรือ (^oK)
T_{si}	=	อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (^oC) หรือ (^oK)
T_{so}	=	อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^oC) หรือ (^oK)
T_{MRTi}	=	อุณหภูมิพื้นผิวสมมุติ (^oC) หรือ (^oK)
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
ϑ	=	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)
$\sum$	=	มุมเอียงของระนาบเมื่อเทียบกับระนาบระดับ (องศา)
ρ	=	ความหนาแน่น (kg/m^3)
ρ_g	=	ค่าการสะท้อนของพื้นดิน
σ	=	ค่าคงตัวของ Stefan-Boltzmann
ω	=	อัตราส่วนความชื้นของอากาศ (kg_w/kg_a)

ตัวอักษรห้อย

i	=	พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน
j	=	คาบของเวลาในแต่ละขั้นเวลา δ
MRT	=	ถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่
o	=	พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน
t	=	เวลา ณ ปัจจุบัน
δ	=	ช่วงของเวลา

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

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

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เน้นในส่วนของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาเป็นฟังก์ชั่นของมุม โดยนำวิธีสมดุลความร้อน ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งในการหาภาระความร้อน มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่นำมาวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการหาปริมาณความร้อนรายชั่วโมงรวมตลอดทั้งปี สำหรับระบบหลังคา 2 รูปทรง คือ ระบบหลังคาทรงหน้าจั่วและระบบหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึงอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา โดยการประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์

1.2.2 เพื่อศึกษาความหมายและพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลเชิงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ในการคำนวณ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

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

1.3.2 ศึกษาพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม กล่าวคือ เมื่อมุมที่เกิดจากแนวรังสีตกกระทบเทียบกับเส้นตั้งฉากของระนาบมีเปลี่ยนแปลง ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมจะมีเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

1.3.3 ประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาด้วยภาษาฟอร์แทรน(FORTRAN) และเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับผลที่ได้จากโปรแกรมที่เป็นมาตรฐาน(ASHRAE)

1.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลของอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

1.3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบอิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม 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) โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คำนวณฟังก์ชั่นการนำความร้อน (Conduction Transfer Function, CTF) ในหนึ่งมิติผ่านผนังหลายชั้น (Multilayered Slab) ซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์กระบวนการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้น ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญของวิธีสมดุลความร้อน

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

Pedersen, C.O. (1997) แสดงรูปแบบของสมดุลความร้อนที่เหมาะสมต่อการคำนวณหาภาระการทำความเย็นของระบบ รวมทั้งข้อสมมุติฐานที่ใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย ซึ่งภายในงานวิจัยมีการอธิบายถึงภาพรวมของระเบียบวิธีสมดุลความร้อนและแสดงให้เห็นว่าสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้น ณ กรอบอาคารนั้นประกอบด้วยสมดุลความร้อนทั้ง 4 แห่ง ได้แก่ สมดุคลความร้อนที่ผนังด้านนอก สมดุลความร้อนที่ผนังด้านใน การนำความร้อนผ่านระบบผนังหลายชั้นและสมดุลความร้อนของอากาศภายในบริเวณควบคุม 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 จากนั้นจึงศึกษาเชิงวิเคราะห์ถึงความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเหล่านั้นและนำผลการคำนวณที่ได้จากแต่ละรูปแบบจำลองมาเปรียบเทียบกันอีกด้วย

Somboon Tirasit (2000) แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับสมดุลความร้อนมาคำนวณหาภาระทางความร้อนผ่านระบบหลังคา และวิเคราะห์ถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา รวมถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา

Akara Kitkranchareamsin (2001) ศึกษาถึงอิทธิพลของกันสาดและช่องเปิดที่มีผลต่อสภาวะสบายเชิงความร้อนของบ้านจำลองที่ไม่ได้ติดตั้งเครื่องปรับอากาศในกรุงเทพมหานคร โดยคำนวณและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยในรอบหนึ่งปีของค่า PMV และ SET* ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยนำวิธีสมดุลความร้อนและแบบจำลองการไหลของอากาศอย่างง่ายมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าอุณหภูมิของพื้นผิวผนัง อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง อุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และความเร็วลมเป็นรายชั่วโมง จากนั้นจึงนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาดัชนีความสุขสบายรวมถึงค่าเฉลี่ยรายปีของดัชนีดังกล่าว ผลการคำนวณที่ได้ถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสุขสบายเชิงความร้อนของผู้อาศัยในบ้านจำลอง

Teera Sutunya (2004) ศึกษาในส่วนของการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคาร โดยนำโรงเรือนเลี้ยงไก่พันธุ์เนื้อระบบปิด กว้าง 12 เมตรที่พบได้ทั่วไปในประเทศไทยเปรียบเทียบกับโรงเรือนเลี้ยงไก่พันธุ์เนื้อระบบปิด กว้าง 24 เมตร นอกจากนั้นจะตรวจสอบอิทธิพลของตัวแปรโรงเรือนต่างๆ ได้แก่ ความสูงหลังคา ทิศทางการวางตัวของโรงเรือน การติดกันสาดและการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบที่มีผลต่อความเร็วลม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณตัวแปรทางสภาวะแวดล้อมเชิงความร้อนโดยการใช้ระเบียบวิธีสมดุลความร้อน 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

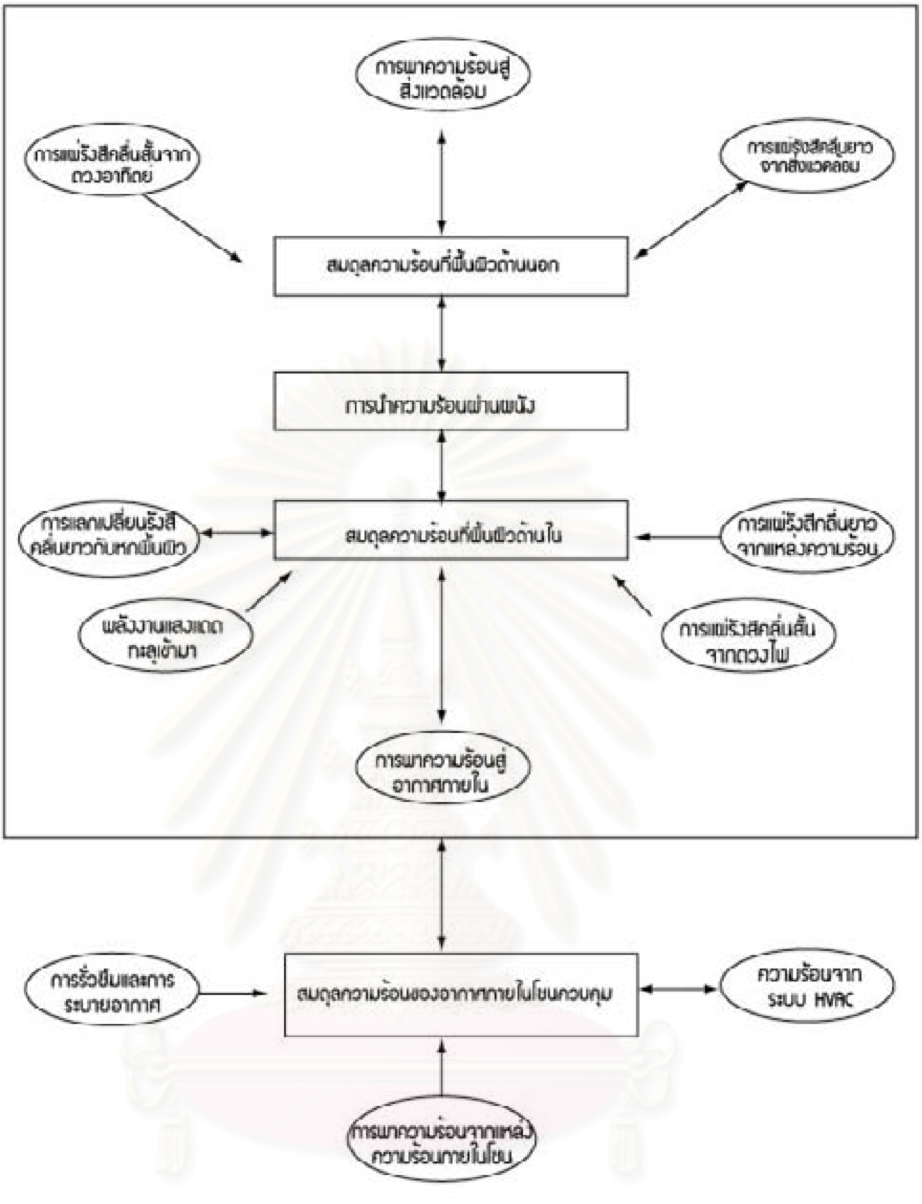
2,1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมดุลความร้อน (Heat Balance Method)

วิธีสมดุลความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าภาระความร้อนของห้องหรือโซน ซึ่งถูกดัดแปลงมาจากกฎข้อที่1ของอุณหพลศาสตร์ (กฎการอนุรักษ์พลังงาน) กระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในวิธีสมดุลความร้อนนี้ ประกอบด้วยกระบวนการถ่ายเทความร้อนหลายรูปแบบ มีทั้งการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีคลื่นสั้นและคลื่นยาวที่พื้นผิวของห้องหรือโซน การพาความร้อนที่พื้นผิวของห้องหรือโซน และการนำความร้อนผ่านชั้นผนังต่างๆของห้องหรือโซน

ในการคำนวณหาภาระความร้อนด้วยวิธีสมดุลความร้อนนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ โดยมีข้อสมมุติฐานที่จำเป็น 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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (Outside Heat Balance)

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

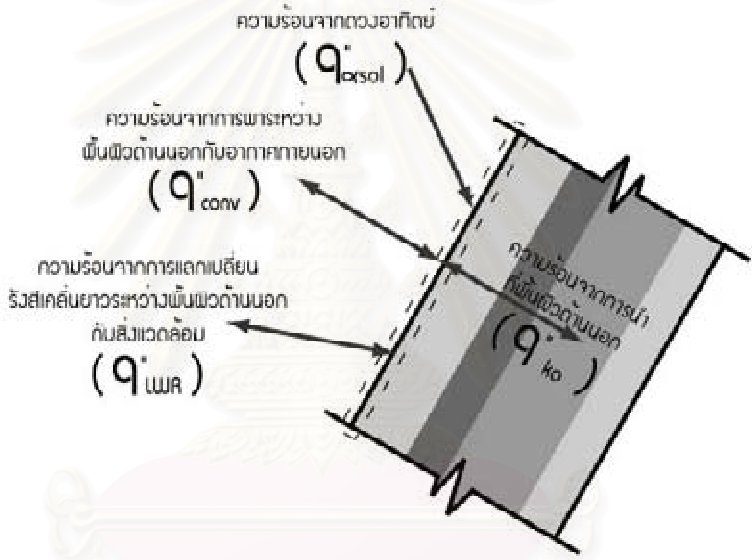
$$q''_{ko} = q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv} \tag{2.1}$$

โดย q''_{ko} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการนำที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (W/m^2)

$q''_{\alpha sol}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนดูดซับไว้ (W/m^2)

q''_{LWR} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับสิ่งแวดล้อม (W/m^2)

q''_{conv} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)



รูปที่ 2.2 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน

2.2.1 ฟลักซ์ความร้อนจากดวงอาทิตย์หรือฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนดูดซับไว้ ($q''_{\alpha sol}$) คำนวณได้ตามแบบจำลองใน ASHRAE Fundamental Handbook (ASHRAE 2001) ได้ดังสมการ

$$q''_{\alpha sol} = \alpha I_t \tag{2.2}$$

โดยแบ่งฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ออกเป็นการแผ่รังสีโดยตรงจากดวงอาทิตย์, การแผ่รังสีโดยการกระจายกับไอน้ำในอากาศ และการแผ่รังสีโดยการกระจายหลังจากสะท้อนกับพื้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$I_t = I_D + I_d + I_r \tag{2.3}$$

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) ในทิศทางต่างๆนั้น จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว คือ

$$I_D = I_{DN} \cos\theta \tag{2.4}$$

เมื่อ I_{DN} คือ ฟลักซ์ของรังสีที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิว (Direct Normal Irradiation,W/m^2)

$\cos\theta$ คือ ค่าโคซายน์ของมุมตกกระทบของรังสีที่ทำกับพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน

2.2.1.2 เวลาสุริยะ (Solar Time) คือ เวลาที่เปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่เชิงมุมของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ซึ่งอาจจะไม่ตรงกับเวลาท้องถิ่น(Local Time)ที่อ่านได้จากนาฬิกา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเวลาท้องถิ่นให้เป็นเวลาสุริยะก่อนที่จะนำไปคำนวณหาพลังงานจากแสงอาทิตย์ เวลาสุริยะจะต่างกับเวลาท้องถิ่นมากน้อยขึ้นกับตำแหน่งของสถานที่และวันที่จะคำนวณหาพลังงานจากแสงอาทิตย์ ความสัมพันธ์ของเวลาทั้งสองสามารถแสดงไว้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

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

หรือสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของมุมชั่วโมง(H)ได้คือ

$$H = 15(AST - 12) \tag{2.6}$$

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 เส้นแวงมาตรฐานที่ท้องถิ่นอ้างถึง (Local Standard Time Meridian, องศา)

LON คือ เส้นแวงที่สถานที่นั้นตั้งอยู่ (Local Longitude, องศา)

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบที่ทิศทางเฉพาะใดๆ เมื่อเทียบกับโลกที่เวลาใดๆกับพลังงานแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้รับ คือ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยมุมต่างๆ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งความหมายของมุมต่างๆมีดังนี้

L เส้นรุ้ง (Latitude) คือ ตำแหน่งเชิงมุมทางเหนือหรือใต้ของเส้นศูนย์สูตร โดยทางเหนือของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของเส้นศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ มีค่าระหว่าง $-90^{o} \le L \le 90^{o}$

ξ เดคลิเนชั่น (Declination) คือ มุมที่เกิดระหว่างแนวต่อศูนย์กลางโลกกับดวงอาทิตย์ทำกับระนาบศูนย์สูตร เมื่อเวลาเที่ยงสุริยะ(Solar Noon) โดยทางทิศเหนือของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นบวก ทางใต้ของระนาบศูนย์สูตรมีค่าเป็นลบ มีค่าระหว่าง $-23.45^{o} \le \delta \le 23.45^{o}$ ซึ่งหาได้จากตารางที่ 2.3

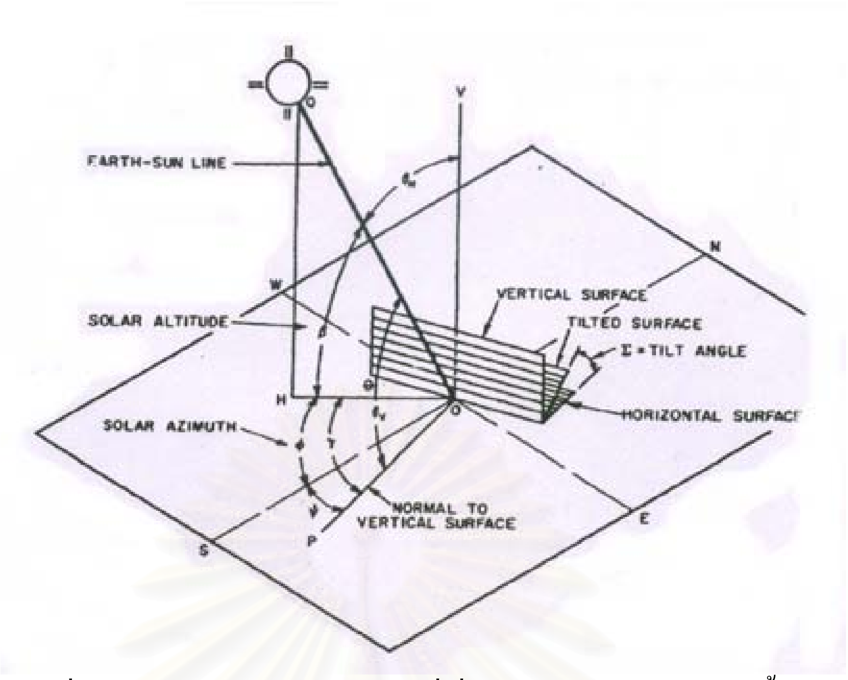
$\sum$ มุมเอียงของระนาบ (Tilt) เป็นมุมของระนาบที่ทำกับแนวระดับมีค่าระหว่าง $0^{o} \le \sum \le 180^{o}$ (เกิน 90 องศา แสดงว่าระนาบหันหน้าลง)

ψ มุมแอซิมุธของระนาบ (Surface azimuth angle) คือ มุมที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแนวฉายบนระนาบระดับของเส้นตั้งฉากกับผิวของระนาบจากแนวเมอริเดียน(Local Meridian) มุมนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้าแนวของรูปฉายชี้ไปทางทิศใต้ มีค่าเป็นบวกเมื่อแนวฉายชี้ไปทางทิศตะวันตก มีค่าเป็นลบเมื่อแนวฉายชี้ไปทางทิศตะวันออก มีค่าระหว่าง $-180^{o} \le \psi \le 180^{o}$ หาค่าได้จากตารางที่1

H มุมชั่วโมง (Hour Angle) คือ มุมที่เกิดจากแนวฉายของเส้นที่ลากจากศูนย์กลางโลกไปยังตำแหน่งใดๆบนผิวโลกทำกับแนวต่อระหว่างศูนย์กลางโลกและดวงอาทิตย์ที่เวลาเที่ยงของเวลาสุริยะ ที่เวลาสุริยะตอนเที่ยง มุมนี้จะเป็น 0^{o} และจะเพิ่มขึ้น 15^{o} ต่อชั่วโมง โดยก่อนเที่ยงจะมีค่าเป็นลบและหลังเที่ยงจะมีค่าเป็นบวก

β Solar Altitude คือ มุมระหว่างลำแสงแดดกับเส้นตั้งฉากของแนวระดับ

θ มุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ (Angle of Incidence) คือ มุมที่เกิดจากแนวของแสงอาทิตย์ทำกับแนวของเส้นตั้งฉากของระนาบ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของมุมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับดวงอาทิตย์และพื้นผิว

ตารางที่ 2.1 ทิศทางของระนาบและมุมแอซิมุธของระนาบ 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 Merridians ของประเทศอเมริกาและแคนนาดา

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

ที่มา : 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook

และความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆมีดังนี้

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

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

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

ดังนั้นค่าโคซายน์ของมุมตกกระทบของรังสีที่ทำกับกรอบของโซนนั้นๆ จะมีค่าเท่ากับ

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

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

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

เมื่อ ASI คือ Apparent Solar Irradiation ที่มวลอากาศมีค่าเท่ากับศูนย์ 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 ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับระนาบระดับ(Vertical Surfaces)

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

โดย C คือ Sky Diffuse Factor หาได้จากตารางที่ 2.3

Y คือ อัตราส่วนระหว่างการกระจายของท้องฟ้า

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ I_d ตกกระทบกับพื้นผิวที่ไม่ตั้งฉากกับระนาบระดับ(Surfaces Other than Vertical)

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

ตารางที่ 2.3 Extraterrestrial Solar Radiation Intensity and Related Data

	Equation of time, min	Declination, degree	ASI W/m^2	B (Dimensionless ratio)	C (Dimensionless ratio)
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 ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีที่เกิดการกระจายหลังจากสะท้อนกลับจากพื้นดิน (Ground-Reflected Irradiation, I_r)

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

โดย β คือ มุมระหว่างลำแสงแดดกับเส้นตั้งฉากของแนวระดับ(Solar Altitude)

ρ_g คือ ค่าสภาพการสะท้อนแสง(Ground reflectivity) โดยปกติมีค่าเท่ากับ 0.2

สำหรับพื้นผิวผสม(Mixture of Ground Surfaces) และสำหรับพื้นผิวอื่นๆหาได้จากตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ของพื้นผิวต่างๆ

	Inceident Angle θ					
Foreground Surface	20^{o}	30^{o}	40^{o}	50^{o}	60^{o}	70^{o}
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 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับสิ่งแวดล้อม (ท้องฟ้า พื้นดิน อากาศ) แบ่งได้เป็น 3 ส่วน(Walton, 1983) คือ

$$q''_{LWR} = q''_{oa} + q''_{sky} + q''_{gr} \tag{2.16}$$

และการที่จะหาค่าดังกล่าวจะสมมุติว่าพื้นผิวมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับสภาพแวดล้อมหรือท้องฟ้าหรือพื้นดิน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีจะอยู่ในรูปของสมการไม่เชิงเส้น แต่ในที่นี้จะแปลงสมการต่างๆให้อยู่ในรูปเชิงเส้น โดยจะใช้วิธี MRT ในการจำลองสมการ (McClellan, 1997)

2.2.2.1 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับท้องฟ้า

$$q''_{sky} = \sigma \varepsilon F_{sky}(T_{sky}^{4} - T_{so}^{4}) \tag{2.17}$$

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

$$q''_{sky} = h_{sky}(T_{sky} - T_{so}) \tag{2.18}$$

โดย q''_{sky} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวกับท้องฟ้า (W/m^2)

h_{sky} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของท้องฟ้า มีค่าประมาณ $4\sigma\varepsilon F_{sky}T_{avg}^3$ (W/m^2K)

σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} ($W/(m^2K^4)$)

ε คือ ค่าสภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน(Emissivity)

T_{sky} คือ อุณหภูมิท้องฟ้า(BLAST Model) มีค่าเท่ากับ $T_{oa}-6.0$ (^OK)

T_{so} คือ อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^OK)

T_{oa} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (^OK)

T_{avg} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิท้องฟ้ากับอุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^OK)

F_{sky} คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของท้องฟ้า มีค่าเท่ากับ $\left[\frac{(1+\cos\Sigma)}{2}\right]\cos\left(\frac{\Sigma}{2}\right)$

2.2.2.2 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับพื้นดิน

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

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

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

โดย q''_{gr} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับพื้นดิน (W/m^2)

h_{gr} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นดิน มีค่าประมาณ $4\sigma\varepsilon F_{gr}T_{avg}^3$ (W/m^2K)

T_{gr} คือ อุณหภูมิพื้นดิน(BLAST model) มีค่าเท่ากับ อุณหภูมิของอากาศภายนอก (^OK)

T_{avg} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิพื้นดินกับอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^OK)

F_{gr} คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของพื้นดิน มีค่าเท่ากับ $\left[\frac{(1-\cos\Sigma)}{2}\right]$

2.2.2.3 ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก

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

เมื่อใช้วิธี MRT จะได้สมการเป็น

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

โดย q''_{oa} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)

h_{oa} คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของอากาศภายนอกมีค่าประมาณ $4\sigma\varepsilon F_a T_{avg}^3$ (W/m^{2}K)

T_{avg} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกกับอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^{O}K)

F_a คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของอากาศ มีค่าเท่ากับ $1 - F_{sky} - F_g$

2.2.3 ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก

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

โดย q''_{conv} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซนกับอากาศภายนอก (W/m^2)

h_{co} คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมโดยการพาที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (W/m^{2}K)

T_{oa} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก (^{O}K)

T_{so} คือ อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^{O}K)

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

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

2.2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนโดยการพาแบบบังคับ(Force Convection Coefficient)

$$h_f = 2.537 W_f R_f \sqrt{\frac{PV_{az}}{A}} \tag{2.25}$$

โดย h_f คือ Force Convection Coefficient (W/m^2K)

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 (m^2)

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)

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

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

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

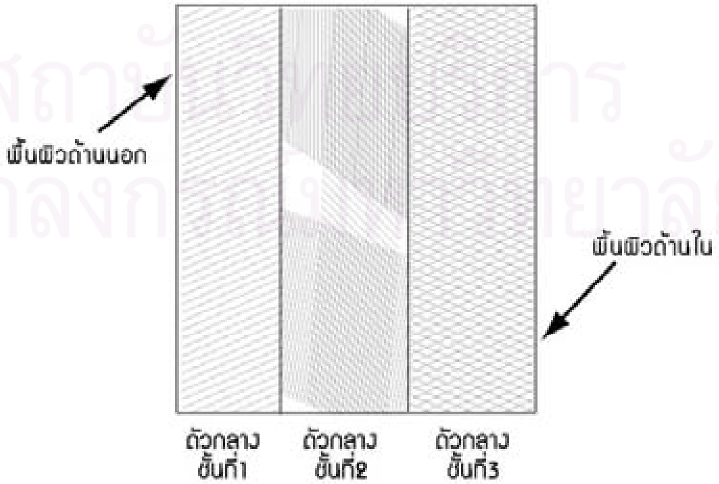
T_{oa} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอก (^{O}K)

T_{so} คือ อุณหภูมิของผิวด้านนอกของกรอบของโซน (^{O}K)

2.3 กระบวนการนำความร้อน 1 มิติ ในสภาวะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น

ซึ่งจะพิจารณาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการนำความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัวผ่านตัวกลางหลายชั้น

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



รูปที่ 2.4 ตัวกลางของการนำความร้อนหลายชั้น

สมมุติให้ k เป็นค่าคงที่จะได้

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

โดย $\vartheta=\frac{k}{\rho c_p}$

จากสมการ Fourier's Law

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

โดย T คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และเวลา t ใดๆ (^{O}K)

x คือ ตำแหน่ง (เมตร)

t คือ เวลา (วินาที)

ϑ 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) โดยการใช้ Laplace Transform

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

จาก Appendix F ของ Poulikakos (1994)

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

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

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

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

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

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

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

จัดรูปใหม่จะได้เป็น

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

จากรูปแบบของสมการที่ (2.37) จะเป็นสมการ Second Order Ordinary Differential Equation ผลเฉลยของสมการจะอยู่ในรูปของ

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

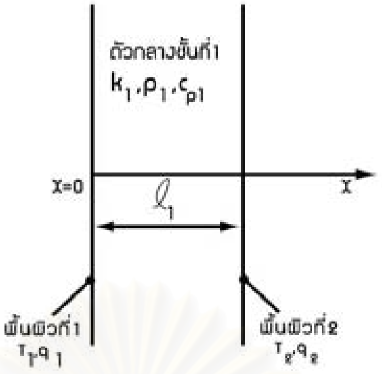
ทำการ Differentiate สมการ (2.38) เทียบกับ x จะได้เป็น

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

จากสมการ Fourier's Law สมการที่ (2.30) จะได้

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

เริ่มต้นโดยการพิจารณา Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Boundary Condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น

$T_1(0,s)$ และ $q_1(0,s)$ สำหรับ พื้นผิวที่ 1 (2.41)

$T_2(L,s)$ และ $q_2(L,s)$ สำหรับ พื้นผิวที่ 2 (2.42)

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

$$T_1(0,s) = A \tag{2.43}$$

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

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

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

จัดรูปสมการ (2.43) ถึง (2.46) ให้อยู่ในรูป

$$T_1(s) = A(s)\times T_2(s) + B(s)\times q_2(s) \tag{2.47}$$

$$q_1(s) = c(s)\times T_2(s) + D(s)\times q_2(s) \tag{2.48}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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

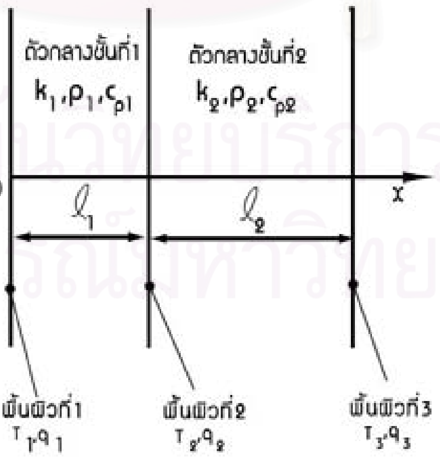
$$C(s) = k\sqrt{s/\alpha}\,\sinh\left(\frac{L}{\sqrt{s/\alpha}}\right) \tag{2.51}$$

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

และจัดสมการ (2.47) และ (2.48) ให้อยู่ในรูปของ Matrix ดังนี้

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เพราะฉะนั้นในทำนองเดียวกันสำหรับการนำความร้อนในหนึ่งมิติสำหรับวัสดุ 2 ชั้น ตามรูปที่ 2.6 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

สำหรับตัวกลางชั้นที่1

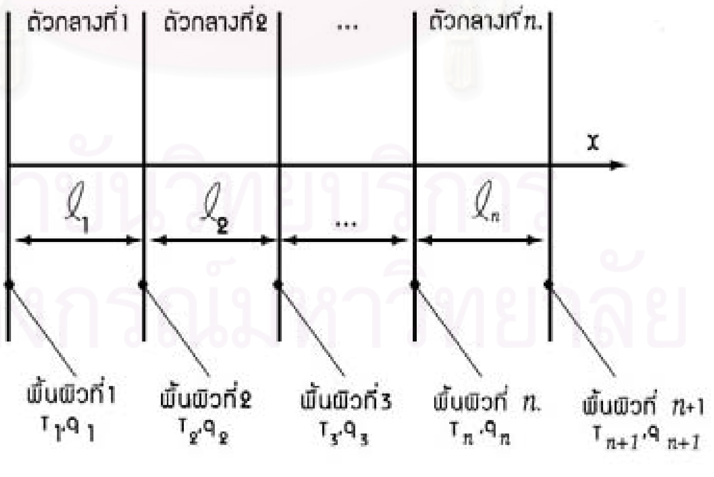
$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2(s) \\ q_2(s) \end{bmatrix} \tag{2.54}$$

สำหรับตัวกลางชั้นที่ 2

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

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

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



รูปที่ 2.7 Boundary Condition สำหรับตัวกลางหลายชั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และในทำนองเดียวกันนี้สามารถพัฒนาเป็นความสัมพันธ์ของการนำความร้อนในหนึ่งมิติสำหรับตัวกลางหลายชั้น 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

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

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

จัดรูปสมการ (2.62) ใหม่ได้เป็น

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

แทนสมการ (2.64) ลงในสมการ (2.63) จะได้

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

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

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

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

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

$$A(s)D(s) - B(s)C(s) = 1 \tag{2.69}$$

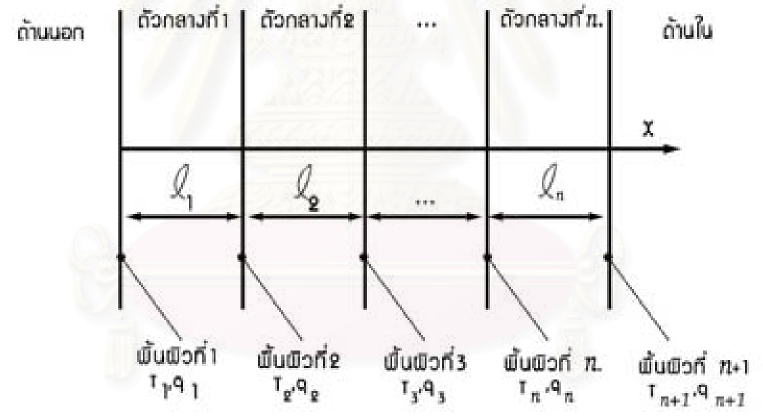
เมื่อแทนสมการ (2.69) ลงในสมการ (2.68) จะได้เป็น

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

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

หรือ

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



รูปที่ 2.8 กำหนด Boundary Condition ของพื้นผนังด้านนอกและด้านในสำหรับตัวกลางหลายชั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

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

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

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

สำหรับฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน

$$q''_{ki} = -X_o T_{i,t} + Y_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q''_{ki,t-j\delta} \tag{2.75}$$

สำหรับฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน

$$q''_{ko} = -Y_o T_{i,t} + Z_o T_{o,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} F_j q''_{ko,t-j\delta} \tag{2.76}$$

โดย q''_{ki} คือ ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (W/m^2K)

q''_{ko} คือ ฟลักซ์การนำความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (W/m^2K)

X_j คือ Internal Conduction Transfer Function โดย j = 0,1,2,…,nz

Y_j คือ Cross Conduction Transfer Function โดย j = 0,1,2,…,nz

Z_j คือ External Conduction Transfer Function โดย j = 0,1,2,…,nz

F_j คือ Flux Conduction Transfer Function โดย j = 0,1,2,…,nq

T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (^OK)

T_o คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกของหลังคาหรือโซน (^OK)

และ m เป็นจำนวนเทอมทั้งหมดที่เข้าสู่สมดุล

k แทนลำดับออเดอร์ของ Conduction Transfer Function

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

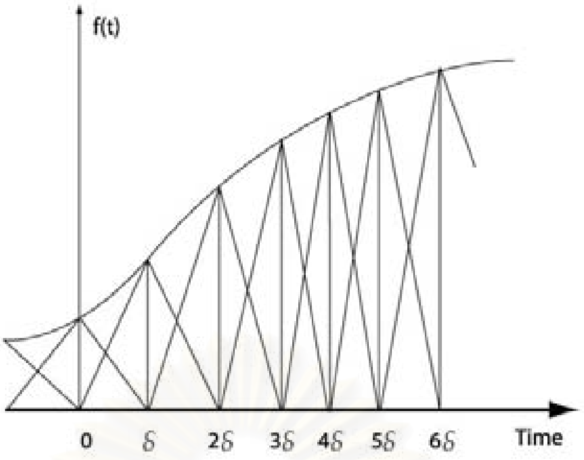
2.4 **การหาค่า** Conduction Transfer Function

ในทางทฤษฎี การคำนวณค่า Conduction Transfer Function สามารถหาได้โดยวิธี Inverse Laplace Transform ถ้าสามารถหารากของ $B(s)=0$ ได้อย่างแม่นตรงแล้ว คำตอบที่ได้จากวิธีนี้จะเป็นคำตอบที่แม่นตรงด้วย แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วสมการของ $B(s)$ จะซับซ้อนมากถ้าตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมีหลายชั้น พิจารณาได้จากสมการ (2.59)

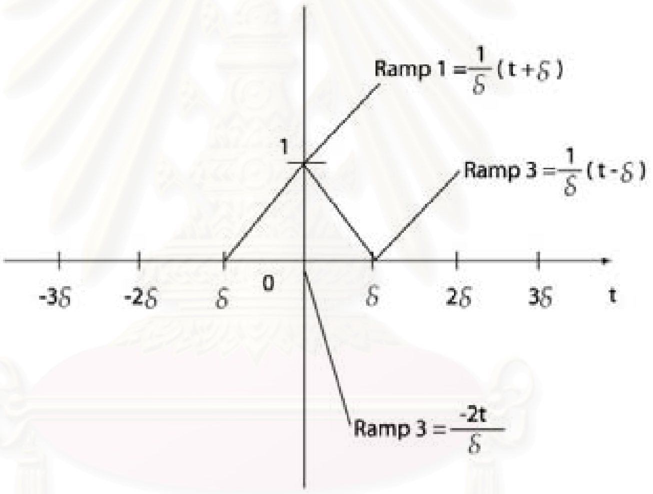
ดังนั้นการหาค่าราก (s) ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ $B(s)=0$ นั้น จะใช้วิธีที่เรียกว่า Direct Roots Finding (Hittle and Bishop, 1983)

2.4.1 Unit Triangular Pulse Excitation ซึ่งจะพิจารณาฟังก์ชั่นของอุณหภูมิภายนอกที่แปรผันตามเวลา, $f(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นต่อเนื่องนั้นให้มีลักษณะเป็น Triangular Pulse ที่มีความสูงเท่ากับอุณหภูมิที่เวลา t และมีฐานเท่ากับ 2 เท่าของช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้, (δ) ผลรวมของ Triangular Pulse ที่ซับซ้อนกันดังรูป 2.9 จะประมาณเท่ากับฟังก์ชั่นต่อเนื่อง, $f(t)$ ถึงแม้ว่าการจำลองฟังก์ชั่นของอุณหภูมิก็ตามแต่ ผลที่ได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงมาก (Gupta, C.L. et al., 1974)

ค่า Conduction Transfer Function คือ ชุดคำตอบตั้งแต่เวลา $\delta = 0,1,2,...,m$ 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 $\delta = 2,3,...,m$ 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.4.3 การหาค่า Conduction Transfer Function จากการแปลงลาปลาซย้อนกลับโดยใช้ทฤษฎี 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 $\dfrac{1}{s^2}$ ดังนั้นถ้าพิจารณาสัมประสิทธิ์ของ X - Conduction Transfer Function จะได้เป็น

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

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

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

สัมประสิทธิ์ X - Conduction Transfer Function จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$X_0 = \xi(\delta) \tag{2.84}$$

$$X_1 = \xi(2\delta) - 2\xi(s) \tag{2.85}$$

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

แทนสมการ (2.77) และ (2.83) ลงในสมการ (2.84) ถึงสมการ (2.86) จะได้ ชุดสัมประสิทธิ์ของ 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

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

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

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

ค่าชุดสัมประสิทธิ์ Y Conduction Transfer Function

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

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

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

ค่าชุดสัมประสิทธิ์ Z Conduction Transfer Function

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

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

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

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

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

$$C_i'(s) = \frac{d(C_i(s))}{ds} = \frac{C_i}{2} \cosh(\sqrt{sR_i C_i}) + \frac{1}{2} \frac{C_i}{\sqrt{sR_i C_i}} \sinh(\sqrt{sR_i C_i}) \tag{2.98}$$

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

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 Trasmission Matrix หาได้โดยกฎลูกโซ่ดังนี้

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

และสำหรับออเดอร์ k ใดๆมีรูปแบบดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

2.5 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (Inside Heat Balance)

พิจารณาที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน ณ พื้นผิวด้านในนี้จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการพาความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซนด้วยกันเอง ดังนั้นสมการของสมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของกรอบโซนนี้ คือ

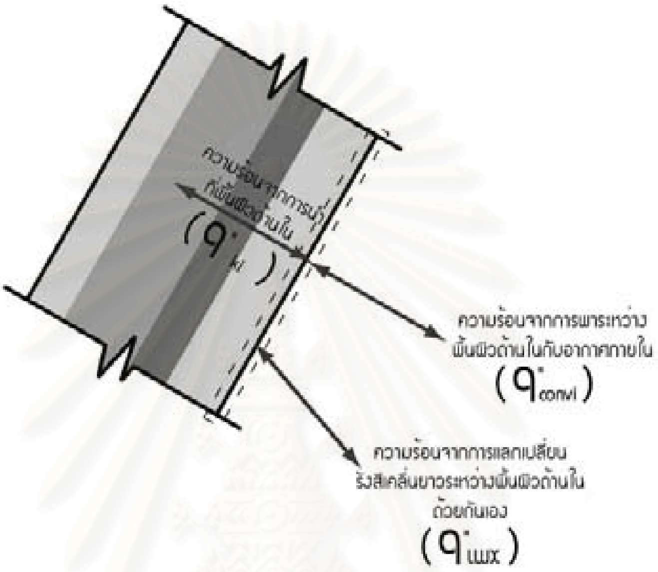
$$q^{''}_{LWX} + q^{''}_{ki} + q^{''}_{convi} = 0 \qquad (2.108)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

q''_{convi} คือ ฟลักซ์ความร้อนจากการพาระหว่างพื้นผิวด้านในหลังคาหรือโซนกับอากาศภายในหลังคาหรือโซน (W/m^2)



รูปที่ 2.11 สมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน

2.5.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน จะใช้แบบจำลอง MRT ในการคำนวณหา ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงเส้น โดยมีหลักการ คือ พิจารณาพื้นผิวของหลังคาหรือโซนเป็น 2 ส่วน คือ พื้นผิวหนึ่งเป็นส่วนที่เป็นปริมาตรควบคุม และอีกส่วนหนึ่งคือพื้นผิวที่เหลือทั้งหมดซึ่งคิดเสมือนพื้นผิวสมมุติอีกหนึ่งพื้นผิว การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกันนั้นจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนของพื้นผิวเพียง 2 พื้นผิวเท่านั้น(Walton,1980)

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

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

T_{MRTi} คือ อุณหภูมิพื้นผิวสมมุติ (^{O}K)

T_i คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (^{O}K)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งค่า h_{MRT} และ T_{MRTi} หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$A_{MRTi} = \sum_{j \neq i}^{n} A_j \tag{2.110}$$

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

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

$$T_{avgi} = \frac{(T_i + T_{MRTi})}{2} \tag{2.113}$$

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

$$h_{MRT} = 4\sigma F_{MRTi} T_{avgi}^3 \tag{2.115}$$

โดย σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} (W/(m^{2}K^4))

ε_{MRTi} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวสมมุติโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่

A_{MRTi} คือ พื้นที่ของพื้นผิวสมมุติโดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ (m^2)

F_{MRTi} คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวที่กำลังพิจารณากับพื้นผิวสมมุติ

เนื่องจากสูตรในการหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย(Mean Radiant Temperature) ข้างต้นเป็นเหตุให้เกิดความไม่สมดุลในค่าพลังงานของการแผ่รังสีความร้อนรวม เนื่องมาจากค่าตัวประกอบรูปร่างและอุณหภูมิของการแผ่รังสีเฉลี่ย (T_{MRTi}) ไม่ใช่ค่าแม่นตรง ดังนั้นความไม่สมดุลของค่าพลังงานดังกล่าวสามารถแก้ไขให้ถูกต้องได้โดยการคำนวณค่าความไม่สมดุลทั้งหมดและเฉลี่ยกันไปทุกพื้นผิว ค่าดังกล่าวหาได้จาก(Richard,1997)

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

ดังนั้นค่าฟลักซ์ของการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิวด้านในด้วยกันเองของหลังคาหรือโซนที่แก้ไขแล้ว คือ

$$q''_{LWX} = h_{MRT} (T_{MRTi} - T_i) - R_{bal} \tag{2.117}$$

2.5.2 ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน

$$q''_{convi} = h_{ci} (T_a - T_{si}) \tag{2.118}$$

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

T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในหลังคาหรือโซน (^{O}K)

T_{si} คือ อุณหภูมิพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (^{O}K)

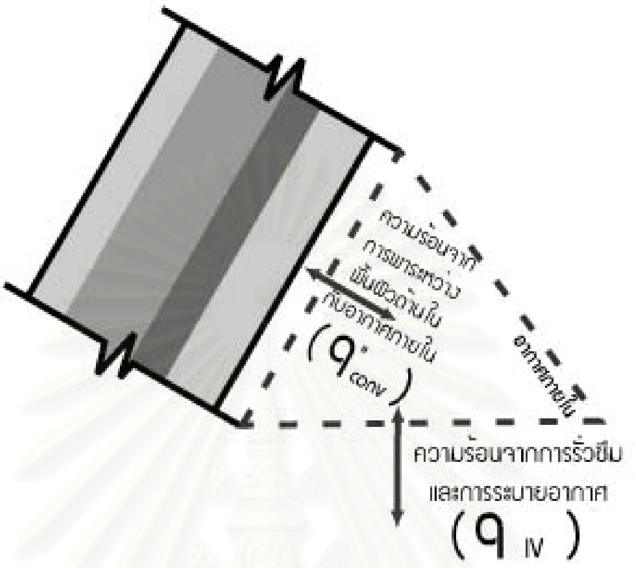
2.6 สมดุลความร้อนที่พิจารณาอากาศภายในหลังคาหรือโซนเป็นปริมาตรควบคุม (Inside Air Heat Balance)

ในวิธีสมดุลความร้อนนั้นมีจุดมุ่งหมายในการที่จะหาภาระทางความร้อน โดยจะไม่พิจารณาความจุความร้อนของอากาศ และการพิจารณาสมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโซนเป็นปริมาตรควบคุมนั้นจะกำหนดให้อยู่ในสภาวะเกือบคงที่ (Quasi-steady) ซึ่งในแต่ละช่วงเวลา สมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโซนจะเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายเทความร้อนดังนี้ คือ

$$q_{conv} + q_{IV} = 0 \tag{2.119}$$

โดย q_{conv} คือ ความร้อนจากการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน(W)

q_{IV} คือ ความร้อนจากการรั่วซึมและการระบายอากาศ (W)



รูปที่ 2.12 สมดุลความร้อนของอากาศภายในหลังคาหรือโซน

2.6.1 ความร้อนโดยการพาระหว่างอากาศภายในหลังคาหรือโซนกับพื้นผิวด้านในของหลังคาหรือโซน (q_{conv}) จะอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พื้นที่ของพื้นผิวและผลต่างระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอากาศภายใน ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

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

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

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

โดย $q^{"}_{IV_s}$ คือ ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและจากการระบายอากาศในส่วนของความร้อนสัมผัส (W)

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

c_p คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ (J/kg.K)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

t_i คือ อุณหภูมิอากาศภายในหลังคาหรือโซน (^oK)

t_o คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกที่รั่วเข้ามาในโซน (^oK)

$$q_{IV\,l} = Q\rho h_{fg}\left(\omega_o - \omega_i\right) \tag{2.122}$$

โดย $q_{IV\,l}$ คือ ความร้อนจากการรั่วซึมของอากาศและจากการระบายอากาศในส่วนของความร้อนแฝง (W)

h_{fg} คือ เอนทาลปีในการควบแน่นของไอน้ำ ณ อุณหภูมิภายในโซน (J/kg)

ω_i คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายในโซน (kg_w/kg_a)

ω_o คือ อัตราส่วนความชื้นของอากาศภายนอกที่รั่วเข้ามาในโซน (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) $\quad q''_{ko} = q''_{\alpha sol} + q''_{LWR} + q''_{conv}$

พิจารณาแยกในแต่ละเทอมตามสมการ (2.1) ได้ดังนี้

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

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

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

สมการ (2.1) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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

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

รวมสมการ (2.75) และ (2.124) เพื่อทำการแก้สมการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านในจะได้

$$T_{si_{i,j}} = \frac{\begin{bmatrix} Y_{o_j} T_{so_{i,j}} - \sum_{k=1}^{nz} X_{k_i} T_{si_{i-k\delta,j}} + \sum_{k=1}^{nz} Y_{k_i} T_{so_{i-k\delta,j}} + \sum_{k=1}^{nq} F_{k_j} q_{ki_{i-k\delta,j}} \\ + h_{MRT_{i,j}} T_{MRTi} - R_{bal} + h_{ci_{i,j}} T_{zone_i} + q''_{SW} + q''_{sol} + q''_{LWS} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} X_{o_j} + h_{MRT_{i,j}} + h_{ci_{i,j}} \end{bmatrix}} \qquad (2.125)$$

รวมสมการ (2.76) และ (2.123) เพื่อทำการแก้สมการหาค่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านนอกจะได้

$$T_{so_{i,j}} = \frac{\begin{bmatrix} Y_{o_j} T_{si_{i,j}} + \sum_{k=1}^{nz} Y_{k_i} T_{si_{i-k\delta,j}} - \sum_{k=1}^{nz} Z_{k_i} T_{so_{i-k\delta,j}} - \sum_{k=1}^{nq} F_{k_j} q_{ko_{i-k\delta,j}} \\ + \alpha_j I_{t_{i,j}} + h_{oa_{i,j}} T_{oa_i} + h_{sky_{i,j}} T_{sky_i} + h_{gr_{i,j}} T_{gr_i} + h_{co_{i,j}} T_{oa_i} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} Z_{o_j} + h_{oa_{i,j}} + h_{sky_{i,j}} + h_{gr_{i,j}} + h_{co_{i,j}} \end{bmatrix}} \qquad (2.126)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

พิจารณาแยกในแต่ละเทอมตามสมการ (2.119) ได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^{ns} A_j h_{ci_{i,j}} (T_{si_{i,j}} - T_{zone_i}) + q_{IV} = 0 \qquad (2.127)$$

โดย i คือ ชั่วโมงที่ทำการคำนวณ

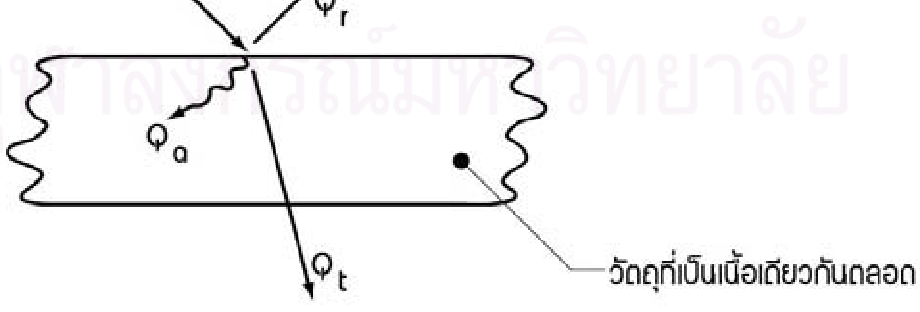
j คือ พื้นผิวที่ทำการคำนวณ

ns คือ จำนวนของผนัง

2.8 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

กลไกการถ่ายเทพลังงานโดยการแผ่รังสี สามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางกายภาพได้จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell ในการพิจารณาพฤติกรรมของกลไกการแผ่รังสีเพื่อใช้ทำนายคุณสมบัติการแผ่รังสีของวัตถุใดๆ โดยพิจารณาพฤติกรรมกลไกการแผ่รังสีเป็นพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขณะเดียวกันก็อาศัยทฤษฎีของ Plack ซึ่งจะพิจารณาพฤติกรรมกลไกการแผ่รังสีเป็นพฤติกรรมของโฟตอน เพื่อใช้ทำนายปริมาณของพลังงานที่ถูกปล่อยออกจากวัตถุที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง

การแผ่รังสีความร้อนนั้น ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน ซึ่งต่างกับการนำความร้อนหรือการพาความร้อน เมื่อวัตถุใดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นจะแผ่รังสีความร้อนออกมา



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 และการส่งผ่านพลังงานของวัตถุใดๆนั้น จะแตกต่างกัน กล่าวคือ

วัตถุดำ (Black Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานจากการอาบรังสีไว้ได้ทั้งหมดในทุกๆทิศทางและทุกๆความยาวคลื่นของการอาบรังสี โดยไม่มีการสะท้อนกลับและการส่งผ่านพลังงาน

วัตถุทึบแสง (Opaque Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนและการสะท้อนกลับพลังงานจากการอาบรังสีโดยไม่มีการส่งผ่านพลังงาน

วัตถุขาว (White Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถสะท้อนกลับพลังงานจากการอาบรังสีได้ทั้งหมด

วัตถุโปร่งใส (Transparant Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการส่งผ่านพลังงานจากการอาบรังสีได้ทั้งหมด

วัตถุกึ่งโปร่งใส (Semitransparant Body) คือ วัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนและส่งผ่านพลังงานจากการอาบรังสี

2.9 การแผ่รังสีของวัตถุดำ (Radiation of Black Body)

วัตถุดำถูกกำหนดให้เป็นวัตถุในอุดมคติของการแผ่รังสีความร้อน กล่าวคือ วัตถุดำสามารถดูดกลืนรังสีเอาไว้ได้ทั้งหมด (โดยไม่มีพลังงานสะท้อนกลับและส่งผ่าน) ขณะอาบรังสีสำหรับทุกความยาวคลื่นและทุกทิศทางการอาบรังสี นั่นแสดงว่าวัตถุดำเป็นตัวดูดกลืนรังสีสมบูรณ์และวัตถุดำยังเป็นตัวเปล่งรังสีสมบูรณ์อีกด้วย

2.9.1 ความเข้มของการแผ่รังสีของวัตถุดำ (Blackbody of Intensity)

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

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

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

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

$I_b(T)$ คือ ความเข้มของการแผ่รังสีทั้งหมดของวัตถุดำ (Hermisperical Total Radiation Intensity of Blackbody ; W/(m^2.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

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

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

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

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

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

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

2.9.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการแผ่รังสีกับกำลังของการแผ่รังสีของวัตถุดำ

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

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

$$E_b(T) = \pi I_b(T) \tag{2.132}$$

2.10 การแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริง (Radiation of Real Surface)

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

2.10.1 ค่าของสภาพการเปล่งรังสีของวัตถุ(Emissivity ; ε)

สภาพการเปล่งรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการปล่อยพลังงานการแผ่รังสีของพื้นผิวแท้จริงโดยเปรียบเทียบกับวัตถุดำ ความสามารถในการแผ่รังสีขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิว ,ความยาวคลื่นขณะแผ่รังสี และทิศทางหรือมุมของการแผ่รังสี ดังนั้นค่าของสภาพการเปล่งรังสีจึงสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.10.1.1 สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (Directional Spectral Emissivity) เป็นค่าของสภาพการเปล่งรังสีที่มีการแจกแจงตามความยาวคลื่น กล่าวคือ เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) และตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

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

2.10.1.2 สภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดระบุทิศทาง (Directional Total Emissivity) เป็นค่าสภาพการเปล่งรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่น กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

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

2.10.1.3 สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมคลุมครึ่งทรงกลม (Hermispherical Spectral Emissivity) เป็นค่าการสภาพเปล่งรังสีที่รวมค่าจากทุกทิศทุกทาง กล่าวคือ เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ, ϕ)

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

2.10.1.4 สภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดคลุมครึ่งทรงกลม (Hermispherical Total Emissivity) เป็นค่าสภาพการเปล่งรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่นและค่าจากทุกทิศทุกทาง กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรแสดงทิศทาง (θ, ϕ)

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

2.10.2 ค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีของวัตถุ(Absorptivity ; α)

สภาพการดูดกลืนรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของพื้นผิวแท้จริงขณะอาบรังสี (Incident Radiation) กล่าวคือ เป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานการดูดกลืนรังสีโดยพื้นผิวจริงกับพลังงานการอาบรังสีบนพื้นผิวจริง และเนื่องจากการอาบรังสีของพื้นผิวแท้จริง

ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดรังสี พฤติกรรมเชิงสเปกตรัมและระบุทิศทางของการแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดรังสี เป็นผลทำให้การพิจารณาสภาพดูดกลืนรังสีของพื้นผิวแท้จริง (พื้นผิวอาบรังสี) ยุ่งยากมาก

ในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถหาค่าสภาพเปล่งรังสีได้ง่ายกว่าสภาพดูดกลืนรังสี โดยใช้กฎของ Kirchhoff ในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเปล่งรังสีกับสภาพดูดกลืนรังสีของวัตถุใดๆ

2.10.2.1 สภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทาง (Directional Spectral Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่มีการแจกแจงตามความยาวคลื่น กล่าวคือ เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) และตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ,ϕ)

$$\alpha_{\lambda}(\lambda,\theta,\phi,T) = \varepsilon_{\lambda}(\lambda,\theta,\phi,T) \qquad (2.137)$$

สมการ (2.137) เรียกว่า " กฎของ Kirchhoff' กล่าวคือ สภาพการเปล่งรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทางที่อุณหภูมิ T ของพื้นผิวแท้จริงเท่ากับสภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทางโดยดูดกลืนรังสีจากแหล่งกำเนิดรังสีที่เป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิ T เดียวกัน

2.10.2.2 สภาพการดูดกลืนรังสีทั้งหมดระบุทิศทาง (Directional Total Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่น กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ,ϕ)

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

สมการ (2.138) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า" ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิ T ใดๆ"

2.10.2.3 สภาพการดูดกลืนรังสีเชิงสเปกตรัมคลุมครึ่งวงกลม (Hermispherical Spectral Absorptivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าจากทุกทิศทุกทาง กล่าวคือ เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรที่แสดงทิศทาง (θ,ϕ)

$$\alpha_{\lambda}(\lambda,T) = \varepsilon_{\lambda}(\lambda,T) \qquad (2.139)$$

สมการ (2.139) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า" ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง"

2.10.2.4 สภาพการดูดกลืนรังสีทั้งหมดคลุมครึ่งวงกลม (Hermispherical Total Emissivity) เป็นค่าของสภาพการดูดกลืนรังสีที่รวมค่าของทุกความยาวคลื่นและค่าจากทุกทิศทุกทาง กล่าวคือ ไม่เป็นฟังก์ชั่นของความยาวคลื่น (λ) แต่ยังคงเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรแสดงทิศทาง (θ,ϕ)

$$\alpha(T) = \varepsilon(T) \tag{2.140}$$

สมการ (2.140) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า" ความเข้มของการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมระบุทิศทางบนพื้นผิวแท้จริงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มของการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ T โดยไม่ขึ้นกับทิศทางการอาบรังสี"

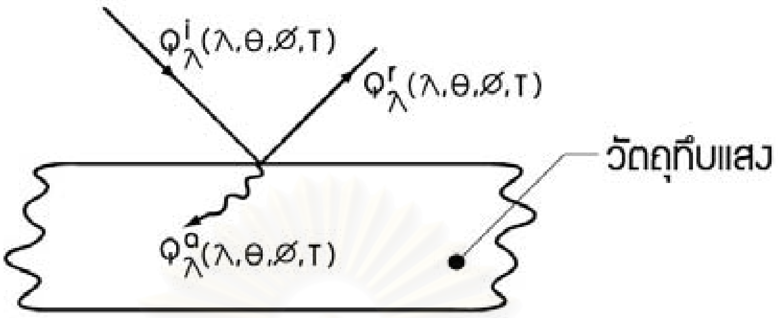
2.10.3 ค่าของสภาพการสะท้อนรังสีของวัตถุ(Reflectivity ; ρ)

สภาพของการสะท้อนรังสี คือ ตัวบ่งบอกความสามารถในการสะท้อนพลังงานของพื้นผิวแท้จริงขณะอาบรังสี (Incident Radiation) กล่าวคือ เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มการสะท้อนรังสีกับพลังงานในการอาบรังสี และการหาค่าของสภาพสะท้อนรังสีมีความซับซ้อนในการพิจารณามากกว่าค่าของสภาพการเปล่งรังสีหรือค่าของสภาพการดูดกลืนรังสี เนื่องจากพลังงานการสะท้อนรังสีไม่ได้ขึ้นอยู่กับการอาบรังสีในทิศทาง (θ,ϕ) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับทิศทางการสะท้อนรังสีในพิกัด (θ_r,ϕ_r) อีกด้วย

2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเปล่งรังสี สภาพการดูดกลืนรังสีและสภาพการสะท้อนรังสี

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายถึงคำจำกัดความของสภาพการเปล่งรังสี สภาพการดูดกลืนรังสีและสภาพสะท้อนรังสี พลังงานการอาบรังสีบนพื้นผิวจริงของวัตถุทึบแสง บางส่วนพื้นผิวจะดูดกลืนไว้และบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับ (โดยไม่มีพลังงานส่งผ่าน) และใช้กฎของ Kirchhoff อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการเปล่งรังสีกับสภาพการดูดกลืนรังสีโดยมีเงื่อนไขต่างๆตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

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

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

หรือ

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

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

$$\alpha_\lambda(\lambda,\theta,\phi,T) + \rho_\lambda(\lambda,\theta,\phi,T) = 1 \tag{2.143}$$

อาศัยกฎของ Kirchhoff แทนสมการ (2.137) ลงในสมการ (2.143) จะได้

$$\varepsilon_\lambda(\lambda,\theta,\phi,T) + \rho_\lambda(\lambda,\theta,\phi,T) = 1 \tag{2.144}$$

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

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

2.11.3 พิจารณาพลังงานการอาบรังสีเชิงสเปกตรัมครอบคลุมครึ่งวงกลมบนพื้นผิวแท้จริง ($Q^{i}_{\lambda}(\lambda, T)$) ที่อุณหภูมิ T โดยพิจารณาในทำนองเดียวกัน จะได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) + \rho_{\lambda}(\lambda, T) = 1 \qquad (2.146)$$

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

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

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 คำนวณหาค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

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

3.1.5 คำนวณหาความร้อนจากแสงแดดที่พื้นผิวด้านนอกของผนังแต่ละด้านที่ประกอบขึ้นเป็นหลังคาหรือโซนดูดซับไว้ตลอด 24 ชั่วโมง

3.1.6 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

3.1.7 คำนวณหาภาระความร้อนจากการรั่วซึมหรือการระบายอากาศ

3.1.8 ทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาตัวแปรอุณหภูมิของพื้นผิวผนังด้านในและพื้นผิวด้านนอกในแต่ละด้าน แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่กำหนดขึ้นในข้อ 3.1.2

3.1.9 ถ้าตัวแปรอุณหภูมิยังไม่ลู่เข้าสู่สมดุล ให้ทำซ้ำข้อ 3.1.6 เพื่อหาตัวแปรอุณหภูมิแล้วเปรียบเทียบกับตัวแปรที่ได้กับค่าตัวแปรก่อนหน้านั้น จนกระทั่งตัวแปรอุณหภูมิลู่เข้าสู่สมดุล

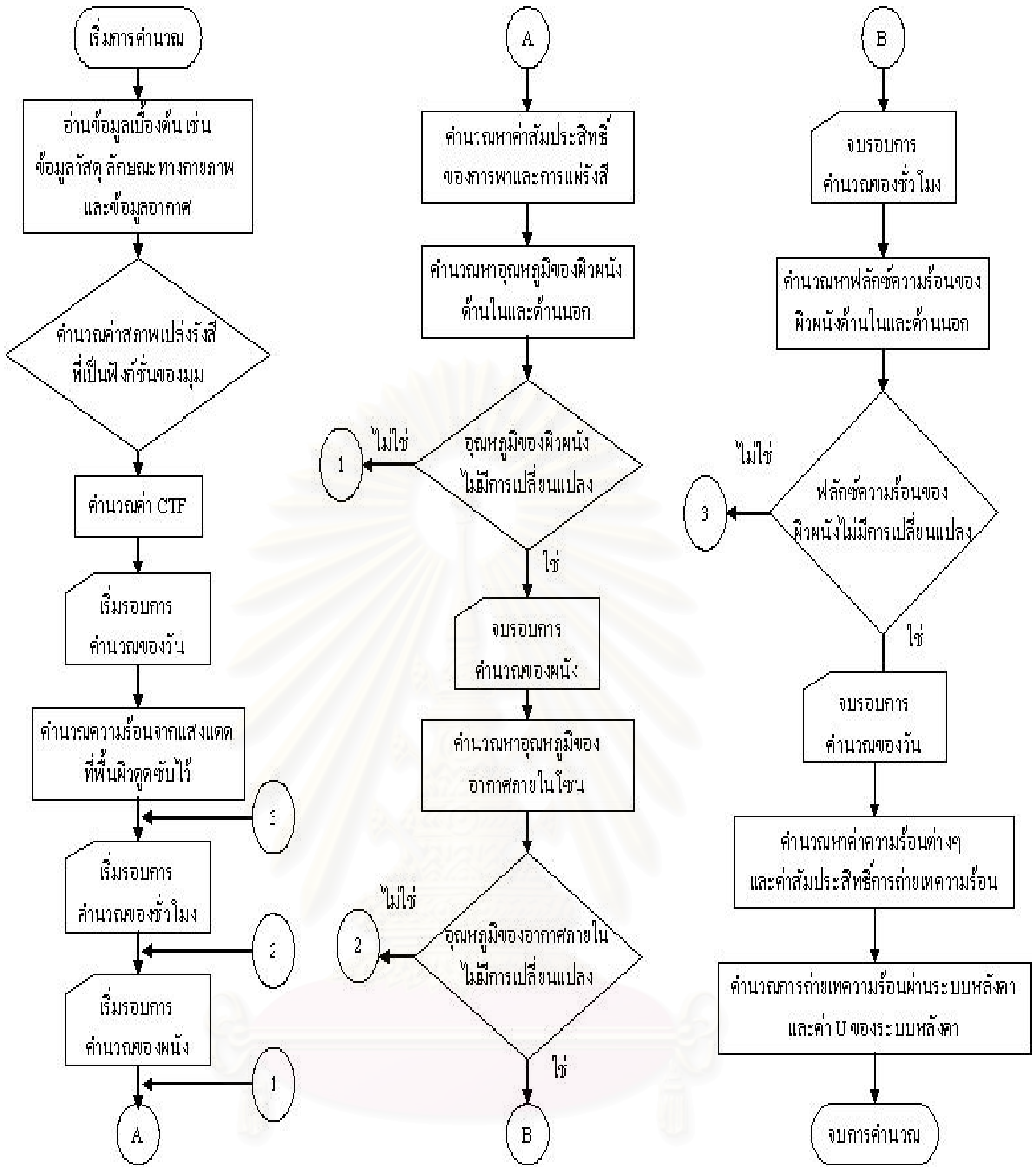
3.1.10 ถ้าให้อากาศภายในไม่มีความจุความร้อนจำเพาะ ไปข้อที่ 3.1.13

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



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นด้วยวิธีสมดุลความร้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการคำนวณโดยสังเขปของระเบียบวิธีสมดุลความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งขอบเขตในการคำนวณหาค่าภาระความร้อนในแต่ละชั่วโมง จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของพื้นผิวด้านใน อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอกและอุณหภูมิของอากาศภายในระบบหลังคาหรือโซนที่ทำการคำนวณซ้ำนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับขอบเขตในการลู่เข้าของการคำนวณนั้นจะอยู่ที่ผลต่างระหว่างฟลักซ์ความร้อนที่เข้าและออกตลอดทั้งวัน

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 ใช้คำนวณหาค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

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

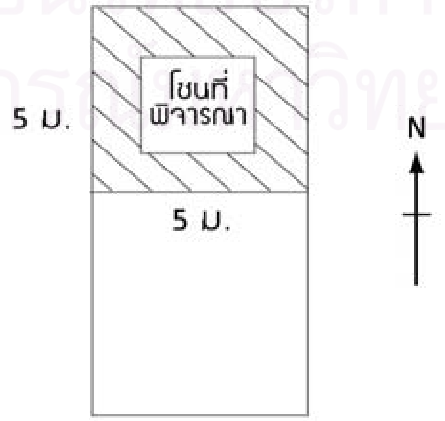
การตรวจสอบความถูกต้องของคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์นั้น โดยนำคอมพิวเตอร์โปรแกรมดังกล่าวไปแก้ปัญหาพื้นฐาน แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโปรแกรม ASHRAE Load Principles ในปัญหาเดียวกัน ปัญหาที่ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องคอมพิวเตอร์โปรแกรม ได้แก่ โซนตัวอย่าง 4 โซน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 โซนตัวอย่างที่ 1 เป็นโซนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาด้านละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โซนที่พิจารณาเป็นโซนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโซนที่ติดกับโซนที่พิจารณาเป็นโซนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โซน 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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3..3.2 โซนตัวอย่างที่ 2 เป็นโซนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาด้านละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โซนที่พิจารณาเป็นโซนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโซนที่ติดกับโซนที่พิจารณาเป็นโซนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โซน ในวันที่ 21 เมษายน และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 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

มีลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 2 ดังรูปที่ 3.3

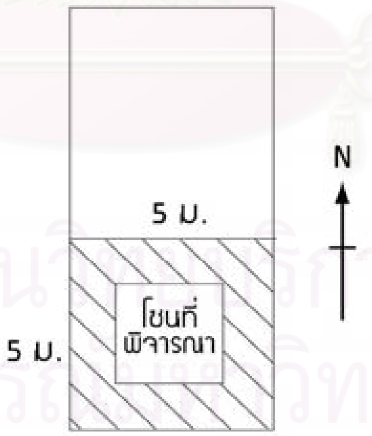
รูปที่ 3.3 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 2

3.3.3 โซนตัวอย่างที่ 3 เป็นโซนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาด้านละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โซนที่พิจารณาเป็นโซนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโซนที่ติดกับโซนที่พิจารณาเป็นโซนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โซน ในวันที่ 21 กรกฎาคม และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 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

มีลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 3 ดังรูปที่ 3.4



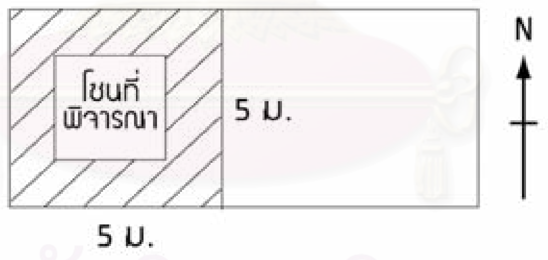
รูปที่ 3.4 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 3

3.3.4 โซนตัวอย่างที่ 4 เป็นโซนตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพฯ มีขนาด กว้าง X ยาว X สูง เท่ากับ 5ม. X 5ม. X 3ม. โดยผนังเป็นผนังก่ออิฐหนา 3 นิ้ว ฉาบปูนทั้ง 2 ด้านหนาด้านละ 0.5 นิ้ว สำหรับพื้นและเพดานเป็นพื้นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว โซนที่พิจารณาเป็นโซนปรับอากาศอุณหภูมิคงที่ 25°C และโซนที่ติดกับโซนที่พิจารณาเป็นโซนที่มีอุณหภูมิคงที่ 25°C เช่นกัน คำนวณหาภาระความร้อนรวมที่ถ่ายเทเข้าสู่โซน ในวันที่ 21 ตุลาคม และมีรายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดสำหรับพื้นผิวต่างๆของโซนตัวอย่างที่ 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

มีลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 4 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Floor Plan แสดงลักษณะของโซนตัวอย่างที่ 4

3.4 ผลการคำนวณภาระความร้อนของแต่ละโซนตัวอย่าง

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการคำนวณค่าภาระความร้อนเป็นรายชั่วโมงตลอดทั้งวันของโซนตัวอย่างทั้ง 4 โซน 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			
ชั่วโมงที่	ASHRAE	โปรแกรมที่ประดิษฐ์	%Error	ชั่วโมงที่	ASHRAE	โปรแกรมที่ประดิษฐ์	%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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าภาระความร้อนจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE ที่เข้าสู่โซนตัวอย่างทั้ง 4 โซน (ต่อ)

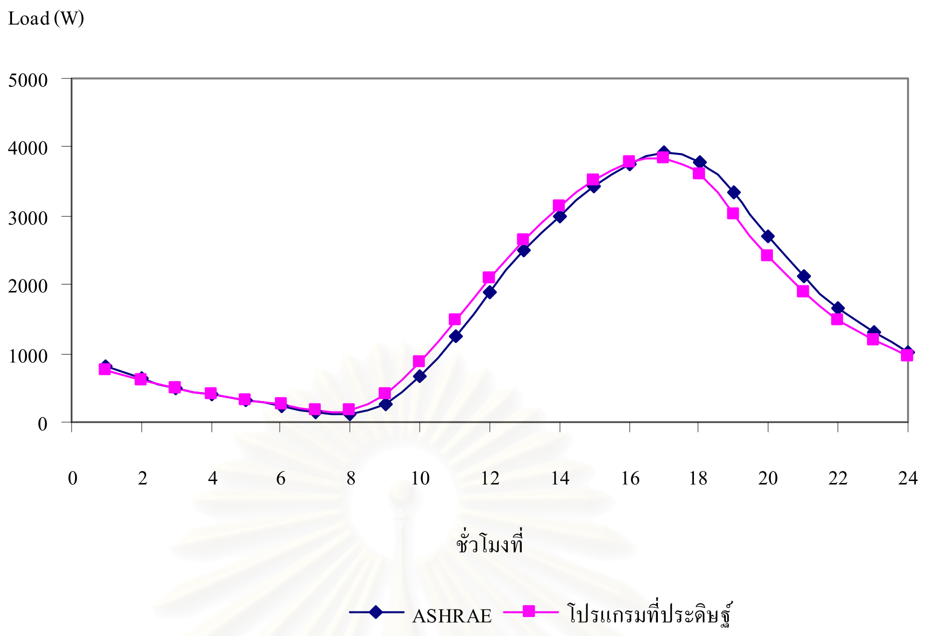
โซนตัวอย่างที่3

ชั่วโมงที่	ASHRAE	โปรแกรมที่ประดิษฐ์	%Error
1	1220	1183	3.0
2	1008	993	1.5
3	840	840	0.0
4	704	716	-1.7
5	591	612	-3.5
6	499	526	-5.5
7	441	510	-15.7
8	506	687	-35.8
9	786	1067	-35.7
10	1272	1604	-26.1
11	1868	2196	-17.6
12	2461	2739	-11.3
13	2978	3186	-7.0
14	3388	3547	-4.7
15	3728	3836	-2.9
16	3951	3996	-1.1
17	4018	3983	0.9
18	3914	3777	3.5
19	3583	3366	6.1
20	3056	2845	6.9
21	2549	2376	6.8
22	2120	1989	6.2
23	1761	1668	5.3
24	1468	1406	4.2
Total	48711	49648	-1.9

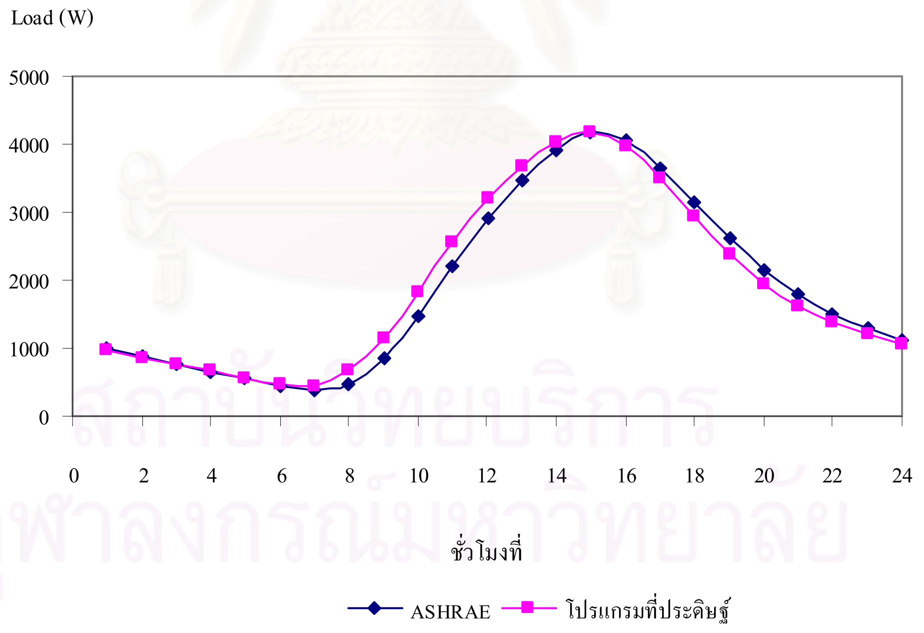
โซนตัวอย่างที่4

ชั่วโมงที่	ASHRAE	โปรแกรมที่ประดิษฐ์	%Error
1	452	423	6.4
2	299	289	3.4
3	189	193	-2.1
4	104	119	-13.7
5	41	61	-46.3
6	-16	7	140.8
7	-56	-4	92.0
8	-31	53	273.2
9	71	234	-229.1
10	333	578	-73.5
11	811	1103	-36.0
12	1412	1703	-20.6
13	2016	2270	-12.6
14	2594	2800	-8.0
15	3085	3224	-4.5
16	3429	3476	-1.4
17	3521	3448	2.1
18	3294	3102	5.8
19	2756	2511	8.9
20	2143	1927	10.1
21	1638	1469	10.3
22	1227	1103	10.1
23	896	811	9.5
24	649	595	8.3
Total	30859	31493	-2.1

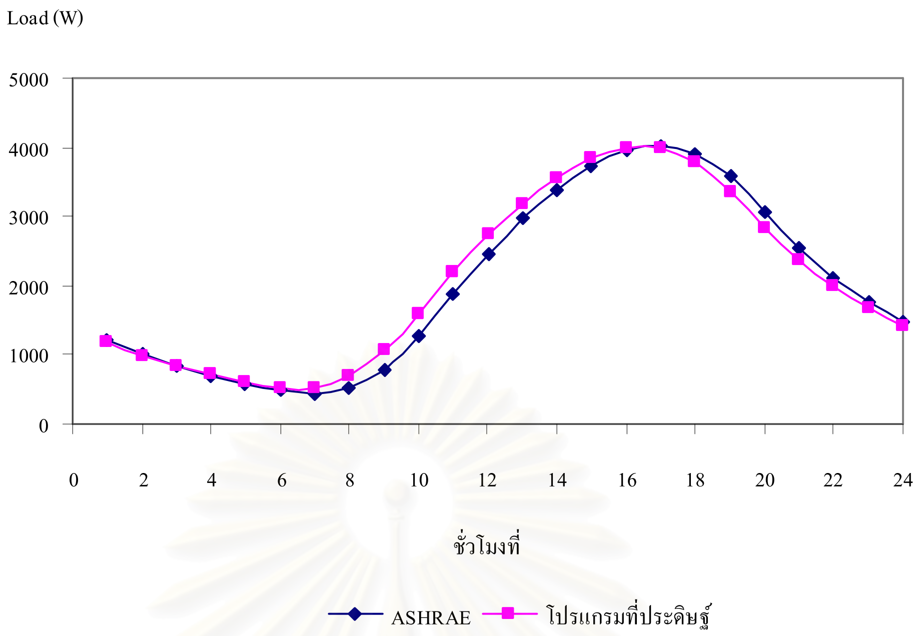
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



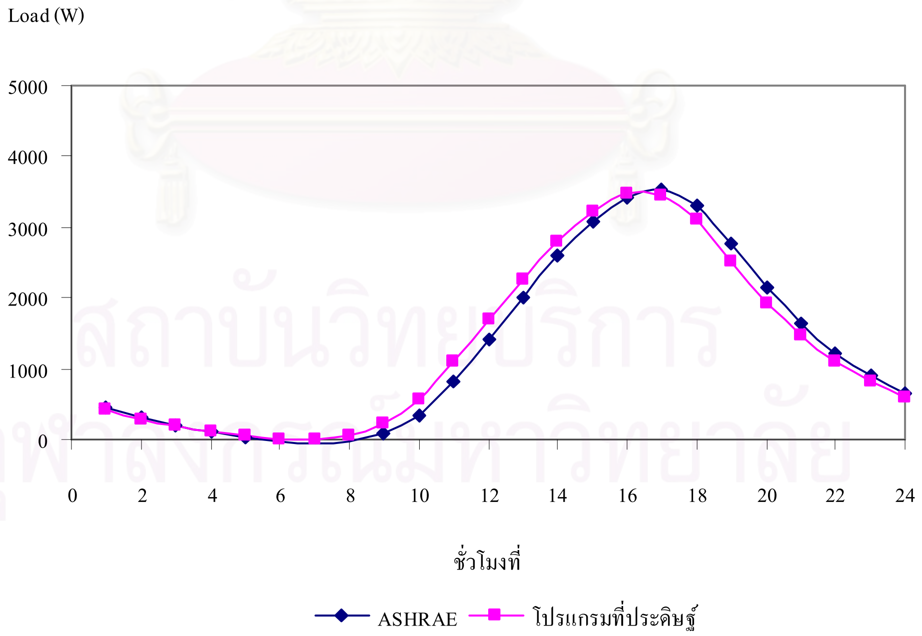
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบค่าภาระความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบภาระค่าความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบภาระค่าความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบภาระค่าความร้อนรายชั่วโมงที่คำนวณจากคอมพิวเตอร์โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นกับโปรแกรม ASHRAE Load Principles สำหรับโซนตัวอย่างที่ 4

บทที่ 4
ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ

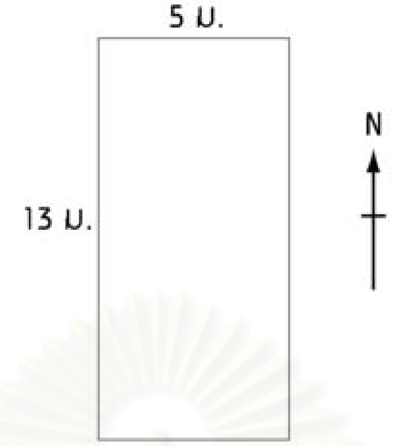
ในการวิจัยฉบับนี้ได้นำวิธีสมดุลความร้อน(Heat Balance Method) ซึ่งเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการหาภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องหรือโซน โดยจะนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับโซนที่มีรูปแบบเป็นระบบหลังคา เพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับกลไกของการถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนต่างๆผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร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

1. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH
2. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารเปลี่ยนไปจากทิศทางเดิม 90 องศา
3. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา
4. ศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคาร เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคาที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม 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

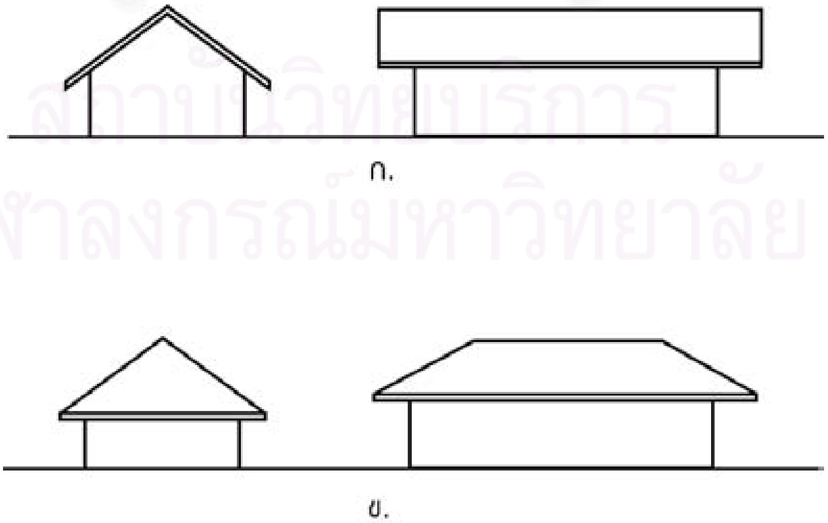


รูปที่ 4.1 Floor Plan แสดงลักษณะการวางตัวของอาคารที่พิจารณา

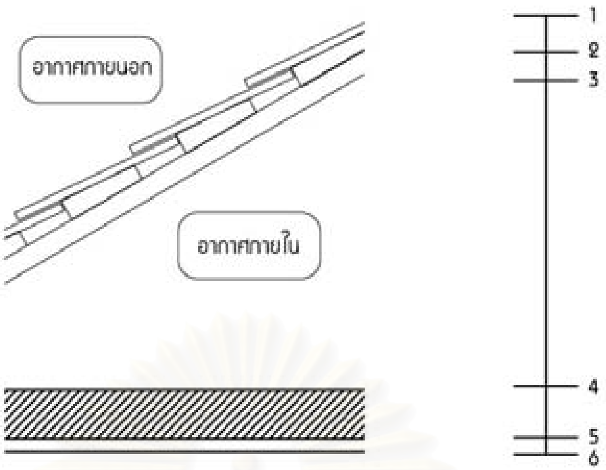
4.1.2 ระบบหลังคา

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. เป็นโซนที่เป็นช่องใต้หลังคาและติดกับห้องที่ปรับอุณหภูมิ 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. เป็นโซนที่เป็นช่องใต้หลังคาและติดกับห้องที่ปรับอุณหภูมิ 25°C คงที่



รูปที่ 4.2 รูปทรงของหลังคา ก.หลังคาทรงหน้าจั่ว ข.หลังคาทรงปั้นหยา



รูปที่ 4.3 หลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

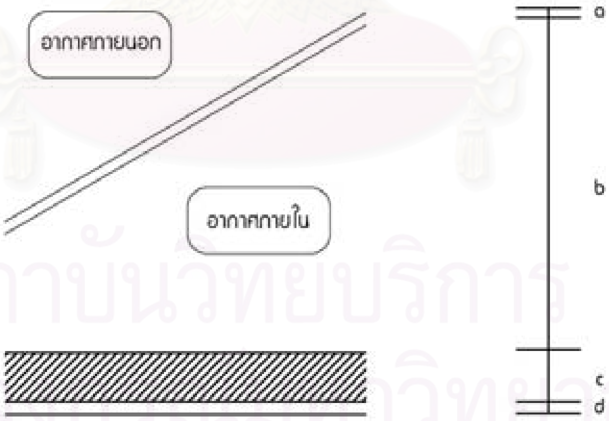
1-2 : กระเบื้องมุงหลังคาบนระแนง

2-3 : จันทัน

3-4 : ช่องว่างใต้หลังคา

4-5 : ฉนวนกันความร้อน

5-6 : ฝ้าเพดาน



รูปที่ 4.4 ลำดับชั้นวัสดุสำหรับหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

a : ชั้นวัสดุมุงหลังคา ได้แก่ กระเบื้องคอนกรีต ซีเมนต์ใยหิน และเซรามิค

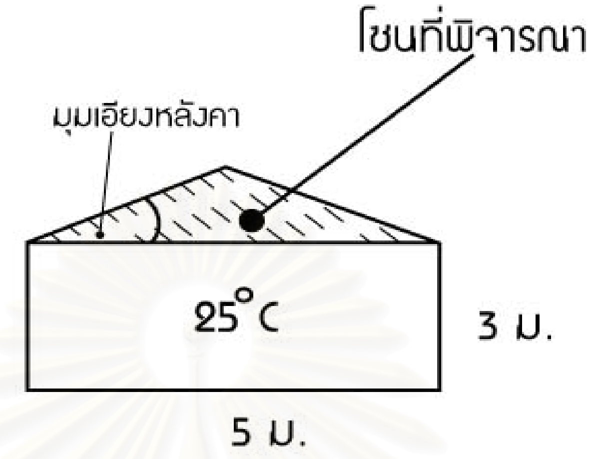
b : ชั้นของอากาศหรือช่องใต้หลังคา

c : ชั้นของฉนวนกันความร้อน ได้แก่ ฉนวนใยแก้ว

d : ฝ้าเพดาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.3 ปริมาตรควบคุมของระบบหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา มีลักษณะตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ปริมาตรควบคุมของโซนหลังคาที่พิจารณาของระบบหลังคาแบบมีช่องใต้หลังคา

4.1.4 วัสดุมุงหลังคา

ใช้กระเบื้องคอนกรีต ทำมาจากปูนซีเมนต์ เช่น กระเบื้องว่าวรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน และกระเบื้องลัดลอน

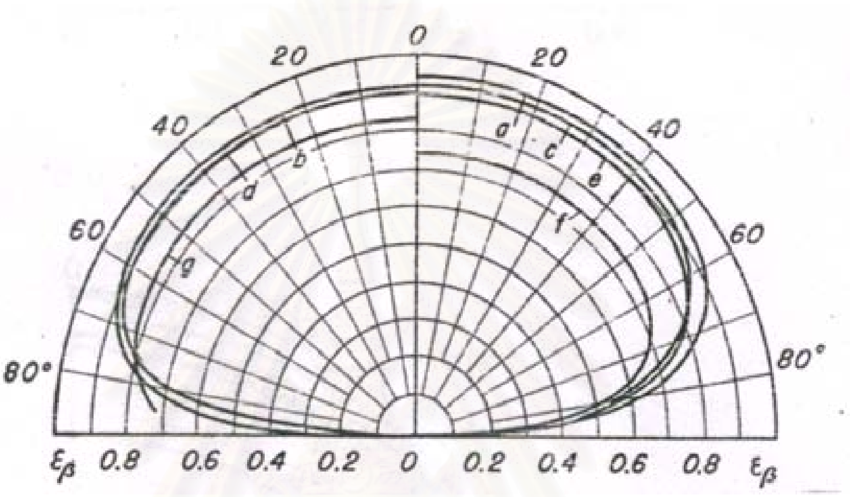
4.1.5 ฉนวน

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

4.1.6 ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ε)

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

การสร้างแบบจำลองในการหาค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุที่ใช้ในการมุงหลังคา จะใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีทั้งหมดระบุทิศทาง ณ ทิศทางของการแผ่รังสีที่ตั้งฉากกับระนาบ หรือ ($\beta = 0$) มาทำการคำนวณ โดยสมมุติให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพการเปล่งรังสีตามทิศทางของการเปล่งรังสีของวัสดุมุงหลังคา เสมือนหรือคล้ายกับแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพการเปล่งรังสีของวัสดุที่พอจะหาข้อมูลได้ ดังรูปที่ 4.6

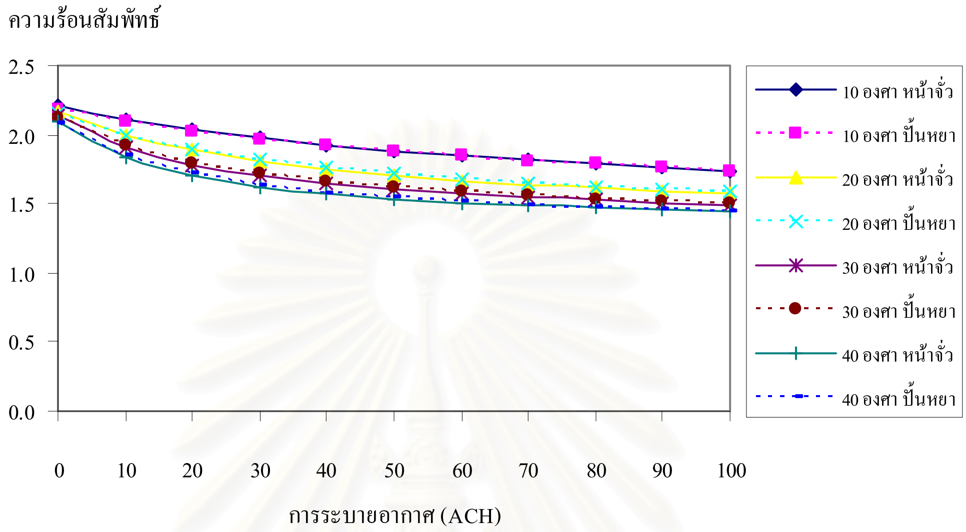


รูปที่ 4.6 ค่าสภาพเปล่งรังสี $\varepsilon(\theta,\phi,T)$ ของวัสดุเปลี่ยนแปลงกับ θ
(a) น้ำแข็ง (b) ไม้ (c) แก้ว (d) กระดาษ (e) ดิน (f) คอปเปอร์ออกไซด์
(g) อะลูมิเนียมออกไซด์ (E. Schmidt and E.Eckert,1935)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH



รูปที่ 4.7 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH

<u>หมายเหตุ</u> ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

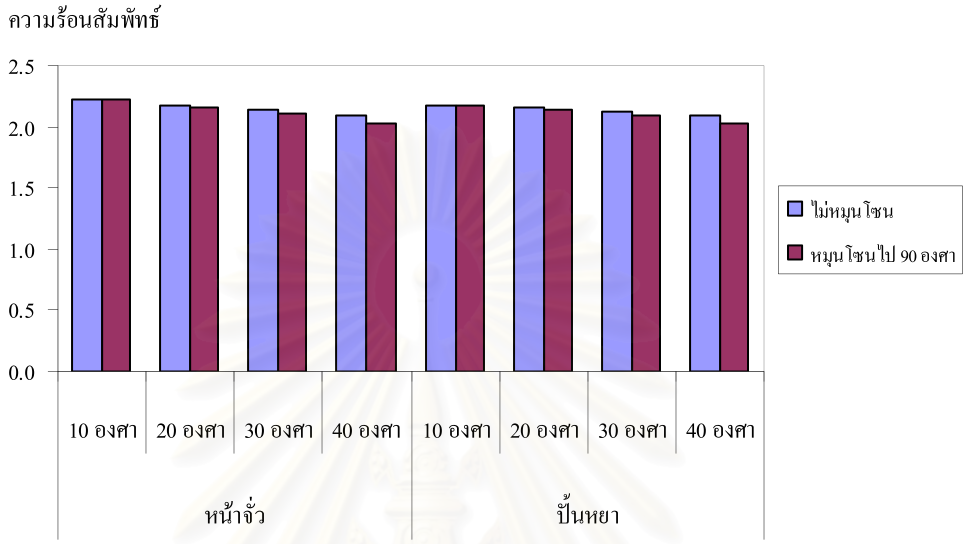
4.2 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH (ต่อ)

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาค่าใดค่าหนึ่ง มุมเอียงหลังคามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารพอสมควร นั่นคือ เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ค่าความร้อนสัมพัทธ์จะลดลง เนื่องจากว่าวิธีสมดุลความร้อนนั้น สูตรที่ใช้คำนวณในส่วนของความร้อนจากการระบายอากาศจะคำนึงถึงปริมาตรในช่องใต้หลังคา และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศภายในช่องใต้หลังคากับอากาศภายนอก ถ้าพิจารณาระบบหลังคาที่มีพื้นที่ฐานเท่ากัน เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ปริมาตรภายในระบบหลังคาก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาตรที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวสามารถช่วยดูดซับความร้อนบางส่วนได้ และช่วงที่หลังคาได้รับความร้อนโดยตรงจากดวงอาทิตย์นั้น เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวด้านใน อุณหภูมิของพื้นผิวด้านนอก และอุณหภูมิของอากาศภายในของระบบหลังคาลดลง 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

<u>หมายเหตุ</u> ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ทิศทางการวางตัวของอาคาร 2 ทิศทาง (ต่อ)

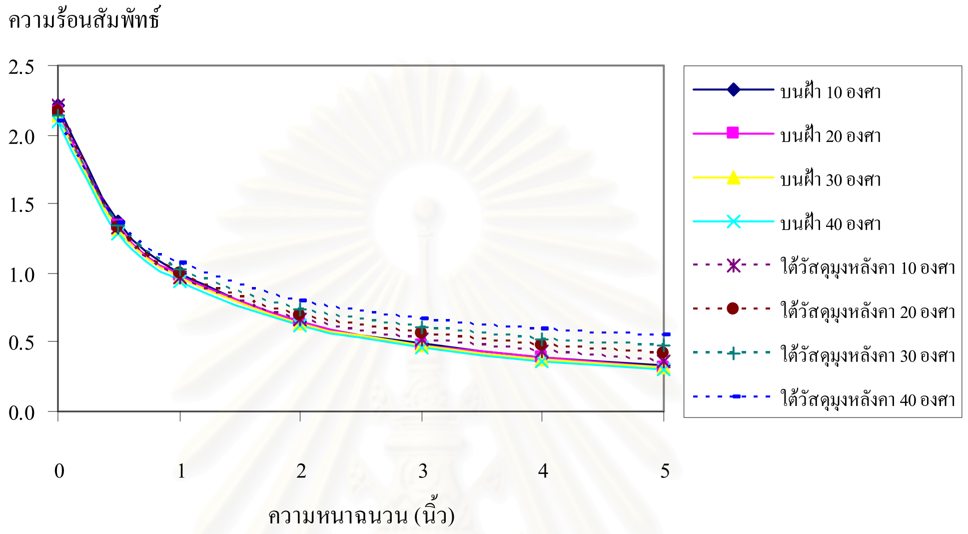
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการวางตัวของอาคาร สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วและทรงปั้นหยามีช่องใต้หลังคา มุมเอียงหลังคามีผลต่อปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารไม่มากนัก

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

ผลต่างของค่าความร้อนสัมพัทธ์ในกรณีที่ไม่หมุนทิศทางการวางตัวของอาคารกับกรณีที่หมุนทิศทางการวางตัวของอาคารไป 90 องศา พบว่า เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันไม่มากนัก (ประมาณไม่เกิน 20 องศา) ผลต่างของค่าความร้อนสัมพัทธ์มีค่าน้อยมาก และเมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น(ประมาณ 20 องศาขึ้นไป) ผลต่างของค่าความร้อนสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากว่า ถ้ามุมเอียงหลังคามีค่าความชันไม่มากนัก ไม่ว่าจะหมุนตัวของอาคารไปในทิศทางใดก็ตาม ความร้อนที่ระบบหลังคาได้รับโดยตรงจากดวงอาทิตย์แทบจะมีค่าใกล้เคียงกันนั่นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา

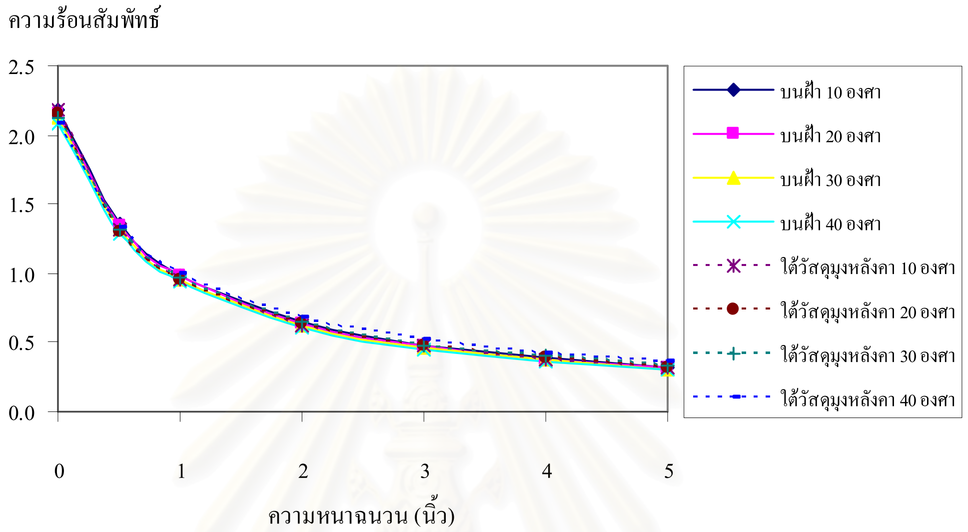


รูปที่ 4.9 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดาน หรือใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคารูปทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

<u>หมายเหตุ</u> ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา (ต่อ)



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดาน หรือใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคารูปทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคาที่มีผลต่อความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา (ต่อ)

เมื่อพิจารณาตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อน จากรูปที่ 4.9 สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา แสดงให้เห็นว่า มุมเอียงหลังคามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารพอสมควร และรูปที่ 4.10 สำหรับหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา แสดงให้เห็นว่า มุมเอียงหลังคามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารน้อยมาก

โดยตำแหน่งของการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ศึกษา จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานและกรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา

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

จากรูปที่ 4.10 ที่ความหนาฉนวนค่าใดค่าหนึ่ง ในแต่ละมุมเอียงหลังคา แสดงให้เห็นว่า ไม่ว่ากรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าหรือกรณีที่ติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา ค่าความร้อนสัมพัทธ์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของทั้ง 2 กรณี พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก เนื่องมาจากในการคำนวณความร้อนในส่วนที่มาจากหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคานั้น จะคิดจากโซนที่ประกอบด้วยหลังคา และฝ้าเพดานเท่านั้น จึงไม่มีความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้าสู่ภายในอาคาร

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา								
การระบายอากาศ (ACH)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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 ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 0 ถึง 100 ACH ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา								
อัตราการระบายอากาศ (ACH)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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

<u>หมายเหตุ</u> ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ทิศทางการวางตัวของอาคารทั้ง 2 ทิศทาง

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา								
ทิศทางการวางตัวของอาคาร	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
ไม่หมุนตัวของอาคาร	2.222	2.179	2.134	2.099	2.211	2.172	2.137	2.103
หมุนตัวของอาคารไป 90 องศา	2.210	2.170	2.114	2.024	2.223	2.180	2.116	2.028
หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา								
ทิศทางการวางตัวของอาคาร	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
ไม่หมุนตัวของอาคาร	2.181	2.153	2.121	2.088	2.179	2.154	2.124	2.091
หมุนตัวของอาคารไป 90 องศา	2.178	2.147	2.095	2.018	2.182	2.149	2.098	2.022

หมายเหตุ ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดาน								
ความหนาฉนวน (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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 ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงหน้าจั่วแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนใต้วัสดุมุงหลังคา								
ความหนาฉนวน (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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

<u>หมายเหตุ</u> ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนบนฝ้าเพดาน								
ความหนาฉนวน (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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 ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความร้อนสัมพัทธ์ของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม ที่ความหนาฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา ในหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา

หลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา ติดตั้งฉนวนใต้วัสดุมุงหลังคา								
ความหนาฉนวน (นิ้ว)	ค่าสภาพการเปล่งรังสี ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม				ค่าสภาพการเปล่งรังสี เป็นฟังก์ชั่นของมุม			
	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา	มุม 10 องศา	มุม 20 องศา	มุม 30 องศา	มุม 40 องศา
	ความร้อนสัมพัทธ์							
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 ค่าความร้อนสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยต่อชั่วโมงที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนเทียบกับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ 10 W/m^2

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม (ต่อ)

จากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่ใช้ในการคำนวณไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม เนื่องจากค่าความร้อนสัมพัธ์ที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุมนั้น ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ เนื่องจากในรูปที่ 4.6 ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมนั้น ค่อนข้างจะมีค่าคงที่ ในช่วงของมุมของการเปล่งรังสีที่ 0° θ < 45° และ ค่าสภาพการเปล่งรังสีจะมีค่าลดลง เมื่อ θ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 45° ขึ้นไป และค่าสภาพการเปล่งรังสี 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 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม พบว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหลังคาน้อยมาก เมื่อเทียบกับกรณีที่ค่าสภาพการเปล่งรังสีไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม

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

5.1.1 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ที่อัตราการระบายอากาศผ่านช่องใต้หลังคาตั้งแต่ 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 องศาจากทิศทางในรูปที่ 4.1 มีค่าเพิ่มขึ้น

5.1.3 อิทธิพลของมุมเอียงหลังคา ที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนตั้งแต่ 0 ถึง 5 นิ้ว และที่ตำแหน่งติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา จากรูปที่ 4.9 สำหรับหลังคาทรงหน้าจั่วมีช่องใต้หลังคา พบว่า ถ้าติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้วัสดุมุงหลังคา เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ถ้าติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดาน เมื่อมุมเอียงหลังคามีค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก และจากรูปที่ 4.10 สำหรับหลังคาทรงปั้นหยาแบบมีช่องใต้หลังคา พบว่า ไม่ว่าจะติดตั้งฉนวนกันความร้อนบนฝ้าเพดานหรือใต้วัสดุมุงหลังคา

เมื่อมุมเอียงหลังคาที่ค่าความชันเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคามีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

5.1.4 อิทธิพลของการคำนวณเมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุม จากตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่า ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่ใช้ในการคำนวณ ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุม เนื่องจากความร้อนที่ได้จากการคำนวณ เมื่อใช้ค่าสภาพการเปล่งรังสีที่เป็นฟังก์ชั่นของมุมกับที่ไม่เป็นฟังก์ชั่นของมุมนั้น ไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ

5.2 ข้อเสนอแนะ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น เป็นเพียงโปรแกรมพื้นฐานที่มีความสามารถในการคำนวณหาปริมาณความร้อนรวมที่ถ่ายเทผ่านระบบหลังคาเข้าสู่โซนที่พิจารณานั้น ได้เพียงคราวละ 1 โซนเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยต่อๆไป ควรมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โซนหลายๆ โซนผ่านระบบหลังคาเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2538). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใ

มนตรี อึ่งเจริญ. (2527). การแผ่รังสีความร้อน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์.

Akara Kitkranchareamsin. (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 lllinois 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, FC. 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, Alanta.

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	=	1.0×10^{-4} m^2	=	0.1550 in^2	1 in^2	=	6.4516×10^{-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	=	2.831685×10^{-2} m^3
1 L	=	0.001 m^3			1 in^3	=	1.6387×10^{-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 $kg/m\text{-}s^2$	1 lbf/in^2	=	6.894757 kPa
1 bar	=	1.0×10^{-5} Pa	=	100 kPa	1 atm	=	14.69594 lbf/in^2
1 atm	=	101.325 kPa				=	29.921 in.Hg [32^{o}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 $Btu/hr\text{-}ft^2$			1 $Btu/hr\text{-}ft^2$	=	3.15459 W/m^2
สัมประสิทธทางความร้อน (Heat Transfer Coefficient)							
1 W/m^2-K	=	0.17611 $Btu/hr\text{-}ft^2$-R			1 $Btu/hr\text{-}ft^2$-R	=	5.6783 W/m^2-K

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในโครงสร้างหลังคาและผนังกำแพง

วัสดุ	k (W/m.K)	ρ (kg/m3)	Cp (J/kg.K)
กระเบื้องคอนกรีต	1.731	2243	840
กระเบื้องกระดาษ	0.600	1922	1005
กระเบื้องเซรามิค	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
แผ่นยิปซั่ม	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 , พลาสเตอร์	0.45	0.90
ทองแดง	0.50	0.25
ทองแดงขัดเงา	0.40	0.02
สีอลูมิเนียม	0.40	0.50
อลูมิเนียมขัดเงา	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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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)
REALQS(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)
DIMENSIONG(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)
DIMENSIONSUMA(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)
DIMENSIONRRI(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 EMITSIVITY
(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(I,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
HRAOO(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),RO
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
UNKNOWNS
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 UNKNOWNS 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  UNKNOWNS.............
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) = HCII(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) = HCII(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) + HCII(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

C.....FIND MIN & MAX OF U
        IF(TOLUMIN.GE.U_ROOF(ID,IA))THEN
        TOLUMIN=U_ROOF(ID,IA)
        ENDIF
        IF(TOLUMAX.LE.U_ROOF(ID,IA))THEN
        TOLUMAX=U_ROOF(ID,IA)
        ENDIF
C.....FIND MIN & MAX OF FILMIN
        IF(TOLFILMINMIN.GE.FILM_IN(ID,IA))THEN
        TOLFILMINMIN=FILM_IN(ID,IA)
        ENDIF
        IF(TOLFILMINMAX.LE.FILM_IN(ID,IA))THEN
        TOLFILMINMAX=FILM_IN(ID,IA)
        ENDIF
C.....FIND MIN & MAX OF FLIMOUT
        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(J,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)/0.920,0.919,0.918,0.916,0.914,0912,
   * 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*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
          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=LWEM*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
            WF=1.0
      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
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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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 EDFS(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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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,DECL,ET)
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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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)-
(D*BPIME)/(DEL*B**2.)
      X(1,2)=-DPIME/(DEL*B)+(D*BPIME)/(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*BPIME)/(DEL*B**2.)
      Z(1,2)=-APIME/(DEL*B)+(A*BPIME)/(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,NHR1
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,NHR1
      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,NHR1
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,NHR1
      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.L
E.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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
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)
ELSE
B(J,I)=RI(I)*SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))/SQRT(X*RI(I)*CI(I))
ENDIF
C(J,I)=-SIN(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))*SQRT(X*RI(I)*CI(I))/RI(I)
D(J,I)=COS(SQRT(X*RI(I)*CI(I)))
   4 CONTINUE
   3 CONTINUE
     APIME=0.
            BPIME=0.
            CPIME=0.
            DPIME=0.
            DO 5 I=1,N
            A(I,I)=ADAT(I,I)
            B(I,I)=BDAT(I,I)
            C(I,I)=CDAT(I,I)
            D(I,I)=DDAT(I,I)
   5 CONTINUE
            DO 6 J=1,N
            DO 7 I=1,N-1
            AA(J,I+1)=A(J,I)*A(J,I+1)+B(J,I)*C(J,I+1)
            BB(J,I+1)=A(J,I)*B(J,I+1)+B(J,I)*D(J,I+1)
            CC(J,I+1)=C(J,I)*A(J,I+1)+D(J,I)*C(J,I+1)
            DD(J,I+1)=C(J,I)*B(J,I+1)+D(J,I)*D(J,I+1)
            A(J,I+1)=AA(J,I+1)
            B(J,I+1)=BB(J,I+1)
            C(J,I+1)=CC(J,I+1)
            D(J,I+1)=DD(J,I+1)
   7 CONTINUE
            APIME=APIME+A(J,N)
            BPIME=BPIME+B(J,N)
            CPIME=CPIME+C(J,N)
            DPIME=DPIME+D(J,N)
   6 CONTINUE
C     WRITE(4,*) APIME,BPIME,CPIME,DPIME
     RETURN
            END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C           FIND OF ROOT BY DIRECT INPUT VARIABLE
AND
C           FIND THE POINTS THAT GRAPH IS CHAINGING
C           FROM  POSITIVE AND NEGATIVE VALUE OF
B(S)
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
            SUBROUTINE FR(RI,CI,N,XNEW,NX)
            PARAMETER(NHR1=24,MLAYER=10)
            REAL
XR(NHR1),XL(NHR1),XNEW(NHR1),S(NHR1)
     X=1.E-8
            DX=1.E-6
            CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
            Y=B
            DO 1 I=1,24
            IF(Y.GT.0.)THEN
            DO 2 J=1,100000000
            X=X+DX
            CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
            Y=B
            IF(Y.LT.0.) GOTO 3
            IF(Y.GT.0.AND.J.EQ.100000000)THEN
            WRITE(8,101)
 101        FORMAT(/,'SOLUTION NOT FOUND YET')
            GOTO 1
            ENDIF
  2 CONTINUE
3 CONTINUE
   XR(I)=X
            XL(I)=X-DX
            ELSE
            DO 4 K=1,100000000
            X=X+DX
            CALL ABCD(X,RI,CI,N,A,B,C,D)
            Y=B
            IF(Y.GT.0.) GOTO 5
            IF(Y.LT.0.AND.J.EQ.100000000)THEN
            GOTO 1
            ENDIF
  4 CONTINUE
  5 CONTINUE
            XR(I)=X
            XL(I)=X-DX
            ENDIF
            XXR=XR(I)
            XXL=XL(I)
            CALL FALSE_POSITION(XXR,XXL,XN,RI,CI,N)
            XNN=SQRT(XN)
            IF(XNN.GE.0.11) GOTO 10
            XNEW(I)=XN
  1 CONTINUE
  10 CONTINUE
   NX=I-1
            RETURN
            END
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C    FALSE_POSITION METHOD
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
            SUBROUTINE
FALSE_POSITION(XR,XL,XN,RI,CI,N)
            PARAMETER(MLAYER=10)
            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

ตัวอย่างอินพุทไฟล์

(จำนวนพื้นผิวที่โดนแสงแดดส่องทั้งหมด, จำนวนพื้นผิวที่เป็น Partition)

4. 1.

(LSM คือ Local Standard Meridian)

(LON คือ Longtitude)

(LLT คือ Latititude)

(LSM, LON, LLT)

-105 -100.5 13.73

(วันและเดือนที่เริ่มต้นในการคำนวณ)

1. 1.

(วันและเดือนที่สิ้นสุดในการคำนวณ)

31. 12.

(Condtion เกี่ยวกับความเร็วลม, Condition เกี่ยวกับอุณหภูมิภายในโซนที่พิจารณา, Condition เกี่ยวกับพื้นผิวที่เป็น Partition)

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

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

(Condition เกี่ยวกับพื้นผิวที่เป็น Partition เท่ากับ 1 คือ ไม่มีพื้นผิวใดเลยเป็น Partition, เท่ากับ 2 คือ มีพื้นผิวหนึ่งพื้นผิวใดเป็น 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

(องศาในการหมุนโซนจากทิศเหนือหมุนไปทางทิศตะวันออก, องศา)

90.

(อุณหภูมิของอากาศภายในโซนตลอด 24 ชม. , ^{o}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 , m^3)

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/m^3)

(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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย