

การคำนวณค่าซีแอลที่ดีใหม่สำหรับผนังและหลังคา
จากพีรอดีกรีสปอนส์แฟกเตอร์



นายกฤษณะ มานิตย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-7156-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECALCULATION OF CLTD FOR WALLS AND ROOFS
FROM PERIODIC RESPONSE FACTORS



Mr. Kritsana Manit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-7156-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การคำนวณค่าซีแอลที่ดีใหม่สำหรับผนังและหลังคาจากฟิรออกติกเรสพอนส์แฟกเตอร์
โดย นายกฤษณะ มานิตย์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กฤษณะ มานิตย์ : การคำนวณค่าซีแอลทีดีใหม่สำหรับผนังและหลังคาจากพีริอดิกเรส
ปอนส์แฟกเตอร์. (RECALCULATION OF CLTD FOR WALLS AND ROOFS FROM
PERIODIC RESPONSE FACTORS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา, 128 หน้า.
ISBN 974-17-7156-8

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการคำนวณค่า Cooling Load Temperature Difference (CLTD) สำหรับผนังกลุ่ม A ถึง G และหลังคาชนิดที่ 1 ถึง 13 ของ ASHRAE GRP-158 ใหม่ ด้วยวิธี Radiant Time Series (RTSM) ซึ่งมีวิธีการคำนวณ 2 ขั้นตอนคือ ขั้นที่ 1 หาค่า Heat gain ที่เข้ามาในกรอบอาคารจากค่า Periodic Response Factors (PRF) ขั้นที่ 2 แบ่งค่า Heat gain เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ Heat gain จากการพาซึ่งจะเป็นภาระการทำความเย็น ณ ชั่วโมงนั้นทันที ส่วนที่สองคือ Heat gain จากการแผ่รังสีซึ่งจะต้องใช้ค่า Radiant Time Factors (RTF) เปลี่ยนให้เป็นภาระการทำความเย็น ผลบวกของภาระการทำความเย็นทั้งสองส่วนจะเป็นภาระการทำความเย็นรวมซึ่งจะนำไปคำนวณค่า CLTD ในลำดับต่อไป ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับ CLTD เดิมซึ่งคำนวณมาจากวิธี Transfer Function (TFM) ในงานวิจัยนี้คำนวณค่า PRF จากวิธี Direct root และ วิธี Frequency Domain Regression (FDR) ส่วนค่า RTF จะคำนวณจากวิธีสมดุลความร้อน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ที่ประดิษฐ์ขึ้น

ผลการวิจัยพบว่าผลรวมของค่า PRF ที่คำนวณจากวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors จะคลาดเคลื่อนจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ไม่เกิน 1% ส่วนผลรวมของค่า PRF ที่คำนวณจากวิธี FDR จะคลาดเคลื่อนจากค่า U ไม่เกิน 0.001% ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยสำหรับผนังกลุ่ม A-G จากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 1.1 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยของหลังคาชนิดที่ 1-13 ที่ไม่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 2.1 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันเฉลี่ยของหลังคาชนิดที่ 1-13 ที่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM 1.2 °C ค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของผนังและหลังคาทั้งที่มีและไม่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา2547..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4470206021: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: RESPONSE FACTORS / PERIODIC RESPONSE FACTORS / RADIANT TIME SERIES METHOD / FDR METHOD / HEAT GAIN / COOLING LOAD / CLTD / WALL / ROOF

KRITSANA MANIT: RECALCULATION OF CLTD FOR WALLS AND ROOFS FROM PERIODIC RESPONSE FACTORS. THESIS ADVISER: ASST. PROF. TUL MANEEWATTANA, Ph.D. 128pp. ISBN 974-17-7156-8

This thesis presents the recalculation of Cooling Load Temperature Difference (CLTD) for wall groups A-G and roof types 1-13 in ASHRAE GRP-158 by Radiant Time Series Method (RTSM). The calculation procedure has two steps. Firstly, heat gain through zone was carried out by a Periodic Response Factors (PRF). Secondly, heat gain from previous part was divided into 2 parts: a convective component that is the instantaneous cooling load and a radiative component which requires a Radiant Time Factors (RTF) to convert it to cooling load. The summation of both components is the total cooling load that can be used to obtain the new set of CLTD. These new set of CLTD were then compared with the old CLTD calculated from a Transfer Function Method (TFM). In this research, PRF is calculated from direct root method and Frequency Domain Regression Method (FDR) while RTF determined by heat balance method using a computer program developed from MATLAB program.

The results have shown that the errors between the summation of PRF and overall heat transfer coefficient (U) that calculated from direct root method (Response Factors) are not exceed 1% and from FDR method are not exceed 0.001%. The average of maximum CLTD for wall groups A-G from RTSM is 1.1 °C higher than TFM. The average of maximum CLTD for roof types 1-13 without suspended ceiling from RTSM is 2.1 °C higher than TFM. The average of maximum CLTD for roof types 1-13 with suspended ceiling from RTSM is 1.2 °C higher than TFM. The maximum CLTD for walls, roofs with and without suspended ceiling from RTSM occurred about 1-2 hours slower than TFM.

DepartmentMechanical Engineering.....	Student's signature
Field of studyMechanical Engineering.....	Advisor's signature
Academic year2004.....	Co-Advisor's signature-

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก ผศ.ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ เสนอข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์อย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ.ทวี เวชพฤติ รศ.ดร.มานิจ ทองประเสริฐ ผศ.ฤชากร จิรกาลวสาน และ ผศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ธีระชาติ พรพิบูลย์ และ อาจารย์เทพฤทธิ์ ทองชุบ นิสิตระดับปริญญาตรีบัณฑิต ที่กรุณาให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอาคารและสิ่งแวดล้อมทุกคน สำหรับการแลกเปลี่ยนความรู้ที่มีประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ คุณณวัชชัย สิทธิสระคู สำหรับคำแนะนำที่ทำให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ คุณกรรณิการ์ อารีย์ ที่ช่วยตรวจทานคำผิดและให้กำลังใจอย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจตลอดเวลา และสนับสนุนการศึกษาอย่างดียิ่งจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของภาระการทำความเย็น	6
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธี Radiant Time Series Method (RTSM)	7
2.3 การนำความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัวสำหรับตัวกลางหลายชั้น	9
2.4 การหาค่า Response Factors	15
2.5 การหาค่า Periodic Response Factors (PRF) โดยวิธี Direct root finding	22
2.6 การหาค่า PRF โดยวิธี Frequency Domain Regression (FDR Method)	28
2.7 การหาค่า Radiant Time Factor (RTF) จากวิธีสมดุลความร้อน	35
2.8 การคำนวณหาค่า Sol-air temperature	39
2.9 การคำนวณหาค่า Heat Input	45
2.10 การคำนวณหาค่า Heat gain จากผนังและหลังคา	46
2.11 การคำนวณหาค่าภาระการทำความเย็น (Cooling load) ด้วยวิธี RTSM	47
2.12 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CLTD/SCL/CLF	48

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการคำนวณของโปรแกรม	51
บทที่ 4 ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ	53
4.1 ผลการคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี Direct root	54
4.2 ผลการคำนวณค่า PRF โดยวิธี FDR Method	65
4.3 ผลการคำนวณค่า Radiant Time Factors (RTF)	76
4.4 ผลการคำนวณค่า CLTD จากวิธี RTSM	78
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	97
5.1 สรุปผล	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	98
รายการอ้างอิง	99
ภาคผนวก	103
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของผนังและหลังคา	104
ภาคผนวก ข ชนิดผนังและหลังคาของ ASHRAE	108
ภาคผนวก ค ค่า PRF ของผนังและหลังคาของ ASHRAE (Response Factors)	111
ภาคผนวก ง ค่า PRF ของผนังและหลังคาของ ASHRAE (FDR Method)	118
ภาคผนวก จ กรณีศึกษาการคำนวณค่าภาระการทำคามเย็น	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	128

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีและความร้อนจากการพา	8
ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผนังด้านใน	38
ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดผนังและหลังคาของโซนที่ใช้ในการคำนวณค่า RTF	39
ตารางที่ 2.4 สมการของเวลา (Equation of time) วันที่ 21 ของเดือน	42
ตารางที่ 2.5 Time zone meridians	43
ตารางที่ 2.6 Percentage of daily temperature range	43
ตารางที่ 2.7 สภาพการสะท้อนรังสีของพื้น, ρ_g	45
ตารางที่ 2.8 แสดงชนิดของผนังกลุ่ม A-G ของ ASHRAE GRP-158	49
ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดของหลังชนิดที่ 1-13 ไม่มีฝ้าเพดาน ของ ASHRAE GRP-158	49
ตารางที่ 2.10 แสดงชนิดของหลังชนิดที่ 1-13 มีฝ้าเพดาน ของ ASHRAE GRP-158	50
ตารางที่ 4.1 แสดงชนิดผนังและหลังคาที่มีความคลาดเคลื่อนเกิน 1% ในการคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs Order 6	54
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor เมื่อใช้ Y_j ที่จำนวนเทอม 120 เทอมกับการใช้จำนวนเทอมแปรผันที่ทำให้ ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1%	57
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า Cross Periodic Response Factors ที่คำนวณจากวิธี Direct root	58
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor จากการคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี Direct root	60
ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-transfer function สำหรับ ASHRAE Wall type 30 และ 31	68
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-transfer function สำหรับ ASHRAE Wall type 35 และ 36	69
ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-transfer function สำหรับ ASHRAE Wall type 37 และ 38	70
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-transfer function สำหรับ ASHRAE Roof type 37 และ 38	71

ตารางที่ 4.9	ค่า RTF สำหรับ Light, Medium และ Heavy weight zone	76
ตารางที่ 4.10	ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A-G ที่คำนวณโดยวิธี RTSM	79
ตารางที่ 4.11	ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A-G จาก ASHRAE GRP-158	80
ตารางที่ 4.12	ค่า CLTD สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM	88
ตารางที่ 4.13	ค่า CLTD สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน 13 ชนิด จาก ASHRAE GRP-158	88
ตารางที่ 4.14	ค่า CLTD สำหรับหลังคามีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM	89
ตารางที่ 4.15	ค่า CLTD สำหรับหลังคามีฝ้าเพดาน 13 ชนิด จาก ASHRAE GRP-158	89
ตารางที่ ก	คุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบ ของผนังและหลังคาของ ASHRAE	105
ตารางที่ ข.1	แสดงชนิดผนังของ ASHRAE 41 ชนิด	109
ตารางที่ ข.2	แสดงชนิดหลังคาของ ASHRAE 42 ชนิด	110
ตารางที่ ค.1	ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2.K$) สำหรับผนัง ของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี Direct Root Method, (Response Factors) Error < 1%	112
ตารางที่ ค.2	ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2.K$) สำหรับหลังคา ของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี Direct Root Method, (Response Factors) Error < 1%	115
ตารางที่ ง.1	ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2.K$) สำหรับผนัง ของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี FDR Method	119
ตารางที่ ง.2	ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2.K$) สำหรับหลังคา ของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี FDR Method	122

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวยกกลางการถ่ายเทความร้อนหลายชั้น	9
รูปที่ 2.2 Boundary condition สำหรับตัวยกกลาง 1 ชั้น	11
รูปที่ 2.3 Boundary condition สำหรับตัวยกกลางหลายชั้น	13
รูปที่ 2.4 การกำหนดผนังด้านนอกและด้านใน	14
รูปที่ 2.5 Superposition of unit triangular pulse excitation	16
รูปที่ 2.6 Unit triangular pulse excitation	16
รูปที่ 2.7 Periodic Response Factors (PRF)	22
รูปที่ 2.8 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านในของผนังหรือหลังคา	35
รูปที่ 2.9 แสดงมุมต่างๆสำหรับพื้นผิวเพื่อคำนวณค่าความร้อนจากดวงอาทิตย์	42
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 30 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	60
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 31 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	61
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 35 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	61
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 36 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	62
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 37 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	62
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 38 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	63
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 37 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	63
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 38 ที่คำนวณจากวิธี Direct root	64
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า Polynomial s-transfer function กับ Theoretical Frequency Characteristics, (Exact) สำหรับผนังชนิดที่ 38 และส่วนขยาย	66
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 30 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	72
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 31 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	72
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 35 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	73
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 36 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	73

รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 37 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	74
รูปที่ 4.15	เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 38 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	74
รูปที่ 4.16	เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 37 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	75
รูปที่ 4.17	เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 38 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)	75
รูปที่ 4.18	ค่า RTF สำหรับ Light weight zone	77
รูปที่ 4.19	ค่า RTF สำหรับ Medium weight zone	77
รูปที่ 4.20	ค่า RTF สำหรับ Heavy weight zone	77
รูปที่ 4.21	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W	81
รูปที่ 4.22	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW	81
รูปที่ 4.23	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม B ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W	82
รูปที่ 4.24	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม B ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW	82
รูปที่ 4.25	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม C ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W	83
รูปที่ 4.26	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม C ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW	83
รูปที่ 4.27	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม D ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W	84
รูปที่ 4.28	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม D ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW	84
รูปที่ 4.29	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม E ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W	85

รูปที่ 4.44	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 10 ที่ไม่มีฝ้าเพดาน และมีฝ้าเพดาน (SC) ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158	94
รูปที่ 4.45	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 11 ที่ไม่มีฝ้าเพดาน และมีฝ้าเพดาน (SC) ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158	95
รูปที่ 4.46	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 12 ที่ไม่มีฝ้าเพดาน และมีฝ้าเพดาน (SC) ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158	95
รูปที่ 4.47	เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 13 ที่ไม่มีฝ้าเพดาน และมีฝ้าเพดาน (SC) ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158	96
รูปที่ ๑.1	แสดงภาพอาคารสำหรับกรณีศึกษาที่ 1	126
รูปที่ ๑.2	การระกการทำความเย็นจากผนังและหลังคาของอาคารที่ 1	126
รูปที่ ๑.3	แสดงภาพอาคารสำหรับกรณีศึกษาที่ 2	127
รูปที่ ๑.4	การระกการทำความเย็นจากผนังและหลังคาของอาคารที่ 2	127

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่ (m^2) หรือ Apparent solar constant (W/m^2)
AST	=	Apparent solar time (ชั่วโมง)
b_n	=	Conduction Transfer Function Coefficients
B	=	Atmospheric extinction coefficient
c_n	=	Conduction Transfer Function Coefficients
C	=	Sky diffuse factor
$CLTD$	=	ค่า CLTD ($^{\circ}C$)
CN	=	แฟกเตอร์ความโปร่งของท้องฟ้า
c_p	=	Specific heat ($J/kg.K$)
d_n	=	Conduction Transfer Function Coefficients
E_d	=	Diffuse sky irradiance (W/m^2)
E_r	=	Diffuse ground reflected irradiance (W/m^2)
E_D	=	Surface direct irradiance (W/m^2)
E_{DN}	=	Direct normal irradiance (W/m^2)
E_t	=	พลังงานรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว ($W/m^2.K$)
ET	=	สมการของเวลา (นาที)
h_o	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาที่พื้นผิวด้านนอก ($W/m^2.K$)
H	=	Hour angle (องศา)
k	=	Thermal conductivity ($W/m.K$)
L	=	ละติจูด
LON	=	ลองจิจูด (องศา)
LSM	=	Local standard time meridian (องศา)
LST	=	Local standard time (ชั่วโมง)
n	=	จำนวนเต็ม
q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน (W/m^2)
q_e	=	Heat gain (W/m^2)
q_{LWX}''	=	ฟลักซ์ความร้อนสุทธิจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวระหว่างผิวภายในโซน (W/m^2)

q_{sw}''	=	ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีคลื่นสั้นจากแสงไฟ (W/m^2)
q_{LWS}''	=	ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีคลื่นยาวจากอุปกรณ์ภายใน (W/m^2)
q_{ki}''	=	ฟลักซ์ความร้อนโดยการนำที่ผิวด้านในของโซน (W/m^2)
q_{sol}''	=	ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ที่ผิวด้านในของโซน (W/m^2)
q_{conv}''	=	ฟลักซ์ความร้อนจากการพาที่ผิวด้านในของโซน (W/m^2)
Q_r	=	ค่า Radiant heat gain (W)
Q_{rc}	=	ค่า Radiant cooling load (W)
r	=	ค่า Radiant Time Factors, RTF
ΔR	=	ค่าความแตกต่างระหว่างรังสีความร้อนคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิวจากท้องฟ้าและสิ่งแวดล้อม กับการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำที่อุณหภูมิภายนอก
s	=	Laplace variable หรือ Roots
t	=	เวลา (วินาที)
t_o	=	อุณหภูมิอากาศภายนอก ($^{\circ}C$)
t_s	=	อุณหภูมิพื้นผิว ($^{\circ}C$)
T	=	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
T_e	=	Sol-air temperature ($^{\circ}C$)
U	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2.K$)
x	=	ตำแหน่ง (m)
X	=	External Response Factors ($W/m^2.K$)
X_p	=	External Periodic Response Factors ($W/m^2.K$)
Y	=	Cross Response Factors ($W/m^2.K$)
Y_p	=	Cross Periodic Response Factors ($W/m^2.K$)
Z	=	Internal Response Factors ($W/m^2.K$)
Z_p	=	Internal Periodic Response Factors ($W/m^2.K$)

ตัวอักษรกรีก

α	=	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของพื้นผิว (m^2/s)
β	=	Solar altitude (องศา)
ε	=	Hemispherical emittance of surface
δ	=	Time interval (1 ชั่วโมง) หรือความเอียงของแกนโลก (องศา)

ϕ	=	Solar azimuth (องศา)
θ	=	Incident angle (องศา)
ρ	=	Density (kg / m^3)
ρ_g	=	Ground reflectivity
γ	=	Surface solar azimuth (องศา)
ω	=	ความถี่เชิงมุม (rad / s)
Ψ	=	Surface azimuth (องศา)
Λ	=	Identity matrix
Σ	=	ความเอียงของพื้นผิวจากแนวระนาบ (องศา)

ตัวอักษรห้อย

θ	=	เวลาที่ชั่วโมงปัจจุบัน
is	=	พื้นผิวด้านใน
os	=	พื้นผิวด้านนอก
δ	=	Time interval (1 ชั่วโมง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจด้านการออกแบบระบบปรับอากาศมีสูง วิศวกรจำเป็นต้องคำนวณภาระการทำความเย็นอย่างรวดเร็วและที่สำคัญต้องมีความเชื่อถือได้ วิธีการคำนวณภาระการทำความเย็นที่มีความแม่นยำสูงและเป็นวิธีที่ใช้อ้างอิงกันทั่วไปคือวิธีสมดุลความร้อน (Heat balance) บางครั้งวิธีนี้ถูกอ้างอิงให้เป็นวิธีที่แม่นยำตรง (Exact solution) การคำนวณโดยวิธีนี้มีความถูกต้องสูงก็จริงแต่ก็มีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้เวลานานเพราะจะต้องใส่ข้อมูลเบื้องต้นจำนวนมากเพื่อหาผลเฉลยจำนวนมากในการสมดุลความร้อน แม้ว่าในปัจจุบันจะมีคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงที่ใช้คำนวณได้อย่างรวดเร็ว แต่วิธีสมดุลความร้อนก็ไม่สะดวกในการใช้งานจริงมากนัก การคำนวณภาระการทำความเย็นวิธี Transfer Function Method (TFM) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากรหัสสมดุลความร้อน วิธีนี้จะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 2 ชุด คือ Conduction Transfer Function Coefficients (CTFs) และ Room Weighting Factors วิธีนี้จะมีการคำนวณหลายขั้นตอนและจะต้องใช้การคำนวณซ้ำเพื่อหาผลเฉลยที่เข้าสู่คำตอบ แต่ก็ยังมีความจำเป็นต้องใช้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์อยู่ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่ไม่สะดวกรวดเร็วมากนัก ต่อมาจึงได้พัฒนาการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นโดยวิธี CLTD/SCL/CLF ขึ้นซึ่งได้ถูกเสนอใน Cooling and Heating Load Calculation Manual (1979) เรียกกันโดยทั่วไปว่า ASHRAE GRP-158 เป็นวิธีที่ถูกพัฒนามาจากวิธี TFM จากการคำนวณในหลายขั้นตอนให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว จึงเป็นวิธีที่วิศวกรนิยมใช้กันมากเนื่องจากความง่ายและรวดเร็ว สามารถคำนวณภาระการทำความเย็นรายชั่วโมงด้วยมือโดยใช้เครื่องคำนวณธรรมดาได้ สำหรับการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นผ่านผนังและหลังคาโดยวิธี CLTD/SCL/CLF นี้จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เรียกว่า Cooling Load Temperature Difference (CLTD)

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการคำนวณภาระการทำความเย็นวิธีใหม่คือวิธี Radiant Time Series Method (RTSM) เป็นวิธีที่ปรับปรุงมาจากวิธีสมดุลความร้อนซึ่งมีข้อดีคือไม่ต้องใช้การคำนวณซ้ำ วิธีนี้เป็นวิธีที่จะถูกนำมาใช้แทนวิธี TFM โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์อย่างง่ายที่คล้ายกับการคำนวณด้วยมือเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในปัจจุบันเช่นโปรแกรม Microsoft Excel

เป็นต้น อย่างไรก็ตามการคำนวณวิธีนี้จะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 2 ชุดเช่นกัน คือ Periodic Response Factors (PRF) และ Radiant Time Factors (RTF) ซึ่งจะต้องคำนวณจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขั้นสูงไว้ก่อนเนื่องจากค่อนข้างยุ่งยาก แล้วจึงนำค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 2 ชุด ไปใส่ในโปรแกรมการคำนวณอย่างง่าย จึงถือได้ว่ายังไม่สะดวกมากนัก ดังนั้นจึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งจะทำการคำนวณค่า CLTD จากวิธี RTSM

ความร้อนที่ผ่านเข้าในกรอบอาคาร (Heat gain) ผ่านผนังและหลังคาเป็นปัญหาการนำความร้อนแบบไม่คงตัวเนื่องจากอุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนภาระการทำควมเย็น (Cooling load) ก็เป็นปัญหาที่ค่อนข้างซับซ้อนเนื่องจากผนังและหลังคาจะสะสมความร้อนไว้ในขณะที่อุณหภูมิผิวของผนังและหลังคามีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศภายใน และจะคายความร้อนออกสู่อากาศเมื่ออุณหภูมิที่ผิวด้านในมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายใน สำหรับวิธี TFM นั้นจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Conduction Transfer Function Coefficients (CTFs) ในการคำนวณค่า Heat gain ซึ่งค่า CTFs นี้สามารถหาได้โดยวิธีการแปลงลาปลาซย้อนกลับและหาค่ารากของสมการแบบ Direct root ส่วนวิธี RTSM นั้นจะใช้ค่า Periodic Response Factors (PRF) ในการคำนวณค่า Heat gain อย่างไรก็ตามวิธีหนึ่งในการคำนวณค่า PRF คือหาจากค่า CTFs คุณสมบัติของค่า PRF ประการหนึ่งที่สำคัญคือ ผลรวมของค่า PRF จะต้องเท่ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ปัญหาที่พบจากการคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs คือผลรวมของค่า PRF ของผนังและหลังคาบางชนิดมีความแตกต่างจากค่า U จริงค่อนข้างมาก วิธีใหม่จึงได้ถูกเสนอขึ้นเพื่อใช้หาค่า PRF คือวิธี Frequency Domain Regression (FDR) ผลที่ได้จากวิธีนี้คือ ค่า U จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่า U ของผนังและหลังคาจริง อย่างไรก็ตามก็ได้ใช้วิธี FDR คำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาบางชนิดเท่านั้น ซึ่งเป็นชนิดของผนังและหลังคาที่ค่า U มีความคลาดเคลื่อนมากเมื่อคำนวณจากค่า CTFs เท่านั้น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะคำนวณค่า PRF ของผนัง 41 ชนิดและหลังคา 42 ชนิดที่ถูกจัดหมวดหมู่ขึ้นใหม่โดย ASHRAE ด้วยการคำนวณจากวิธี FDR และจากวิธีการแปลงลาปลาซย้อนกลับโดยหาค่ารากของสมการแบบ Direct root ตามลำดับ เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละวิธีและเลือกวิธีที่เหมาะสมที่สุด เพื่อนำไปคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังและหลังคาชนิดใน ASHRAE GRP-158

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่า Periodic Response Factors (PRF)
2. เพื่อศึกษาการคำนวณค่า PRF ที่ถูกต้อง
3. เพื่อศึกษาการคำนวณค่า Cooling Load Temperature Difference (CLTD) ของผนังและหลังคาจาก PRF ที่ถูกต้อง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาวิธีการคำนวณค่า Cooling Load Temperature Difference (CLTD) ของผนังและหลังคาจากค่า Periodic Response Factors (PRF) โดยคำนึงถึงความถูกต้องของค่า PRF เป็นหลัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่า Periodic Response Factors (PRF) และสามารถคำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาที่ถูกต้องได้
2. ค่าคำนวณค่า CLTD ที่ถูกต้องได้ สำหรับผนังและหลังคาของ ASHRAE เพื่อนำไปปรับปรุงค่า CLTD ของ ASHRAE GRP-158

1.5 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mitalas and Stephenson (1967) ได้ Derive สมการ Conduction response factors ขึ้นเพื่อใช้คำนวณภาระการทำความเย็น ซึ่งสมการ Conduction response factors เป็นสมการอนุกรมอนันต์ ทำให้ไม่สะดวกในการใช้งานจริงมากนักจึงได้ตัดเทอมปลายของอนุกรมอนันต์ที่ไม่สำคัญออก และได้ทำการเปรียบเทียบค่า Conduction response factors โดยใช้ Analog computer กับปัญหาการใช้พลังงานและภาระการทำความร้อนในอาคาร พบว่าการตัดเทอมปลายของอนุกรมอนันต์ที่ไม่สำคัญออกมีผลน้อยมาก

การคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Transfer Function Method (TFM) ได้ถูกพัฒนาโดย Mitalas (1968) และนำเสนอครั้งแรกใน ASHRAE Handbook-Fundamentals ปี 1972 โดยจะใช้ค่า Conduction Transfer Function Coefficients (CTFs) ซึ่งพัฒนามาจากค่า Conduction response factors เพื่อใช้ในการคำนวณภาระการทำความเย็น วิธีการพัฒนาค่า Conduction response factors ไปเป็นค่า CTFs นั้นสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก Peavy (1978) และ Hittle (1981)

Rudoy and Duran (1975) ได้พัฒนาวิธีการคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Cooling Load Temperature Difference/Cooling Load Factors (CLTD/CLF) ขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากวิธี TFM โดยที่ค่า CLTD จะใช้คำนวณค่าภาระการทำความเย็นจาก Heat Gain ที่ผ่านเข้ามาในห้องจากผนังและหลังคา ส่วนค่า CLF จะใช้คำนวณค่าภาระการทำความเย็นจาก Heat gain จากแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกและแหล่ง Heat gain ภายในห้อง วิธีนี้มีรายละเอียดอยู่ใน ASHRAE GRP-158 Cooling and Heating Load Calculation Manual (1979)

Harris and McQuiston (1988) ได้พัฒนาค่าสัมประสิทธิ์ Conduction Transfer Function Coefficients (CTFs) ใหม่เพื่อใช้สำหรับคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Transfer Function Method (TFM) นอกจากนี้ยังได้จัดกลุ่มผนังเป็น 41 ชนิดและหลังคา 42 ชนิด ตามคุณสมบัติทางเทอร์โมฟิสิกส์เพื่อให้สามารถจำแนกได้สะดวกยิ่งขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ CTFs และการจัดกลุ่มผนังและหลังคาได้ถูกรวบรวมไว้ใน ASHRAE Handbook of Fundamentals (1989, 1993, 1997) และ Cooling and Heating Load Calculation Manual, 2nd Ed. (1992)

Cooling and Heating Load Calculation Manual, 2nd Ed. (1992) ฉบับปรับปรุง ถูกตีพิมพ์โดย ASHRAE และยังได้ตีพิมพ์บทความใน ASHRAE Transaction โดย Spitler, et al. (1993a, 1993b) และ Falconer, et al. (1993) คู่มือเล่มใหม่นี้ได้ทำการแก้ไขปรับปรุงวิธี CLTD/CLF จาก ASHRAE GRP-158 ในปี 1979 ให้เป็นวิธี CLTD/SCL/CLF ซึ่งมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้รวบรวมการคำนวณวิธี TFM และวิธี TETD/TA ลงไปด้วย

Spitler, et al. (1997) ได้พัฒนาการคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Radiant Time Series Method (RTSM) ขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณอย่างง่ายที่มีรากฐานมาจากวิธีสมดุลความร้อน (Heat balance) วิธี RTSM นี้จะใช้ค่า Periodic Response Factors (PRF) หรือ Conduction Time Series (CTS) เพื่อคำนวณค่า Heat gain ซึ่งค่า PRF หรือ CTS นี้สามารถ

คำนวณได้จากค่า CTFs วิธี RTSM นี้สามารถคำนวณภาระการทำความเย็นได้ง่ายโดยไม่ต้องมีการคำนวณซ้ำ

Spitler and Fisher (1999a) ได้คำนวณค่า PRF สำหรับผนัง 41 ชนิด และสำหรับหลังคา 42 ชนิด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ CTFs ดังที่ได้แสดงแหล่งข้อมูลไว้ข้างต้น ในภาคผนวก B ของบทความนี้ได้ให้ข้อคิดเห็นไว้ว่า ค่า CTFs ที่นำมาคำนวณค่า PRF มีความคลาดเคลื่อนมากในกรณีที่มีผนังและหลังคามีน้ำหนักมาก ซึ่งค่า CTFs นี้มาจาก Harris and Mcquiston (1988) และนอกจากนี้ยังได้ตีพิมพ์ใน ASHRAE Handbook of Fundamentals ในปี 1989, 1993 และ 1997 อีกด้วย ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) และพบว่า ค่า U ของผนังและหลังคาที่คำนวณจากค่า CTFs มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1 % 8 ชนิด คือ Roof 37 (3%), Roof 38 (8%), Wall 30 (2%), Wall 31 (6%), Wall 35 (16%), Wall 36 (1.03%), Wall 37 (30%) และ Wall 38 (30%) โดยที่ค่า U ที่คำนวณจากค่า CTFs ทุกกรณีมีค่าต่ำกว่าค่า U จริงของผนังและหลังคา ด้วยเหตุนี้จะทำให้การคำนวณค่าภาระการทำความเย็นต่ำกว่าความเป็นจริง

Wang and Chen (2002) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณค่า PRF วิธีใหม่ คือวิธี Frequency Domain Regression (FDR) วิธีนี้เป็นการแปลงลาปลาซย้อนกลับจากแบบจำลองที่เรียกว่า Polynomial s-Transfer Function ซึ่งจะจำลองมาจาก Theoretical frequency characteristic (สมการจริง) และได้คำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด 8 ชนิดของ Spitler and Fisher (1999a) พบว่าค่า U ที่คำนวณโดยวิธี FDR นั้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่านอกจากการคำนวณค่า Cross PRF ที่ง่ายและถูกต้องมากกว่าแล้ว ยังสามารถคำนวณค่า Internal และ External PRF ได้อีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของภาระการทำความร้อน

ความพยายามในการรักษาอุณหภูมิภายในอาคารให้คงที่ตามต้องการนั้น จะต้องมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร ซึ่งการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนออกจากหรือเข้าสู่อาคารนั้น จะใช้ตัวแปรต้นที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์ อุณหภูมิกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้งภายนอก ความดันบรรยากาศ ความเร็วลม อุณหภูมิจุดน้ำค้าง อุณหภูมิภายใน และวัสดุที่ใช้ทำตัวอาคาร เป็นต้น ส่วนใหญ่แล้วในงานปรับอากาศเราจะสนใจอัตราการถ่ายเทความร้อน 4 รูปแบบ คือ

1. Space heat gain

คือ อัตราความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาสู่ห้อง (Space) และ/หรือ อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องในเวลานั้นๆ ความร้อนที่อยู่ภายในห้องจะแบ่งออกเป็นความร้อนสัมผัส (Sensible heat) และความร้อนแฝง (Latent heat) แหล่งความร้อนที่เข้ามาสู่ห้องอาจมาจากหลายแหล่ง เช่น ความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านกระจก ความร้อนที่ผ่านผนังอาคาร หลังคาอาคาร ผนังกันภายใน เพดาน พื้น ความร้อนจากไฟฟ้าส่องสว่าง อุปกรณ์ไฟฟ้า ผู้อยู่อาศัย และความร้อนจากการระบายอากาศ เป็นต้น ความร้อนจาก Heat gain ในรูปของความร้อนสัมผัสจะทำให้อุณหภูมิภายในห้องเปลี่ยนไป ขณะที่ความร้อนแฝงจะทำให้ความชื้นในห้องเปลี่ยนไป

2. Space cooling load

คือ ภาระการทำความร้อนหรือค่าอัตราความร้อนที่จะต้องนำออกไปจากห้องเพื่อรักษาอุณหภูมิของอากาศภายในห้องให้คงที่ โดยที่ค่า Space heat gain ขณะใด ไม่จำเป็นต้องเท่า Space cooling load ขณะนั้นเสมอไป

3. Space heat extraction rate

คือ ค่าอัตราความร้อนที่จะถูกนำออกไปจากห้องที่มีการปรับสภาวะอากาศ ค่าอัตราความร้อนดังกล่าวจะรวมถึงผลของคุณลักษณะของระบบควบคุม ซึ่งจะส่งผลให้มีการแกว่งของอุณหภูมิภายในห้อง

4. Cooling coil load

คือ ค่าอัตราความร้อนที่จะถูกนำออกที่คอยล์เย็น ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลรวมของ Space heat extraction rate ของทุกห้องที่ถูกจ่ายความเย็นจากคอยล์ บวกกับค่าความร้อนที่เกิดจากระบบจ่าย ความร้อนและความชื้นจากอากาศที่ถูกนำเข้าสู่ตัวอุปกรณ์ทำความเย็นด้วย

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะเกี่ยวข้องกับการหาค่า Space heat gain และ Space cooling load ที่ผ่านผนังและหลังคาเข้ามาสู่ห้องหรือโซนเท่านั้น ปัญหาความร้อนในลักษณะนี้เป็นปัญหาแบบไม่คงตัว เนื่องจากอุณหภูมิภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธี Radiant Time Series Method (RTSM)

การคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี Radiant Time Series (Spitler, et al. 1997) จะใช้หลักการแบ่งค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ห้อง (Heat gain) เป็น 2 ส่วน คือ

1. ค่าความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiant parts) จะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีของแต่ละพื้นผิวภายในห้องเนื่องจากผลต่างอุณหภูมิ ซึ่งจะถูกระงับไว้ในตัวอาคาร แล้วปลดปล่อยออกมาเป็นภาระการทำความเย็นภายหลัง
2. ค่าความร้อนจากการพา (Convective parts) จะเป็นการทำความเย็น ณ ชั่วโม่งนั้นๆ โดยตรง

หลังจากนั้นจึงใช้ค่า Radiant Time Factors (RTF) กับค่าความร้อนจากการแผ่รังสีเพื่อหาค่าภาระการทำความเย็นที่ชั่วโม่งใดๆ โดยจะคำนึงถึงผลกระทบของ Heat gain ที่ชั่วโม่งก่อนด้วย ขั้นตอนของการคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี RTSM สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ห้อง (Heat gain) ตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้สัมประสิทธิ์ Periodic Response Factors (PRF)
2. แบ่งค่าความร้อนเป็น 2 ส่วน คือค่าความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiant parts) และค่าความร้อนจากการพา (Convective parts) โดยใช้ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีและความร้อนจากการพา
3. ใช้สัมประสิทธิ์ Radiant Time Factors (RTF) กับค่า Heat gain จากการแผ่รังสีเพื่อเปลี่ยนเป็นภาระการทำความเย็น
4. รวมค่าความร้อนจากการพาและภาระการทำความเย็นจากข้อ 3 เพื่อคำนวณหาภาระการทำความเย็นแต่ละชั่วโมง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีและความร้อนจากการพา

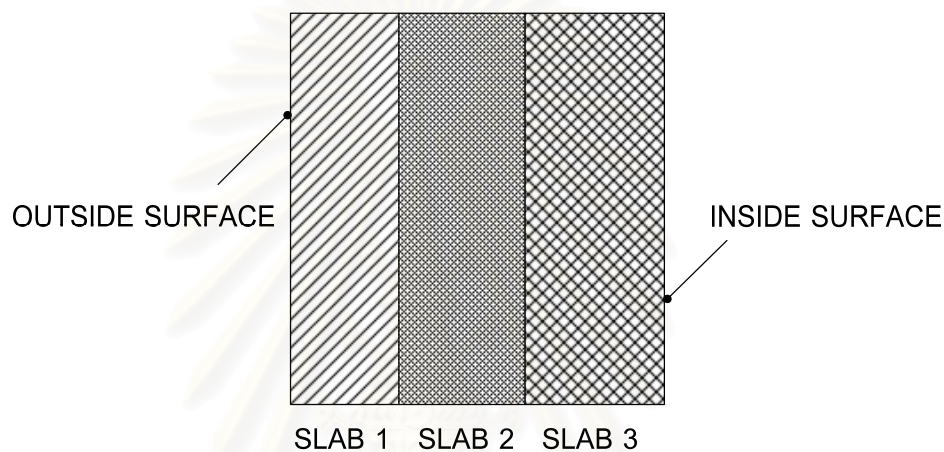
แหล่งที่มาของความร้อน (Heat gain)	การแผ่รังสี	การพา
Conduction heat gain		
Walls	0.63	0.37
Roofs	0.84	0.16
Solar radiation		
Transmitted solar, no inside shade	1	0
Window solar, with inside shade	0.63	0.37
Absorbed (by fenestration) solar	0.63	0.37
Lighting		
Fluorescent lights, suspended, unvented	0.67	0.33
Fluorescent lights, recessed, vented to turn air	0.59	0.41
Fluorescent lights, recessed, vented to turn air and supply air	0.19	0.81
Incandescent lights	0.80	0.20
Infiltration and ventilation	0	1

ที่มา : ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001

2.3 การนำความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัวสำหรับตัวกลางหลายชั้น

จากสมการควบคุมของการนำความร้อน 1 มิติในสภาวะไม่คงตัว

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) = \rho c_p \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.1 ตัวกลางการถ่ายเทความร้อนหลายชั้น

สมมติให้ k เป็นค่าคงที่จะได้

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (2.2)$$

เมื่อ $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$

จากสมการ Fourier's law

$$q(x,t) = -k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \quad (2.3)$$

เมื่อ $T =$ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)

$x =$ ตำแหน่ง (m)

$t =$ เวลา (s)

α = Thermal diffusivity (m^2 / s)

q = การถ่ายเทความร้อน (W / m^2)

k = Thermal conductivity ($W / m.K$)

ρ = Density (kg / m^3)

c_p = Specific heat ($J / kg.K$)

แก้สมการที่ (2.3) โดยการใช Laplace transform

$$L\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x,t)\right] = L\left[\frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} T(x,t)\right] \quad (2.4)$$

จาก Appendix F ของ Poulikakos (1994)

$$L[aT_1(x,t) + bT_2(x,t)] = a\bar{T}_1(x,s) + b\bar{T}_2(x,s) \quad (2.5)$$

$$L\left[\frac{\partial}{\partial t} T(x,t)\right] = s\bar{T}(x,s) - T(x,0) \quad (2.6)$$

$$L\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x,t)\right] = \frac{d^2}{dx^2} [\bar{T}(x,s)] \quad (2.7)$$

แทนสมการ (2.5), (2.6) และ (2.7) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$\frac{d^2}{dx^2} [\bar{T}(x,s)] = \frac{1}{\alpha} [s\bar{T}(x,s) - T(x,0)] \quad (2.8)$$

สมมติให้ Initial condition $\bar{T}(x,0) = 0$ (Hittle, 1981)

$$\frac{d^2}{dx^2} [\bar{T}(x,s)] = \frac{1}{\alpha} s\bar{T}(x,s) \quad (2.9)$$

จัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$\frac{d^2}{dx^2} [\bar{T}(x,s)] - \frac{1}{\alpha} s\bar{T}(x,s) = 0 \quad (2.10)$$

จากรูปแบบของสมการที่ (2.10) จะเป็นสมการ Second order ordinary differential equation ผลเฉลยของสมการจะเป็น

$$\bar{T}(x, s) = A \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.11)$$

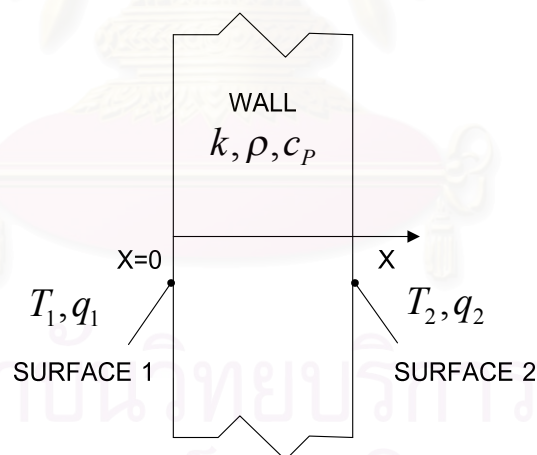
ทำการ Differentiate สมการที่ (2.11) เทียบกับ x จะได้เป็น

$$\frac{d}{dx}\bar{T}(x, s) = A\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.12)$$

จากสมการ Fourier's law $q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$

จะได้
$$q(x, s) = -kA\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) - kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.13)$$

เริ่มต้นพิจารณา Boundary condition สำหรับตัวกลาง 1 ขึ้นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 Boundary condition สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น

พิจารณารูปที่ 2.2 จะได้ Boundary condition เป็น

$$T_1(0, s) \text{ และ } q_1(0, s) \text{ สำหรับ Surface 1} \quad (2.14)$$

$$T_2(L, s) \text{ และ } q_2(L, s) \text{ สำหรับ Surface 2} \quad (2.15)$$

แทนค่าสมการ Boundary condition (2.14) และ (2.15) ลงในสมการ (2.11) และ (2.13) จะได้

$$T_1(0, s) = A \quad (2.16)$$

$$q_1(0, s) = -kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \quad (2.17)$$

$$T_2(0, s) = A \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) + B \sinh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.18)$$

$$q_2(0, s) = -kA\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) - kB\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \cosh\left(L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right) \quad (2.19)$$

จัดรูปสมการ (2.16) - (2.19) ให้อยู่ในรูป

$$T_1(s) = A(s) \times T_2(s) + B(s) \times q_2(s) \quad (2.20)$$

$$q_1(s) = C(s) \times T_2(s) + D(s) \times q_2(s) \quad (2.21)$$

โดยใช้คุณสมบัติของ Hyperbolic function $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ ช่วยในการจัดรูปแล้วจะได้

$$A(s) = \cosh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \quad (2.22)$$

$$B(s) = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\alpha}{s}} \sinh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \quad (2.23)$$

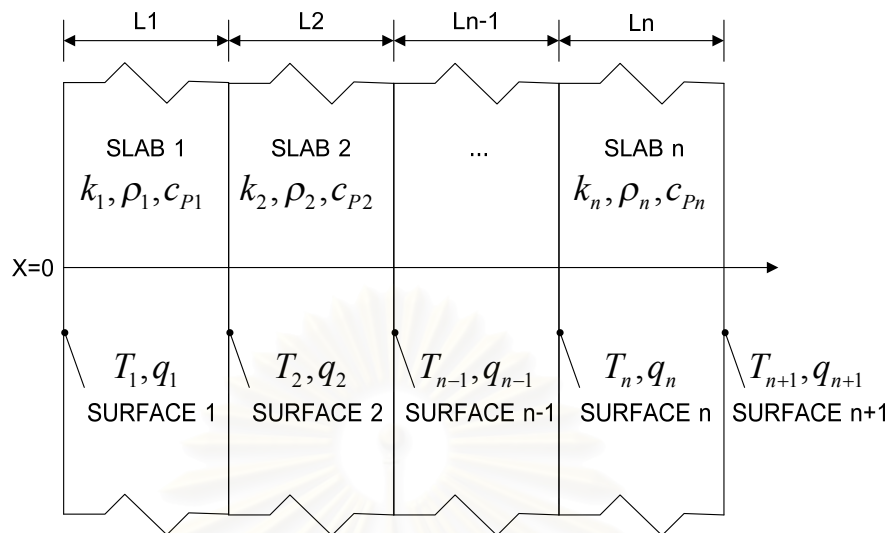
$$C(s) = k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \sinh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \quad (2.24)$$

$$D(s) = \cosh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \quad (2.25)$$

และเมื่อจัดสมการ (2.20) - (2.21) ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_2(s) \\ q_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

สมการที่ (2.26) เราเรียกเมตริกซ์ $\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ ว่า Transmission matrix สำหรับตัวกลาง 1 ชั้น



รูปที่ 2.3 Boundary condition สำหรับตัวกลางหลายชั้น

สำหรับตัวกลางการถ่ายเทความร้อน n ชั้นตามรูปที่ 2.3 จะได้สมการการนำความร้อนที่ผิว n ที่สัมพันธ์กับผิว $n+1$ เป็น

$$\begin{bmatrix} T_n(s) \\ q_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{n+1}(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

และเมื่อแทนค่าสมการ 2.27 สำหรับตัวกลางแต่ละชั้นไปจนถึง n ชั้น จะได้สมการการนำความร้อนที่ผิว 1 ที่สัมพันธ์กับผิว $n+1$ เป็น

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{n+1}(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

ถ้าให้

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

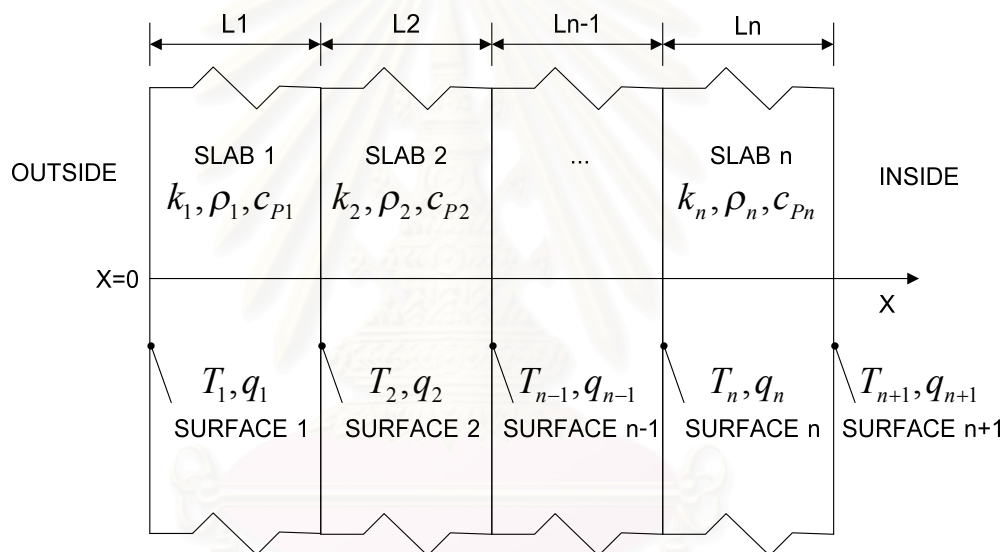
เราเรียกเมตริกซ์ตามสมการที่ (2.29) $\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}$ ว่า Total transmission matrix ซึ่งสามารถเขียนสมการ (2.29) ใหม่เป็น

$$\begin{bmatrix} T_1(s) \\ q_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{n+1}(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

โดยทั่วไปแล้วเราต้องการทราบอัตราการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากเราจะให้อุณหภูมิที่ผิวเป็นค่าที่ขอบเขต ดังนั้นจึงปรับปรุงสมการ (2.30) ใหม่ให้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_1(s) \\ q_{n+1}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(s)/B(s) & -1/B(s) \\ 1/B(s) & -A(s)/B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1(s) \\ T_{n+1}(s) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

ถ้าให้ $T_1 = T_{out}$, $q_1 = q_{out}$ และ $T_{n+1} = T_{in}$, $q_{n+1} = q_{in}$ ตามรูปที่ 2.4 จะสามารถเขียนสมการ (2.31) ใหม่ได้เป็น



รูปที่ 2.4 การกำหนดผนังด้านนอกและด้านใน

$$\begin{bmatrix} q_{out}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(s)/B(s) & -1/B(s) \\ 1/B(s) & -A(s)/B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_{in}(s) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

เรานิยามแต่ละ Element ของ Transmission matrix ให้เป็น $D(s)/B(s) = X(s)$, $1/B(s) = Y(s)$ และ $A(s)/B(s) = Z(s)$ ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้เขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_{out}(s) \\ q_{in}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & -Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out}(s) \\ T_{in}(s) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$\text{เมื่อ } X(s) = D(s) / B(s) \quad \text{เป็น External Response Factors} \quad (2.34)$$

$$Y(s) = 1 / B(s) \quad \text{เป็น Cross Response Factors} \quad (2.35)$$

$$Z(s) = A(s) / B(s) \quad \text{เป็น Internal Response Factors} \quad (2.36)$$

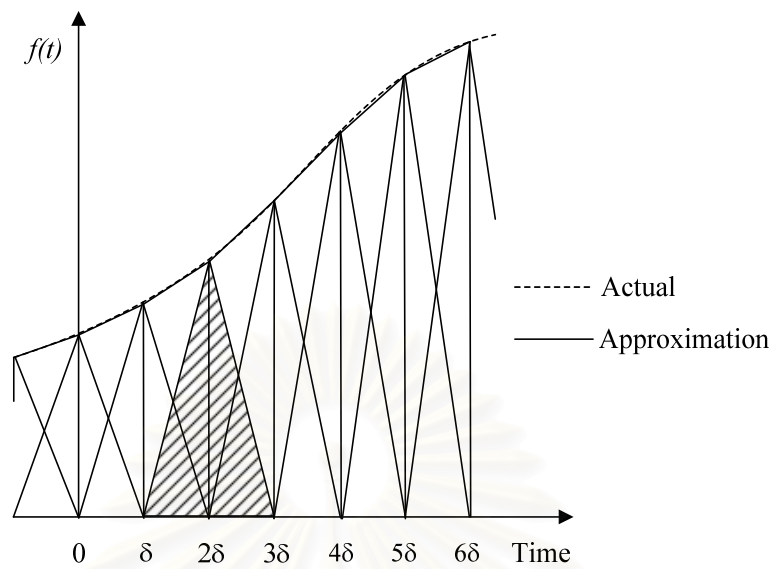
2.4 การหาค่า Response Factors

การคำนวณค่า Response Factors สามารถหาได้โดยวิธี Inverse laplace transform ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วถ้าสามารถหารากของ $B(s) = 0$ ได้อย่างแม่นยำแล้วคำตอบที่ได้จากวิธีนี้จะ เป็นคำตอบแบบแม่นยำด้วย แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วสมการของ $B(s)$ จะซับซ้อน เนื่องจากตัวกลางการถ่ายเทความร้อนมีหลายชั้น พิจารณาได้จากสมการ (2.29) ดังนั้นการหาค่า รากที่ทำให้ $B(s) = 0$ จะต้องหาค่าการแทนค่า s เข้าไปใน $B(s)$ แล้วตรวจสอบคำตอบว่า $B(s) = 0$ ที่ s เท่ากับเท่าใด วิธีนี้เรียกว่า Direct roots finding (Hittle and Bishop, 1983)

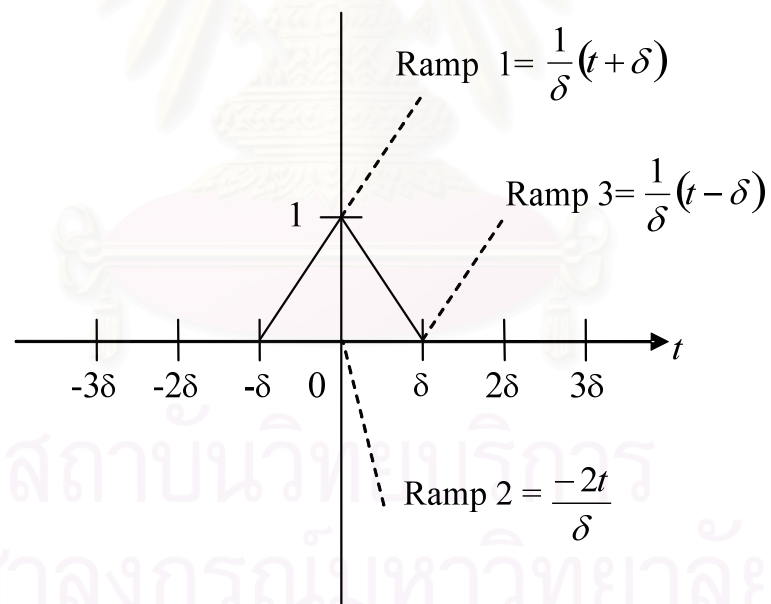
2.4.1 Unit triangular pulse excitation

พิจารณาฟังก์ชันของอุณหภูมิภายนอกที่แปรผันตามเวลา, $f(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง นั้นให้มีลักษณะเป็น Triangular pulse ที่มีความสูงเท่ากับอุณหภูมิที่เวลา t และมีฐานเท่ากับ 2 เท่าของช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้, (δ) ผลรวมของ Triangular pulse ที่ซ้อนทับกันดังรูป 2.5 จะ ประมาณเท่ากับฟังก์ชันต่อเนื่อง, $f(t)$ ถึงแม้ว่าจะเป็น การจำลองฟังก์ชันของอุณหภูมิก็ตามแต่ ผลที่ได้ก็มีค่าใกล้เคียงมาก (Gupta, et al. 1974)

ค่า Response Factors คือชุดคำตอบตั้งแต่เวลา $\delta = 0, 1, 2, \dots, m$ ที่เป็นผลมาจาก Unit triangular pulse ที่มีความสูงเท่ากับ 1 ที่เวลา $t = 0$ และมีฐานเท่ากับ 2δ ช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้คือ $(\delta = 3600$ วินาที) พิจารณาได้จาก รูปที่ 2.6 ซึ่งจะกระทำที่ผนังด้านนอก ค่า Response Factors สำหรับชั่วโมงที่ $\delta = 0$ เป็นผลจาก Ramp 1 ค่า Response Factors สำหรับ ชั่วโมงที่ $\delta = 1$ จะเป็นผลจาก Ramp 1 + Ramp 2 และค่า Response Factors สำหรับชั่วโมงที่ $\delta = 2, 3, \dots, m$ จะเป็นผลจาก Ramp 1 + Ramp 2 + Ramp 3



รูปที่ 2.5 Superposition of unit triangular pulse excitation



รูปที่ 2.6 Unit triangular pulse excitation

พิจารณาจาก รูปที่ 2.6 Unit triangular pulse จะมีค่าเท่ากับ Ramp 1 + Ramp 2 + Ramp 3 สามารถเขียนได้เป็น

$$f(t) = \frac{1}{\delta}(t + \delta) - \frac{2t}{\delta} + \frac{1}{\delta}(t - \delta) \quad (2.37)$$

2.4.2 การแปลงลาปลาซย้อนกลับแบบทั่วไป

การแปลงลาปลาซย้อนกลับแบบทั่วไปจะต้องใช้ทฤษฎี Residue theorem ดังต่อไปนี้ ถ้ามี Function ที่อยู่ใน Domain ของ s , $F(s)$ โดยที่

$$F(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (2.38)$$

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

$$f(t) = L^{-1} \left[\frac{N(s)}{D(s)} \right] = \sum_{m=1}^n \frac{N(\beta_m)}{D'(\beta_m)} e^{\beta_m t} \quad (2.39)$$

ซึ่ง $\frac{N(\beta_m)}{D'(\beta_m)}$ เรียกว่า Residue และ รากของสมการ $D(s) = 0$ เรียกว่า Pole

ถ้า $D(s)$ มีรากที่ $s = 0$ จำนวน 1 ค่า จะได้ $f(t)$ เป็น

$$f(t) = \left[\frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} + \sum_{m=1}^n \frac{N(\beta_m)}{\beta_m D'(\beta_m)} e^{\beta_m t} \quad (2.40)$$

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

$$f(t) = \left[\frac{D(s)t}{B(s)} \right]_{s=0} + \left[\frac{d}{ds} \frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=0} + \sum_{m=1}^n \frac{N(\beta_m)}{\beta_m^2 D'(\beta_m)} e^{\beta_m t} \quad (2.41)$$

2.4.3 การหาค่า Response Factors จากการแปลงลาปลาซย้อนกลับโดยใช้

Residue theorem

การหาค่าชุดสัมประสิทธิ์ของ X (External Response Factors), Y (Cross Response Factors), และ Z (Internal Response Factors) หาได้จากการแปลงลาปลาซย้อนกลับโดยใช้ Residue theorem ตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.4.2 ได้ดังต่อไปนี้

ผลการแปลงลาปลาซสำหรับ Unit triangular pulse, $f(t)$ คือ $\frac{1}{s^2}$ ดังนั้นถ้าพิจารณาสัมประสิทธิ์ของ X -Response Factors จะได้เป็น

$$X(j) = \frac{1}{s^2} \frac{D(s)}{B(s)} \quad (2.42)$$

เนื่องจากรากของสมการที่ (2.42) คือ $s=0$ มี 2 ค่า ซึ่งพิจารณาได้จาก s^2 ดังนั้นการแปลงลาปลาซย้อนกลับสำหรับสมการ (2.42) จะเป็น

$$\xi(t) = \left[\frac{D(s)}{B(s)} t \right]_{s=0} + \left[\frac{d}{ds} \frac{D(s)}{B(s)} \right]_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{\beta_m t} D(s)}{\beta_m^2 B'(\beta_m)} \quad (2.43)$$

สำหรับรากของสมการ $B(s)=0$ ที่จะใช้ในสมการ (2.43) นั้นจะหาจากวิธี Direct root finding คือ การแทนค่า s เข้าไปในสมการแล้วตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายบวกลบของค่า $B(s)$ จะได้ช่วงของค่า s ที่มีคำตอบอยู่ในช่วงนี้จากนั้นจึงนำวิธี Bisection มาหาค่า s ที่ทำให้ $B(s)=0$ ในระดับความละเอียด $\Delta s = 10^{-11}$

สัมประสิทธิ์ของ X -Response Factors จะสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$X(0) = \xi(\delta) \quad (2.44)$$

$$X(1) = \xi(2\delta) - 2\xi(\delta) \quad (2.45)$$

$$X(j) = \xi[(j+1)\delta] - 2\xi(j\delta) + \xi[(j-1)\delta] \quad (2.46)$$

แทนสมการ 2.37 และ 2.43 ลงในสมการ (2.44) – (2.46) จะได้ ชุดสัมประสิทธิ์ของ X (External Response Factors) ส่วนชุดสัมประสิทธิ์ของ Y (Cross Response Factors) และ Z (Internal Response Factors) สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน ดังต่อไปนี้

ชุดสัมประสิทธิ์ของ $X(j)$ (Cross Response Factors)

$$X(0) = \left[\frac{D(s)}{B(s)} + \frac{D'(s)}{\delta B(s)} - \frac{D(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_m} D(s)}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.47)$$

$$X(1) = - \left[\frac{D'(s)}{\delta B(s)} - \frac{D(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_m} (1 - 2e^{\delta\beta_m}) D(s)}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.48)$$

$$X(j) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{D(s) e^{-(j+1)\delta\beta_m} (1 - e^{\delta\beta_m})^2}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.49)$$

ชุดสัมประสิทธิ์ของ $Y(j)$ (Cross Response Factors)

$$Y(0) = \left[\frac{1}{B(s)} - \frac{B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_m}}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.50)$$

$$Y(1) = \left[\frac{B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_m} (1 - 2e^{\delta\beta_m})}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.51)$$

$$Y(j) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-(j+1)\delta\beta_m} (1 - e^{\delta\beta_m})^2}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.52)$$

ชุดสัมประสิทธิ์ของ $Z(j)$ (Internal Response Factors)

$$Z(0) = \left[\frac{A(s)}{B(s)} + \frac{A'(s)}{\delta B(s)} - \frac{A(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-\delta\beta_m} A(s)}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.53)$$

$$Z(1) = - \left[\frac{A'(s)}{\delta B(s)} - \frac{A(s)B'(s)}{\delta(B(s))^2} \right] \Bigg|_{s=0} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-2\delta\beta_m} (1-2e^{\delta\beta_m}) A(s)}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.54)$$

$$Z(j) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A(s) e^{-(j+1)\delta\beta_m} (1-e^{\delta\beta_m})^2}{\delta\beta_m^2 B'(s)} \Bigg|_{s=-\beta_m} \quad (2.56)$$

$$\text{เมื่อ } A'(s) = \frac{d(A(s))}{ds}, B'(s) = \frac{d(B(s))}{ds}, C'(s) = \frac{d(C(s))}{ds} \text{ และ } D'(s) = \frac{d(D(s))}{ds}$$

ซึ่งจะหาได้จากกฎลูกโซ่ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{dA(s)}{ds} & \frac{dB(s)}{ds} \\ \frac{dC(s)}{ds} & \frac{dD(s)}{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'(s) & B'(s) \\ C'(s) & D'(s) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A'_1(s) & B'_1(s) \\ C'_1(s) & D'_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_2(s) & B'_2(s) \\ C'_2(s) & D'_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n(s) & B_n(s) \\ C_n(s) & D_n(s) \end{bmatrix} \\ &+ \cdots + \begin{bmatrix} A_1(s) & B_1(s) \\ C_1(s) & D_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2(s) & B_2(s) \\ C_2(s) & D_2(s) \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A'_n(s) & B'_n(s) \\ C'_n(s) & D'_n(s) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.57)$$

โดยที่ $A'_i(s) = \frac{1}{2} \frac{R_i C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh[\sqrt{s R_i C_i}]$ (2.58)

$$B'_i(s) = \frac{R_i}{2s} \cosh[\sqrt{s R_i C_i}] - \frac{R_i}{2s \sqrt{s R_i C_i}} \sinh[\sqrt{s R_i C_i}] \quad (2.59)$$

$$C'_i(s) = \frac{C_i}{2} \cosh[\sqrt{s R_i C_i}] + \frac{1}{2} \frac{C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh[\sqrt{s R_i C_i}] \quad (2.60)$$

$$D'_i(s) = \frac{1}{2} \frac{R_i C_i}{\sqrt{s R_i C_i}} \sinh[\sqrt{s R_i C_i}] \quad (2.61)$$

ค่า Heat flux ที่ผนังด้านในเป็น

$$q''_{in,t} = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j T_{i,t-j\delta} \quad (2.62)$$

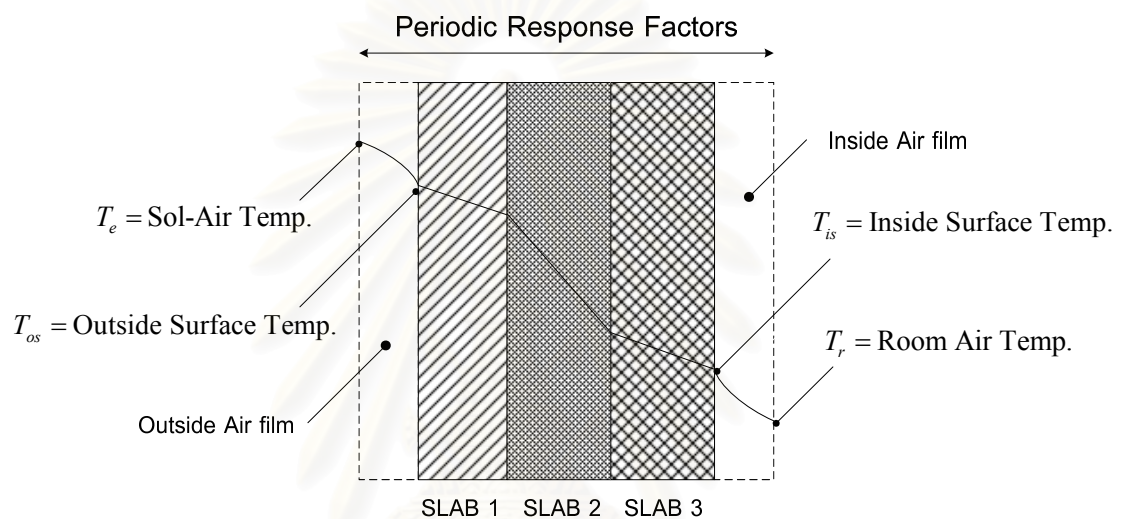
ค่า Heat flux ที่ผนังด้านนอกเป็น

$$q''_{out,t} = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (2.63)$$

สมการที่ (2.62) และ (2.63) เป็นสมการหาค่าความร้อนจากการนำที่ผิวด้านในและด้านนอกตามลำดับ โดยที่ค่า Heat flux ที่ผนังด้านในตามสมการที่ (2.62) คือค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาสู่ห้องหรือ Heat gain นั้นเอง

2.5 การหาค่า Periodic Response Factors (PRF) โดยวิธี Direct root finding

การคำนวณค่า Heat gain ผ่านกรอบอาคารโดยใช้ค่า Response Factors จะเป็นการคำนวณจากอุณหภูมิที่ผิวของของแข็งทั้งด้านนอกและด้านในที่แปรเปลี่ยนตามเวลา ส่วนการใช้ค่า Periodic Response Factors (PRF) ในวิธี RTSM จะเป็นการคำนวณจากอุณหภูมิที่ผิวของชั้นอากาศด้านนอกที่แปรเปลี่ยนตามเวลาและอุณหภูมิที่ผิวของชั้นอากาศด้านในคงที่ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 Periodic Response Factors (PRF)

การคำนวณค่า PRF โดยวิธี Direct root finding จะสามารถหาได้ 2 วิธี คือ 1.หาค่า PRF จากสูตรของ Response Factors โดยตรง (Spitler, et al. 1997) และ 2.หาค่า PRF จากตารางค่า CTFs ใน 1997 ASHRAE Fundamentals Handbook (Spitler and Fisher, 1997)

2.5.1 การหาค่า Periodic Response Factor จาก Response Factors

จากสมการ Heat flux ที่ผนังด้านในเป็น

$$q_0'' = \sum_{j=0}^n Y_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^n Z_j T_{i,t-j\delta} \quad (2.64)$$

โดยที่ q_0'' = Heat flux ที่ผนังด้านในที่ชั่วโมงปัจจุบัน (W / m^2)

n = จำนวนจริงที่มากพอที่ทำให้สมการลู่เข้า (Hittle, 1981 แนะนำให้ใช้ $n = 20$)

Z_j = Internal Response Factors

Y_j = Cross Response Factors

$T_{i,t-j\delta}$ = Inside surface temperature j ชั่วโมงที่ผ่านมา ($^{\circ}C$)

$T_{o,t-j\delta}$ = Outside surface temperature j ชั่วโมงที่ผ่านมา ($^{\circ}C$)

δ = Time interval (ปกติ 3600 วินาที หรือ 1 ชั่วโมง)

ถ้า Boundary condition ของอุณหภูมิเป็นคาบ (Steady periodic) ภายใน 24 ชั่วโมง สามารถจัดเรียงสมการ (2.64) ใหม่เป็น

$$\begin{aligned}
 q_{\theta}'' &= \sum_{j=0}^{23} Y_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{23} Z_j T_{i,t-j\delta} \\
 &+ \sum_{j=24}^{47} Y_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=24}^{47} Z_j T_{i,t-j\delta} \\
 &+ \sum_{j=48}^{63} Y_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=48}^{63} Z_j T_{i,t-j\delta} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.65}$$

และเมื่อแยกเทอมแรกของ Z - Summation ของสมการ (2.65) ออกจะได้

$$\begin{aligned}
 q_{\theta}'' &= \sum_{j=0}^{23} Y_j T_{o,t-j\delta} - Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=0}^{23} Z_j T_{i,t-j\delta} \\
 &+ \sum_{j=24}^{47} Y_j T_{o,t-j\delta} - Z_{24} T_{i,t-24} - \sum_{j=25}^{47} Z_j T_{i,t-j\delta} \\
 &+ \sum_{j=48}^{63} Y_j T_{o,t-j\delta} - Z_{48} T_{i,t-48} - \sum_{j=48}^{63} Z_j T_{i,t-j\delta} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.66}$$

สำหรับ Steady periodic function โดยการบังคับให้รูปแบบของอุณหภูมิเหมือนเดิมทุกวัน (24 ชั่วโมง) ดังนั้น $T_{i,t}, T_{i,t-24}, T_{i,t-48}, \dots$ จะมีค่าเท่ากัน และสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่เวลาเดียวกันของทุกวันสามารถนำมารวมกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ตัวใหม่ซึ่งเรียกว่า Periodic Response Factors, Z_{pj} ในที่นี้คือ Internal Periodic Response Factors

$$Z_{po} = Z_0 + Z_{24} + Z_{48} + \dots \quad (2.67)$$

$$Z_{p1} = Z_1 + Z_{25} + Z_{49} + \dots \quad (2.68)$$

สำหรับ Cross Periodic Response Factors Y_{pj} ก็เช่นเดียวกัน คือ

$$Y_{po} = Y_0 + Y_{24} + Y_{48} + \dots \quad (2.69)$$

$$Y_{p1} = Y_1 + Y_{25} + Y_{49} + \dots \quad (2.70)$$

พิจารณาสมการ (2.67) และ (2.68) จะได้ผลรวมของ Periodic Response Factors จาก Response Factors เป็น

$$Z_{pj} = \sum_{k=0}^n Z_{j+24k} \quad (2.71)$$

และเช่นกันเมื่อพิจารณาสมการ (2.69) และ (2.70) จะได้

$$Y_{pj} = \sum_{k=0}^n Y_{j+24k} \quad (2.72)$$

โดยที่ Y_j, Z_j = Cross and Internal Response Factors

Y_{pj}, Z_{pj} = Cross and Internal Periodic Response Factors

n = เลขจำนวนเต็มที่มากที่สุดที่ทำให้ Y_{pj} และ Z_{pj} เป็นค่าที่มีความ

คลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด, 120 ค่า (Spitler, et al. 1997)

เมื่อแทนค่า Periodic Response Factors (2.71) และ (2.72) ลงในสมการ (2.65) จะได้สมการ Heat flux ในเงื่อนไขของ Steady periodic คือ

$$q''_0 = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{23} Z_{pj} T_{i,t-j\delta} \quad (2.73)$$

เนื่องจากการคิดชั้นอากาศที่ผิวของผนังและหลังคา ทั้งภายนอกและภายในรวมเป็นชั้นของตัวกลางการนำความร้อนชั้นหนึ่งด้วย ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวผนังและหลังคาทั้งภายนอกและ

ภายในจะถูกแทนที่ด้วยอุณหภูมิอากาศ ถ้าสมมติให้อุณหภูมิภายในห้องมีค่าคงที่เป็น T_{rc} จะทำให้สมการ (2.73) เป็น

$$q_{\theta}'' = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} T_{o,t-j\delta} - T_{rc} \sum_{j=0}^{23} Z_{pj} \quad (2.74)$$

เนื่องจากผลรวมของ Internal Periodic Response Factors, Z_p เท่ากับ ผลรวมของ Internal Response Factors, Z จึงทำให้ $\sum Z_p$ เท่ากับผลรวมของ Cross Periodic Response Factors, Y_p ด้วย และเมื่อพิจารณาให้อุณหภูมิอากาศภายนอกเป็นแบบ Steady state periodic function (Sol-air temperature, t_e) สมการ (2.74) จะเขียนได้เป็น

$$q_{\theta}'' = \sum_{j=0}^{23} Y_{pj} (t_{e,\theta-j\delta} - t_{rc}) \quad (2.75)$$

สำหรับค่า External Periodic Response Factors, X_{pj} ก็สามารถหาได้จาก External Response Factors, X_j ในรูปสมการที่ (2.71) หรือ (2.72) เช่นกัน คือ

$$X_{pj} = \sum_{k=0}^n X_{j+24k} \quad (2.76)$$

2.5.2 การหาค่า Periodic Response Factor จากค่าสัมประสิทธิ์ CTFs

จากสมการสัมประสิทธิ์ CTFs (1993 ASHRAE Fundamentals Handbook) ที่ใช้ในการคำนวณ Heat gain โดยวิธี Transfer Function Method (TFM) ค่าสัมประสิทธิ์ CTFs ของผนัง 41 ชนิดและหลังคา 42 ชนิด จะถูกคำนวณในความละเอียด Order 6 ไว้ก่อนและถูกเก็บในรูปของตารางเพื่อความง่ายในการใช้งาน หรือถ้ามีผนังและหลังคาชนิดอื่นๆนอกเหนือจากนี้ก็สามารถใช้โปรแกรม TFMTAB คำนวณได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ CTFs นี้จะเป็นฟังก์ชันของคุณสมบัติของตัวกลางการนำความร้อนเท่านั้น

$$q_{e,\theta} = \sum_{n=0} b_n (T_{e,\theta-n\delta}) - \sum_{n=1} d_n (q_{e,\theta-n\delta}) - T_{rc} \sum_{n=0} c_n \quad (2.77)$$

โดยที่ $q_{e,\theta}$ = Heat gain ที่เวลา θ (W / m^2)

θ = เวลาที่ชั่วโมงปัจจุบัน θ

δ = Time interval (3600 วินาที)

n = จำนวนชั่วโมงที่ผ่านมา (ชั่วโมง)

T_{rc} = Indoor design temperature ($^{\circ}C$)

$T_{e,\theta}$ = Sol-air temperature ที่เวลา θ ($^{\circ}C$)

b_n, c_n, d_n = Conduction Transfer Function Coefficients

จากสมการที่ (2.77) นั้น สามารถเขียนค่า Heat gain ทุก 24 ชั่วโมง โดยใช้ความละเอียดที่ Order 6 และใช้คุณสมบัติ $\sum b_n = \sum c_n$ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะ Steady state จะได้

$$q_1 = \sum_{n=0}^6 b_n T_{e,1-n\delta} - \sum_{n=1}^6 d_n q_{1-n\delta} - T_{rc} \sum_{n=0}^6 b_n \quad (2.78)$$

$$q_2 = \sum_{n=0}^6 b_n T_{e,2-n\delta} - \sum_{n=1}^6 d_n q_{2-n\delta} - T_{rc} \sum_{n=0}^6 b_n \quad (2.79)$$

$$q_3 = \sum_{n=0}^6 b_n T_{e,3-n\delta} - \sum_{n=1}^6 d_n q_{3-n\delta} - T_{rc} \sum_{n=0}^6 b_n \quad (2.80)$$

⋮

$$q_{24} = \sum_{n=0}^6 b_n T_{e,24-n\delta} - \sum_{n=1}^6 d_n q_{24-n\delta} - T_{rc} \sum_{n=0}^6 b_n \quad (2.81)$$

จัดรูปค่า Heat gain สมการ (2.78) ถึง (2.81) ทั้ง 24 ชั่วโมงให้อยู่ในรูปเมตริกซ์

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & d_3 & d_2 & d_1 \\ d_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & d_3 & d_2 \\ d_2 & d_1 & 1 & 0 & 0 & \cdots & d_3 \\ & & & \cdots & & & \\ & & & \cdots & d_3 & d_2 & d_1 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 & 0 & 0 & \cdots & b_2 & b_1 \\ b_1 & b_0 & 0 & 0 & \cdots & b_2 \\ b_2 & b_1 & b_0 & 0 & 0 & \cdots \\ & & & \cdots & & \\ & & & & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} T_{e,1} \\ T_{e,2} \\ T_{e,3} \\ \vdots \\ T_{e,24} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{rc} \sum b_n \\ \vdots \\ T_{rc} \sum b_n \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

สมการเมตริกซ์ (2.82) สามารถเขียนได้เป็น

$$q = D^{-1} B T_e - D^{-1} B T_{rc} = D^{-1} B (T_e - T_{rc}) \quad (2.83)$$

เปรียบเทียบสมการ (2.83) กับสมการ (2.75) พบว่า $Y = D^{-1} B =$ Periodic Response Factors จะได้

$$q = Y (T_e - T_{rc}) \quad (2.84)$$

โดยที่ q = Column vector ของ Conductive heat flux

Y = เมตริกซ์ของ Periodic Response Factors

T_e = Column vector ของ Sol-air temperature

T_{rc} = Column vector ของ T_{rc} ซึ่งเท่ากันทุกแถว

สำหรับขั้นตอนของการสร้าง PRF จากตาราง CTFs จะสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1. อ่านค่า d และ b จากตาราง CTFs ของ ASHRAE RP-626 (Falconer, et al. 1993)
2. สร้างเมตริกซ์ D และ B
3. คำนวณ D^{-1} และ $D^{-1} B$ ตามลำดับ
4. ดึงค่า PRF ออกจากเมตริกซ์ $D^{-1} B$

2.6 การหาค่า PRF โดยวิธี Frequency Domain Regression (FDR Method)

2.6.1 Theoretical frequency characteristics of heat conduction through a multilayer construction

พิจารณารูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_1, q_1 และ T_{n+1}, q_{n+1} ในรูปของ Transmission matrix จะเป็น

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{n+1} \\ q_{n+1} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

ในทางกลับกันความสัมพันธ์ระหว่าง T_{n+1}, q_{n+1} และ T_1, q_1 จะเป็น

$$\begin{bmatrix} T_{n+1} \\ q_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n-1} & B_{n-1} \\ C_{n-1} & D_{n-1} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

เมื่อ $A_n = \cosh(L_i \sqrt{s/\alpha_i})$

$$B_n = R_i \sinh(L_i \sqrt{s/\alpha_i}) / (L_i \sqrt{s/\alpha_i})$$

$$C_n = L_i \sqrt{s/\alpha_i} \sinh(L_i \sqrt{s/\alpha_i}) / R_i$$

$$D_n = \cosh(L_i \sqrt{s/\alpha_i})$$

ถ้าให้ Surface (1) = Outside และ Surface (n+1) = Inside จะทำให้สมการ (2.86) เป็น

$$\begin{bmatrix} T_{in} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ q_{out} \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

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

เป็นเมตริกซ์ที่คูณจาก Inside ไป Outside นั่นคือ

$$\begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{in} & B_{in} \\ C_{in} & D_{in} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{out} & B_{out} \\ C_{out} & D_{out} \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

เนื่องจาก Total transmission matrix จะมี Det เป็น 1 เสมอ ดังนั้นจัดรูปสมการ (2.87) ในอยู่รูป Heat flux ได้ดังต่อไปนี้ สมการเมตริกซ์ (2.87) สามารถแยกได้เป็น 2 สมการคือ

$$T_{in} = A(s)T_{out} + B(s)q_{out} \quad (2.89)$$

$$q_{in} = C(s)T_{out} + D(s)q_{out} \quad (2.90)$$

จัดรูปสมการ (2.89) ใหม่ได้เป็น

$$q_{out} = \frac{1}{B(s)}T_{in} - \frac{A(s)}{B(s)}T_{out} \quad (2.91)$$

แทนสมการ (2.91) ลงในสมการ (2.90) จะได้

$$q_{in} = C(s)T_{out} + D(s) \left[\frac{1}{B(s)}T_{in} - \frac{A(s)}{B(s)}T_{out} \right] \quad (2.92)$$

$$q_{in} = C(s)T_{out} + \frac{D(s)}{B(s)}T_{in} - \frac{D(s)A(s)}{B(s)}T_{out} \quad (2.93)$$

$$q_{in} = \left[C(s) - \frac{D(s)A(s)}{B(s)} \right] T_{out} + \frac{D(s)}{B(s)} T_{in} \quad (2.94)$$

พิจารณาเทอม $\left[C(s) - \frac{D(s)A(s)}{B(s)} \right] = \left[\frac{C(s)B(s) - D(s)A(s)}{B(s)} \right]$ ของสมการ (2.94)

จากคุณสมบัติ $A(s)B(s) - C(s)B(s) = 1$ ดังนั้น $C(s)B(s) - D(s)A(s) = -1$ แทนค่าแล้วจะได้

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

จะทำให้จัดรูป q_{in} สมการ (2.94) ใหม่ได้เป็น

$$q_{in} = \frac{-1}{B(s)}T_{out} + \frac{D(s)}{B(s)}T_{in} \quad (2.95)$$

$$q_{out} = \frac{-A(s)}{B(s)}T_{out} + \frac{1}{B(s)}T_{in} \quad (2.96)$$

จะได้
$$\begin{bmatrix} q_{out} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A(s)/B(s) & 1/B(s) \\ -1/B(s) & D(s)/B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ T_{in} \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

หรือ
$$\begin{bmatrix} q_{in} \\ q_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D(s)/B(s) & -1/B(s) \\ 1/B(s) & -A(s)/B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{in} \\ T_{out} \end{bmatrix} \quad (2.98)$$

พิจารณาสมการ (2.97) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_{out} \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_x & G_y \\ -G_y & G_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{out} \\ T_{in} \end{bmatrix} \quad (2.99)$$

โดยที่ตัวแปรทางขวาของสมการ (2.99) นิยามดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} G_x(s) &= A(s)/B(s) && \text{External} \\ G_y(s) &= 1/B(s) && \text{Cross} \\ G_z(s) &= D(s)/B(s) && \text{Internal} \end{aligned} \right\} \quad (2.100)$$

สมการ (2.100) เรียกว่า External, Cross และ Internal transfer function ตามลำดับ ซึ่ง จะทำการแทนค่า s ด้วย $j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$) ลงในสมการที่ (2.100) จะได้ Complex function ของ $G_x(j\omega)$, $G_y(j\omega)$ และ $G_z(j\omega)$ ตามลำดับ และเรียกว่า Theoretical frequency characteristics ของ External, Cross และ Internal heat conduction ตามลำดับ Theoretical frequency characteristics จะมีคุณสมบัติดังนี้

$$|G(j\omega)| = \text{Amplitude} \quad (2.101)$$

$$\tan^{-1} \left[\frac{\text{imag}(G(j\omega))}{\text{real}(G(j\omega))} \right] = \text{Phase lag} \quad (2.102)$$

เมื่อ $\text{imag}(G(j\omega)) = \text{Imaginary part}$ ของ $G(j\omega)$

$\text{real}(G(j\omega)) = \text{Real part}$ ของ $G(j\omega)$

2.6.2 การจำลอง Polynomial s-transfer function

Theoretical frequency characteristics, $G(j\omega)$ ที่เป็นสมการจริง สามารถจำลองให้เป็น Polynomial s-transfer function, $\tilde{G}(j\omega)$ โดยเริ่มจากสมมติให้ Transfer function ในรูปแบบของ Hyperbolic s-transfer function, $G(s)$ แสดงให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนฟังก์ชัน Polynomial 2 ชุด ดังต่อไปนี้

$$\tilde{G}(s) = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_r s^r}{1 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_m s^m} = \frac{\tilde{B}(s)}{1 + \tilde{A}(s)} \quad (2.103)$$

$$\text{เมื่อ } \tilde{B}(s) = \beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_r s^r \quad (2.104)$$

$$\tilde{A}(s) = \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_m s^m \quad (2.105)$$

α_i และ β_i เป็นสัมประสิทธิ์จำนวนจริง m และ r เป็นเลขจำนวนเต็มซึ่ง Order สูงสุดของ Polynomial โดยทั่วไป $r \leq m$ และเมื่อแทนค่า $s = j\omega$ ในสมการ (2.103) จะได้

$$\tilde{G}(j\omega) = \frac{\beta_0 + \beta_1(j\omega) + \beta_2(j\omega)^2 + \dots + \beta_r(j\omega)^r}{1 + \alpha_1(j\omega) + \alpha_2(j\omega)^2 + \dots + \alpha_m(j\omega)^m} \quad (2.106)$$

Complex function $G(j\omega)$ ของ Theoretical frequency characteristics สามารถเขียนได้เป็น 2 ส่วน คือค่า Real part และ Imaginary part ที่ k^{th} Frequency point

$$G(j\omega_k) = G_k = P_k + jQ_k \quad (2.107)$$

เพื่อที่จะหาค่าสัมประสิทธิ์ของ Polynomial s-transfer function จะใช้วิธีการ Sum of squared absolute errors ซึ่ง Errors นี้จะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยเทอม $[1 + \tilde{A}(j\omega_k)]$ และ Errors ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Frequency ที่เพิ่มขึ้นอีกเทอมหนึ่งด้วย ซึ่งเรียก function ที่จะ Minimize errors นี้ว่า Objective function, $J(\theta)$

ถ้า Polynomial ที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับ Theoretical frequency characteristics จะได้ว่า

$$G(j\omega_k) \approx \frac{\tilde{B}(j\omega_k)}{1 + \tilde{A}(j\omega_k)} \quad (2.108)$$

$$\therefore G(j\omega_k)[1 + \tilde{A}(j\omega_k)] \approx \tilde{B}(j\omega_k) \quad (2.109)$$

Errors จะเป็น Absolute errors ของเทอมซ้ายและขวาในสมการ (2.109)

$$|error| = |\tilde{B}(j\omega_k) - G(j\omega_k)[1 + \tilde{A}(j\omega_k)]|$$

ถ้าให้ $J(\theta)$ เป็น Sum squared absolute errors จะได้เป็น

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N |\tilde{B}(j\omega_k) - G(j\omega_k)[1 + \tilde{A}(j\omega_k)]|^2 \quad (2.110)$$

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N |\tilde{B}(j\omega_k) - G(j\omega_k)\tilde{A}(j\omega_k) - G(j\omega_k)|^2$$

นิยามเมตริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\theta^T = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3 \quad \beta_4 \quad \dots \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \alpha_4 \quad \dots] \quad (2.111)$$

$$g^T = [G_1 \quad G_2 \quad G_3 \quad \dots \quad G_N] \quad (2.112)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & j\omega_1 & (j\omega_1)^2 & (j\omega_1)^3 & \dots & -j\omega_1 G_1 & -(j\omega_1)^2 G_1 & -(j\omega_1)^3 G_1 & \dots \\ 1 & j\omega_2 & (j\omega_2)^2 & (j\omega_2)^3 & \dots & -j\omega_2 G_2 & -(j\omega_2)^2 G_2 & -(j\omega_2)^3 G_2 & \dots \\ 1 & j\omega_3 & (j\omega_3)^2 & (j\omega_3)^3 & \dots & -j\omega_3 G_3 & -(j\omega_3)^2 G_3 & -(j\omega_3)^3 G_3 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & j\omega_N & (j\omega_N)^2 & (j\omega_N)^3 & \dots & -j\omega_N G_N & -(j\omega_N)^2 G_N & -(j\omega_N)^3 G_N & \dots \end{bmatrix} \quad (2.113)$$

เมตริกซ์ H มีขนาด $N \times (r+m+1)$ เมตริกซ์ θ มีขนาด $(r+m+1) \times 1$ และเมตริกซ์ g มีขนาด $N \times 1$ จากนิยามของ Objective function, $J(\theta)$ และนิยามของ เมตริกซ์ H , θ และ g ทำให้เขียน $J(\theta)$ จากรูปแบบของ Sum of squared absolute errors ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$J(\theta) = (H\theta - g)^T \Lambda (H\theta - g) \quad (2.114)$$

โดยที่ $\Lambda =$ Identity matrix ขนาด $N \times N$

สำหรับการทำ Minimize objective function, $J(\theta)$ นั่นคือ ถ้ามีเมตริกซ์สัมประสิทธิ์ $\hat{\theta}$ ที่ทำให้ $J(\theta)$ มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดคือ $\hat{\theta} = \min \{J(\theta)\}$ จะสามารถหาสัมประสิทธิ์ $\hat{\theta}$ ได้โดยการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.114)

$$\left. \frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\hat{\theta}} = \left. \frac{\partial}{\partial \theta} (H\theta - g)^T \Lambda (H\theta - g) \right|_{\hat{\theta}} = 0^T \quad (2.115)$$

จะได้ $(H^T \Lambda H) \hat{\theta} = H^T \Lambda g \quad (2.116)$

ถ้าให้ $\Gamma = \text{real}(H^T \Lambda H)$ และ $\Theta = \text{real}(H^T \Lambda g)$ จะทำให้สมการ (2.116) เป็น

$$\Gamma \hat{\theta} = \Theta \quad (2.117)$$

$$\hat{\theta} = \Gamma^{-1} \Theta \quad (2.118)$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของ Polynomial s-transfer function ได้จากสมการ (2.118) และเนื่องจากการจำลอง Polynomial s-transfer function ค่า r และ m ที่เป็นเลขชี้ Order นั้นจะมีหลายชุดที่ทำให้แบบจำลองใกล้เคียงกับ Theoretical frequency characteristics ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความน่าเชื่อถือเพื่อเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดก่อน ในวิทยานิพนธ์นี้จะตรวจสอบ Polynomial s-transfer function ของ Cross PRF โดยใช้ค่า R^2 ดังต่อไปนี้

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\tilde{G}(j\omega_k) - \bar{G})^2}{\sum_{k=1}^N (G(j\omega_k) - \bar{G})^2} \quad (2.119)$$

โดยที่ $\bar{G} = \frac{\sum_{k=1}^N G(j\omega_k)}{N} \quad (2.120)$

สำหรับเงื่อนไขการเลือกแบบจำลองของ Polynomial s-transfer function คือเลือกแบบจำลองที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากที่สุด

2.6.3 การคำนวณค่า PRF จาก Polynomial s-transfer function

การคำนวณค่า Cross PRF จาก Polynomial s-transfer function จะอ้างอิงจากบทความของ Wang and Chen (2002) โดยหาจากการแปลงลาปลาซย้อนกลับสมการ $\tilde{G}(s)/s^2$ จะได้

$$Y_{P0} = U + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\Delta\tau} (1 - e^{-s_i\Delta\tau}) \frac{1 - e^{-(M-1)s_i\Delta\tau}}{1 - e^{-Ms_i\Delta\tau}} \quad (2.121)$$

$$Y_{Pj} = -\sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\Delta\tau} (1 - e^{-s_i\Delta\tau})^2 \frac{e^{-(j-1)s_i\Delta\tau}}{1 - e^{-Ms_i\Delta\tau}} \quad \text{เมื่อ } (1 \leq j \leq M-1) \quad (2.122)$$

เมื่อ Y_{Pj} = Cross Periodic Response Factors

j = 0, 1, 2, ..., $M - 1$

M = 24

$\Delta\tau$ = Time interval, 1 Hour

δ = Residue = $-\tilde{B}(-s_i) / [s_i^2 \tilde{A}'(-s_i)]$

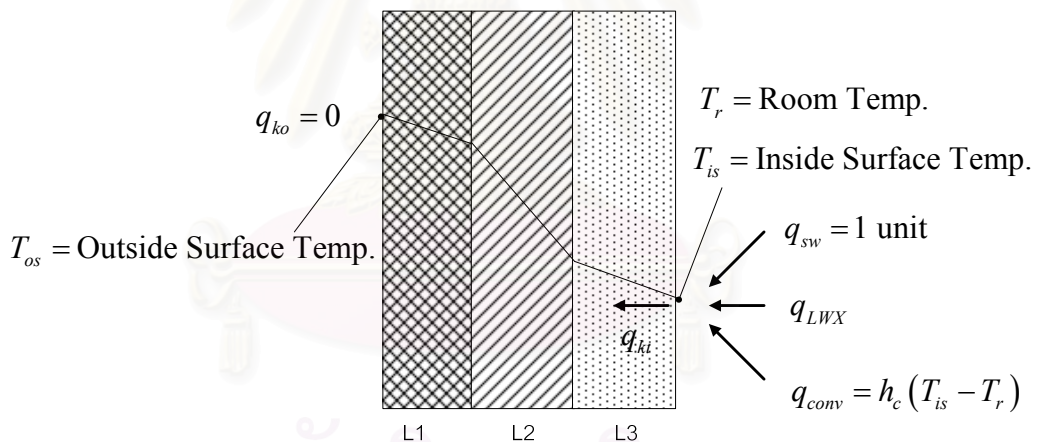
m = จำนวน Root ของ Polynomial s-transfer function

U = U-Factor ($W / m^2.K$)

s = Roots

2.7 การหาค่า Radiant Time Factor จากวิธีสมดุลความร้อน (Heat balance method)

ค่าสัมประสิทธิ์ Radiant Time Factors (RTF) คือการตอบสนองของโซนที่มีต่ออากาศภายในโซนจากค่าความร้อนของการแผ่รังสี จะใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Heat gain จากการแผ่รังสีให้เป็นภาระการทำความเย็นที่ชั่วโมงใดๆ จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ Solar-RTF และ Nonsolar-RTF สำหรับผนังและหลังคาจะใช้ค่า Nonsolar-RTF แบบจำลองของโซนมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร และสูง 3 เมตร ประกอบด้วยผนัง 4 ด้าน พื้น 1 ด้านและหลังคา 1 ด้าน ค่า RTF หาได้จากการให้ค่า Radiant heat gain pulse 1 หน่วย ที่ชั่วโมงที่ 1 และซ้ำทุกๆ 24 ชั่วโมง กระจายอย่างสม่ำเสมอทุกพื้นผิวสำหรับ Nonsolar-RTF และกระจายอย่างสม่ำเสมอเฉพาะที่พื้นสำหรับ Solar-RTF ตามลำดับ ความร้อนนี้จะทำให้อุณหภูมิที่ผิวภายในเพิ่ม และจะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อากาศโดยการพาเป็นภาระการทำความเย็น เมื่อนำภาระการทำความเย็นแต่ละชั่วโมงหารด้วยผลรวมของภาระการทำความเย็นรวมจะได้ค่า RTF ซึ่งผลรวมของค่า RTF จะต้องเท่ากับ 1 เสมอ



รูปที่ 2.8 แสดงการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านในของผนังหรือหลังคา

สมการการนำความร้อนผ่านผนังหรือหลังคาจาก Response Factors เป็น

$$q''_{ki,\theta} = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{os,\theta-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j T_{is,\theta-j\delta} \quad (2.123)$$

$$q''_{k0,\theta} = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{os,\theta-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{is,\theta-j\delta} \quad (2.124)$$

สมการสมดุลความร้อนที่ผนังด้านในเป็น

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2.125)$$

เมื่อ q''_{LWX} = ฟลักซ์ความร้อนสุทธิจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาว
ระหว่างผิวภายในโซน, (W/m^2)

$$q''_{SW} = \text{ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีคลื่นสั้นจากแสงไฟ, } (W/m^2)$$

$$q''_{LWS} = \text{ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีคลื่นยาวจากอุปกรณ์ภายใน, } (W/m^2)$$

$$q''_{ki} = \text{ฟลักซ์ความร้อนโดยการนำที่ผิวด้านในของโซน, } (W/m^2)$$

$$q''_{sol} = \text{ฟลักซ์ความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ที่ผิวด้านในของโซน, } (W/m^2)$$

$$q''_{conv} = \text{ฟลักซ์ความร้อนจากการพาที่ผิวด้านในของโซน, } (W/m^2)$$

สมมติให้โซนได้รับ Radiant heat flux 100% และ Convection heat flux 0% และผนังด้านในไม่ได้รับความร้อนจากรังสีคลื่นยาวจากอุปกรณ์ภายในและจากแสงอาทิตย์ ทิศทางของความร้อนไปทางซ้ายมือเป็นลบ ยกเว้นความร้อนสุทธิจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวของพื้นผิวภายในโซนเข้าสู่ผนังเป็นลบออกจากผนังเป็นบวก พิจารณาจากรูปที่ 2.7 สมการ (2.125) จะลดรูปเป็น

$$-q''_{SW} + q''_{LWX} - h_{ci}(T_r - T_{is}) = q''_{ki} \quad (2.126)$$

แทนค่า q''_{ki} ในสมการ (2.126) ด้วยสมการที่ (2.123) จะได้

$$-q''_{SW} + q''_{LWX} + h_{ci}T_{is,0} - h_{ci}T_r = \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{os,0-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Z_j T_{is,0-j\delta} \quad (2.127)$$

$$\text{ให้ } q''_{SW} = 1 \quad \text{เมื่อ } j = 0, 24, 48, \dots, \infty$$

$$q''_{SW} = 0 \quad \text{เมื่อ } j \neq 0, 24, 48, \dots, \infty$$

ที่ผิวด้านนอกจะสมมติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกนอกโซน เพราะต้องการให้ความร้อนที่ให้กับโซนเปลี่ยนเป็นภาระการทำความเย็นทั้งหมด ดังนั้นสมการสมดุลความร้อนที่ผนังด้านนอกจะเป็น

$$0 = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{os,\theta-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{is,\theta-j\delta} \quad (2.128)$$

จัดรูปสมการ (2.127) ใหม่ให้อยู่ในรูปของอนุกรมทมิภายในปัจจุบันได้เป็น

$$-q''_{SW} + q''_{LWX} + h_{ci} T_{is,\theta} - h_{ci} T_r = Y_o T_{os,\theta} + \sum_{j=1}^{\infty} Y_j T_{os,\theta-j\delta} - Z_o T_{is,\theta} - \sum_{j=1}^{\infty} Z_j T_{is,\theta-j\delta} \quad (2.129)$$

$$T_{is,\theta} = \frac{Y_o T_{os,\theta} + \sum_{j=1}^{\infty} Y_j T_{os,\theta-j\delta} - \sum_{j=1}^{\infty} Z_j T_{is,\theta-j\delta} + q''_{SW} - q''_{LWX} + h_{ci} T_r}{Z_o + h_{ci}} \quad (2.130)$$

จัดรูปสมการ (2.128) ใหม่ให้อยู่ในรูปอนุกรมทมิภายนอกปัจจุบันจะได้เป็น

$$0 = X_o T_{os,\theta} + \sum_{j=1}^{\infty} X_j T_{os,\theta-j\delta} - Y_o T_{is,\theta} - \sum_{j=1}^{\infty} Y_j T_{is,\theta-j\delta} \quad (2.131)$$

$$T_{os,\theta} = \frac{Y_o T_{is,\theta} + \sum_{j=1}^{\infty} Y_j T_{is,\theta-j\delta} - \sum_{j=1}^{\infty} X_j T_{os,\theta-j\delta}}{X_o} \quad (2.132)$$

จัดสมการ (2.130) และ (2.132) ให้อยู่ในรูปของ Periodic function จะได้

$$T_{is,\theta} = \frac{Y_{p0} T_{os,\theta} + \sum_{j=1}^{23} Y_{pj} T_{os,\theta-j\delta} - \sum_{j=1}^{23} Z_{pj} T_{is,\theta-j\delta} + q''_{SW} - q''_{LWX} + h_{ci} T_r}{Z_{p0} + h_{ci}} \quad (2.133)$$

$$T_{os,\theta} = \frac{Y_{p0} T_{is,\theta} + \sum_{j=1}^{23} Y_{pj} T_{is,\theta-j\delta} - \sum_{j=1}^{23} X_{pj} T_{os,\theta-j\delta}}{X_{p0}} \quad (2.134)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_c หาได้จากค่าในตารางที่ 2.2 ที่มา: Heating, ventilating and air conditioning analysis and design. 5^{ed} (McQuiston, et al. 2000)

ตารางที่ 2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผนังด้านใน

ทิศทางของพื้นผิว	ทิศการถ่ายเทความร้อน	$h_c, (W/m^2.K)$
แนวระนาบ	ขึ้น	4.15
เอียง 45	ขึ้น	3.98
แนวตั้ง	ระนาบ	3.18
เอียง 45	ลง	2.39
แนวระนาบ	ลง	1.02

ค่าความร้อนสุทธิจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวของพื้นผิวภายในโซน q''_{LWX} หาได้จากแบบจำลองของ Walton's mean radiant temperature/Balance method

แก้สมการ (2.133) และ (2.134) เพื่อหาค่า T_{is} และ T_{os} ทั้ง 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการทำซ้ำ (Iterative method)

โดยทั่วไปแล้วค่า RTF สามารถคำนวณตามโซนที่กำหนดได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้เป็นการคำนวณค่าภาระการทำความเย็นสำหรับผนังและหลังคา ซึ่งแยกส่วนกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า RTF 3 กรณี คือ Light, Medium และ Heavy weight zone ตามที่ ASHRAE แนะนำไว้ใน Fundamental-1997 บทที่ 28 ตารางที่ 25 ดังต่อไปนี้

1. Light weight zone เป็นโซนที่มีน้ำหนักมวลน้อย ประมาณ 30 ปอนด์ต่อตารางฟุตของพื้นที่พื้น เช่น ผนังเป็น Frame, พื้นเป็นคอนกรีตหนา 2 นิ้ว
2. Medium weight zone เป็นโซนที่มีน้ำหนักมวลปานกลาง ประมาณ 70 ปอนด์ต่อตารางฟุตของพื้นที่พื้น เช่น ผนังเป็นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว, พื้นเป็นคอนกรีตหนา 4 นิ้ว

3. Heavy weight zone เป็นโซนที่มีน้ำหนักมวลมาก ประมาณ 130 ปอนด์ต่อตารางฟุตของพื้นที่พื้น เช่น ผนังเป็นคอนกรีตหนา 6 นิ้ว, พื้นเป็นคอนกรีตหนา 6 นิ้ว

เนื่องจากการยากที่จะกำหนดชนิดของโซนให้ชัดเจนได้ จึงกำหนดโซนขึ้นมาเพื่อใช้กับวิทยานิพนธ์นี้ดังตารางที่ 2.3 โดยอ้างอิงตามข้อเสนอแนะของ ASHRAE ตามที่กล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิดผนังและหลังคาของโซนที่ใช้ในการคำนวณค่า RTF

Zone	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall 4	Ceiling	Floor
Light	B7	B7	B7	B7	B2	B7
Medium	C2	C2	C2	C2	C14,B2	C14
Heavy	C8	C8	C8	C8	C10,B2	C10

2.8 การคำนวณหาค่า Sol-air temperature

Sol-air temperature, t_e คืออุณหภูมิอากาศภายนอกที่ชดเชยผลของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนแล้ว เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณหาค่า Heat gain เข้าสู่อาคารเนื่องจากพื้นผิวด้านนอกที่ถูกแสงอาทิตย์ส่อง สามารถหาได้จากการสมดุลความร้อนที่พื้นผิวด้านนอกที่ถูกแสงอาทิตย์ จะทำให้ได้อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่พื้นผิว, Q/A เป็น

$$\frac{Q}{A} = \alpha E_t + h_o(t_o - t_s) - \varepsilon \Delta R \quad (2.135)$$

โดยที่ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

A = พื้นที่, m^2

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนความร้อนของพื้นผิว

E_t = พลังงานรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว, ($W / m^2.K$)

h_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยรังสีความร้อนคลื่นสั้น และการพาที่พื้นผิวด้านนอก, ($W / m^2.K$)

- t_o = อุณหภูมิอากาศภายนอก, $^{\circ}C$
 t_s = อุณหภูมิพื้นผิว, $^{\circ}C$
 ε = Hemispherical emittance of surface
 ΔR = ค่าความแตกต่างระหว่างรังสีความร้อนคลื่นยาวที่ตกกระทบพื้นผิวจากท้องฟ้า
 และสิ่งแวดล้อม กับการแผ่รังสีความร้อนจากวัตถุดำที่อุณหภูมิภายนอก

เพื่อให้ง่ายแก่การคำนวณจึงสมมติให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของ Sol-air temperature, t_e ซึ่งจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{Q}{A} = h_o(t_e - t_s) \quad (2.136)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2.135) ให้อยู่ในรูปของสมการที่ (2.136) จะได้เป็น

$$\frac{Q}{A} = h_o \left[\left(\frac{\alpha E_t}{h_o} + t_o - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \right) - t_s \right] \quad (2.137)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (2.136) กับ สมการที่ (2.137) แล้วจะได้ค่า Sol-air temperature, t_e ที่ชัดเจนผลของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนแล้วเป็น

$$t_e = t_o + \frac{\alpha E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (2.138)$$

สำหรับพื้นผิวที่อยู่ในแนวระนาบ จะรับรังสีความร้อนคลื่นยาวจากท้องฟ้าอย่างเดียวน่า ΔR จะมีค่าประมาณ 63 W/m^2 ค่า $\varepsilon = 1$ และค่า $h_o = 17 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ จะทำให้ค่าในเทอมที่ 3 ของสมการที่ (2.138) เป็น 4 K (Bliss, 1961)

สำหรับพื้นผิวที่อยู่ในแนวตั้งฉาก จะรับรังสีความร้อนคลื่นสั้นจากพื้นและอาคารโดยรอบ เป็นส่วนใหญ่ ค่าที่ถูกต้องของ ΔR หาได้ยาก โดยทั่วไปจะกำหนดให้ค่า $\varepsilon \Delta R = 0$ สำหรับพื้นผิวที่อยู่ในแนวตั้งฉาก

สำหรับค่าพลังงานรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิว, E_t ในเทอมที่ 2 ของสมการที่ (2.138) สามารถหาได้จากสมการของดวงอาทิตย์ที่อ้างอิงจาก ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001 ดังต่อไปนี้

Apparent solar time AST , ชั่วโมง

$$AST = LST + ET / 60 + (LSM - LON) / 15 \quad (2.139)$$

Hour angle H , องศา

$$H = 15(AST - 12) \quad (2.140)$$

Solar altitude β , องศา

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (2.141)$$

Solar azimuth ϕ , องศา

$$\sin \phi = (\sin \beta \sin L - \sin \delta) / (\cos \beta \cos L) \quad (2.142)$$

Surface solar azimuth γ , องศา

$$\gamma = \phi - \Psi \quad (2.143)$$

Incident angle θ , องศา

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (2.144)$$

โดยที่ ET = สมการของเวลา, นาที (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4)

L = ละติจูด

LON = ลองจิจูด, องศา

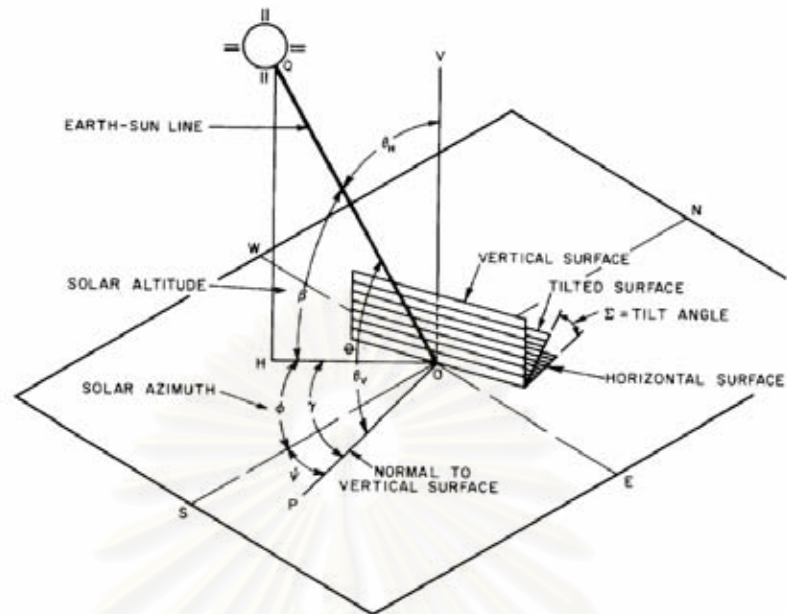
LSM = Local standard time meridian, องศา (แสดงไว้ในตารางที่ 2.5)

LST = Local standard time, ชั่วโมง

δ = ความเอียงของแกนโลก, องศา (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4)

Ψ = Surface azimuth, องศา

Σ = ความเอียงของพื้นผิวจากแนวระนาบ, องศา



รูปที่ 2.9 แสดงมุมต่างๆ สำหรับพื้นผิวเพื่อคำนวณค่าความร้อนจากดวงอาทิตย์

ตารางที่ 2.4 สมการของเวลา (Equation of time) วันที่ 21 ของเดือน

Month	Equation of time (ET)	Solar declination (δ)	A (W/m^2)	B	C
1	-11.2	-20.00	1230	0.142	0.058
2	-13.9	-10.80	1215	0.144	0.060
3	-7.5	0.00	1186	0.156	0.071
4	1.1	11.60	1136	0.180	0.097
5	3.3	20.00	1104	0.196	0.121
6	-1.4	23.45	1088	0.205	0.134
7	-6.2	20.60	1085	0.207	0.136
8	-2.4	12.30	1107	0.201	0.122
9	7.5	0.00	1151	0.177	0.092
10	15.4	-10.50	1192	0.160	0.073
11	13.8	-19.80	1221	0.149	0.063
12	1.6	-23.45	1233	0.142	0.057

ที่มา : ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001

ตารางที่ 2.5 Time zone meridians

Time zone	Standard meridian
1. Atlantic	60
2. Eastern	75
3. Central	90
4. Mountain	105
5. Pacific	120
6. Alaska	135
7. Hawaii	150

ที่มา : ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001

ตารางที่ 2.6 Percentage of daily temperature range

Time	%	Time	%
1	87	13	11
2	92	14	3
3	96	15	0
4	99	16	3
5	100	17	10
6	98	18	21
7	93	19	34
8	84	20	47
9	71	21	58
10	56	22	68
11	39	20	76
12	23	24	82

ที่มา : ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001

Direct normal irradiance E_{DN} , W / m^2

$$\text{ถ้า } \beta > 0 \quad E_{DN} = \left[\frac{A}{\exp(B / \sin \beta)} \right] CN \quad (2.145)$$

$$\text{นอกเหนือจากนั้น} \quad E_{DN} = 0 \quad (2.146)$$

Surface direct irradiance E_D , W / m^2

$$\text{ถ้า } \cos \theta > 0 \quad E_D = E_{DN} \cos \theta \quad (2.147)$$

$$\text{นอกเหนือจากนั้น} \quad E_D = 0 \quad (2.148)$$

Ratio of sky diffuse on vertical surface to sky diffuse on horizontal surface, Y

$$\text{ถ้า } \cos \theta > -0.2 \quad Y = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad (2.149)$$

$$\text{นอกเหนือจากนั้น} \quad Y = 0.45 \quad (2.150)$$

Diffuse irradiance E_d , W / m^2

$$\text{พื้นผิวแนวตั้ง} \quad E_d = CYE_{DN} \quad (2.151)$$

$$\text{พื้นผิวแนวอื่นๆ} \quad E_d = CE_{DN} (1 + \cos \Sigma) / 2 \quad (2.152)$$

Ground reflected irradiance E_r , W / m^2

$$E_r = E_{DN} (C + \sin \beta) \rho_g (1 - \cos \Sigma) / 2 \quad (2.153)$$

Total surface irradiance E_t , W / m^2

$$E_t = E_D + E_d + E_r \quad (2.154)$$

โดยที่ A = Apparent solar constant, W / m^2 (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4)

- B = Atmospheric extinction coefficient, (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4)
- C = Sky diffuse factor, (แสดงไว้ในตารางที่ 2.4)
- CN = แฟกเตอร์ความโปร่งของท้องฟ้า (สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1 ท้องฟ้าปลอดโปร่ง)
- E_d = Diffuse sky irradiance, W / m^2
- E_r = Diffuse ground reflected irradiance, W / m^2
- ρ_g = Ground reflectivity, (แสดงไว้ในตารางที่ 2.7)

ตารางที่ 2.7 สภาพการสะท้อนรังสีของพื้น, ρ_g

ประเภทของพื้น	มุมตกกระทบ					
	20 °	30 °	40 °	50 °	60 °	70 °
คอนกรีตใหม่	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
คอนกรีตเก่า	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.25
สนามหญ้าสีเขียวสด	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31
พื้นรอยหินกรวด	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
หินกรวดลาดยาง Asphalt	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
ลานจอดรถลาดยาง Asphalt	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12

ที่มา : ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001, ตารางที่ 10 บทที่ 30

2.9 การคำนวณค่า Heat input

เมื่อคำนวณหาค่า Sol-air temperature, t_e แล้วจะสามารถนำค่า Sol-air temperature มาคำนวณหาค่า Heat input ได้จากการใช้สมการ

$$Q_{i,\theta-n} = U A(t_{e,\theta-n} - t_{rc}) \quad (2.155)$$

โดยที่ $Q_{i,\theta-n}$ = ค่า Heat input ที่ชั่วโมง $\theta - n$ (W)

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W / m^2 \cdot K$)

A = พื้นที่ผนัง, (m^2)

$t_{e,\theta-n}$ = Sol-air temperature ที่ชั่วโมง $\theta - n$ ($^{\circ}C$)

t_{rc} = อุณหภูมิคงที่บริเวณปรับอากาศ ($^{\circ}C$)

2.10 การคำนวณค่า Heat gain จากผนังและหลังคา

ค่า Heat gain สามารถคำนวณได้จากหาค่า Heat input โดยใช้สมการ

$$Q_{\theta} = c_0 Q_{i,\theta} + c_1 Q_{i,\theta-1} + c_2 Q_{i,\theta-2} + c_3 Q_{i,\theta-3} + \dots + c_{23} Q_{i,\theta-23} \quad (2.156)$$

โดยที่ Q_{θ} = ค่า Heat gain ที่ชั่วโมง θ (W)

$Q_{i,\theta}$ = ค่า Heat input ที่ชั่วโมง θ (W)

$Q_{i,\theta-n}$ = ค่า Heat input ที่ชั่วโมงที่ผ่านมา (W)

c_0, c_1, etc = ค่า Conduction Time Series, CTS หาได้จากการหาค่า PRF ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, U

สำหรับค่า PRF จะสามารถหาได้ 2 วิธี คือ 1.หาค่า PRF จากการแปลงสูตรของ Response Factors โดยตรง (Pedersen, et al. 1998) และ 2.หาค่า PRF จากตารางค่า CTFs ใน ASHRAE Handbook of Fundamentals 1993 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีที่ 1 ซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.5.1

2.11 การคำนวณค่าภาระการทำความเย็น (Cooling load) ด้วยวิธี RTSM

การคำนวณค่าภาระการทำความเย็น (Cooling load) ด้วยวิธี Radiant Time Series (RTSM) คือ เมื่อคำนวณค่า Heat gain ทุกชั่วโมงแล้ว จะทำการ แบ่งค่า Heat gain ออกเป็น 2 ส่วน คือ ความร้อนในส่วนของการพา, Q_c และความร้อนในส่วนของการแผ่รังสี, Q_r ซึ่งจะใช้ อัตราส่วนจากตารางที่ 2.1 เป็นหลัก จากนั้นจึงใช้ค่า Radiant Time Factor, RTF เปลี่ยนค่าความร้อนในส่วนของการแผ่รังสี เป็น Cooling load จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{rc,\theta} = r_0 Q_{r,\theta} + r_1 Q_{r,\theta-1} + r_2 Q_{r,\theta-2} + r_3 Q_{r,\theta-3} + \dots + r_{23} Q_{r,\theta-23} \quad (2.157)$$

โดยที่ $Q_{rc,\theta}$ = ค่า Radiant cooling load Q_r ที่ชั่วโมง θ (W)

$Q_{r,\theta}$ = ค่า Radiant heat gain ที่ชั่วโมง θ (W)

$Q_{r,\theta-n}$ = ค่า Radiant heat gain ที่ n ชั่วโมงที่ผ่านมา (W)

r_0, r_1, etc = ค่า Radiant Time Factors, RTF

ค่า RTF จะมี 2 ค่าคือ Nonsolar RTF และ Solar RTF ซึ่งค่า Nonsolar RTF จะใช้สำหรับ เปลี่ยนค่า Radiant heat gain จากผนัง หลังคา พื้น คน แสงสว่าง และ เครื่องใช้ไฟฟ้า ไปเป็น Cooling load ส่วนค่า Solar RTF จะใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Radiant heat gain จากแสงอาทิตย์ที่ส่องมาที่ห้องโดยตรงไปเป็น Cooling load

ค่า Radiant Time Factors (RTF) สามารถคำนวณได้ 2 วิธีคือ 1.หาจาก Zone heat balance model และ 2.หาจากค่า Weighting Factors ของ ASHRAE Database โดย Sowell (1988a, 1988b, 1988c) ปัจจุบันการหาค่า RTF สามารถหาได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Hbfort (Pedersen, et al. 1998) อีกวิธีหนึ่ง ในงานวิจัยนี้จะหาค่า RTF จากวิธีที่ 1 ซึ่งแสดงรายละเอียดใน หัวข้อ 2.7 โดยมี Zone 3 แบบคือ Light, Medium และ Heavy weight zone

2.12 ทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CLTD/SCL/CLF

การคำนวณภาระการทำความเย็นด้วยวิธี CLTD/SCL/CLF เป็นวิธีที่มีพื้นฐานมาจากวิธี TFM โดยที่ค่า CLTD/SCL/CLF จะใช้คำนวณค่าภาระการทำความเย็นจากความร้อนที่ผ่านผนัง และหลังคาเข้ามาในบริเวณปรับอากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$CLTD_{\theta} = \frac{Q_{\theta}}{UA} \quad (2.158)$$

โดยที่ Q_{θ} = ค่า Cooling load ที่ชั่วโมง θ (W)

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W / m^2 .K$)

A = พื้นที่ผนังหรือหลังคา, (m^2)

$CLTD_{\theta}$ = ค่า CLTD ที่ชั่วโมง θ ($^{\circ}C$)

การคำนวณค่า CLTD นี้เดิมใช้วิธี TFM หาค่า Q_{θ} แต่ในงานวิจัยนี้จะนำวิธีการคำนวณภาระการทำความเย็น RTSM มาใช้คำนวณ Q_{θ} แทนวิธีเดิม

คุณลักษณะของโซนและสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการคำนวณค่า CLTD ในวิทยานิพนธ์นี้จะอ้างอิงตาม ASRAE GRP-158 ดังต่อไปนี้คือ

1. หลังคาเป็นเสมือนวัตถุดำ (Dark for solar radiation absorption)
2. อุณหภูมิภายในโซนเท่ากับ $78^{\circ}F$ ($25.56^{\circ}C$)
3. อุณหภูมิอากาศภายนอกสูงสุด $78^{\circ}F$ ($35^{\circ}C$) และอุณหภูมิภายนอกเฉลี่ย $85^{\circ}F$ ($29.44^{\circ}C$) Daily range $21^{\circ}F$ ($11.67^{\circ}C$)
4. Solar radiation 40 deg north latitude on July 21
5. Outside surface resistance $R_o = 0.333 \text{ hr.ft}^2.^{\circ}F / \text{Btu}$ ($0.059 \text{ m}^2.K / W$)
6. Inside surface resistance $R_i = 0.685 \text{ hr.ft}^2.^{\circ}F / \text{Btu}$ ($0.121 \text{ m}^2.K / W$)

ชนิดของผนังและหลังคาจะอ้างอิงจาก ASHRAE GRP-158 สำหรับผนังแต่ละกลุ่มของ A-G นั้นจะมีอีกหลายชนิด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกชนิดผนังใดชนิดหนึ่งจากตารางที่ 3.9 ใน ASHRAE GRP-158 ดังที่แสดงในตารางที่ 2.8 สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดานนั้นจะอ้างอิงจาก ตารางที่ 3.7 ใน ASHRAE GRP-158 โดยตรงดังที่แสดงในตารางที่ 2.9 ส่วนหลังคามีฝ้าเพดาน จะเพิ่ม Air space, E4 และ Acoustic tile, E5 เข้าไปดังที่แสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.8 แสดงชนิดของผนังกลุ่ม A-G ของ ASHRAE GRP-158

ผนัง	Code (Outside to Inside)	Description	U(W/m ² .k)	Zone
A	A0 A2 C9 B2 E1 E0	100 mm Face Brick+200 mm Common Brick+25 mm Insulation	0.879	MW
B	A0 A2 B3 C4 E1 E0	100 mm Face Brick+50 mm Insulation+100 mm Common Brick	0.623	MW
C	A0 A2 B1 C5 E1 E0	100 mm Face Brick+Air space+100 mm HD Concrete	2.000	MW
D	A0 A2 C1 B1 E1 E0	100 mm Face Brick+100 mm Tile+Air space	1.621	MW
E	A0 A1 C5 E1 E0	25 mm Stucco+100 mm HD Concrete	3.322	MW
F	A0 A1 C2 B1 E1 E0	25 mm Stucco+100 mm LD Concrete Block+Air space	1.504	MW
G	A0 A1 B1 B3 E1 E0	25 mm Stucco+Air space+50 mm Insulation	0.629	LW

ตารางที่ 2.9 แสดงชนิดของหลังชนิดที่ 1-13 ไม่มีฝ้าเพดาน ของ ASHRAE GRP-158

หลังคา	Code (Outside to Inside)	Description	U(W/m ² .k)	Zone
1	A0 E2 E3 B5 A3 E0	Steel Sheet with 25 mm Insulation	1.217	LW
2	A0 E2 E3 B5 B7 E0	25 mm Wood with 25 mm Insulation	0.972	LW
3	A0 E2 E3 C14 E0	100 mm LD Concrete	1.221	MW
4	A0 E2 E3 B5 C12 E0	50 mm HD Concrete with 25 mm Insulation	1.175	MW
5	A0 E2 E3 B6 B7 E0	25 mm Wood with 50 mm Insulation	0.612	LW
6	A0 E2 E3 C15 E0	150 mm LD Concrete	0.903	MW
7	A0 E2 E3 B5 B8 E0	65 mm Wood with 25 mm Insulation	0.745	LW
8	A0 E2 E3 C16 E0	200 mm LD Concrete	0.716	MW
9	A0 E2 E3 B5 C5 E0	100 mm HD Concrete with 25 mm Insulation	1.136	MW
10	A0 E2 E3 B6 B8 E0	65 mm Wood with 50 mm Insulation	0.513	LW
11	A0 C12 B1 B6 E2 E3 C5 E0	Roof terrace system	0.597	MW
12	A0 E2 E3 B5 C13 E0	150 mm HD Concrete with 25 mm Insulation	1.100	MW
13	A0 E2 E3 B5 B9 E0	100 mm Wood with 50 mm Insulation	0.607	LW

ตารางที่ 2.10 แสดงชนิดของหลังชนิดที่ 1-13 มีฝ้าเพดาน ของ ASHRAE GRP-158

หลังคา	Code (Outside to Inside)	Description	U(W/m ² .k)	Zone
1	A0 E2 E3 B5 A3 E4 E5 E0	Steel Sheet with 25 mm Insulation + S.C.(Suspended ceiling)	0.764	LW
2	A0 E2 E3 B5 B7 E4 E5 E0	25 mm Wood with 25 mm Insulation + S.C.	0.660	LW
3	A0 E2 E3 C14 E4 E5 E0	100 mm LD Concrete + S.C.	0.766	MW
4	A0 E2 E3 B5 C12 E4 E5 E0	50 mm HD Concrete with 25 mm Insulation + S.C.	0.747	MW
5	A0 E2 E3 B6 B7 E4 E5 E0	25 mm Wood with 50 mm Insulation + S.C.	0.472	LW
6	A0 E2 E3 C15 E4 E5 E0	150 mm LD Concrete + S.C.	0.627	MW
7	A0 E2 E3 B5 B8 E4 E5 E0	65 mm Wood with 25 mm Insulation + S.C.	0.546	LW
8	A0 E2 E3 C16 E4 E5 E0	200 mm LD Concrete + S.C.	0.531	MW
9	A0 E2 E3 B5 C5 E4 E5 E0	100 mm HD Concrete with 25 mm Insulation + S.C.	0.732	MW
10	A0 E2 E3 B6 B8 E4 E5 E0	65 mm Wood with 50 mm Insulation + S.C.	0.411	LW
11	A0 C12 B1 B6 E2 E3 C5 E4 E5 E0	Roof terrace system + S.C.	0.463	MW
12	A0 E2 E3 B5 C13 E4 E5 E0	150 mm HD Concrete with 25 mm Insulation + S.C.	0.716	MW
13	A0 E2 E3 B5 B9 E4 E5 E0	100 mm Wood with 50 mm Insulation + S.C.	0.468	LW

หมายเหตุ: Suspended ceiling (S.C.) เพิ่ม Air space, E4 และ Acoustic tile, E5

บทที่ 3

วิธีการคำนวณของโปรแกรม

วิธีการคำนวณของโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นมีขั้นตอนการคำนวณหลักๆดังต่อไปนี้

1. รับค่าข้อมูลของโซน เช่น สถานที่ เดือน ทิศทางการวางตัวของผนัง และส่วนประกอบของผนังหรือหลังคา เป็นต้น
2. คำนวณค่า Sol-air temperature
3. คำนวณค่า Periodic Response Factors (PRF)
4. คำนวณค่า Radiant Time Factors (RTF)
5. คำนวณค่า Heat gain
6. คำนวณค่าภาระการทำความเย็น (Cooling load)
7. คำนวณค่า CLTD

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นโปรแกรม MATLAB แบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. โปรแกรมรับค่า ทำหน้าที่รับค่าที่จำเป็นต่อการคำนวณ มี 1 โปรแกรมคือ INPUTMAIN.m เป็นโปรแกรมรับค่าข้อมูลของโซนและข้อมูลของผนังหรือหลังคา
2. โปรแกรมหลัก ทำหน้าที่จัดการการคำนวณให้เป็นไปตามตามลำดับ มี 1 โปรแกรมคือ MAIN.m โปรแกรมหลักใช้เรียกโปรแกรมย่อยตามลำดับการคำนวณ
3. โปรแกรมย่อย มี 18 โปรแกรมคือ
SOLAIR.m โปรแกรมย่อยคำนวณค่า Sol-air temperature
MLAYER.m โปรแกรมย่อยสำหรับคำนวณค่า R และ C ของผนังและหลังคา
LAYER.m โปรแกรมย่อยบรรจุค่า R และ C ของผนังและหลังคา ใช้ร่วมกับโปรแกรมย่อย LAYER
WALLTYPE.m โปรแกรมย่อยบรรจุ Layer sequence ของผนัง 41 ชนิด
ROOFTYPE.m โปรแกรมย่อยบรรจุ Layer sequence ของหลังคา 42 ชนิด
TTM.m โปรแกรมย่อยคำนวณ Total transmission matrix

DTTM.m	โปรแกรมย่อยคำนวณอนุพันธ์ของ Total transmission matrix
FROOTS.m	โปรแกรมย่อยหาค่ารากของสมการ $B(s) = 0$
XYZ.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่า External, Cross และ Internal Response Factors ของผนังและหลังคา (X_j, Y_j, Z_j)
PRF.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่า External, Cross และ Internal Periodic Response Factors ของผนังและหลังคา (X_{Pj}, Y_{Pj}, Z_{Pj})
FDR.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่า Cross Response Factors และ Cross Periodic Response Factors โดยวิธี FDR Method
COEFAB.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของ Polynomial s-transfer function ของวิธี FDR Method
HEATGAIN.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่า Heat gain
RTFF.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่า Radiant Time Factors (RTF)
INITI.m	โปรแกรมย่อยกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณค่า Radiant Time Factor (RTF) ใช้ร่วมกับโปรแกรมย่อย RTFF
NETQLWX.m	โปรแกรมย่อยคำนวณค่าความร้อนสุทธิจากการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวของพื้นผิวภายในโซนใช้ร่วมกับโปรแกรมย่อย RTFF
LOADS.m	โปรแกรมย่อยคำนวณ Cooling load โดยวิธี RTSM
RESULT.m	โปรแกรมย่อยใช้สำหรับจัดการ พิมพ์ผลการคำนวณเพื่อแสดงผลในรูปแบบของ Text ไฟล์

หลังจากการคำนวณแล้วโปรแกรมจะสร้าง Text ไฟล์ขึ้นมาโดยอัตโนมัติ เพื่อแสดงผลประกอบด้วย 7 ไฟล์คือ

CLTD.txt	แสดงผลการคำนวณค่า CLTD ($^{\circ}C$)
HEATGAIN.txt	แสดงผลการคำนวณค่า Heat gain (W/m^2)
RTF.txt	แสดงผลการคำนวณค่า RTF (ไร้หน่วย)
LOAD.txt	แสดงผลการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น (W/m^2)
XPRF.txt	แสดงผลการคำนวณค่า External PRF ($W/m^2.K$)
YPRF.txt	แสดงผลการคำนวณค่า Cross PRF ($W/m^2.K$)
ZPRF.txt	แสดงผลการคำนวณค่า Internal PRF ($W/m^2.K$)

บทที่ 4

ผลการคำนวณและอภิปรายผลการคำนวณ

การคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังและหลังคาจากค่า Periodic Response Factors, (PRF) สามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ เป็นการคำนวณด้วยวิธี Radiant Time Series Method, (RTSM) เนื่องจากค่า PRF จะใช้ในการคำนวณค่า Heat gain ที่เข้าสู่โซนทั้ง 24 ชั่วโมงใน 1 วัน โดยที่ค่า Heat gain ที่ชั่วโมงใดๆ จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. การพาความร้อนซึ่งจะเป็นภาระการทำความเย็นที่ชั่วโมงนั้นๆ ทันทีและ 2. การแผ่รังสีความร้อนซึ่งจะถูกสะสมไว้ในตัวอาคารก่อนที่จะคายออกมาสู่โซนในภายหลัง สำหรับ Heat gain ในส่วนของการแผ่รังสีนี้จะต้องใช้ค่า Radiant Time Factor, (RTF) เพื่อเปลี่ยนค่า Heat gain ให้เป็นค่าภาระทำความเย็นที่ชั่วโมงนั้นๆ ก่อนผลรวมของภาระทำความเย็นที่เข้าสู่โซนที่ชั่วโมงใดๆ จะเท่ากับผลรวมของภาระทำความเย็นที่ชั่วโมงนั้นๆ ทั้ง 2 ส่วนข้างต้น และภาระทำความเย็นนี้จะถูกนำไปคำนวณค่า CLTD ต่อไป

ในการวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นเองเพื่อคำนวณค่า CLTD ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะทำให้การศึกษาเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. การคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี Direct root แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ คำนวณจากค่า CTFs และคำนวณจาก Response Factors
2. การคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี FDR Method
3. การคำนวณค่า RTF
4. การคำนวณค่า CLTD

4.1 ผลการคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี Direct root

4.1.1 ผลการคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs

การคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs ใน ASHRAE Handbook of Fundamental 1997 (Spitler and Fisher, 1999a) พบว่าค่า PRF ของผนังที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% มี 6 ชนิด คือ Wall 30, Wall 31, Wall 35, Wall 36, Wall 37, Wall 38 และหลังคาที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% มี 2 ชนิดคือ Roof 37 และ Roof 38 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงชนิดผนังและหลังคาที่มีความคลาดเคลื่อนเกิน 1%

ในการคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs Order 6

ลำดับ	ชนิดผนังและหลังคา	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	Wall 30	3.38
2	Wall 31	5.96
3	Wall 35	16.42
4	Wall 36 #	0.35 (1.03)
5	Wall 37	29.33
6	Wall 38	31.41
7	Roof 37	3.12
8	Roof 38	7.92

ASHRAE : ผนัง 41 ชนิด และหลังคา 42 ชนิด

(Spitler and Fisher, 1999) พบความคลาดเคลื่อนเกิน 1% จำนวน 7 ชนิด

#(Chen and Wang, 2004) พบความคลาดเคลื่อนเกิน 1% จำนวน 8 ชนิด

ความคลาดเคลื่อน = $\left| \frac{\sum Y_{p-u}}{U} \right| \times 100\%$

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า PRF ของผนังและหลังคาที่เกิน 1% นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ค่า CTFs ที่มีความละเอียดอยู่ในระดับ Order 6 เท่านั้น ซึ่งน้อยเกินไปสำหรับผนังและหลังคาประเภทเหล่านี้ พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทั้ง 6 ชนิดและหลังคาทั้ง 2 ชนิดที่คำนวณได้จากค่า PRF, (U_c) นั้นจะน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริง, (U_a) ดังนั้นการใช้ค่า CTFs ในความละเอียด Order 6 สำหรับผนังและหลังคาทุกชนิดนั้น จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่า PRF ในผนังและหลังคาบางชนิดได้

$$U_c = \frac{\sum_{n=0}^6 b_n}{1 + \sum_{n=1}^6 d_n} \quad (4.1)$$

การคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs ให้ถูกต้องนั้น ควรจะตรวจสอบความถูกต้องของค่า CTFs โดยการคำนวณจำนวนเทอมของ CTFs ก่อน โดยใช้สมการที่ (4.1) เป็นตัวกำหนดว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากค่า CTFs, U_c มีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริง, U_a ให้อยู่ในความละเอียดที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ก่อนที่จะนำมาคำนวณค่า PRF ต่อไป

IU (2002) Oklahoma State University, Stillwater ได้พัฒนาโปรแกรม PRF/RTF Generator ขึ้น ซึ่งจะใช้ค่า CTFs ที่มีการคำนวณ Order ที่ทำให้ค่า U_c มีค่าใกล้เคียงกับ U_a ก่อนนำไปคำนวณค่า Cross PRF ตามสมการที่ 2.83 ผลที่ได้คือค่า PRF ของผนังและหลังคาทุกชนิดมีความถูกต้องในระดับเดียวกับค่า CTFs วิธีนี้จะเป็นการคำนวณค่า CTFs เพียงระดับ Order เท่าที่ต้องการและกำหนดความถูกต้องโดยความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor ได้ ปัจจุบันโปรแกรมนี้คำนวณค่า Cross PRF ได้เพียงค่าเดียว และจากการตรวจสอบพบโปรแกรมว่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% ทุกกรณี สำหรับผนัง 41 ชนิด และ หลังคา 42 ชนิดโดยที่ค่า $U_c < U_a$ ทุกชนิด

การคำนวณค่า PRF จากค่า CTFs สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. ใช้ค่า CTFs Order 6 จากตาราง ใน ASHRAE Handbook of Fundamental 1997
2. ใช้ค่า CTFs ที่มีการคำนวณ Order (โปรแกรม PRF/RTF Generator)

ค่า Cross PRF สำหรับผนังและหลังคาที่มีความคลาดเคลื่อนเกิน 1% ดังในตารางที่ 4.1 จะถูกคำนวณจากทั้ง 2 วิธี โดยถือว่าเป็นวิธี Direct root ทั้ง 2 วิธี เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors ซึ่งเป็นโปรแกรมประดิษฐ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3-4.4 และรูปที่ 1-8

4.1.2 ผลการคำนวณค่า PRF จากค่า Response Factors

การคำนวณค่า PRF จากค่า Response Factors โดยใช้จำนวนเทอมของ Response Factors, (Y_j) 120 เทอม (Spitler, et al. 1997) สำหรับผนัง 41 ชนิดและหลังคา 42 ชนิด ตามสมการที่ (2.70) ในบทที่ 2 พบว่าค่า PRF ของผนังที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% มี 6 ชนิด คือ Wall 28, Wall 29, Wall 35, Wall 36, Wall 40, Wall 41 และหลังคาที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% มี 9 ชนิด คือ Roof 24, Roof 25, Roof 33, Roof 34, Roof 38, Roof 39, Roof 40, Roof 41 และ Roof 42

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า PRF ของผนังและหลังคาที่เกิน 1% นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้จำนวนเทอมของ Response Factors, (Y_j) น้อยเกินไป จากการคำนวณพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทั้ง 6 ชนิดและหลังคาทั้ง 9 ชนิดที่คำนวณได้จากค่า PRF, (U_c) นั้นจะน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจริง, (U_a) ดังนั้นการใช้ค่า Response Factors เพียง 120 เทอม สำหรับผนังและหลังคาทุกชนิดนั้น จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่า PRF ในผนังและหลังคาบางชนิดได้

การคำนวณค่า PRF จากค่า Response Factors ให้ถูกต้องนั้น ควรจะตรวจสอบความถูกต้องของค่า Response Factors, (Y_j) โดยการคำนวณจำนวนเทอมของ Response Factors ก่อน โดยใช้สมการที่ (4.2) เป็นตัวกำหนดว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากค่า Response Factors, U_c มีค่าใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจริง, U_a ให้อยู่ในความละเอียดที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ก่อนที่จะนำมาคำนวณค่า PRF ต่อไป

$$U_c = \sum_{j=0}^n Y_j \quad (4.2)$$

วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของค่า Response Factors, (Y_j) คือ ใช้จำนวนเทอมของ Y_j เริ่มต้นที่ 24 เทอม และเพิ่มขึ้นครั้งละ 24 เทอม จนกระทั่งค่า U_c มีคลาดเคลื่อนไม่เกินกว่า 1% ทำให้จำนวนเทอมของ Y_j ที่จะนำไปใช้คำนวณค่า PRF ของผนัง 41 ชนิดและหลังคา 42 ชนิด มีจำนวนตั้งแต่ 24 เทอมจนถึง 240 เทอม ซึ่งมีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนของ PRF มีค่าไม่เกิน 1% ตาม Y_j ด้วย (ถ้าต้องการความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่านี้ก็สามารถเปลี่ยนค่าในโปรแกรมได้) ผนังที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% ทั้ง 6 ชนิด และหลังคาที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน 1% ทั้ง 9 ชนิด ดังที่กล่าวข้างต้น ถูกนำมาคำนวณใหม่เพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor เมื่อใช้ Y_j ที่จำนวนเทอม 120

เทอมกับการใช้จำนวนเทอมแปรผันที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1%

ชนิดผนัง และหลังคา	จำนวนเทอม Y_j คงที่		จำนวนเทอม Y_j แปรตาม error < 1%	
	error (%)	จำนวนเทอม Y_j	error (%)	จำนวนเทอม Y_j
Wall 28	2.40	120	0.49	168
Wall 29	3.07	120	0.69	168
Wall 35	2.85	120	0.61	168
Wall 36	6.18	120	0.56	216
Wall 40	1.08	120	0.40	144
Wall 41	3.04	120	0.65	168
Roof 24	1.53	120	0.64	144
Roof 25	5.48	120	0.91	192
Roof 33	1.58	120	0.65	144
Roof 34	4.58	120	0.63	192
Roof 38	2.31	120	0.45	168
Roof 39	1.74	120	0.71	144
Roof 40	1.77	120	0.72	144
Roof 41	4.50	120	0.57	192
Roof 42	8.03	120	0.82	216

พิจารณาจาก ตารางที่ 4.2 พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่า PRF สามารถปรับปรุงให้ลดลงได้โดยการตรวจสอบจำนวนเทอมของ Y_j ซึ่งจะเป็นการคำนวณค่า PRF ให้ถูกต้องในระดับความคลาดเคลื่อนที่ต้องการได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดความคลาดเคลื่อนไว้ไม่เกิน 1%

เนื่องจาก Response Factors เป็นคำตอบแม่นยำตรง ดังนั้นจึงสามารถเรียกวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors, (Y_j) จำนวนเทอมแปรผันที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor ไม่เกิน 1% นี้ว่าเป็นวิธีแม่นยำตรง (Exact solution) ได้อีกแบบหนึ่ง และจะนำไปใช้คำนวณค่า Cross PRF สำหรับผนังและหลังคาในตารางที่ 4.1 ของ ASHRAE เพื่อนำไปเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนกับวิธี Direct root (CTFs) ผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 วิธีแสดงในตารางที่ 4.3-4.4 และรูปที่ 4.1-4.8

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า Cross Periodic Response Factors ที่คำนวณจากวิธี Direct root

j	Wall 30			Wall 31			Wall 35			Wall 36		
	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@
0	0.008359	0.008402	0.008599	0.005447	0.005794	0.005809	0.008953	0.010832	0.010857	0.015236	0.015212	0.015211
1	0.007494	0.007551	0.007532	0.004959	0.005306	0.005203	0.008625	0.010512	0.010372	0.014875	0.014855	0.014614
2	0.006735	0.006911	0.006879	0.004517	0.004878	0.004824	0.008307	0.010196	0.010129	0.014543	0.014546	0.014403
3	0.006422	0.007033	0.006625	0.004244	0.004697	0.004574	0.008057	0.009966	0.009886	0.014439	0.014525	0.014327
4	0.007316	0.008483	0.007675	0.004513	0.005132	0.004914	0.008066	0.010025	0.009931	0.014863	0.015025	0.014810
5	0.009632	0.011121	0.010204	0.005547	0.006308	0.006053	0.008487	0.010484	0.010411	0.015736	0.015918	0.015744
6	0.012755	0.014274	0.013519	0.007118	0.007947	0.007725	0.009241	0.011242	0.011225	0.016737	0.016903	0.016785
7	0.015883	0.017262	0.016784	0.008798	0.009639	0.009484	0.010108	0.012094	0.012143	0.017622	0.017766	0.017688
8	0.018478	0.019656	0.019449	0.010256	0.011078	0.010991	0.010902	0.012871	0.012974	0.018294	0.018415	0.018360
9	0.020311	0.021283	0.021294	0.011330	0.012116	0.012085	0.011525	0.013479	0.013616	0.018741	0.018843	0.018799
10	0.021364	0.022149	0.022311	0.011989	0.012730	0.012736	0.011948	0.013889	0.014044	0.018990	0.019075	0.019033
11	0.021729	0.022352	0.022608	0.012271	0.012962	0.012992	0.012184	0.014114	0.014273	0.019076	0.019147	0.019103
12	0.021538	0.022022	0.022330	0.012245	0.012884	0.012927	0.012262	0.014181	0.014335	0.019036	0.019093	0.019045
13	0.020926	0.021294	0.021623	0.011985	0.012572	0.012620	0.012217	0.014124	0.014268	0.018898	0.018943	0.018892
14	0.020014	0.020287	0.020617	0.011555	0.012094	0.012143	0.012077	0.013972	0.014104	0.018688	0.018722	0.018666
15	0.018903	0.019100	0.019418	0.011009	0.011506	0.011552	0.011867	0.013752	0.013870	0.018423	0.018449	0.018389
16	0.017673	0.017811	0.018110	0.010393	0.010851	0.010894	0.011607	0.013484	0.013587	0.018120	0.018138	0.018075
17	0.016387	0.016480	0.016756	0.009737	0.010164	0.010203	0.011312	0.013183	0.013271	0.017790	0.017800	0.017735
18	0.015089	0.015152	0.015403	0.009067	0.009470	0.009504	0.010994	0.012861	0.012935	0.017441	0.017445	0.017378
19	0.013815	0.013857	0.014083	0.008400	0.008784	0.008814	0.010660	0.012526	0.012587	0.017080	0.017078	0.017011
20	0.012586	0.012618	0.012820	0.007750	0.008121	0.008146	0.010319	0.012185	0.012233	0.016712	0.016706	0.016638
21	0.011418	0.011447	0.011626	0.007125	0.007486	0.007508	0.009974	0.011843	0.011879	0.016341	0.016331	0.016262
22	0.010322	0.010352	0.010511	0.006531	0.006885	0.006904	0.009630	0.011502	0.011526	0.015970	0.015956	0.015888
23	0.009301	0.009338	0.009478	0.005971	0.006322	0.006338	0.009289	0.011166	0.011179	0.015601	0.015584	0.015517
Σ	0.344450	0.356235	0.356254	0.202757	0.215726	0.214943	0.248611	0.294483	0.295635	0.409252	0.410475	0.408373
U	0.356506			0.215610			0.297442			0.410678		
e	3.38	0.08	0.07	5.96	0.05	0.31	16.42	0.99	0.61	0.35	0.05	0.56

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

* Based on CTFs order 6

Based on CTFs check order (PRF/RTF Generator)

@ Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า Cross Periodic Response Factors ที่คำนวณจากวิธี Direct root (ต่อ)

j	Wall 37			Wall 38			Roof 37			Roof 38		
	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@	Yp(j)*	Yp(j)#	Yp(j)@
0	0.005075	0.007652	0.007704	0.005342	0.008252	0.008307	0.007526	0.007731	0.007693	0.006529	0.007091	0.007098
1	0.004578	0.007175	0.007099	0.004934	0.007859	0.007778	0.007211	0.007414	0.007249	0.006304	0.006859	0.006761
2	0.004101	0.006729	0.006704	0.004541	0.007479	0.007459	0.006915	0.007120	0.007020	0.006088	0.006644	0.006593
3	0.003678	0.006389	0.006304	0.004196	0.007170	0.007129	0.006744	0.006989	0.006865	0.005925	0.006522	0.006434
4	0.003464	0.006331	0.006124	0.004046	0.007103	0.007014	0.006954	0.007272	0.007119	0.005973	0.006651	0.006514
5	0.003668	0.006694	0.006378	0.004285	0.007437	0.007316	0.007624	0.008007	0.007844	0.006347	0.007089	0.006943
6	0.004333	0.007448	0.007098	0.004939	0.008150	0.008042	0.008549	0.008966	0.008814	0.006960	0.007722	0.007609
7	0.005295	0.008436	0.008120	0.005839	0.009076	0.009016	0.009473	0.009898	0.009765	0.007621	0.008381	0.008312
8	0.006341	0.009471	0.009225	0.006779	0.010021	0.010020	0.010235	0.010654	0.010539	0.008192	0.008942	0.008909
9	0.007307	0.010407	0.010239	0.007608	0.010845	0.010895	0.010777	0.011180	0.011081	0.008612	0.009351	0.009340
10	0.008096	0.011157	0.011058	0.008251	0.011472	0.011560	0.011100	0.011483	0.011397	0.008874	0.009601	0.009600
11	0.008671	0.011687	0.011641	0.008687	0.011883	0.011994	0.011233	0.011596	0.011520	0.008998	0.009711	0.009714
12	0.009032	0.011995	0.011987	0.008929	0.012090	0.012213	0.011216	0.011558	0.011491	0.009010	0.009709	0.009712
13	0.009198	0.012102	0.012118	0.009003	0.012123	0.012248	0.011084	0.011406	0.011346	0.008939	0.009623	0.009623
14	0.009196	0.012037	0.012068	0.008941	0.012016	0.012137	0.010869	0.011173	0.011118	0.008806	0.009475	0.009471
15	0.009056	0.011834	0.011872	0.008771	0.011800	0.011914	0.010595	0.010883	0.010833	0.008630	0.009285	0.009278
16	0.008805	0.011522	0.011564	0.008519	0.011504	0.011609	0.010283	0.010556	0.010511	0.008425	0.009066	0.009056
17	0.008467	0.011130	0.011172	0.008205	0.011152	0.011246	0.009946	0.010206	0.010165	0.008201	0.008829	0.008816
18	0.008063	0.010682	0.010721	0.007845	0.010763	0.010846	0.009595	0.009845	0.009806	0.007965	0.008581	0.008567
19	0.007610	0.010196	0.010232	0.007453	0.010351	0.010424	0.009239	0.009479	0.009444	0.007723	0.008328	0.008313
20	0.007124	0.009689	0.009721	0.007040	0.009927	0.009990	0.008884	0.009115	0.009082	0.007479	0.008074	0.008058
21	0.006617	0.009172	0.009201	0.006616	0.009500	0.009553	0.008532	0.008756	0.008726	0.007236	0.007822	0.007806
22	0.006101	0.008657	0.008682	0.006187	0.009076	0.009120	0.008187	0.008405	0.008377	0.006996	0.007573	0.007557
23	0.005585	0.008148	0.008170	0.005761	0.008659	0.008694	0.007852	0.008064	0.008037	0.006760	0.007330	0.007313
Σ	0.159461	0.226740	0.225202	0.162717	0.235708	0.236524	0.220623	0.227756	0.225842	0.182593	0.198259	0.197397
U	0.225632			0.237248			0.227739			0.198295		
e	29.33	0.49	0.19	31.41	0.65	0.31	3.12	0.01	0.83	7.92	0.02	0.45

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

* Based on CTFs order 6

Based on CTFs check order (PRF/RTF Generator)

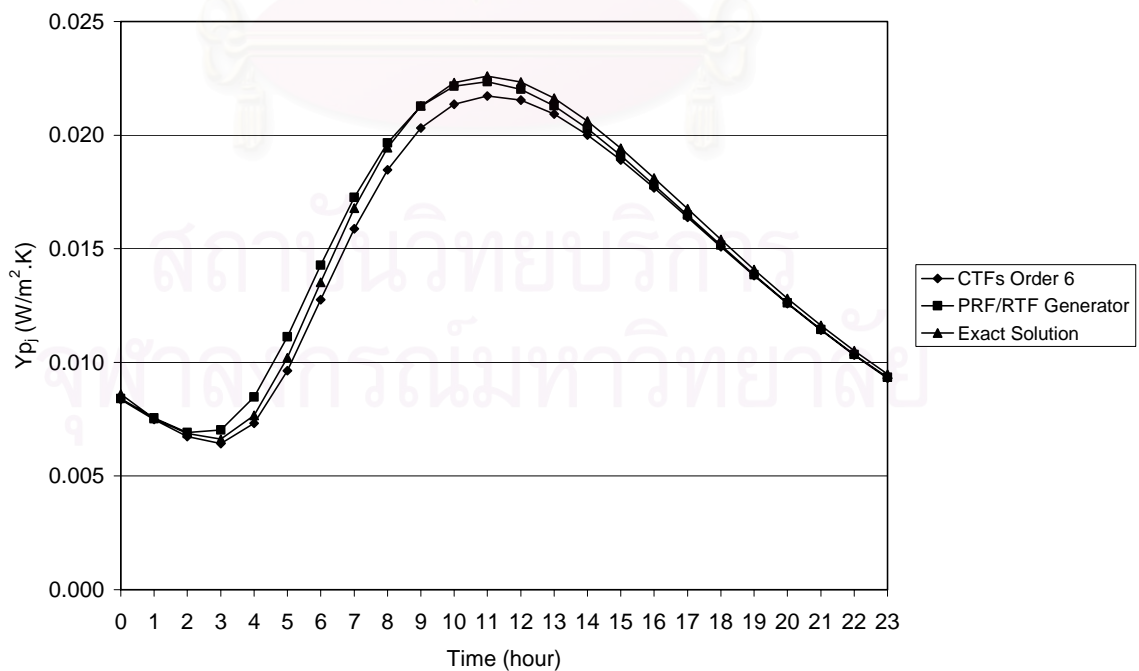
@ Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของค่า U-Factor จากการคำนวณค่า PRF ด้วยวิธี

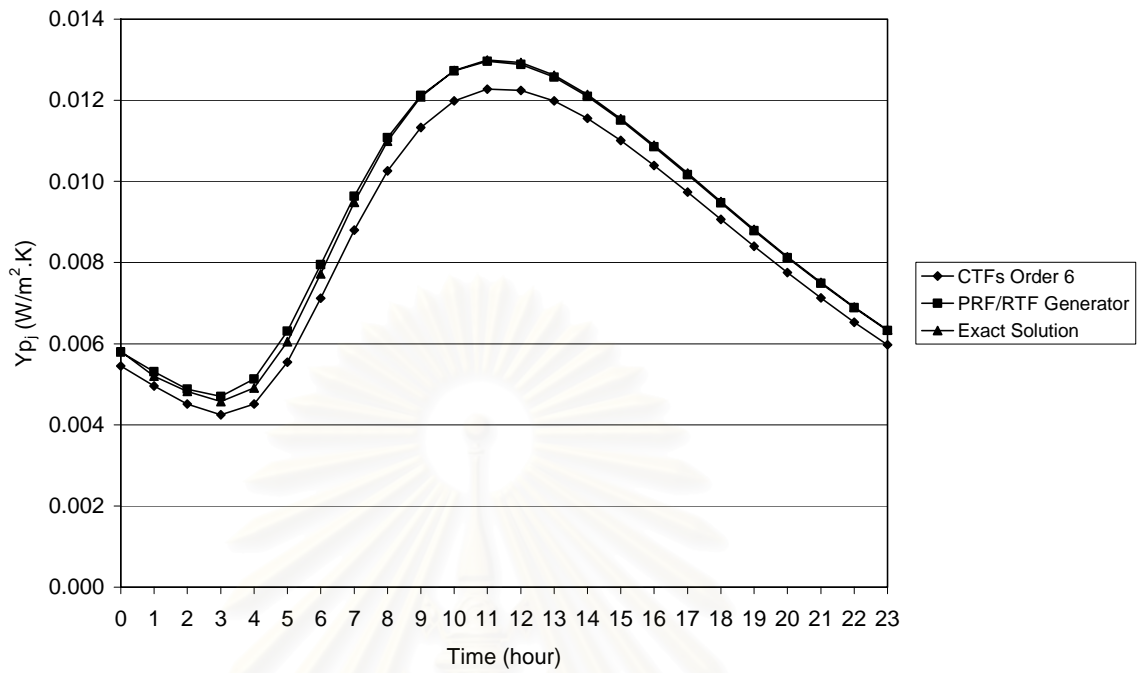
Direct root

ลำดับ	ชนิดผนัง และ หลังคา	จำนวน Order ของ CTFs คงที่		จำนวน Order ของ CTFs แปรผัน		จำนวนเทอม Y_j แปรตาม error 1%	
		error (%)	Order	error (%)	Order	error (%)	เทอม
1	Wall 30	3.38	6	0.08	11	0.07	72
2	Wall 31	5.96	6	0.05	11	0.31	72
3	Wall 35	16.42	6	0.99	12	0.61	168
4	Wall 36	0.35	6	0.05	11	0.56	216
5	Wall 37	29.33	6	0.49	8	0.19	96
6	Wall 38	31.41	6	0.65	12	0.31	120
7	Roof 37	3.12	6	0.01	11	0.83	120
8	Roof 38	7.92	6	0.02	12	0.45	168

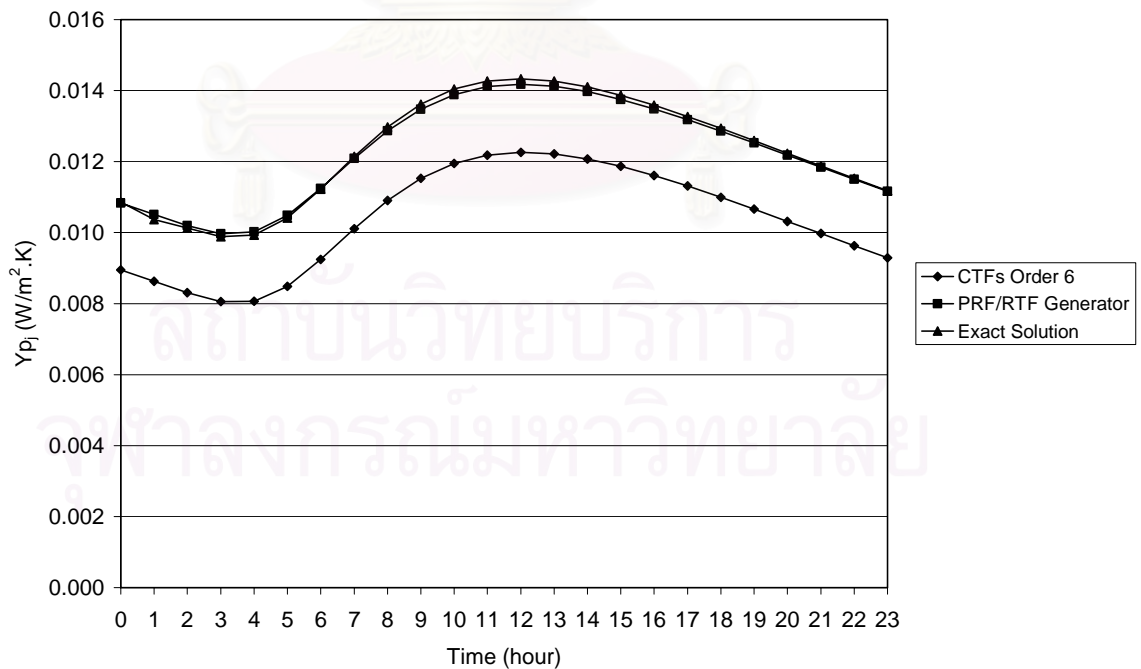
- ที่มา
1. วิธี CTFs คงที่ Spittle and Fisher (1999)
 2. วิธี CTFs แปรผัน โปรแกรม PRF/RTF Generator "[Oklahoma State University](#)"
 3. วิธี Response Factors, (Y_j) จำนวนเทอมแปรผัน (โปรแกรมประดิษฐ์)



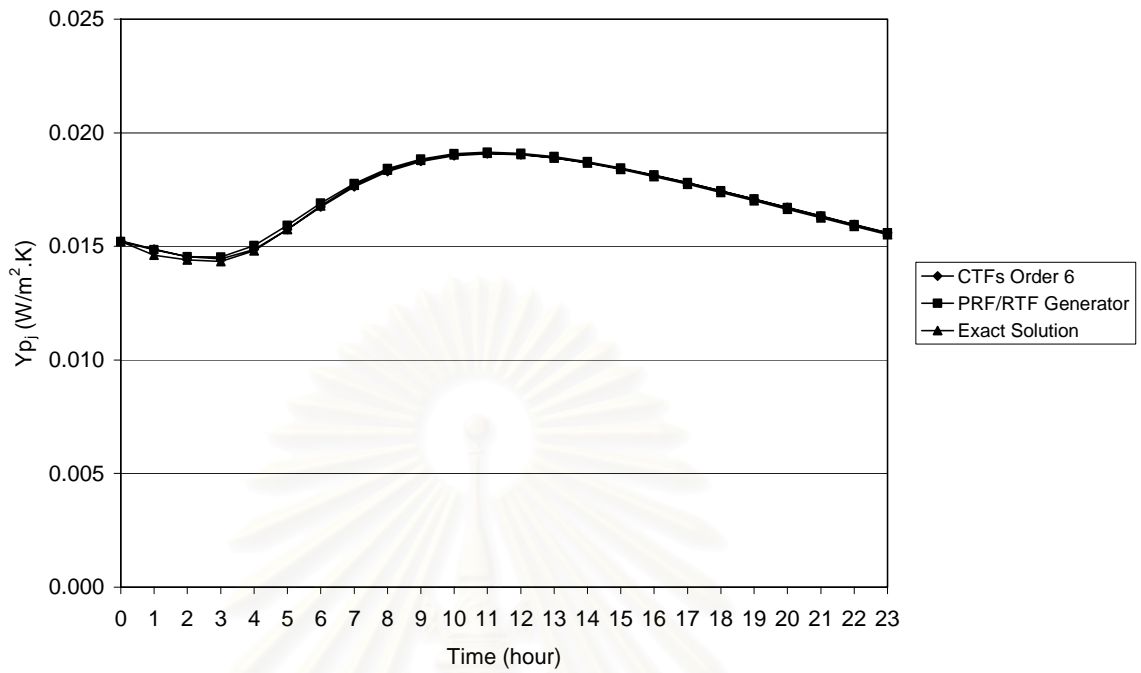
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 30 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



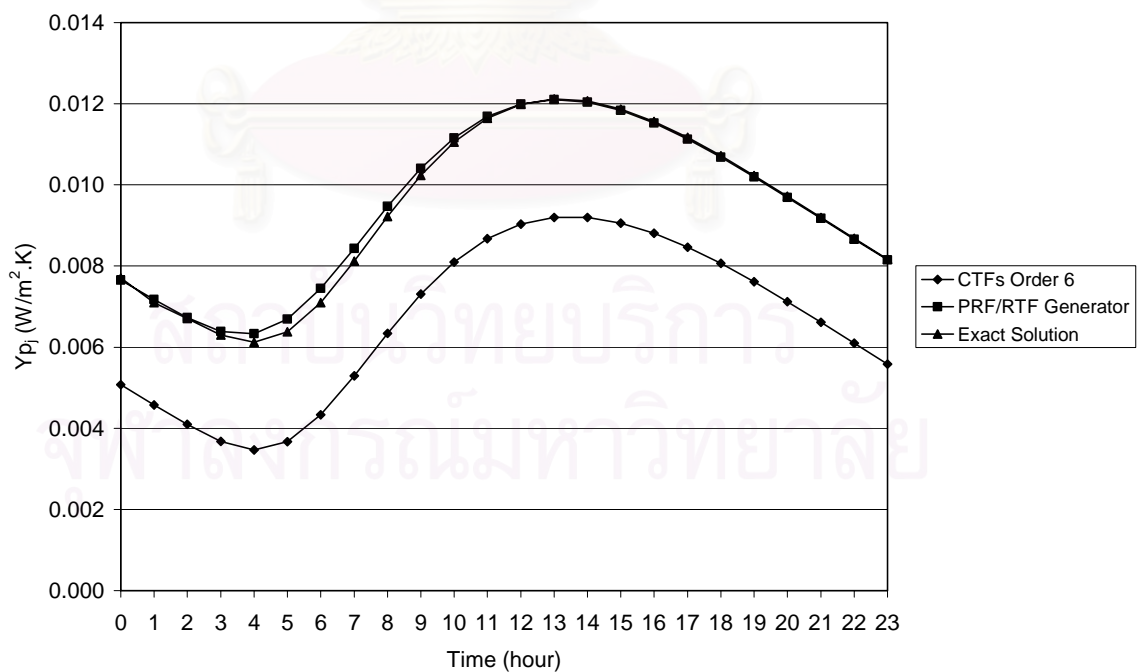
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 31 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



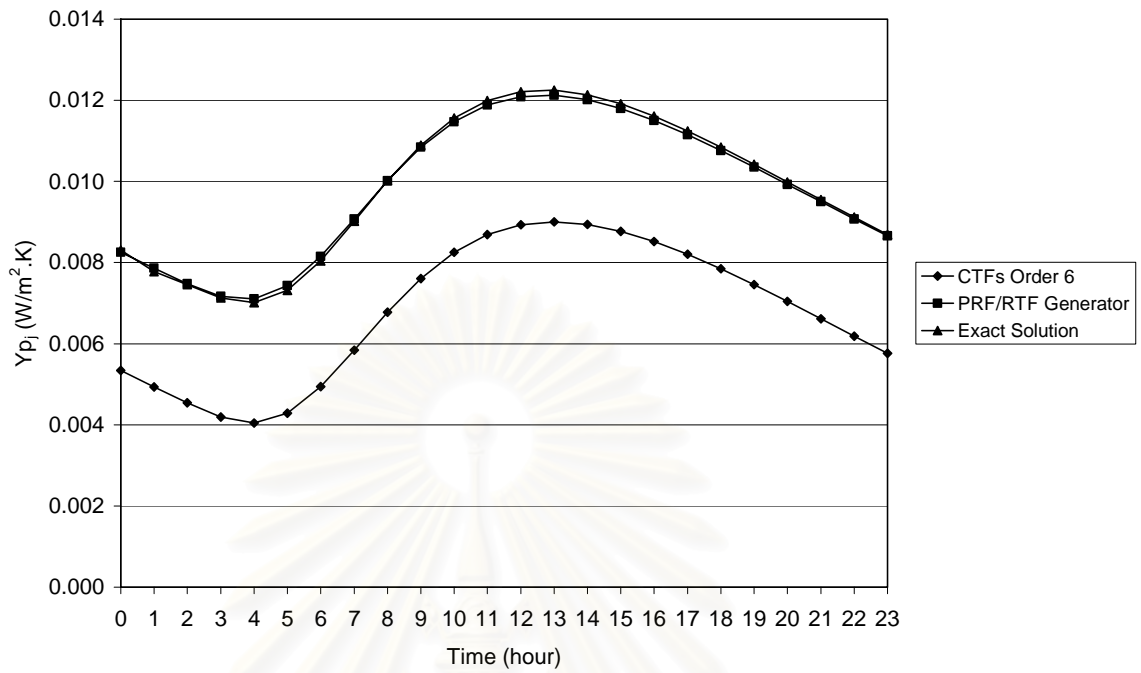
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 35 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



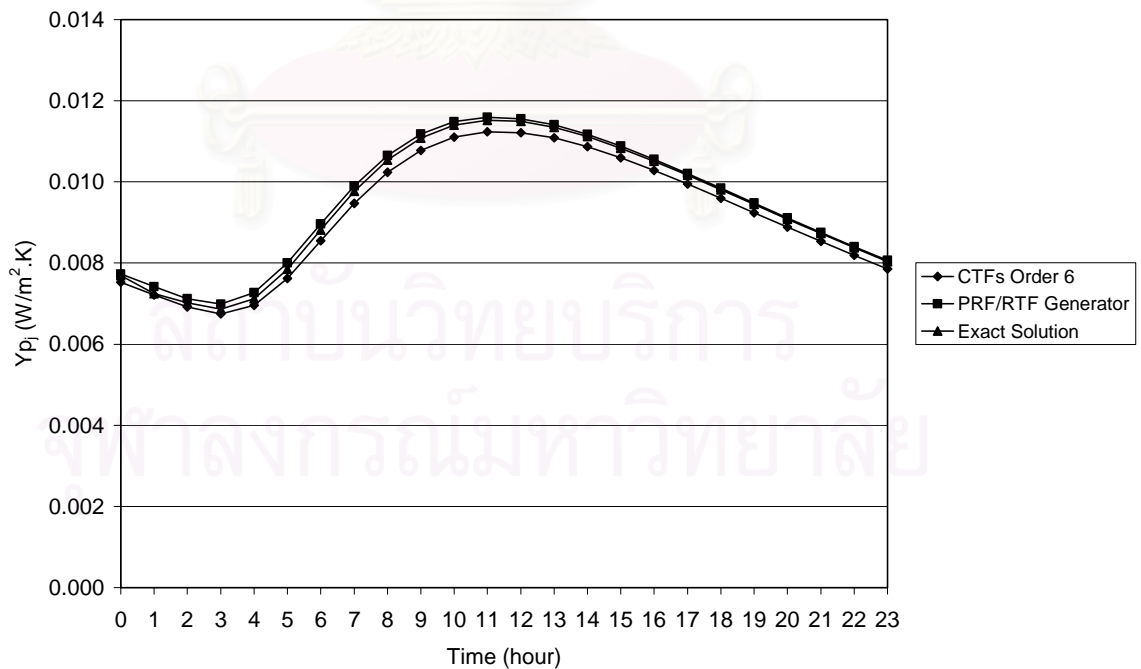
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 36 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



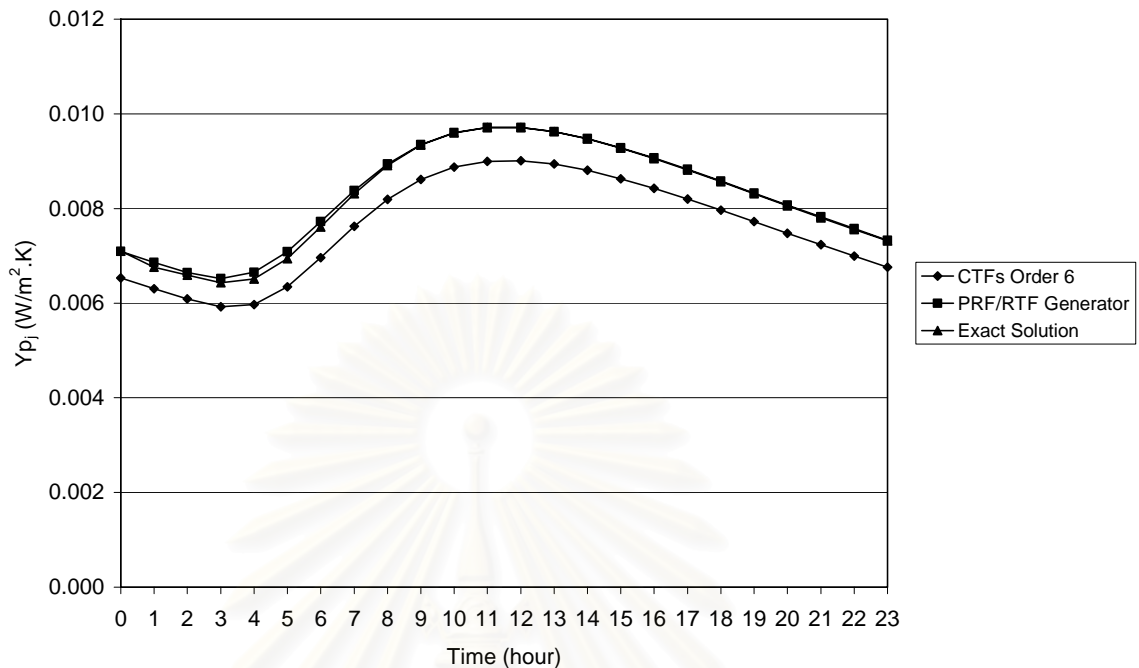
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 37 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 38 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 37 ที่คำนวณจากวิธี Direct root



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 38 ที่คำนวณจากวิธี Direct root

พิจารณาจากรูปที่ 1-8 พบว่าค่า Cross PRF จากวิธี CTFs Order 6 มีค่าน้อยที่สุดและความคลาดเคลื่อนมากที่สุดวิธีนี้จึงไม่อาจคำนวณค่า Cross PRF ให้ถูกต้องได้ แต่สำหรับวิธี Response Factors และ วิธี CTFs ที่มีการคำนวณ Order มีค่าใกล้เคียงกันมาก และสอดคล้องกับความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 1% ดังตารางที่ 4.4 โดยที่ค่า U_c ที่คำนวณได้จะน้อยกว่า U_a ทุกกรณี ซึ่งถ้าลดความคลาดเคลื่อนลงกราฟจะสูงขึ้นเนื่องจากมีค่าเข้าใกล้ค่า U_a มากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า CTFs เป็นการคำนวณ 2 ขั้นตอน ในขณะที่ วิธี Response Factors คำนวณเพียง 1 ขั้นตอน นอกจากนี้วิธี Response Factors มีข้อดีกว่า CTFs ที่มีการคำนวณ Order ดังนี้

1. มีความน่าเชื่อถือสูงเพราะมาจากคำตอบแม่นยำ
2. กำหนดความคลาดเคลื่อนได้
3. คำนวณค่า External, Cross และ Inside PRF ได้ทั้ง 3 กรณี

ดังนั้นการคำนวณค่า PRF โดยวิธี Direct root จะนำวิธี Response Factors ในระดับความถูกต้อง 1% (โปรแกรมประดิษฐ์) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับวิธี FDR Method ในลำดับต่อไป และสำหรับค่า Cross PRF จากวิธี Response Factors ในระดับความถูกต้อง 1% (โปรแกรมประดิษฐ์) ของผนัง 41 ชนิด และหลังคา 42 ชนิด ของ ASHRAE แสดงไว้ในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.1 และ ค.2 ตามลำดับ

4.2 ผลการคำนวณค่า PRF โดยวิธี FDR Method

การคำนวณค่า PRF โดยวิธี FDR Method โดยใช้ Frequency range 10^{-8} ถึง 10^{-3} $rad.s^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่กว้างพอสำหรับ Sol-air temperature และใช้จำนวน Frequency point จำนวน 50 จุด ในการจำลอง Polynomial s-transfer function

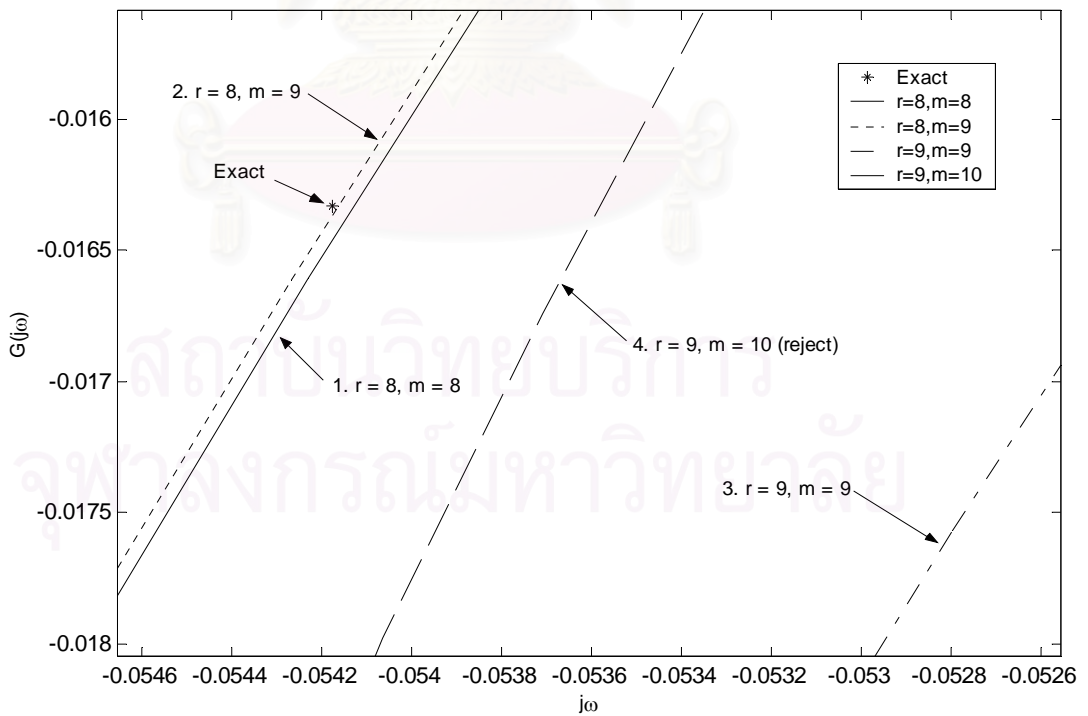
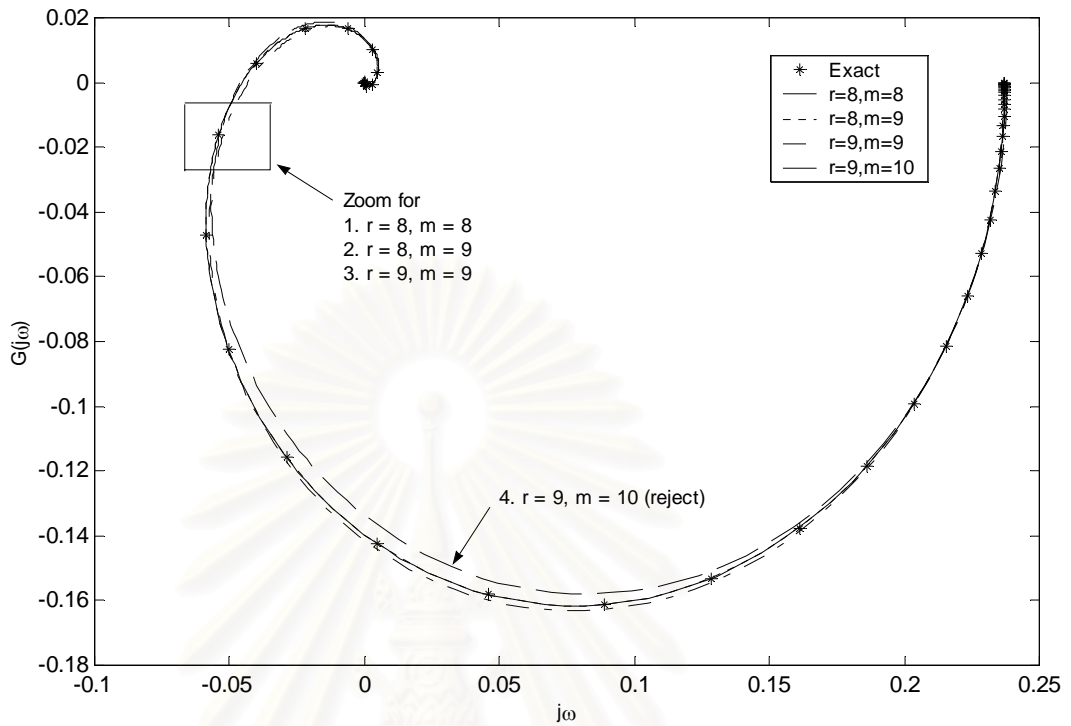
$$\tilde{G}(s) = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots + \beta_r s^r}{1 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_m s^m} = \frac{\tilde{B}(s)}{1 + \tilde{A}(s)} \quad (4.3)$$

จากการคำนวณค่า PRF โดยวิธี FDR (โปรแกรมประดิษฐ์) พบว่าค่า r และ m ตามสมการที่ (4.3) ของ Polynomial s-transfer function ที่น้อยหรือมากเกินไปจะทำให้ กราฟของ PRF มีแนวโน้มแตกต่างจากผลลัพธ์แม่นยำตรง (Response Factors) อย่างเห็นได้ชัด พิจารณาได้จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.17 นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ค่า Polynomial s-transfer function จากค่า r และ m ทุกชุดคำนวณค่า PRF แล้วพบว่าค่า U-cal จะคลาดเคลื่อนจาก U-actual น้อยมาก (น้อยกว่า 0.001% พิจารณาจากตารางที่ 4.5 – 4.8) ทุกกรณี ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากค่า U-Factor ได้ ดังนั้นค่า r และ m ของผนังและหลังคาแต่ละชนิดที่ทำให้ค่าของ PRF ใกล้เคียงกับผลลัพธ์แม่นยำตรงนั้น จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นมวลของผนังและหลังคาชนิดนั้นๆ

เมื่อพิจารณาผนังชนิดที่ 38 เป็นตัวอย่างการเลือกแบบจำลอง โดยที่เลือกใช้จากค่า r และ m 4 ชุดดังต่อไปนี้

ชุดที่	r	m
1	8	8
2	8	9
3	9	9
4	9	10

จากการคำนวณพบว่าค่า R^2 ที่ใกล้ 1 ที่สุดคือ $R^2 = 0.9999994705$ นั่นคือชุดของ Polynomial ที่มี Order r=8 และ m=9 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าเป็นเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกับผลลัพธ์แม่นยำตรงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากส่วนขยายของรูปที่ 4.9 ยังพบอีกว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดนี้ก็ยังมีความแตกต่างจากผลลัพธ์แม่นยำตรงอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นที่มาของความคลาดเคลื่อนของค่า PRF นั่นเอง ดังนั้นคลาดเคลื่อนของค่า PRF วิธีนี้จะเกิดจากความแตกต่างของแบบจำลองของ Polynomial กับ Exact solution สำหรับแบบจำลองที่ดีที่สุดของผนังชนิดที่ 38 คือ Polynomial ที่มี Order r=8 และ m=9



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่า Polynomial s-transfer function กับ Theoretical Frequency

Characteristics, (Exact) สำหรับผนังชนิดที่ 38 และส่วนขยาย

เมื่อใช้ค่า r และ m ของ Polynomial s -transfer function (เลือกจากสมการ 2.119) สำหรับผนัง 6 ชนิด และ หลังคา 2 ชนิด ของ ASHRAE ที่พบความคลาดเคลื่อนเกิน 1% ในวิธี CTFs จะได้ค่าของ PRF ใกล้เคียงกับผลลัพธ์แม่นยำตรง (Response Factors) ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4.10 ถึง 4.17 จะพบว่าคือเส้นกราฟของค่า PRF ที่อยู่ใกล้กับผลลัพธ์แม่นยำตรงที่สุดนั่นเอง และผลที่ได้พบความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 0.001% ทุกกรณี

และสำหรับค่า Cross PRF จากวิธี FDR Method (โปรแกรมประดิษฐ์) ของผนัง 41 ชนิด และหลังคา 42 ชนิด ของ ASHRAE แสดงไว้ในภาคผนวก ง ตารางที่ ง.1 และ ง.2 ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-Transfer Function ASHRAE Wall type 30 และ 31

j	Wall 30					Wall 31				
	Yp(j)* 5-5	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 7-8	Yp(j)* 11-11	Yp(j)#	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 6-7	Yp(j)* 8-8	Yp(j)* 9-9	Yp(j)#
0	0.022637	0.001396	0.008526	0.036957	0.008599	0.014156	0.005595	0.005818	0.005376	0.005809
1	0.014874	0.005128	0.007657	0.007283	0.007532	0.008340	0.005098	0.005325	0.005131	0.005203
2	0.014443	0.011449	0.006901	0.006255	0.006879	0.008550	0.004550	0.004880	0.004731	0.004824
3	0.014077	0.017645	0.006644	0.005709	0.006625	0.008723	0.004222	0.004626	0.004526	0.004574
4	0.013780	0.022621	0.007692	0.006458	0.007675	0.008875	0.004519	0.004961	0.004916	0.004914
5	0.013553	0.025404	0.010219	0.008681	0.010204	0.009007	0.005648	0.006096	0.006108	0.006053
6	0.013397	0.025394	0.013533	0.011687	0.013519	0.009102	0.007303	0.007764	0.007840	0.007725
7	0.013313	0.022807	0.016796	0.014643	0.016784	0.009188	0.008971	0.009520	0.009664	0.009484
8	0.013300	0.018500	0.019460	0.017011	0.019449	0.009236	0.010311	0.011024	0.011240	0.010991
9	0.013354	0.013770	0.021304	0.018601	0.021294	0.009268	0.011274	0.012114	0.012397	0.012085
10	0.013472	0.010053	0.022322	0.019461	0.022311	0.009277	0.011970	0.012763	0.013095	0.012736
11	0.013648	0.008493	0.022619	0.019748	0.022608	0.009251	0.012487	0.013016	0.013368	0.012992
12	0.013873	0.009609	0.022341	0.019637	0.022330	0.009217	0.012818	0.012948	0.013286	0.012927
13	0.014140	0.013141	0.021634	0.019265	0.021623	0.009141	0.012909	0.012638	0.012928	0.012620
14	0.014436	0.018085	0.020626	0.018716	0.020617	0.009052	0.012732	0.012158	0.012373	0.012143
15	0.014749	0.022962	0.019426	0.018033	0.019418	0.008935	0.012320	0.011566	0.011688	0.011552
16	0.015062	0.026229	0.018116	0.017232	0.018110	0.008789	0.011743	0.010907	0.010931	0.010894
17	0.015360	0.026718	0.016761	0.016322	0.016756	0.008637	0.011065	0.010215	0.010147	0.010203
18	0.015623	0.023995	0.015406	0.015316	0.015403	0.008457	0.010326	0.009515	0.009367	0.009504
19	0.015832	0.018515	0.014086	0.014230	0.014083	0.008291	0.009544	0.008824	0.008616	0.008814
20	0.015966	0.011531	0.012821	0.013086	0.012820	0.008136	0.008736	0.008156	0.007906	0.008146
21	0.016003	0.004769	0.011627	0.011909	0.011626	0.008015	0.007926	0.007518	0.007247	0.007508
22	0.015919	-0.000042	0.010511	0.010722	0.010511	0.007971	0.007141	0.006913	0.006640	0.006904
23	0.015695	-0.001666	0.009478	0.009546	0.009478	0.007997	0.006401	0.006346	0.006088	0.006338
Σ	0.356506	0.356506	0.356506	0.356508	0.356254	0.215611	0.215609	0.215611	0.215609	0.214943
U	0.356506					0.215610				
e	0.000000	0.000000	0.000000	0.000561	0.070686	0.000464	0.000464	0.000464	0.000464	0.309355

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

* = Based on FDR method with polynomial-s transfer function order r-m

= Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-Transfer Function ASHRAE Wall type 35 และ 36

j	Wall 35					Wall 36				
	Yp(j)* 6-7	Yp(j)* 7-7	Yp(j)* 7-8	Yp(j)* 10-10	Yp(j)#	Yp(j)* 5-6	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 7-8	Yp(j)* 11-11	Yp(j)#
0	0.010715	0.010826	0.010886	0.009283	0.010857	0.014694	0.015657	0.015218	0.018123	0.015211
1	0.010681	0.010545	0.010551	0.010880	0.010372	0.014767	0.014924	0.014855	0.014906	0.014614
2	0.010265	0.010208	0.010228	0.010475	0.010129	0.015881	0.014601	0.014523	0.014549	0.014403
3	0.009926	0.009953	0.009983	0.010142	0.009886	0.016982	0.014527	0.014444	0.014438	0.014327
4	0.009892	0.009987	0.010024	0.010090	0.009931	0.017983	0.015008	0.014924	0.014880	0.014810
5	0.010323	0.010462	0.010502	0.010471	0.010411	0.018697	0.015952	0.015855	0.015767	0.015744
6	0.011085	0.011270	0.011313	0.011183	0.011225	0.019008	0.017034	0.016893	0.016751	0.016785
7	0.011881	0.012176	0.012228	0.012001	0.012143	0.018897	0.017997	0.017793	0.017589	0.017688
8	0.012496	0.012980	0.013057	0.012738	0.012974	0.018432	0.018691	0.018464	0.018189	0.018360
9	0.012921	0.013592	0.013698	0.013308	0.013616	0.017791	0.019076	0.018899	0.018559	0.018799
10	0.013277	0.014001	0.014125	0.013699	0.014044	0.017193	0.019194	0.019131	0.018745	0.019033
11	0.013651	0.014239	0.014353	0.013938	0.014273	0.016848	0.019124	0.019199	0.018796	0.019103
12	0.014014	0.014338	0.014413	0.014063	0.014335	0.016886	0.018945	0.019139	0.018755	0.019045
13	0.014265	0.014322	0.014342	0.014102	0.014268	0.017312	0.018712	0.018983	0.018645	0.018892
14	0.014332	0.014209	0.014174	0.014075	0.014104	0.017997	0.018460	0.018756	0.018482	0.018666
15	0.014233	0.014015	0.013936	0.013987	0.013870	0.018706	0.018198	0.018476	0.018275	0.018389
16	0.014041	0.013756	0.013649	0.013844	0.013587	0.019168	0.017928	0.018160	0.018030	0.018075
17	0.013815	0.013449	0.013330	0.013648	0.013271	0.019159	0.017644	0.017818	0.017751	0.017735
18	0.013562	0.013108	0.012991	0.013404	0.012935	0.018577	0.017342	0.017459	0.017444	0.017378
19	0.013254	0.012747	0.012641	0.013117	0.012587	0.017485	0.017022	0.017089	0.017116	0.017011
20	0.012873	0.012375	0.012285	0.012795	0.012233	0.016109	0.016687	0.016714	0.016769	0.016638
21	0.012435	0.012000	0.011930	0.012443	0.011879	0.014776	0.016340	0.016337	0.016410	0.016262
22	0.011977	0.011626	0.011576	0.012071	0.011526	0.013827	0.015987	0.015961	0.016041	0.015888
23	0.011530	0.011257	0.011228	0.011684	0.011179	0.013504	0.015631	0.015588	0.015667	0.015517
Σ	0.297444	0.297441	0.297443	0.297441	0.295635	0.410679	0.410681	0.410678	0.410677	0.408373
U	0.297442					0.410678				
e	0.000672	0.000336	0.000336	0.000336	0.607513	0.000243	0.000730	0.000000	0.000243	0.561267

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

* = Based on FDR method with polynomial-s transfer function order r-m

= Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-Transfer Function ASHRAE Wall type 37 และ 38

j	Wall 37					Wall 38				
	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 7-7	Yp(j)* 8-9	Yp(j)* 10-10	Yp(j)#	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 7-7	Yp(j)* 8-9	Yp(j)* 10-10	Yp(j)#
0	0.006499	0.008487	0.007679	0.007292	0.007704	0.005866	0.008644	0.008294	0.007293	0.008307
1	0.011594	0.008848	0.007199	0.006987	0.007099	0.011082	0.008590	0.007892	0.007457	0.007778
2	0.010979	0.008360	0.006737	0.006442	0.006704	0.010550	0.008163	0.007506	0.007010	0.007459
3	0.010261	0.008035	0.006333	0.005975	0.006304	0.009996	0.007923	0.007173	0.006647	0.007129
4	0.009524	0.007840	0.006150	0.005749	0.006124	0.009485	0.007775	0.007056	0.006531	0.007014
5	0.008828	0.007771	0.006401	0.005977	0.006378	0.009054	0.007752	0.007356	0.006859	0.007316
6	0.008220	0.007818	0.007119	0.006689	0.007098	0.008723	0.007936	0.008080	0.007637	0.008042
7	0.007732	0.007973	0.008139	0.007720	0.008120	0.008503	0.008355	0.009052	0.008686	0.009016
8	0.007384	0.008218	0.009242	0.008855	0.009225	0.008397	0.008923	0.010054	0.009787	0.010020
9	0.007191	0.008523	0.010255	0.009926	0.010239	0.008401	0.009480	0.010928	0.010784	0.010895
10	0.007154	0.008855	0.011072	0.010838	0.011058	0.008510	0.009904	0.011591	0.011596	0.011560
11	0.007271	0.009193	0.011652	0.011550	0.011641	0.008712	0.010208	0.012024	0.012198	0.011994
12	0.007531	0.009533	0.011997	0.012053	0.011987	0.008995	0.010509	0.012241	0.012592	0.012213
13	0.007917	0.009883	0.012127	0.012348	0.012118	0.009340	0.010905	0.012275	0.012787	0.012248
14	0.008406	0.010232	0.012078	0.012446	0.012068	0.009730	0.011366	0.012162	0.012796	0.012137
15	0.008970	0.010545	0.011883	0.012364	0.011872	0.010143	0.011730	0.011937	0.012638	0.011914
16	0.009579	0.010771	0.011576	0.012122	0.011564	0.010559	0.011843	0.011630	0.012335	0.011609
17	0.010198	0.010879	0.011185	0.011747	0.011172	0.010954	0.011688	0.011267	0.011916	0.011246
18	0.010790	0.010889	0.010735	0.011267	0.010721	0.011305	0.011419	0.010866	0.011410	0.010846
19	0.011323	0.010855	0.010247	0.010710	0.010232	0.011593	0.011218	0.010442	0.010847	0.010424
20	0.011762	0.010813	0.009736	0.010102	0.009721	0.011799	0.011135	0.010007	0.010252	0.009990
21	0.012074	0.010729	0.009215	0.009466	0.009201	0.011903	0.011029	0.009569	0.009649	0.009553
22	0.012229	0.010507	0.008694	0.008821	0.008682	0.011889	0.010695	0.009135	0.009055	0.009120
23	0.012214	0.010075	0.008181	0.008185	0.008170	0.011758	0.010059	0.008709	0.008486	0.008694
Σ	0.225630	0.225632	0.225632	0.225631	0.225202	0.237247	0.237249	0.237246	0.237248	0.236524
U	0.225632					0.237248				
e	0.000886	0.000000	0.000000	0.000443	0.190576	0.000421	0.000421	0.000843	0.000000	0.305166

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

* = Based on FDR method with polynomial-s transfer function order r-m

= Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)

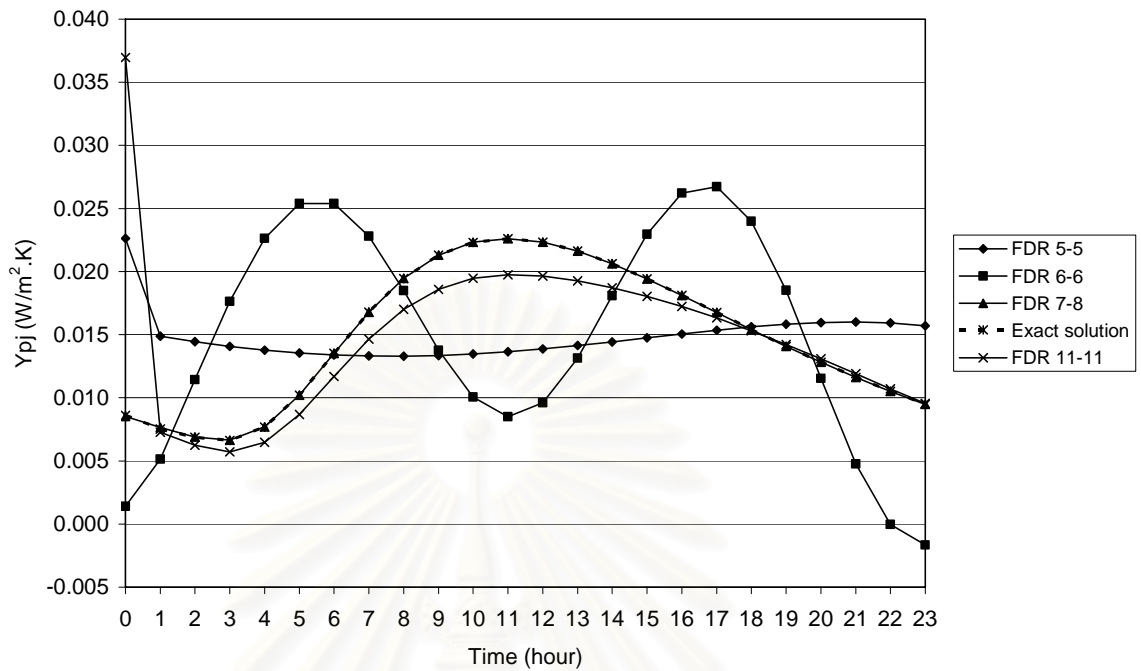
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบ Order ของ Polynomial s-Transfer Function ASHRAE Roof type 37 และ 38

j	Roof 37					Roof 38				
	Yp(j)* 5-5	Yp(j)* 6-6	Yp(j)* 7-8	Yp(j)* 10-11	Yp(j)#	Yp(j)* 6-7	Yp(j)* 7-7	Yp(j)* 8-8	Yp(j)* 10-10	Yp(j)#
0	0.017223	0.008509	0.007751	0.006396	0.007693	0.006937	0.007042	0.007100	0.006627	0.007098
1	0.009177	0.008110	0.007432	0.006928	0.007249	0.006889	0.006848	0.006866	0.006869	0.006761
2	0.009010	0.008950	0.007133	0.006667	0.007020	0.006575	0.006619	0.006643	0.006653	0.006593
3	0.008876	0.009625	0.006974	0.006568	0.006865	0.006351	0.006455	0.006483	0.006500	0.006434
4	0.008775	0.010113	0.007223	0.006898	0.007119	0.006399	0.006532	0.006561	0.006586	0.006514
5	0.008707	0.010382	0.007944	0.007718	0.007844	0.006814	0.006960	0.006989	0.007022	0.006943
6	0.008670	0.010407	0.008909	0.008799	0.008814	0.007432	0.007623	0.007653	0.007695	0.007609
7	0.008663	0.010251	0.009856	0.009880	0.009765	0.007997	0.008318	0.008355	0.008406	0.008312
8	0.008685	0.010000	0.010626	0.010802	0.010539	0.008392	0.008901	0.008950	0.009011	0.008909
9	0.008732	0.009759	0.011165	0.011502	0.011081	0.008688	0.009318	0.009379	0.009447	0.009340
10	0.008802	0.009640	0.011478	0.011970	0.011397	0.009002	0.009578	0.009638	0.009708	0.009600
11	0.008891	0.009708	0.011599	0.012216	0.011520	0.009348	0.009709	0.009750	0.009816	0.009714
12	0.008995	0.009973	0.011566	0.012261	0.011491	0.009629	0.009737	0.009747	0.009803	0.009712
13	0.009108	0.010375	0.011418	0.012128	0.011346	0.009749	0.009681	0.009656	0.009699	0.009623
14	0.009226	0.010793	0.011187	0.011850	0.011118	0.009712	0.009556	0.009504	0.009532	0.009471
15	0.009344	0.011078	0.010899	0.011458	0.010833	0.009598	0.009379	0.009310	0.009323	0.009278
16	0.009454	0.011091	0.010573	0.010989	0.010511	0.009471	0.009162	0.009087	0.009087	0.009056
17	0.009552	0.010749	0.010224	0.010473	0.010165	0.009328	0.008918	0.008846	0.008837	0.008816
18	0.009631	0.010056	0.009864	0.009939	0.009806	0.009123	0.008659	0.008596	0.008580	0.008567
19	0.009684	0.009117	0.009498	0.009408	0.009444	0.008836	0.008392	0.008341	0.008322	0.008313
20	0.009704	0.008119	0.009134	0.008898	0.009082	0.008497	0.008123	0.008086	0.008065	0.008058
21	0.009687	0.007285	0.008776	0.008420	0.008726	0.008156	0.007855	0.007832	0.007814	0.007806
22	0.009626	0.006818	0.008425	0.007982	0.008377	0.007839	0.007593	0.007583	0.007568	0.007557
23	0.009515	0.006833	0.008083	0.007588	0.008037	0.007533	0.007337	0.007338	0.007328	0.007313
Σ	0.227737	0.227741	0.227737	0.227738	0.225842	0.198295	0.198295	0.198293	0.198298	0.197397
U	0.227739					0.198295				
e	0.000878	0.000878	0.000878	0.000439	0.832971	0.000000	0.000000	0.001009	0.001513	0.452861

$e = |(\Sigma - U)/U| \times 100\%$

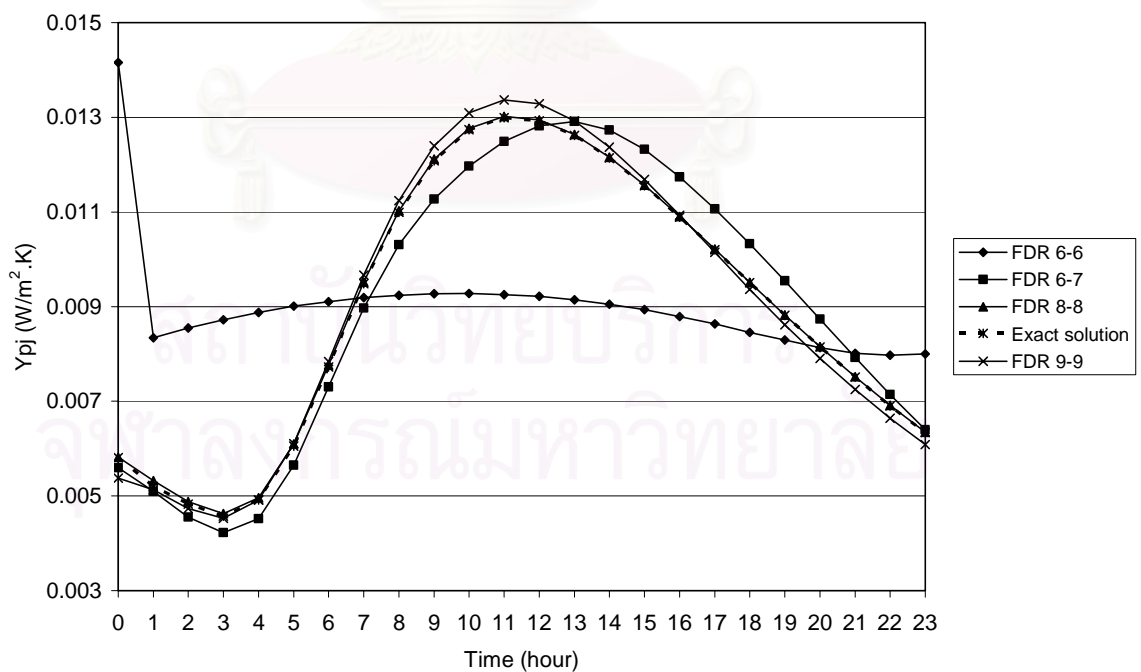
* = Based on FDR method with polynomial-s transfer function order r-m

= Based on Response Factors with check number of terms (Exact solution)



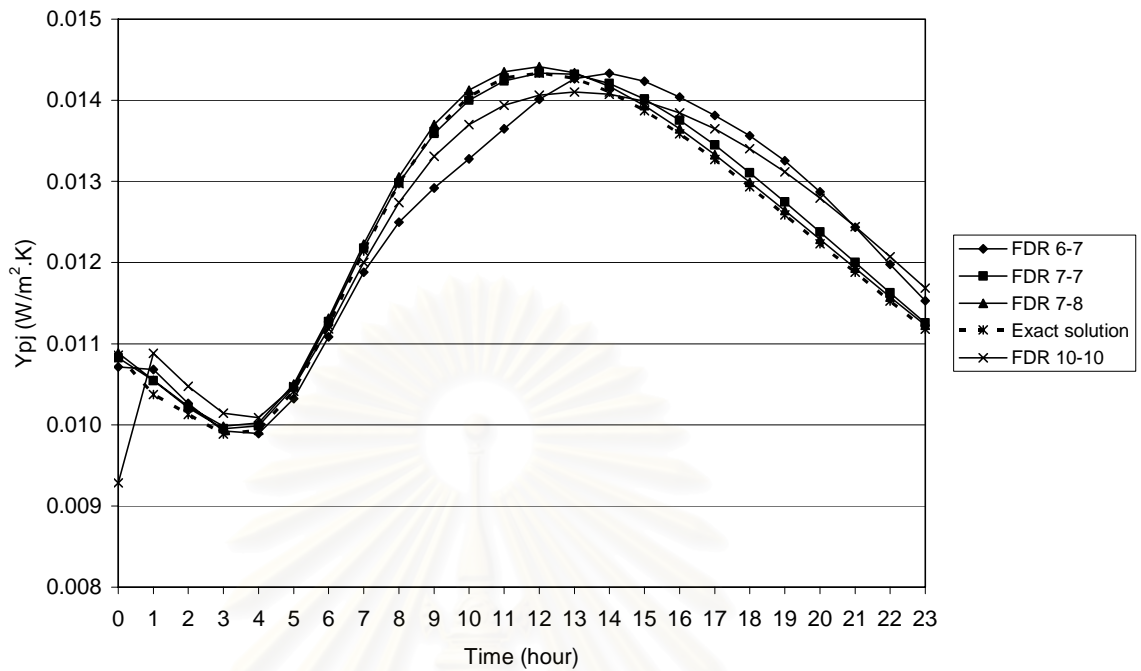
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 30 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



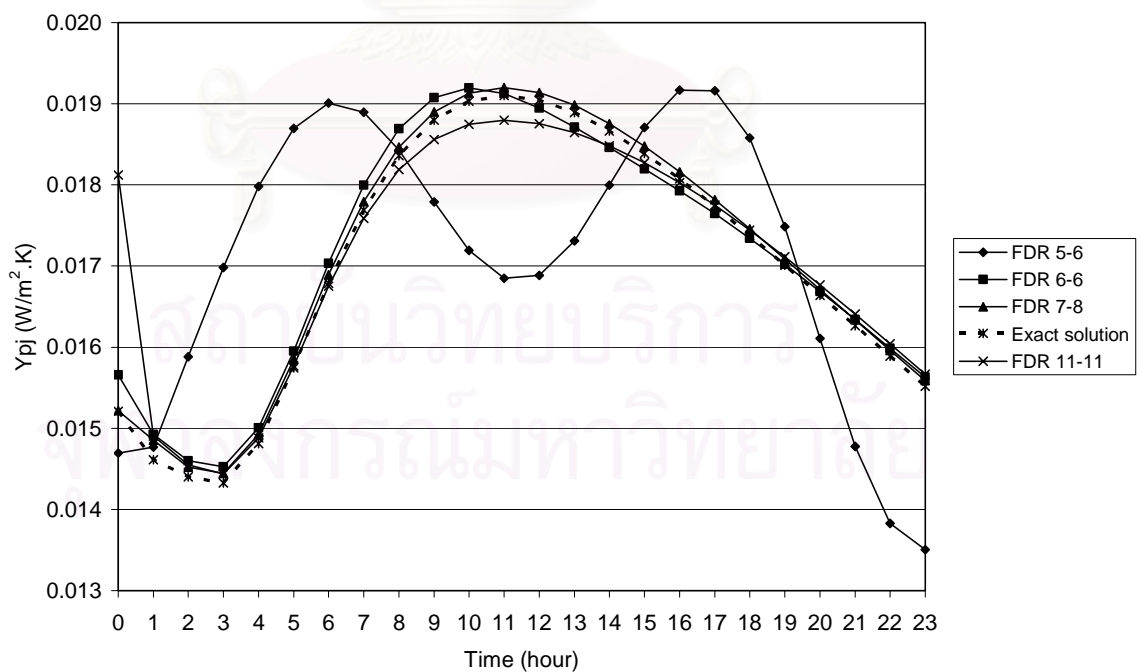
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 31 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



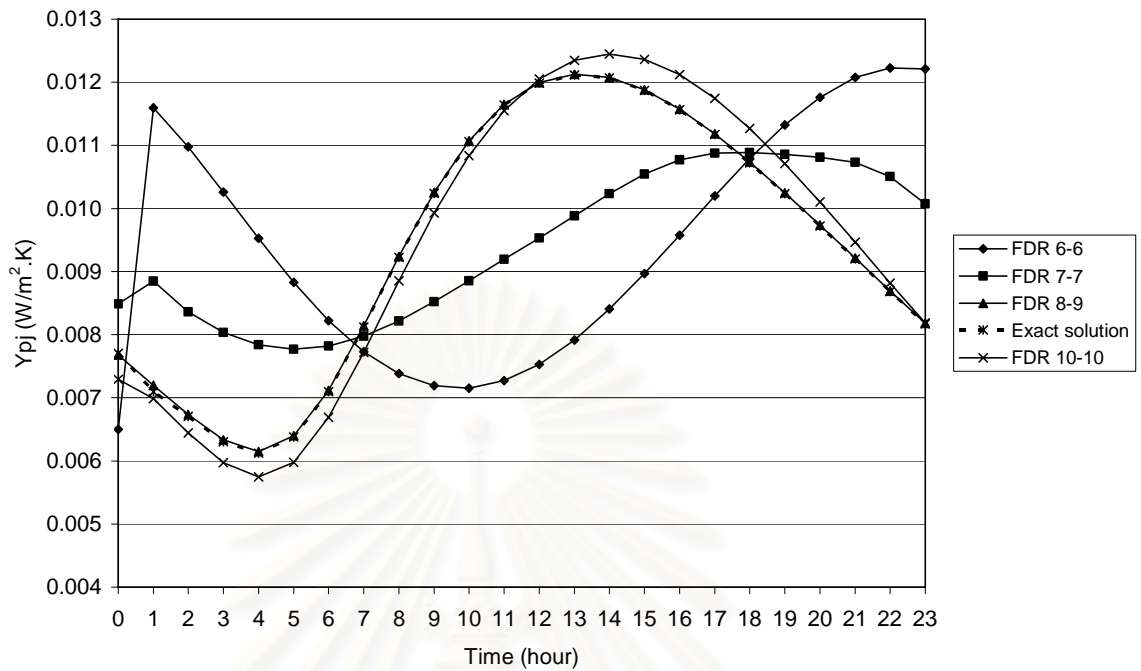
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 35 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



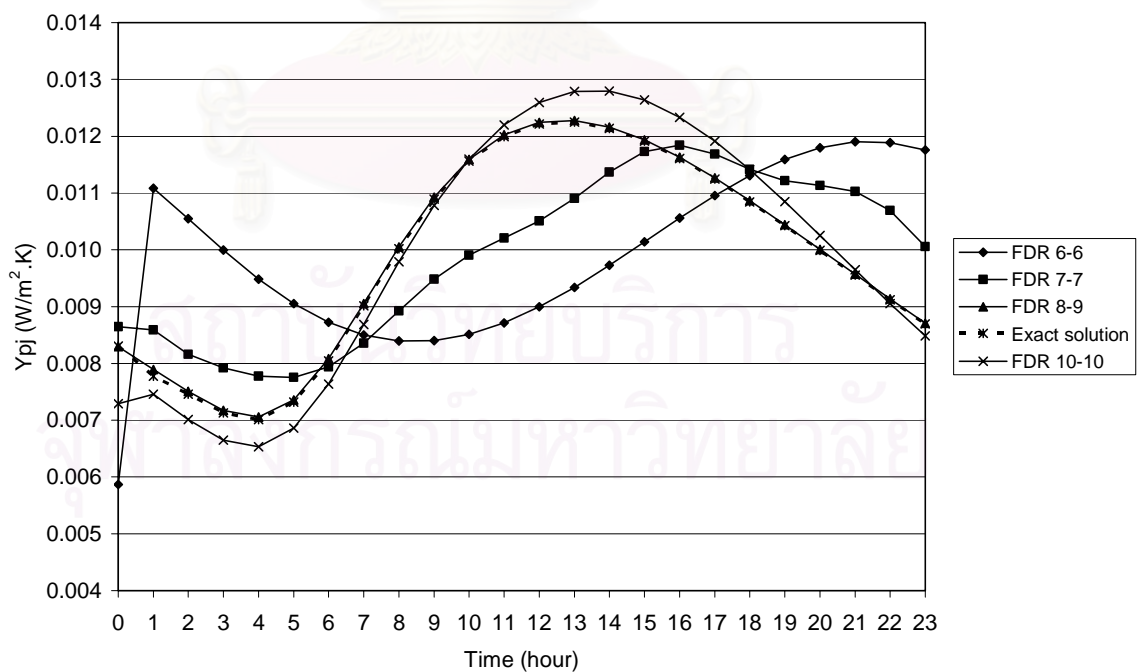
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 36 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



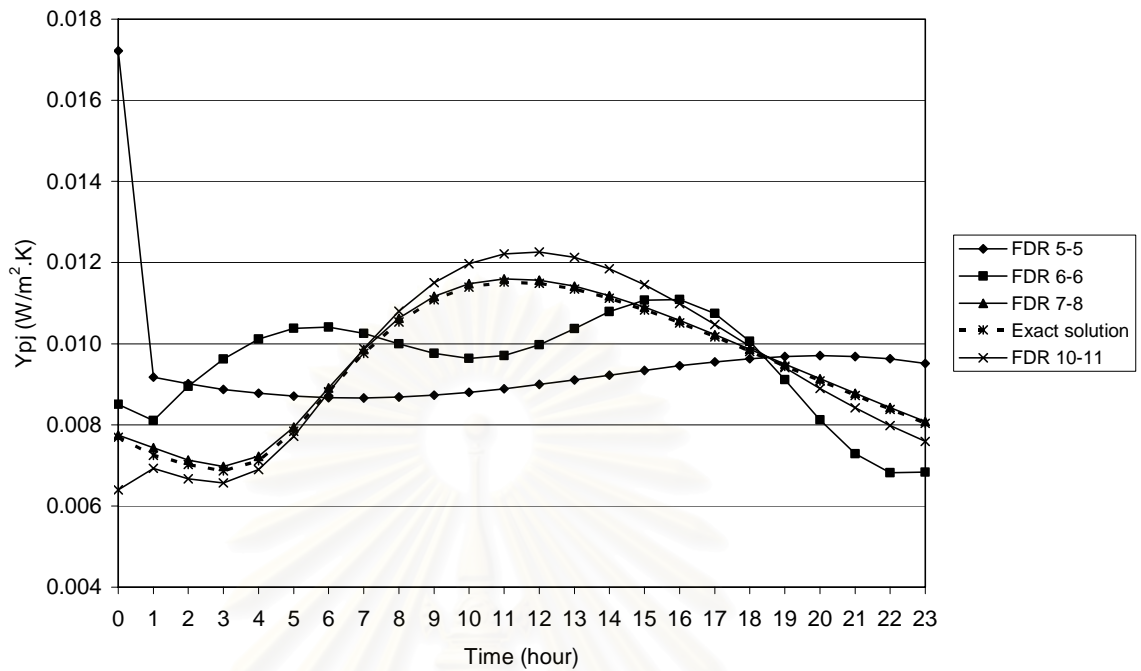
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 37 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



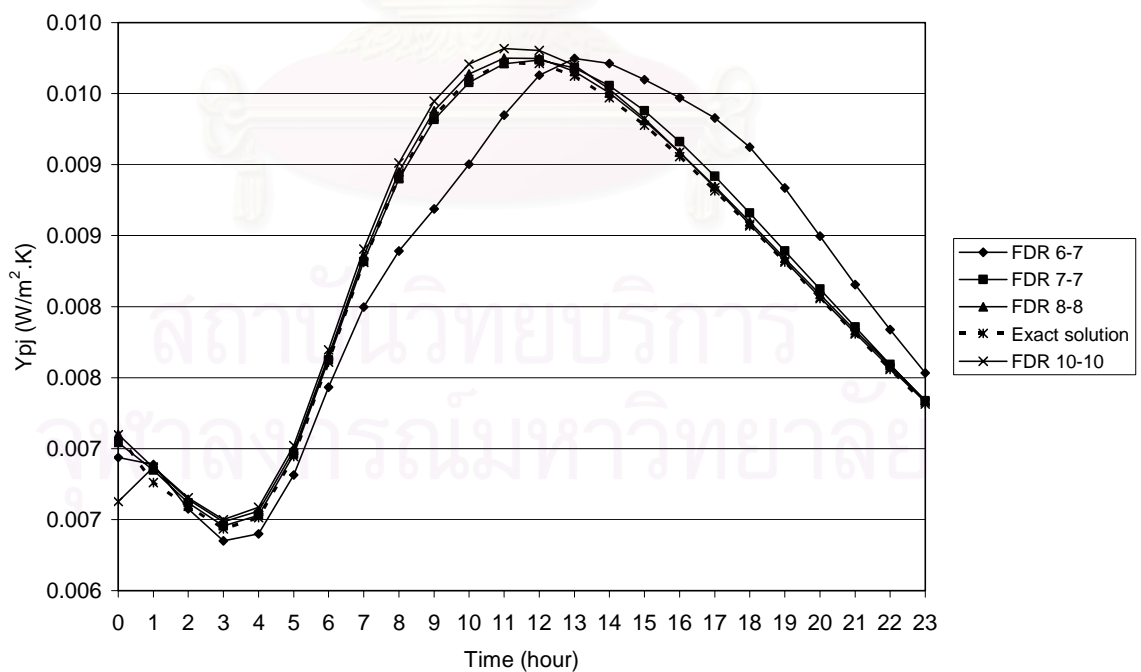
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับผนังชนิดที่ 38 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 37 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบค่า PRF สำหรับหลังคาชนิดที่ 38 ที่คำนวณโดยวิธี FDR Method

โดยใช้ Order ต่างๆ และวิธี Direct root (Response Factors)

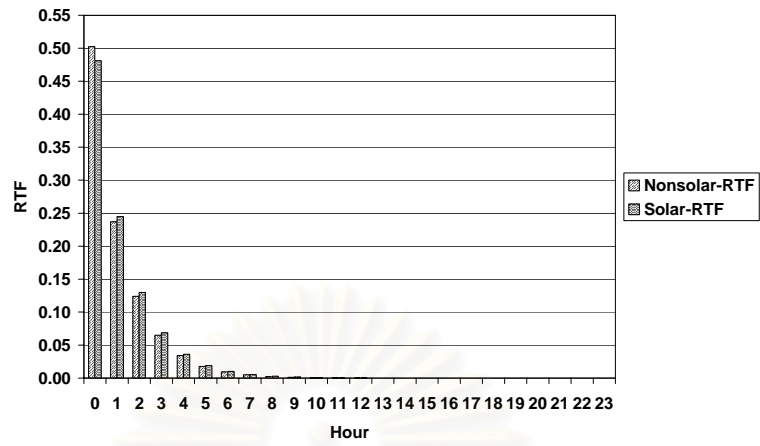
4.3 ผลการคำนวณค่า Radiant Time Factors (RTF)

ค่าสัมประสิทธิ์ RTF คือการตอบสนองของโซนที่มีต่ออากาศภายในโซนจากค่าความร้อนของการแผ่รังสี จะใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Heat gain จากการแผ่รังสีให้เป็นภาระการทำความเย็นที่ชั่วโมงใดๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการสะสมความร้อนของโซน และสภาพแลกเปลี่ยนการแผ่รังสีความร้อนภายในโซน ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า RTF 3 กรณี คือ Light, Medium และ Heavy weight zone ดังแสดงในตารางที่ 4.9

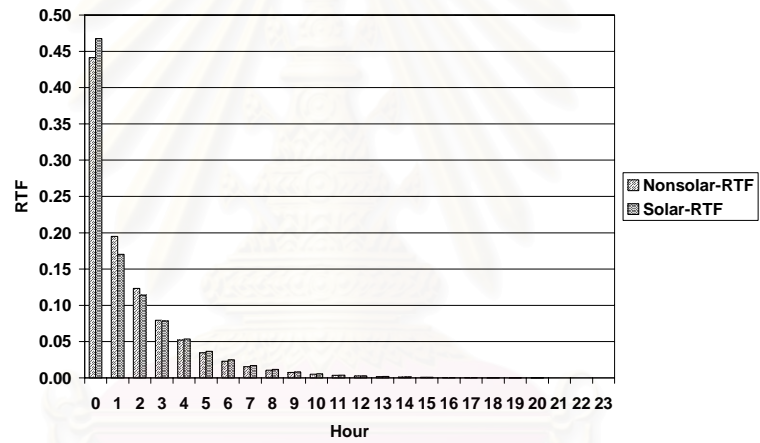
ตารางที่ 4.9 ค่า RTF สำหรับ Light, Medium และ Heavy weight zone

Hour	Light weight zone		Medium weight zone		Heavy weight zone	
	Nonsolar-RTF	Solar-RTF	Nonsolar-RTF	Solar-RTF	Nonsolar-RTF	Solar-RTF
0	0.5024340153	0.4807775915	0.4412237108	0.4675065875	0.2482230067	0.1680082977
1	0.2369523048	0.2448187023	0.1951154023	0.1703595966	0.1056950018	0.0855472088
2	0.1239693984	0.1298774928	0.1232099980	0.1140559018	0.0874237791	0.0754509568
3	0.0649968907	0.0686325654	0.0795878023	0.0782193169	0.0752656087	0.0696494132
4	0.0340819955	0.0361715481	0.0520883165	0.0535040386	0.0650257245	0.0642040074
5	0.0178721678	0.0190304797	0.0345132202	0.0365491435	0.0563261248	0.0589638166
6	0.0093720509	0.0100010149	0.0231315047	0.0249732435	0.0489202403	0.0539731458
7	0.0049147350	0.0052518398	0.0156666730	0.0170887634	0.0425973348	0.0492666923
8	0.0025772676	0.0027565709	0.0107121654	0.0117215049	0.0371818058	0.0448631532
9	0.0013515941	0.0014464699	0.0073872162	0.0080645652	0.0325284675	0.0407693088
10	0.0007088375	0.0007587989	0.0051332740	0.0055681583	0.0285177603	0.0369834676
11	0.0003716586	0.0003980296	0.0035910991	0.0038592243	0.0250504799	0.0334976912
12	0.0001949259	0.0002087952	0.0025270868	0.0026855869	0.0220446624	0.0303000752
13	0.0001021782	0.0001094663	0.0017876829	0.0018764763	0.0194317978	0.0273759495
14	0.0000534832	0.0000574112	0.0012702043	0.0013165111	0.0171548668	0.0247088429
15	0.0000280522	0.0000300376	0.0009060869	0.0009274126	0.0151658328	0.0222819168
16	0.0000147010	0.0000156937	0.0006486360	0.0006556328	0.0134245958	0.0200777575
17	0.0000076558	0.0000082521	0.0004656649	0.0004651894	0.0118971253	0.0180791803
18	0.0000039064	0.0000043171	0.0003352977	0.0003311235	0.0105544757	0.0162696093
19	0.0000019532	0.0000022317	0.0002418169	0.0002365189	0.0093722716	0.0146333370
20	0.0000009855	0.0000012534	0.0001748313	0.0001693480	0.0083297826	0.0131554576
21	0.0000004356	0.0000006892	0.0001265050	0.0001215831	0.0074090301	0.0118219042
22	0.0000002785	0.0000002785	0.0000917532	0.0000874493	0.0065946272	0.0106197167
23	0.0000000000	0.0000001321	0.0000665293	0.0000630078	0.0058733840	0.0095366761

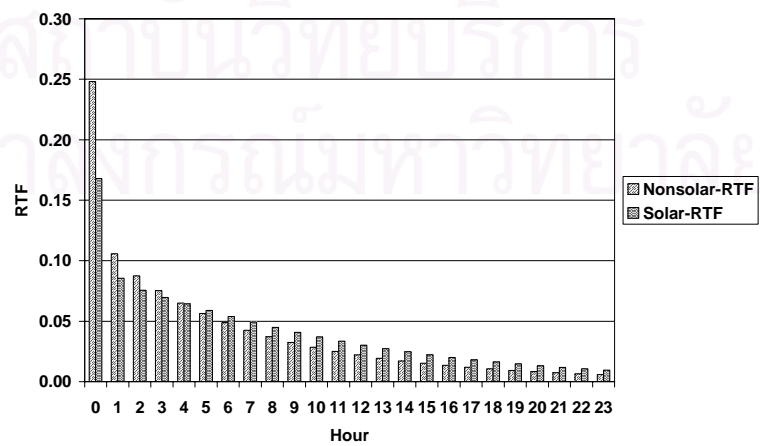
เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.18 ถึง 4.20 พบว่า Light weight zone จะตอบสนองต่อการแผ่รังสีความร้อนในชั่วโมงต้นๆสูงมาก และจะตอบสนองในชั่วโมงท้ายๆน้อยมาก สำหรับ Medium weight zone จะมีการตอบสนองในชั่วโมงต้นๆน้อยลงแต่จะเพิ่มขึ้นในชั่วโมงท้าย ส่วน Heavy weight zone ก็จะมีการตอบสนองในชั่วโมงต้นๆน้อยลงไปอีกและจะเพิ่มขึ้นในชั่วโมงท้ายมากขึ้นอีก ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณการสะสมความร้อนไว้ภายในโซน และจะถ่ายเทความร้อนออกมาในภายหลัง ปริมาณการสะสมความร้อนในตัวโซนนี้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นมวล



รูปที่ 4.18 ค่า RTF สำหรับ Light weight zone



รูปที่ 4.19 ค่า RTF สำหรับ Medium weight zone



รูปที่ 4.20 ค่า RTF สำหรับ Heavy weight zone

4.4 ผลการคำนวณค่า CLTD จากวิธี RTSM

ค่า CLTD จาก ASHRAE GRP-158 เดิมใช้วิธี Transfer Function Method (TFM) ในการคำนวณ ซึ่งจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์เชิงความร้อน 2 ชุด โดยที่ชุดแรกคือ Conduction Transfer Function Coefficients (CTFs) ใช้สำหรับเปลี่ยนค่าความร้อนจากสภาวะอากาศภายนอกที่ตกกระทบบนกรอบอาคาร ให้เป็นค่าความร้อนที่ห้องได้รับ (Heat gain) และชุดที่สองคือ Room Weighting Factors ซึ่งจะแบ่งเป็น Solar Weighting Factors ใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Heat gain จากแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาทางกระจกให้เป็นภาระการทำความร้อน และ Nonsolar Weighting Factors ใช้สำหรับเปลี่ยนค่า Heat gain จากแหล่งความร้อนภายในและความร้อนจากผนังและหลังคาให้เป็นภาระการทำความร้อน สำหรับค่า CLTD ในวิทยานิพนธ์นี้คำนวณจากวิธี RTSM ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณคล้ายกับวิธี TFM โดยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 2 ชุด เช่นกัน คือ Periodic Response Factors (PRF) และ Radiant Time Factors (RTF) ซึ่งแบ่งเป็น Solar-RTF และ Nonsolar-RTF อีกเช่นกัน ความแตกต่างของวิธีทั้งสองคือในกระบวนการคำนวณภาระการทำความร้อนสำหรับวิธี TFM จะต้องใช้วิธีการทำซ้ำจึงทำให้มีความยุ่งยากในการคำนวณ ประกอบกับค่า CTFs ที่ใช้ในการคำนวณค่า Heat gain ยังมีความคลาดเคลื่อนสูง (ตามหัวข้อ 4.1.1) ในขณะที่วิธี RTSM ไม่ต้องใช้วิธีการทำซ้ำ และได้รับการปรับปรุงความคลาดเคลื่อนของค่า PRF แล้ว

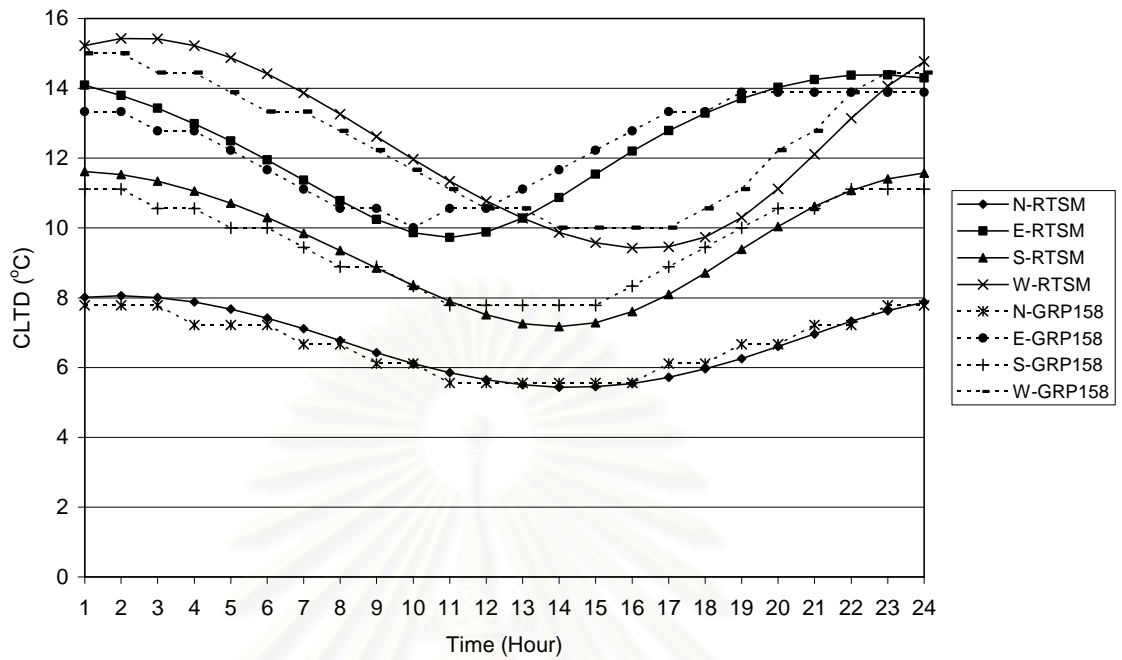
ผลการคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังของ ASHRAE GRP-158 กลุ่ม A-G แสดงในตารางที่ 4.10 ถึง 4.11 และรูปที่ 4.21 ถึง 4.34 พบว่าค่า CLTD สูงสุดในรอบวันจากวิธี RTSM จะแตกต่างจาก ASHRAE GRP-158 (TFM) ตั้งแต่ -0.2 ถึง 4.8 °C ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.1 °C และค่า CLTD สูงสุดในรอบวันจากวิธี RTSM จะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมง

ผลการคำนวณค่า CLTD สำหรับหลังคาของ ASHRAE GRP-158 ชนิดที่ 1-13 แสดงในตารางที่ 4.12 ถึง 4.15 และรูปที่ 4.35 ถึง 4.47 พบว่าค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะแตกต่างจาก ASHRAE GRP-158 (TFM) ตั้งแต่ -0.9 ถึง 9.0 °C ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 °C ส่วนค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของหลังคาที่มีฝ้าเพดานจะมีความแตกต่างตั้งแต่ -0.3 ถึง 4 °C ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2 °C สำหรับค่า CLTD ของหลังคาทั้งที่มีและไม่มีฝ้าเพดานสูงสุดในรอบวันจากวิธี RTSM จะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมง

หมายเหตุ: แกนนอนที่แสดงจำนวนชั่วโมงในกราฟตั้งแต่ 0 ถึง 23 มีความหมายว่าใน 1 วันมี 24 ชั่วโมง นับเริ่มต้นจาก 0 แกนนอนที่แสดงจำนวนชั่วโมงในกราฟตั้งแต่ 1 ถึง 24 มีความหมายว่าใน 1 วันมี 24 ชั่วโมง นับเริ่มต้นจาก 1 กำหนดให้มีความหมายเดียวกันเพียงแต่นับเริ่มต้นต่างกันเท่านั้นเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบค่า CLTD

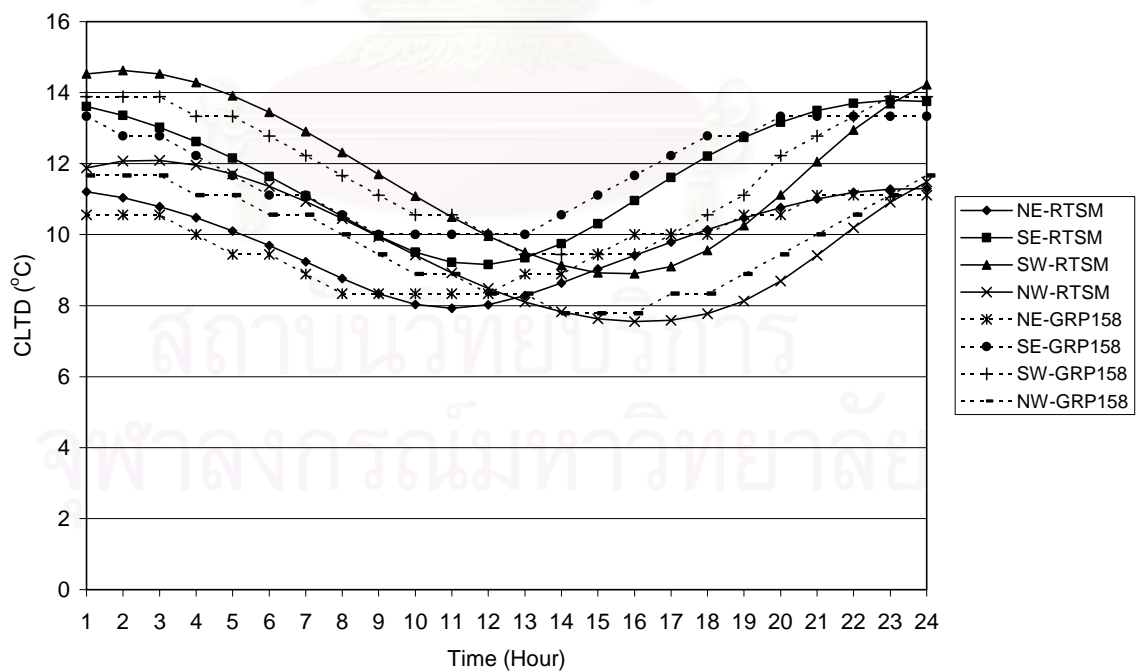
ตารางที่ 4.11 ค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A-G จาก ASHRAE GRP-158 ($^{\circ}\text{C}$)

	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Group A Walls																								
N	8	8	8	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	8	8	
NE	11	11	11	10	9	9	9	8	8	8	8	8	9	9	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11
E	13	13	13	13	12	12	11	11	11	10	11	11	11	12	12	13	13	13	14	14	14	14	14	14
SE	13	13	13	12	12	11	11	11	10	10	10	10	10	11	11	12	12	13	13	13	13	13	13	13
S	11	11	11	11	10	10	9	9	9	8	8	8	8	8	8	8	9	9	10	11	11	11	11	11
SW	14	14	14	13	13	13	12	12	11	11	11	10	9	9	9	9	10	11	11	12	13	13	14	14
W	15	15	14	14	14	13	13	13	12	12	11	11	10	10	10	10	10	11	11	12	13	14	14	14
NW	12	12	12	11	11	11	11	10	9	9	9	8	8	8	8	8	8	9	9	10	11	11	12	12
Group B Walls																								
N	8	8	8	7	7	6	6	6	5	5	5	4	5	5	5	6	6	7	7	8	8	8	8	8
NE	11	10	9	9	8	8	7	7	7	7	8	8	9	9	10	11	11	11	11	12	12	12	11	11
E	13	12	12	11	10	9	9	8	8	8	8	9	11	12	12	13	14	14	15	15	14	14	14	13
SE	13	12	12	11	10	9	9	8	8	8	8	8	9	10	11	12	13	13	14	14	14	14	14	13
S	12	11	11	10	9	8	8	7	7	6	6	6	6	7	8	8	9	11	11	12	12	12	12	12
SW	15	14	14	13	12	12	11	10	9	8	8	8	7	7	8	8	9	11	12	14	15	16	16	16
W	16	16	15	14	13	13	12	11	10	9	9	8	8	8	8	8	9	11	12	14	15	16	16	17
NW	13	12	12	11	11	10	9	8	8	7	7	7	6	7	7	7	8	9	11	12	12	13	13	
Group C Walls																								
N	8	8	7	7	6	6	5	4	4	4	4	4	4	5	6	7	7	8	8	9	9	9	9	9
NE	11	9	9	8	7	6	6	6	6	7	8	9	11	11	12	12	12	13	13	13	13	12	12	11
E	12	12	11	9	8	8	7	7	8	9	11	12	14	15	16	16	17	17	17	16	16	15	14	13
SE	12	12	11	9	8	8	7	7	7	7	9	11	12	13	14	16	16	16	16	16	16	15	14	13
S	12	11	10	9	8	7	7	6	5	5	5	6	6	8	9	11	12	13	14	14	14	14	13	12
SW	16	15	14	12	11	10	9	8	7	6	6	6	6	7	8	10	12	14	16	18	18	18	18	17
W	17	16	15	14	12	11	10	9	8	7	7	7	7	7	8	9	11	13	16	18	19	19	19	18
NW	14	13	12	11	10	9	8	7	6	6	6	6	6	6	7	7	8	10	12	14	15	15	15	14
Group D Walls																								
N	8	7	7	6	5	4	3	3	3	3	3	4	4	6	7	7	8	9	10	11	11	11	10	9
NE	9	8	7	6	6	4	4	4	6	8	9	11	12	13	13	13	13	14	14	13	13	12	11	10
E	11	9	8	7	6	5	4	5	7	9	12	15	17	18	18	18	18	18	17	17	16	14	13	12
SE	11	9	8	7	6	6	4	4	6	7	9	12	14	16	17	18	18	18	17	17	16	14	13	12
S	11	9	8	7	6	5	4	4	3	3	4	5	7	9	11	13	15	16	16	16	15	14	13	12
SW	16	14	12	11	9	8	7	6	5	4	4	4	6	7	9	12	15	18	20	21	21	21	19	17
W	17	15	13	12	10	8	7	6	6	5	5	5	6	6	8	10	13	17	20	22	23	22	21	19
NW	14	12	11	9	8	7	6	5	4	4	4	4	5	6	7	8	10	12	15	17	18	18	17	15
Group E Walls																								
N	7	6	4	4	3	2	2	2	3	3	4	5	6	7	8	9	11	11	12	13	11	10	9	8
NE	7	6	5	4	3	2	3	5	8	11	13	14	14	14	14	14	14	14	14	13	12	11	9	8
E	8	7	6	4	3	3	3	6	10	14	18	20	21	21	20	19	18	18	17	16	14	12	11	9
SE	8	7	6	4	4	3	3	4	7	11	14	17	19	21	21	20	19	18	17	16	14	13	11	9
S	8	7	6	4	4	3	2	2	2	3	5	7	11	13	16	18	19	18	17	16	14	13	11	9
SW	12	10	8	7	6	4	3	3	3	3	4	5	7	10	13	18	21	24	25	24	22	19	17	14
W	14	12	9	8	6	5	4	3	3	3	4	5	6	8	11	15	20	24	27	27	25	22	19	16
NW	11	9	8	6	5	4	3	3	3	3	3	4	6	7	9	11	14	18	21	21	20	18	16	13
Group F Walls																								
N	4	3	3	2	1	1	1	2	3	4	5	6	8	9	11	12	12	13	13	13	11	9	7	6
NE	5	4	3	2	1	1	3	8	13	16	17	16	16	15	15	15	15	14	13	12	11	9	7	6
E	6	4	3	2	2	1	3	9	16	21	24	25	24	22	20	19	18	17	15	13	12	9	8	7
SE	6	4	3	2	2	1	2	6	11	16	20	23	24	23	22	20	19	17	16	14	12	10	8	7
S	6	4	3	2	2	1	1	2	4	7	11	15	19	21	22	21	19	17	14	12	10	8	7	6
SW	8	6	5	3	3	2	1	1	2	3	4	6	9	14	19	24	28	29	29	25	21	16	13	10
W	9	7	6	4	3	2	2	2	2	3	4	6	8	11	16	22	27	32	33	30	24	19	15	12
NW	8	6	4	3	2	2	1	1	2	3	4	6	7	8	12	15	19	23	26	24	19	16	12	10
Group G Walls																								
N	2	1	1	0	-1	1	4	4	5	7	8	10	12	13	13	13	14	14	12	8	6	5	4	3
NE	2	1	1	0	-1	5	15	20	22	19	17	14	14	15	15	14	14	12	10	8	6	5	4	3
E	2	1	1	0	-1	6	17	26	30	31	28	22	18	17	17	16	15	13	11	8	7	6	4	3
SE	2	1	1	0	-1	3	10	18	23	27	28	27	23	20	18	17	15	13	11	8	7	6	4	3
S	2	1	1	0	-1	0	1	3	7	12	17	22	25	26	24	21	17	14	11	8	7	6	4	3
SW	3	2	2	1	0	0	1	3	4	7	9	14	21	28	33	35	34	29	21	13	9	7	6	4
W	3	3	2	1	1	1	1	3	4	6	8	11	15	23	31	37	40	37	27	16	11	8	6	4
NW	3	2	1	1	0	0	1	3	4	6	8	10	12	15	21	26	31	31	23	14	9	7	6	4



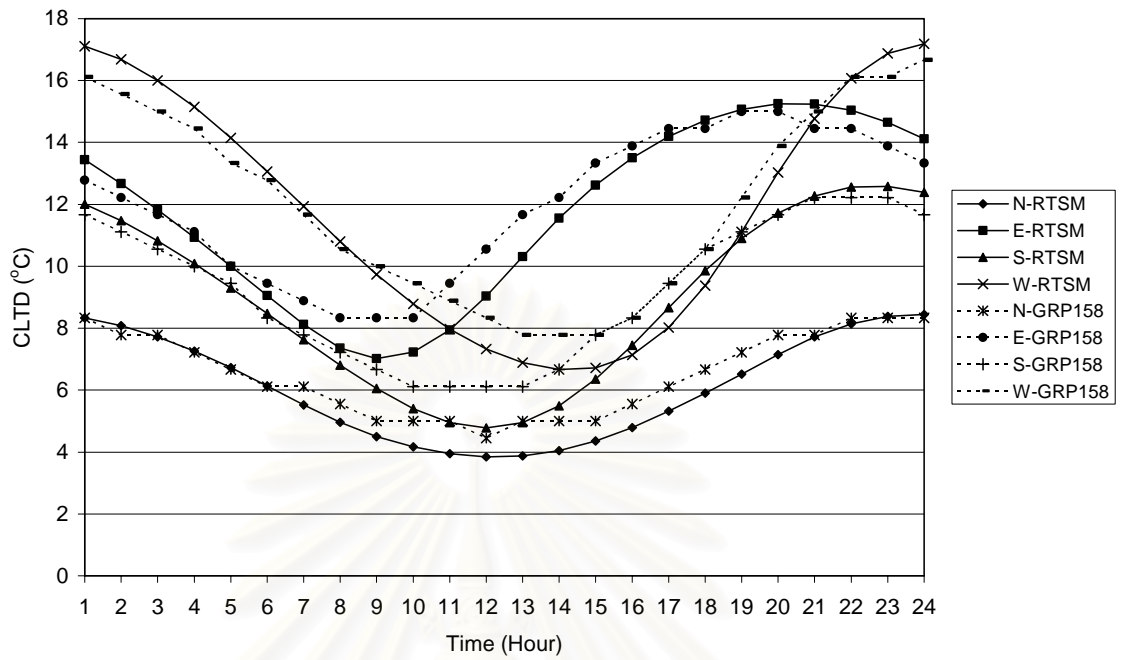
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



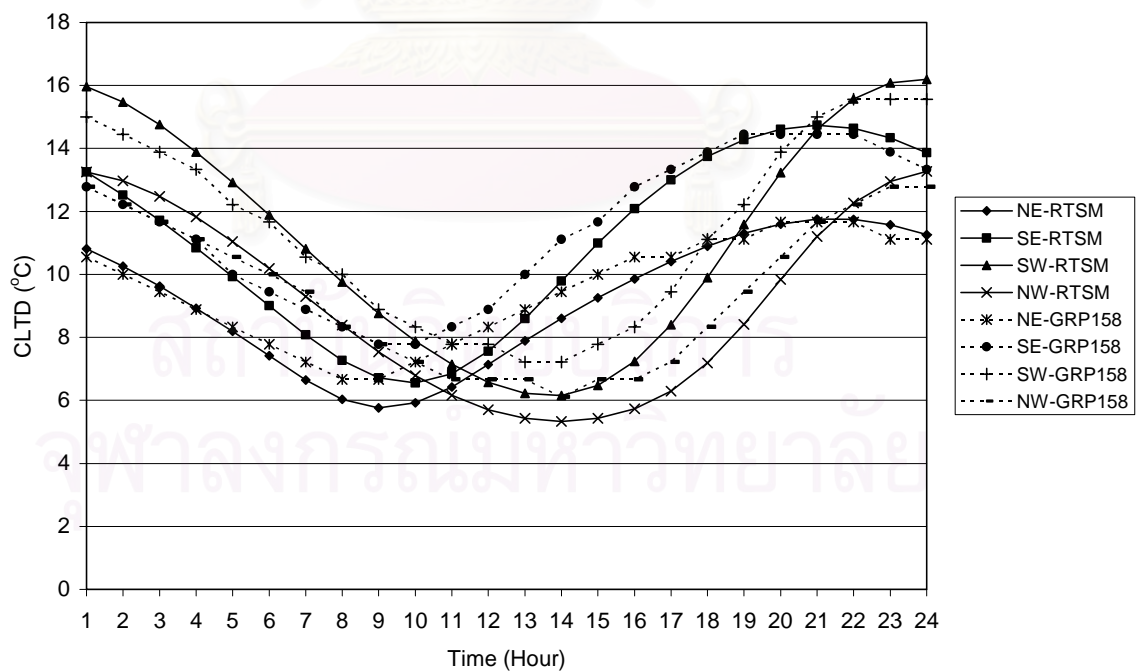
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม A ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



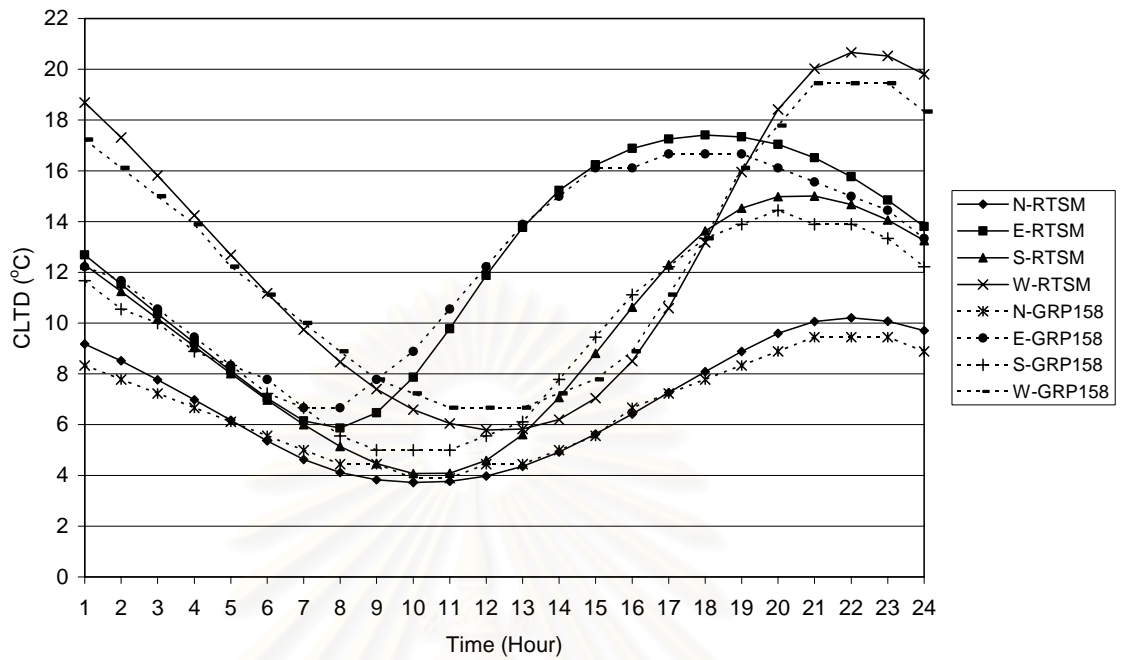
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม B ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



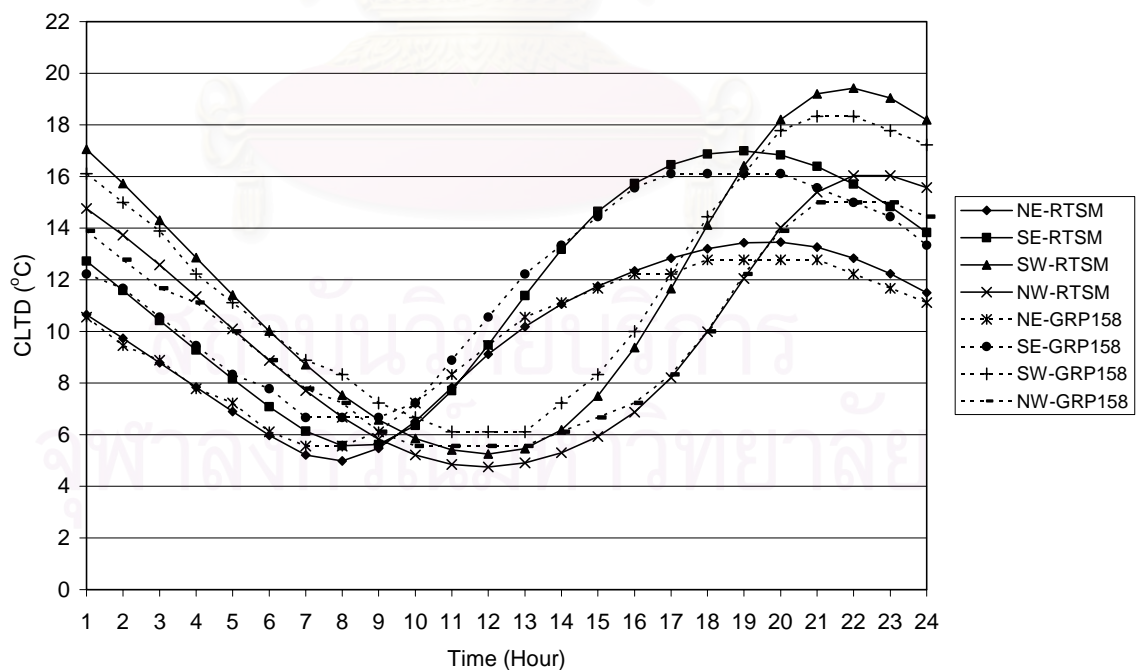
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม B ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



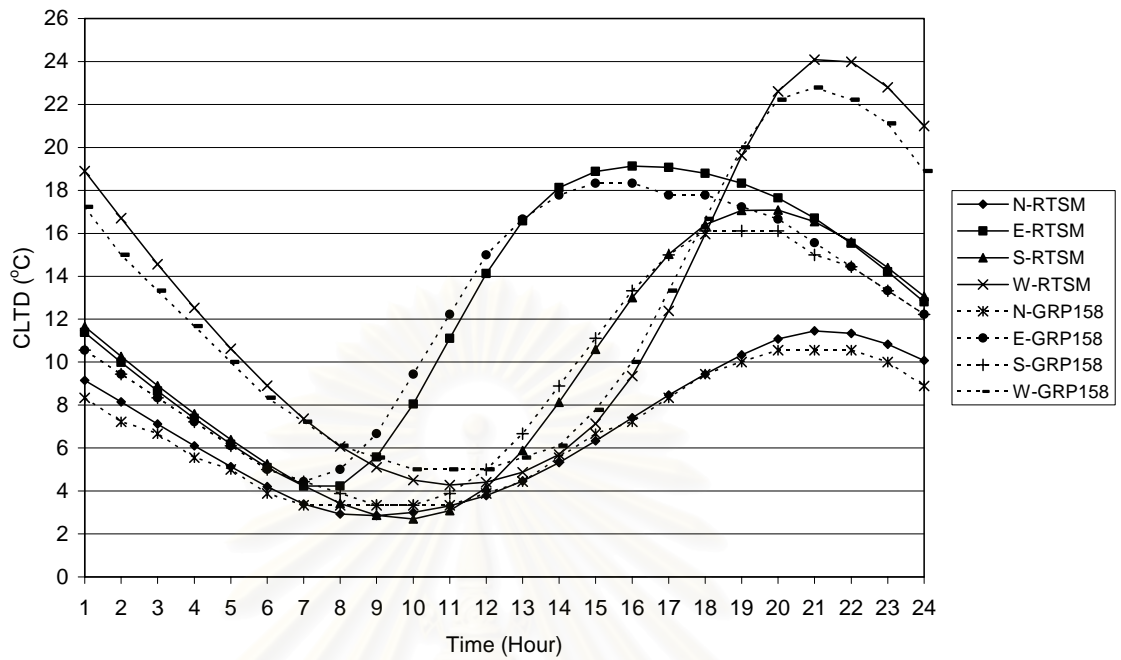
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม C ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



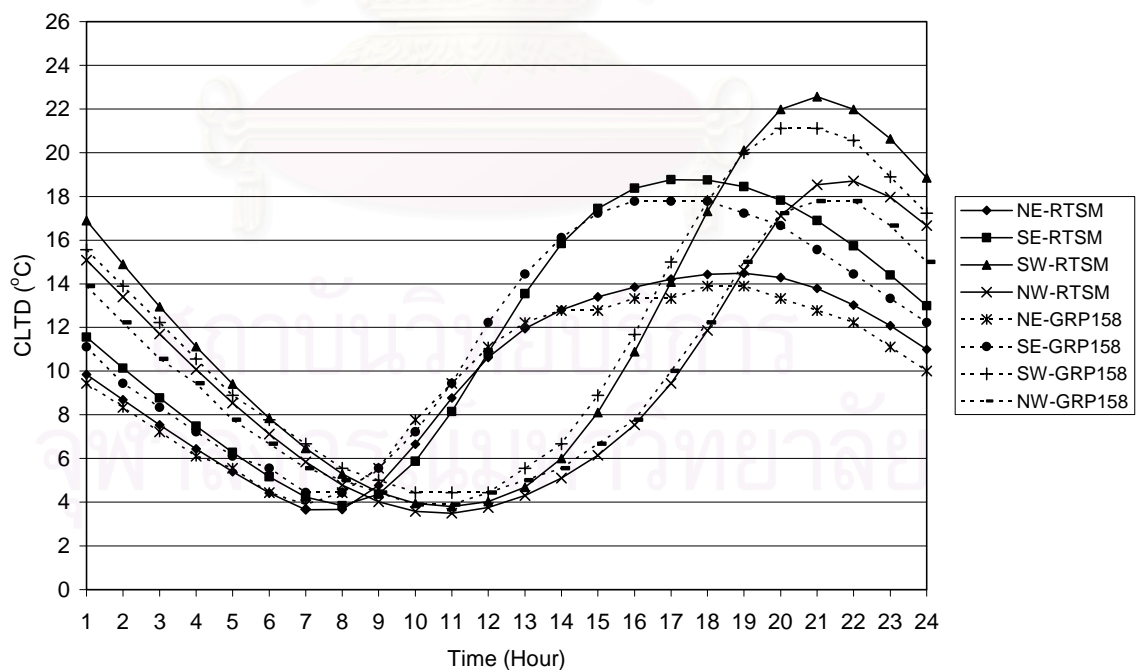
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม C ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



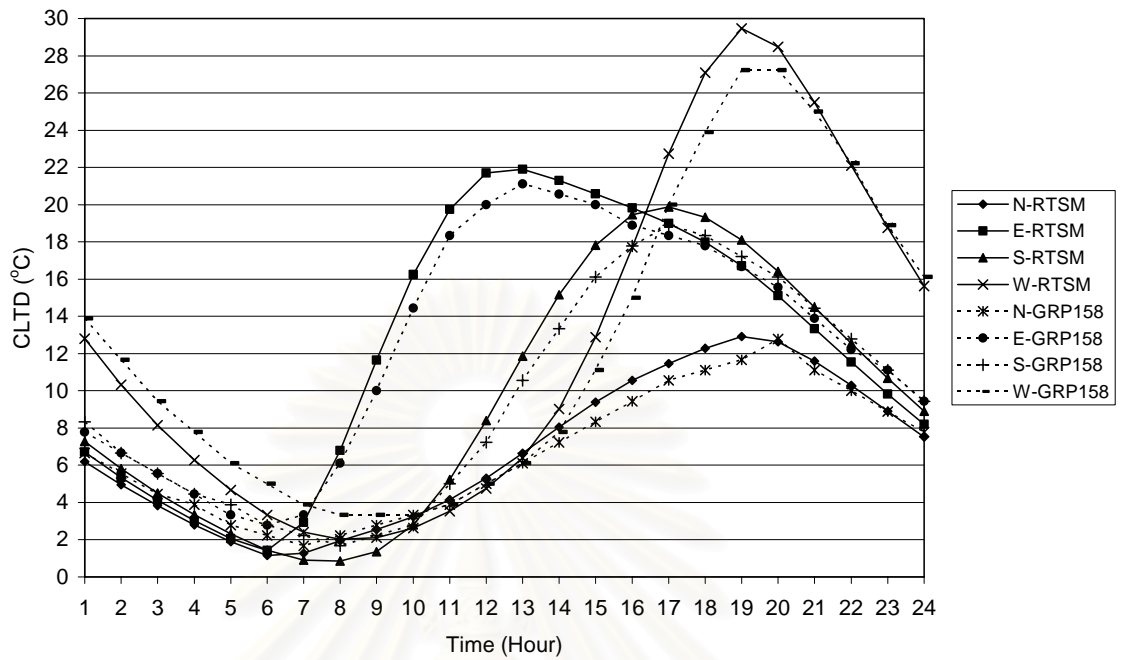
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม D ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



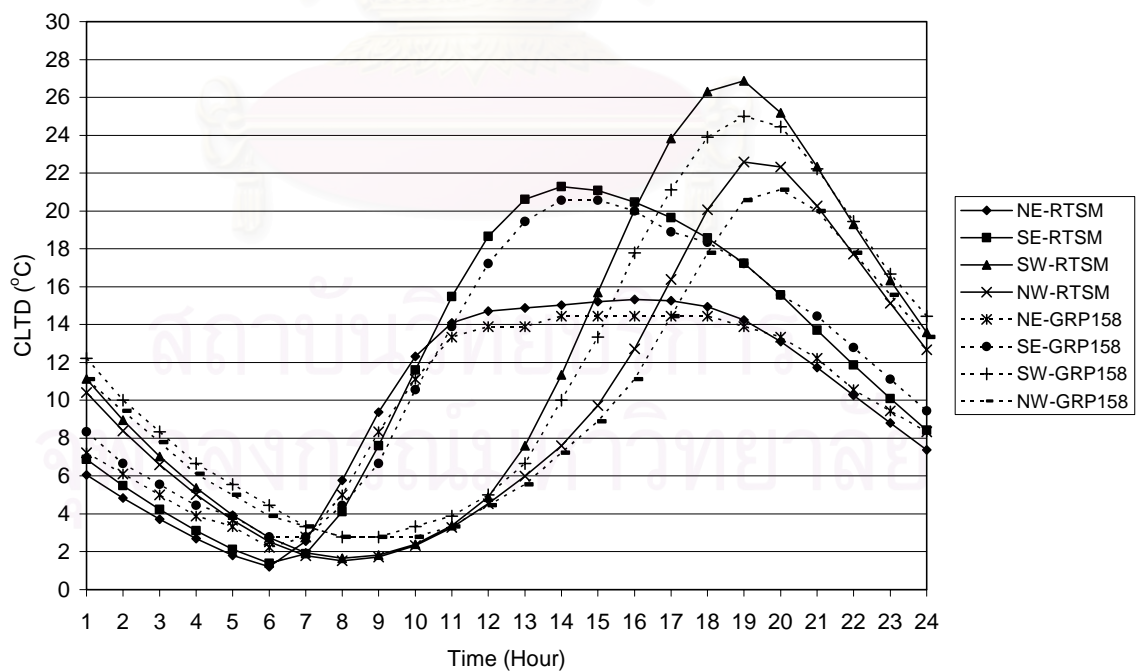
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม D ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



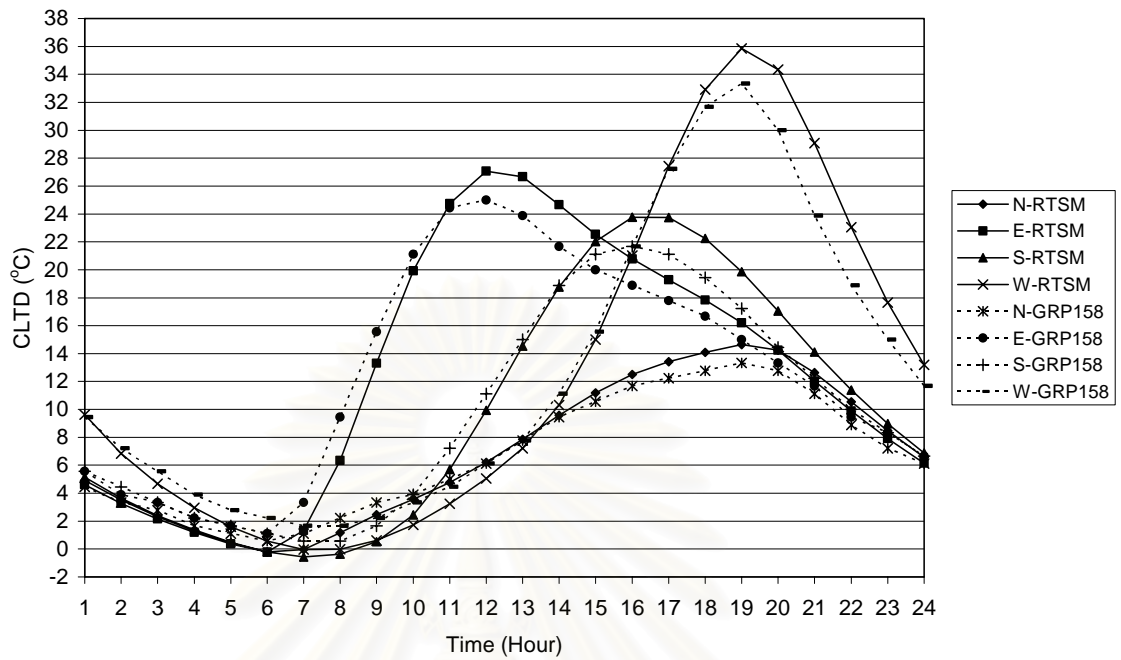
รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม E ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



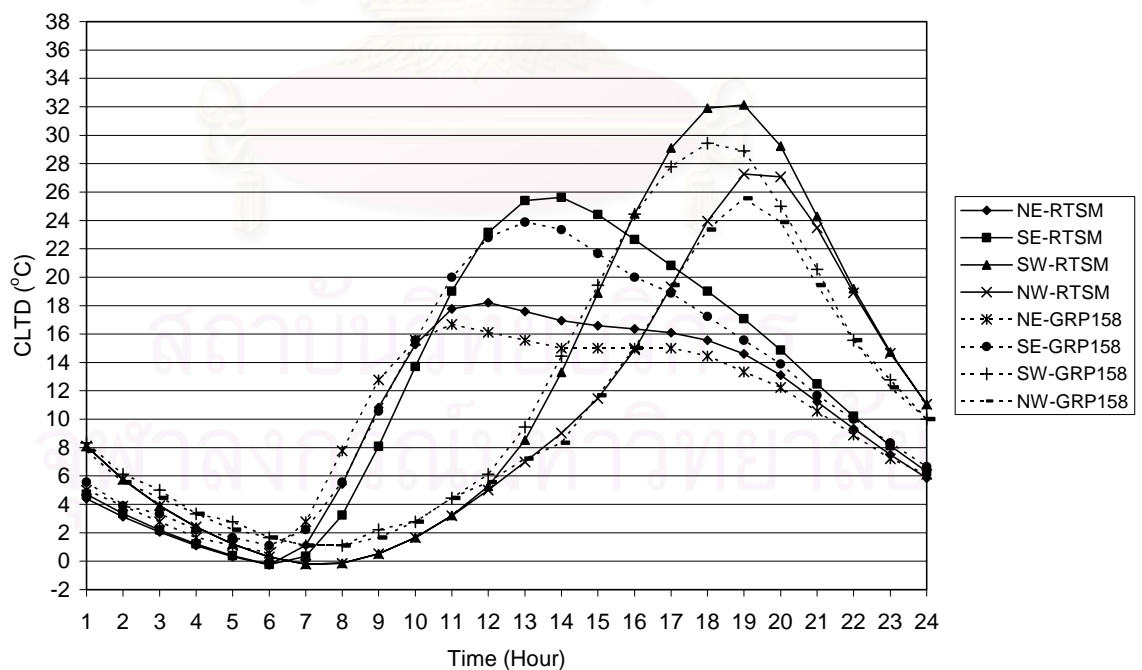
รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม E ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



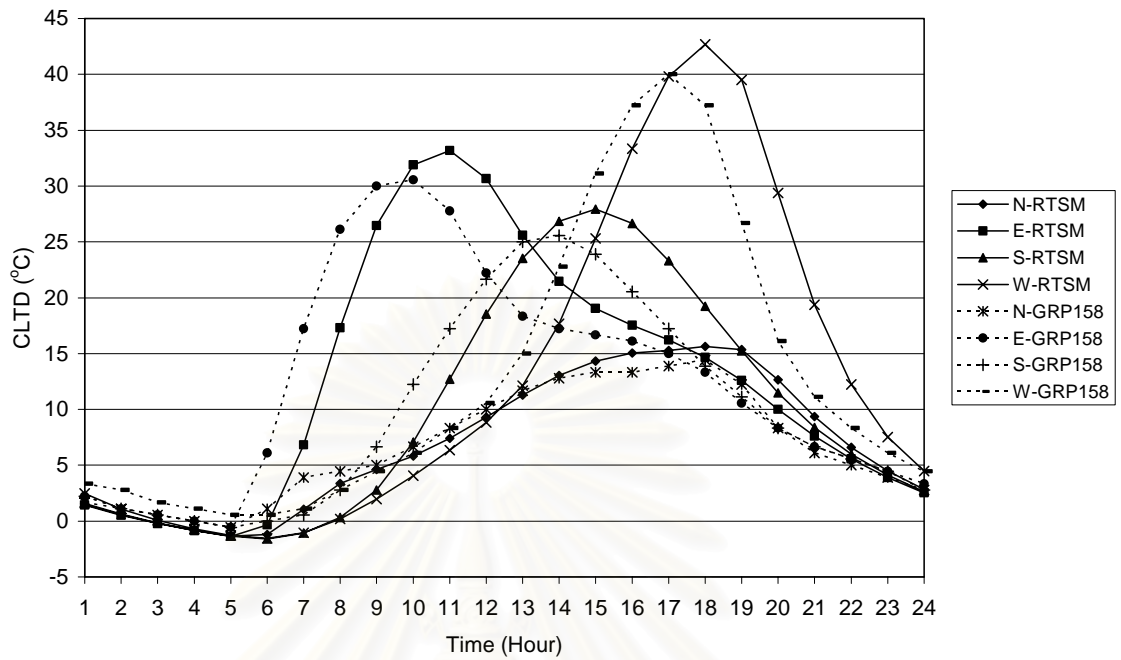
รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม F ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



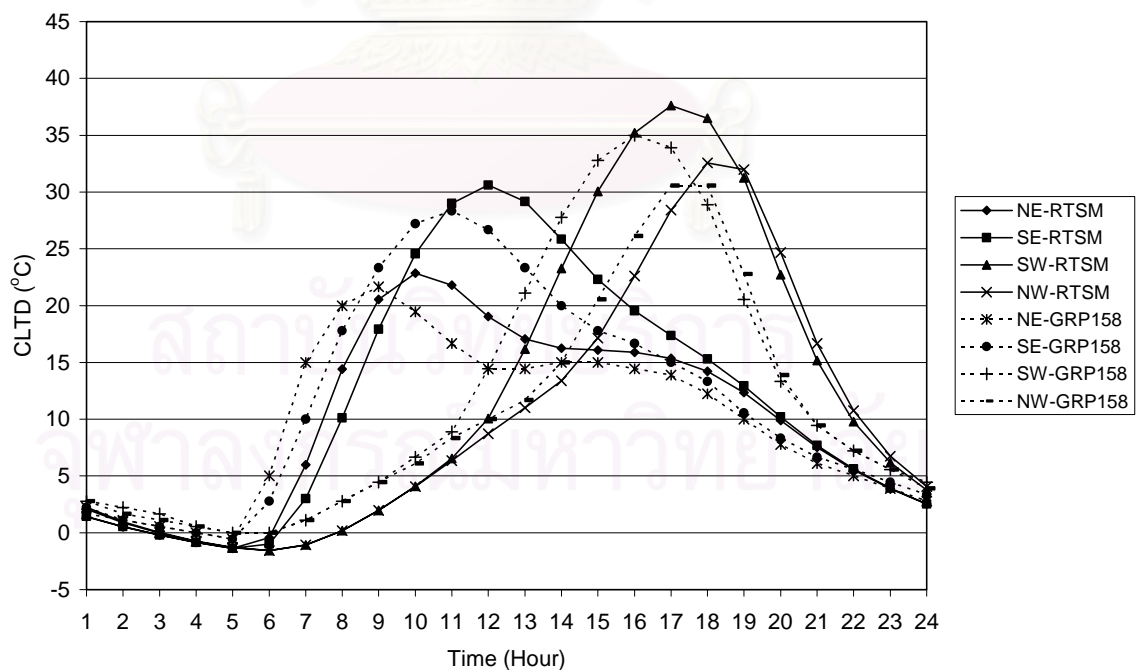
รูปที่ 4.32 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม F ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม G ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ N, E, S และ W



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับผนังกลุ่ม G ที่คำนวณโดยวิธี RTSM

และจาก ASHRAE GRP-158 ทิศ NE, SE, SW และ NW

ตารางที่ 4.12 ค่า CLTD สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM ($^{\circ}\text{C}$)

Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	-2.9	0.5	4.8	7.2	1.9	13.8	16.3	21.4	15.1	18.2	19.4	16.9	22.1
2	-3.8	-1.4	2.3	4.5	-0.2	10.3	13.2	18.3	12.6	15.3	17.4	15.1	20.4
3	-4.6	-2.7	0.3	2.3	-1.9	7.3	10.3	15.3	10.3	12.7	15.3	13.3	18.7
4	-5.2	-3.7	-1.3	0.5	-3.1	4.7	7.9	12.6	8.1	10.2	13.4	11.5	16.8
5	-5.6	-4.5	-2.6	-1.1	-4.0	2.6	5.7	10.0	6.2	8.1	11.5	9.9	15.0
6	-4.8	-5.0	-3.5	-2.2	-4.7	0.8	3.8	7.8	4.5	6.1	9.6	8.3	13.3
7	-0.6	-4.1	-3.7	-2.3	-4.4	-0.7	2.2	5.7	3.3	4.4	8.0	7.0	11.6
8	6.7	-0.9	-2.0	-0.7	-2.0	-1.3	1.2	4.0	2.9	3.1	6.6	6.0	10.1
9	15.7	4.7	1.7	2.6	2.6	-0.7	1.2	2.9	3.7	2.6	5.7	5.7	8.7
10	24.9	12.0	7.2	7.4	9.2	1.4	2.5	2.6	5.5	3.2	5.5	6.1	7.8
11	33.6	20.1	13.9	13.2	16.8	5.0	5.0	3.4	8.3	4.9	6.0	7.3	7.4
12	40.8	28.2	21.0	19.4	24.7	9.7	8.7	5.2	11.9	7.6	7.3	9.2	7.6
13	45.8	35.4	28.0	25.6	32.1	15.2	13.1	8.1	16.0	11.2	9.3	11.6	8.6
14	48.3	41.0	34.1	31.1	38.3	21.0	18.0	11.7	20.1	15.3	11.8	14.3	10.2
15	47.9	44.5	38.8	35.3	42.5	26.4	22.8	15.8	23.9	19.6	14.7	17.2	12.3
16	44.6	45.5	41.4	37.9	44.5	31.1	27.1	20.0	27.1	23.6	17.6	19.8	14.8
17	38.6	43.8	41.9	38.6	44.0	34.5	30.5	24.0	29.4	27.0	20.3	22.0	17.4
18	30.3	39.6	40.0	37.3	40.8	36.4	32.7	27.3	30.5	29.5	22.6	23.7	19.9
19	20.6	33.0	35.9	34.0	35.3	36.4	33.4	29.7	30.2	30.9	24.3	24.5	22.1
20	11.8	25.0	29.9	29.1	28.1	34.6	32.6	30.9	28.7	30.9	25.1	24.4	23.8
21	6.1	17.3	23.3	23.8	20.5	31.1	30.3	30.8	26.4	29.5	25.1	23.6	24.8
22	2.4	11.1	17.2	18.8	14.0	26.8	27.1	29.4	23.6	27.2	24.3	22.3	25.0
23	0.0	6.4	12.2	14.3	8.8	22.2	23.4	27.2	20.7	24.3	23.0	20.6	24.6
24	-1.7	3.0	8.1	10.5	4.9	17.8	19.8	24.4	17.8	21.3	21.3	18.8	23.5

ตารางที่ 4.13 ค่า CLTD สำหรับหลังคาไม่มีฝ้าเพดาน 13 ชนิด จาก ASHRAE GRP-158 ($^{\circ}\text{C}$)

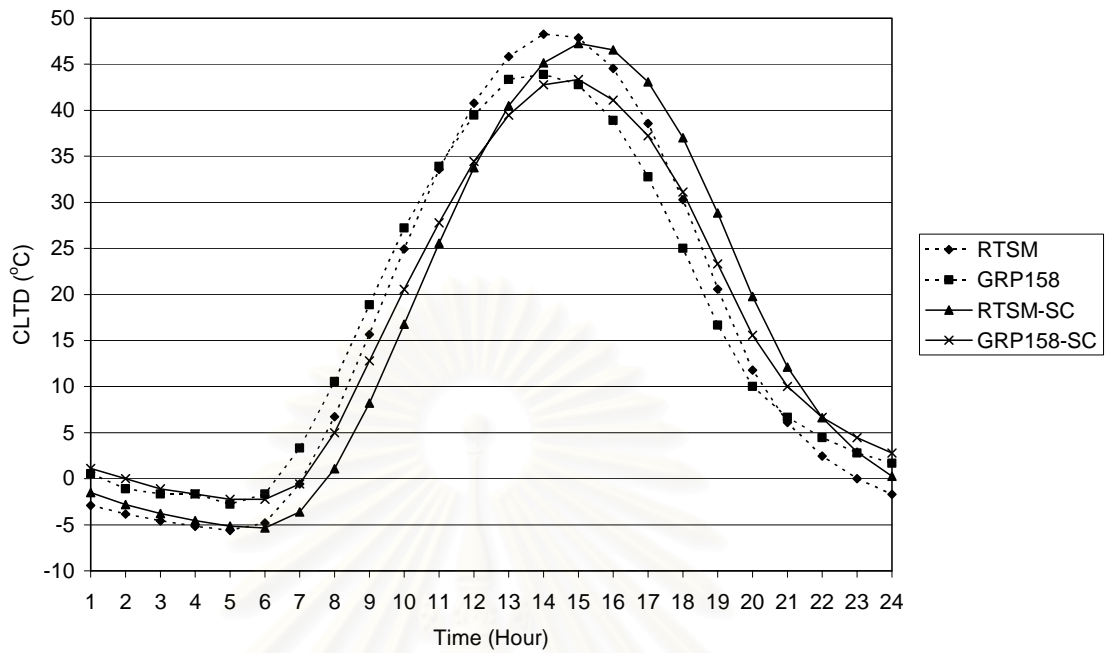
Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	1	3	5	7	2	12	16	19	14	17	19	17	21
2	-1	2	3	4	0	9	13	17	12	14	17	16	20
3	-2	0	1	3	-2	7	11	14	10	13	16	14	18
4	-2	-1	0	2	-2	5	9	12	8	11	14	12	17
5	-3	-2	-1	0	-3	3	7	10	7	9	12	11	16
6	-2	-2	-2	-1	-4	2	6	8	5	7	11	9	14
7	3	-1	-2	-1	-3	1	4	6	4	6	9	8	12
8	11	2	1	2	-2	1	3	5	4	5	8	8	11
9	19	8	5	6	3	2	3	4	6	4	7	8	10
10	27	15	11	11	9	4	5	4	8	5	7	9	9
11	34	22	18	17	15	8	7	5	11	7	8	10	9
12	39	29	24	23	22	13	11	7	14	9	10	12	9
13	43	34	31	28	27	18	15	11	18	13	12	14	10
14	44	39	36	33	32	24	19	14	22	16	14	17	12
15	43	41	39	36	35	28	23	18	26	20	17	20	13
16	39	41	41	37	36	32	27	22	28	23	20	22	16
17	33	39	39	37	34	34	29	26	29	26	22	24	18
18	25	34	37	34	32	36	31	28	29	27	24	25	20
19	17	28	32	30	27	34	31	29	29	28	25	25	22
20	10	21	25	25	21	32	30	30	27	28	26	24	23
21	7	16	19	20	14	28	27	29	24	26	25	23	24
22	4	11	14	16	10	23	24	27	21	24	24	22	24
23	3	8	10	12	6	19	22	25	19	22	22	21	23
24	2	5	7	9	4	16	19	22	17	19	21	19	22

ตารางที่ 4.14 ค่า CLTD สำหรับหลังคามีฝ้าเพดาน 13 ชนิด ที่คำนวณโดยวิธี RTSM ($^{\circ}\text{C}$)

Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	-1.5	9.9	11.6	16.4	13.5	19.8	20.0	22.7	17.5	19.8	17.8	17.6	20.4
2	-2.8	6.9	8.3	14.5	10.5	16.8	18.0	20.9	16.5	18.3	17.3	16.9	19.8
3	-3.8	4.4	5.5	12.6	7.9	14.0	16.1	18.9	15.4	16.8	16.7	16.2	19.0
4	-4.5	2.3	3.2	10.8	5.6	11.4	14.3	16.9	14.4	15.3	16.1	15.5	18.1
5	-5.1	0.5	1.3	9.2	3.7	9.0	12.5	14.9	13.3	13.8	15.4	14.8	17.1
6	-5.4	-0.9	-0.3	7.7	2.0	6.9	10.9	13.0	12.3	12.4	14.8	14.1	16.0
7	-3.6	-1.8	-1.5	6.4	0.7	5.0	9.3	11.1	11.4	11.1	14.1	13.4	15.0
8	1.1	-1.4	-1.6	5.8	0.4	3.5	8.0	9.4	10.7	9.9	13.4	12.8	13.9
9	8.2	0.6	-0.3	6.0	1.4	2.7	7.1	7.9	10.4	8.9	12.9	12.4	12.9
10	16.8	4.2	2.7	7.1	3.7	2.8	6.8	6.8	10.5	8.4	12.5	12.2	12.0
11	25.6	9.1	7.1	8.9	7.4	4.1	7.2	6.3	11.1	8.4	12.4	12.3	11.3
12	33.8	14.8	12.4	11.4	11.9	6.4	8.5	6.5	12.1	9.1	12.4	12.8	10.9
13	40.5	20.8	18.4	14.3	17.0	9.7	10.4	7.5	13.4	10.3	12.8	13.5	10.9
14	45.1	26.5	24.2	17.3	22.1	13.6	12.8	9.2	15.0	12.0	13.4	14.4	11.2
15	47.2	31.4	29.5	20.3	26.8	17.8	15.6	11.5	16.6	14.1	14.1	15.4	12.0
16	46.6	35.1	33.8	22.9	30.7	21.9	18.4	14.2	18.2	16.3	15.0	16.5	13.1
17	43.1	37.1	36.5	24.8	33.3	25.7	21.1	17.0	19.5	18.6	16.0	17.5	14.4
18	37.0	37.2	37.5	26.0	34.4	28.6	23.4	19.8	20.6	20.5	16.9	18.4	15.9
19	28.9	35.3	36.5	26.2	33.9	30.4	25.0	22.3	21.2	22.1	17.6	19.0	17.3
20	19.8	31.7	33.6	25.5	31.7	31.0	25.8	24.2	21.3	23.1	18.2	19.4	18.6
21	12.1	27.0	29.3	24.2	28.3	30.3	25.8	25.4	20.9	23.4	18.6	19.4	19.7
22	6.6	22.1	24.5	22.4	24.4	28.4	24.9	25.7	20.3	23.1	18.6	19.1	20.4
23	2.9	17.5	19.7	20.4	20.5	25.8	23.6	25.3	19.5	22.3	18.5	18.7	20.8
24	0.3	13.4	15.4	18.4	16.8	22.9	21.8	24.2	18.5	21.1	18.2	18.2	20.7

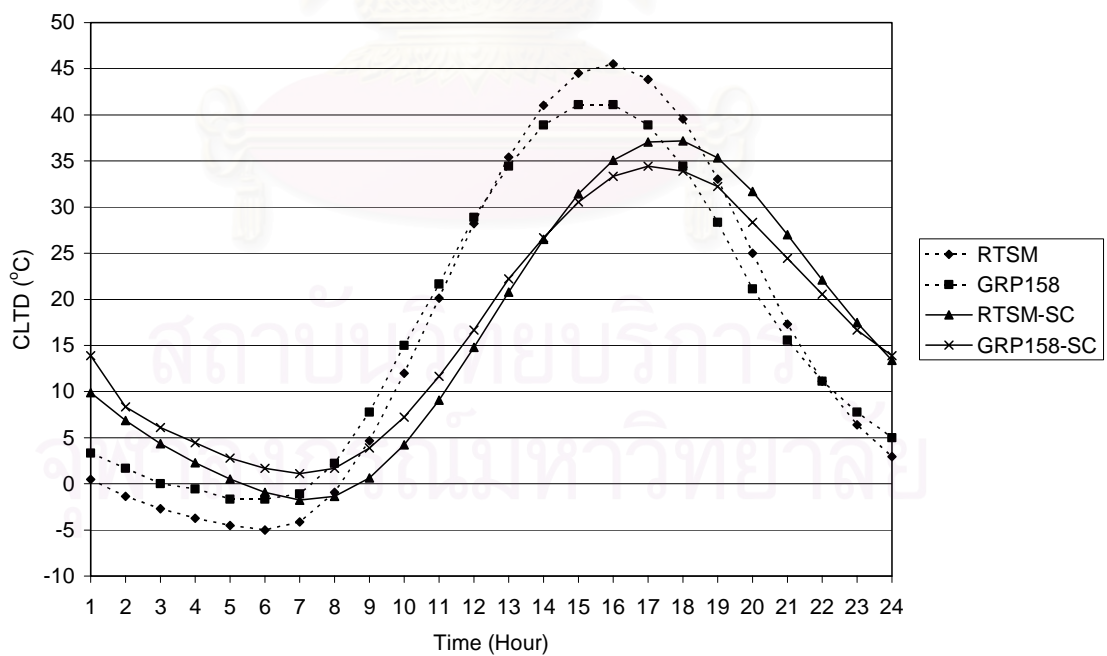
ตารางที่ 4.15 ค่า CLTD สำหรับหลังคามีฝ้าเพดาน 13 ชนิด จาก ASHRAE GRP-158 ($^{\circ}\text{C}$)

Hour	R1 $^{\circ}\text{C}$	R2 $^{\circ}\text{C}$	R3 $^{\circ}\text{C}$	R4 $^{\circ}\text{C}$	R5 $^{\circ}\text{C}$	R6 $^{\circ}\text{C}$	R7 $^{\circ}\text{C}$	R8 $^{\circ}\text{C}$	R9 $^{\circ}\text{C}$	R10 $^{\circ}\text{C}$	R11 $^{\circ}\text{C}$	R12 $^{\circ}\text{C}$	R13 $^{\circ}\text{C}$
1	1	14	11	16	14	18	19	22	17	19	17	16	19
2	0	8	8	14	11	16	17	20	16	18	16	16	19
3	-1	6	6	13	9	13	16	18	15	17	16	15	18
4	-2	4	4	11	7	11	14	16	14	16	15	14	18
5	-2	3	2	9	6	9	13	14	13	14	14	14	17
6	-2	2	1	8	4	7	12	13	12	13	14	13	16
7	-1	1	0	7	3	6	10	11	12	12	13	13	15
8	5	2	0	7	3	4	9	10	11	11	13	12	14
9	13	4	2	8	4	4	8	8	11	10	12	12	13
10	21	7	6	9	7	4	8	8	12	10	12	12	13
11	28	12	11	11	10	6	9	8	12	10	12	12	12
12	34	17	16	14	14	9	10	8	13	11	13	13	12
13	39	22	22	17	18	12	12	9	15	12	13	14	12
14	43	27	27	19	23	16	14	11	16	14	14	14	12
15	43	31	31	22	27	20	17	14	18	16	14	16	13
16	41	33	34	24	29	23	19	16	19	18	16	17	14
17	37	34	36	26	32	27	21	19	20	19	16	18	15
18	31	34	36	26	32	29	23	21	21	21	17	18	17
19	23	32	34	26	31	30	24	23	21	22	18	19	18
20	16	28	30	24	29	30	24	25	21	23	18	19	19
21	10	24	26	23	26	28	24	26	21	23	18	19	19
22	7	21	21	21	22	26	23	25	20	22	18	18	20
23	4	17	17	19	19	23	22	24	19	22	18	18	21
24	3	14	13	18	16	21	21	23	18	21	18	17	20



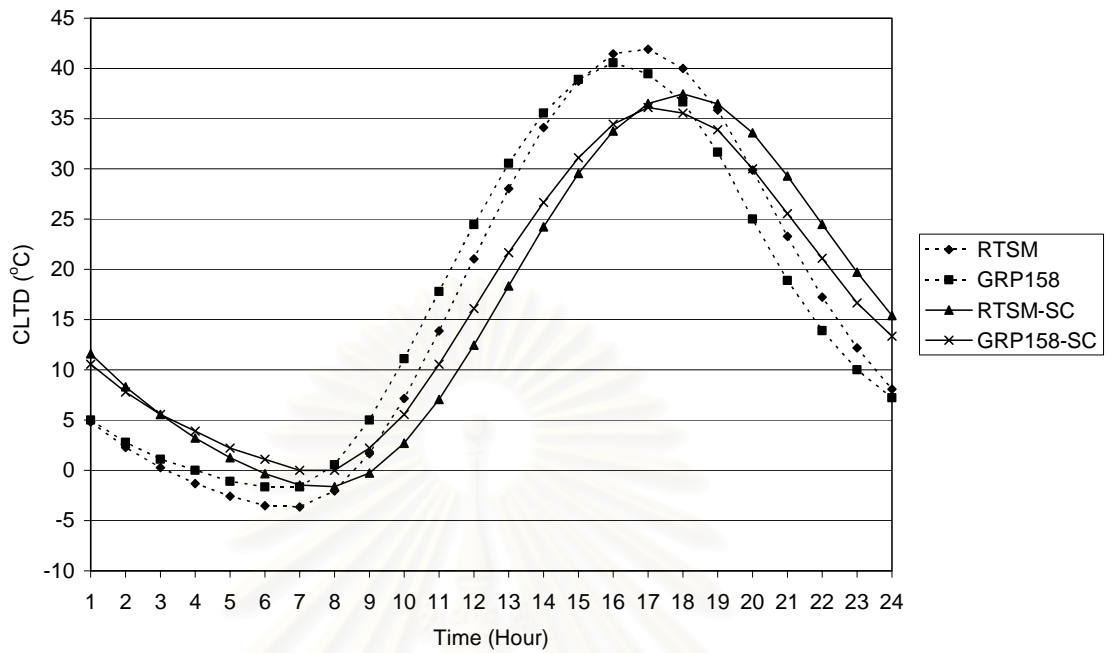
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 1 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



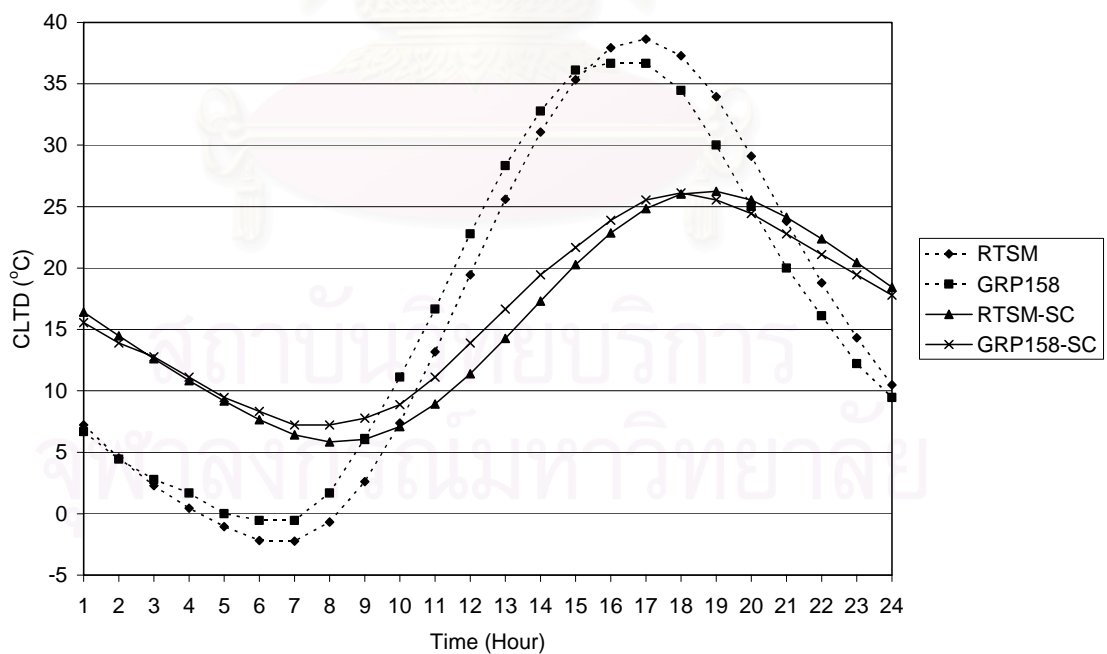
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 2 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



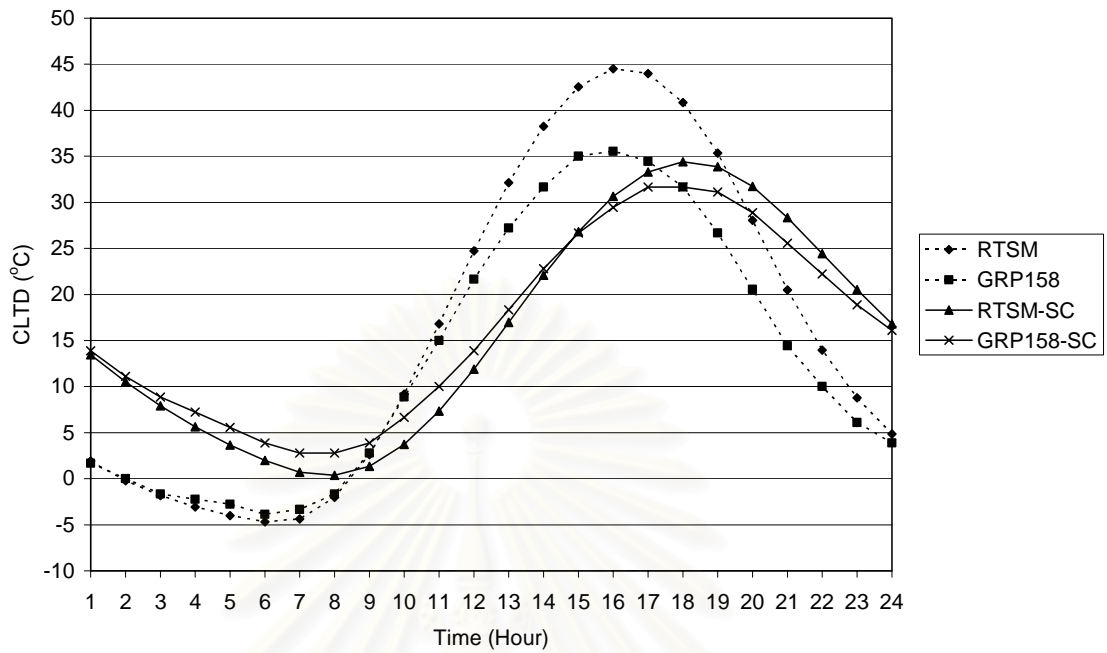
รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 3 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



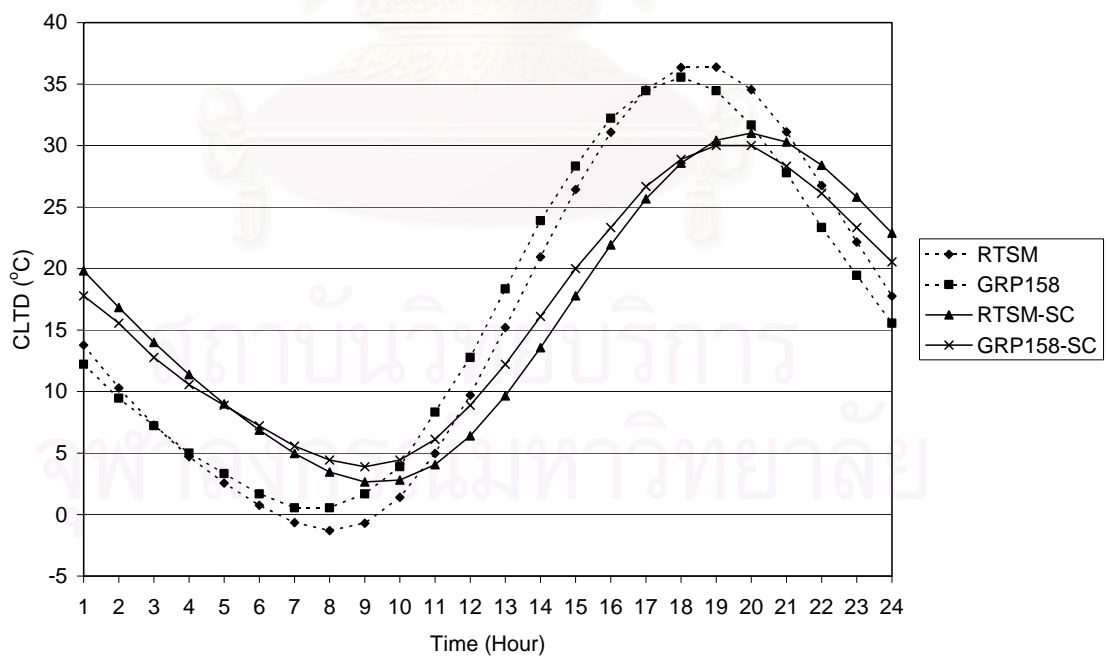
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 4 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



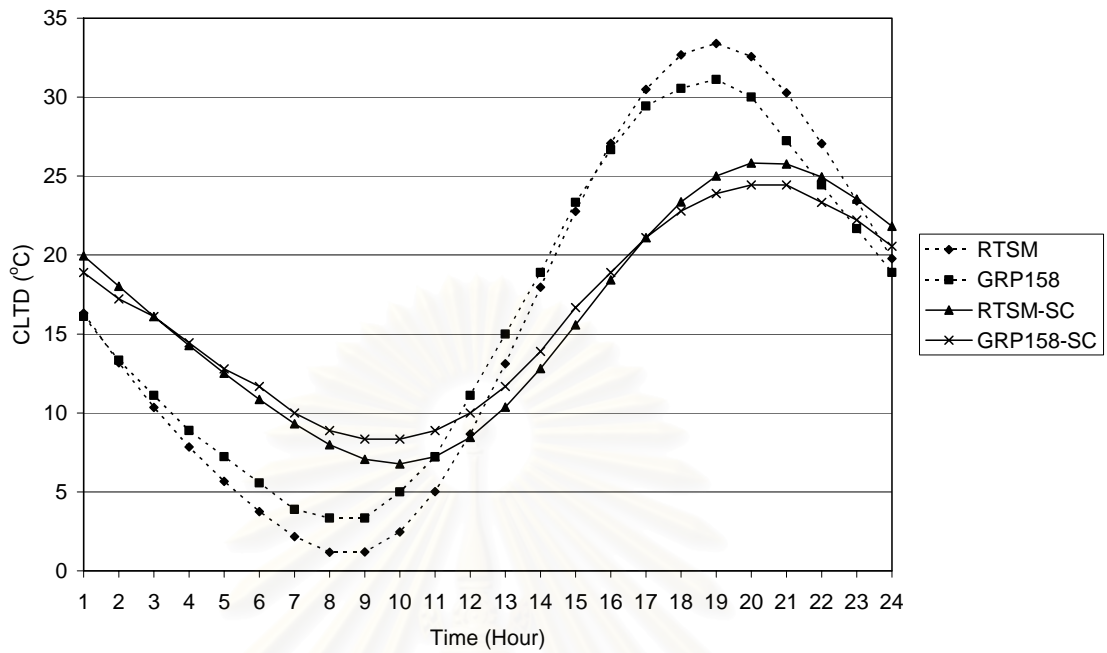
รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 5 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



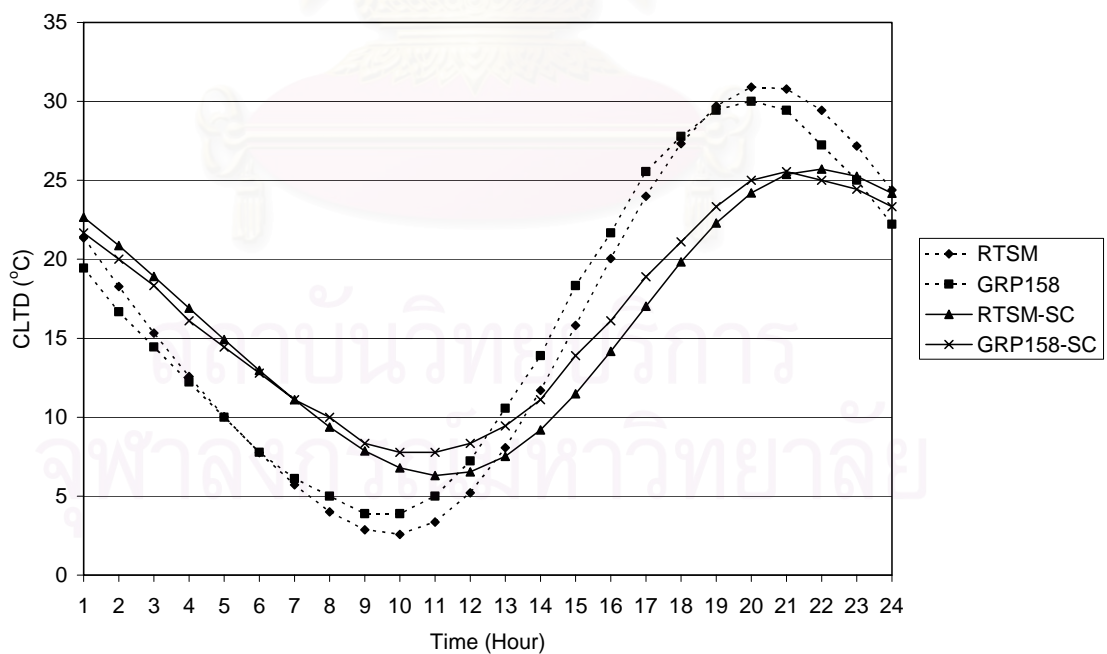
รูปที่ 4.40 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 6 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



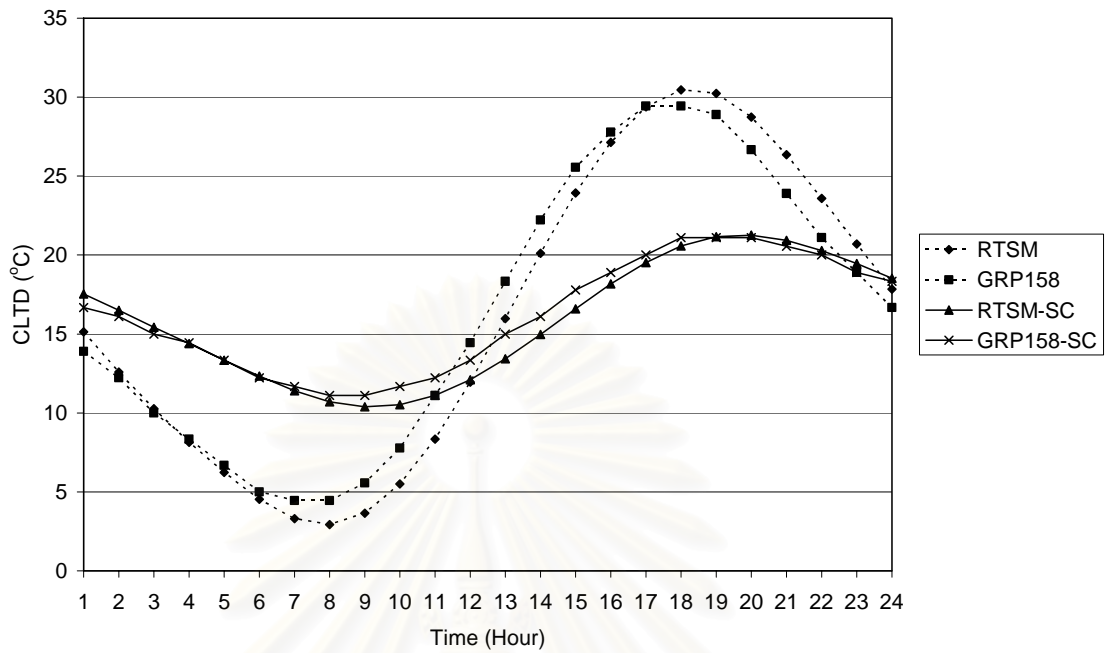
รูปที่ 4.41 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 7 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



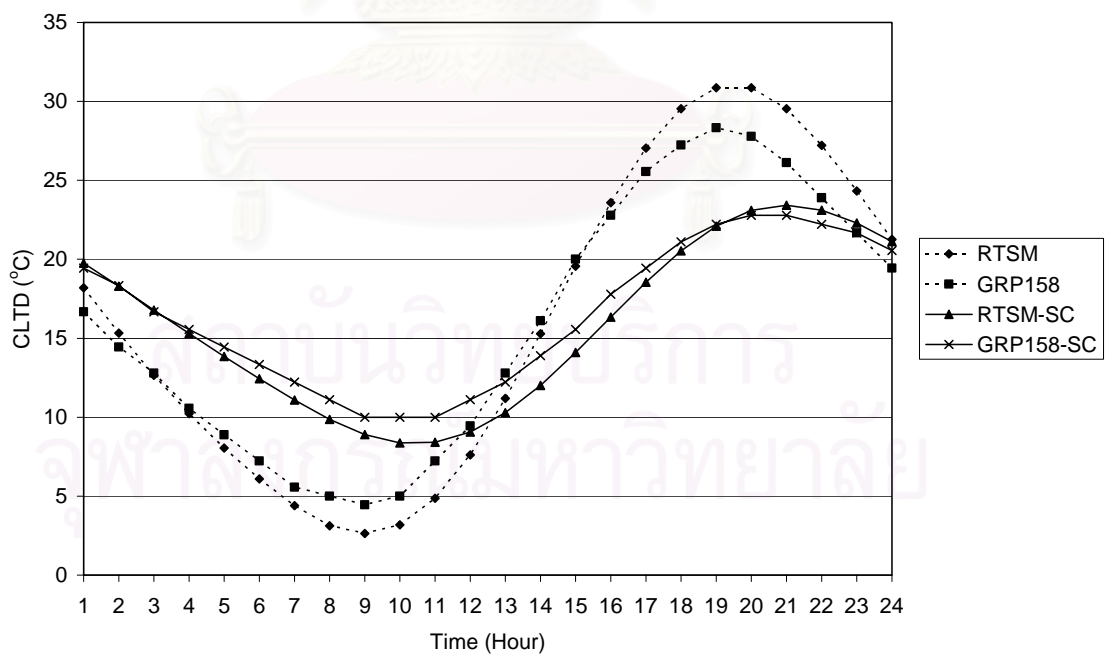
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 8 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



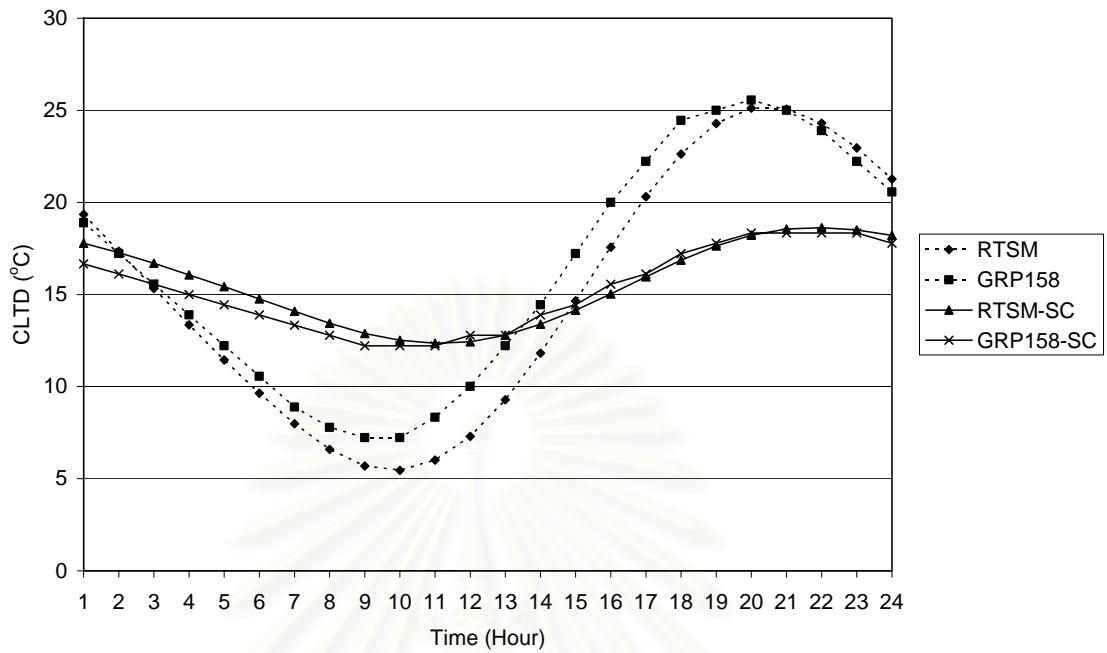
รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 9 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



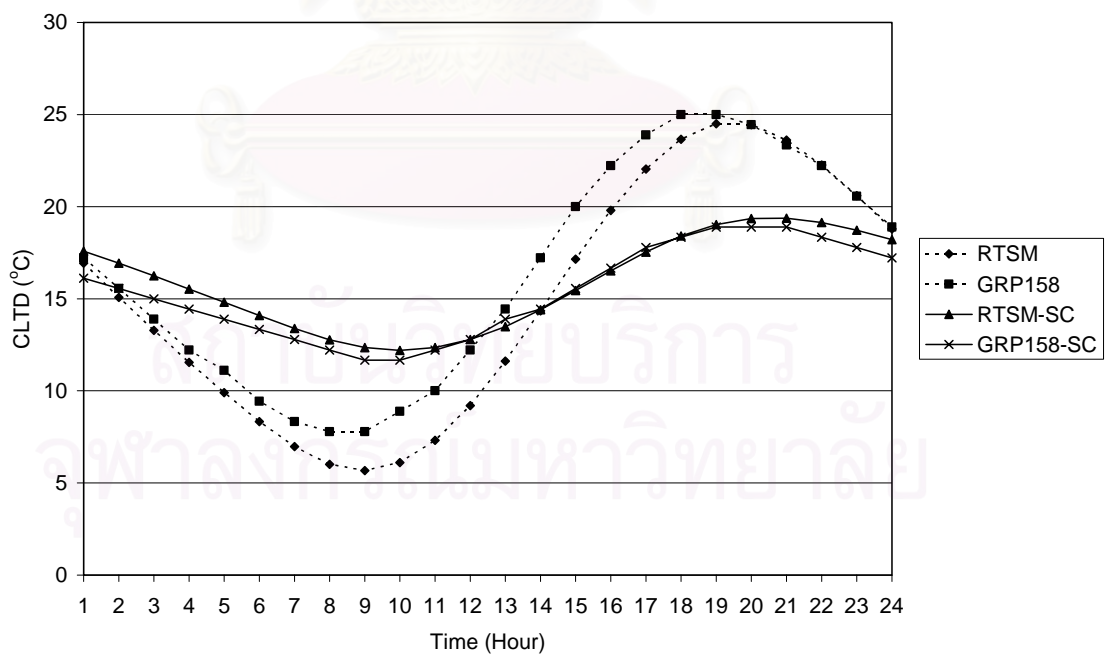
รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 10 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



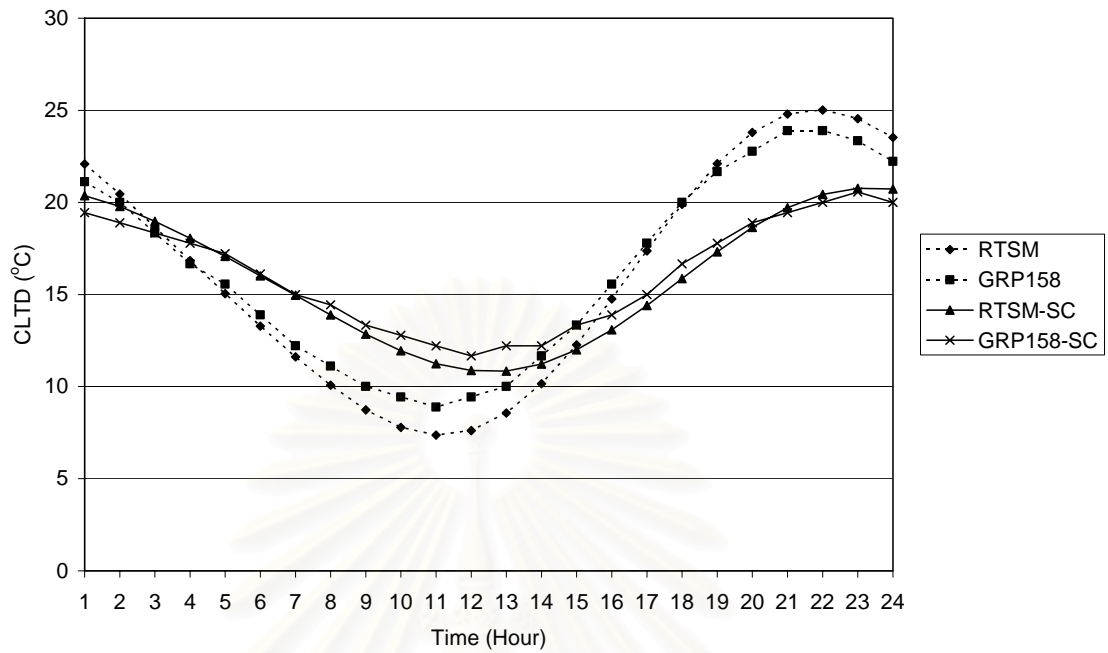
รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 11 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 12 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158



รูปที่ 4.47 เปรียบเทียบค่า CLTD สำหรับหลังคาชนิดที่ 13 ที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดาน (SC)

ที่คำนวณโดยวิธี RTSM และจาก ASHRAE GRP-158

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ผลการวิจัยพบว่าการคำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาที่คำนวณจากวิธี Direct root แบบใช้ค่า CTFs ความคลาดเคลื่อน (ความคลาดเคลื่อนนี้หมายถึงการพิจารณาจากค่า U-Factor) จะเกิดขึ้นเนื่องจากการหารากของสมการ $B(s) = 0$ ซึ่งเป็นการหาค่ารากจากสมการจริง แต่ค่าของรากที่ได้จะเป็นค่าประมาณขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ใช้ในการค้นหา และเกิดจากจำนวน Order ของค่า CTFs โดยที่จะต้องให้ Order ที่สูงขึ้นตามความหนาแน่นมวลของผนังและหลังคา ส่วนวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% (เป็นค่าที่กำหนดได้) ความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นเนื่องจากการหารากของสมการ $B(s) = 0$ ซึ่งเป็นการหาค่ารากจากสมการจริง แต่ค่าของรากที่ได้จะเป็นค่าประมาณขึ้นอยู่กับความละเอียดที่ใช้ในการค้นหาเช่นกัน และเกิดจากจำนวนเทอมของ Response Factors ซึ่งจะต้องใช้จำนวนเทอมที่มากขึ้นตามความหนาแน่นมวลของผนังและหลังคาเช่นกัน และจากรูปที่ 4.1 ถึง 4.8 พบว่าการคำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาจากวิธี Direct root แบบใช้ค่า CTFs (ตรวจสอบ Order) และจากวิธี Direct root แบบใช้ค่า Response Factors ให้ผลใกล้เคียงกัน

สำหรับการคำนวณค่า PRF ของผนังและหลังคาจากวิธี FDR Method พบความคลาดเคลื่อน (ความคลาดเคลื่อนนี้หมายถึงการพิจารณาจากค่า U-Factor) น้อยกว่า 0.001% ซึ่งไม่สามารถบ่งบอกความคลาดเคลื่อนจาก ค่า U-Factor ได้เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจะน้อยมากสำหรับ Polynomial s-transfer function ทุก Order แต่จะพบว่าความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นจากแนวโน้มของกราฟ PRF ผิดไปจากความเป็นจริงมาก พิจารณาจากรูปที่ 4.10 ถึง 4.17 ข้อจำกัดก็คือ Order ของ Polynomial s-transfer function เป็นจำนวนเต็มจึงทำได้เพียงหา Order ที่ใกล้เคียงกับ Theoretical Frequency Characteristics เท่านั้น ค่าของรากของสมการ $B(s) = 0$ เป็นค่าจริงแต่กระนั้นก็เป็นค่ารากจริงของแบบจำลอง Polynomial s-transfer function ที่ดีที่สุดเท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากส่วนขยายของรูปที่ 4.9 ยังพบว่าแบบจำลองที่ดีที่สุดนี้ก็ยังคงมีความแตกต่างจากผลลัพธ์แม่นยำอยู่เล็กน้อย ซึ่งเป็นที่มาของความคลาดเคลื่อนของค่า PRF นั่นเอง ดังนั้นความคลาดเคลื่อนของค่า PRF จะเกิดจากความแตกต่างของแบบจำลองของ Polynomial

กับ Exact solution วิธีนี้อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้เมื่อใช้แก้ปัญหามผนังหรือหลังคาแบบใหม่ที่มีความซับซ้อนมากๆ เนื่องจากแบบจำลอง Polynomial s-transfer function จะต้องมีความซับซ้อนตาม

จากผลการคำนวณค่า CLTD ใหม่สำหรับผนังและหลังคาใน ASHRAE GRP-158 พบว่าค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของผนังจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM เฉลี่ย 1.1°C และจะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมง ส่วนค่า CLTD สูงสุดในรอบวันของหลังคาที่ไม่มีฝ้าเพดานและมีฝ้าเพดานจากวิธี RTSM จะสูงกว่าวิธี TFM เฉลี่ย 2.1 และ 1.2°C ตามลำดับ และจะเกิดช้ากว่าวิธี TFM ประมาณ 1-2 ชั่วโมงเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การคำนวณค่า Response Factors ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้จำนวน Root คงที่ที่ 20 ค่า ซึ่งควรพัฒนาให้เป็นจำนวน Root แปรผันตามความคลาดเคลื่อนที่กำหนด

การคำนวณค่า PRF จากวิธี FDR Method โดยการใช้การตรวจสอบ Order ของ Polynomial s-transfer function ในวิทยานิพนธ์นี้สามารถคำนวณได้เฉพาะค่า Cross PRF ซึ่งเพียงพอต่อการคำนวณภาระการทำความเย็นวิธี RTSM เท่านั้น ควรพัฒนาให้คำนวณค่า Internal PRF และ External PRF เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในวิธี RTSM ในรูปแบบสมบูรณ์ต่อไป นอกจากนี้ยังควรพัฒนาแบบจำลอง Polynomial s-transfer function ให้ใกล้เคียงกับ Theoretical Frequency Characteristics มากยิ่งขึ้น

ในการคำนวณค่า RTF ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติที่ผนังด้านในคงที่ ควรพัฒนาให้เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่แปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในกับอุณหภูมิห้อง เพื่อปรับแบบจำลองของโซนให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น นอกจากนี้ค่า RTF ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้สำหรับ Light, Medium และ Heavy weight zone ที่เพียงพอต่อการคำนวณค่า CLTD สำหรับผนังและหลังคาเท่านั้น ควรพัฒนาให้คำนวณค่า RTF ตามส่วนประกอบของโซนชนิดนั้นๆ

รายการอ้างอิง

- ASHRAE (1979). Cooling and Heating Load Calculation Manual. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1992). Cooling and Heating Load Calculation Manual. 2nd, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1972). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1977). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1989). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1993). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (1997). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (2001). ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Bliss, R. V. J. (1961). Atmospheric Radiation near the surface of the ground. Solar Energy 5(3): 103.
- Chen, Y. M. and Wang, S. W. (2001). Frequency Domain Regression Method for Estimating CTF Models of Building Multilayer Constructions. Applied Mathematical Modelling 25(7): 579-592.
- Chen, Y. M. and Wang, S. W. (2004). Response to Comments on Calculation of Wall Conduction Transfer Coefficients by Regression in the Frequency Domain. Building and Environment 39: 591-593.
- Chen, Y. M. and Wang, S. W. (2004). A new Procedure for Calculating Periodic Response Factors Based on Frequency Domain Regression Method. International Journal of Thermal Sciences. (Accepted, Source of SCI, EI)
- Churchill, R. V. (1958). Operational Mathematics. New York: McGraw-Hill.

- Falconer, D. R., Sowell, E. F., Spittler, J. D. and Todorovich, B. B. (1993). Electronic Tables for the ASHRAE Load Calculation Manual. ASHRAE Transactions 99(1): 193-200.
- Gupta, C. L., Spencer, J.W. and Muncey, R. W. R. (1974). A Conceptual Survey of Computer-Oriented Thermal Calculation Methods Proc. 2nd Symp. Use of Computers for Environ. Eng. Related to Build.
- Harris, S. M. and McQuiston, F. C. (1988). A Study to Categorize Walls and Roofs on the Basis of Thermal Response. ASHRAE Transactions 94(2): 688-715.
- Hittle, D. C. (1981). Calculating Building Heating and Cooling Loads Using The Frequency Response of Multilayered Slabs, Doctoral Dissertation, University of Illinois at Urbana - Champaign.
- Hittle, D. C. and Bishop, R. (1983). An Improved Root-Finding Procedure for Use in Calculating Transient Heat Flow Through Multilayered Slabs. International Journal of Heat and Mass Transfer 26:1685-1693.
- Iu, I. S. (2002). Experimental Validation of the Radiant Time Series Method for Cooling Load Calculations, Master Thesis, Oklahoma State University.
- Kimura, K. (1977). Scientific Basis of Air Conditioning. London: Applied Science Publishers.
- Liesen, R. J. and Pedersen, C. O. (1997). An Evaluation of Inside Surface Heat Balance Models for Cooling Load Calculations. ASHRAE Transactions 103(2): 485-502.
- McQuiston, F. C. and Parker, J. D. (1994). Heating, Ventilating, Air Conditioning Analysis and Design. 4th Ed. New York, NY: John Wiley & Son.
- McQuiston, F. C., Parker, J. D. and Spittler, J. D. (2000). Heating, Ventilating, Air Conditioning Analysis and Design. 5th Ed. New York, NY: John Wiley & Son.
- McClellan, T. M. and Pedersen, C. O. (1997). Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure. ASHRAE Transactions 103(2): 469-484.
- Mitalas, G. P. and Stephenson, D. G. (1967). Room Thermal Response Factors. ASHRAE Transactions 73(1): 2.1-2.10.

- Mitalas, G. P. (1968). Calculation of Transient Heat Flow Through Walls and Roofs. ASHRAE Transactions 74.
- Pedersen, C. O., Fisher, D. E. and Liesen, R. J. (1997). Development of a Heat Balance Procedure for Calculating Cooling Loads. ASHRAE Transactions 103(2):459-468.
- Pedersen, C. O., Fisher, D. E., Spitler J. D. and Liesen, R. J. (1998). Cooling and Heating Load Calculation Principles. ASHRAE, Atlanta.
- Peavy, B. A. (1978). A Note on Response Factors and Conduction Transfer Functions. ASHRAE Transactions 84(1): 688-690.
- Poulikakos, D. (1994). Conduction Heat Transfer. New Jersey: Prentice-Hall
- Rudoy, W. and Duran, F. (1975). Development of an Improved Cooling Load Calculation Method. ASHRAE Transactions 81(2): 19-69.
- Sowell, E. F. (1988a). Load Calculations for 200,640 Zones. ASHRAE Transactions 94(2): 716-736.
- Sowell, E. F. (1988b). Cross-Check and Modification of the DOE-2 Program for Calculation of Zone Weighting Factors. ASHRAE Transactions 94(2): 737-753.
- Sowell, E. F. (1988c). Classification of 200,640 Parametric Zones for Cooling Load Calculations. ASHRAE Transactions 94(2): 754-777.
- Spitler, J. D., McQuiston, F. C. and Lindsey, K. L. (1993a). Development of a Revised Cooling and Heating Load Calculation Manual. ASHRAE Transactions 99(1): 175-182.
- Spitler, J. D., McQuiston, F. C. and Lindsey, K. L. (1993b). The CLTD/SCL/CLF Cooling Load Calculation Method. ASHRAE Transactions 99(1): 183-192.
- Spitler, J. D., Fisher, D. E. and Pedersen, C. O. (1997). The Radiant Time Series Cooling Load Calculation Procedure. ASHRAE Transactions 103(2): 503-515.
- Spitler, J. D. and Fisher, D. E. (1999a). Development of Periodic Response Factors for Use with the Radiant Time Series Method. ASHRAE Transactions 105(2): 491-509.
- Spitler, J. D. and Fisher, D. E. (1999b). On the Relationship Between the Radiant Time Series and Transfer Function Method for Design Cooling Load Calculations. HVAC&R Research 5(2): 123-136.

- Wang, S.W. and Chen, Y.M. (2001). A Novel and Simple Building Load Calculation Model for Building and System Dynamic Simulation. Applied Thermal Engineering 21(6): 683-702.
- Wang, S.W. and Chen, Y.M. (2002). A Simple Procedure for Calculating Thermal Response Factors and Conduction Transfer Functions of Multiplayer Walls. Applied Thermal Engineering 22(3): 333-338.
- Wang, S. W. and Chen, Y. M. (2003). Transient Heat Flow Calculation for Multilayer Constructions Using a Frequency-Domain Regression Method. Building And Environment 38(1): 45-61.

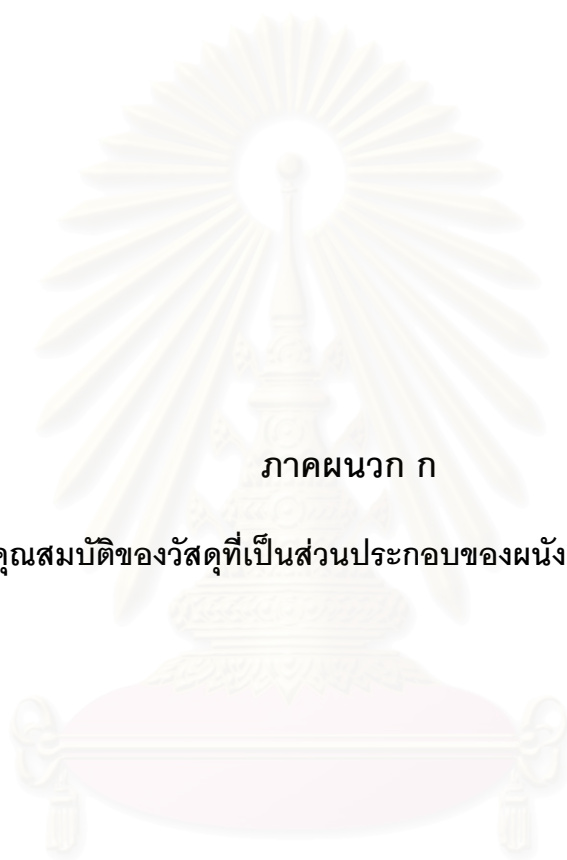


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของผนังและหลังคา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก คุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของผนังและหลังคาของ ASHRAE

Code	Description	Thickness and Thermal Properties						
		l mm	k W/m.K	ρ kg/m ³	Cp kJ/kg.K	R m ² .K/W	m kg/m ²	C J/m ² .K
A0	Outside surface resistance	0	0.000	0	0.000	0.059	0.000	0
A1	25 mm Stucco	25	0.692	1858	0.841	0.036	46.439	39055
A2	100 mm Face brick	100	1.333	2002	0.921	0.075	200.200	184384
A3	Steel siding	2	44.998	7689	0.419	0.000	15.432	6466
A4	12 mm Slag	13	0.190	1121	1.670	0.068	14.579	24346
A5	Outside surface resistance	0	0.000	0	0.000	0.059	0.000	0
A6	Finish	13	0.415	1249	1.088	0.031	16.243	17673
A7	100 mm Face brick	100	1.333	2002	0.921	0.075	200.200	184384
B1	Air space resistance	0	0.000	0	0.000	0.160	0.000	0
B2	25 mm Insulation	25	0.043	32	0.841	0.581	0.800	673
B3	50 mm Insulation	51	0.043	32	0.841	1.186	1.632	1373
B4	75 mm Insulation	76	0.043	32	0.841	1.767	2.432	2045
B5	25 mm Insulation	25	0.043	91	0.841	0.581	2.274	1913
B6	50 mm Insulation	51	0.043	91	0.841	1.186	4.641	3903
B7	25 mm Wood	25	0.121	593	2.512	0.207	14.821	37231
B8	65 mm Wood	63	0.121	593	2.512	0.521	37.354	93834
B9	100 mm Wood	100	0.121	593	2.512	0.826	59.300	148962
B10	50 mm Wood	51	0.121	593	2.512	0.422	30.245	75975
B11	75 mm Wood	76	0.121	593	2.512	0.628	45.066	113206
B12	75 mm Insulation	76	0.043	91	0.841	1.767	6.916	5816
B13	100 mm Insulation	100	0.043	91	0.841	2.326	9.100	7653
B14	125 mm Insulation	125	0.043	91	0.841	2.907	11.374	9566
B15	150 mm Insulation	150	0.043	91	0.841	3.489	13.651	11480
B16	4 mm Insulation	4	0.043	91	0.841	0.093	0.363	305
B17	8 mm Insulation	8	0.043	91	0.841	0.186	0.728	612
B18	12 mm Insulation	12	0.043	91	0.841	0.279	1.091	918
B19	15 mm Insulation	15	0.043	91	0.841	0.349	1.366	1149
B20	20 mm Insulation	20	0.043	91	0.841	0.465	1.819	1530
B21	35 mm Insulation	35	0.043	91	0.841	0.814	3.185	2679
B22	42 mm Insulation	42	0.043	91	0.841	0.977	3.823	3215
B23	60 mm Insulation	62	0.043	91	0.841	1.442	5.642	4745
B24	70 mm Insulation	70	0.043	91	0.841	1.628	6.370	5357
B25	85 mm Insulation	85	0.043	91	0.841	1.976	7.734	6504
B26	92 mm Insulation	92	0.043	91	0.841	2.140	8.372	7041
B27	115 mm Insulation	115	0.043	91	0.841	2.675	10.466	8802
C1	100 mm Clay tile	100	0.571	1121	0.841	0.175	112.100	94276
C2	100 mm LD concrete block	100	0.381	609	0.841	0.262	60.900	51217
C3	100 mm HD concrete block	100	0.813	977	0.841	0.123	97.700	82166
C4	100 mm Common brick	100	0.727	1922	0.841	0.138	192.199	161640
C5	100 mm HD concrete	100	1.731	2243	0.841	0.058	224.299	188636

ตารางที่ ก คุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของผนังและหลังคาของ ASHRAE (ต่อ)

Code	Description	Thickness and Thermal Properties						
		l mm	k W/m.K	ρ kg/m ³	Cp kJ/kg.K	R m ² .K/W	m kg/m ²	C J/m ² .K
C6	200 mm Clay tile	200	0.571	1121	0.841	0.350	224.200	188552
C7	200 mm LD concrete block	200	0.571	609	0.841	0.350	121.800	102434
C8	200 mm HD concrete block	200	1.038	977	0.841	0.193	195.400	164331
C9	200 mm Common brick	200	0.727	1922	0.841	0.275	384.399	323279
C10	200 mm HD concrete	200	1.731	2243	0.841	0.116	448.598	377271
C11	300 mm HD concrete	300	1.731	2243	0.841	0.173	672.898	565907
C12	50 mm HD concrete	50	1.731	2243	0.841	0.029	112.179	94342
C13	150 mm HD concrete	150	1.731	2243	0.841	0.087	336.478	282978
C14	100 mm LD concrete	100	0.173	641	0.841	0.578	64.101	53909
C15	150 mm LD concrete	150	0.173	641	0.841	0.867	96.159	80870
C16	200 mm LD concrete	200	0.173	641	0.841	1.156	128.201	107817
C17	200 mm LD concrete block	200	0.138	288	0.841	1.449	57.601	48442
C18	200 mm HD concrete block	200	0.588	849	0.841	0.340	169.800	142802
C19	300 mm LD concrete block	300	0.138	304	0.841	2.174	91.201	76700
C20	300 mm HD concrete block	300	0.675	897	0.841	0.444	269.102	226314
E0	Inside surface resistance	0	0.000	0	0.000	0.121	0.000	0
E1	20 mm Plaster or gypsum	20	0.727	1602	0.841	0.027	32.024	26932
E2	12 mm Slag or stone	12	1.436	881	1.670	0.008	10.562	17639
E3	10 mm Felt and membrane	10	0.190	1121	1.670	0.053	11.219	18736
E4	Ceiling air space	0	0.000	0	0.000	0.176	0.000	0
E5	Acoustic tile	19	0.061	481	0.841	0.311	9.139	7686
F01	Outside Surface Resistance	0	0.000	0	0.000	0.044	0.000	0
F02	Inside Vertical Surface	0	0.000	0	0.000	0.120	0.000	0
F03	Inside Horizontal Surface	0	0.000	0	0.000	0.162	0.000	0
F04	Wall Air Space Resistance	0	0.000	0	0.000	0.153	0.000	0
F05	Ceiling Air Space Resistance	0	0.000	0	0.000	0.176	0.000	0
F06	EIFS Finish	10	0.721	1858	0.837	0.013	17.698	14813
F07	1in Stucco	25	0.721	1858	0.837	0.035	47.195	39502
F08	Metal Surface	1	45.284	7833	0.502	0.000	5.969	2996
F09	Opaque Spandrel Glass	6	0.995	2531	0.879	0.006	16.071	14126
F10	1 in Stone	25	3.173	2563	0.795	0.008	65.097	51752
F11	Wood Siding	13	0.089	593	1.172	0.143	7.527	8821
F12	Asphalt Shingles	3	0.041	1121	1.256	0.077	3.560	4471
F13	Built-up Roofing	10	0.162	1121	1.465	0.059	10.680	15646
F14	Slate or Tile	13	1.586	1922	1.256	0.008	24.411	30661
F15	Wood Shingles	6	0.038	593	1.298	0.167	3.763	4885
F16	Acoustic Tile	19	0.061	368	0.586	0.312	7.018	4113
F17	Carpet	13	0.058	288	1.381	0.219	3.662	5057
F18	Terrazzo	25	1.803	2563	0.795	0.014	65.097	51752
G01	5/8 in Gyp Board	16	0.160	801	1.088	0.099	12.714	13833

ตารางที่ ก คุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่เป็นส่วนประกอบของผนังและหลังคาของ ASHRAE (ต่อ)

Code	Description	Thickness and Thermal Properties						
		l mm	k W/m.K	ρ kg/m ³	Cp kJ/kg.K	R m ² .K/W	m kg/m ²	C J/m ² .K
G02	5/8 in Plywood	16	0.115	545	1.214	0.138	8.646	10496
G03	1/2 in Fiberboard Sheathing	13	0.068	400	1.298	0.187	5.086	6601
G04	1/2 in Wood	13	0.153	615	1.632	0.083	7.812	12749
G05	1 in Wood	25	0.153	615	1.632	0.166	15.623	25497
G06	2 in Wood	51	0.153	615	1.632	0.332	31.247	50994
G07	4 in Wood	102	0.153	615	1.632	0.664	62.493	101989
I01	R-5,1 in Insulation Board	25	0.029	42	1.214	0.876	1.078	1309
I02	R-10,2 in Insulation Board	51	0.029	42	1.214	1.752	2.156	2618
I03	R-15,3 in Insulation Board	76	0.029	42	1.214	2.628	3.235	3927
I04	R-11, 3-1/2 in Batt Insulation	89	0.046	19	0.963	1.944	1.719	1655
I05	R-19, 6-1/4 in Batt Insulation	154	0.046	19	0.963	3.357	2.968	2859
I06	R-30, 9-1/2 in Batt Insulation	244	0.046	19	0.963	5.301	4.687	4514
M01	4 in Brick	102	0.894	1922	0.795	0.114	195.291	155256
M02	6 in LW Concrete Block	152	0.489	513	0.879	0.312	78.116	68664
M03	8 in LW Concrete Block	203	0.496	457	0.879	0.410	92.763	81539
M04	12 in LW Concrete Block	305	0.710	513	0.879	0.429	156.233	137329
M05	8 in Concrete Block	203	1.113	793	0.921	0.183	161.115	148387
M06	12 in Concrete Block	305	1.402	801	0.921	0.217	244.114	224829
M07	6 in LW Concrete Block(filled)	152	0.286	513	0.879	0.533	78.116	68664
M08	8 in LW Concrete Block(filled)	203	0.260	457	0.879	0.782	92.763	81539
M09	12 in LW Concrete Block(filled)	305	0.294	513	0.879	1.037	156.233	137329
M10	8 in Concrete Block(filled)	203	0.721	793	0.921	0.282	161.115	148387
M11	4 in Lightweight Concrete	102	0.534	1281	0.837	0.190	130.194	108972
M12	6 in Lightweight Concrete	152	0.534	1281	0.837	0.285	195.291	163458
M13	8 in Lightweight Concrete	203	0.534	1281	0.837	0.381	260.388	217944
M14	6 in Heavyweight Concrete	152	1.947	2243	0.900	0.078	341.759	307583
M15	8 in Heavyweight Concrete	203	1.947	2243	0.900	0.104	455.678	410111
M16	12 in Heavyweight Concrete	305	1.947	2243	0.900	0.157	683.520	615168
M17	2 in LW Concrete Roof Ballast	51	0.187	641	0.837	0.272	32.548	27243

l = Thickness, (mm)

k = Thermal Conductivity, (W/m.K)

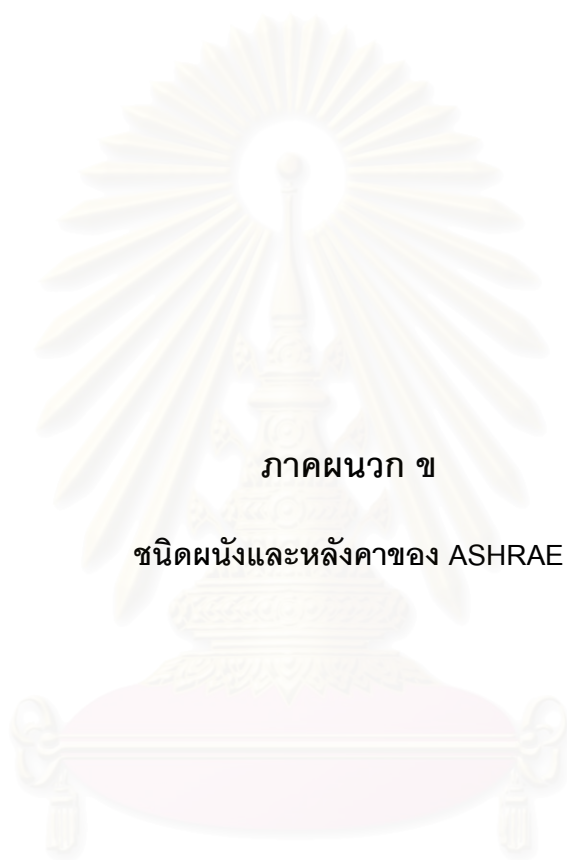
ρ = Density, (kg/m³)

Cp = Specific Heat, (kJ/kg.K)

R = Thermal Resistance, (m².K/W)

m = Mass per Unit Area, (kg/m²)

C = Thermal Capacitance, (J/m².K)



ภาคผนวก ข

ชนิดผนังและหลังคาของ ASHRAE

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 แสดงชนิดผนังของ ASHRAE 41 ชนิด

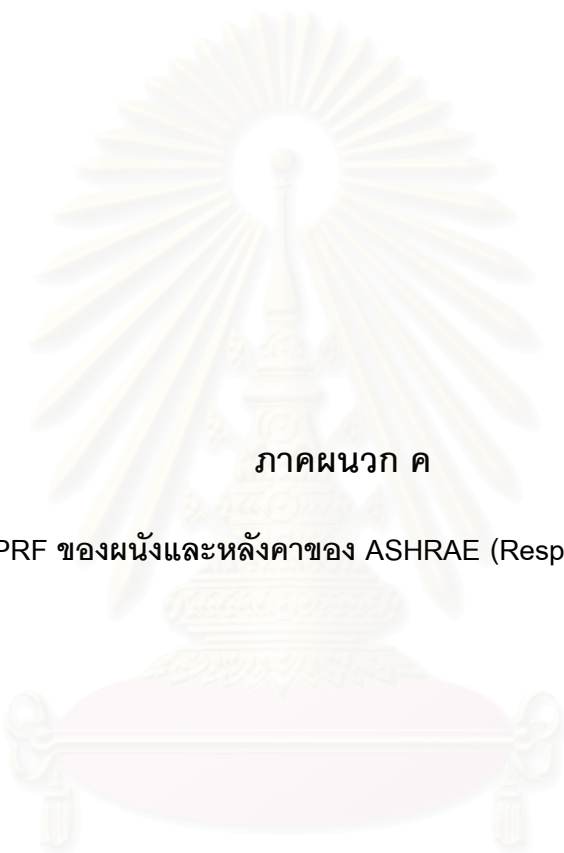
Wall Type	Layer Sequence Inside to Outside	Description	U W/m ² .K
1	E0 A3 B1 B13 A3 A0	Steel siding with 100 mm insulation	0.375
2	E0 E1 B14 A1 A0	Frame wall with 13 mm insulation	0.317
3	E0 C3 B5 A6 A0	100 mm h.w. concrete block with 25 mm insulation	1.093
4	E0 E1 B6 C12 A0	50 mm insulation with 50 mm h.w. concrete	0.703
5	E0 A6 B21 C7 A0	35 mm insulation with 200 mm l.w. concrete block	0.727
6	E0 E1 B2 C5 A1 A0	25 mm insulation with 100 mm h.w. concrete	1.134
7	E0 A6 C5 B3 A3 A0	100 mm h.w. concrete with 50 mm insulation	0.687
8	E0 A2 C12 B5 A6 A0	Face brick and 50 mm h.w. concrete with 25 mm insulation	1.116
9	E0 A6 B15 B10 A0	150 mm insulation with 50 mm wood	0.243
10	E0 E1 C2 B5 A2 A0	100 mm l.w. concrete block with 25 mm ins. and face brick	0.889
11	E0 E1 C8 B6 A1 A0	200 mm h.w. concrete block with 50 mm insulation	0.617
12	E0 E1 B1 C10 A1 A0	200 mm h.w. concrete	1.927
13	E0 A2 C5 B19 A6 A0	Face brick and 100 mm h.w. concrete with 16 mm ins.	1.443
14	E0 A2 A2 B6 A6 A0	Face brick and face brick with 50 mm insulation	0.646
15	E0 A6 C17 B1 A7 A0	200 mm l.w. conc. block (filled) and face brick	0.528
16	E0 A6 C18 B1 A7 A0	200 mm h.w. concrete block (filled) and face brick	1.272
17	E0 A2 C2 B15 A0	Face brick and 100 mm l.w. conc. block with 150 mm ins.	0.250
18	E0 A6 B25 C9 A0	85 mm insulation with 200 mm common brick	0.406
19	E0 C9 B6 A6 A0	200 mm common brick with 50 mm insulation	0.598
20	E0 C11 B19 A6 A0	300 mm h.w. concrete with 15 mm insulation	1.364
21	E0 C11 B6 A1 A0	300 mm h.w. concrete with 50 mm insulation	0.635
22	E0 C14 B15 A2 A0	100 mm l.w. concrete with 150 mm ins. and face brick	0.231
23	E0 E1 B15 C7 A2 A0	150 mm insulation with 200 mm l.w. concrete block	0.243
24	E0 A6 C20 B1 A7 A0	300 mm h.w. concrete block (filled) and face brick	1.124
25	E0 A2 C15 B12 A6 A0	Face brick and 150 mm l.w. conc. with 75 mm ins.	0.342
26	E0 A2 C6 B6 A6 A0	Face brick and 200 mm clay tile with 50 mm insulation	0.549
27	E0 E1 B14 C11 A1 A0	125 mm insulation with 300 mm h.w. concrete	0.301
28	E0 E1 C11 B13 A1 A0	300 mm h.w. concrete with 100 mm insulation	0.365
29	E0 A2 C11 B5 A6 A0	Face brick and 300 mm h.w. concrete with 25 mm ins.	0.962
30	E0 E1 B19 C19 A2 A0	15 mm ins. with 300 mm l.w. conc. block (filled) w/face brick	0.357
31	E0 E1 B15 C15 A2 A0	150 mm ins. with 150 mm l.w. conc. and face brick	0.216
32	E0 E1 B23 B9 A2 A0	60 mm insulation with face brick	0.392
33	E0 A2 C6 B15 A6 A0	Face brick and 200 mm clay tile with 150 mm insulation	0.242
34	E0 C11 B21 A2 A0	300 mm h.w. concrete with 35 mm ins. and face brick	0.805
35	E0 E1 B14 C11 A2 A0	125 mm ins. with 300 mm h.w. concrete and face brick	0.297
36	E0 A2 C11 B25 A6 A0	Face brick and 300 mm h.w. conc. with 85 mm ins.	0.411
37	E0 E1 B25 C19 A2 A0	85 mm ins. with 300 mm l.w. conc. block (filled) w/face brick	0.226
38	E0 E1 B15 C20 A2 A0	150 mm ins. with 300 mm h.w. conc. block (filled) w/face brick	0.237
39	E0 A2 C16 B14 A6 A0	Face brick and 300 mm l.w. conc. with 175 mm ins.	0.230
40	E0 A2 C20 B15 A6 A0	Face brick and 300 mm h.w. conc. block (filled) w/ 150 mm ins.	0.237
41	E0 E1 C11 B14 A2 A0	300 mm h.w. concrete with 125 mm ins. and face brick	0.297

หมายเหตุ : รายละเอียดของส่วนประกอบแต่ละชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ ข.2 แสดงชนิดหลังคาของ ASHRAE 42 ชนิด

Roof Type	Layer Sequence Inside to Outside	Description	U W/m ² .K
1	E0 A3 B25 E3 E2 A0	Steel Deck w/85 mm insulation	0.451
2	E0 A3 B14 E3 E2 A0	Steel Deck w/125 mm insulation	0.318
3	E0 E5 E4 C12 E3 E2 A0	50 mm h.w. conc. w/suspended ceiling	1.321
4	E0 E1 B15 E4 B7 A0	Attic Roof w/150 mm insulation	0.245
5	E0 B14 C12 E3 E2 A0	125 mm insulation w/50 mm h.w. conc.	0.315
6	E0 C5 B17 E3 E2 A0	100 mm h.w. conc. w/8 mm insulation	2.062
7	E0 B22 C12 E3 E2 C12 A0	40 mm insulation w/50 mm h.w. conc. RTS	0.784
8	E0 B16 C13 E3 E2 A0	4 mm insulation w/150 mm h.w. conc.	2.375
9	E0 E5 E4 B12 C14 E3 E2 A0	75 mm insulation w/100 mm l.w. conc. and susp. ceil.	0.325
10	E0 E5 E4 C15 B16 E3 E2 A0	150 mm l.w. conc. w/4 mm insulation and susp. ceil.	0.592
11	E0 C5 B15 E3 E2 A0	100 mm h.w. conc. w/150 mm insulation	0.264
12	E0 C13 B16 E3 E2 C12 A0	150 mm h.w. conc. 4 mm insulation 50 mm h.w. conc. RTS	2.222
13	E0 C13 B6 E3 E2 A0	150 mm h.w. conc. w/50 mm insulation	0.661
14	E0 E5 E4 C12 B13 E3 E2 A0	50 mm h.w. conc. w/100 mm insulation and susp. ceil.	0.324
15	E0 E5 E4 C5 B6 E3 E2 A0	100 mm h.w. conc. w/50 mm insulation and susp. ceil.	0.507
16	E0 E5 E4 C13 B20 E3 E2 A0	150 mm h.w. conc. w/20 mm insulation and susp. ceil.	0.781
17	E0 E5 E4 B15 C14 E3 E2 A0	150 mm insulation w/100 mm l.w. conc. and susp. ceil.	0.209
18	E0 C12 B15 E3 E2 C5 A0	50 mm h.w. conc. 150 mm insulation 100 mm h.w. conc. RTS	0.262
19	E0 C5 B27 E3 E2 C12 A0	100 mm h.w. conc. 115 mm insulation 50 mm h.w. conc. RTS	0.333
20	E0 B21 C16 E3 E2 A0	35 mm insulation w/200 mm l.w. conc.	0.452
21	E0 C13 B12 E3 E2 C12 A0	150 mm h.w. conc. 75 mm insulation 50 mm h.w. conc. RTS	0.471
22	E0 B22 C5 E3 E2 C13 A0	40 mm insulation 100 mm h.w. conc. 150 mm h.w. conc. RTS	0.734
23	E0 E5 E4 C12 B14 E3 E2 C12 A0	50 mm h.w. conc. 125 mm ins. 50 mm h.w. Conc. RTS w/susp. ceil.	0.271
24	E0 E5 E4 C5 E3 E2 B6 B1 C12 A0	100 mm h.w. conc. 50 mm ins. 50 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.463
25	E0 E5 E4 C13 B13 E3 E2 A0	150 mm h.w. conc. w/100 mm insulation and susp. ceil.	0.318
26	E0 E5 E4 B15 C15 E3 E2 A0	150 mm insulation w/150 mm l.w. conc. and susp. ceil.	0.197
27	E0 C13 B15 E3 E2 C12 A0	150 mm h.w. conc. 150 mm insulation 50 mm h.w. conc. RTS	0.260
28	E0 B9 B14 E3 E2 A0	100 mm wood w/125 mm insulation	0.252
29	E0 E5 E4 C12 B13 E3 E2 C5 A0	50 mm h.w. conc. 100 mm ins. 100 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.318
30	E0 E5 E4 B9 B6 E3 E2 A0	100 mm wood w/50 mm insulation and susp. ceil.	0.365
31	E0 B27 C13 E3 E2 C13 A0	115 mm ins. 150 mm h.w. conc. 150 mm h.w. conc. RTS	0.324
32	E0 E5 E4 C5 B20 E3 E2 C13 A0	100 mm h.w. conc. 20 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.747
33	E0 E5 E4 C5 B13 E3 E2 C5 A0	100 mm h.w. conc. 100 mm ins. 100 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.315
34	E0 E5 E4 C13 B23 E3 E2 C5 A0	150 mm h.w. conc. 60 mm ins. 100 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.432
35	E0 C5 B15 E3 E2 C13 A0	100 mm h.w. conc. 150 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS	0.258
36	E0 C13 B27 E3 E2 C13 A0	150 mm h.w. conc. 115 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS	0.324
37	E0 E5 E4 B15 C13 E3 E2 C13 A0	150 mm ins. 150 mm h.w. conc. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.228
38	E0 E5 E4 B9 B15 E3 E2 A0	100 mm wood w/150 mm insulation and susp. ceil.	0.198
39	E0 E5 E4 C13 B20 E3 E2 C13 A0	150 mm h.w. conc. 20 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.732
40	E0 E5 E4 C5 B26 E3 E2 C13 A0	100 mm h.w. conc. 90 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.332
41	E0 E5 E4 C13 B6 E3 E2 C13 A0	150 mm h.w. conc. 50 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.479
42	E0 E5 E4 C13 B14 E3 E2 C13 A0	150 mm h.w. conc. 125 mm ins. 150 mm h.w. conc. RTS w/susp. ceil.	0.263

หมายเหตุ : รายละเอียดของส่วนประกอบแต่ละชนิดแสดงไว้ในภาคผนวก ก



ภาคผนวก ค

ค่า PRF ของผนังและหลังคาของ ASHRAE (Response Factors)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1%

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE													
	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall 4	Wall 5	Wall 6	Wall 7	Wall 8	Wall 9	Wall 10	Wall 11	Wall 12	Wall 13	Wall 14
0	0.038109	0.001018	0.024432	0.016498	0.000686	0.007058	0.010510	0.012705	0.000804	0.003093	0.006458	0.025337	0.023548	0.013480
1	0.205763	0.032257	0.205106	0.140283	0.026222	0.059513	0.055974	0.038690	0.000905	0.008225	0.009045	0.033649	0.033456	0.014104
2	0.099504	0.084461	0.241054	0.183246	0.088581	0.128632	0.073662	0.085917	0.006073	0.037958	0.027114	0.085327	0.072921	0.024340
3	0.024353	0.082293	0.179348	0.139726	0.110484	0.141411	0.067004	0.099496	0.017570	0.071088	0.045983	0.135966	0.100236	0.036121
4	0.005658	0.055057	0.127939	0.091066	0.100453	0.128870	0.059495	0.095669	0.026427	0.089059	0.053712	0.156508	0.107594	0.041741
5	0.001311	0.031140	0.090999	0.055521	0.082864	0.110992	0.052757	0.087761	0.029169	0.093654	0.053637	0.156914	0.105411	0.042887
6	0.000304	0.016139	0.064713	0.032739	0.066340	0.093861	0.046778	0.079523	0.027756	0.090066	0.050159	0.148420	0.099669	0.041899
7	0.000070	0.007959	0.046019	0.018962	0.052638	0.078890	0.041476	0.071821	0.024505	0.082201	0.045631	0.136880	0.092870	0.040024
8	0.000016	0.003809	0.032725	0.010872	0.041658	0.066170	0.036775	0.064808	0.020800	0.072536	0.041038	0.124832	0.085997	0.037839
9	0.000004	0.001790	0.023272	0.006198	0.032944	0.055462	0.032607	0.058467	0.017282	0.062536	0.036735	0.113275	0.079418	0.035599
10	0.000001	0.000831	0.016549	0.003521	0.026048	0.046476	0.028912	0.052742	0.014191	0.053015	0.032822	0.102556	0.073257	0.033413
11	0.000000	0.000383	0.011769	0.001997	0.020594	0.038943	0.025635	0.047577	0.011576	0.044381	0.029305	0.092757	0.067540	0.031327
12	0.000000	0.000175	0.008369	0.001131	0.016282	0.032630	0.022730	0.042918	0.009408	0.036796	0.026156	0.083855	0.062254	0.029356
13	0.000000	0.000080	0.005951	0.000640	0.012873	0.027340	0.020154	0.038715	0.007630	0.030276	0.023344	0.075792	0.057377	0.027501
14	0.000000	0.000037	0.004232	0.000362	0.010177	0.022907	0.017870	0.034923	0.006181	0.024762	0.020832	0.068498	0.052880	0.025761
15	0.000000	0.000017	0.003010	0.000205	0.008046	0.019193	0.015844	0.031503	0.005003	0.020154	0.018591	0.061902	0.048734	0.024129
16	0.000000	0.000008	0.002140	0.000116	0.006362	0.016082	0.014049	0.028418	0.004048	0.016338	0.016591	0.055941	0.044913	0.022600
17	0.000000	0.000003	0.001522	0.000066	0.005030	0.013474	0.012456	0.025635	0.003275	0.013203	0.014806	0.050554	0.041392	0.021168
18	0.000000	0.000002	0.001082	0.000037	0.003976	0.011290	0.011045	0.023124	0.002649	0.010640	0.013213	0.045685	0.038146	0.019826
19	0.000000	0.000001	0.000770	0.000021	0.003144	0.009459	0.009793	0.020859	0.002142	0.008556	0.011791	0.041285	0.035155	0.018569
20	0.000000	0.000000	0.000547	0.000012	0.002486	0.007926	0.008683	0.018817	0.001733	0.006867	0.010522	0.037309	0.032399	0.017392
21	0.000000	0.000000	0.000389	0.000007	0.001965	0.006641	0.007699	0.016974	0.001401	0.005503	0.009390	0.033715	0.029858	0.016289
22	0.000000	0.000000	0.000277	0.000004	0.001554	0.005564	0.006826	0.015311	0.001133	0.004404	0.008380	0.030468	0.027517	0.015257
23	0.000000	0.000000	0.000197	0.000002	0.001228	0.004662	0.006053	0.013812	0.000916	0.003521	0.007478	0.027533	0.025359	0.014290
ΣY_p	0.375093	0.317460	1.092411	0.703232	0.722635	1.133446	0.684787	1.106185	0.242577	0.888832	0.612733	1.924958	1.437901	0.644912
U	0.375094	0.317460	1.092896	0.703235	0.727273	1.133787	0.687285	1.116071	0.242601	0.888889	0.616523	1.926782	1.443001	0.646412
e	0.000267	0.000000	0.044378	0.000427	0.637725	0.030076	0.363459	0.885786	0.009893	0.006412	0.614738	0.094666	0.353430	0.232050

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ค.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 15-28 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1% (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE													
	Wall 15	Wall 16	Wall 17	Wall 18	Wall 19	Wall 20	Wall 21	Wall 22	Wall 23	Wall 24	Wall 25	Wall 26	Wall 27	Wall 28
0	0.003376	0.013381	0.003996	0.008251	0.013876	0.035074	0.018894	0.002891	0.004847	0.025090	0.008707	0.015334	0.009558	0.012222
1	0.002718	0.011825	0.003574	0.007505	0.013049	0.033380	0.017833	0.002350	0.004239	0.022261	0.007878	0.014199	0.008991	0.011624
2	0.006407	0.022040	0.004923	0.008731	0.016566	0.040197	0.018549	0.002448	0.003981	0.021567	0.007608	0.014202	0.008757	0.011472
3	0.018619	0.047631	0.009206	0.013868	0.024721	0.054434	0.021884	0.004290	0.004479	0.025315	0.008531	0.016364	0.008879	0.011917
4	0.033442	0.074221	0.013932	0.020337	0.031811	0.066864	0.026417	0.008008	0.006513	0.034683	0.011038	0.020335	0.009878	0.013317
5	0.044017	0.092274	0.017031	0.024846	0.035637	0.074192	0.030111	0.011993	0.009554	0.046147	0.014014	0.024240	0.011497	0.015064
6	0.048923	0.100989	0.018357	0.026877	0.036929	0.077337	0.032386	0.015085	0.012541	0.056400	0.016538	0.027158	0.013147	0.016547
7	0.049359	0.102533	0.018422	0.027138	0.036693	0.077736	0.033435	0.016962	0.014792	0.063924	0.018310	0.028985	0.014441	0.017545
8	0.046931	0.099316	0.017737	0.026378	0.035621	0.076468	0.033617	0.017738	0.016115	0.068471	0.019358	0.029897	0.015265	0.018080
9	0.042932	0.093255	0.016665	0.025106	0.034124	0.074238	0.033238	0.017666	0.016602	0.070393	0.019813	0.030116	0.015661	0.018256
10	0.038252	0.085710	0.015429	0.023620	0.032438	0.071484	0.032516	0.017000	0.016449	0.070238	0.019812	0.029833	0.015725	0.018179
11	0.033449	0.077584	0.014159	0.022077	0.030695	0.068478	0.031595	0.015955	0.015857	0.068557	0.019475	0.029198	0.015556	0.017935
12	0.028850	0.069450	0.012923	0.020560	0.028966	0.065381	0.030567	0.014693	0.014994	0.065825	0.018899	0.028326	0.015231	0.017583
13	0.024628	0.061656	0.011756	0.019108	0.027290	0.062292	0.029489	0.013333	0.013984	0.062420	0.018160	0.027298	0.014811	0.017165
14	0.020858	0.054394	0.010674	0.017738	0.025685	0.059267	0.028398	0.011958	0.012914	0.058632	0.017315	0.026178	0.014334	0.016710
15	0.017557	0.047757	0.009679	0.016456	0.024160	0.056339	0.027314	0.010624	0.011842	0.054671	0.016408	0.025008	0.013830	0.016235
16	0.014708	0.041775	0.008770	0.015261	0.022717	0.053525	0.026251	0.009365	0.010803	0.050689	0.015472	0.023821	0.013315	0.015754
17	0.012273	0.036436	0.007943	0.014149	0.021356	0.050832	0.025217	0.008200	0.009819	0.046788	0.014530	0.022639	0.012801	0.015273
18	0.010210	0.031707	0.007193	0.013117	0.020074	0.048263	0.024216	0.007141	0.008901	0.043036	0.013601	0.021478	0.012295	0.014797
19	0.008473	0.027543	0.006511	0.012160	0.018867	0.045817	0.023249	0.006189	0.008053	0.039475	0.012697	0.020350	0.011802	0.014331
20	0.007017	0.023892	0.005894	0.011272	0.017732	0.043490	0.022318	0.005341	0.007275	0.036129	0.011826	0.019260	0.011323	0.013875
21	0.005802	0.020702	0.005335	0.010448	0.016665	0.041279	0.021422	0.004593	0.006566	0.033010	0.010993	0.018213	0.010861	0.013432
22	0.004791	0.017922	0.004829	0.009685	0.015661	0.039178	0.020560	0.003937	0.005921	0.030117	0.010204	0.017212	0.010416	0.013000
23	0.003952	0.015505	0.004371	0.008977	0.014718	0.037183	0.019733	0.003365	0.005337	0.027448	0.009459	0.016258	0.009988	0.012582
$\sum Y_p$	0.527544	1.269498	0.249309	0.403665	0.596051	1.352728	0.629209	0.231125	0.242378	1.121286	0.340646	0.545902	0.298362	0.362895
U	0.527704	1.272265	0.249626	0.406174	0.598086	1.364256	0.634921	0.231374	0.242660	1.123596	0.342466	0.548847	0.300933	0.364697
e	0.030320	0.217486	0.126990	0.617716	0.340252	0.845003	0.899639	0.107618	0.116212	0.205590	0.531440	0.536579	0.854343	0.494109

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ค.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 29-41 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1% (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE												
	Wall 29	Wall 30	Wall 31	Wall 32	Wall 33	Wall 34	Wall 35	Wall 36	Wall 37	Wall 38	Wall 39	Wall 40	Wall 41
0	0.033641	0.008599	0.005809	0.012093	0.007997	0.027468	0.010857	0.015211	0.007704	0.008307	0.008268	0.008737	0.011424
1	0.032098	0.007532	0.005203	0.011120	0.007488	0.025962	0.010372	0.014614	0.007099	0.007778	0.007769	0.008291	0.010957
2	0.031701	0.006879	0.004824	0.010540	0.007210	0.025343	0.010129	0.014403	0.006704	0.007459	0.007472	0.008046	0.010719
3	0.032472	0.006625	0.004574	0.010209	0.007054	0.025575	0.009886	0.014327	0.006304	0.007129	0.007161	0.007785	0.010455
4	0.035032	0.007675	0.004914	0.010827	0.007422	0.027260	0.009931	0.014810	0.006124	0.007014	0.007063	0.007723	0.010374
5	0.038285	0.010204	0.006053	0.012511	0.008350	0.029819	0.010411	0.015744	0.006378	0.007316	0.007336	0.008003	0.010575
6	0.041240	0.013519	0.007725	0.014769	0.009526	0.032539	0.011225	0.016785	0.007098	0.008042	0.007942	0.008580	0.011020
7	0.043485	0.016784	0.009484	0.017026	0.010637	0.034963	0.012143	0.017688	0.008120	0.009016	0.008715	0.009293	0.011593
8	0.044970	0.019449	0.010991	0.018912	0.011514	0.036882	0.012974	0.018360	0.009225	0.010020	0.009494	0.009990	0.012184
9	0.045788	0.021294	0.012085	0.020274	0.012110	0.038238	0.013616	0.018799	0.010239	0.010895	0.010173	0.010580	0.012717
10	0.046071	0.022311	0.012736	0.021104	0.012444	0.039057	0.014044	0.019033	0.011058	0.011560	0.010706	0.011023	0.013153
11	0.045942	0.022608	0.012992	0.021462	0.012559	0.039403	0.014273	0.019103	0.011641	0.011994	0.011078	0.011315	0.013474
12	0.045506	0.022330	0.012927	0.021434	0.012502	0.039354	0.014335	0.019045	0.011987	0.012213	0.011299	0.011469	0.013682
13	0.044847	0.021623	0.012620	0.021108	0.012317	0.038985	0.014268	0.018892	0.012118	0.012248	0.011386	0.011505	0.013784
14	0.044027	0.020617	0.012143	0.020561	0.012039	0.038367	0.014104	0.018666	0.012068	0.012137	0.011360	0.011446	0.013794
15	0.043097	0.019418	0.011552	0.019858	0.011696	0.037560	0.013870	0.018389	0.011872	0.011914	0.011241	0.011310	0.013726
16	0.042092	0.018110	0.010894	0.019050	0.011310	0.036614	0.013587	0.018075	0.011564	0.011609	0.011047	0.011115	0.013594
17	0.041041	0.016756	0.010203	0.018177	0.010897	0.035570	0.013271	0.017735	0.011172	0.011246	0.010795	0.010876	0.013409
18	0.039963	0.015403	0.009504	0.017270	0.010470	0.034461	0.012935	0.017378	0.010721	0.010846	0.010498	0.010605	0.013184
19	0.038875	0.014083	0.008814	0.016353	0.010038	0.033312	0.012587	0.017011	0.010232	0.010424	0.010169	0.010311	0.012927
20	0.037786	0.012820	0.008146	0.015441	0.009607	0.032145	0.012233	0.016638	0.009721	0.009990	0.009816	0.010001	0.012647
21	0.036706	0.011626	0.007508	0.014548	0.009183	0.030974	0.011879	0.016262	0.009201	0.009553	0.009448	0.009682	0.012351
22	0.035641	0.010511	0.006904	0.013682	0.008767	0.029811	0.011526	0.015888	0.008682	0.009120	0.009071	0.009358	0.012043
23	0.034593	0.009478	0.006338	0.012848	0.008364	0.028665	0.011179	0.015517	0.008170	0.008694	0.008691	0.009034	0.011728
ΣY_p	0.954899	0.356254	0.214943	0.391177	0.241501	0.798327	0.295635	0.408373	0.225202	0.236524	0.227998	0.236078	0.295514
U	0.961538	0.356506	0.215610	0.392157	0.242424	0.805153	0.297442	0.410678	0.225632	0.237248	0.229938	0.237023	0.297442
e	0.690456	0.070686	0.309355	0.249900	0.380738	0.847789	0.607513	0.561267	0.190576	0.305166	0.843706	0.398695	0.648194

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ค.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1%

Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 1	Roof 2	Roof 3	Roof 4	Roof 5	Roof 6	Roof 7	Roof 8	Roof 9	Roof 10	Roof 11	Roof 12	Roof 13	Roof 14
0	0.023492	0.003028	0.035414	0.000087	0.000435	0.021014	0.005924	0.019988	0.000880	0.003541	0.002208	0.019769	0.008928	0.005685
1	0.194532	0.068252	0.252678	0.003874	0.015534	0.193291	0.055179	0.127505	0.002011	0.004244	0.002567	0.036943	0.015713	0.007876
2	0.155199	0.115880	0.268612	0.024982	0.044506	0.304047	0.099414	0.252474	0.015297	0.019218	0.008721	0.107609	0.039215	0.016914
3	0.055171	0.073029	0.200920	0.044806	0.050259	0.278394	0.100053	0.262855	0.034631	0.044474	0.018072	0.167911	0.053199	0.022688
4	0.016318	0.033960	0.148139	0.047411	0.043900	0.232317	0.088209	0.237730	0.042830	0.059551	0.023607	0.193704	0.055059	0.023724
5	0.004591	0.014201	0.109187	0.039538	0.035499	0.190907	0.074806	0.208334	0.041268	0.062478	0.024935	0.196181	0.052128	0.022865
6	0.001272	0.005680	0.080476	0.029142	0.027940	0.156475	0.062639	0.181193	0.035852	0.058786	0.023891	0.186507	0.047979	0.021481
7	0.000351	0.002226	0.059315	0.020011	0.021770	0.128197	0.052225	0.157295	0.029824	0.052550	0.021842	0.171433	0.043783	0.020021
8	0.000097	0.000863	0.043718	0.013158	0.016897	0.105022	0.043479	0.136486	0.024366	0.045809	0.019507	0.154608	0.039853	0.018614
9	0.000027	0.000333	0.032223	0.008416	0.013094	0.086036	0.036179	0.118416	0.019759	0.039429	0.017215	0.137888	0.036249	0.017292
10	0.000007	0.000128	0.023750	0.005286	0.010142	0.070482	0.030099	0.102736	0.015974	0.033717	0.015100	0.122159	0.032965	0.016061
11	0.000002	0.000049	0.017505	0.003280	0.007853	0.057740	0.025039	0.089131	0.012899	0.028735	0.013203	0.107786	0.029977	0.014916
12	0.000001	0.000019	0.012902	0.002018	0.006081	0.047301	0.020830	0.077328	0.010411	0.024446	0.011525	0.094868	0.027259	0.013853
13	0.000000	0.000007	0.009509	0.001235	0.004708	0.038750	0.017328	0.067088	0.008401	0.020778	0.010051	0.083371	0.024788	0.012865
14	0.000000	0.000003	0.007009	0.000753	0.003645	0.031744	0.014415	0.058204	0.006778	0.017652	0.008762	0.073198	0.022541	0.011947
15	0.000000	0.000001	0.005166	0.000458	0.002822	0.026005	0.011992	0.050496	0.005469	0.014992	0.007637	0.064229	0.020497	0.011095
16	0.000000	0.000000	0.003808	0.000278	0.002185	0.021304	0.009976	0.043809	0.004413	0.012732	0.006655	0.056339	0.018639	0.010304
17	0.000000	0.000000	0.002806	0.000168	0.001692	0.017452	0.008298	0.038008	0.003560	0.010811	0.005799	0.049407	0.016949	0.009569
18	0.000000	0.000000	0.002068	0.000102	0.001310	0.014297	0.006903	0.032975	0.002873	0.009180	0.005053	0.043321	0.015412	0.008887
19	0.000000	0.000000	0.001525	0.000062	0.001014	0.011712	0.005743	0.028608	0.002318	0.007795	0.004403	0.037982	0.014015	0.008253
20	0.000000	0.000000	0.001124	0.000037	0.000785	0.009595	0.004777	0.024819	0.001870	0.006618	0.003836	0.033299	0.012744	0.007665
21	0.000000	0.000000	0.000828	0.000023	0.000608	0.007860	0.003974	0.021533	0.001509	0.005620	0.003343	0.029193	0.011589	0.007118
22	0.000000	0.000000	0.000610	0.000014	0.000471	0.006439	0.003306	0.018681	0.001217	0.004772	0.002913	0.025592	0.010538	0.006610
23	0.000000	0.000000	0.000450	0.000008	0.000364	0.005275	0.002750	0.016207	0.000982	0.004052	0.002538	0.022436	0.009582	0.006139
ΣY_p	0.451060	0.317659	1.319742	0.245147	0.313514	2.061656	0.783537	2.371899	0.325392	0.591980	0.263383	2.215733	0.659601	0.322442
U	0.451060	0.317662	1.321004	0.245158	0.314762	2.061856	0.783699	2.375297	0.325415	0.592417	0.263992	2.222222	0.660502	0.324359
e	0.000000	0.000944	0.095533	0.004487	0.396490	0.009700	0.020671	0.143056	0.007068	0.073766	0.230689	0.292005	0.136411	0.591012

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ค.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 15-28 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1% (ต่อ)

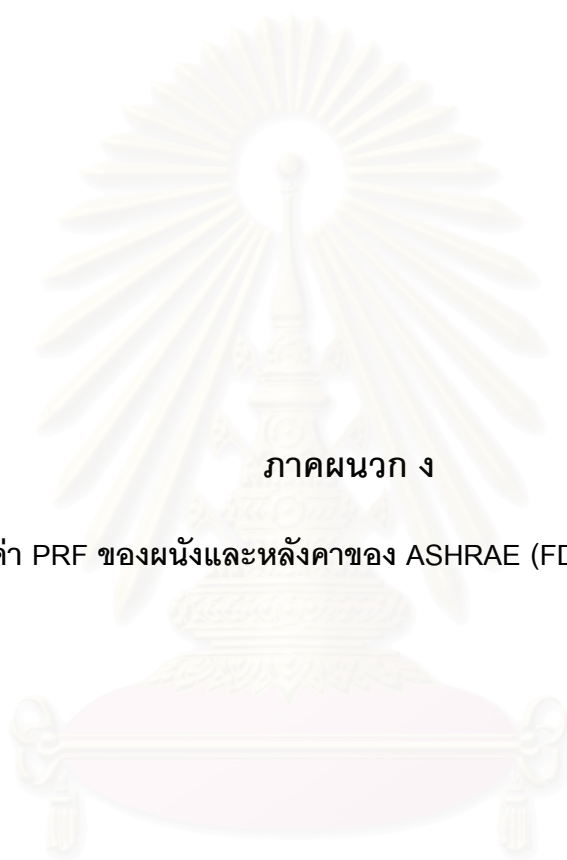
Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 15	Roof 16	Roof 17	Roof 18	Roof 19	Roof 20	Roof 21	Roof 22	Roof 23	Roof 24	Roof 25	Roof 26	Roof 27	Roof 28
0	0.012827	0.020707	0.001214	0.002371	0.003484	0.006785	0.008473	0.016783	0.006023	0.013727	0.010411	0.003547	0.005605	0.006564
1	0.015829	0.022814	0.000947	0.001970	0.003395	0.005999	0.008021	0.016157	0.005649	0.013419	0.010080	0.003094	0.005024	0.006009
2	0.025669	0.034623	0.002230	0.003516	0.007800	0.008331	0.012170	0.021888	0.007111	0.016162	0.011264	0.002955	0.005163	0.005769
3	0.030243	0.043182	0.007715	0.008220	0.015684	0.016353	0.019826	0.031329	0.010213	0.020144	0.013661	0.003728	0.006827	0.006139
4	0.030523	0.045399	0.015019	0.013844	0.022050	0.025526	0.026155	0.038543	0.013076	0.022858	0.015389	0.006196	0.009725	0.007826
5	0.029579	0.044795	0.019929	0.018209	0.025540	0.031582	0.029842	0.042558	0.014962	0.024143	0.016031	0.009417	0.012582	0.010297
6	0.028382	0.043328	0.021592	0.020750	0.026717	0.034155	0.031395	0.044187	0.015947	0.024494	0.016046	0.012095	0.014696	0.012577
7	0.027168	0.041669	0.020967	0.021679	0.026357	0.034265	0.031499	0.044251	0.016267	0.024310	0.015799	0.013697	0.015942	0.014149
8	0.025991	0.040009	0.019143	0.021417	0.025070	0.032927	0.030687	0.043337	0.016134	0.023835	0.015460	0.014286	0.016446	0.014959
9	0.024861	0.038399	0.016858	0.020365	0.023276	0.030846	0.029326	0.041834	0.015709	0.023208	0.015095	0.014138	0.016398	0.015161
10	0.023779	0.036850	0.014529	0.018845	0.021253	0.028455	0.027663	0.040001	0.015105	0.022508	0.014728	0.013532	0.015971	0.014944
11	0.022744	0.035363	0.012357	0.017091	0.019174	0.026000	0.025859	0.038001	0.014397	0.021780	0.014367	0.012676	0.015302	0.014467
12	0.021754	0.033935	0.010424	0.015264	0.017148	0.023616	0.024017	0.035943	0.013638	0.021047	0.014013	0.011712	0.014491	0.013842
13	0.020808	0.032564	0.008748	0.013469	0.015236	0.021370	0.022205	0.033892	0.012862	0.020324	0.013668	0.010725	0.013608	0.013143
14	0.019902	0.031249	0.007317	0.011771	0.013471	0.019291	0.020460	0.031891	0.012092	0.019617	0.013331	0.009766	0.012701	0.012419
15	0.019036	0.029988	0.006107	0.010208	0.011866	0.017389	0.018807	0.029963	0.011342	0.018929	0.013003	0.008859	0.011801	0.011697
16	0.018208	0.028777	0.005091	0.008796	0.010421	0.015658	0.017257	0.028123	0.010620	0.018263	0.012683	0.008018	0.010928	0.010994
17	0.017415	0.027615	0.004240	0.007538	0.009132	0.014091	0.015813	0.026376	0.009932	0.017619	0.012370	0.007245	0.010095	0.010320
18	0.016657	0.026500	0.003530	0.006432	0.007988	0.012676	0.014477	0.024725	0.009280	0.016997	0.012065	0.006541	0.009309	0.009678
19	0.015933	0.025430	0.002937	0.005466	0.006979	0.011400	0.013243	0.023169	0.008666	0.016396	0.011768	0.005901	0.008572	0.009071
20	0.015239	0.024403	0.002444	0.004631	0.006090	0.010251	0.012109	0.021705	0.008088	0.015816	0.011478	0.005322	0.007885	0.008499
21	0.014576	0.023417	0.002033	0.003912	0.005310	0.009216	0.011067	0.020331	0.007546	0.015257	0.011195	0.004798	0.007247	0.007961
22	0.013942	0.022472	0.001691	0.003296	0.004627	0.008286	0.010112	0.019040	0.007038	0.014717	0.010919	0.004326	0.006657	0.007456
23	0.013335	0.021564	0.001406	0.002771	0.004030	0.007449	0.009237	0.017831	0.006564	0.014196	0.010650	0.003899	0.006113	0.006982
ΣY_p	0.504400	0.775052	0.208468	0.261831	0.332098	0.451917	0.469720	0.731858	0.268261	0.459766	0.315474	0.196473	0.259088	0.250923
U	0.507099	0.781250	0.208551	0.261986	0.333000	0.452284	0.470810	0.733676	0.270783	0.462749	0.318370	0.196696	0.260010	0.251636
e	0.532243	0.793344	0.039798	0.059163	0.270871	0.081144	0.231516	0.247793	0.931373	0.644626	0.909633	0.113373	0.354602	0.283346

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ค.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 29-42 โดยวิธี Direct Root Method(Response Factors) Error < 1% (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 29	Roof 30	Roof 31	Roof 32	Roof 33	Roof 34	Roof 35	Roof 36	Roof 37	Roof 38	Roof 39	Roof 40	Roof 41	Roof 42
0	0.008292	0.011044	0.010050	0.023612	0.010728	0.015515	0.007116	0.010130	0.007693	0.007098	0.026081	0.012162	0.018146	0.010336
1	0.007686	0.010354	0.009441	0.022251	0.010209	0.014924	0.006370	0.009353	0.007249	0.006761	0.024916	0.011646	0.017457	0.010019
2	0.008439	0.010156	0.009306	0.022921	0.010274	0.014962	0.006062	0.008997	0.007020	0.006593	0.024757	0.011511	0.017323	0.009919
3	0.010639	0.010889	0.009967	0.025601	0.011051	0.015693	0.006342	0.009145	0.006865	0.006434	0.025637	0.011730	0.017524	0.009817
4	0.013007	0.012937	0.011630	0.028881	0.012214	0.016857	0.007591	0.010193	0.007119	0.006514	0.027437	0.012377	0.018208	0.009887
5	0.014838	0.015362	0.013524	0.031683	0.013254	0.017938	0.009348	0.011730	0.007844	0.006943	0.029352	0.013123	0.019038	0.010123
6	0.016079	0.017351	0.015064	0.033790	0.014033	0.018770	0.011081	0.013263	0.008814	0.007609	0.030983	0.013783	0.019798	0.010431
7	0.016826	0.018650	0.016087	0.035252	0.014564	0.019352	0.012505	0.014540	0.009765	0.008312	0.032230	0.014307	0.020413	0.010737
8	0.017182	0.019322	0.016643	0.036164	0.014890	0.019720	0.013534	0.015491	0.010539	0.008909	0.033111	0.014695	0.020877	0.011000
9	0.017235	0.019512	0.016836	0.036622	0.015051	0.019913	0.014179	0.016128	0.011081	0.009340	0.033672	0.014961	0.021201	0.011209
10	0.017056	0.019366	0.016766	0.036709	0.015079	0.019967	0.014490	0.016492	0.011397	0.009600	0.033962	0.015122	0.021403	0.011364
11	0.016702	0.018994	0.016514	0.036494	0.015002	0.019908	0.014525	0.016626	0.011520	0.009714	0.034026	0.015192	0.021500	0.011468
12	0.016221	0.018477	0.016138	0.036038	0.014843	0.019762	0.014342	0.016572	0.011491	0.009712	0.033902	0.015185	0.021508	0.011527
13	0.015648	0.017874	0.015682	0.035391	0.014620	0.019546	0.013991	0.016365	0.011346	0.009623	0.033624	0.015113	0.021438	0.011546
14	0.015012	0.017221	0.015176	0.034593	0.014348	0.019277	0.013515	0.016038	0.011118	0.009471	0.033220	0.014985	0.021303	0.011532
15	0.014336	0.016546	0.014643	0.033681	0.014038	0.018966	0.012949	0.015615	0.010833	0.009278	0.032713	0.014811	0.021114	0.011489
16	0.013640	0.015866	0.014097	0.032683	0.013701	0.018625	0.012322	0.015120	0.010511	0.009056	0.032125	0.014599	0.020878	0.011420
17	0.012935	0.015193	0.013549	0.031623	0.013345	0.018260	0.011656	0.014571	0.010165	0.008816	0.031473	0.014354	0.020605	0.011329
18	0.012234	0.014534	0.013007	0.030521	0.012976	0.017879	0.010971	0.013984	0.009806	0.008567	0.030770	0.014084	0.020299	0.011220
19	0.011544	0.013893	0.012475	0.029395	0.012600	0.017486	0.010281	0.013371	0.009444	0.008313	0.030030	0.013793	0.019968	0.011096
20	0.010872	0.013274	0.011957	0.028257	0.012219	0.017087	0.009597	0.012745	0.009082	0.008058	0.029263	0.013485	0.019616	0.010958
21	0.010221	0.012677	0.011455	0.027119	0.011838	0.016685	0.008928	0.012113	0.008726	0.007806	0.028477	0.013165	0.019247	0.010809
22	0.009596	0.012105	0.010969	0.025988	0.011459	0.016282	0.008281	0.011483	0.008377	0.007557	0.027680	0.012835	0.018865	0.010651
23	0.008997	0.011556	0.010501	0.024874	0.011084	0.015880	0.007660	0.010860	0.008037	0.007313	0.026877	0.012499	0.018474	0.010486
ΣY_p	0.315237	0.363153	0.321477	0.740143	0.313420	0.429254	0.257636	0.320925	0.225842	0.197397	0.726318	0.329517	0.476203	0.260373
U	0.318370	0.364964	0.323625	0.747384	0.315457	0.431965	0.258065	0.323625	0.227739	0.198295	0.731529	0.331895	0.478927	0.262536
e	0.984075	0.496213	0.663731	0.968846	0.645730	0.627597	0.166237	0.834299	0.832971	0.452861	0.712344	0.716492	0.568771	0.823887

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$



ภาคผนวก ง

ค่า PRF ของผนังและหลังคาของ ASHRAE (FDR Method)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี FDR Method

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE													
	Wall 1	Wall 2	Wall 3	Wall 4	Wall 5	Wall 6	Wall 7	Wall 8	Wall 9	Wall 10	Wall 11	Wall 12	Wall 13	Wall 14
0	0.083453	0.000930	0.024269	0.016304	0.001459	0.006800	0.012795	0.013450	0.000741	0.002859	0.006722	0.024995	0.023606	0.013416
1	0.212319	0.032346	0.205509	0.140479	0.027195	0.059873	0.061171	0.039956	0.000976	0.008479	0.009606	0.034357	0.034292	0.014401
2	0.062113	0.084461	0.241125	0.183247	0.089190	0.128672	0.073601	0.086777	0.006076	0.037965	0.027462	0.085484	0.073316	0.024445
3	0.013485	0.082293	0.179398	0.139726	0.110965	0.141444	0.066429	0.100272	0.017572	0.071094	0.046293	0.136109	0.100600	0.036219
4	0.002918	0.055057	0.127975	0.091066	0.100833	0.128897	0.058959	0.096369	0.026429	0.089063	0.053989	0.156636	0.107930	0.041834
5	0.000632	0.031140	0.091025	0.055521	0.083165	0.111015	0.052279	0.088393	0.029171	0.093657	0.053884	0.157031	0.105720	0.042974
6	0.000137	0.016139	0.064731	0.032739	0.066578	0.093880	0.046354	0.080092	0.027757	0.090068	0.050380	0.148524	0.099954	0.041980
7	0.000030	0.007959	0.046032	0.018962	0.052826	0.078906	0.041100	0.072335	0.024506	0.082204	0.045827	0.136974	0.093133	0.040100
8	0.000006	0.003809	0.032734	0.010872	0.041807	0.066184	0.036441	0.065272	0.020801	0.072538	0.041213	0.124917	0.086239	0.037910
9	0.000001	0.001790	0.023278	0.006198	0.033062	0.055474	0.032311	0.058885	0.017283	0.062538	0.036892	0.113352	0.079641	0.035665
10	0.000000	0.000831	0.016554	0.003521	0.026141	0.046486	0.028649	0.053119	0.014191	0.053017	0.032962	0.102626	0.073463	0.033476
11	0.000000	0.000383	0.011772	0.001997	0.020668	0.038951	0.025401	0.047917	0.011577	0.044383	0.029429	0.092820	0.067729	0.031386
12	0.000000	0.000175	0.008371	0.001131	0.016340	0.032636	0.022522	0.043225	0.009409	0.036797	0.026267	0.083912	0.062429	0.029411
13	0.000000	0.000080	0.005953	0.000640	0.012919	0.027345	0.019970	0.038991	0.007630	0.030277	0.023443	0.075844	0.057538	0.027553
14	0.000000	0.000037	0.004233	0.000362	0.010214	0.022912	0.017706	0.035173	0.006181	0.024763	0.020921	0.068544	0.053028	0.025809
15	0.000000	0.000017	0.003010	0.000205	0.008075	0.019197	0.015699	0.031728	0.005003	0.020154	0.018670	0.061945	0.048871	0.024174
16	0.000000	0.000008	0.002141	0.000116	0.006384	0.016085	0.013920	0.028621	0.004048	0.016339	0.016661	0.055979	0.045039	0.022642
17	0.000000	0.000003	0.001522	0.000066	0.005047	0.013477	0.012342	0.025818	0.003275	0.013203	0.014869	0.050588	0.041508	0.021207
18	0.000000	0.000002	0.001083	0.000037	0.003991	0.011292	0.010943	0.023289	0.002649	0.010640	0.013269	0.045716	0.038253	0.019863
19	0.000000	0.000001	0.000770	0.000021	0.003155	0.009461	0.009703	0.021009	0.002142	0.008556	0.011841	0.041313	0.035254	0.018604
20	0.000000	0.000000	0.000547	0.000012	0.002494	0.007927	0.008603	0.018951	0.001733	0.006867	0.010567	0.037334	0.032490	0.017424
21	0.000000	0.000000	0.000389	0.000007	0.001972	0.006642	0.007628	0.017095	0.001401	0.005503	0.009430	0.033738	0.029942	0.016320
22	0.000000	0.000000	0.000277	0.000004	0.001559	0.005565	0.006763	0.015421	0.001133	0.004404	0.008416	0.030489	0.027594	0.015285
23	0.000000	0.000000	0.000197	0.000002	0.001233	0.004663	0.005997	0.013911	0.000917	0.003521	0.007510	0.027552	0.025431	0.014316
ΣY_p	0.375094	0.317461	1.092895	0.703235	0.727272	1.133784	0.687286	1.116069	0.242601	0.888889	0.616523	1.926779	1.443000	0.646414
U	0.375094	0.317460	1.092896	0.703235	0.727273	1.133787	0.687285	1.116071	0.242601	0.888889	0.616523	1.926782	1.443001	0.646412
e	0.000000	0.000315	0.000092	0.000000	0.000137	0.000265	0.000146	0.000179	0.000000	0.000000	0.000000	0.000156	0.000069	0.000309

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ง.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 15-28 โดยวิธี FDR Method (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE													
	Wall 15	Wall 16	Wall 17	Wall 18	Wall 19	Wall 20	Wall 21	Wall 22	Wall 23	Wall 24	Wall 25	Wall 26	Wall 27	Wall 28
0	0.003257	0.013418	0.003959	0.008357	0.013868	0.035525	0.019075	0.002858	0.004803	0.024883	0.008782	0.015399	0.009636	0.012224
1	0.002890	0.012516	0.003674	0.007820	0.013364	0.034531	0.018371	0.002450	0.004330	0.022732	0.008127	0.014559	0.009239	0.011832
2	0.006427	0.022331	0.004950	0.008919	0.016705	0.040937	0.018887	0.002482	0.004002	0.021721	0.007751	0.014398	0.008911	0.011572
3	0.018635	0.047882	0.009230	0.014042	0.024852	0.055136	0.022208	0.004323	0.004499	0.025466	0.008662	0.016549	0.009026	0.012014
4	0.033455	0.074438	0.013954	0.020499	0.031934	0.067530	0.026728	0.008042	0.006531	0.034836	0.011159	0.020510	0.010018	0.013411
5	0.044028	0.092461	0.017051	0.024995	0.035753	0.074824	0.030410	0.012029	0.009571	0.046308	0.014126	0.024406	0.011632	0.015154
6	0.048932	0.101151	0.018375	0.027016	0.037038	0.077937	0.032672	0.015123	0.012556	0.056577	0.016640	0.027316	0.013276	0.016635
7	0.049367	0.102672	0.018437	0.027267	0.036796	0.078306	0.033710	0.017001	0.014806	0.064127	0.018403	0.029136	0.014565	0.017630
8	0.046937	0.099436	0.017750	0.026497	0.035717	0.077009	0.033881	0.017776	0.016128	0.068701	0.019444	0.030041	0.015384	0.018162
9	0.042938	0.093360	0.016676	0.025218	0.034215	0.074751	0.033492	0.017699	0.016616	0.070639	0.019891	0.030253	0.015775	0.018335
10	0.038257	0.085800	0.015439	0.023723	0.032523	0.071972	0.032760	0.017026	0.016466	0.070482	0.019883	0.029962	0.015835	0.018256
11	0.033452	0.077661	0.014169	0.022172	0.030775	0.068940	0.031829	0.015971	0.015877	0.068780	0.019541	0.029320	0.015661	0.018009
12	0.028852	0.069517	0.012933	0.020648	0.029041	0.065820	0.030791	0.014699	0.015014	0.066012	0.018960	0.028439	0.015332	0.017655
13	0.024630	0.061713	0.011766	0.019190	0.027360	0.062708	0.029704	0.013330	0.014003	0.062562	0.018216	0.027404	0.014908	0.017235
14	0.020859	0.054443	0.010683	0.017814	0.025751	0.059662	0.028604	0.011948	0.012930	0.058726	0.017367	0.026276	0.014427	0.016778
15	0.017558	0.047799	0.009688	0.016526	0.024222	0.056714	0.027512	0.010608	0.011854	0.054720	0.016457	0.025099	0.013919	0.016301
16	0.014708	0.041811	0.008778	0.015325	0.022776	0.053881	0.026441	0.009346	0.010811	0.050698	0.015517	0.023906	0.013400	0.015817
17	0.012274	0.036467	0.007951	0.014209	0.021411	0.051170	0.025399	0.008180	0.009824	0.046766	0.014572	0.022719	0.012882	0.015334
18	0.010211	0.031734	0.007199	0.013173	0.020126	0.048584	0.024390	0.007121	0.008902	0.042991	0.013639	0.021553	0.012373	0.014856
19	0.008473	0.027567	0.006517	0.012211	0.018916	0.046121	0.023417	0.006170	0.008052	0.039416	0.012732	0.020420	0.011876	0.014388
20	0.007018	0.023912	0.005899	0.011320	0.017778	0.043779	0.022479	0.005325	0.007273	0.036063	0.011858	0.019325	0.011395	0.013931
21	0.005803	0.020720	0.005340	0.010493	0.016708	0.041553	0.021576	0.004579	0.006562	0.032943	0.011023	0.018275	0.010930	0.013485
22	0.004792	0.017937	0.004833	0.009726	0.015702	0.039438	0.020709	0.003926	0.005918	0.030054	0.010232	0.017270	0.010481	0.013052
23	0.003953	0.015518	0.004374	0.009016	0.014756	0.037430	0.019875	0.003358	0.005333	0.027392	0.009484	0.016313	0.010050	0.012632
ΣY_p	0.527706	1.272264	0.249625	0.406176	0.598087	1.364258	0.634920	0.231370	0.242661	1.123595	0.342466	0.548848	0.300931	0.364698
U	0.527704	1.272265	0.249626	0.406174	0.598086	1.364256	0.634921	0.231374	0.242660	1.123596	0.342466	0.548847	0.300933	0.364697
e	0.000379	0.000079	0.000401	0.000492	0.000167	0.000147	0.000157	0.001729	0.000412	0.000089	0.000000	0.000182	0.000665	0.000274

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ง.1 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับผนังของ ASHRAE ชนิดที่ 29-41 โดยวิธี FDR Method (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดผนังของ ASHRAE												
	Wall 29	Wall 30	Wall 31	Wall 32	Wall 33	Wall 34	Wall 35	Wall 36	Wall 37	Wall 38	Wall 39	Wall 40	Wall 41
0	0.033744	0.008526	0.005818	0.012064	0.007992	0.027701	0.010886	0.015218	0.007679	0.008294	0.008348	0.008730	0.011461
1	0.032748	0.007657	0.005325	0.011304	0.007616	0.026605	0.010551	0.014855	0.007199	0.007892	0.007970	0.008411	0.011141
2	0.032062	0.006901	0.004880	0.010610	0.007268	0.025753	0.010228	0.014523	0.006737	0.007506	0.007601	0.008100	0.010824
3	0.032823	0.006644	0.004626	0.010274	0.007109	0.025967	0.009983	0.014444	0.006333	0.007173	0.007283	0.007837	0.010557
4	0.035371	0.007692	0.004961	0.010888	0.007475	0.027636	0.010024	0.014924	0.006150	0.007056	0.007178	0.007774	0.010473
5	0.038614	0.010219	0.006096	0.012568	0.008399	0.030180	0.010502	0.015855	0.006401	0.007356	0.007445	0.008053	0.010671
6	0.041558	0.013533	0.007764	0.014822	0.009573	0.032884	0.011313	0.016893	0.007119	0.008080	0.008045	0.008627	0.011113
7	0.043795	0.016796	0.009520	0.017076	0.010681	0.035294	0.012228	0.017793	0.008139	0.009052	0.008812	0.009339	0.011683
8	0.045271	0.019460	0.011024	0.018958	0.011557	0.037199	0.013057	0.018464	0.009242	0.010054	0.009585	0.010036	0.012271
9	0.046082	0.021304	0.012114	0.020318	0.012151	0.038541	0.013698	0.018899	0.010255	0.010928	0.010260	0.010626	0.012803
10	0.046357	0.022322	0.012763	0.021145	0.012484	0.039347	0.014125	0.019131	0.011072	0.011591	0.010787	0.011071	0.013237
11	0.046220	0.022619	0.013016	0.021501	0.012597	0.039681	0.014353	0.019199	0.011652	0.012024	0.011155	0.011363	0.013556
12	0.045776	0.022341	0.012948	0.021471	0.012539	0.039620	0.014413	0.019139	0.011997	0.012241	0.011372	0.011516	0.013762
13	0.045108	0.021634	0.012638	0.021142	0.012352	0.039240	0.014342	0.018983	0.012127	0.012275	0.011455	0.011550	0.013862
14	0.044281	0.020626	0.012158	0.020593	0.012072	0.038611	0.014174	0.018756	0.012078	0.012162	0.011425	0.011486	0.013869
15	0.043342	0.019426	0.011566	0.019887	0.011727	0.037794	0.013936	0.018476	0.011883	0.011937	0.011302	0.011345	0.013798
16	0.042329	0.018116	0.010907	0.019077	0.011339	0.036838	0.013649	0.018160	0.011576	0.011630	0.011104	0.011146	0.013662
17	0.041269	0.016761	0.010215	0.018202	0.010925	0.035784	0.013330	0.017818	0.011185	0.011267	0.010849	0.010903	0.013475
18	0.040184	0.015406	0.009515	0.017293	0.010497	0.034666	0.012991	0.017459	0.010735	0.010866	0.010549	0.010628	0.013247
19	0.039088	0.014086	0.008824	0.016374	0.010063	0.033509	0.012641	0.017089	0.010247	0.010442	0.010217	0.010332	0.012988
20	0.037993	0.012821	0.008156	0.015461	0.009631	0.032334	0.012285	0.016714	0.009736	0.010007	0.009861	0.010020	0.012705
21	0.036906	0.011627	0.007518	0.014566	0.009205	0.031155	0.011930	0.016337	0.009215	0.009569	0.009491	0.009700	0.012407
22	0.035834	0.010511	0.006913	0.013698	0.008788	0.029984	0.011576	0.015961	0.008694	0.009135	0.009112	0.009376	0.012097
23	0.034781	0.009478	0.006346	0.012863	0.008384	0.028831	0.011228	0.015588	0.008181	0.008709	0.008730	0.009052	0.011781
ΣY_p	0.961536	0.356506	0.215611	0.392155	0.242424	0.805154	0.297443	0.410678	0.225632	0.237246	0.229936	0.237021	0.297443
U	0.961538	0.356506	0.215610	0.392157	0.242424	0.805153	0.297442	0.410678	0.225632	0.237248	0.229938	0.237023	0.297442
e	0.000208	0.000000	0.000464	0.000510	0.000000	0.000124	0.000336	0.000000	0.000000	0.000843	0.000870	0.000844	0.000336

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ๓.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 1-14 โดยวิธี FDR Method

Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 1	Roof 2	Roof 3	Roof 4	Roof 5	Roof 6	Roof 7	Roof 8	Roof 9	Roof 10	Roof 11	Roof 12	Roof 13	Roof 14
0	0.041083	0.005943	0.035379	0.000024	0.000631	0.020477	0.005734	0.019796	0.000794	0.003443	0.002216	0.019988	0.008834	0.005759
1	0.221861	0.087990	0.253289	0.003945	0.015840	0.193894	0.055420	0.128566	0.002106	0.004466	0.002711	0.038293	0.015981	0.008119
2	0.130906	0.114098	0.268792	0.024984	0.044675	0.304072	0.099433	0.252824	0.015300	0.019267	0.008783	0.108252	0.039291	0.017055
3	0.041215	0.063323	0.201053	0.044807	0.050390	0.278414	0.100069	0.263159	0.034634	0.044515	0.018126	0.168475	0.053268	0.022820
4	0.011612	0.027856	0.148237	0.047412	0.044001	0.232333	0.088222	0.237993	0.042832	0.059586	0.023654	0.194197	0.055121	0.023846
5	0.003188	0.011288	0.109259	0.039538	0.035577	0.190920	0.074817	0.208562	0.041269	0.062507	0.024976	0.196614	0.052184	0.022979
6	0.000870	0.004416	0.080530	0.029143	0.028001	0.156485	0.062648	0.181392	0.035853	0.058812	0.023927	0.186886	0.048031	0.021587
7	0.000237	0.001700	0.059355	0.020012	0.021817	0.128206	0.052233	0.157467	0.029826	0.052572	0.021873	0.171766	0.043830	0.020119
8	0.000064	0.000649	0.043747	0.013159	0.016933	0.105030	0.043485	0.136635	0.024367	0.045828	0.019534	0.154899	0.039895	0.018705
9	0.000018	0.000247	0.032244	0.008416	0.013123	0.086042	0.036184	0.118546	0.019759	0.039445	0.017239	0.138144	0.036288	0.017377
10	0.000005	0.000094	0.023766	0.005286	0.010164	0.070487	0.030103	0.102848	0.015975	0.033730	0.015121	0.122383	0.033001	0.016139
11	0.000001	0.000036	0.017516	0.003280	0.007870	0.057744	0.025043	0.089229	0.012899	0.028746	0.013221	0.107982	0.030009	0.014989
12	0.000000	0.000013	0.012911	0.002018	0.006094	0.047304	0.020833	0.077413	0.010411	0.024455	0.011540	0.095040	0.027289	0.013920
13	0.000000	0.000005	0.009516	0.001235	0.004718	0.038752	0.017331	0.067161	0.008401	0.020786	0.010065	0.083522	0.024814	0.012928
14	0.000000	0.000002	0.007014	0.000752	0.003653	0.031746	0.014417	0.058267	0.006778	0.017659	0.008774	0.073331	0.022565	0.012006
15	0.000000	0.000001	0.005169	0.000457	0.002828	0.026007	0.011993	0.050551	0.005469	0.014998	0.007647	0.064345	0.020519	0.011150
16	0.000000	0.000000	0.003810	0.000277	0.002190	0.021305	0.009977	0.043857	0.004413	0.012736	0.006664	0.056440	0.018658	0.010354
17	0.000000	0.000000	0.002808	0.000168	0.001695	0.017454	0.008300	0.038049	0.003560	0.010815	0.005807	0.049496	0.016967	0.009616
18	0.000000	0.000000	0.002070	0.000102	0.001313	0.014298	0.006904	0.033011	0.002873	0.009183	0.005060	0.043399	0.015428	0.008930
19	0.000000	0.000000	0.001526	0.000062	0.001016	0.011713	0.005744	0.028639	0.002318	0.007798	0.004409	0.038051	0.014030	0.008294
20	0.000000	0.000000	0.001124	0.000037	0.000787	0.009596	0.004778	0.024847	0.001870	0.006621	0.003842	0.033359	0.012758	0.007702
21	0.000000	0.000000	0.000829	0.000022	0.000609	0.007861	0.003975	0.021556	0.001509	0.005622	0.003347	0.029246	0.011601	0.007153
22	0.000000	0.000000	0.000611	0.000014	0.000472	0.006440	0.003306	0.018702	0.001217	0.004773	0.002917	0.025638	0.010549	0.006643
23	0.000000	0.000000	0.000450	0.000008	0.000365	0.005276	0.002751	0.016225	0.000982	0.004053	0.002541	0.022476	0.009593	0.006169
ΣY_p	0.451060	0.317661	1.321005	0.245158	0.314762	2.061856	0.783700	2.375295	0.325415	0.592416	0.263994	2.222222	0.660504	0.324359
U	0.451060	0.317662	1.321004	0.245158	0.314762	2.061856	0.783699	2.375297	0.325415	0.592417	0.263992	2.222222	0.660502	0.324359
e	0.000000	0.000315	0.000076	0.000000	0.000000	0.000000	0.000128	0.000084	0.000000	0.000169	0.000758	0.000000	0.000303	0.000000

$$e = \left| \frac{\sum Y_p - U}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ง.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 15-28 โดยวิธี FDR Method (ต่อ)

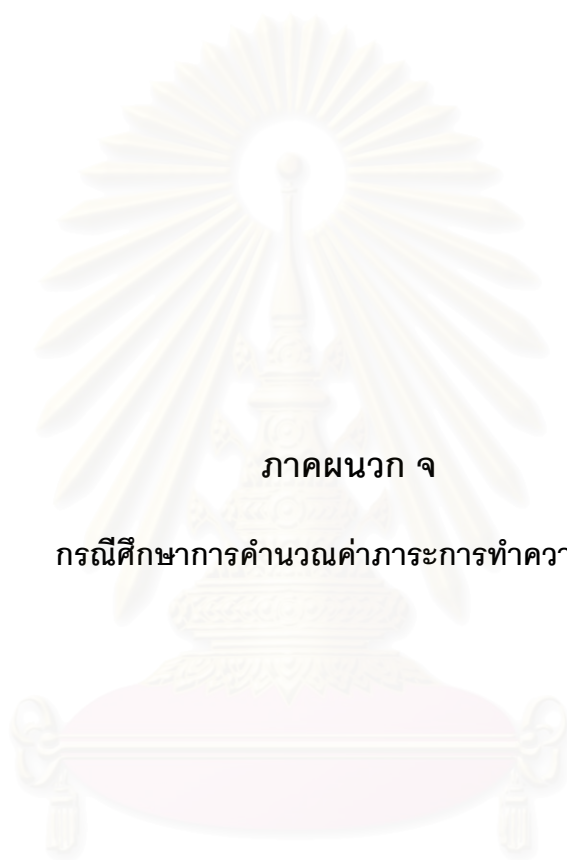
Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 15	Roof 16	Roof 17	Roof 18	Roof 19	Roof 20	Roof 21	Roof 22	Roof 23	Roof 24	Roof 25	Roof 26	Roof 27	Roof 28
0	0.012873	0.020877	0.001170	0.002326	0.003513	0.006701	0.008450	0.016728	0.006159	0.013772	0.010475	0.003517	0.005620	0.006552
1	0.016133	0.023425	0.001017	0.002064	0.003594	0.006162	0.008249	0.016494	0.005919	0.013732	0.010329	0.003170	0.005175	0.006135
2	0.025832	0.034990	0.002240	0.003535	0.007893	0.008363	0.012259	0.022015	0.007293	0.016332	0.011415	0.002974	0.005236	0.005821
3	0.030400	0.043535	0.007723	0.008236	0.015764	0.016383	0.019907	0.031449	0.010384	0.020308	0.013807	0.003746	0.006894	0.006187
4	0.030673	0.045737	0.015026	0.013857	0.022120	0.025553	0.026229	0.038655	0.013235	0.023016	0.015532	0.006211	0.009786	0.007871
5	0.029723	0.045119	0.019935	0.018220	0.025601	0.031606	0.029910	0.042663	0.015110	0.024295	0.016171	0.009431	0.012639	0.010339
6	0.028519	0.043639	0.021598	0.020758	0.026769	0.034175	0.031457	0.044286	0.016085	0.024641	0.016182	0.012108	0.014748	0.012616
7	0.027299	0.041967	0.020973	0.021686	0.026403	0.034279	0.031555	0.044343	0.016395	0.024452	0.015932	0.013709	0.015990	0.014186
8	0.026116	0.040296	0.019148	0.021423	0.025110	0.032936	0.030738	0.043423	0.016254	0.023972	0.015589	0.014296	0.016491	0.014993
9	0.024981	0.038674	0.016863	0.020371	0.023311	0.030854	0.029373	0.041915	0.015821	0.023339	0.015222	0.014147	0.016440	0.015192
10	0.023894	0.037114	0.014533	0.018850	0.021283	0.028463	0.027706	0.040076	0.015209	0.022635	0.014852	0.013539	0.016011	0.014972
11	0.022854	0.035616	0.012359	0.017095	0.019201	0.026010	0.025898	0.038072	0.014494	0.021902	0.014487	0.012683	0.015339	0.014492
12	0.021859	0.034178	0.010424	0.015267	0.017171	0.023627	0.024053	0.036009	0.013728	0.021166	0.014131	0.011718	0.014524	0.013864
13	0.020908	0.032798	0.008747	0.013471	0.015256	0.021382	0.022237	0.033954	0.012946	0.020438	0.013783	0.010731	0.013638	0.013164
14	0.019998	0.031473	0.007316	0.011773	0.013488	0.019303	0.020490	0.031949	0.012170	0.019727	0.013443	0.009771	0.012728	0.012439
15	0.019128	0.030202	0.006106	0.010209	0.011880	0.017400	0.018835	0.030017	0.011415	0.019036	0.013112	0.008864	0.011825	0.011717
16	0.018296	0.028983	0.005090	0.008797	0.010434	0.015669	0.017282	0.028174	0.010688	0.018366	0.012789	0.008023	0.010950	0.011014
17	0.017499	0.027812	0.004240	0.007539	0.009143	0.014101	0.015836	0.026424	0.009996	0.017718	0.012474	0.007250	0.010114	0.010339
18	0.016738	0.026689	0.003529	0.006432	0.007998	0.012685	0.014497	0.024770	0.009340	0.017092	0.012166	0.006545	0.009326	0.009696
19	0.016009	0.025612	0.002937	0.005467	0.006987	0.011408	0.013262	0.023211	0.008721	0.016488	0.011866	0.005905	0.008587	0.009089
20	0.015313	0.024577	0.002444	0.004631	0.006097	0.010258	0.012126	0.021744	0.008139	0.015905	0.011574	0.005325	0.007899	0.008516
21	0.014646	0.023585	0.002033	0.003912	0.005316	0.009222	0.011083	0.020367	0.007594	0.015342	0.011289	0.004802	0.007260	0.007977
22	0.014009	0.022633	0.001691	0.003296	0.004633	0.008291	0.010126	0.019075	0.007083	0.014799	0.011011	0.004328	0.006669	0.007471
23	0.013399	0.021719	0.001407	0.002772	0.004035	0.007453	0.009250	0.017863	0.006605	0.014276	0.010739	0.003901	0.006123	0.006996
ΣY_p	0.507099	0.781250	0.208549	0.261987	0.333000	0.452284	0.470808	0.733676	0.270783	0.462749	0.318370	0.196694	0.260012	0.251638
U	0.507099	0.781250	0.208551	0.261986	0.333000	0.452284	0.470810	0.733676	0.270783	0.462749	0.318370	0.196696	0.260010	0.251636
e	0.000000	0.000000	0.000959	0.000382	0.000000	0.000000	0.000425	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.001017	0.000769	0.000795

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$

ตารางที่ ง.2 ค่า Cross Periodic Response Factors ($W/m^2 K$) สำหรับหลังคาของ ASHRAE ชนิดที่ 29-42 โดยวิธี FDR Method (ต่อ)

Yp(j)	ชนิดหลังคาของ ASHRAE													
	Roof 29	Roof 30	Roof 31	Roof 32	Roof 33	Roof 34	Roof 35	Roof 36	Roof 37	Roof 38	Roof 39	Roof 40	Roof 41	Roof 42
0	0.008473	0.011071	0.010100	0.023924	0.010767	0.015560	0.007070	0.010282	0.007751	0.007100	0.026209	0.012220	0.018154	0.010381
1	0.008022	0.010569	0.009670	0.022961	0.010418	0.015178	0.006511	0.009687	0.007432	0.006866	0.025422	0.011878	0.017754	0.010204
2	0.008670	0.010269	0.009436	0.023392	0.010391	0.015106	0.006101	0.009211	0.007133	0.006643	0.025056	0.011648	0.017470	0.010030
3	0.010854	0.010996	0.010091	0.026047	0.011164	0.015834	0.006376	0.009341	0.006974	0.006483	0.025925	0.011863	0.017666	0.009925
4	0.013206	0.013039	0.011749	0.029303	0.012323	0.016993	0.007621	0.010373	0.007223	0.006561	0.027715	0.012504	0.018346	0.009993
5	0.015023	0.015460	0.013638	0.032083	0.013358	0.018070	0.009376	0.011896	0.007944	0.006989	0.029620	0.013246	0.019172	0.010226
6	0.016251	0.017444	0.015173	0.034169	0.014133	0.018899	0.011105	0.013415	0.008909	0.007653	0.031240	0.013901	0.019928	0.010533
7	0.016986	0.018739	0.016192	0.035611	0.014661	0.019478	0.012527	0.014679	0.009856	0.008355	0.032478	0.014420	0.020540	0.010836
8	0.017331	0.019405	0.016743	0.036504	0.014984	0.019842	0.013553	0.015618	0.010626	0.008950	0.033350	0.014804	0.021000	0.011097
9	0.017373	0.019592	0.016931	0.036944	0.015141	0.020032	0.014196	0.016245	0.011165	0.009379	0.033902	0.015066	0.021320	0.011304
10	0.017184	0.019441	0.016857	0.037014	0.015166	0.020082	0.014505	0.016600	0.011478	0.009638	0.034184	0.015223	0.021519	0.011456
11	0.016822	0.019066	0.016601	0.036784	0.015086	0.020021	0.014539	0.016725	0.011599	0.009750	0.034239	0.015289	0.021613	0.011558
12	0.016332	0.018546	0.016221	0.036313	0.014924	0.019871	0.014355	0.016663	0.011566	0.009747	0.034108	0.015279	0.021617	0.011615
13	0.015751	0.017940	0.015762	0.035650	0.014698	0.019653	0.014003	0.016449	0.011418	0.009656	0.033823	0.015203	0.021545	0.011632
14	0.015108	0.017285	0.015253	0.034839	0.014422	0.019381	0.013526	0.016115	0.011187	0.009504	0.033411	0.015072	0.021407	0.011616
15	0.014426	0.016607	0.014716	0.033914	0.014110	0.019067	0.012959	0.015686	0.010899	0.009310	0.032898	0.014895	0.021215	0.011571
16	0.013723	0.015925	0.014167	0.032903	0.013771	0.018723	0.012330	0.015185	0.010573	0.009087	0.032303	0.014679	0.020976	0.011500
17	0.013012	0.015249	0.013616	0.031832	0.013412	0.018355	0.011664	0.014631	0.010224	0.008846	0.031644	0.014432	0.020700	0.011407
18	0.012306	0.014587	0.013071	0.030719	0.013041	0.017971	0.010978	0.014038	0.009864	0.008596	0.030936	0.014159	0.020392	0.011297
19	0.011611	0.013944	0.012536	0.029583	0.012662	0.017577	0.010287	0.013422	0.009498	0.008341	0.030189	0.013865	0.020058	0.011170
20	0.010934	0.013322	0.012016	0.028435	0.012279	0.017175	0.009602	0.012791	0.009134	0.008086	0.029416	0.013555	0.019703	0.011031
21	0.010279	0.012724	0.011511	0.027287	0.011896	0.016770	0.008933	0.012155	0.008776	0.007832	0.028625	0.013232	0.019332	0.010880
22	0.009649	0.012149	0.011023	0.026148	0.011515	0.016365	0.008285	0.011521	0.008425	0.007583	0.027822	0.012900	0.018948	0.010721
23	0.009047	0.011598	0.010552	0.025025	0.011138	0.015961	0.007663	0.010896	0.008083	0.007338	0.027015	0.012562	0.018554	0.010554
ΣY_p	0.318373	0.364967	0.323625	0.747384	0.315460	0.431964	0.258065	0.323624	0.227737	0.198293	0.731530	0.331895	0.478929	0.262537
U	0.318370	0.364964	0.323625	0.747384	0.315457	0.431965	0.258065	0.323625	0.227739	0.198295	0.731529	0.331895	0.478927	0.262536
e	0.000942	0.000822	0.000000	0.000000	0.000951	0.000232	0.000000	0.000309	0.000878	0.001009	0.000137	0.000000	0.000418	0.000381

$$e = \left| \frac{(\Sigma Y_p - U)}{U} \right| \times 100\%$$

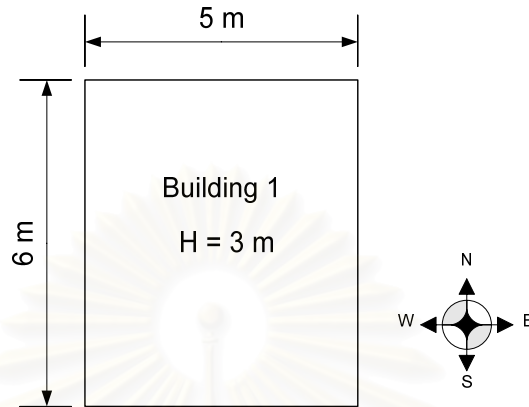


ภาคผนวก จ

กรณีศึกษาการคำนวณค่าภาระการทำความเย็น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรณีศึกษาที่ 1



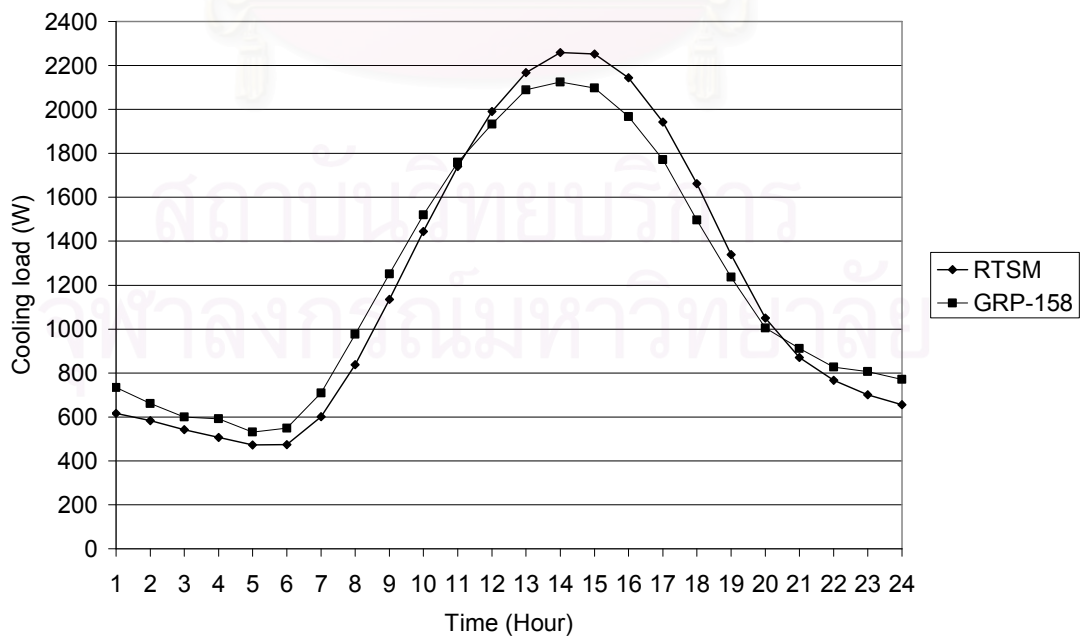
รูปที่ ๑.1 แสดงภาพอาคารสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ชื่อ : Building 1

ผนัง : กลุ่ม A ทั้ง 4 ด้าน

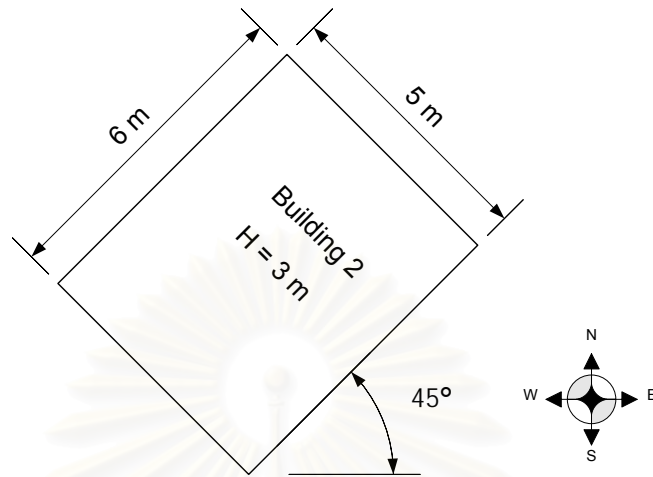
หลังคา : ชนิดที่ 1 ไม่มีฝ้าเพดาน

ที่ตั้ง : ละติจูด 40 องศาเหนือ ลองจิจูด 90 องศา



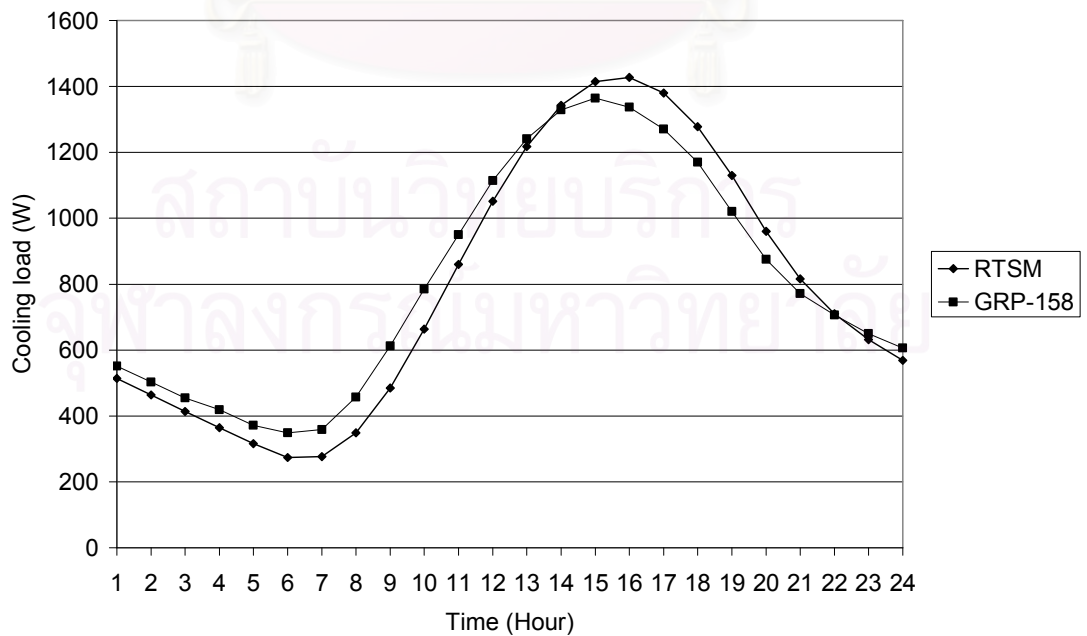
รูปที่ ๑.2 ภาระการทำความเย็นจากผนังและหลังคาของอาคารที่ 1

กรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ ๑.3 แสดงภาพอาคารสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

- ชื่อ : Building 2
 ผนัง : กลุ่ม B ทั้ง 4 ด้าน
 หลังคา : ชนิดที่ 1 มีฝ้าเพดาน
 ที่ตั้ง : ละติจูด 40 องศาเหนือ ลองจิจูด 90 องศา



รูปที่ ๑.4 ภาระการทำความเย็นจากผนังและหลังคาของอาคารที่ 2

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกฤษณะ มานิตย์ เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ เมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2521 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย