

การพัฒนาแบบจำลองของการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่



นางสาวน้ำเพชร ทรงศิริทัตต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR HEAT TRANSMISSION THROUGH
A GLASS WINDOW WITH A VENETIAN BLIND INSTALLED

Miss Numphet Songsirithat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองของการส่งผ่านความร้อนผ่าน หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่
โดย	นางสาวน้ำเพชร ทรงศิริทัตต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. นพรัตน์ คำพร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. นพรัตน์ คำพร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. เวชพฤติ)

น้ำเพชร ทรงศิริทัตต์ : การพัฒนาแบบจำลองของการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก
ที่ติดตั้งมู่ลี่ (DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR HEAT
TRANSMISSION THROUGH A GLASS WINDOW WITH A VENETIAN BLIND
INSTALLED) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. นพรัตน์ คำพร, 216 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนาย
การส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และตรวจสอบผลเฉลยของ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง การประเมินการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่
ติดตั้งมู่ลี่จะพิจารณาค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ เพื่อหาค่าคุณสมบัติทาง
optic ของระบบรวมทั้งส่วนของรังสีคลื่นสั้น และคลื่นยาว รวมทั้งพิจารณาการนำความร้อน การพา
ความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
ความร้อนรวม และค่า SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) การพัฒนาแบบจำลองจะพัฒนาการ
หาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น การหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และการหาค่า
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การตรวจสอบความแม่นยำของผล
เฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเปรียบเทียบกับผลเฉลยของการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบ
6 กรณี คือใช้หน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และสีฟ้า ปรับมุมบิดเป็น -45 0 และ 45 องศา
พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามีความแม่นยำในการทำนายค่า SHGC ในส่วนของรังสี
คลื่นสั้น แต่ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และค่า
SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมจากการทดลองมีค่ามาก จึงตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกวิธีหนึ่ง คือเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จาก
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา กับผลการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. และ
ผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาให้ผล
เฉลยที่แม่นยำขึ้น และพบว่า การติดตั้งมู่ลี่ด้านหลังหน้าต่างกระจกช่วยลดการส่งผ่านความร้อนผ่าน
หน้าต่างกระจกเข้าสู่อาคารได้ การปรับบิดของมู่ลี่เป็นมุม 45 องศา จะช่วยลดการส่งผ่านความร้อน
ได้มากที่สุด และค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่จะมีผลต่อการส่งผ่านความร้อน
ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5770209421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HEAT TRANSMISSION / GLASS WINDOW / VENETIAN BLIND / MATHEMATICAL MODEL

NUMPHET SONGSIRITHAT: DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR HEAT TRANSMISSION THROUGH A GLASS WINDOW WITH A VENETIAN BLIND INSTALLED.
 ADVISOR: PROF. SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D., CO-ADVISOR: NOPPARAT KHAMORN, Ph.D., 216 pp.

This thesis is to study and develop a mathematical model to predict heat transmission through a glass window with a curved venetian blind installed. A glass window is considered as a specular optical element. The venetian blind is considered as a non-specular element and treated as an effective layer. The predicted results from the mathematical model are the overall heat transfer coefficient and the SHGC (Solar Heat Gain Coefficient). The study emphasizes on developing more accurate models for the ground reflectivity, the thermal conductivity of the venetian blind, and the convective heat transfer coefficient used in various points in the fenestration. The predicted results from the developed mathematical model are compared with the experiment to verify the accuracy of the mathematical model. The fenestration system chosen for the study are the 6 mm clear glass window and two different color blinds; blue and cream blinds with three different slat angles; -45, 0, and 45 degrees. It is found that the agreement of the Shortwave SHGC between predicted results and the experimental results is good. But the experimental uncertainties of the fenestration heat gain and the SHGC are large values. The predicted results from the developed mathematical model are also compared with the experiment conducted by Collins, M.R. and Harrison, S.J. and the traditional mathematical model. It is found that the developed mathematical model gives more accurate predicted results than the traditional mathematical model. It is also found that installing a venetian blind to the glass window can reduce heat transmission. The values of the overall heat transfer coefficient and the SHGC depend on the slat angle, solar profile angle and optical properties of a blind slat.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่องการพัฒนาแบบจำลองของการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือของ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และให้เวลาอย่างมากในการให้คำปรึกษาการทำวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.นพรัตน์ คำพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำในการเขียนโปรแกรม และการทดลอง ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง กรรมการ และศาสตราจารย์ชานทวี เวชพฤติ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่างๆ มาปรับปรุงแก้ไขในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อประยงค์ ทรงศิริทัตต์ และคุณแม่ชุติมา พันธุ์เงิน ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ และคอยเป็นกำลังใจเสมอมา รวมทั้งขอขอบคุณ นางสาวนภารัตน์ พานิชชีวะกุล ที่เป็นที่ปรึกษาและช่วยเหลือตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การคำนวณหาการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจก.....	4
2.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่.....	10
2.2.1 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว.....	10
2.2.2 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	11
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่.....	15
3.1.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่.....	16
3.1.1.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient ในส่วนของรังสี แสงอาทิตย์แบบตรง.....	17

3.1.1.2 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient ในส่วนของรังสี แสงอาทิตย์แบบกระจาย.....	18
3.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่.....	19
3.1.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว	23
3.1.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน.....	24
3.1.2.2.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก	25
3.1.2.2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก	25
3.1.2.2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่.....	27
3.1.2.2.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร.....	27
3.1.3 การวิเคราะห์หลักสมมูลของพลังงานเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน รวม.....	27
3.1.3.1 ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ในสมมูลความร้อน	28
3.1.3.2 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิว.....	29
3.1.3.3 ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่.....	31
3.1.3.4 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ.....	31
3.2 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก	36
3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass).....	36
3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass).....	38
3.3 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่.....	39
3.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่	39
3.3.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่.....	40
3.3.1.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรง.....	40
3.3.1.1.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบกระจาย	51
3.3.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นยาวของมู่ลี่.....	54

บทที่ 4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	59
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน	59
4.1.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้น	60
4.2 การพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมูลี่	64
4.3 การพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่	66
4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่	67
4.3.1.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก	67
4.3.1.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมูลี่	68
4.3.1.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมูลี่เข้าสู่อาคาร	69
4.3.1.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร	71
4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่	71
4.3.3 สมการอนุพันธ์ในการหาค่าความร้อนคงเหลือ	73
บทที่ 5 การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยทางคณิตศาสตร์	76
5.1 การทดลอง	76
5.1.1 ห้องทดลอง	76
5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	77
5.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์	81
5.3 การเปรียบเทียบผลเฉลยทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง	85
5.4 ค่าความคลาดเคลื่อน	88
5.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง	88
5.4.1.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด	88
5.4.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง	90
5.4.2 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน	91

5.4.2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง.....	91
5.4.2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	92
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผล.....	94
6.1 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง	94
6.1.1 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมที่ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา	95
6.1.2 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมซึ่งปรับมุมบิดเป็น 0 องศา	101
6.1.3 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมซึ่งปรับมุมบิดเป็น 45 องศา....	107
6.1.4 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น -45 องศา.....	112
6.1.5 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น 0 องศา	117
6.1.6 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น 45 องศา.....	122
6.2 การเปรียบเทียบค่า Solar Heat Gain Coefficient ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Collins, MR. และ Harrison, S.J.....	129
6.2.1 การทดลอง	129
6.2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	130
6.2.3 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่า SHGC ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J.	131
บทที่ 7 Parametric study	134
7.1 การศึกษาผลของมุมบิดของมู่ลี่.....	134
7.2 การศึกษาผลของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก	140
7.3 การศึกษาผลของค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของมู่ลี่	144
7.4 การศึกษาผลของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่.....	146
บทที่ 8 สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ	156
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	156

8.2 ข้อเสนอแนะ	158
รายการอ้างอิง	160
ภาคผนวก ก การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน	165
ภาคผนวก ข การหาค่าดัชนีที่ใช้วิเคราะห์จากการทดลอง	183
ภาคผนวก ค โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้หาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	212
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	216



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ค่า angular-weighting function 19

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ 26

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของกระจกชนิดเคลือบ 39

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น 63

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลอง MoWiTT 68

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกที่ศึกษา 82

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมู่ลี่ที่ศึกษา..... 82

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลขาเข้าที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 83

ตารางที่ 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ 89

ตารางที่ 6.1 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกที่ศึกษา 130

ตารางที่ 6.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมู่ลี่ที่ศึกษา..... 130

ตารางที่ 6.3 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและแบบกระจายที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 131

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่า SHGC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง..... 132

ตารางที่ 7.1 ค่าคุณสมบัติ optic ของหน้าต่างกระจกใส 135

ตารางที่ 7.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมู่ลี่ที่ศึกษาผลของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก..... 135

ตารางที่ 7.3 ค่าคุณสมบัติ optic ของหน้าต่างกระจกใส หน้าต่างกระจกสีชา หน้าต่างกระจกใสสองชั้น และ หน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น..... 141

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth.....	6
รูปที่ 2.2 แบบจำลองของมูลิ์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมูลิ์	7
รูปที่ 2.3 การไหลของอากาศผ่านช่องหน้าต่างกระจกและอุปกรณ์บังเงา	8
รูปที่ 2.4 แบบจำลองของมูลิ์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมูลิ์ของ EnergyPlus	10
รูปที่ 2.5 (ก) ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ์เป็นอุปกรณ์บังเงาภายในที่ประกอบด้วย หน้าต่างกระจกสองชั้น และมูลิ์ (ข) โครงข่ายความต้านทานความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ์ที่พิจารณาส่วนของการพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคาร	12
รูปที่ 3.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth ที่อยู่ในระนาบหน้าต่างกระจก	18
รูปที่ 3.2 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมูลิ์ภายใน.....	20
รูปที่ 3.3 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมูลิ์ภายใน	20
รูปที่ 3.4 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ์ที่ประกอบไปด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมูลิ์ภายใน	23
รูปที่ 3.5 การกระจายตัวอุณหภูมิของกระจก และมูลิ์.....	28
รูปที่ 3.6 รูปร่างของใบมูลิ์แบบใบตรงและใบโค้งและมุมที่เกี่ยวข้อง	41
รูปที่ 3.7 ผลของความโค้งของใบมูลิ์ที่มีต่อการบังแสงอาทิตย์ในมุมเฉพาะบางตำแหน่ง.....	42
รูปที่ 3.8 รังสีตกกระทบบนใบมูลิ์และมุมที่เกี่ยวข้อง.....	44
รูปที่ 3.9 ลักษณะของใบมูลิ์โค้งที่มีความหนาในตำแหน่งมุมบิดต่างๆ	44
รูปที่ 3.10 ส่วนรอบล้อมปิด 6 ผิวที่ประกอบจากใบมูลิ์โค้ง 2 ใบที่อยู่ชิดกัน	46
รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของส่วนย่อยของรังสีแบบกระจายที่ตกกระทบบนมูลิ์.....	52
รูปที่ 3.12 ส่วนล้อมรอบปิด 6 พื้นผิวที่ประกอบขึ้นจากใบมูลิ์ 2 ใบที่อยู่ชิดกัน.....	54
รูปที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของใบมูลิ์โค้ง	55

รูปที่ 3.14 มวลี่พร้อมทั้งค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิว.....	57
รูปที่ 4.1 ปริมาตรควบคุมย่อยของชั้นมวลี่และการนิยามตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อหาสภาพนำความร้อนประสิทธิผลของมวลี่	66
รูปที่ 4.2 โครงถ่ายความต้านทานความร้อนที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคารที่เสนอโดย Wright, J.L.	69
รูปที่ 4.3 โครงถ่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมวลี่ภายในแบบใหม่.....	71
รูปที่ 4.4 โครงถ่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมวลี่ภายในแบบใหม่.....	72
รูปที่ 5.1 ลักษณะของห้องทดลอง (ก) ขนาดของห้องทดลอง (ข) ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิของผนัง เพดาน และพื้นภายในห้องทดลอง	77
รูปที่ 5.2 เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ก) ติดตั้งภายนอกเพื่อวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์รวม และ (ข) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์บังเงาเพื่อวัดแสงอาทิตย์แบบกระจาย	78
รูปที่ 5.3 เทอร์โมคัปเปิลชนิด J	78
รูปที่ 5.4 ระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย (ก) เครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (ข) เครื่องสูบน้ำ (ค) คอยล์เย็น และ (ง) มิเตอร์วัดค่าอัตราการไหลของน้ำ	80
รูปที่ 5.5 แผนผังของระบบท่อน้ำของระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในการทดลอง	81
รูปที่ 5.6 มุมบิตของมวลี่ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ (ก) มุม -45 องศา (ข) มุม 0 องศา และ (ค) มุม 45 องศา.....	83
รูปที่ 6.1 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมวลี่สีครีม ที่มุมบิต -45 องศา	96
รูปที่ 6.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมวลี่สีครีม ที่มุมบิต -45 องศา.....	97

รูปที่ 6.15 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา.....	115
รูปที่ 6.16 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา.....	116
รูปที่ 6.17 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา.....	118
รูปที่ 6.18 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา	119
รูปที่ 6.19 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา	120
รูปที่ 6.20 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา	121
รูปที่ 6.21 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา.....	123
รูปที่ 6.22 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา	124
รูปที่ 6.23 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา.....	125
รูปที่ 6.24 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา	126
รูปที่ 6.25 (ก) ห้องทดลองสำหรับวัดปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ และ (ข) ภาพตัดขวางของห้องทดลอง	129
รูปที่ 7.1 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 0 และ 45 องศา.....	136

รูปที่ 7.2 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 องศา	137
รูปที่ 7.3 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม 0 องศา.....	138
รูปที่ 7.4 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม 45 องศา	139
รูปที่ 7.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกใสตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่ เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 0 และ 45 องศา.....	140
รูปที่ 7.6 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบต่างๆ	142
รูปที่ 7.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบต่างๆ.....	143
รูปที่ 7.8 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเป็น 0.4 0.6 และ 0.8	145
รูปที่ 7.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเป็น 0.4 0.6 และ 0.8.....	146
รูปที่ 7.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 0 และ 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ.....	147
รูปที่ 7.11 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ	149
รูปที่ 7.12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 0 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ	149

รูปที่ 7.13 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ 150

รูปที่ 7.14 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 0 และ 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... 152

รูปที่ 7.15 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ 153

รูปที่ 7.16 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 0 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ..... 153

รูปที่ 7.17 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ 154



คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ

A_i	คือ พื้นที่ของพื้นผิว i , m^2
A_j	คือ พื้นที่ของพื้นผิว j , m^2
A_L	คือ พื้นที่เสมือนของอากาศรั่ว, cm^2
A_i^f	คือ ค่า directional front absorptance ของชั้นที่ i
$A_{d,ref}^H$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน
$A_{d,sky}^H$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า
A_i^H	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere
$A_{i,ref}^H$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดินของชั้นที่ i
A_i^{sol}	คือ ค่า absorptance ของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i
b	คือ ระยะห่างระหว่างผิวกระจกกับชั้นเสมือนของมู่ลี่, m
bf	คือ ค่า correction factor ของสันของใบมู่ลี่
C_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $J/(kg \cdot K)$
C_s	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ stack (stack coefficient), $(L/s)^2 / (cm^4 \cdot K)$
C_w	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลม (wind coefficient), $(L/s)^2 / (cm^4 \cdot (m/s)^2)$
$c_{p,w}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, $J/(kg \cdot K)$
c_t	คือ ค่าคงที่การพาความร้อนแบบธรรมชาติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent natural convection constant)
d	คือ ความหนาของกระจก, mm
d_i	คือ ความหนาของชั้น i , m
F_{ij}	คือ ค่า view factor ถูกนิยามเป็นสัดส่วนของรังสีที่ออกจากผิว i ที่ไปตกกระทบบน
ผิว j	
f_{gvd}	คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น
f_{sky}	คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า

f_{td}	คือ ค่าแฟกเตอร์ time-delay effect
g	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
G_b	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหลังของส่วนล้อมรอบปิด,
W/m^2	
G_f	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด,
W/m^2	
G_i	คือ ค่า irradiation บนผิว i , W/m^2
G_1	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1),
W/m^2	
G_2	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2),
W/m^2	
Gr	คือ Grashof number
H	คือ ความสูงของชั้นหน้าต่างกระจก, m
h	คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่สองใบที่อยู่ติดกัน, m
h_c	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{c,across}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{c,gapb}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{c,in}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารที่รวมผลของการปรับมุมบิดของมู่ลี่, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{c,out}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{r,across}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ตำแหน่งระหว่างผิวด้านต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$
$h_{r,j-k}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิว j และ k , $W/(m^2 \cdot K)$
h_t	คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีในส่วนของรังสีตรงซึ่งมีส่วนที่รังสีทะลุออกจากมู่ลี่โดยไม่กระทบใบมู่ลี่, m
I	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

I_D	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2
I_{DN}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2
$I_{D,r}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดินแล้ว ตกกระทบเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์, W/m^2
I_d	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2
$I_{d,hor}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, W/m^2
$I_{d,grd}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น, W/m^2
$I_{d,sky}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า, W/m^2
$I_{glo,hor}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมทั้งวัดในระนาบแนวนอน, W/m^2
$I_{glo,hor,grd}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมทั้งเป็นผลของการสะท้อนพื้นที่วัดในแนวระนาบแนวนอน, W/m^2
$I_{glo,ver}$	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมทั้งวัดในระนาบแนวตั้ง, W/m^2
I_{gnd}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน, W/m^2
I_{sky}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า, W/m^2
I_{r1}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1, W/m^2
I_{r2}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 2, W/m^2
J_j	คือ ค่า radiosity จากผิว j , W/m^2
k_{air}	คือ สภาพนำความร้อนของอากาศระหว่างใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$
k_b	คือ สภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$
k_{eff}	คือ สภาพนำความร้อนประสิทธิผลของใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$

k_i	คือ สภานำความร้อนของชั้นที่ i , $W/(m \cdot K)$
L_i	คือ ความยาวที่วัดตามผิวโค้ง i , m
L_p	คือ ค่าความกว้างของปริมาตรควบคุมย่อยของชั้นมู่ลี่ที่พิจารณา, m
L_s	คือ ค่าความยาวที่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่, m
l_1	คือ ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว ab , m
l_2	คือ ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว bc , m
M	คือ จำนวนของชั้นของระบบหน้าต่างกระจก/ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา
m	คือ จำนวนมุมตกกระทบที่พิจารณาในช่วง $0^\circ < \theta < 90^\circ$
\dot{m}_w	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น, kg/s
Nu	คือ Nusselt number
N_i	คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจก
n	คือ จำนวนมุม azimuth ที่พิจารณา
n	คือ จำนวนชั้นของระบบหน้าต่างกระจก
P_{273}	คือ ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อุณหภูมิ 273 K
Pr	คือ Prandtl number
Q	คือ อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s
$Q_{abs,i}$	คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่ i , W/m^2
$Q_{across,i}$	คือ ค่าการถ่ายเทความร้อน (heat flux) ที่ถูกส่งผ่านจากชั้น i ข้ามชั้นมู่ลี่ที่เป็นชั้น diathermanous layer สู่จุด $i+2$, W/m^2
Q_i	คือ ค่า flux ของความร้อนจากพื้นผิว i , W/m^2
q	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2
q_{ct}	คือ ภาระการทำความเย็น, W
q_{exp}	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลอง, W
q_i	คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนของพื้นผิว i ใดๆ, W

$q_{inf,i}$	คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม, W
$q_{i,actual}$	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศสามารถกำจัดได้จริงที่ชั่วโมงที่ i , W/m^2
$q_{i,cat}$	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ชั่วโมงที่ i , W/m^2
$q_{i,d}$	คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำ ความร้อนของพื้นผิว i ใดๆที่รวมผลของ time delay, W
q_l	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น, W
q_r	คือ ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง, W
R_c	คือ รัศมีความโค้งของใบมู่ลี่, m
R_i	คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของ ชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน, $(m^2 \cdot K) / W$
R_λ	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
Ra	คือ Rayleigh number
Ra_{cv}	คือ Rayleigh number ที่เป็นผลจากมุมเอียงของมู่ลี่
Ra_H	คือ Rayleigh number ที่ขึ้นกับความสูงของมู่ลี่
s	คือ ค่าความกว้างของใบมู่ลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ, m
sw	คือ ความยาวของใบมู่ลี่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่, m
$SHGC$	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของระบบหน้าต่างกระจก/หน้าต่างกระจก ที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา
$SHGC_{cat}$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์
$SHGC_D$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่
$SHGC_{D,r}$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน
$SHGC_d$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง มู่ลี่
$SHGC_{d,ref}$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$SHGC_{d,sky}$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า
$SHGC_{exp}$	คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลอง
T	คือ อุณหภูมิของมวล, K
$T_{b,n}$	คือ อุณหภูมิผิวของมวลที่ด้านใน, K
T_i	คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของระบบกระจกที่ชั้นที่ i , $^{\circ}C$
T_{in}	คือ อุณหภูมิอากาศภายใน, K
T_k	คือ อุณหภูมิผิวใหม่ของชั้นหน้าต่างกระจกหรือชั้นมวลที่ k , $^{\circ}C$
$T_{m,f}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์มอากาศ, K
T_{out}	คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก, K
T_{si}	คือ อุณหภูมิผิวภายในผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา, $^{\circ}C$
T_{sj}	คือ อุณหภูมิของผิว j , K
T_{sk}	คือ อุณหภูมิของผิว k , K
T_{so}	คือ อุณหภูมิผิวภายนอกผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา, $^{\circ}C$
$T_{water,in}$	คือ อุณหภูมิน้ำยาเย็นเข้าจากเครื่องปรับอากาศ, $^{\circ}C$
$T_{water,out}$	คือ อุณหภูมิน้ำยาเย็นขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, $^{\circ}C$
T_{λ}	คือ การส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
T^{FH}	คือ ค่า front directional-hemispherical transmittance ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา/มวล
T_{cal}^{FH}	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
T_D^{FH}	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง
$T_{D,r}^{FH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน
$T_{d,ref}^{FH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน
$T_{d,sky}^{FH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า
T_{exp}^{FH}	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากการทดลอง
T_k^0	คือ อุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นหน้าต่างกระจกหรือชั้นมวลที่ k , $^{\circ}C$

$T_{1,N}^{sol}$	คือ ค่า total solar transmittance ของระบบหน้าต่างกระจก
t_b	คือ ความหนาของใบมู่ลี่, m
t_c	คือ ระยะบังเพิ่มเติมจากผลของความโค้งของใบมู่ลี่, m
t_s	คือ ความหนาของใบมู่ลี่, m
U	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/(m^2 \cdot K)$
US_{ij}	คือ ผลรวมของค่าที่ไม่เส้นไขว้ (uncrossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j , m
u_i	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณ i ใดๆ
V	คือ ความเร็วลมภายนอก, m/s
\dot{V}	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, m^3/s
v	คือ ความเร็วของกระแสลมอิสระวัดที่ความสูง 10 เมตร, m/s
v_c	คือ ความยาวของส่วนที่รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงบนใบมู่ลี่, m
W	คือ ความกว้างของหน้าต่างกระจก, m
w	คือ ระยะที่บังรังสีจากใบมู่ลี่ชนิดใบตรง, m
w_c	คือ ระยะการบังรังสีของใบมู่ลี่โค้งในกรณีที่มีบางส่วนของรังสีทะลุลอดมู่ลี่ออกไปโดยไม่กระทบกับใบมู่ลี่, m
w_r	คือ ระยะบังรังสีของใบมู่ลี่ที่รวมผลของความหนาของใบมู่ลี่เข้าไว้, m
XS_{ij}	คือ ผลรวมของค่าเส้นไขว้ (crossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j , m
ΣJ_{sk}^j	คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว j (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบหน้าต่างกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว k , W/m^2
ΣJ_{sj}^k	คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว k (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบหน้าต่างกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว j , W/m^2
δT_k	คือ ค่าผลต่างอุณหภูมิรวม, $^{\circ}C$
$\frac{dP}{dT_{ave}}$	คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ
$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายของชั้นเสมือน
$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบตรง

$\alpha_{bl-ct, gnd-dif, dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมูลี่ไบโโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มา
จากพื้นดิน	
$\alpha_{bl-ct, sky-dif, dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมูลี่ไบโโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มา
จากท้องฟ้า	
α_{L-bl}^b	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
α_{L-bl}^f	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
β	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ, $1/K$
ϵ_{L-bl}^b	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
ϵ_{L-bl}^f	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
μ	คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/(m \cdot s)$
ω	คือ ค่าความพรุน (porosity) ของชั้นมูลี่
ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3
ρ_g	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน
ρ_{water}	คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m^3
ρ_λ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความยาวคลื่น λ
$\rho_{dif, dif}^b$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของไบมูลี่ที่ด้านหลังไบ
$\rho_{dif, dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของไบมูลี่ที่ด้านหน้าไบ
$\rho_{bl-c, dir, dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายของชั้นเสมือน
$\rho_{bl-ct, dir, dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมูลี่ไบโโค้งที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบตรง
$\rho_{bl-ct, gnd-dif, dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมูลี่ไบโโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มา
จากพื้นดิน	
$\rho_{bl-ct, sky-dif, dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมูลี่ไบโโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มา
จากท้องฟ้า	
ρ_{L-bl}^b	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
ρ_{L-bl}^f	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
$\tau_{dif, dif}$	คือ ค่าการส่งผ่านของไบมูลี่
$\tau_{bl-c, dir, dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายของชั้นเสมือน

$\tau_{bl-ct,dir,dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีตกกระทบใบมู่ลี่และสะท้อนไปมา ที่มุม solar profile ϕ_s
$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีทะลุผ่านมู่ลี่โดยไม่ตกกระทบใบมู่ลี่ ที่มุม solar profile ϕ_s
$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีจากรังสีตรงของมู่ลี่แบบใบโค้งที่มีความหนาในส่วนที่ไม่ตกกระทบมู่ลี่
$\tau_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน
$\tau_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า
τ_{L-bl}^b	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
τ_{L-bl}^f	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
τ_λ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มุมตกกระทบ θ
λ	คือ ความยาวคลื่น, nm
ζ	คือ มุมหักเหของแสง, $^\circ$
Δ_i	คือ ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านชั้นที่ i ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่, W/m^2
ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิของผิวกระจก, K
ΔT_{water}	คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นขาเข้าและน้ำขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, $^\circ C$
ΔW	คือ ผลต่างของค่าอัตราส่วนความชื้น (humidity ratio) ระหว่างอากาศภายในและภายนอกห้องทดลอง, kg_w / kg_{da}
θ	คือ มุมตกกระทบ/มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์, $^\circ$
θ_1	คือ มุมที่นิยามตามสมการที่ (3.99), $^\circ$
θ_3	คือ มุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของความโค้งของส่วนที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.102), $^\circ$
ϕ	คือ มุม azimuth, $^\circ$
ϕ_b	คือ มุมบิดของใบมู่ลี่, $^\circ$
ϕ_{cr}	คือ ค่ามุมวิกฤติ, $^\circ$

ϕ_{crit}	คือ ค่ามุมวิกฤติในกรณีของค่าคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาว, °
ϕ_s	คือ มุม solar profile, °
Ω	คือ มุม solar profile, °
φ_s	คือ ค่า openness factor
γ	คือ มุมเอียงของมู่ลี่, °



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อาคารขนาดใหญ่ ทั้งอาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ และอาคารที่อยู่อาศัย ต่างต้องใช้เครื่องปรับอากาศในการให้ความเย็นเพื่อรักษาสภาพให้มีความเหมาะสม ในประเทศไทย อาคารส่วนใหญ่มักติดตั้งหน้าต่างกระจกจำนวนมาก ข้อดีของการติดตั้งหน้าต่างกระจก คือผู้อยู่อาศัยสามารถเห็นทิวทัศน์นอกอาคารได้ และแสงสว่างเข้าสู่อาคารช่วยลดการใช้ไฟฟ้าในอาคาร ทั้งนี้การติดตั้งหน้าต่างกระจกมีข้อเสียเช่นกัน เนื่องจากหน้าต่างกระจกรับแสงอาทิตย์เข้าสู่อาคารโดยตรง แสงอาทิตย์จะให้แสงธรรมชาติ และความร้อน หน้าต่างกระจกจึงเป็นตัวนำความร้อนเข้ามาสู่อาคาร ทำให้ผู้อยู่อาศัยเกิดความไม่สบายเชิงความร้อน และทำให้ใช้พลังงานมากในระบบปรับอากาศและระบายอากาศเพื่อกำจัดความร้อนเหล่านั้น ดังนั้นในการออกแบบอาคารให้มีการอนุรักษ์พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องมีความเข้าใจในเรื่องการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

การส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านหน้าต่างกระจกจะมีกลไกดังนี้ เมื่อรังสีจากแสงอาทิตย์ตกกระทบบนผิวด้านนอกของหน้าต่างกระจก รังสีแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าไปในอาคารได้โดยตรง ส่วนหนึ่งสะท้อนกลับ และส่วนที่เหลือถูกดูดกลืนไว้ในหน้าต่างกระจกทำให้หน้าต่างกระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของหน้าต่างกระจกสูงกว่าอุณหภูมิห้องจะเกิดการคายความร้อนโดยการแผ่รังสีคลื่นยาว และการพาความร้อน ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในแง่การส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกต้องแบ่งการพิจารณาเป็นสองส่วน คือ ส่วนการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ (solar energy) และส่วนของการนำความร้อนและพาความร้อน (thermal energy) ในการหาค่าการส่งผ่านความร้อนในส่วนของการส่งผ่านแสงอาทิตย์นั้น นิยมใช้ค่า SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) เป็นพารามิเตอร์หลักในการคำนวณ โดยที่นิยามของค่า SHGC คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกที่ส่งผ่านเป็นความร้อนเข้าสู่อาคาร และในส่วนของการนำความร้อนและการพาความร้อนจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient, U) เป็นพารามิเตอร์หลักในการคำนวณ

อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการใช้อาคารจริง ผู้อยู่อาศัยมักนิยมติดตั้งอุปกรณ์บังเงา เช่น ม่าน หรือมู่ลี่ไว้หลังหน้าต่างกระจก ทำให้ส่วนกรอบอาคารที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์เข้าสู่

อาคารกลายเป็นหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายในแทนที่จะเป็นหน้าต่างกระจกตัวเปล่า ส่งผลกระทบต่อการส่งผ่านความร้อนทั้งส่วนการส่งความร้อนจากแสงอาทิตย์ และส่วนของการนำความร้อนและการพาความร้อน ทำให้ค่า SHGC และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมเปลี่ยนไปและมีความซับซ้อนมากขึ้น การศึกษาเกี่ยวกับการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จะมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาและวิเคราะห์ผลของคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และพัฒนาให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ศึกษาที่ใช้ทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ มีความแม่นยำขึ้น ความเข้าใจในองค์ความรู้ที่ศึกษานี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อเจ้าของอาคาร สถาปนิกผู้ออกแบบ และวิศวกรระบบในการเลือกหน้าต่างกระจก และอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ เพื่อลดภาระความร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้าสู่ห้องในอาคารที่มีกรอบอาคารเป็นหน้าต่างกระจก ซึ่งภาระดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นภาระการทำความเย็น (cooling load) ดังนั้น เมื่อลดภาระความร้อนได้ จะสามารถลดขนาดเครื่องทำความเย็นลงได้ และส่งผลต่อการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศและระบายอากาศของอาคารได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และตรวจสอบผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลอง

2. ศึกษาผลของคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในส่วนของหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นจากการทดลอง การคำนวณสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จากการศึกษาบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

มาตรฐาน ISO15099 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่แสดงวิธีการหาค่าคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของ หน้าต่างกระจก ประตู และอุปกรณ์บังเงาชนิดต่างๆ และแบบจำลองของ EnergyPlus ซึ่งเป็น โปรแกรมจำลองพลังงานของอาคารที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. ตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยผลการทดลอง

3. ศึกษาผลของการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ มุมบิดของมู่ลี่ ค่าคุณสมบัติทาง optic ของ หน้าต่างกระจก และค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของใบมู่ลี่ที่มีต่อค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์ แบบตรง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่ ติดตั้งมู่ลี่ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบอาคารให้มีการอนุรักษ์พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

2. เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกซื้อหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ เพื่อลดภาระความร้อนที่ถูก ส่งผ่านเข้าสู่ห้องในอาคารที่มีกรอบอาคารเป็นหน้าต่างกระจก ซึ่งภาระดังกล่าวจะถูกเปลี่ยนเป็นภาระ การทำความเย็น ดังนั้น เมื่อลดภาระความร้อนได้ จะสามารถลดขนาดเครื่องทำความเย็นลงได้ และ ส่งผลต่อการประหยัดพลังงานของระบบปรับอากาศและระบายอากาศของอาคารได้

บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของเอกสาร และงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และที่ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ โดยได้แบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

การคำนวณหาการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจก

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

2.1 การคำนวณหาการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจก

งานวิจัยของ Finlayson, E.U. และคณะ

ในปี พ.ศ. 2536 Finlayson, E.U. และคณะ [1] ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการเพื่อหาค่าคุณสมบัติทางความร้อน และทาง optic ที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจก โดยที่ระบบหน้าต่างกระจกในที่วิเคราะห์ จะเป็นหน้าต่างกระจกหนึ่งชั้น หรือมากกว่าหนึ่งชั้น นอกจากนี้ การวิเคราะห์สามารถรวมผลของโครงสร้างหน้าต่างกระจกได้ หลักการคำนวณที่พัฒนานั้น ถูกนำมาสร้างเป็นโปรแกรม WINDOW4.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้กันแพร่หลายในการออกแบบอาคารทางวิศวกรรม และการออกแบบเพื่อผลิตหน้าต่างกระจกในภาคอุตสาหกรรม

การทำนายการส่งผ่านความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกจะใช้ค่า SHGC ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าการส่งผ่านความร้อนของรังสีแสงอาทิตย์รวม (total solar transmittance) ค่า inward-flowing fraction ของการดูดกลืนพลังงานของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจก และค่าการดูดกลืน (absorptance) ของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจก ดังนั้น ในการประเมินค่า SHGC ของระบบหน้าต่างกระจกใด ๆ ต้องประเมินจากสมการ

$$SHGC = T_{1,N}^{sol} + \sum_{i=1}^M N_i A_i^{sol} \quad (2.1)$$

เมื่อ $SHGC$ คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของระบบหน้าต่างกระจก

$T_{1,N}^{sol}$ คือ ค่า total solar transmittance ของระบบหน้าต่างกระจก

A_i^{sol} คือ ค่า absorptance ของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i

N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจก

M คือ จำนวนของชั้นของระบบหน้าต่างกระจก

ในการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกใดๆ ได้แก่ ค่าการส่งผ่าน (transmittance) ค่าการสะท้อน (reflectance) และค่าการดูดกลืน สามารถหาได้จากแบบจำลองของ Furler, R.A. [2] สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบ และแบบจำลองของ Finlayson, E.U. และคณะ [1] สำหรับกระจกชนิดเคลือบ

และค่า inward-flowing fraction ของการดูดกลืนพลังงานของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจกถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของผลรวมของค่าความต้านทานความร้อนของจุดที่ศึกษาต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม ซึ่งจะมีหลักการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนมาเกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Klems, J.H.

ในปี พ.ศ. 2536 Klems, J.H. [3-6] ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการเพื่อทำนายการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีความซับซ้อน (complex fenestration system) หรือหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา เช่น ที่บังแดด มู่ลี่ โดยที่อุปกรณ์บังเงาจะเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทาง optic เป็นแบบ nonspecular (รังสีตกกระทบในทิศทางหนึ่งและสะท้อนออกในทิศทางที่ไม่แน่นอนได้หลายทิศทาง) ต่างจากหน้าต่างกระจกที่มีคุณสมบัติทาง optic เป็นแบบ specular (รังสีตกกระทบในทิศทางหนึ่ง และสะท้อนออกในอีกทิศทางหนึ่งที่แน่นอน) ทำให้การทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงามีความซับซ้อนมากขึ้น

ในการศึกษานี้ Klems, J.H. ใช้เครื่องวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบชนิดกวาดภาพ (scanning radiometer) วัดค่าคุณสมบัติทาง optic ได้แก่ ค่า bi-directional radiative transmittance และ bi-directional radiative reflectance ของชั้นแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างกระจก แล้วนำค่าคุณสมบัติที่ได้มาคำนวณหาค่า directional hemispherical transmittance ของระบบหน้าต่างกระจก และค่า absorptance ของแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างกระจก ค่าที่ได้เหล่านี้จะนำมารวมกับผลของค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น จะได้ค่า SHGC ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เป็นดัชนีในการวัดค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา

นอกจากนั้น ค่า SHGC ขึ้นอยู่กับ มุมตกกระทบของรังสี และลักษณะการเอียงของรังสีที่มาตกกระทบ จึงมีการนิยามมุม azimuth ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้น ในการประเมินค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่มีติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายในใด ๆ ต้องประเมินจากสมการ

$$SHGC(\theta, \phi) = T^{FH}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_i^f(\theta, \phi) \quad (2.2)$$

เมื่อ $SHGC$ คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา
 T^{FH} คือ ค่า front directional-hemispherical transmittance ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา

A_i^f คือ ค่า directional front absorptance ของชั้นที่ i

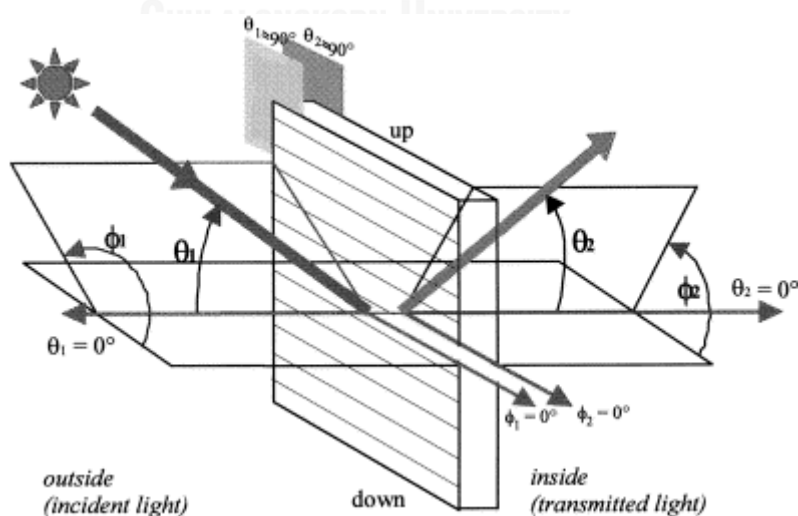
N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น

θ คือ มุมตกกระทบของรังสี

ϕ คือ มุม azimuth

M คือ จำนวนของชั้นของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา

เมื่อมีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาเข้ากับหน้าต่างกระจก ทำให้การคำนวณค่าต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกมีความซับซ้อนขึ้นจากหน้าต่างกระจกตัวเปล่า จากสมการที่ (2.2) Klems, J.H. ได้พิจารณาค่า T^{FH} และ A_i^f เป็นปริมาณทาง optic ที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น และค่าการสะท้อนของรังสี แต่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในขณะที่ ค่า N_i เป็นปริมาณทาง calorimetric ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา อุณหภูมิ รวมทั้งการถ่ายเทความร้อนของระบบ แต่ไม่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทาง optic ในช่วงความยาวคลื่นสั้นของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงา เช่น สี หรือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้น

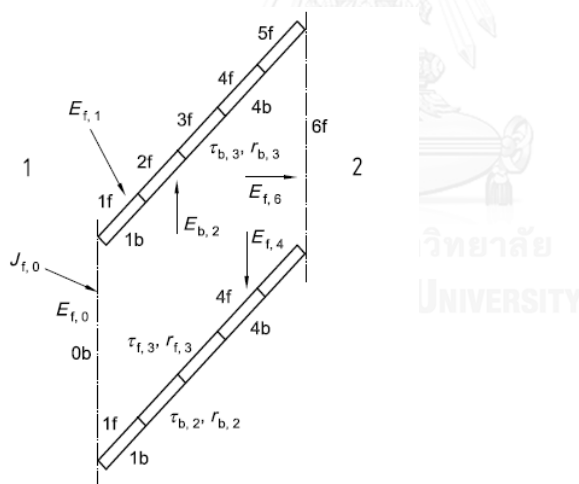


รูปที่ 2.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth

ISO15009

ในปี พ.ศ. 2546 องค์การมาตรฐานสากลได้ออกมาตรฐาน ISO15099 [7] เป็นมาตรฐานที่แสดงวิธีการหาค่าคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจก ประตู และอุปกรณ์บังเงาชนิดต่างๆ

จากมาตรฐาน ISO15099 ค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในเทอมของ SHGC จะแบ่งเป็นสองส่วน คือส่วนของการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ และส่วนของการนำ และพาความร้อน ในส่วนของการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ การหาค่าคุณสมบัติทาง optic ทำได้โดยแบ่งเป็นการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก ซึ่งใช้ตามมาตรฐาน ISO9050 [7] และการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ ซึ่งจะวิเคราะห์แบบจำลองโดยพิจารณาใบมู่ลี่สองใบที่ติดกันเป็นแบบผิวนปิด และแบ่งใบมู่ลี่เป็น 5 ส่วนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 2.2 ทั้งนี้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่มีสมมติฐาน คือ การสะท้อนระหว่างมู่ลี่จะเป็นการสะท้อนแบบไม่มีทิศทาง และไม่คำนึงถึงผลของความโค้งของใบมู่ลี่

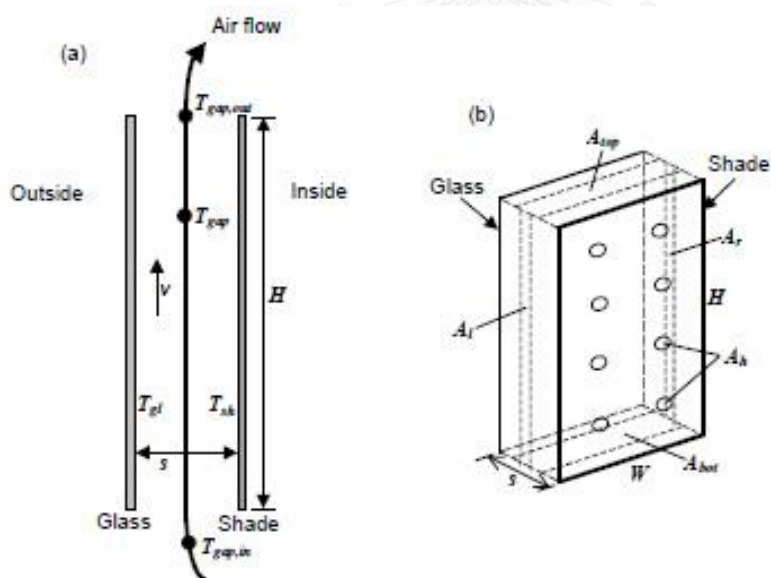


รูปที่ 2.2 แบบจำลองของมู่ลี่ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ [8]

ในส่วนของการนำ และพาความร้อน จะใช้สมดุลพลังงานในการวิเคราะห์ สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ISO15099 ได้จะแบ่งการพิจารณาแยกเป็น 4 ส่วน คือ

- การพาความร้อนภายในอาคาร [9] ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับ Nusselt number สภาพนำความร้อนของอากาศ และความสูงของหน้าต่างกระจก หรืออุปกรณ์บังเงาที่อยู่ด้านในอาคาร

- การพาความร้อนภายนอกอาคาร [10] ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วของลม และทิศทางการพาความร้อนภายนอกอาคาร
- การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก [11] ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะขึ้นอยู่กับ Nusselt number สภาพนำความร้อนของอากาศ และความกว้างระหว่างช่องกระจก
- การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับอุปกรณ์บังเงา [8] เนื่องจากอุปกรณ์บังเงาหลายชนิด เช่น มู่ลี่ อากาศสามารถไหลทะลุผ่านได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับอุปกรณ์บังเงาจึงพิจารณาการไหลของอากาศที่ไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนของช่องระหว่างหน้าต่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงา ดังรูปที่ 2.3 ในขณะที่อากาศไหลผ่านช่องระหว่างหน้าต่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงา จะมีอากาศบางส่วนที่ไหลออกหรือไหลเข้ามาได้ จึงใช้สมดุลความดัน (pressure balance) ของการไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างหน้าต่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงาเพื่อหาค่าความเร็วของอากาศที่ไหลในช่องว่างระหว่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงา



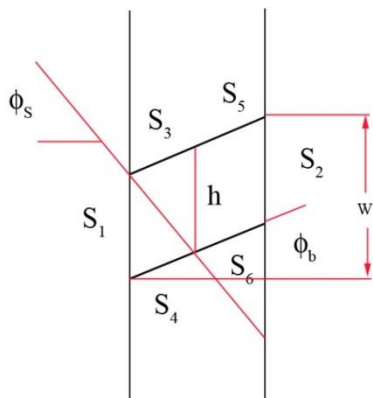
รูปที่ 2.3 การไหลของอากาศผ่านช่องหน้าต่างกระจกและอุปกรณ์บังเงา [8]

งานวิจัยของ EnergyPlus

ในปี พ.ศ. 2548 โปรแกรม EnergyPlus [12] ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยกระทรวงพลังงานสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้จากการรวมโปรแกรมทางด้านพลังงานที่ใช้ในการทำนายการใช้พลังงานในอาคารก่อนหน้านี้ ไม่ว่าจะเป็นโปรแกรม DOE และโปรแกรม BLAST โดยนำส่วนดีของแต่ละโปรแกรมมารวมเข้าด้วยกัน และเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ในตัวโปรแกรมจะประกอบด้วยโมดูลย่อยสำหรับการคำนวณพลังงานแต่ละส่วนของอาคาร สำหรับการพัฒนาแบบ จำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษานี้ จะสนใจหลักการคำนวณของ EnergyPlus ในส่วนของการคำนวณหาค่าการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

การคำนวณหาค่าการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Klems, J.H. [3-6] การหาค่าคุณสมบัติ optic กระจก และแบบจำลองของการพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับอุปกรณ์บังเงาจะใช้แบบจำลองตามมาตรฐาน ISO15099 [8] ในขณะที่การหาค่า inward-flowing fraction ของการดูดกลืนพลังงานของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจกนั้น สามารถหาได้จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

การหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ของ EnergyPlus จะวิเคราะห์แบบจำลองโดยพิจารณาใบมู่ลี่สองใบที่ติดกันเป็นแบบผิวปิด และแบ่งใบมู่ลี่เป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่มีสมมติฐาน คือ ใบมู่ลี่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ (flat plate) และใบมู่ลี่มีลักษณะการกระจายแสงเท่ากันในทุกทิศทาง (perfect diffuser) และไม่ขึ้นกับมุมตกกระทบของรังสี นอกจากนี้ ทาง EnergyPlus ได้เปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองของ EnergyPlus และ ISO15099 เมื่อเปลี่ยนมุม solar profile และค่าการสะท้อนของใบมู่ลี่ พบว่า ค่าคุณสมบัติทาง optic ของใบมู่ลี่ทั้งในส่วนของคลื่นสั้น และคลื่นยาวที่ได้จากแบบจำลองของ EnergyPlus จะต่างจากผลเฉลยที่ได้แบบจำลองของ ISO15099 ไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของมูลิที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมูลิของ EnergyPlus [12]

งานวิจัยของ Chaiyapinunt, S. และ Worasinchai, S.

ในปี พ.ศ.2552 Chaiyapinunt, S. และ Worasinchai, S.[13, 14] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในแง่การส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ โดยได้พัฒนาในส่วนของการหาคุณสมบัติทาง optic ของมูลิในช่วงการแผ่รังสีคลื่นสั้น และคลื่นยาว แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะพิจารณาให้มูลิมีคุณสมบัติทาง optic เป็นแบบ nonspecular และพิจารณาให้มูลิเป็นชั้นเสมือน (effective layer) ที่มีคุณสมบัติเหมือนมูลิ รวมทั้งพิจารณาผลของความหนา และความโค้งของมูลิ เพื่อทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิมีความแม่นยำมากขึ้น

2.2 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ

2.2.1 การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

งานวิจัยของ Collins, M.R. และ Wright, J.L.

ในปี พ.ศ.2549 Collins, M.R. และ Wright, J.L. [15] ได้ทำการศึกษาและเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว ซึ่งส่งผลต่อการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่า SHGC เนื่องจากแบบจำลองอื่นจะพิจารณาชั้นแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างกระจกเป็นชั้นที่ทึบแสงต่อคลื่นยาว จะเห็นได้ชัดว่าไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่า SHGC ของระบบหน้าต่างกระจกเมื่อติดตั้งอุปกรณ์บังเงา เช่น มูลิ เพิ่มเข้าไป แบบจำลองนี้จะพิจารณาอุปกรณ์บังเงาให้มีลักษณะเป็น

diathermanous layer (ชั้นที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้น และคลื่นยาวส่งผ่านได้) และสมมติให้อุณหภูมิผิวของทุกชั้นมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นผิวของชั้นที่พิจารณาในขณะนั้นซึ่งให้อุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วทำการหาค่าการส่งผ่านรังสีไปสู่ผิวแต่ละผิวโดยวิธี radiosity จากนั้นจึงดำเนินการกำหนดผิวที่ต้องการพิจารณาใหม่ กระทำซ้ำจนครบทุกผิวในระบบกระจกและมู่ลี่ ส่งผลให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่มีความแม่นยำขึ้น นอกจากนี้ Collins, M.R. และ Wright, J.L. ได้แสดงการหาค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่อยู่ระหว่างกลาง ซึ่งเป็นผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่และชุดของค่าความต้านทานความร้อนของแต่ละชั้น

2.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

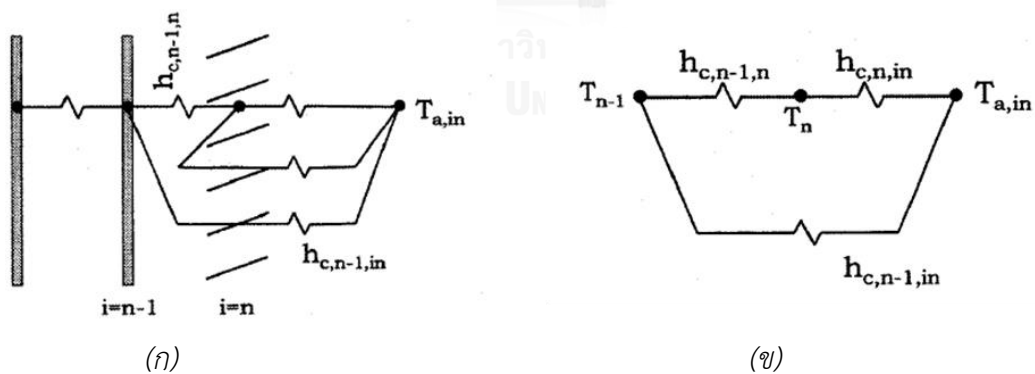
งานวิจัยของ Yazdanian, M. และ Klems, J.H.

ในปี พ.ศ. 2537 [16] Yazdanian, M. และ Klems, J.H. ได้ทำการศึกษาและทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก โดยได้ทำการทดลองที่ Mobile Window Thermal Test (MoWiTT) และเก็บข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์เป็นระยะเวลาสองปี

จากการศึกษาที่ผ่านมา ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศภายนอก และทิศทางของอาคาร มีงานวิจัยหลายงานที่เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก แต่จากการสำรวจงานที่ผ่านมา ผู้วิจัยพบว่าที่เงื่อนไขเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมีค่าค่อนข้างต่างกัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก และพบว่านอกจากค่าความเร็วลมของอากาศภายนอก และทิศทางของอาคาร ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และอากาศภายนอกจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกเช่นกัน เนื่องจาก การพาความร้อน แบ่งเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติซึ่งเป็นผลจากผลต่างของอุณหภูมิ และการพาความร้อนแบบบังคับซึ่งเป็นผลจากลมที่พัดผ่านอาคาร ผู้วิจัยจึงใช้แบบจำลองของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบธรรมชาติ และแบบบังคับ มาวิเคราะห์กับข้อมูลที่วัดได้ ได้แบบจำลองสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกสำหรับความเร็วลมที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 2.2 m/s โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับผลจากการทดลองไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยของ Wright, J.L.

ในปี พ.ศ.2551 [17] Wright, J.L. ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ คำนวณค่าดัชนีที่ใช้ประเมินค่าของสมรรถนะทางความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง อุปกรณ์บังเงา เช่น ค่า SHGC และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และเสนอแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์แบบใหม่ในส่วนของ การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับ สิ่งแวดล้อม สำหรับระบบหน้าต่างที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายใน สิ่งแวดล้อมที่กล่าวถึงคือ อากาศ ภายในอาคาร นั่นคือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใหม่นี้จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคาร ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การพา ความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร สำหรับการพิจารณาเพื่อหาค่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร จะพิจารณาให้อุปกรณ์บังเงามีลักษณะ เป็น diathermanous layer อากาศจึงสามารถไหลผ่านอุปกรณ์บังเงาได้ ทำให้มีตัวต้านทานแบบ ข้าม (jump resistor) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเป็นโครงข่ายความต้านทานความร้อนของระบบหน้าต่าง กระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่พิจารณาส่วนของการพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคาร



รูปที่ 2.5 (ก) ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายในที่ประกอบด้วย หน้าต่าง กระจกสองชั้น และมู่ลี่ (ข) โครงข่ายความต้านทานความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ พิจารณาส่วนของการพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคาร [17]

งานวิจัยของ Lomanowski, B.A. และ Wright, J.L.

ในปี พ.ศ. 2552 [18] Lomanowski, B.A. และ Wright, J.L. ได้นำแบบจำลองที่ Wright, J.L. เสนอ [17] มาสร้างเป็นส่วนเพิ่มเติมในโปรแกรม ESP-r เพื่อให้สามารถทำนายค่าการส่งผ่านความร้อน และภาระการทำความเย็นของอาคารที่มีระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่บังเงาได้ แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่นำมาสร้างเป็นโปรแกรม ESP-r จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติ และแบ่งการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เป็นสองส่วน คือ ส่วนการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์หรือส่วนของรังสีคลื่นสั้น และส่วนของการนำความร้อน และพาความร้อนหรือส่วนของรังสีคลื่นยาว มีสมมติฐานคือความยาวคลื่นของรังสีคลื่นสั้นและคลื่นยาวไม่ทับกัน ในการศึกษาี้ จะเปรียบเทียบผลการทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก และภาระการทำความเย็นของอาคารที่ถูกจำลองให้หน้าต่างกระจกหันหน้าไปทางทิศใต้ที่ได้จากโปรแกรม ESP-r มาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทำนายของโปรแกรม EnergyPlus2.0 ระบบหน้าต่างกระจกที่ศึกษาจะเป็นหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ ติดตั้งมู่ลี่ไว้ด้านนอกอาคาร ติดตั้งมู่ลี่ไว้ตรงกลางระหว่างหน้าต่างกระจกสองชั้น และติดตั้งมู่ลี่ภายในอาคาร และที่การติดตั้งมู่ลี่ตำแหน่งต่างๆ จะเปลี่ยนค่ามุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 และ 45 องศา โดยผลการทำนายจากทั้งสองโปรแกรมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การส่งผ่านความร้อนเข้ามาในตัวอาคารผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ประกอบด้วย ส่วนของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ และส่วนของการนำและพาความร้อน โดยมีค่าดัชนีที่ใช้ประเมินค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในส่วนของ การส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ คือ ค่า SHGC และส่วนของการนำและพาความร้อน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะมีความซับซ้อนมากกว่า การวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกตัวเปล่า เนื่องจาก กระจกจะคุณสมบัติทาง optic เป็นแบบ specular และทึบแสงในช่วงความยาวคลื่นยาว ในขณะที่มู่ลี่จะมีคุณสมบัติทาง optic เป็นแบบ nonspecular ดังนั้น เมื่อมีการติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติมกับระบบหน้าต่างกระจก คุณสมบัติโดยรวมของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ จะขึ้นกับค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจก ค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ และผลของการสะท้อนระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่

ในการประเมินค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จำเป็นต้องพิจารณาค่าคุณสมบัติที่กล่าวมานี้ เพื่อหาคุณสมบัติทาง optic ของระบบโดยรวมทั้งส่วนของรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาว เช่น ค่าการส่งผ่านของระบบ ค่าการสะท้อนของระบบ และค่าการดูดกลืนรังสีในแต่ละชั้น รวมทั้งพิจารณาส่วนของการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวของระบบ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและค่าการถ่ายเทความร้อนในส่วนต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับค่า inward-flowing fraction ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการหาค่า SHGC ที่ประกอบด้วยส่วนของรังสีคลื่นสั้น คือ ค่าการส่งผ่านของระบบ และส่วนของรังสีคลื่นยาว คือ ความร้อนที่ไหลเข้าสู่อาคารจากรังสีที่ดูดกลืนไว้ในระบบหน้าต่างกระจก

ดังนั้น ในการทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะเริ่มจากการหาคุณสมบัติทาง optic ของระบบ ซึ่งในส่วนของการแผ่รังสีคลื่นสั้นนั้น รังสีแสงอาทิตย์จะสามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาโดยตรง การประเมินถึงผลกระทบเนื่องจากรังสีคลื่นสั้นจะสามารถพิจารณาหาค่าได้จากการส่งผ่านความร้อนที่ได้จากวิธีการของ Klems, J.H. [3-6] แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วน of คลื่นสั้นมีความแม่นยำในระดับหนึ่งจากการตรวจสอบกับผล

การทดลอง [13] ในส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาว ที่มีผลต่อค่าการถ่ายเทความร้อนรวม และ inward-flowing fraction ซึ่งต้องพิจารณาส่วนของการพาความร้อน และการแผ่ความร้อนในส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาวจากผิวกระจกยังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น จะเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาว

เนื่องจากความรู้พื้นฐานต่างๆ ที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษามีค่อนข้างมาก จึงแบ่งความรู้ทั้งหมดออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณา ดังนี้

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจก

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

การศึกษานี้ เน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ที่กล่าวถึงจะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า

3.1 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้ามาในตัวอาคารนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของการนำ และพาความร้อน จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิของอากาศภายนอก และอากาศภายใน และส่วนของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งเกิดจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบบนระบบหน้าต่างกระจก

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถูกส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่อาคารจะสามารถหาได้จาก

$$q = U \cdot (T_{out} - T_{in}) + SHGC \cdot I \quad (3.1)$$

เมื่อ q คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/(m^2 \cdot K)$

T_{out} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, K

T_{in} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, K

$SHGC$ คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient

I คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2
 รังสีแสงอาทิตย์รวม (global solar radiation) เป็นผลรวมของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง (direct solar radiation) และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse solar radiation) ที่ตกกระทบบนพื้นผิวใดๆ โดยที่รังสีแสงอาทิตย์แบบตรง คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกลงบนพื้นผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย คือ รังสีส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลก และวัตถุต่างๆ ที่อยู่ใต้นิวทางเดินของแสง เช่น โมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ ฝุ่นละออง ก่อนตกกระทบบนพื้นผิวรับแสง ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$I = I_D + I_d \quad (3.2)$$

เมื่อ I_D คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

I_d คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

ดังนั้น สมการที่ (3.1) ในส่วนของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ใดๆ จะสามารถแบ่งการพิจารณาเป็นรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย ได้ดังนี้

$$q = U \cdot (T_{out} - T_{in}) + (SHGC_D) \cdot I_{DN} \cdot \cos \theta + (SHGC_d) \cdot I_d \quad (3.3)$$

เมื่อ $SHGC_D$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง

I_{DN} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

$SHGC_d$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์, $^{\circ}$

3.1.1 การคำนวณค่า Solar Heat Gain Coefficient ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ สามารถแบ่งได้เป็น ค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย มีรายละเอียดการคำนวณดังต่อไปนี้

3.1.1.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient ในส่วนของรังสี แสงอาทิตย์แบบตรง

ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสี และมุม azimuth ที่อยู่ในระนาบหน้าต่างกระจก ดังรูปที่ 3.1 สามารถเขียนเป็น ผลรวมของค่าความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้ามาโดยตรง และความร้อนที่ไหลเข้าสู่อาคารเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในระบบหน้าต่างกระจก ดังสมการที่ (3.4)

$$SHGC_D(\theta, \phi) = T^{H}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_i^f(\theta, \phi) \quad (3.4)$$

เมื่อ $SHGC_D$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

T^{H} คือ ค่า directional-hemispherical transmittance

A_i^f คือ ค่า directional front absorptance ของชั้นที่ i

N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของชั้นที่ i

θ คือ มุมตกกระทบของรังสี, °

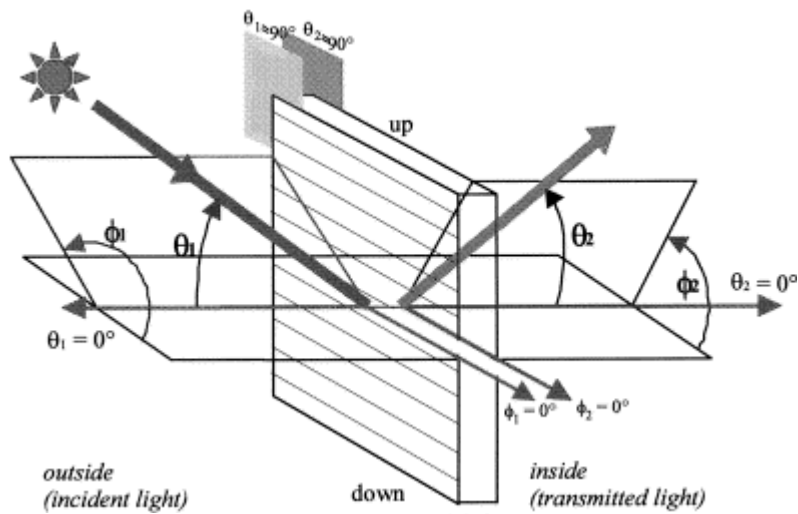
ϕ คือ มุม azimuth ที่อยู่ในระนาบหน้าต่างกระจก, °

M คือ จำนวนของชั้นของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า SHGC นั้นจะประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ

1. ตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติทาง optic ได้แก่ ค่า T^{H} และ A_i^f สามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix Layer Calculation ที่เสนอโดย Klems, J.H. [3-6] ซึ่งเป็นการรวมผลของค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจก ค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ และผลของการสะท้อนระหว่างชั้นระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่

2. ตัวแปรทางความร้อน ได้แก่ ค่า N_i ของหน้าต่างกระจกแต่ละชั้น และมู่ลี่ สามารถหาค่าได้จากสมดุลพลังงานที่เสนอโดย Collins, M.R. และ Wright, J.L. [15]



รูปที่ 3.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth ที่อยู่ในระนาบหน้าต่างกระจก [19]

มุม solar profile สามารถเขียนอยู่ในรูปของมุมตกกระทบ และมุม azimuth ตามที่นิยามในรูปที่ 3.1 ได้เป็น

$$\Omega = \tan^{-1}(\sin \phi \tan \theta) \quad (3.5)$$

เมื่อ Ω คือ มุม solar profile, $^{\circ}$
การนิยามมุม solar profile จะทำให้ได้นิยามของ SHGC ใหม่ ดังนี้

$$SHGC(\Omega) = T^{FH}(\Omega) + \sum_{i=1}^n N_i A_i^f(\Omega) \quad (3.6)$$

3.1.1.2 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient ในส่วนของรังสี

แสงอาทิตย์แบบกระจาย

ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะแบ่งการหาค่า SHGC ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนที่เป็นการกระเจิงของรังสีจากท้องฟ้า (หรือส่วนครึ่งบน, upper) และส่วนล่างที่เป็นการสะท้อนของรังสีจากพื้นดิน (หรือส่วนครึ่งล่าง, lower)

ค่า SHGC ส่วนครึ่งบนและส่วนครึ่งล่าง สามารถหาค่าได้จากการอินทิเกรตค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้จากวิธี Matrix Layer Calculation ในช่วง $0^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$, $0^{\circ} < \phi < 180^{\circ}$ และในช่วง $0^{\circ} < \theta < 90^{\circ}$, $180^{\circ} < \phi < 360^{\circ}$ ตามลำดับ โดยการอินทิเกรตทำได้โดยใช้ค่า weighting function ดังสมการที่ (3.7) และ (3.8)

$$SHGC_{d,upper} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 0^{\circ} < \phi < 180^{\circ} \quad (3.7)$$

$$SHGC_{d,lower} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 180^\circ < \phi < 360^\circ \quad (3.8)$$

เมื่อ m คือ จำนวนมุมตกกระทบที่พิจารณาในช่วง $0^\circ < \theta < 90^\circ$

n คือ จำนวนมุม azimuth ที่พิจารณา

โดยค่า weighting function มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่า angular-weighting function

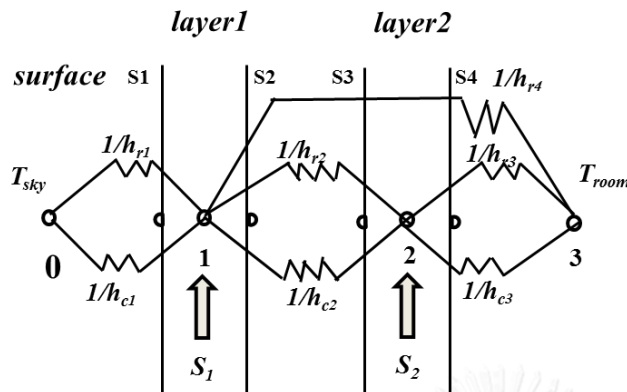
θ	ϕ	Angular weighting, $w(\theta_i, \phi_i)$
0	0,30,60,...,360	0.00028
15	0,30,60,...,360	0.02156
30	0,30,60,...,360	0.03736
45	0,30,60,...,360	0.04314
60	0,30,60,...,360	0.03736
75	0,30,60,...,360	0.02156
90	0,30,60,...,360	0.00028

โดยทั่วไป ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีความสัมพันธ์กับค่าการสะท้อนของพื้นดินซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไป และการหาค่าการสะท้อนของพื้นดินนั้นมามีวิธีการที่ซับซ้อน ดังนั้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ใช้จะเป็นค่าเฉลี่ยของค่า SHGC ส่วนครึ่งบนและส่วนครึ่งล่าง

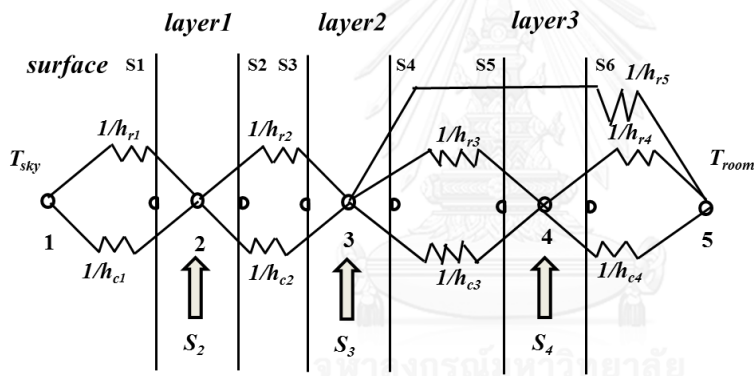
3.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, U จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่แทนเฉพาะส่วนของความร้อนที่เข้าสู่อาคารเนื่องจากความแตกต่างของค่าอุณหภูมิภายนอก และภายใน โดยกำหนดให้รังสีแสงอาทิตย์ที่มากกระทบระบบหน้าต่างกระจกนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และพิจารณาการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวของระบบ สำหรับวิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่นั้นจะเป็นการคำนวณไปพร้อมๆ กันกับการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของชั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากหลักการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 มิตติ โดยจะพิจารณาว่ามู่ลี่เป็นเหมือนกับชั้นเสมือน

(effective layer) ชั้นหนึ่งทีประกอบเข้าไปกับระบบหน้าต่างกระจกอยู่ภายในอาคารสำนักงาน ค่าความต้านทานความร้อนจะมีลักษณะเป็นโครงข่ายดังรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมู่ลี่ภายใน



รูปที่ 3.3 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ภายใน

การคำนวณจะเริ่มจากการหาค่าการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว จากนั้นพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบกระจกติดมู่ลี่ดังแสดงในสมการที่ (3.9) และ (3.12)

สำหรับระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโครงข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะสามารถเขียนได้เป็น

$$U_{total} = \frac{(R_2 + R_3 + R_4)}{[R_4(R_1 + R_2 + R_3) + R_1(R_2 + R_3)]} \quad (3.9)$$

เมื่อ U_{total} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/(m^2 \cdot K)$

R_i คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน, ($m^2 \cdot K$) /W และสามารถหาค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม และชุดของค่าความต้านทานความร้อนจากวิธีที่นำเสนอโดย Collins, M.R. และ Wright, J.L. [15]

$$N_2 = U_{out} R_1 \quad (3.10)$$

$$N_3 = U_{out} \left[(R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{R_4} \right] - \frac{R_2}{R_4} \quad (3.11)$$

สำหรับระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโครงข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของจะสามารถเขียนได้เป็น

$$U_{out} = \frac{(R_3 + R_4 + R_5)}{[R_5(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)]} \quad (3.12)$$

และสามารถหาค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ ได้ดังนี้

$$N_2 = U_{out} R_1 \quad (3.13)$$

$$N_3 = U_{out} (R_1 + R_2) \quad (3.14)$$

$$N_4 = U_{out} \left[(R_1 + R_2 + R_3) + \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_5} \right] - \frac{R_3}{R_5} \quad (3.15)$$

ภายใต้สภาวะสมดุล ความร้อนที่ถูกดูดกลืนที่ผิวกระจกใดๆ จะต้องมีค่าเท่ากับการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ในการถ่ายเทความร้อนนี้จะประกอบไปด้วยการถ่ายเทความร้อน 3 โหมดหลัก คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว สามารถนำมาเขียนเป็นความต้านทานความร้อน และหาค่าได้ดังนี้

กรณี ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโครงข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 3.2 สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ ได้ดังนี้

ความต้านทานความร้อนระหว่างที่ผิวหน้าต่างกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอกอาคาร

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_2}{k_2} \quad (3.16)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,gap} + h_{r,gap}} + \left(\frac{0.5d_2}{k_2} + \frac{0.5d_3}{k_3} \right) \quad (3.17)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวมู่ลี่กับอากาศภายในอาคาร

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_3}{k_3} \quad (3.18)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร

$$R_4 = \frac{1}{h_{r,across}} + \frac{0.5d_2}{k_2} \quad (3.19)$$

กรณี ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโครงข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 3.3 สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ ได้ดังนี้

ความต้านทานความร้อนระหว่างที่ผิวหน้าต่างกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอกอาคาร

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_2}{k_2} \quad (3.20)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างช่องกระจก

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,gap} + h_{r,gap}} + \left(\frac{0.5d_2}{k_2} + \frac{0.5d_3}{k_3} \right) \quad (3.21)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,gap} + h_{r,gap}} + \left(\frac{0.5d_3}{k_3} + \frac{0.5d_4}{k_4} \right) \quad (3.22)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวมู่ลี่กับอากาศภายในอาคาร

$$R_4 = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_4}{k_4} \quad (3.23)$$

ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร

$$R_5 = \frac{1}{h_{r,across}} + \frac{0.5d_3}{k_3} \quad (3.24)$$

เมื่อ $h_{c,x}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่ง x ใดๆ (out = ตำแหน่งระหว่างที่ผิวหน้าต่างกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอกอาคาร gap = ตำแหน่งระหว่างช่องกระจก และตำแหน่งระหว่างชั้นกระจกกับมู่ลี่ in = ตำแหน่งระหว่างผิวมู่ลี่กับอากาศภายในอาคาร

และ $across =$ ตำแหน่งระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร),

$$W/(m^2 \cdot K)$$

$h_{r,x}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ตำแหน่ง x ใดๆ, $W/(m^2 \cdot K)$

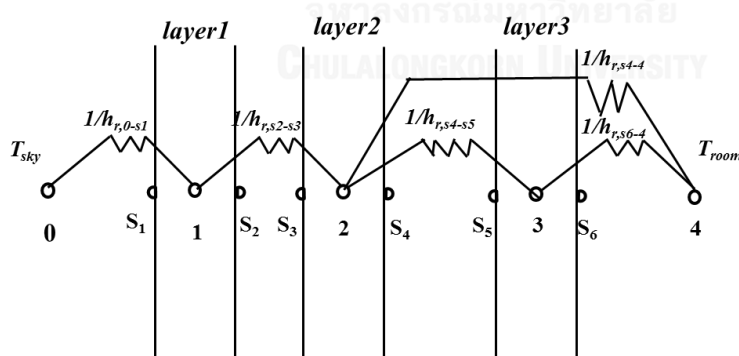
d_i คือ ความหนาของชั้น i , m

k_i คือ สภาพนำความร้อนของชั้นที่ i , $W/(m \cdot K)$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

3.1.2.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

เนื่องจากมูลิมีลักษณะพิเศษ คือ ยอมให้รังสีคลื่นยาวส่งผ่านได้ ต่างกับหน้าต่างกระจกที่รังสีคลื่นยาวไม่สามารถทะลุผ่านได้ ดังนั้นมูลิจึงถูกกำหนดให้เป็นชั้นแบบ diathermanous ทำให้การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีคลื่นยาวของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิมีความซับซ้อน การวิเคราะห์กระทำตามวิธีที่เสนอโดย Collins, M.R. และ Wright, J.L. [15] รูปที่ 3.4 เป็นโครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของกรณีตัวอย่างของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมูลิไว้ด้านหลังหน้าต่างกระจก



รูปที่ 3.4 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิที่ประกอบไปด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมูลิภายใน

การวิเคราะห์เริ่มจากการสมมติให้อุณหภูมิผิวของทุกชั้นมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นผิวของชั้นที่พิจารณาในขณะนั้นซึ่งให้อุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วทำการหาค่าการส่งผ่านรังสีไปสู่ผิวแต่ละผิวโดยวิธี radiosity จากนั้นจึงดำเนินการกำหนดผิวที่ต้องการพิจารณาใหม่ กระทำซ้ำจนครบทุกผิวในระบบ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวสามารถหาได้จาก

$$h_{r,j-k} = \frac{\sum J_{sk}^j - \sum J_{sj}^k}{T_{sj} - T_{sk}} \quad (3.25)$$

โดยที่ $h_{r,j-k}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิว j และ k (โดยทั่วไป $j=k-1$) ถ้าผิว k เป็นผิวด้านนอกสุดของระบบหน้าต่างกระจก ผิว j จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอก ถ้าผิว j เป็นผิวด้านในสุดของระบบหน้าต่างกระจก ผิว k จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายในห้อง, $W/(m^2 \cdot K)$
 $\sum J_{sk}^j$ คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว j (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบหน้าต่างกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว k, W/m^2
 $\sum J_{sj}^k$ คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว k (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบหน้าต่างกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว j, W/m^2
 T_{sj} คือ ค่าอุณหภูมิของผิว j, K
 T_{sk} คือ ค่าอุณหภูมิของผิว k, K

3.1.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในระบบหน้าต่างกระจกหลายชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่จะสามารถพิจารณาแยกตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

1. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก
2. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่
4. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

3.1.2.2.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตพบว่า การพาความร้อนออกที่ผิวด้านนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศภายนอก และทิศทางของอาคารเป็นหลัก โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Finlayson, E.U. [1]

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม (*windward side of the building*)

$$h_{c,out} = 8.07 \cdot V^{0.605} \quad \text{ถ้า } V > 2 \text{ m/s} \quad (3.26)$$

$$h_{c,out} = 12.27 \quad \text{ถ้า } V < 2 \text{ m/s} \quad (3.27)$$

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ใต้ลม (*leeward side of the building*)

$$h_{c,out} = 18.64(0.3 + 0.05V)^{0.605} \quad (3.28)$$

เมื่อ V คือ ค่าความเร็วลมภายนอก, m/s

3.1.2.2.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก

สามารถที่จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนั้นคือ

$$h_{c,gap} = \frac{k \cdot Nu}{\omega} \quad (3.29)$$

เมื่อ k คือ สภาพนำความร้อนของก๊าซระหว่างชั้นกระจก, $W/(m \cdot K)$

ω คือ ความกว้างของช่องกระจก, mm

Nu คือ Nusselt number

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการ

$$Nu = \left[1 + (0.0303Ra^{0.402})^{11} \right]^{0.091} \quad (3.30)$$

โดยที่ $Ra = Gr \cdot Pr$ (3.31)

เมื่อ Ra คือ Rayleigh number

Gr คือ Grashof number

Pr คือ Prandtl number

และ

$$Gr = \frac{g \beta \rho^2 \omega^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (3.32)$$

เมื่อ	ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิของผิวกระจก, K
	g	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2
	β	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ, $1/K$
	ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3
	μ	คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/m \cdot s$

โดยที่คุณสมบัติของก๊าซสามารถที่จะหาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นกระจกทั้งสอง และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$P(T) = P_{273} + \frac{dP}{dT_{ave}} \times T_{ave} \quad (3.33)$$

โดยที่

$$T_{ave} = 0.5 \times (T_{left} + T_{right}) \quad (3.34)$$

เมื่อ P_{273} คือ ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อุณหภูมิ 273 K

$\frac{dP}{dT_{ave}}$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ

ค่าคุณสมบัติของอากาศต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ [1]

ค่าคุณสมบัติของอากาศ	ค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิ 273 K	ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เทียบกับอุณหภูมิ
ค่าความหนาแน่น, kg/m^3	1.290	-0.0044
ค่าความหนืด, $kg/(m \cdot s)$	1.73e-5	10.0e-8
สภาพนำความร้อนของอากาศ, $W/(m \cdot K)$	0.0241	7.6e-5
ค่า Prandtl number	0.720	0.00180

3.1.2.2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

การพาความร้อนในส่วนนี้นั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ที่ทำให้มีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน และไม่สามารถที่จะหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรงได้ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาได้พยายามศึกษาทั้งโดยจากการทดลอง [20-22] และจากกรรมวิธีเชิงตัวเลข [21, 23, 24] โดยจากการการศึกษาต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลัก ๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนในส่วนนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ระยะของการติดตั้ง มุมเอียงของมู่ลี่ ระดับของความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ตัวมู่ลี่ ค่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของผิวกระจก และค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่

ในส่วนนี้พบว่าค่าที่ได้จากการทดลอง หรือกรรมวิธีเชิงตัวเลขเมื่อนำมาใช้ จะให้ค่าไม่แม่นยำ จึงใช้สมการที่ (3.29) โดยสมมติช่องว่างระหว่างกระจกกับมู่ลี่ให้เหมือนกับช่องว่างระหว่างกระจก สมมติฐานนี้ให้ค่าแม่นยำกว่าผลเฉลยจากการนำค่าที่ได้จากการทดลอง หรือกรรมวิธีเชิงตัวเลขเมื่อนำมาใช้

3.1.2.2.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

สามารถจำลองได้เป็นการไหลผ่านแผ่นเรียบ และสามารถหาค่าได้จากแบบจำลองของกระจกผิวในจากความสัมพันธ์ [1]

$$h_{c,in} = 1.77(T_{s,2n} - T_{room})^{0.25} \quad (3.35)$$

เมื่อ n คือ จำนวนชั้นของระบบหน้าต่างกระจก

3.1.3 การวิเคราะห์หลักสมมูลของพลังงานเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม

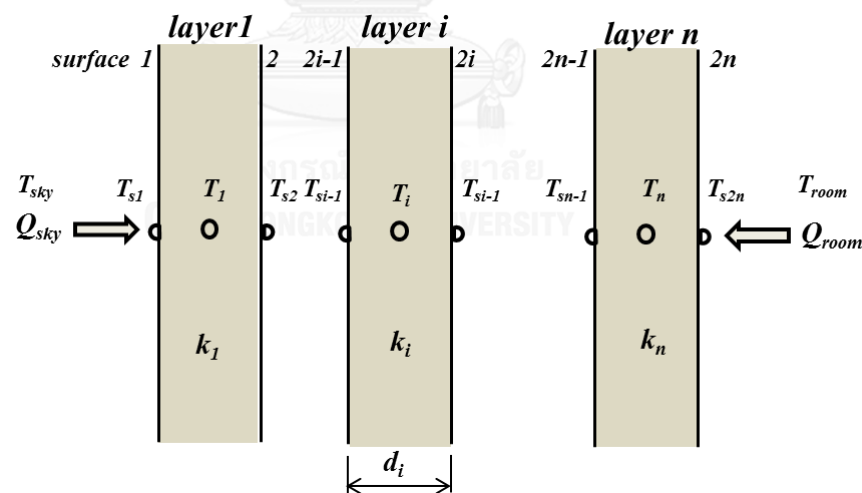
การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่จะเป็นการคำนวณไปพร้อมๆ กันกับการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของชั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ โดยพิจารณามู่ลี่เป็นชั้นเสมือนที่ประกอบเข้าไประบบหน้าต่างกระจก และใช้หลักการสมมูลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 มิติที่ประกอบไปด้วยการถ่ายเทความร้อน 3 โหมดหลัก ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีในการวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การประเมินค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละผิวของชั้นหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

การวิเคราะห์เริ่มจากการสมมติค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกและมู่ลี่ เพื่อนำไปหาค่าอุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ เมื่อได้อุณหภูมิผิวแล้ว จะนำไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนคงเหลือ (heat flux residual) เพื่อนำไปหาค่าการกระจายตัวอุณหภูมิใหม่ แล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้ค่าอุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่แต่ละชั้นที่ทำให้ค่าความร้อนสุทธิถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ในสมดุลความร้อนมีค่าเข้าสู่ศูนย์

3.1.3.1 ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ในสมดุลความร้อน

ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละชั้น และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นั้น จะเริ่มจากการแบ่งให้ในแต่ละชั้นของกระจกและมู่ลี่นั้นประกอบไปด้วยจุดต่อ 3 จุด นั่นคือที่จุดกึ่งกลางกระจก และที่ผิวแต่ละด้านของกระจกดังแสดงในรูปที่ 3.5 และจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ

1. สภาพอากาศมีค่าคงที่ (constant environmental conditions)
2. การถ่ายเทพลังงานนั้นอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state)



รูปที่ 3.5 การกระจายตัวอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

ภายใต้สภาวะคงตัวนี้ ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ในสมดุลความร้อนนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นคือ

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} = 0 \quad (3.36)$$

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} = 0 \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (3.37)$$

$$Q_{across,i} = \frac{(T_i - T_{i+2})}{R_{i+3}} \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (3.38)$$

เมื่อ Q_i คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิ (net heat flux), W/m^2

$Q_{across,i}$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อน (heat flux) ที่ถูกส่งผ่านจากชั้น i ข้ามชั้นมูลตีที่เป็นชั้น diathermanous layer สู่จุด $i+2$, W/m^2

T_i คือ อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของระบบกระจกที่ชั้นที่ i , $^{\circ}C$

R_i คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน, $(m^2 \cdot K) / W$

$Q_{abs,i}$ คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่ i , W/m^2

โดยที่ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้นสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$Q_{abs,i} = A_i^{FH} \cdot I_D \quad (3.39)$$

เมื่อ A_i^{FH} คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere

I_D คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบระบบกระจก, W/m^2

3.1.3.2 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิว

จากค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางชั้นหน้าต่างกระจกและมูลตีจะทำให้เราสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกได้จากหลักของสมดุลพลังงาน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวกระจกด้านนอกจะได้ว่าที่สภาวะคงตัว การนำความร้อนผ่านเนื้อกระจกจะต้องมีค่าเท่ากับการพาความร้อนออกจากผิวกระจก นั่นคือ

$$\frac{T_1 - T_{s1}}{R_{k1}} = \frac{T_{s1} - T_{sky}}{R_{h1}} \quad (3.40)$$

จัดรูปสมการเสียใหม่จะได้

$$R_{h1}T_1 - R_{h1}T_{s1} = R_{k1}T_{s1} - R_{k1}T_{sky} \quad (3.41)$$

$$R_{k1}T_{s1} + R_{h1}T_{s1} = R_{h1}T_1 + R_{k1}T_{sky} \quad (3.42)$$

หารตลอดด้วย $R_{k1}R_{h1}$ จะได้

$$\frac{R_{k1}T_{s1} + R_{h1}T_{s1}}{R_{k1}R_{h1}} = \frac{R_{h1}T_1 + R_{k1}T_{sky}}{R_{k1}R_{h1}} \quad (3.43)$$

หรือ

$$\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}} \right) T_{s1} = \left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{sky}}{R_{h1}} \right) \quad (3.44)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ผิวใหม่ได้เป็น

$$T_{s1} = \frac{\left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{sky}}{R_{h1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}} \right)} \quad (3.45)$$

และพิจารณาในทำนองเดียวกันกับกรณีผิวลู่อื่นในจะได้

$$T_{s2N} = \frac{\left(\frac{T_N}{R_{kN+1}} + \frac{T_{room}}{R_{hN+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hN+1}} + \frac{1}{R_{kN+1}} \right)} \quad (3.46)$$

อุณหภูมิผิวที่อยู่ระหว่างชั้นสามารถพิจารณาหาค่าได้จากสมดุลพลังงานเช่นเดียวกัน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวด้านในของกระจกชั้นนอกจะได้

$$T_{s2} = \frac{\left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{s3}}{R_{h2}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k1}} \right)} \quad (3.47)$$

และที่ผิวกระจก

$$T_{s3} = \frac{\left(\frac{T_2}{R_{k2}} + \frac{T_{s2}}{R_{h2}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k2}} \right)} \quad (3.48)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ index notation ได้เป็น

$$T_{s2i} = \frac{\left(\frac{T_i}{R_{ki}} + \frac{T_{s2i+1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki}} \right)} \quad (3.49)$$

และ

$$T_{s2i+1} = \frac{\left(\frac{T_{i+1}}{R_{ki+1}} + \frac{T_{s2i-1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki+1}} \right)} \quad (3.50)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ (3.49) และ (3.50) นั้นจะมีลักษณะที่ couple กันอยู่ และจำเป็นที่จะต้องหาค่าไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นในการคำนวณจึงจะเริ่มต้นการคำนวณจากการสมมติค่า T_{s2i} และ T_{s2i+1} ก่อน โดยจะสมมติให้มีค่าที่เท่ากับอุณหภูมิที่กลางกระจก นั่นคือ $T_{s2i} = T_i$ และ $T_{s2i+1} = T_{i+1}$ จากนั้นจึงค่อยคำนวณค่าอุณหภูมิทั้งสองใหม่จนมีค่าที่ลู่อเข้า โดยในการคำนวณนั้นจะถือว่าลู่อเข้าเมื่อผลต่างสูงสุดของอุณหภูมิทั้งสองนั้นมีค่าไม่เกิน 0.01

3.1.3.3 ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่

ค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากอุณหภูมิที่สมมติขึ้นจะทำให้สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} \quad (3.51)$$

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (3.52)$$

เมื่อ Δ_i คือ ค่าความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านชั้นที่ i ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่, W/m^2

โดยค่า Δ_i ที่ได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ และเราจะใช้ค่า Δ_i ตัวนี้ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวใหม่

3.1.3.4 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ

ค่าอุณหภูมิที่กลางกระจกตัวใหม่สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$T_k = T_k^0 + \delta T_k \quad (3.53)$$

เมื่อ T_k คือ ค่าอุณหภูมิตัวใหม่ของชั้นหน้าต่างกระจกหรือชั้นมู่ลี่ที่ k , °C

T_k^0 คือ ค่าอุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นหน้าต่างกระจกหรือชั้นมู่ลี่ที่ k , °C

δT_k คือ ค่าผลต่างอุณหภูมิรวม, °C

และค่า δT_k จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงเหลือของความร้อน (heat flux residual, Δ_j) ดังนี้

$$\delta T_1 = \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N$$

$$\delta T_2 = \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N$$

....

(3.54)

$$\delta T_N = \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N$$

จะเห็นได้ว่าในการหาค่า δT_k นั้นจำเป็นต้องทราบค่า Δ_j และค่าอนุพันธ์ ต่าง ๆ เสียก่อน โดยที่ค่า Δ_j สามารถที่จะคำนวณได้โดยตรงจากสมการ (3.51) แต่สำหรับพจน์อนุพันธ์ ถ้าพิจารณาที่สมการเดียวกันจะเห็นได้ว่าหาค่าได้ไม่ถนัด เนื่องจากว่าในหนึ่งสมการมีค่าอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกัน อยู่หลายตัวด้วยกัน

อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนคงเหลือแทนจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ \Delta_2 &= \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ &\dots \\ \Delta_N &= \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \end{aligned}$$
(3.55)

หรือสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{bmatrix}$$
(3.56)

ดังนั้นจะทำให้สามารถหาค่า δT_k ใด ๆ ได้จาก

$$\begin{bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{bmatrix}$$
(3.57)

หรือ

$$\delta T_k = \left[\frac{\partial \Delta_k}{\partial T_j} \right]^{-1} \times \Delta_j$$
(3.58)

ถ้าพิจารณาจากสมการ (3.54) ถึง (3.56) จะเห็นได้ว่าจากค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้สมมติในตอนแรกนั้นจะให้ค่า Δ_j มีค่าที่ติดลบเสมอ เนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สมมติในตอนแรกนั้นไม่ได้รวมถึงผลของการดูดกลืนรังสีที่มีอยู่ในแต่ละชั้นกระจก ดังนั้นค่าอุณหภูมิใหม่ที่คำนวณได้นั้นจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่า Δ_j นั้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากว่าค่า Δ_j ที่ได้จะเป็นลบ จึงเป็นผลให้ค่า δT_k มีค่าลบไปด้วย ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการเสียใหม่เพื่อให้ได้ค่า δT_k มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ

$$\delta T_k = -[\partial \Delta_k / \partial T_j]^{-1} \times \Delta_j \quad (3.59)$$

จากสมการ (3.54) ถึง สมการ (3.59) จะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้โดยพิจารณาจากค่าอนุพันธ์ของ $\partial \Delta_i / \partial T_j$ แทน ซึ่งสามารถหาค่าได้ง่ายกว่า

โดยค่าอนุพันธ์ $\partial \Delta_i / \partial T_j$ สามารถหาค่าได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ (3.51) เทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางของแต่ละชั้นกระจก/มูลี โดยจะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

ในกรณีของกระจกตัวเปล่า 1 ชั้นจะมีค่าเพียง 1 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} = & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ & + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_2}{\partial T_1} \right) - h_{r2} \right] \end{aligned} \quad (3.60)$$

ในกรณีของกระจกตัวเปล่า 2 ชั้นจะมี 4 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} = & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ & + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} \right) - h_{r, gap} \right] \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} = & \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_2} \right) \right] \\ & - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) + h_{r, gap} \right] \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} = & -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} \right) + h_{r, gap} \right] \\ & + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_3}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) - h_{r3} \right] \end{aligned} \quad (3.64)$$

กรณี กระจก 1 ชั้นกับมู่ลี่ จะมี 4 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2 h_{r4}^2} \left[\left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_1} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_2} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) + h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4^2 R_4^2 h_{r4}^2} \left[\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_2} \right] \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} \right) + h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (3.68)$$

ดังนั้น สำหรับกรณีกระจก 2 ชั้นกับมู่ลี่จะรวมเป็น 3 ชั้นจะมีค่าอนุพันธ์เหล่านี้ทั้งหมด 3 คู่ 3 ค่า และสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} \right) - h_{r, gap} \right] \end{aligned} \quad (3.69)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r_1} + h_{c_1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c_1}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_2} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r_2} + h_{c_2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c_2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) + h_{r, gap} \right] \end{aligned} \quad (3.70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r_1} + h_{c_1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c_1}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_3} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_2^2(h_{r_2} + h_{c_2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c_2}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_3} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r_2} + h_{c_2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c_2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} \right) + h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3^2(h_{r_3} + h_{c_3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c_3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_1} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_5^2 h_{r5}^2} \left[\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_1} \right] \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r_2} + h_{c_2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c_2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r_3} + h_{c_3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c_3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_2} \right) - h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_5^2 h_{r5}^2} \left[\left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_2} \right) - h_{r5} \right] \end{aligned} \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_2^2(h_{r_2} + h_{c_2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c_2}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_3} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r_3} + h_{c_3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c_3}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_3} \right) + h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_5^2 h_{r5}^2} \left[\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_3} \right] \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_3^2(h_{r_3} + h_{c_3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c_3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_4^2(h_{r_4} + h_{c_4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c_4}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s6}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_2} = & -\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} \right) + h_{r3} \right] \\ & + \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_4^r}{\partial T_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} \right) - h_{r3} \right] \\ & + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_4^r}{\partial T_3} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (3.77)$$

โดยที่ ค่าความต้านทานความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ เป็นไปตามนิยามของสมการที่ (3.16) ถึง (3.24)

3.2 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก

3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)

สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบนั้น กระจกจะมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และจะมีค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจกที่ผิวด้านหน้า และผิวด้านหลังที่เท่ากัน โดยในการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะสามารถหาค่าได้จากขั้นตอนที่เสนอโดย Furler, R.A. [2]

โดยทั่วไปทางผู้ผลิตมักจะให้ค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมศูนย์องศาที่ได้จากการทดลองของผู้ผลิต โดยจากค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการสะท้อนรังสีที่มุมตกกระทบศูนย์องศาเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของกระจกเช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสง (refraction index) ค่าสัมประสิทธิ์การสิ้นสูญ (extinction coefficient) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดแสง (absorption coefficient) เป็นต้น และสามารถนำไปใช้ในการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ที่มุมตกกระทบอื่นได้

โดยที่ค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflectivity) และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ มุมตกกระทบศูนย์องศาจะมีความสัมพันธ์กับค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการสะท้อนรังสีที่มุมศูนย์องศา ดังแสดงสมการที่ (3.78) และ (3.79)

$$\rho_\lambda(0) = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_\lambda(0)) \cdot R_\lambda(0)}}{2(2 - R_\lambda(0))} \quad (3.78)$$

โดย

$$\beta = T_\lambda(0)^2 - R_\lambda(0)^2 + 2R_\lambda(0) + 1 \quad (3.79)$$

เมื่อ ρ_λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความยาวคลื่น λ

$T_\lambda(0)$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ

$R_\lambda(0)$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ

และจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มุมตกกระทบศูนย์องศาจะทำให้สามารถหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ได้ดังนี้

ค่าดัชนีการหักเหของแสง, n_λ

$$n_\lambda = \frac{1 + \sqrt{\rho_\lambda(0)}}{1 - \sqrt{\rho_\lambda(0)}} \quad (3.80)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย, k_λ

$$k_\lambda = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln \left(\frac{R_\lambda(0) - \rho_\lambda(0)}{\rho_\lambda(0) T_\lambda(0)} \right) \quad (3.81)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น, nm

d คือ ความหนาของกระจก, mm

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดแสง, α_λ

$$\alpha_\lambda = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} \quad (3.82)$$

ในการหาค่าคุณสมบัติที่มุมตกกระทบอื่นก็สามารถหาค่าได้จากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ โดยในกรณีที่มีมุมตกกระทบอื่นที่ไม่ใช่ศูนย์องศาจะเกิดการหักเหของแสงตาม Snell's law

$$\zeta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{n_\lambda} \right) \quad (3.83)$$

เมื่อ ζ คือ มุมหักเหของแสง, $^\circ$

θ คือ มุมตกกระทบ, $^\circ$

และที่มุมตกกระทบนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนที่ผิวเปลี่ยนไปด้วย ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{n_\lambda \cos \theta - \cos \zeta}{n_\lambda \cos \theta + \cos \zeta} \right)^2 + \left(\frac{n_\lambda \cos \zeta - \cos \theta}{n_\lambda \cos \zeta + \cos \theta} \right)^2 \right) \quad (3.84)$$

และจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmissivity) ได้จาก

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (3.85)$$

จากนั้นจะทำให้สามารถหาค่าการส่งผ่าน และค่าการสะท้อนที่มุมตกกระทบใด ๆ ที่รวมผลของการสะท้อนในเนื้อกระจกแล้วได้จากสมการที่ (3.86) และ (3.87)

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 e^{(-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 e^{(-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}} \quad (3.86)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot (1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta}) \quad (3.87)$$

- เมื่อ T_λ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
 R_λ คือ ค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
 τ_λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านที่มุมตกกระทบ θ
 ρ_λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มุมตกกระทบ θ

3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)

สำหรับกระจกชนิดเคลือบค่าคุณสมบัติทาง optic เหล่านี้จะมีค่าที่ซับซ้อนมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการสะท้อนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ และในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะพิจารณาตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ที่ได้เสนอโดย Finlayson, E.U. และคณะ [1] โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ

1. กรณีที่ค่าการส่งผ่านรังสีมีค่ามากกว่า 0.645, $T(0) > 0.645$ จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{clr}(\theta) \quad (3.88)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{clr}(\theta)) + \bar{\rho}_{clr}(\theta) \quad (3.89)$$

2. กรณีที่ค่าการส่งผ่านรังสีมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645, $T(0) \leq 0.645$ จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{bnz}(\theta) \quad (3.90)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{bnz}(\theta)) + \bar{\rho}_{bnz}(\theta) \quad (3.91)$$

โดยที่

$$\bar{\tau}_x(\theta) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cos(\theta) + \bar{\tau}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\tau}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\tau}_4 \cos^4(\theta) \quad (3.92)$$

$$\bar{\rho}_x(\theta) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cos(\theta) + \bar{\rho}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\rho}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\rho}_4 \cos^4(\theta) - \bar{\tau}(\theta) \quad (3.93)$$

- เมื่อ x เป็นตัวห้อยที่เป็น clr หรือ bnz

ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ นั้นจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติของกระจกชนิดเคลือบ [1]

	0	1	2	3	4
$\bar{\tau}_{clr}$	-0.0015	3.355	-3.840	1.460	0.0288
$\bar{\rho}_{clr}$	0.999	-0.563	2.043	-2.532	1.054
$\bar{\tau}_{bnz}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599
$\bar{\rho}_{bnz}$	0.997	-1.868	6.513	-7.862	3.225

3.3 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

คุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่นั้นสามารถแบ่งเป็นคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นสั้น และคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาว

3.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่

ในปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าคุณสมบัติในส่วนนี้ของมู่ลี่นั้นได้มีการนำเสนอในหลายๆ รูปแบบจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [25-27] โดยแต่ละแบบจำลองนั้นก็มีการการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันคือ พิจารณาจากลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่เทียบกับมุม solar profile เป็นหลัก และค่าคุณสมบัติที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่ (ความกว้างของใบ ระยะห่างระหว่างใบ) และค่าการสะท้อนรังสีที่ผิวมู่ลี่ และคุณสมบัติของใบมู่ลี่ในช่วงความยาวคลื่นสั้น และในช่วงความยาวคลื่นยาว

ในการศึกษานี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนาโดย Chaiyapinunt, S. และ Worasinchai, S. [13] ที่ครอบคลุมถึงผลกระทบจากความโค้งและความหนาของใบมู่ลี่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาใบมู่ลี่เป็นแบบใบตรงและไม่มีความหนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้

1. มู่ลี่ทั้งชุดจะถูกแบ่งเป็นหน่วยย่อย ๆ วางซ้อนกันโดยแต่ละหน่วยย่อยจะประกอบไปด้วยใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ติดกัน
2. ทุก ๆ หน่วยย่อยที่ประกอบกันเป็นมู่ลี่นั้นมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบเดียวกัน ดังนั้นการพิจารณาเพียงแค่หนึ่งหน่วยย่อยก็สามารถใช้เป็นตัวแทน (representative) ของมู่ลี่ทั้งชุดได้ ซึ่งชุดมู่ลี่จะสามารถพิจารณาเป็นชั้นเสมือน (effective layer) ที่มีค่าคุณสมบัติทาง optic แบบคลื่นสั้น (solar-optical properties) ของมู่ลี่อยู่

3. ใบของมู่ลี่ที่พิจารณาจะมีความยาวมากกว่าความกว้างของใบมาก ทำให้ผลของขอบมู่ลี่มีไม่มากนักและสามารถพิจารณาเป็น 2 มิติได้

4. ในกรณีที่มีการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของมู่ลี่ซึ่งไม่คำนึงถึงตำแหน่งของรังสีที่ส่งผ่านเข้ามาว่าจะไปในทิศทางไหนบ้าง และสนใจเพียงแต่ปริมาณของรังสีที่ส่งผ่านเข้ามา จะเรียกแบบจำลองของมู่ลี่ที่ใช้สมมติฐานในลักษณะนี้ว่าแบบจำลองแบบ 1 มิติ (one-dimensional slat-type blind model)

5. ใบมู่ลี่จะถูกสมมติให้มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบกระจายแบบสมบูรณ์ (perfectly diffuse)

3.3.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่

รังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบระบบกระจกจะประกอบด้วยรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย เมื่อรังสีทั้ง 2 ชนิดมาตกกระทบใบมู่ลี่ รังสีแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนทิศทางไปในลักษณะที่ต่างกัน

กรณีของรังสีแบบตรงมาตกกระทบมู่ลี่จะมีการส่งรังสีผ่านมู่ลี่แยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. รังสีแบบตรงที่มาตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก และลอดผ่านใบมู่ลี่เข้ามาสู่ด้านในของอาคารเลย (direct transmittance)

2. รังสีแบบตรงที่เข้ามาตกกระทบใบมู่ลี่และเกิดการสะท้อนที่ใบมู่ลี่ (direct-reflected transmittance)

กรณีของรังสีแบบกระจายมาตกกระทบใบมู่ลี่จะมีการส่งผ่านมู่ลี่แยกออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน ได้แก่

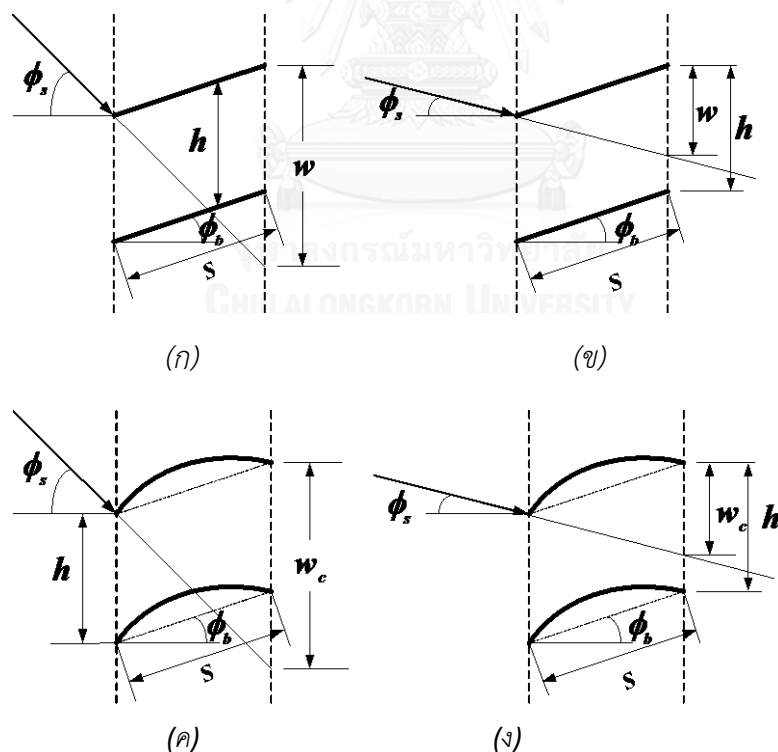
1. รังสีแบบกระจายที่มาตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก และลอดผ่านระหว่างใบมู่ลี่เข้ามาสู่ด้านในของอาคารเลย (diffuse transmittance)

2. รังสีแบบกระจายที่มาตกกระทบระบบกระจกและเกิดการสะท้อนที่ใบมู่ลี่ (diffuse-reflected transmittance)

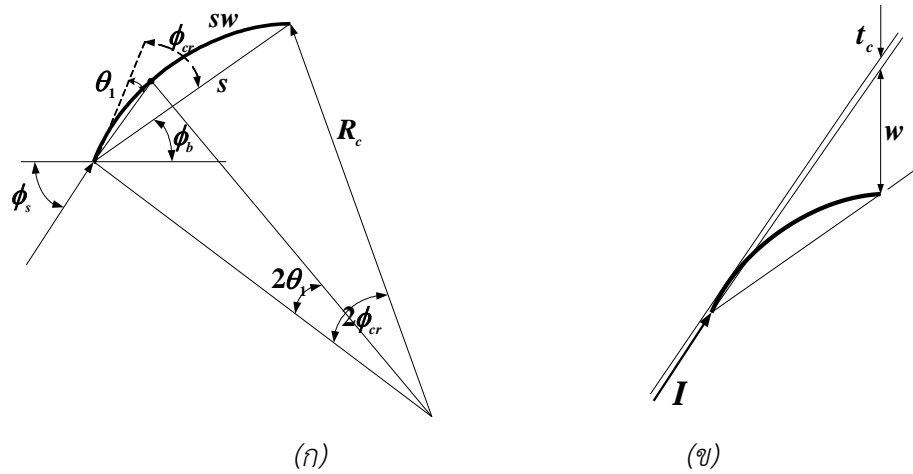
3.3.1.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรง

การวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบตรงนั้นจะซับซ้อนกว่าการวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบกระจาย กล่าวคือ รังสีแบบตรงจะเข้ามากระทบกับมู่ลี่ที่ทิศทางอันหนึ่ง โดยที่การส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนที่ใบมู่ลี่นั้นจะมีค่าเท่าใดจะต้อง

ทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาทิศของรังสีที่ตกกระทบเทียบกับทิศทางของใบมู่ลี่ด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบกระจายนั้นจะกำหนดให้รังสีแบบกระจายเข้ามาตกกระทบระบบกระจกในทุกทิศทาง ดังนั้นค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนที่ใบมู่ลี่ของรังสีส่วนนี้นั้นจึงจะขึ้นอยู่กับมุมเอียงของมู่ลี่เป็นสำคัญ รูปที่ 3.6 จะแสดงถึงการตกกระทบของรังสีบนใบมู่ลี่แบบใบตรงและแบบใบโค้งในลักษณะที่ต่างกัน ในรูปที่ 3.6 (ก) (ค) แสดงถึงการที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในมุม solar profile ที่ทำให้ไม่มีส่วนของรังสีสามารถส่งผ่านลอดช่องว่างของใบมู่ลี่โดยตรงได้ รังสีที่ตกกระทบใบมู่ลี่จะต้องสะท้อนไปมาแล้วถึงส่งผ่านออกจากใบมู่ลี่อีกที ในขณะที่รูปที่ 3.6 (ข) (ง) จะแสดงถึงการที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในมุม solar profile ที่ทำให้มีบางส่วนของรังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านลอดช่องว่างของใบมู่ลี่โดยตรงได้ ดังนั้นใบมู่ลี่จะมีลักษณะในการบังแสงอาทิตย์แตกต่างกันไป และในรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าการมีส่วนโค้งและความหนาของใบมู่ลี่จะมีผลต่อการบังแสงอาทิตย์ต่างกัน ซึ่งก็จะส่งผลให้มีค่าการส่งผ่านรังสีของชุดมู่ลี่แตกต่างกันไป รูปที่ 3.7 แสดงถึงลักษณะของการบังแสงอาทิตย์เพิ่มเติมของมู่ลี่ใบโค้งเมื่อเปรียบเทียบกับใบมู่ลี่ใบตรง



รูปที่ 3.6 รูปร่างของใบมู่ลี่แบบใบตรงและใบโค้งและมุมที่เกี่ยวข้อง [13]



รูปที่ 3.7 ผลของความโค้งของไบมู่ลี่ที่มีต่อการบังแสงอาทิตย์ในมุมเฉพาะบางตำแหน่ง[13]

การบังกันของมู่ลี่ต่อรังสีแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีรังสีส่วนหนึ่งของมู่ลี่ผ่านออกไปโดยไม่กระทบไบมู่ลี่ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 (ข) และ (ง) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตเป็น

$$w = s \cdot \frac{\sin(\phi_s + \phi_b)}{\cos \phi_s} \quad \text{เมื่อ } |w| \leq h \quad (3.94)$$

เมื่อ w คือ ระยะที่บังรังสีจากไบมู่ลี่ชนิดใบตรง, m

s คือ ค่าความกว้างของไบมู่ลี่ชนิดใบตรง, m

ϕ_s คือ ค่ามุม solar profile, $^{\circ}$

ϕ_b คือ มุมบิดของไบมู่ลี่, $^{\circ}$

h คือ ค่าระยะห่างของไบมู่ลี่สองใบที่อยู่ชิดกัน, m

ในกรณีที่ไบมู่ลี่เป็นใบแบบโค้ง จะมีกรณีเฉพาะเมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบไบมู่ลี่บางตำแหน่ง ความโค้งของไบมู่ลี่จะส่งผลให้เกิดการบังเพิ่มเติมขึ้นจากกรณีของมู่ลี่แบบใบตรง ดังนั้นการบังรังสีแสงอาทิตย์จากมู่ลี่ใบโค้งซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 สามารถกำหนดได้โดยการนิยามค่ามุมวิกฤติที่ส่งผลต่อการบังจากความโค้งของไบมู่ลี่ที่ต่างจากไบมู่ลี่ใบตรงเป็น

$$\phi_{cr} = \sin^{-1} \left[\frac{s}{2R_c} \right] \quad \text{เมื่อ } |w| \leq h \quad (3.95)$$

เมื่อ ϕ_{cr} คือ ค่ามุมวิกฤติ, $^{\circ}$

s คือ ค่าความกว้างของไบมู่ลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ, m

R_c คือ รัศมีความโค้งของไบมู่ลี่, m

h คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่, m

ผลของความโค้งของใบมู่ลี่จะก่อให้เกิดการบังเพิ่มเติมต่อเมื่อขนาดผลรวมของมุม solar profile กับมุมบิดของใบมู่ลี่มีค่าน้อยกว่าค่ามุมวิกฤติที่นิยามไว้ในสมการที่ (3.95) ซึ่งเงื่อนไขของการบังเพิ่มเติมจากความโค้งของใบสามารถเขียนได้เป็น

$$|\phi_s + \phi_b| < \phi_{cr} \quad (3.96)$$

และระยะบังเพิ่มเติมจากความโค้งของใบสามารถเขียนได้เป็น

$$t_c = R_c (1 - \cos \theta_1) / \cos \phi_s \quad (3.97)$$

และ $t_c = 0$ เมื่อ $|\phi_s + \phi_b| \geq \phi_{cr}$ (3.98)

$$\theta_1 = \phi_{cr} - |\phi_s + \phi_b| \quad \text{เมื่อ } |\phi_s + \phi_b| < \phi_{cr} \quad (3.99)$$

เมื่อ t_c คือ ระยะบังเพิ่มเติมจากความโค้งของใบมู่ลี่, m

θ_1 คือ มุมที่นิยามตามสมการที่ (3.99), $^\circ$

ดังนั้น ค่าการบังของรังสีแสงอาทิตย์จากใบมู่ลี่โค้งตามรูปที่ 3.6 (ง) สามารถเขียนได้เป็น

$$w_c = |w| + t_c \quad (3.100)$$

เมื่อ w_c คือ ระยะการบังรังสีของใบมู่ลี่โค้งในกรณีที่มีบางส่วนของรังสีทะลุออกมาโดยไม่กระทบกับใบมู่ลี่, m

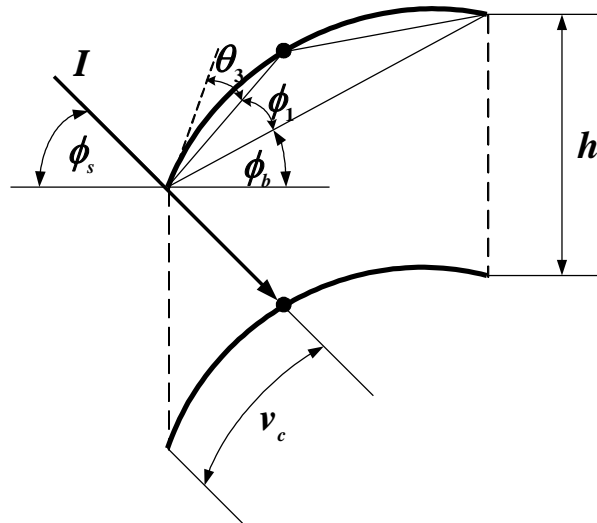
ในกรณีที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบใบมู่ลี่ในตำแหน่งที่ไม่มีส่วนใดของใบมู่ลี่สามารถทะลุออกมาโดยไม่กระทบใบมู่ลี่ตามรูปที่ 3.6 (ค) ระยะที่รังสีตกกระทบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์โดยอ้างอิงกับรูปที่ 3.8 เป็น

$$v_c = 2R_c \theta_3 \quad (3.101)$$

เมื่อ v_c คือ ความยาวของส่วนที่รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงบนใบมู่ลี่, m

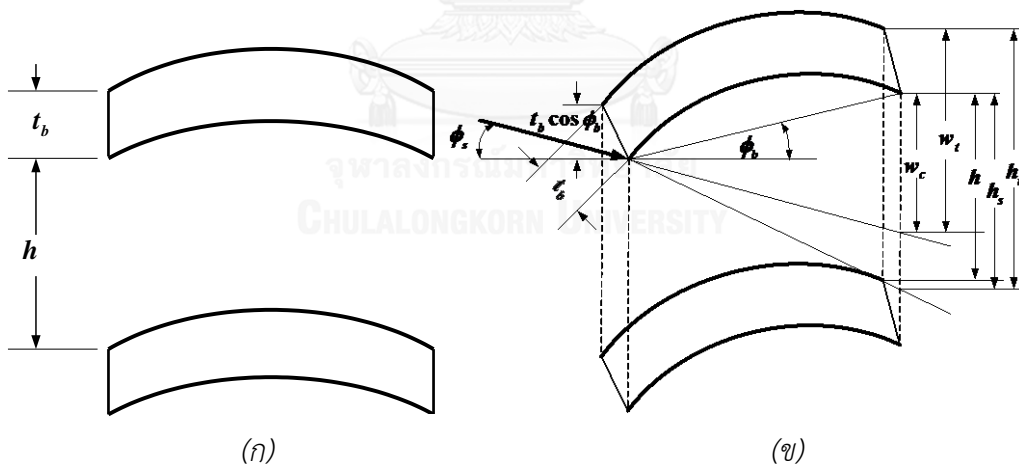
θ_3 คือ มุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของความโค้งของส่วนที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.102), $^\circ$

$$2R_c \sin \theta_3 \sin(\phi_{cr} - \theta_3 + \phi_s + \phi_b) = h \cos \phi_s \quad (3.102)$$



รูปที่ 3.8 รังสีตกกระทบบนใยมู่ลี่และมุมที่เกี่ยวข้อง

สำหรับผลของความหนาของใยมู่ลีนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยกำหนดให้ใยมู่ลี่มีความหนาเท่ากับ t_b และสันขอบของใยมู่ลี่ถูกสมมติให้ตั้งฉากกับใยมู่ลี่และทึบแสง และค่าการสะท้อนรังสีของใยมู่ลี่มีค่าเท่ากับค่าการสะท้อนรังสีของใยมู่ลี่ รูปที่ 3.9 แสดงถึงใยมู่ลี่โค้งที่มีความหนา 2 ใบในตำแหน่งมุมปิดเท่ากับ 0 องศา และในตำแหน่งมุมปิดมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 3.9 ลักษณะของใยมู่ลี่โค้งที่มีความหนาในตำแหน่งมุมปิดต่างๆ

ความหนาของใยมู่ลี่จะส่งผลให้ระยะการบังและระยะห่างระหว่างใยมู่ลี่ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมปิดของใยมู่ลี่ สามารถเขียนได้เป็น

$$w_t = w_c + t_b \cos \phi_b - t_b \sin \phi_b \tan \phi_s \quad (3.103)$$

$$h_t = h + t_b / \cos \phi_b \quad (3.104)$$

เมื่อ w_i คือ ระยะบังรังสีของใบมู่ลี่ที่รวมผลของความหนาของใบมู่ลี่เข้าไว้, m
 t_b คือ ความหนาของใบมู่ลี่, m
 h_i คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีใน
 ส่วนของรังสีตรงซึ่งมีส่วนที่รังสีทะลุออกจากมู่ลี่โดยไม่กระทบใบมู่ลี่, m

3.3.1.1.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ไม่
 ตกกระทบบนใบมู่ลี่

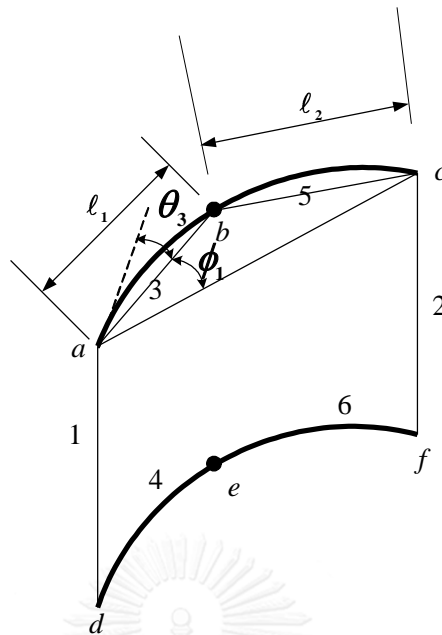
ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ไม่ตกกระทบ
 มู่ลี่จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f = 1 - \frac{w_i}{h_i} \quad \text{เมื่อ } w_i \leq h_i \quad (3.105)$$

เมื่อ $\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีจากรังสีตรงของมู่ลี่แบบใบโค้งที่มีความหนาในส่วนที่
 ไม่ตกกระทบมู่ลี่

3.3.1.1.1.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ตก
 กระทบบนใบมู่ลี่

การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีในส่วนที่รังสีมีการตกกระทบบน
 ใบมู่ลี่นั้นสามารถกระทำโดยสมมติให้ใบมู่ลี่มีคุณลักษณะทาง optic เป็นแบบกระจาย (diffuse) และ
 เพื่อความเรียบง่ายในช่วงแรกจะพิจารณามู่ลี่เป็นแบบใบโค้งที่ไม่มี ความหนา ใบมู่ลี่จะถูกแบ่งเป็น 2
 ส่วน ส่วนที่โดนรังสีกระทบ และส่วนที่ไม่โดนรังสีกระทบ การวิเคราะห์กระทำโดยอ้างอิงทฤษฎี
 radiosity แบบจำลองจะจำลองใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ชิดกันเป็นลักษณะส่วนรอบล้อมผิวปิดที่มีผนัง 6 ด้าน
 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีผิวจินตนาการ 2 ผิว อยู่ที่ส่วนด้านหน้าและด้านหลังของช่องว่างระหว่างใบ
 มู่ลี่



รูปที่ 3.10 ส่วนรอบล้อมปิด 6 ผิวที่ประกอบจากโบลีโค้ง 2 ใบที่อยู่ชิดกัน

จากส่วนล้อมรอบปิด 6 ผิว (ผิว s_1 ถึงผิว s_6) จะสามารถหาค่า view factor, F_{ij} (ค่า view factor ถูกนิยามเป็นส่วนส่วนของรังสีที่ออกจากผิว i ที่ไปตกกระทบบนผิว j) ได้จากความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับส่วนล้อมรอบจำนวน N ผิว

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.106)$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.107)$$

เมื่อ A_i, A_j คือ พื้นที่ของพื้นผิว i และ j, m^2

ค่า view factor ของผิวจำเพาะแต่ละผิวสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้วิธี Hottel's crossed string [28] ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$F_{ij} = \frac{\sum XS_{ij} - \sum US_{ij}}{2L_i} \quad (3.108)$$

เมื่อ XS_{ij} คือ ผลรวมของค่าเส้นไขว้ (crossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j, m

US_{ij} คือ ผลรวมของค่าที่ไม่เส้นไขว้ (uncrossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j, m

L_i คือ ความยาวที่วัดตามผิวโค้ง i, m

ตัวอย่างของการคำนวณค่า F_{ij} ของโบลีโค้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 เป็น

$$F_{35} = \frac{ab + bc - ac}{2L_3} \quad (3.109)$$

$$F_{36} = \frac{af + be - ae - bf}{2L_3} \quad (3.110)$$

ความยาวที่วัดตามผิวโค้งของผิวโค้งที่กำหนดไว้ในส่วนล้อมรอบปิดจะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} ab = L_3 = de = L_4 = v_c & \quad \text{เมื่อ} \quad v_c = 2R_c \theta_3 \\ bc = L_5 = ef = L_6 = sw - v_c \\ ad = L_1 = cf = L_2 = h \\ ac = df = s \\ af = \sqrt{(df \cos \phi_b)^2 + (h - df \sin \phi_b)^2} \\ cd = \sqrt{(df \cos \phi_b)^2 + (h + df \sin \phi_b)^2} \end{aligned} \quad (3.111)$$

$$bd = \sqrt{(h + l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2}$$

$$ae = \sqrt{(h - l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2}$$

$$bf = \sqrt{(h - l_2 \sin(\phi_b - \theta_3))^2 + (l_2 \cos(\phi_b - \theta_3))^2}$$

$$ce = \sqrt{(h + l_2 \sin(\phi_b - \theta_3))^2 + (l_2 \cos(\phi_b - \theta_3))^2}$$

เมื่อ sw คือ ความยาวของใบมู่ลี่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่, m
 s คือ ความยาวของใบมู่ลี่ที่ฉายแสงลงบนระนาบเรียบ (ระยะห่างจากด้านหน้าใบมู่ลี่ถึงปลายใบมู่ลี่), m
 h คือ ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบ, m
 R_c คือ รัศมีความโค้งของใบมู่ลี่, m
 ϕ_b คือ มุมบิดของใบมู่ลี่, $^\circ$
 ϕ_{cr} คือ ค่ามุมวิกฤติ, $^\circ$
 θ_3 คือ ค่าครึ่งหนึ่งของมุมที่กวาดครอบคลุมส่วนโค้งบนใบมู่ลี่ซึ่งโดนรังสีตกกระทบโดยตรงตามนิยามที่กำหนดในสมการที่ (3.101) และ (3.102), $^\circ$
 v_c คือ ความยาวของส่วนโค้งบนใบมู่ลี่ซึ่งโดนรังสีตกกระทบโดยตรง, m
 จากรูปร่างทางเรขาคณิตของส่วนล้อมรอบปิดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ค่า l_1 , l_2 , ϕ และ θ_3 จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} l_1 &= 2R_c \sin \theta_3 \\ l_2 &= 2R_c \sin(\phi_{cr} - \theta_3) = 2R_c \sin \phi \end{aligned} \quad (3.112)$$

$$\phi = \phi_{cr} - \theta_3$$

ในส่วนล้อมรอบแบบผิวปิด ค่า irradiation บนผิว i, G_i สามารถเขียนอยู่ในรูปผลบวกของค่า radiosity จากผิวที่เหลือที่ตกกระทบลงบนผิว i ได้เป็น

$$G_i = \sum_{j=1}^6 J_j F_{ji} \quad (3.113)$$

เมื่อ G_i คือ ค่า irradiation บนผิว $i, W/m^2$

J_j คือ ค่า radiosity จากผิว $j, W/m^2$

F_{ji} คือ ค่า view factor จากผิว j ไปยังผิว i

ค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิวจะเขียนได้เป็น

$$J_1 = Q_1$$

$$J_2 = Q_2$$

$$J_3 = Q_3 + \rho_{dif,dif}^b G_3 + \tau_{dif,dif} G_4$$

$$J_4 = Q_4 + \tau_{dif,dif} G_3 + \rho_{dif,dif}^f G_4 \quad (3.114)$$

$$J_5 = Q_5 + \rho_{dif,dif}^b G_5 + \tau_{dif,dif} G_6$$

$$J_6 = Q_6 + \tau_{dif,dif} G_5 + \rho_{dif,dif}^f G_6$$

เมื่อ Q_i คือ ค่า flux ของความร้อนจากพื้นผิว $i, W/m^2$

$\tau_{dif,dif}$ คือ ค่าการส่งผ่านของใบมู่ลี่ (จะมีค่าเท่ากันทั้งผิวด้านหน้าและด้านหลังของใบมู่ลี่)

$\rho_{dif,dif}^b$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ด้านหลังใบ

$\rho_{dif,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ด้านหน้าใบ

และเนื่องจากพื้นผิวที่ 1 และ 2 เป็นช่องเปิดระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบไม่ใช่พื้นผิวจริงดังนั้นค่า radiosity และค่า flux ของความร้อนของพื้นผิว 1 และ 2 จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ พื้นผิวที่ 3 และ 4 เป็นพื้นผิวที่รังสีตกกระทบขึ้นกับว่ารังสีจะมาจากด้านบนหรือด้านล่าง ขนาดของพื้นผิวดังกล่าวจะขึ้นกับมุม solar profile และมุมบิดของใบมู่ลี่

เมื่อรังสีตกกระทบใบมู่ลี่จากด้านหน้า ($\phi_s \geq -\phi_b$) ค่า flux ของความร้อนจากผิว 3 และ 4 สามารถเขียนได้เป็น

$$Q_3 = \tau_{dir,dif} \quad (3.115)$$

$$Q_4 = \rho_{dir,dif}^f \quad (3.116)$$

เมื่อรังสีตกกระทบใบมู่ลี่จากด้านหลัง ($\phi_s < -\phi_b$) ค่า flux ของความร้อนจากผิว 3 และ 4 สามารถเขียนได้เป็น

$$Q_3 = \rho_{dir,dif}^b \quad (3.117)$$

$$Q_4 = \tau_{dir,dif} \quad (3.118)$$

สำหรับผิว 5 และ 6 ซึ่งเป็นผิวที่ไม่ได้รังสีแบบตรงตกกระทบโดยตรง ค่า flux ของความร้อนจากผิวเหล่านั้นสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_5 = Q_6 = 0 \quad (3.119)$$

จากที่ค่า irradiation ที่ผิว 1 และ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สมการที่ (3.113) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_k = \sum_{j=3}^6 J_j F_{jk} \quad (3.120)$$

เมื่อแทนค่า G_3 ถึง G_6 จากสมการที่ (3.114) ลงไปในสมการที่ (3.120) และจัดรูปใหม่เขียนอยู่ในรูปเมทริกส์ได้

$$[X] \cdot \{J_j\} = \{Q_j\} \quad (3.121)$$

$j = 3, 4, 5$ และ 6 เมทริกส์ $[X]$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_{dif,dif}^b F_{33} - \tau_{dif,dif} F_{34} & -\rho_{dif,dif}^b F_{43} - \tau_{dif,dif} F_{44} & -\rho_{dif,dif}^b F_{53} - \tau_{dif,dif} F_{54} & -\rho_{dif,dif}^b F_{63} - \tau_{dif,dif} F_{64} \\ -\tau_{dif,dif} F_{33} - \rho_{dif,dif}^f F_{34} & 1 - \tau_{dif,dif} F_{43} - \rho_{dif,dif}^f F_{44} & -\tau_{dif,dif} F_{53} - \rho_{dif,dif}^f F_{54} & -\tau_{dif,dif} F_{63} - \rho_{dif,dif}^f F_{64} \\ -\rho_{dif,dif}^b F_{35} - \tau_{dif,dif} F_{36} & -\rho_{dif,dif}^b F_{45} - \tau_{dif,dif} F_{46} & 1 - \rho_{dif,dif}^b F_{55} - \tau_{dif,dif} F_{56} & -\rho_{dif,dif}^b F_{65} - \tau_{dif,dif} F_{66} \\ -\tau_{dif,dif} F_{35} - \rho_{dif,dif}^f F_{36} & -\tau_{dif,dif} F_{45} - \rho_{dif,dif}^f F_{46} & -\tau_{dif,dif} F_{55} - \rho_{dif,dif}^f F_{56} & 1 - \tau_{dif,dif} F_{65} - \rho_{dif,dif}^f F_{66} \end{bmatrix} \quad (3.122)$$

ค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิวจะหาค่าได้โดยการทำ inverse เมทริกส์ในสมการที่ (3.121)

$$\{J_j\} = [X]^{-1} \{Q_j\} \quad (3.123)$$

ค่า irradiation บนพื้นผิว 1 และ 2 สามารถหาได้จาก

$$G_1 = \sum_{j=3}^6 J_j F_{j1} \quad (3.124)$$

$$G_2 = \sum_{j=3}^6 J_j F_{j2} \quad (3.125)$$

ดังนั้นสำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบบนใบมู่ลี่จากทางด้านหน้าในขนาดหนึ่งหน่วย ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงด้านหน้าในส่วนของรังสีที่ตกกระทบจะ มีค่าเท่ากับค่า irradiation บนผิว 2 ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$\tau_{bl-c,dir,dif}^f = G_2 \quad (3.126)$$

เมื่อ $\tau_{bl-c,dir,dif}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจาย (ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงด้านหน้าในส่วนของรังสีที่ตกกระทบ) ของชั้นเสมือน ในทำนองเดียวกันค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของชั้นเสมือนจะมีค่าเท่ากับค่า irradiation บนผิว 1 ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-c,dir,dif}^f = G_1 \quad (3.127)$$

เมื่อ $\rho_{bl-c,dir,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายของชั้นเสมือน และค่าการดูดกลืนรังสีของชั้นเสมือนก็สามารถหาได้จาก

$$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-c,dir,dif}^f - \rho_{bl-c,dir,dif}^f \quad (3.128)$$

เมื่อ $\alpha_{bl-c,dir,dif}^f$ เป็นค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายของชั้นเสมือน

ในกรณีที่มู่ลี่มีมุมปิดอยู่ในตำแหน่งที่เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบแล้ว มีรังสีแบบตรงบางส่วนสามารถลอดทะลุมู่ลี่ออกไปด้านหลังโดยไม่ตกกระทบใบมู่ลี่เลยนั้น ใบมู่ลี่ตลอดทั้งใบจะรับรังสีส่วนที่เหลือทั้งหมด ดังนั้นส่วนล้อมรอบปิดที่ใช้พิจารณาจะเปลี่ยนจาก 6 ผิวเป็นแบบ 4 ผิว และค่าคุณสมบัติเชิง optic ในส่วนที่รังสีมีการสะท้อนไปมาระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบยังคงเหมือนเดิมโดยเปลี่ยนส่วนล้อมรอบปิดจาก 6 ผิวเป็นแบบ 4 ผิว (ละทั้งผิว 5 และ 6 ผิว 3 และ 4 จะคลุมเต็มความยาวของใบมู่ลี่) และค่าคุณสมบัติเชิง optic ในสมการที่ (3.126) ถึง (3.127) จะคำนวณโดยอ้างอิงกับสัดส่วนของค่ารังสีแบบตรงขนาดหนึ่งหน่วยที่ตกกระทบ (หักส่วนที่ผ่านทะลุออกไปโดยไม่กระทบใบมู่ลี่) ท้ายสุดค่าการดูดกลืนรังสีทางด้านหน้าของชั้นเสมือนจะมีค่าเป็น

$$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-c,dir,dif}^f - \rho_{bl-c,dir,dif}^f - \rho_{bl-c,dir,dif}^f \quad (3.129)$$

จากนั้นผลของความหนาของใบมู่ลี่จะถูกหาพิจารณาเพิ่มเติม เมื่อพิจารณารูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบในตำแหน่งต่างกันในรูปแบบที่ 3.8 จะเห็นว่ามันจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมปิดและมีความซับซ้อนมากพอควร และเนื่องจากขนาดความหนาของใบมู่ลี่มีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ ดังนั้นแทนที่จะใช้รูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาทำการศึกษาวิเคราะห์ซึ่งจะมีค่าแปรเปลี่ยนและไม่ต่างกับช่องว่างในใบมู่ลี่โค้งที่ไม่มีความหนามากนัก ในการศึกษา

นี่จึงเลือกใช้รูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบที่ประกบกันเป็นส่วนล้อมรอบผิวปิดแบบเดียวกับของใบมู่ลี่โค้งที่ไม่มีความหนา แต่ทำการแก้ไขผลของการวิเคราะห์ด้วยค่า correction factor ซึ่งพัฒนาโดย EnergyPlus, 2005 [12] แทน ค่า correction factor สามารถเขียนโดยอ้างอิงกับรูปที่ 3.8 ได้เป็น

$$bf = \frac{t_b \cos(\phi_b + \phi_s)}{\left(h + \frac{t_b}{\cos \phi_b}\right) \cos \phi_s} \quad (3.130)$$

เมื่อ bf คือ ค่า correction factor ของสันของใบมู่ลี่

ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายที่คิดผลของความหนาจะเขียนใหม่ได้

$$\tau_{bl-ct,dir,dif}^f = \tau_{bl-c,dir,dif}^f (1-bf) \quad (3.131)$$

เมื่อ $\tau_{bl-ct,dir,dif}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง - กระจายที่คิดผลของความหนา

ค่าการสะท้อนรังสีและค่าการดูดกลืนรังสีของมู่ลี่ใบโค้งพร้อมความหนาจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-ct,dir,dif}^f = \rho_{bl-c,dir,dif}^f (1-bf) + \rho_{dif,dif}^f (bf) \quad (3.132)$$

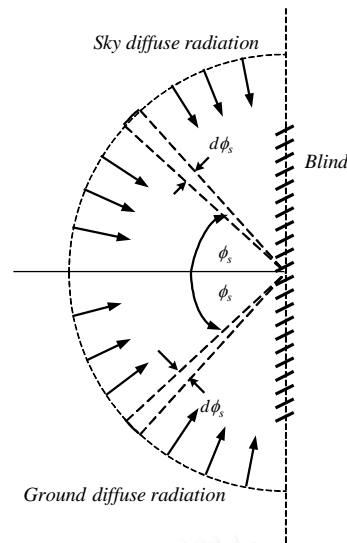
$$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-ct,dir,dif}^f - \tau_{bl-ct,dir,dif}^f - \rho_{bl-ct,dir,dif}^f \quad (3.133)$$

เมื่อ $\rho_{bl-ct,dir,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบตรง

$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$ คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบตรง

3.3.1.1.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบกระจาย

ในกรณีที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายตกกระทบใบมู่ลี่นั้น เนื่องจากรังสีแบบกระจายมาจากทุกทิศทาง ทั้งมาจากด้านบน (ซึ่งจะกำหนดเป็นส่วนที่มาจากท้องฟ้า (sky)) และที่มาจากด้านล่าง (ซึ่งจะกำหนดเป็นส่วนที่สะท้อนมาจากพื้นดิน (ground)) ดังนั้น คุณสมบัติทาง optic ที่มาจากรังสีแบบกระจายจึงสามารถแบ่งเป็นส่วนที่มาจากท้องฟ้า และส่วนที่มาจากพื้นดิน ค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ที่มาจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะสามารถหาได้จากการอินทิเกรตคุณสมบัติทาง optic ที่มาจากรังสีแบบตรงในแต่ละทิศทางให้ครอบคลุมส่วนย่อยของท้องฟ้าและพื้นดินซึ่งมีการกระจายตัวแปรตามมุม solar profile ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การกระจายตัวของส่วนย่อยของรังสีแบบกระจายที่ตกกระทบบนมู่ลี่

ค่าการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\tau_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} [\tau_{bl-ct,dir,dir}^f(\phi_s) + \tau_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s)] I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.134)$$

$$\tau_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 [\tau_{bl-ct,dir,dir}^f(\phi_s) + \tau_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s)] I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.135)$$

เมื่อ $\tau_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$\tau_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีทะลุผ่านมู่ลี่โดยไม่ตกกระทบบนมู่ลี่ ที่มีมุม solar profile ϕ_s

$\tau_{bl-ct,dir,dif}^f$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีตกกระทบบนมู่ลี่และสะท้อนไปมา ที่มีมุม solar profile ϕ_s

I_{sky} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า, W/m^2

I_{gnd} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน, W/m^2

ค่าการสะท้อนรังสีและค่าการดูดกลืนของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho_{bl-ct,dif,dif}^f I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.136)$$

$$\rho_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \rho_{bl-ct,dif,dif}^f I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.137)$$

$$\alpha_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{bl-ct,dif,dif}^f I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.138)$$

$$\alpha_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \alpha_{bl-ct,dif,dif}^f I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.139)$$

เมื่อ $\rho_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$\rho_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\rho_{bl-ct,dif,dif}^f$ คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรง

$\alpha_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ คือ ค่าดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$\alpha_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ คือ ค่าดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\alpha_{bl-ct,dif,dif}^f$ คือ ค่าดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรง

I_{sky} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า,

W/m^2

I_{gnd} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน,

W/m^2

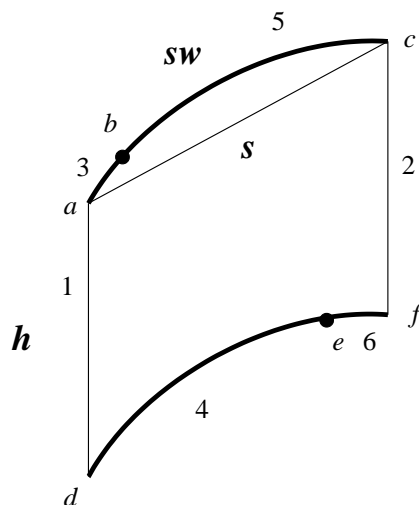
3.3.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic คลื่นยาวของมูลี

เนื่องจากมูลีนั้นมีลักษณะเป็นใบวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ และการแผ่รังสีคลื่นยาวถึงแม้ว่าจะมีความถี่ต่ำก็สามารถส่งผ่านได้โดยผ่านช่องระหว่างใบเหล่านี้ ซึ่งแตกต่างกับกรณีของกระจกที่เป็นเนื้อกระจก และการแผ่รังสีคลื่นยาวไม่สามารถที่จะส่งผ่านได้ นอกจากนั้นค่าคุณสมบัติคลื่นยาวของมูลียังคงแปรตามค่าการสะท้อนที่ผิวมูลี และมุมบิดของมูลีอีกด้วย

ดังนั้นเพื่อเป็นการคำนวณหาคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ เหล่านี้ เพื่อให้เป็นระนาบเสมือนประกอบเข้าไปกับระบบหน้าต่างกระจก จึงได้ทำการจำลองให้มูลีนั้นประกอบไปด้วยพื้นผิวปิดหลาย ๆ ผิว ที่วางซ้อน ๆ กันอยู่ โดยแต่ละพื้นผิวปิดจะประกอบไปด้วยมูลีสองใบ และพื้นผิวที่แทนอากาศด้านหน้า และด้านหลัง โดยจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ

1. ทุก ๆ พื้นผิวปิดนั้น มีลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมือนกัน ดังนั้น การพิจารณาพื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยสามารถใช้เป็นตัวแทนของมูลีรวมทั้งหมดได้
2. ในแต่ละพื้นผิวปิดนั้น พื้นผิวต่าง ๆ นั้นที่ประกอบกันเป็นพื้นผิวปิด มีค่าคุณสมบัติการสะท้อน การเปล่งรังสีคลื่นยาว และค่าอุณหภูมิที่คงที่ตลอดพื้นผิว
3. มูลีมีความยาวมากกว่าความกว้างมูลีมาก และเกิดการแลกเปลี่ยนรังสีในแบบ 2 มิติ
4. แต่ละพื้นผิวในพื้นผิวปิดมีลักษณะเป็นแบบใบโค้ง

จากสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และทำวิเคราะห์แบบผิวปิดโดยให้พื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว [12] ดังแสดงในรูปที่ 3.12

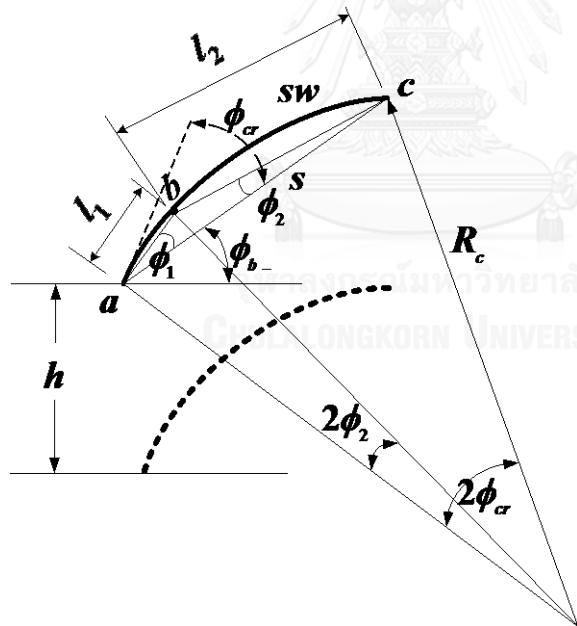


รูปที่ 3.12 ส่วนล้อมรอบปิด 6 พื้นผิวที่ประกอบขึ้นจากใบมูลี 2 ใบที่อยู่ชิดกัน

พื้นผิว 1 และ 2 เป็นผิวจินตนาการที่เป็นช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลัง ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบจะถูกกำหนดให้เป็น h ความยาวใบมู่ลี่วัดตามความโค้งจะถูกกำหนดให้เป็น sw ความยาวใบมู่ลี่วัดตามระนาบเรียบจะถูกกำหนดให้เป็น s ในกรณีที่ $h/s < 1$ เมื่อปิดใบมู่ลี่ไปในตำแหน่งปิดใบมู่ลี่จะซ้อนกัน ส่วนซ้อนกันจะถูกกำหนดเป็น ab และ ef เนื่องจากใบมู่ลี่เป็นใบแบบโค้งไม่ใช่ใบแบบตรง การหาระยะซ้อนกันของใบมู่ลี่จะมีความซับซ้อนมากกว่าในกรณีใบตรงมาก รูปที่ 3.13 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการหาค่าความยาวดังกล่าว ค่ามุมวิกฤติในกรณีของค่าคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาวจะถูกกำหนดเป็น

$$\phi_{crit} = \sin^{-1} \left[\frac{s}{2R_c} \right] \quad (3.140)$$

เมื่อ ϕ_{crit} คือ ค่ามุมวิกฤติในกรณีของค่าคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาว, °
 s คือ ค่าความยาวใบมู่ลี่วัดตามระนาบเรียบ, m
 R_c คือ ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่, m



รูปที่ 3.13 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของใบมู่ลี่โค้ง

และจากรูปร่างทางเรขาคณิตที่แสดงในรูปที่ 3.13 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$sw = 2R_c \phi_{crit} \quad (3.141)$$

$$\phi_1 = \phi_{crit} - \phi_2 \quad (3.142)$$

เมื่อ sw คือ ค่าความยาวใบมู่ลี่วัดตามความโค้ง, m

ϕ_2 คือ ค่าครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของส่วนโค้งของผิว bc , °

ϕ_1 คือ ค่าครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของส่วนโค้งของผิว ab , °

ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบสามารถเขียนได้เป็น

$$l_1 = 2R_c \sin \phi_2 \quad (3.143)$$

$$l_2 = 2R_c \sin \phi_1 \quad (3.144)$$

เมื่อ l_1 คือ ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว ab , m

l_2 คือ ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว bc , m

ความสัมพันธ์ของมุม ϕ_1 และ ϕ_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$\sin \phi_1 \cos \phi_2 = \frac{h}{2R_c} \quad (3.145)$$

เมื่อ h คือ ค่าระยะห่างระหว่างใบมีดสองใบ, m

และจะได้

$$\sin(\phi_{cr} - \phi_2) \cos \phi_2 = \frac{h}{2R_c} \quad (3.146)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.125) จะสามารถหาค่ามุม ϕ_2 ด้วยกระบวนการทำซ้ำ จากนั้นก็จะสามารถกำหนดจุด a และ b ลงบนมุมสี่ใบโค้งได้

ในการหาค่าคุณสมบัติทาง optic ในช่วงความยาวคลื่นยาว จำเป็นต้องใช้ค่า view factor F_{ij} เช่นเดียวกับในตอนหาค่าคุณสมบัติทาง optic ในช่วงความยาวคลื่นสั้น ค่าความยาวที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในการหาค่า view factor มีดังนี้

$$ab = ef = 2R_c \phi_2$$

$$bc = de = 2R_c \phi_1$$

$$ad = cf = h$$

$$l_1 = 2R_c \sin \phi_2$$

$$l_2 = 2R_c \sin \phi_1$$

$$af = \sqrt{(s \cos \phi_b)^2 + (h - s \sin \phi_b)^2} \quad (3.147)$$

$$cd = \sqrt{(s \cos \phi_b)^2 + (h + s \sin \phi_b)^2}$$

$$bd = \sqrt{(h + l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2}$$

$$ce = \sqrt{(h - l_1 \sin(\phi_1 - \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 - \phi_b))^2}$$

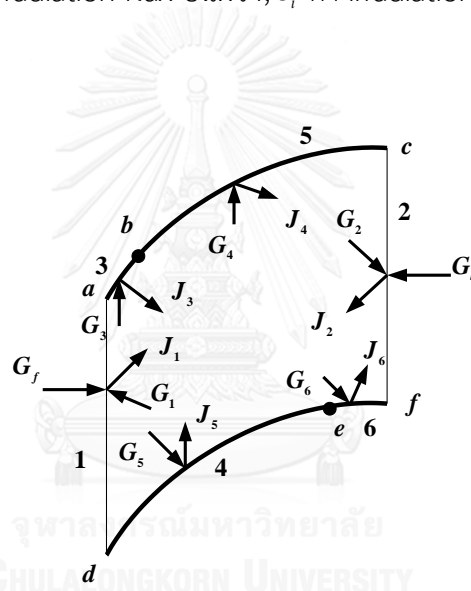
$$bf = \sqrt{(h - l_2 \sin(\phi_b - \phi_2))^2 + (l_2 \cos(\phi_b - \phi_2))^2}$$

$$ae = \sqrt{(h + l_2 \sin(\phi_2 + \phi_b))^2 + (l_2 \cos(\phi_2 + \phi_b))^2}$$

$$be = \sqrt{(h + l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b) - l_2 \sin(\phi_2 + \phi_b))^2 + (l_2 \cos(\phi_2 + \phi_b) - l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2}$$

$$de = \sqrt{(l_2 \sin(\phi_2 + \phi_b))^2 + (l_2 \cos(\phi_2 + \phi_b))^2}$$

ค่าคุณสมบัติทาง optic แบบความยาวคลื่นยาวนั้นสามารถหาค่าได้โดยใช้วิธี radiosity กับ ส่วนล้อมรอบแบบปิด 6 พื้นผิว ในลักษณะเดียวกับที่ Yahoda, D.S. and Wright, J.L. [29] วิเคราะห์กับมู่ลี่แบบใบเรียบ แต่ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ส่วนล้อมรอบแบบปิดชนิด 6 ผิวตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ทำการหาค่า irradiation flux บนผิว i, G_i ค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 มู่ลี่พร้อมทั้งค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิว

ค่าการเปล่งรังสีแบบคลื่นยาว ค่าการสะท้อนรังสีแบบคลื่นยาว ค่าการส่งผ่านรังสีแบบคลื่นยาว และค่าการดูดกลืนรังสีแบบคลื่นยาวสามารถเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_{L-bl}^f = \frac{G_1}{\sigma T^4} \quad (3.148)$$

$$\varepsilon_{L-bl}^b = \frac{G_2}{\sigma T^4} \quad (3.149)$$

$$\rho_{L-bl}^f = \frac{G_1}{G_f} \quad (3.150)$$

$$\rho_{L-bl}^b = \frac{G_2}{G_b} \quad (3.151)$$

$$\tau_{L-bl}^f = \frac{G_2}{G_f} \quad (3.152)$$

$$\tau_{L-bl}^b = \frac{G_1}{G_b} \quad (3.153)$$

$$\alpha_{L-bl}^f = 1 - \frac{(G_1 + G_2)}{G_f} \quad (3.154)$$

$$\alpha_{L-bl}^b = 1 - \frac{(G_1 + G_2)}{G_b} \quad (3.155)$$

เมื่อ	ε_{L-bl}^f	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	ε_{L-bl}^b	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	ρ_{L-bl}^f	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	ρ_{L-bl}^b	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	τ_{L-bl}^f	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	τ_{L-bl}^b	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	α_{L-bl}^f	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	α_{L-bl}^b	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	G_f	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว1), W/m^2
	G_b	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหลังของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว2), W/m^2
	G_1	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1), W/m^2
	G_2	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2), W/m^2
	T	คือ ค่าอุณหภูมิของมวลี่, K

บทที่ 4

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ โดยจะเน้นพัฒนาการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น การคำนวณสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในส่วนของกรนำ และพาความร้อน จะสามารถแบ่งเป็นส่วนที่เป็นผลจากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย สำหรับส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะแบ่งเป็นรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นในสัดส่วนที่ต่างกันขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนของรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นนั้นๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่เป็นผลจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะเป็นค่าเฉลี่ยของส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น ซึ่งไม่ใช่ค่าสัดส่วนที่แท้จริงของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย เพื่อพัฒนาให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้มีความแม่นยำขึ้น จึงมีการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

4.1.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้น [30]

ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้ง (global vertical radiation) สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{gl.ver} = I_{DN} \cos \theta + \frac{I_{d,hor}}{2} + \frac{I_{gl,hor} \rho_g}{2} \quad (4.1)$$

เมื่อ $I_{gl.ver}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวตั้ง, W/m^2

I_{DN} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง, W/m^2

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์, °

$I_{d,hor}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, W/m^2

$I_{gl,hor}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวนอน, W/m^2

ρ_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน

ในขณะที่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน (global horizontal radiation) สามารถหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_{gl,hor} = I_{DN} \sin \theta + I_{d,hor} \quad (4.2)$$

เมื่อ $I_{gl,hor}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวนอน, W/m^2

สามารถแทนค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบในระนาบแนวนอน เพื่อลดจำนวนตัวแปรจากสมการที่ (4.2) ลงในสมการที่ (4.1) ได้ดังนี้

$$I_{gl,ver} = I_{DN} \cos \theta + I_{d,hor} \left(\frac{1 + \rho_g}{2} \right) + I_{DN} \sin \theta \frac{\rho_g}{2} \quad (4.3)$$

จากสมการการหาค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดในระนาบแนวตั้งในสมการที่ (4.3) พบที่สองเป็นผลของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย สามารถเขียนสมการแยกส่วนของรังสีแสงกระจายที่วัดในระนาบแนวตั้ง เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นในเงื่อนไขของ isotropic condition ได้ดังนี้

$$I_{d,sky} = \frac{I_{d,hor}}{2} \quad (4.4)$$

$$I_{d,grd} = \frac{I_{d,hor} \rho_g}{2} \quad (4.5)$$

เมื่อ $I_{d,sky}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า, W/m^2

$I_{d,grd}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น, W/m^2

4.1.2 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้น

การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้น สามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมและไม่ซับซ้อน คือ ใช้เครื่องวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ วัดค่าแสงอาทิตย์รวมในระนาบแนวนอนแบบหงาย และแบบคว่ำ เนื่องจาก ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

บนพื้น เป็นอัตราส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นต่อค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม [31, 32] ดังสมการต่อไปนี้

$$\rho_g = \frac{I_{gl,hor,grd}}{I_{gl,hor}} \quad (4.6)$$

เมื่อ $I_{gl,hor,grd}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นที่วัดในแนวระนาบแนวนอน, W/m^2

และสามารถหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าและรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น ได้ดังนี้

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าหาได้จาก

$$f_{sky} = \frac{I_{d,sky}}{I_d} \quad (4.7)$$

และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นหาได้จาก

$$f_{grd} = \frac{I_{d,grd}}{I_d} \quad (4.8)$$

เมื่อ f_{sky} คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า

I_d คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในระนาบแนวดิ่ง สามารถหาได้จากสมการที่ (4.9), W/m^2

f_{grd} คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในระนาบแนวดิ่ง ในการทดลองนี้จะเป็นผลรวมของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น สามารถหาได้ดังนี้

$$I_d = I_{d,sky} + I_{d,grd} \quad (4.9)$$

ในการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นทั้งสองตอน จะใช้เครื่องวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ติดตั้งบนขาตั้งในแบบต่างๆ ดังนี้

1. ติดตั้งในระนาบแนวนอนแบบหงายเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวระนาบ (global horizontal radiation)

2. ติดตั้งในระนาบแนวนอนแบบคว่ำเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน (reflected-ground global horizontal radiation)
3. ติดตั้งในระนาบแนวตั้งเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้ง (global vertical radiation)
4. ติดตั้งในระนาบแนวนอนพร้อมอุปกรณ์บังเงาเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse horizontal radiation)

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอนที่ได้จากเครื่องวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ จะนำมาคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นตามสมการที่ (4.6) หลังจากนั้นจะนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ได้นี้มาเป็นข้อมูลใส่ในสมการที่ (4.3) ร่วมกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง และมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ได้ผลเป็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวตั้ง แล้วนำมาตรวจสอบกับค่าที่วัดได้จริงจากเครื่องวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ต่อไป

การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น จะแบ่งสองตอน คือ ตอนแรกเป็นการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นบนดาดฟ้าของอาคาร โคลัมโบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจาก บริเวณดาดฟ้าของอาคารโคลัมโบ เป็นที่โล่ง มีการบังน้อย ทำให้การติดตั้งอุปกรณ์ทดลองทำได้ง่าย และพื้นบนดาดฟ้าเป็นคอนกรีต ซึ่งเป็นชนิดของพื้นผิวที่มีการศึกษามาก่อน สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแหล่งอ้างอิงอื่นได้ จึงเหมาะเป็นแนวทางในการทดลองในตอนต่อไปที่เป็นการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ เพื่อที่จะนำไปเป็นข้อมูลหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง เนื่องจาก พื้นที่ที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ เป็นบริเวณระเบียงของห้องทดลองซึ่งมีบริเวณแคบ และมีรั้วกันระเบียง โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นที่ได้จากการทดลองจะถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

และสามารถดูรายละเอียดการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดินในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น

สถานที่ทดลอง	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น, ρ_g	ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น, $I_{d,sky} : I_{d,grd}$
ตาดฟ้าของอาคารโคลัมโบ	0.53	0.65 : 0.35
ระเบียงของห้องทดลอง	0.05	0.95 : 0.05

จากการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน พบว่า ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้งที่วัดได้จากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งได้เป็น ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดินแล้วตกกระทบเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_{glo,ver} = I_D + I_d + I_{D,r} \quad (4.10)$$

เมื่อ I_D คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง, W/m^2

$I_{D,r}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดินแล้วตกกระทบเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์, W/m^2

นอกจากนี้ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นจะนำมาใช้ในการหาค่าปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจก ภายใต้สภาวะคงตัวนี้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า ค่าปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกจะสามารถหาได้จาก

$$Q_{abs,i} = A_i^{Hh} \cdot I_D \quad (3.37)$$

เมื่อ $Q_{abs,i}$ คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่ i , W/m^2

A_i^{FH} คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere

I_D คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบระบบกระจก, W/m^2

เพื่อให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการคำนวณใกล้เคียงการใช้งานจริงมากขึ้น ค่าปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกจะสามารถหาได้จาก

$$Q_{abs,i} = A_i^{FH} I_D + A_{d,sky}^{FH} f_{sky} I_d + A_{d,ref}^{FH} f_{grd} I_d + A_{i,ref}^{FH} I_{D,r} \quad (4.11)$$

เมื่อ $A_{d,sky}^{FH}$ คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

f_{sky} คือ ค่าสัดส่วนของการกระจายรังสีแสงอาทิตย์บนท้องฟ้า

I_d คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

$A_{d,ref}^{FH}$ คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

f_{grd} คือ ค่าสัดส่วนของการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน

$A_{i,ref}^{FH}$ คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดินของชั้นที่ i

และสามารถค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ได้ดังนี้

$$q = U \cdot (T_{out} - T_{in}) + (SHGC_D) \cdot I_{DN} \cdot \cos \theta + (SHGC_{d,sky}) \cdot f_{sky} \cdot I_d + (SHGC_{d,ref}) \cdot f_{grd} \cdot I_d + (SHGC_{D,r}) \cdot I_{D,r} \quad (4.12)$$

เมื่อ q คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/(m^2 \cdot K)$

T_{out} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, K

T_{in} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, K

$SHGC_D$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง

$SHGC_{d,sky}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$SHGC_{d,ref}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$SHGC_{D,r}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน

4.2 การพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่

โดยทั่วไป ใยมู่ลี่จะผลิตจากโลหะ เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีสภาพนำความร้อนสูง (ใยมู่ลี่ที่ใช้ในการทดลองมีค่าสภาพนำความร้อนเป็น $120 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเกาส์สภาพนำความร้อนของมู่ลี่จะใช้สภาพนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ผลิตใยมู่ลี่ในการคำนวณ แต่ในความเป็นจริง

เป็นจริงแล้ว วิธีการคำนวณวิธีนี้จะสามารถใช้ได้เมื่อมุมบิดของมู่ลี่เป็น 90 องศา การปรับมุมบิดมู่ลี่เป็นมุมอื่นๆ จะทำให้เกิดช่องว่างอากาศ ส่งผลให้สภาพนำความร้อนของมู่ลี่ ไม่ได้มาจากใบมู่ลี่เท่านั้น แต่จะเป็นผลของใบมู่ลี่ และอากาศระหว่างใบมู่ลี่

Laouadi, A. [33] ได้เสนอแบบจำลองในการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ประสิทธิภาพ โดยจะพิจารณาปริมาตรควบคุมของใบมู่ลี่และอากาศดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นปริมาตรควบคุมย่อยที่พิจารณาชั้นเสมือนของมู่ลี่เฉพาะช่วงใบมู่ลี่ที่อยู่ติดกันสองใบ และสามารถหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างสภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่ และอากาศ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$k_{eff} = (1 - \omega) \cdot k_b + \omega \cdot k_{air} \quad (4.13)$$

เมื่อ k_{eff} คือ สภาพนำความร้อนประสิทธิภาพของใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$

ω คือ ค่าความพรุน (porosity) ของชั้นมู่ลี่

k_b คือ สภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$

k_{air} คือ สภาพนำความร้อนของอากาศระหว่างใบมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$

โดยค่าความพรุนของชั้นมู่ลี่เป็นผลจากการพิจารณาลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่ ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega = 1 - \frac{(1 - \varphi_s)L_s t_s}{L_p \cdot (h + t_s)} \quad (4.14)$$

เมื่อ φ_s คือ ค่า openness factor ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของพื้นที่ผิวที่เปิดต่อพื้นที่ผิวทั้งหมดของชั้นมู่ลี่ที่พิจารณาตามปริมาตรควบคุมย่อยในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.15)

L_s คือ ความยาวที่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่, m

t_s คือ ความหนาของใบมู่ลี่, m

L_p คือ ค่าความกว้างของปริมาตรควบคุมย่อยของชั้นมู่ลี่ที่พิจารณา, m

h คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่, m

$$\varphi_s = 1 - \frac{d}{h \cdot \cos \phi_b} \quad (4.15)$$

เมื่อ d คือ ระยะที่นิยามตามรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.16)

ϕ_b คือ มุมบิดของใบมู่ลี่, $^\circ$

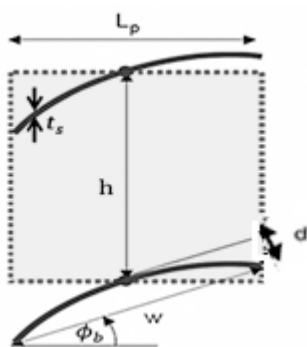
$$d = (R_c - (R_c \cdot \cos(\phi_{cr}))) + t_s \quad (4.16)$$

เมื่อ R_c คือ รัศมีความโค้งของใบมู่ลี่, m

ϕ_{cr} คือ ค่ามุมวิกฤติ, ° คำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.14)

$$\phi_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{S}{2R_c}\right) \quad (4.17)$$

เมื่อ S คือ ค่าความกว้างของใบมู่ลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ, m



รูปที่ 4.1 ปริมาตรควบคุมย่อยของชั้นมู่ลี่และการนิยามตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาเพื่อหาสภาพนำความร้อนประสิทธิผลของมู่ลี่[33]

4.3 การพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่าจะใช้แบบจำลองที่เสนอโดย Finlayson, E.U. [1] ซึ่งเสนอเมื่อ 20 ปีก่อน แต่ในปัจจุบัน มีงานวิจัยหลายงานที่พัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละส่วนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เพื่อพัฒนาให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้มีความแม่นยำขึ้น จึงมีการพัฒนาแบบจำลองในส่วนนี้ ในแบบจำลองที่พัฒนา การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะแบ่งการพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 5 กรณี ได้แก่

1. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก
2. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก
3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่
4. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร
5. สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคารที่เพิ่มเข้ามา จะส่งผลต่อการพิจารณาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม และทำให้ค่าอนุพันธ์ของ $\partial\Delta_i/\partial T_j$ ในการหาค่าความร้อนคงเหลือเปลี่ยนไปเช่นกัน

4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

การพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะเน้นการพัฒนาในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร

4.3.1.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

จากศึกษาและการทดลองที่ผ่านมา พบว่า การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศภายนอก ทิศทางของอาคาร และผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศภายนอกและผิวกระจก สามารถหาได้จากแบบจำลอง MoWiTT ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Yazdanian, M. และ Klems, J.H. [16]

$$h_{c,out} = \sqrt{[c_r [\Delta T]^{1/3}]^2 + [av^b]^2} \quad (4.18)$$

เมื่อ $h_{c,out}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก, $W/(m^2 \cdot K)$
 c_r คือ ค่าคงที่การพาความร้อนแบบธรรมชาติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent natural convection constant) โดยจะมีค่าแสดงในตารางที่ 4.2,
 $W/(m^2 \cdot K^{4/3})$

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศภายนอกและผิวกระจกด้านนอก

a และ b คือ ค่าคงที่ที่แสดงในตารางที่ 4.2

v คือ ความเร็วของกระแสลมอิสระวัดที่ความสูง 10 เมตร

ค่าคงที่การพาความร้อนแบบธรรมชาติสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน และค่าคงที่ a และ b จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละทิศทางของอาคาร ได้แก่ ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม และด้านอาคารที่อยู่ใต้ลม ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่ของแบบจำลอง MoWITT

ทิศทางของอาคาร	$c, W/(m^2 \cdot K^{4/3})$	$a, W/(m^2 K(m/s)^b)$	b
ด้านของอาคารอยู่ต้นลม	0.84±0.015	2.38±0.036	0.89±0.009
ด้านของอาคารอยู่ใต้ลม	0.84	2.86±0.098	0.617±0.017

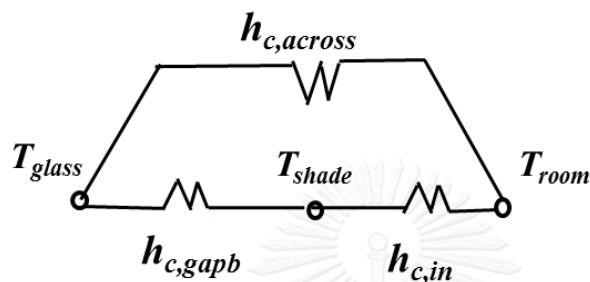
4.3.1.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่มีความซับซ้อน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ส่งผลให้ในแบบจำลองแบบเก่าจะพิจารณาช่องว่างระหว่างกระจกกับมู่ลี่เหมือนกับช่องว่างระหว่างกระจก แต่ในความเป็นจริง มู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาที่มีรูพรุน อากาศสามารถไหลผ่านมู่ลี่ได้ จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนนี้

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า EnergyPlus [12] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับอุปกรณ์บังเงา โดยพิจารณาการไหลของอากาศที่ไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบนของช่องระหว่างหน้าต่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงา และใช้สมดุลความดัน (pressure balance) ของการไหลของอากาศผ่านช่องว่างระหว่างหน้าต่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงาเพื่อหาค่าความเร็วของอากาศที่ไหลในช่องว่างระหว่างกระจกกับอุปกรณ์บังเงา แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาเป็นแบบจำลองที่ใช้หลักการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 มิติในการพิจารณาระบบหน้าต่างกระจก นั่นคือ จะพิจารณาเฉพาะความร้อนที่ไหลในแนวขวางเพียงแนวเดียว ในขณะที่แบบจำลองของ EnergyPlus จะเป็นการพิจารณาความร้อนทั้งแนวขวาง และแนวตั้ง ทำให้ไม่สามารถใช้แบบจำลองของ EnergyPlus ได้

Wright, J.L. [17] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคาร ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร โดยพิจารณาให้อุปกรณ์บังเงามีลักษณะเป็น diathermanous layer อากาศจึงสามารถไหลผ่านอุปกรณ์บังเงาได้ ทำให้โครงข่ายความต้านทานความร้อนในส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคารมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.2 เมื่อ T_{room} คืออุณหภูมิของอากาศภายในอาคาร T_{shade} คืออุณหภูมิผิวของมู่ลี่

และ T_{glass} คืออุณหภูมิผิวกระจก ซึ่งแบบจำลองนี้เป็นการพิจารณาสมดุลของพลังงานใน 1 มิติ เช่นเดียวกับแบบจำลองที่พัฒนา และทำให้ค่าที่ทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร จึงใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Wright, J.L. [17]



รูปที่ 4.2 โครงข่ายความต้านทานความร้อนที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวที่สัมผัสกับอากาศภายในอาคารที่เสนอโดย Wright, J.L. [17]

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$h_{c,gapb} = \frac{k_{air}}{b} \quad (4.19)$$

เมื่อ $h_{c,gapb}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่, $W/(m^2 \cdot K)$

k_{air} คือ สภาพนำความร้อนของอากาศระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่, $W/(m \cdot K)$

b ระยะห่างระหว่างผิวกระจกกับชั้นเสมือนของมู่ลี่ คือ, m

4.3.1.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

เมื่อพิจารณาให้มู่ลี่เป็นวัสดุที่มีรูพรุน อากาศสามารถไหลผ่านได้ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างมู่ลี่กับผิวกระจกด้านใน และมุมบิดของมู่ลี่ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Wright, J.L.[17] ดังนี้

$$h_{c,in} = h_c \left(2 - \exp\left(-4.6 \frac{b}{0.1}\right) \right) \cdot (1 + 0.2|\sin(2\phi_b)|) \quad (4.20)$$

เมื่อ $h_{c,b}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารที่รวมผลของการปรับมุมบิดของมู่ลี่, $W/(m^2 \cdot K)$

h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารที่หาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.21), $W/(m^2 \cdot K)$

ϕ_b คือ มุมบิดของใบมู่ลี่, °

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารที่ไม่ได้รวมผลของการปรับมุมบิดของมู่ลี่สามารถหาได้ดังนี้

$$h_c = \frac{k_{air} \cdot Nu}{H} \quad (4.21)$$

เมื่อ Nu คือ Nusselt number

H คือ ความสูงของชั้นหน้าต่างกระจก, m

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการ

$$Nu = 0.56(Ra_H \sin \gamma)^{1/4} \quad \text{เมื่อ } Ra_H > Ra_{cv} \quad (4.22)$$

$$Nu = 0.13(Ra_H^{1/3} - Ra_{cv}^{1/3}) + 0.56(Ra_{cv} \sin \gamma)^{1/4} \quad \text{เมื่อ } Ra_H > Ra_{cv} \quad (4.23)$$

เมื่อ Ra_H คือ Rayleigh number ที่ขึ้นกับความสูงของมู่ลี่สามารถหาได้จากสมการที่ (4.24)

γ คือ มุมเอียงของมู่ลี่, °

Ra_{cv} คือ Rayleigh number ที่เป็นผลจากมุมเอียงของมู่ลี่สามารถหาได้จากสมการที่ (4.25)

ค่า Rayleigh number สามารถหาได้ดังสมการ

$$Ra_H = \frac{\rho^2 H^3 g C_p |T_{b,n} - T_{in}|}{T_{m,f} \mu k_{air}} \quad (4.24)$$

$$Ra_{cv} = 2.5 \times 10^5 \left(\frac{e^{0.72\gamma}}{\sin \gamma} \right) \quad (4.25)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $J/(kg \cdot K)$

$T_{b,n}$ คือ อุณหภูมิผิวของมู่ลี่ด้านใน, K

T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศภายในอาคาร, K

$T_{m,f}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์มอากาศ, K

μ คือ ค่าความหนืดของอากาศ, $kg/(m \cdot s)$

และสามารถหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์มของอากาศเพื่อใช้หาค่าคุณสมบัติที่ใช้หาค่า Rayleigh number ได้ดังนี้

$$T_{m,f} = T_m + \frac{1}{4}(T_{b,n} - T_m) \quad (4.26)$$

4.3.1.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร

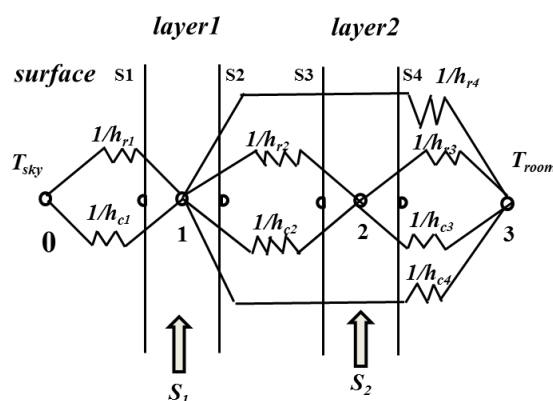
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคารจะเป็นตัวแปรที่พิจารณาร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Wright, J.L. [17] ดังนี้

$$h_{c,across} = h_c \left(1 - \exp\left(-4.6 \frac{b}{0.1}\right) \right) \quad (4.27)$$

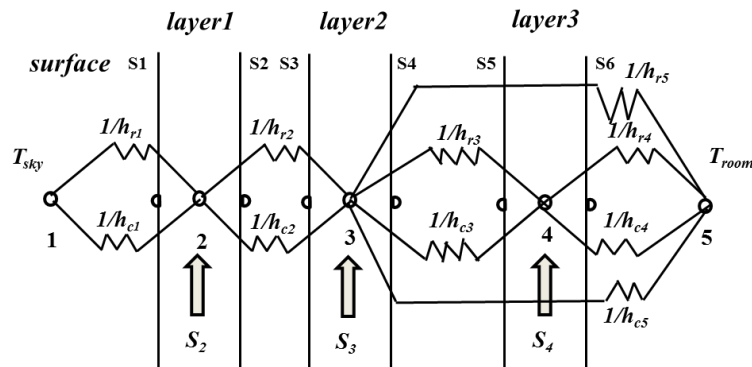
เมื่อ $h_{c,across}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$

4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

เนื่องจาก มีการเพิ่มการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้โครงข่ายความต้านทานความร้อนที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในแบบใหม่



รูปที่ 4.4 โคจรข่ายความต้านทานทางความร้อนของหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในแบบใหม่

และส่งผลให้การหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร มีผลของการพาความร้อนเพิ่มขึ้น สามารถหาได้ดังนี้

กรณี ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกชั้นเดียวที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโคจรข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 4.3 สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร ได้ดังนี้

$$R_4 = \frac{1}{h_{c,across} + h_{r,across}} + \frac{0.5d_2}{k_2} \quad (4.28)$$

กรณี ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ประกอบด้วยหน้าต่างกระจกสองชั้นที่ติดตั้งมู่ลี่ภายในที่มีโคจรข่ายความต้านทานความร้อนดังรูปที่ 4.4 สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร ได้ดังนี้

$$R_5 = \frac{1}{h_{c,across} + h_{r,across}} + \frac{0.5d_3}{k_3} \quad (4.29)$$

เมื่อ R_i คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน, $(m^2 \cdot K) / W$

$h_{c,across}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$

$h_{r,across}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ตำแหน่งระหว่างผิวหน้าต่างกระจกด้านในกับอากาศภายในอาคาร, $W/(m^2 \cdot K)$

d_i คือ ความหนาของชั้น i , m

k_i คือ สภาพนำความร้อนของชั้นที่ i , $W/(m \cdot K)$

4.3.3 สมการอนุพันธ์ในการหาค่าความร้อนคงเหลือ

การเพิ่มการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้ค่าอนุพันธ์ในการหาค่าความร้อนคงเหลือ ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือมีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

กรณี กระจก 1 ชั้นกับมู่ลี่

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_1 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_1} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_2} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) + h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_1 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_4}{\partial T_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} \right) + h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} \right) - h_{r, gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (4.33)$$

กรณี กระจาก 2 ชั้นกับรูสี่

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_1} \right) - h_{r1} \right] \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} \right) - h_{r,gap} \right] \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_2} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} \right) + h_{r,gap} \right] \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_1^2(h_{r1} + h_{c1})^2} \left[(T_1 - T_0) \frac{\partial h_{c1}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s1}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_0}{\partial T_3} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_1 - T_2) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_3} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} \right) + h_{r,gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_1} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_5^2(h_{r5} + h_{c5})^2} \left[(T_2 - T_4) \frac{\partial h_{c5}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_5}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} \right) - h_{r,gap} \right] \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_2} \right) - h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_5^2(h_{r5} + h_{c5})^2} \left[(T_2 - T_4) \frac{\partial h_{c5}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_5}{\partial T_2} \right) - h_{r5} \right] \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_2^2(h_{r2} + h_{c2})^2} \left[(T_2 - T_1) \frac{\partial h_{c2}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s3}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_3} \right) \right] \\ &- \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_2 - T_3) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_3} \right) + h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_5^2(h_{r5} + h_{c5})^2} \left[(T_2 - T_4) \frac{\partial h_{c5}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s2}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_5}{\partial T_3} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_1} + \left(\frac{\partial Q'_{s6}}{\partial T_1} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_1} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_2} &= -\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} \right) + h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_2} + \left(\frac{\partial Q'_{s6}}{\partial T_2} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_2} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2(h_{r3} + h_{c3})^2} \left[(T_3 - T_2) \frac{\partial h_{c3}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s5}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_3} \right) - h_{r3} \right] \\ &+ \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2(h_{r4} + h_{c4})^2} \left[(T_3 - T_4) \frac{\partial h_{c4}}{\partial T_3} + \left(\frac{\partial Q'_{s6}}{\partial T_3} - \frac{\partial Q'_{s4}}{\partial T_3} \right) - h_{r4} \right] \end{aligned} \quad (4.42)$$



บทที่ 5

การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบความแม่นยำในการทำนายการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ (ความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าในตัวอาคารที่รวมผลของส่วนการนำความร้อน และพาความร้อน และส่วนของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์) ค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และค่าการส่งผ่านความร้อนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ (ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น) ที่ได้จากการทดลองที่ห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา ผลการทดลองที่นำมาตรวจสอบจะเป็นผลการทดลองจากโครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน ปีการศึกษา 2557 [34]

5.1 การทดลอง

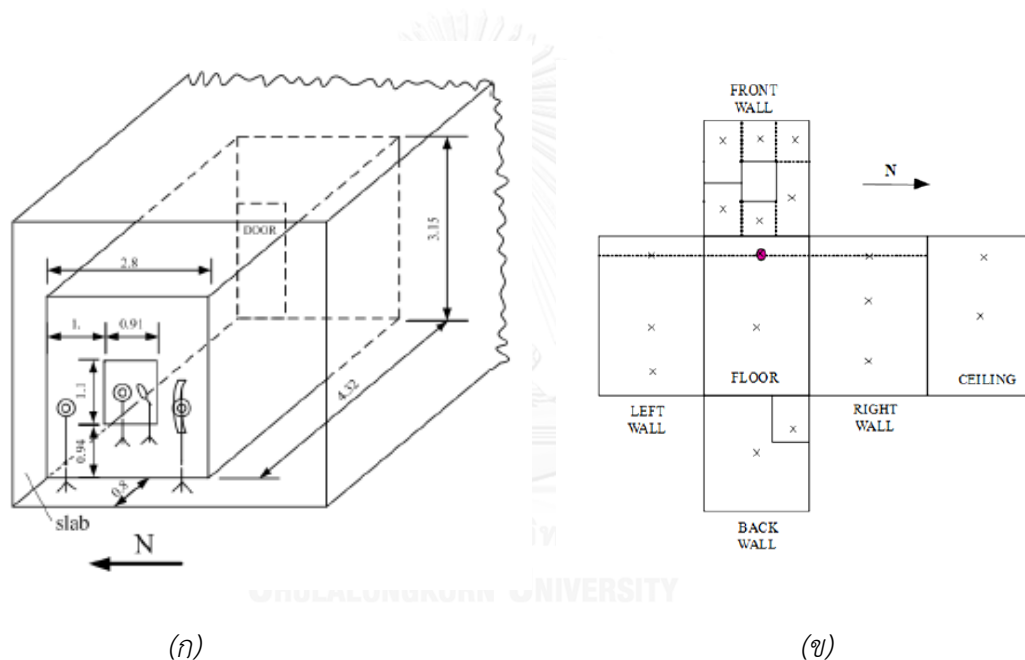
โครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน จะมีรายละเอียดของการทดลองในส่วนของการศึกษาการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ดังนี้

5.1.1 ห้องทดลอง

การทดลองกระทำในห้องทดลองที่ถูกสร้างที่ชั้นที่ 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ก) ห้องทดลองมีขนาดกว้าง 2.8 เมตร สูง 3.15 เมตร และยาว 4.32 เมตร หน้าต่างกระจกที่ศึกษามีขนาดกว้าง 0.8 เมตร และสูง 1 เมตร และมีกรอบอลูมิเนียมขอบกว้าง 0.05 เมตร ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งไว้ให้ขอบด้านล่างอยู่สูงกว่าพื้นเป็นระยะ 0.94 เมตร ผนังด้านที่มีหน้าต่างกระจกจะอยู่ด้านทิศตะวันตก ผนังทั้งสามด้าน (ด้านทิศตะวันตก ทิศตะวันออก และทิศใต้) และเพดานเป็นผนังยิปซัมสองชั้น เสริมด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านที่ติดตั้งหน้าต่างกระจก (ด้านทิศตะวันตก) เป็นผนังอลูมิเนียม ด้านในเสริมด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว โดยที่ผนังด้านในทุกด้านและเพดานถูกทาสีดำ ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องปรับ

อากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ (air cooled water chiller) และด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ในการสร้างห้อง ทำให้หน้าต่างกระจกถูกบังจากขอบอาคารด้านข้างและด้านบน โดยที่ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งห่างจากขอบอาคารประมาณ 0.8 เมตร

การวัดค่าในส่วนของการศึกษาการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมภายนอกห้อง ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายภายนอกห้อง ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่บริเวณด้านหลังมู่ลี่ อุณหภูมิของผนังโดยมีการติดเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิผนังตามตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 5.1 (ข) อุณหภูมิห้อง รวมทั้งวัดค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าและขาออกของเครื่องปรับอากาศ และอัตราการไหลของน้ำของเครื่องทำน้ำเย็น



รูปที่ 5.1 ลักษณะของห้องทดลอง (ก) ขนาดของห้องทดลอง (ข) ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิของผนัง เพดาน และพื้นภายในห้องทดลอง [34]

5.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

- เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ โดยจะใช้เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ของบริษัท Kipp & Zonan รุ่น CM6B 2 ตัว ตัวหนึ่งวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้งภายนอกอาคาร และอีกตัวหนึ่งติดตั้งร่วมกับแหวนบังเงา วัดค่าความเข้ม

แสงอาทิตย์แบบกระจายในแนวตั้งภายนอกอาคาร รุ่น CMP6 1 ตัว และ รุ่น CMP11 1 ตัว ทั้งสองตัวหลังติดตั้งหลังมู่ลี่เพื่อวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์แบบรวมในแนวตั้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ก) ติดตั้งภายนอกเพื่อวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์รวม และ (ข) ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์บังเงาเพื่อวัดแสงอาทิตย์แบบกระจาย [34]

- เทอร์โมคัปเปิลชนิด J วัดอุณหภูมิที่ผนัง อาคารภายนอก อาคารภายในห้องทดลอง และ น้ำเย็นขาเข้าและออกของเครื่องปรับอากาศ



รูปที่ 5.3 เทอร์โมคัปเปิลชนิด J [34]

- ระบบปรับอากาศ แบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ (air cooled water chiller) จะประกอบด้วย เครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นและน้ำ จะใช้เครื่องทำความเย็นจากบริษัท UNI – Aire รุ่น ACK-CHB/WCU-CHB ขนาด 2 ตัน 7.0-16 kW เครื่องสูบน้ำแบบ centrifugal ทำหน้าที่สูบน้ำที่ออกมาจาก evaporator ไปยังคอยล์เย็น จะใช้เครื่องสูบน้ำจากบริษัท EBARA ชนิด Single-Phase 230V 50HZ รุ่น CD/XM

70/05 คอยล์เย็น (fan coil unit) จะใช้เครื่องทำความเย็นจากบริษัท UNI – Aire รุ่น Fresh & Clean : DDF 800 W ติดตั้งภายในห้องทดลอง โดยสามารถทำความเย็นได้ 25000 BTU และวัตต์อัตราการไหลของน้ำจากเครื่องทำน้ำเย็น ด้วยมิเตอร์วัดค่าอัตราการไหลของน้ำจากบริษัท YOKOGAWA รุ่น AFX 015G อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบปรับอากาศ แบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศจะแสดงในรูปแบบที่ 5.4 และมีแผนผังของระบบท่อน้ำของระบบปรับอากาศดังแสดงในรูปแบบที่ 5.5 โดยอากาศภายในห้องทดลองจะถูกดูดเข้าไปที่บริเวณช่องลมกลับ (return air) ของคอยล์เย็นเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำเย็นขาเข้า อากาศที่ผ่านคอยล์เย็นจะมีอุณหภูมิลดลงและถูกปล่อยออกมาทางช่องลมส่ง (supply air) ของคอยล์เย็น ส่วนน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะถูกส่งไปยังฮีตเตอร์ (heater) เพื่อปรับไหลดให้คงที่ ก่อนที่เครื่องสูบน้ำแบบ centrifugal จะดูดน้ำไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (plate heat exchanger) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารทำความเย็นในเครื่องทำน้ำเย็น กลายเป็นน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิที่ต่ำลงสำหรับไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศในคอยล์เย็นต่อไป สำหรับสารทำความเย็นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศในเครื่องทำน้ำเย็น และถูกส่งแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นต่อไป



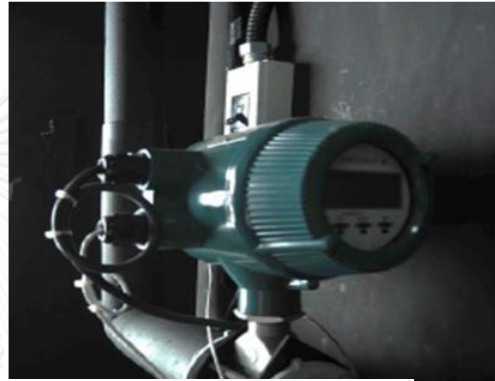
(ก)



(ข)

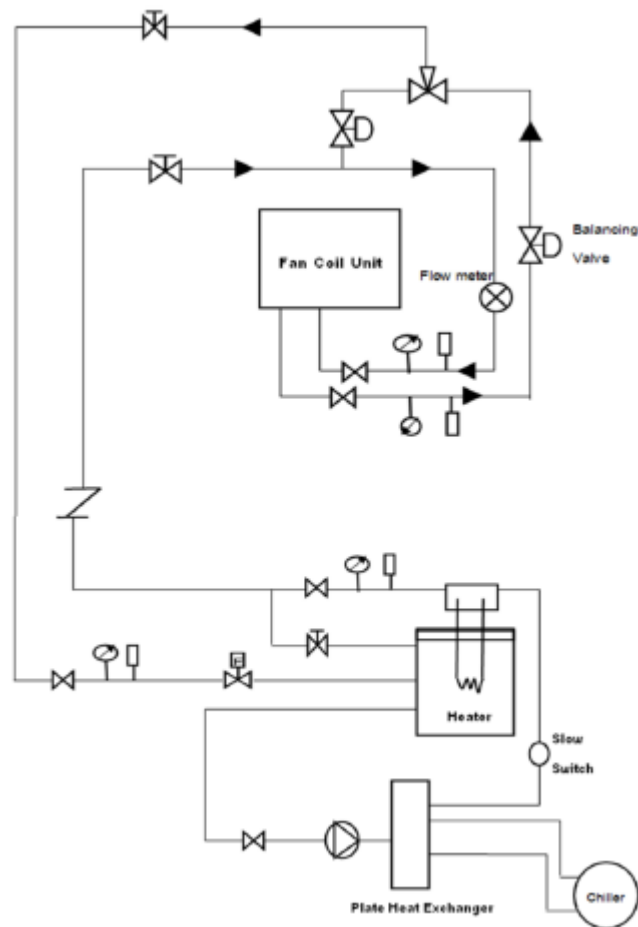


(ค)



(ง)

รูปที่ 5.4 ระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศซึ่งประกอบด้วย (ก) เครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ (ข) เครื่องสูบน้ำ (ค) คอยล์เย็น และ (ง) มิเตอร์วัดค่าอัตราการไหลของน้ำ [34]



รูปที่ 5.5 แผนผังของระบบท่อน้ำของระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศที่ใช้ในการทดลอง [34]

5.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

การทดลองที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะเลือกกรณีหน้าต่างกระจกแบบใส เมื่อติดตั้งมู่ลี่สีครีม และสีฟ้า เมื่อปรับมุมปิดของใบมู่ลี่สามมุม คือ -45° 0° และ 45° องศา รวมเป็น 6 กรณี โดยจะติดตั้งมู่ลี่ห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 40 มิลลิเมตร

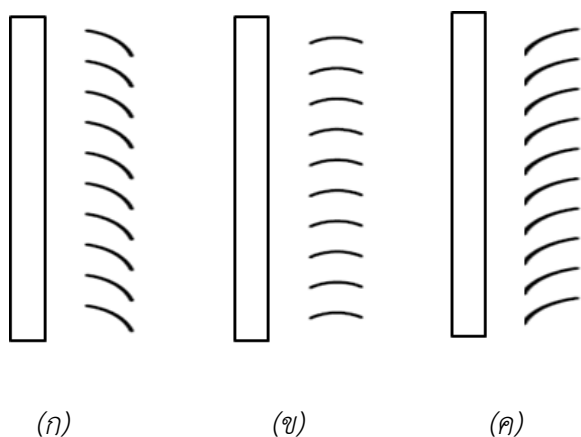
ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกแบบใส และมู่ลี่ที่ศึกษา จะแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ และมุมปิดของมู่ลี่ที่ศึกษา จะแสดงในรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกที่ศึกษา

คุณสมบัติ	
ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก	0.801
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้า และด้านหลัง	0.069
ค่าการดูดกลืนรังสี	0.130
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.84
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.84
สภาพนำความร้อน, $W/(m \cdot K)$	0.917
ความหนา, mm	6

ตารางที่ 5.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมู่ลี่ที่ศึกษา

คุณสมบัติ	ชนิดของมู่ลี่	
	สีครีม	สีฟ้า
ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้น	0.71	0.35
ค่าการเปล่งรังสี	0.83	0.74
ค่ารัศมีความโค้งงอของใบมู่ลี่, mm	71.5	
ความหนาของใบมู่ลี่, mm	0.3	
ความกว้างของมู่ลี่เมื่อวัดตามผิวโค้ง, mm	25.4	
ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ทั้งสองใบ, mm	20	
สภาพนำความร้อน, $W/(m \cdot K)$	120	



รูปที่ 5.6 มุมบิดของมู่ลี่ที่ใช้ศึกษา ได้แก่ (ก) มุม -45 องศา (ข) มุม 0 องศา และ (ค) มุม 45 องศา

การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละกรณีจะเปรียบเทียบกรณีละ 5 จุด โดยแต่ละจุดจะมีข้อมูลขาเข้าเพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรม ซึ่งเป็นผลการวัดจากการทดลองดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลขาเข้าที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กรณี	เวลา	$I_D (W/m^2)$	$I_a (W/m^2)$	$T_{out} (^{\circ}C)$	$T_m (^{\circ}C)$	$\theta (^{\circ})^*$
มู่ลี่สีครีม	13:15:03	$75.41 \pm 12.35\%$	$194.24 \pm 8.29\%$	34.83 ± 0.5	25.80 ± 0.5	81.57
มุมบิด -45°	13:55:03	$131.12 \pm 12.35\%$	$207.95 \pm 8.29\%$	35.47 ± 0.5	25.90 ± 0.5	71.76
	14:41:03	$262.35 \pm 12.35\%$	$203.46 \pm 8.29\%$	35.70 ± 0.5	25.80 ± 0.5	60.54
	16:08:03	$331.17 \pm 12.35\%$	$181.24 \pm 8.29\%$	35.49 ± 0.5	26.10 ± 0.5	39.72
	17:00:03	$248.56 \pm 12.35\%$	$127.79 \pm 8.29\%$	34.85 ± 0.5	26.20 ± 0.5	27.91
	มู่ลี่สีครีม	13:18:03	$102.39 \pm 12.35\%$	$133.63 \pm 8.29\%$	34.83 ± 0.5	25.60 ± 0.5
มุมบิด 0°	13:58:03	$222.82 \pm 12.35\%$	$143.75 \pm 8.29\%$	35.80 ± 0.5	25.90 ± 0.5	70.88
	14:30:03	$327.88 \pm 12.35\%$	$143.41 \pm 8.29\%$	37.51 ± 0.5	26.30 ± 0.5	63.09
	16:01:03	$482.15 \pm 12.35\%$	$135.54 \pm 8.29\%$	38.54 ± 0.5	26.30 ± 0.5	41.29
	17:16:03	$374.40 \pm 12.35\%$	$85.80 \pm 8.29\%$	35.11 ± 0.5	26.30 ± 0.5	24.55

กรณี	เวลา	$I_D (W/m^2)$	$I_d (W/m^2)$	$T_{out} (°C)$	$T_m (°C)$	$\theta (°)^*$
มู่ลี่สีครีม	13:13:04	78.19 ± 12.35%	188.74 ± 8.29%	34.93 ± 0.5	25.70 ± 0.5	81.81
มุ่มปิด	13:56:04	188.65 ± 12.35%	187.11 ± 8.29%	34.79 ± 0.5	25.90 ± 0.5	71.27
45°	14:26:04	250.18 ± 12.35%	213.42 ± 8.29%	33.64 ± 0.5	26.00 ± 0.5	63.94
	15:27:04	379.88 ± 12.35%	181.08 ± 8.29%	36.47 ± 0.5	26.00 ± 0.5	49.20
	17:01:04	311.04 ± 12.35%	117.04 ± 8.29%	34.11 ± 0.5	26.20 ± 0.5	27.47
มู่ลี่สีฟ้า	13:39:04	157.65 ± 12.35%	173.63 ± 8.29%	34.83 ± 0.5	25.60 ± 0.5	75.13
มุ่มปิด	14:17:04	254.64 ± 12.35%	180.65 ± 8.29%	36.20 ± 0.5	26.10 ± 0.5	65.80
-45°	15:12:04	361.92 ± 12.35%	176.95 ± 8.29%	36.14 ± 0.5	26.10 ± 0.5	52.40
	16:17:04	386.13 ± 12.35%	143.98 ± 8.29%	35.31 ± 0.5	26.00 ± 0.5	34.30
	17:09:04	335.53 ± 12.35%	94.34 ± 8.29%	36.07 ± 0.5	26.00 ± 0.5	25.06
มู่ลี่สีฟ้า	13:36:03	103.56 ± 12.35%	209.72 ± 8.29%	33.06 ± 0.5	25.70 ± 0.5	75.97
มุ่มปิด 0°	14:02:03	152.47 ± 12.35%	226.04 ± 8.29%	33.06 ± 0.5	25.70 ± 0.5	69.59
	14:48:03	238.74 ± 12.35%	227.95 ± 8.29%	33.67 ± 0.5	26.00 ± 0.5	58.36
	15:29:03	266.66 ± 12.35%	187.09 ± 8.29%	33.80 ± 0.5	25.80 ± 0.5	48.44
	16:45:03	258.17 ± 12.35%	128.22 ± 8.29%	32.65 ± 0.5	25.70 ± 0.5	30.59
มู่ลี่สีฟ้า	13:02:03	102.32 ± 12.35%	167.78 ± 8.29%	35.66 ± 0.5	25.50 ± 0.5	84.24
มุ่มปิด	13:29:03	157.65 ± 12.35%	173.63 ± 8.29%	34.83 ± 0.5	25.60 ± 0.5	75.13
45°	14:26:03	275.95 ± 12.35%	183.72 ± 8.29%	37.28 ± 0.5	25.80 ± 0.5	63.60
	15:43:03	399.91 ± 12.35%	165.86 ± 8.29%	35.10 ± 0.5	26.10 ± 0.5	44.93
	17:00:03	357.92 ± 12.35%	108.31 ± 8.29%	34.49 ± 0.5	26.20 ± 0.5	27.03

* I_D คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก I_d คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอกห้องทดลอง T_m คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลอง และ θ คือ ค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ และใช้ค่าความเร็วลมเท่ากับ 1.2 m/s

5.3 การเปรียบเทียบผลเฉลยทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำให้สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภาระการทำความเย็นได้ โดยการนำค่าอัตราทำความเย็นที่เครื่องปรับอากาศทำได้ หักลบด้วยภาระการทำความเย็นที่เกิดจากความร้อนแหล่งอื่นๆ ตามสมการที่ (5.1) ส่วนการหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะหาได้จากสมการที่ (4.12)

$$q_{\text{exp}} = q_r - q_l \quad (5.1)$$

เมื่อ q_{exp} คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลอง, W

q_r คือ ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับภาระทำความเย็น (cooling load) ที่มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (5.2), W

q_l คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น, W

ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง จะมีค่าเท่ากับภาระทำความเย็น (cooling load) โดยระบบปรับอากาศที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบเครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ จึงสามารถหาค่าภาระการทำความเย็นได้จากสมมูลความร้อนของเครื่องทำน้ำเย็น ดังสมการที่ (5.2)

$$q_{cl} = \dot{m}_w c_{p,w} \Delta T_{\text{water}} = \rho_{\text{water}} \dot{V} c_{p,w} (T_{\text{water,out}} - T_{\text{water,in}}) \quad (5.2)$$

เมื่อ q_{cl} คือ ภาระการทำความเย็น, W

\dot{m}_w คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น, kg/s

$c_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, J/(kg · K)

ΔT_{water} คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นขาเข้าและน้ำขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, °C

ρ_{water} คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m³

\dot{V} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, m³/s

$T_{\text{water,out}}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, °C

$T_{\text{water,in}}$ คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าจากเครื่องปรับอากาศ, °C

ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น จะหาได้จากภาระการทำความเย็นที่เกิดจากความร้อนแหล่งอื่นๆ ได้แก่ ภาระการทำความเย็นเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พื้น และเพดานห้อง ภาระการทำความเย็นเนื่องจากอากาศรั่วซึม

(infiltration) ตามรอยแตกของขอบหน้าต่าง ประตู หรือผนัง และภาระการทำความเย็นเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นตัวเกิดความร้อน เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รายละเอียดการคำนวณจะแสดงในภาคผนวก ข.

และสามารถหาค่า SHGC และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ได้ โดยที่ค่า SHGC จากการทดลองสามารถหาได้จากสมการที่ (5.3) จะเห็นได้ว่าค่า SHGC ที่คำนวณได้จากการทดลองจะเป็นผลจากรังสีแสงอาทิตย์รวม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าจากผลการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ค่า SHGC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จะสามารถหาได้จากสมการที่ (5.4)

$$SHGC_{exp} = \frac{q_{exp} - U(T_{out} - T_{in})}{I} \quad (5.3)$$

เมื่อ $SHGC_{exp}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลอง

q_{exp} คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลอง, W/m^2

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/(m^2 \cdot K)$

T_{out} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, K

T_{in} คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, K

I คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

$$SHGC_{cal} = \frac{SHGC_D I_D + SHGC_{d,sky} f_{sky} I_d + SHGC_{d,ref} f_{grd} I_d + SHGC_{D,r} I_{D,r}}{I} \quad (5.4)$$

เมื่อ $SHGC_{cal}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$SHGC_D$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง

I_D คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

$SHGC_{d,sky}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

I_d คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

f_{sky} คือ ค่าสัดส่วนของการกระจายรังสีแสงอาทิตย์บนท้องฟ้า

$SHGC_{d,ref}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

f_{grd} คือ ค่าสัดส่วนของการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน

$SHGC_{D,r}$ คือ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน

$I_{D,r}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน, W/m^2

โดยที่ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้น จะหาได้จาก

$$I_{D,r} = I_{DN} \sin \theta \frac{\rho_g}{2} \quad (5.5)$$

เมื่อ I_{DN} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจก สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.6), W/m^2

ρ_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน

$$I_D = I_{DN} \cdot \cos \theta \quad (5.6)$$

เมื่อ θ คือ มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์, $^\circ$

และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก จะหาได้จาก

$$I = I_D + I_d + I_{D,r} \quad (5.7)$$

สำหรับการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะเป็นอัตราส่วนของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่อค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก โดยที่ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการทดลองจะสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากด้านหลังมู่ลี่จากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สองตัว ดังสมการต่อไปนี้

$$T_{exp}^{HI} = \frac{I_{r1} + I_{r2}}{2 \cdot I} \quad (5.8)$$

เมื่อ T_{exp}^{HI} คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากการทดลอง

I_{r1} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1, W/m^2

I_{r2} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 2, W/m^2

I คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W/m^2

จะเห็นว่า ค่าส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองจะเป็นผลของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ดังนั้น ค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา สามารถหาได้ดังนี้

$$T_{cal}^{RH} = \frac{T_D^{RH} I_D + T_{d,sky}^{RH} f_{sky} I_d + T_{d,ref}^{RH} f_{grd} I_d + T_{D,r}^{RH} I_{D,r}}{I} \quad (5.9)$$

เมื่อ T_{cal}^{RH} คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

T_D^{RH} คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง

$T_{d,sky}^{RH}$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$T_{d,ref}^{RH}$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$T_{D,r}^{RH}$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่สะท้อนพื้นดิน

ในหัวข้อนี้ จะเป็นการเปรียบเทียบและวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาและผลการทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ทั้ง 6 กรณี ในแต่ละกรณีจะเลือกมา 5 จุด และมีข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ดังตารางที่ 5.3 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในการทดลอง ค่าในตารางจะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลขาเข้าในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมและค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา

5.4 ค่าความคลาดเคลื่อน

5.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง

5.4.1.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากตัวเครื่องมือเอง ข้อมูลของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดจะมาจากผู้ผลิต เครื่องมือวัดที่ใช้วัดค่าเพื่อศึกษาการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในการทดลองในโครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน ประกอบด้วย

- เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ ใช้เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ของบริษัท Kipp & Zonan รุ่น CM6B 2 ตัว ตัวหนึ่งวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้งภายนอกอาคาร และอีกตัวหนึ่งติดตั้งร่วมกับแหวนบังเงา วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์แบบกระจายในแนวตั้งภายนอกอาคาร รุ่น CMP6 1 ตัว และ รุ่น CMP11 1 ตัว ทั้งสองตัวหลังติดตั้งหลังมู่ลี่ เพื่อวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์แบบรวมในแนวตั้ง ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดแสงอาทิตย์แต่ละรุ่นแสดงในตารางที่ 5.4
- เทอร์โมคัปเปิลชนิด J วัดอุณหภูมิที่ผนัง อากาศภายนอก อากาศภายในห้องทดลอง และน้ำขาเข้าและออกของเครื่องทำน้ำเย็น ค่าความคลาดเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลชนิด J จะมีค่าเท่ากับ $0.5^{\circ}C$
- มิเตอร์วัดค่าอัตราการไหลของน้ำ วัดอัตราการไหลของน้ำจากเครื่องทำน้ำเย็น และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ $0.0001 L/min$

ตารางที่ 5.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ [31, 32]

ชนิดของความคลาดเคลื่อน	รุ่น		
	CM6B	CMP6	CMP11
ค่าความคลาดเคลื่อนจากศูนย์ (zero offset, u_z)	7.5%	6%	3.5%
ค่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่เสถียรภาพ (non-stability, u_{ns})	1%	1%	0.5%
ค่าความคลาดเคลื่อนจากความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity, u_{nl})	1.2%	1%	0.2%
ค่าความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดของทิศทาง (directional error, u_d)	2%	2%	1%
ค่าความคลาดเคลื่อนจากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว (temperature dependence of sensitivity, u_t)	2%	4%	1%
ค่าความคลาดเคลื่อนจากความลาดเอียง (tilt error, u_{it})	1%	1%	0.2%

ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รวมจะเป็นรากที่สองของกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละชนิดที่แสดงในตารางที่ 5.4 โดยค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B รุ่น CMP6 และรุ่น CMP11 มีค่าเป็น 8.23% 7.68% และ 3.82% ตามลำดับ

5.4.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งจะพิจารณาในส่วนของ การติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ เนื่องจากการวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ภายนอกอาคารและภายในอาคาร จะต้องติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้อยู่ระดับกึ่งกลางหน้าต่างกระจก และอยู่ในระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจก และในการวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะใช้แหวนบังเงา ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง ดังนี้

1. ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก เนื่องจากข้อจำกัดของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ ที่ต้องใช้ขาตั้งสามขาเป็นฐาน การติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับเดียวกับหน้าต่างกระจกจึงทำได้ยาก อีกทั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ต้องติดตั้งให้มีมุมเอียงขนานกับหน้าต่างกระจก โดยใช้เครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำ โดยที่เครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 4^\circ$ ส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก ทั้งนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจกมีค่าขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 1% ถึง 12% ในการหาค่าความคลาดเคลื่อน จึงใช้ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้เป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 4% (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.)

2. ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแหวนบังเงา จะเป็นค่าคลาดคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมาสำหรับการวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์แบบกระจาย เนื่องจาก การวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับแหวนบังเงา ส่วนของแหวนบังเงาต้องบังแสงอาทิตย์แบบตรงไม่ให้ตกกระทบเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการวัด แต่เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องมีการเลื่อนเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์เพื่อให้อยู่ในรัศมีการบังของแหวนบังเงา จึงประมาณค่าความคลาดเคลื่อนนี้เท่ากับ 1%

ค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง จะเป็นรากที่สองของกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง จะได้ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดโดยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B มีค่าเป็น 9.15% ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดโดยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B ร่วมกับแวนบังเงา มีค่าเป็น 8.29% ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดโดยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6 มีค่าเป็น 8.66% และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดโดยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP11 มีค่าเป็น 5.53%

5.4.2 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน

จากการหาค่าการถ่ายเทความร้อน ค่า SHGC และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมุมสี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และจากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน

5.4.2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนของความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมุมสี่ที่ได้จากสมการที่ (5.1) หาได้ดังนี้

$$u_{q_{exp}} = \sqrt{(u_{q_r})^2 + (-u_{q_l})^2} \quad (5.10)$$

เมื่อ u_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณ i ใดๆ

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมุมสี่ที่ได้จากการทดลองที่หาได้จากสมการที่ (5.3) หาได้ดังนี้

$$u_{SHGC_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{1}{I}u_q\right)^2 + \left(-\frac{\Delta T}{I}u_v\right)^2 + \left(-\frac{U}{I}u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I}u_{T_{in}}\right)^2 + \left(-\frac{(q-U\Delta T)}{I^2}u_i\right)^2} \quad (5.11)$$

และค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจากการทดลองซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากด้านหลังมุมสี่ต่อค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก ดังสมการที่ (5.8) โดยที่ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากด้านหลังมุมสี่จะได้จากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สองตัว คือเครื่องวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6

และรุ่น CMP11 จะสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจากการทดลองได้ ดังนี้

$$u_{T_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2I} u_{I_{r1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2I} u_{I_{r2}}\right)^2 + \left(-\frac{(I_{r1} + I_{r2})}{2I^2} u_I\right)^2} \quad (5.12)$$

5.4.2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนจากผลเฉลี่ยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจาก ค่าการถ่ายเทความร้อน ค่า SHGC และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะใช้ข้อมูลนำเข้ามาจากค่าการวัดที่ได้จากการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่หาได้จากสมการที่ (4.12) สามารถหาได้จาก

$$u_{q_{cal}} = \sqrt{\left((U \cdot u_{T_{out}})^2 + (-U \cdot u_{T_{in}})^2 + \left(\left(SHGC_D \cdot \cos \theta + SHGC_{D,r} \rho \frac{\sin \theta}{2}\right) \cdot u_{I_{DN}}\right)^2 + \left(\left(SHGC_{d,sky} f_{sky} + SHGC_{d,ref} f_{grd}\right) \cdot u_{I_d}\right)^2 + \left(\left(SHGC_{D,r} I_{DN} \frac{\sin \theta}{2}\right) \cdot u_p\right)^2}\right)} \quad (5.13)$$

เมื่อ q_{cal} คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์, W/m^2

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากสมการที่ (5.4) จะหาได้ดังนี้

$$u_{SHGC_{cal}} = \sqrt{\left(\left(\frac{SHGC_D \cos \theta + 0.5(SHGC_{D,r} \sin \theta)}{I}\right) \cdot u_{I_{DN}}\right)^2 + \left(\left(\frac{SHGC_{d,sky} f_{sky} + SHGC_{d,ref} f_{grd}}{I}\right) \cdot u_{I_d}\right)^2 + \left(\left(\frac{SHGC_{D,r} I_{DN} \sin \theta}{2I}\right) \cdot u_p\right)^2 + \left(-\frac{1}{I^2} \left(SHGC_D I_{DN} \cos \theta + SHGC_{d,sky} I_d f_{sky} + SHGC_{d,ref} I_d f_{grd} + SHGC_{D,r} I_{DN} \frac{\sin \theta}{2}\right) \cdot u_I\right)^2} \quad (5.14)$$

และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากผลเฉลี่ยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากสมการที่ (5.9) จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
u_{T_{cal}}^{jH} = & \sqrt{\left(\left(\frac{T_D^{jH} \cos \theta + 0.5(T_{D,r}^{jH} \sin \theta)}{I} \right) \cdot u_{I_{DN}} \right)^2} \\
& + \left(\left(\frac{T_{d,sky}^{jH} f_{sky} + T_{d,ref}^{jH} f_{grd}}{I} \right) \cdot u_{I_d} \right)^2 + \left(\left(\frac{T_{D,r}^{jH} I_{DN} \sin \theta}{2I} \right) \cdot u_{\rho} \right)^2 \\
& + \left(-\frac{1}{I^2} \left(T_D^{jH} I_{DN} \cos \theta + T_{d,sky}^{jH} I_d f_{sky} + T_{d,ref}^{jH} I_d f_{grd} + T_{D,r}^{jH} I_{DN} \frac{\sin \theta}{2} \right) \cdot u_I \right)^2
\end{aligned}
\tag{5.15}$$



บทที่ 6

การวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลของการเปรียบเทียบการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาทั้ง 6 กรณี คือ ใช้หน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และสีฟ้า ปรับมุมบิดเป็นมุม -45° และ 45° องศา หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกวิธีการหนึ่ง คือการเปรียบเทียบค่า SHGC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนากับค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. [35, 36] และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า [35]

6.1 ผลการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง

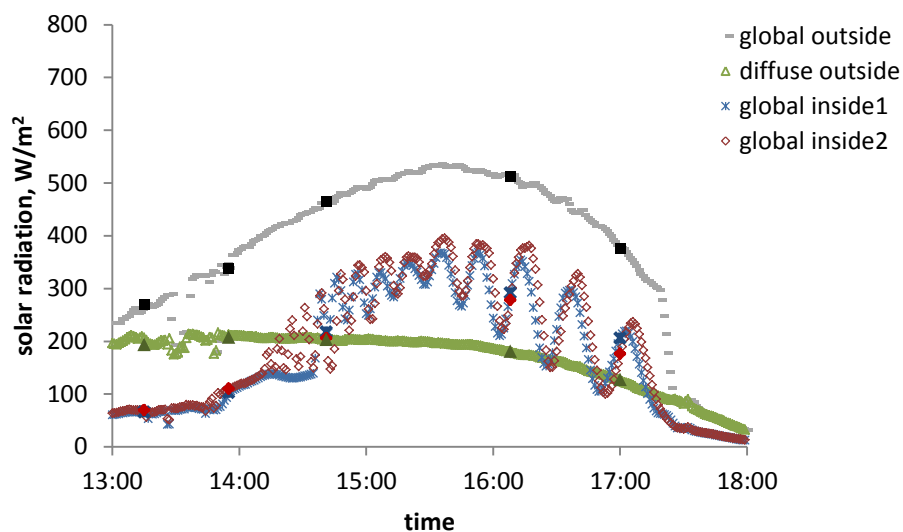
ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ระหว่างผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันดลิ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยการแสดงผลของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้ผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบและวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ทั้ง 6 กรณี ได้แก่ หน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และสีฟ้า มู่ลี่แต่ละสีจะปรับมุม -45° และ 45°

จากผลการทดลองจะสามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ได้จากค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองหักลบด้วยค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น ดังแสดงในสมการที่ (5.1) ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะเป็นผลมาจากค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จากการทดลองสามารถหาได้จากสมการที่ (5.3) และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ สามารถหาได้จากสมการที่ (5.8) จะเป็นอัตราส่วนของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่อค่าความเข้ม

ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก โดยที่ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการทดลองจะสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากด้านหลังมู่ลี่จากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สองตัว และผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.12) ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะหาได้จากสมการที่ (5.4) และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะสามารถหาได้จากสมการที่ (5.9)

6.1.1 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมที่ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา

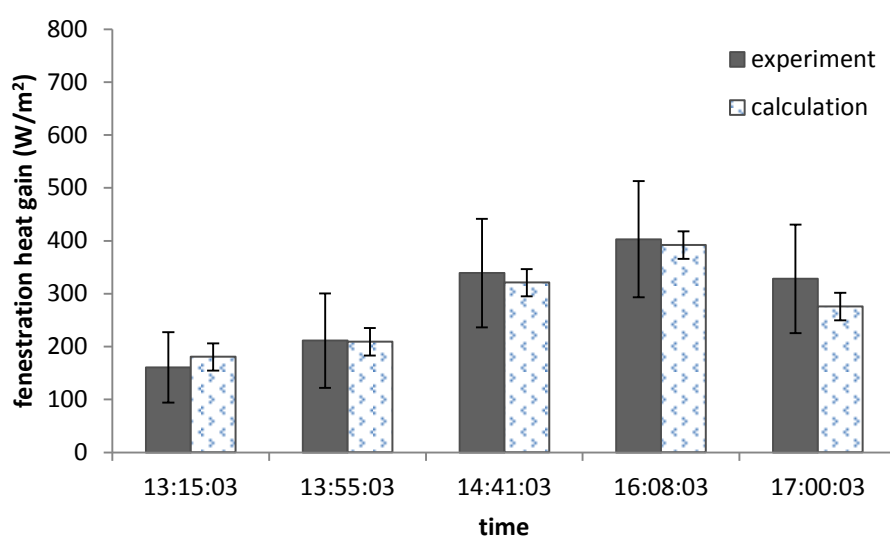
ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.1 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4 ตามลำดับ



รูปที่ 6.1 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ่สีครีม ที่มุมบิด -45 องศา

รูปที่ 6.1 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ่สีครีม และปรับมุมบิดของมูลิ่เป็น -45 องศา ที่วัดในวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.30 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และหลังจากเวลา 17.30 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังเวลา 17.30 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก และจะเห็นได้ว่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.34 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 16.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมูลิ่สีครีม ปรับมุมบิดของมูลิ่เป็น -45 องศา จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 14.00 น. จนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.34 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง โดยจะมีค่าแกว่งขึ้นลงเป็นคาบในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 17.00 น. ในการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ่ที่วัดภายในห้องทดลองนั้น จะติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์สองตัวด้านหลังมูลิ่ โดยให้ตัวหนึ่งอยู่ด้านบน อีกตัวหนึ่งอยู่ด้านล่าง ค่ารังสีแสงอาทิตย์

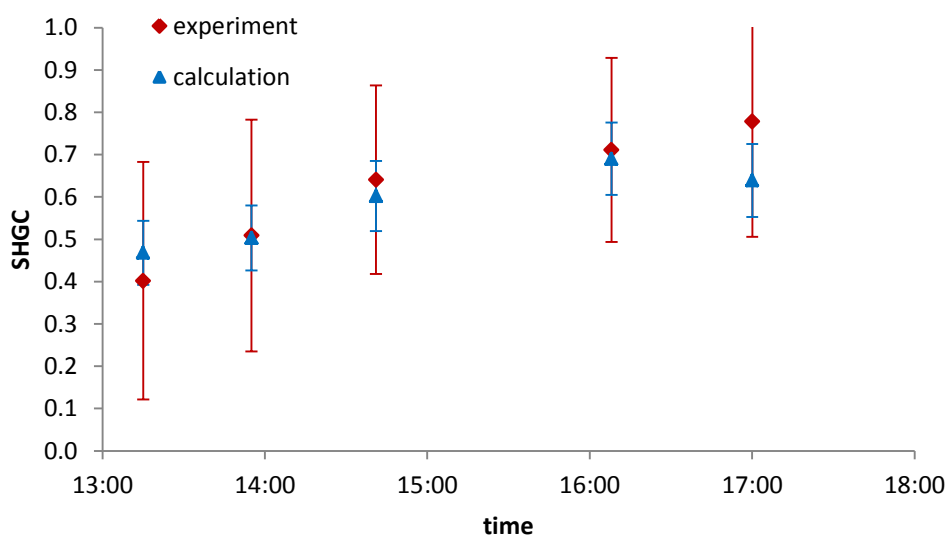
แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในแต่ละเวลาจึงมีสองค่า และจะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่นี้จะมีลักษณะการกระจายตัวและแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้านล่าง (global inside 2) จะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้านบน (global inside 1) เล็กน้อย เนื่องจากการติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละเครื่องที่มีค่าต่างกัน



รูปที่ 6.2 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด -45 องศา

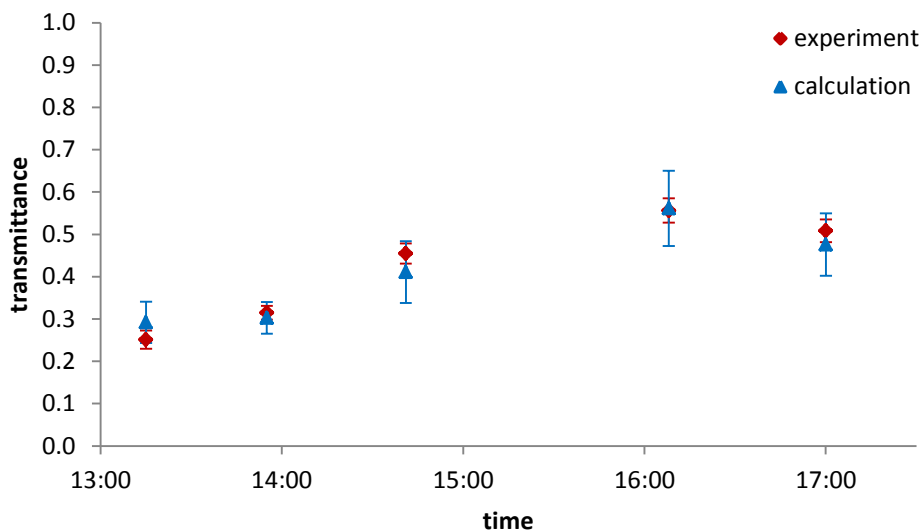
รูปที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าน้อยที่สุดที่เวลาแสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจกในช่วงแรกคือเวลา 13.15 น. และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่เวลา 16.08 น. หลังจากนั้นจะลดลง ทั้งนี้ ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะแปรผันตามค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ดังนั้น ในช่วงที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหน้าต่างกระจกช่วงแรก ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งแบบตรงและแบบกระจายมีค่าน้อย ค่าการถ่ายเทความร้อน

ร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จึงมีค่าน้อย หลังจากนั้น ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จะยกตัวอย่างในกรณีของเวลา 13.15 น. ซึ่งมีค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง $1043.60 \pm 53.38 \text{ W/m}^2$ และมีค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นเป็น $882.95 \pm 40.00 \text{ W/m}^2$ จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองและค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นจะมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองหักออกด้วยค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นตามสมการที่ (5.1) จะมีค่าเท่ากับ $160.65 \pm 66.70 \text{ W/m}^2$ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเป็น 41.52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างมาก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากสมการที่ (5.13) จะมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่มีค่ามากนี้ ทำให้ยากที่จะระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างของค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.3 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด -45 องศา

รูปที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมของแต่ละเวลาในกรณีนี้จะมีค่อนข้างสูง คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.40 ถึง 0.78 กล่าวคือ การปรับมุมบิดเป็น -45 องศา จะเป็นการเปิดรับแสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเข้าห้องได้มาก ทำให้ค่า SHGC มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเหมือนกัน คือเมื่อเวลาผ่านไป จะมีค่าเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่เวลา 17.00 น. และเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทุกเวลาที่ศึกษา ยกเว้นที่เวลา 13.15 น. ทั้งแนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ต่อค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกเป็นหลัก, q/I (จากการหาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมในสมการที่ (5.3) พจน์ของ $U(T_{out} - T_{in})$ จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพจน์ของ q_{exp}) ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงแปรตามค่าอัตราส่วน q/I ส่งผลให้แนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามาก คืออยู่ในช่วง 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา



รูปที่ 6.4 ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด -45 องศา

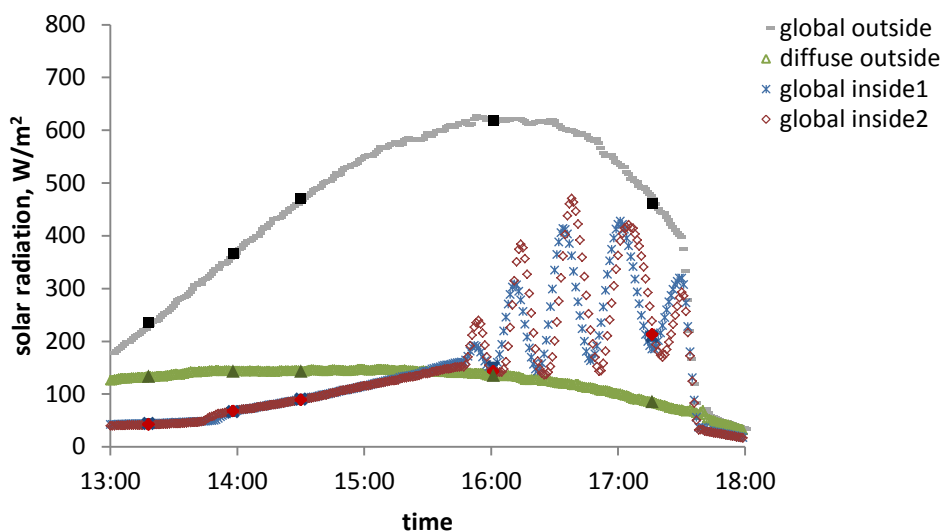
รูปที่ 6.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง มู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่าง กระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่าความเข้มของ รังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จากรูป จะเห็นว่า ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.56 กล่าวคือ การ ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา แสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านเข้าห้องได้มาก เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า การส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมในช่วงเวลาที่พิจารณา จะเห็นว่าค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมี ค่าเพิ่มขึ้น และค่ามากที่สุดที่เวลา 16.08 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง สามารถอธิบายถึงแนวโน้มที่ เกิดขึ้นได้ว่า ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมเป็นอัตราส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่อค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก จากรูปที่ 6.1 จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก และค่ารังสี แสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดได้ทั้ง 5 จุดที่ศึกษา มีแนวโน้มเป็นรูปแบบเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.08 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมมีแนวโน้มดังที่กล่าวมา นอกจากนี้ จะเห็นว่าค่าการส่งผ่านรังสี

แสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

จากสมการที่ (3.4) จะเห็นว่าค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม เป็นผลรวมของค่าการส่งผ่านรังสีรวม ที่สามารถนิยามเป็นค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น (shortwave SHGC) และค่าผลรวมการดูดกลืนความร้อนของชั้นหน้าต่างกระจกและมู่ลี่แต่ละชั้น ที่สามารถนิยามเป็นค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาว (longwave SHGC) เมื่อพิจารณารูปที่ 6.3 และ 6.4 ร่วมกัน จะพบว่าในกรณีของหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม มุมบิด -45 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาวที่ทุกเวลาที่ศึกษา เนื่องจากที่มุมบิด -45 องศา แสงอาทิตย์ส่วนมากจะสามารถส่งผ่านเข้าห้องได้โดยตรง

6.1.2 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมซึ่งปรับมุมบิดเป็น 0 องศา

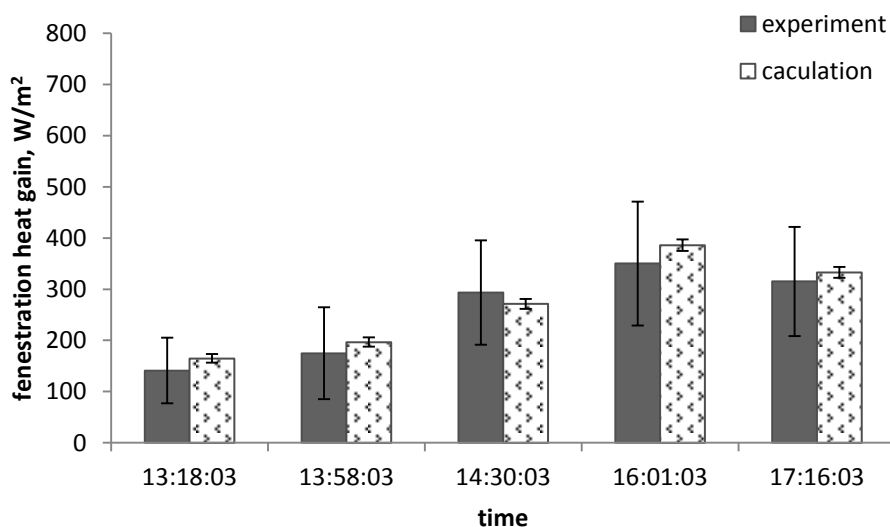
ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.6 ถึง 6.8 ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 0 องศา

รูปที่ 6.5 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ที่วัดในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.40 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และหลังจากเวลา 17.40 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังจากเวลา 17.40 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 16.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดเป็น 0 องศา จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13.40 น. จนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.37 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และจะมีค่าแกว่งขึ้นลงเป็นคาบในช่วงเวลา 15.44 น. ถึง 17.37 น. และจะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดด้านหลังมู่ลี่ทั้งสองตัวจะมีลักษณะการกระจายตัวและแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่

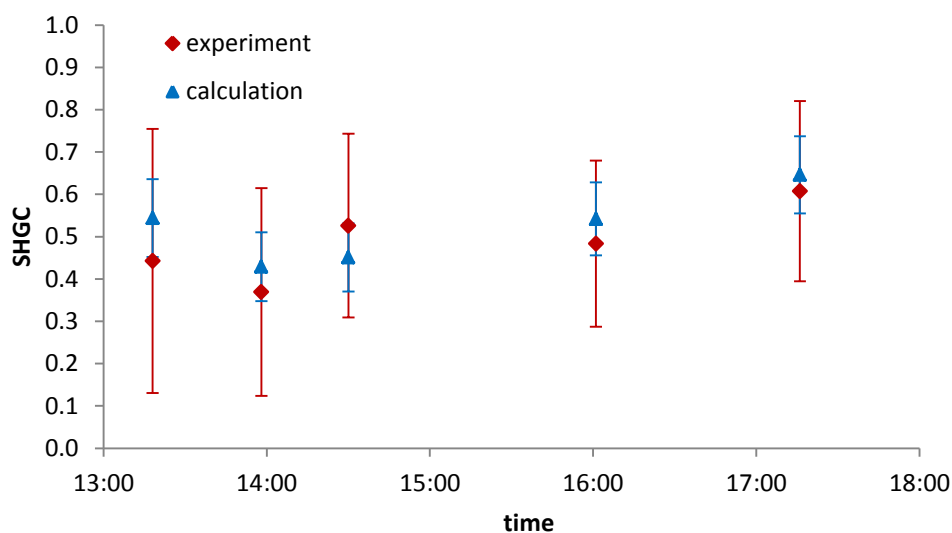
ติดตั้งด้านล่าง (global inside 2) จะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้านบน (global inside 1) เล็กน้อย เนื่องจาก ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละเครื่องที่มีค่าต่างกัน



รูปที่ 6.6 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมปิด 0 องศา

รูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมปิดเป็น 0 องศา จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่นำมาเปรียบเทียบจะเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหน้าต่างกระจก การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าน้อยที่สุดที่เวลาแสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจกในช่วงแรกคือเวลา 13.18 น. และจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 16.01 น. หลังจากนั้นจะลดลง ทั้งนี้ ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะแปรผันตามค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ดังนั้น ในช่วงที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหน้าต่างกระจกช่วงแรก ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งแบบตรงและแบบกระจายมีค่าน้อย ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จึงมีค่าน้อย หลังจากนั้น ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้จะยกตัวอย่างในกรณีของเวลา 13.18 น. ซึ่งมีค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง $1129.40 \pm 51.54 \text{ W/m}^2$ และมีค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นเป็น $988.10 \pm 38.16 \text{ W/m}^2$ จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองและค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นจะมีค่าไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกจะได้จากค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองหักออกด้วยค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นตามสมการที่ (5.1) จะมีค่าเท่ากับ $141.30 \pm 64.13 \text{ W/m}^2$ เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองจะมีค่าเป็น 45.39 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างมาก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากสมการที่ (5.13) จะมีค่าไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองที่มีค่ามากนี้ ทำให้ยากที่จะระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างของค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์

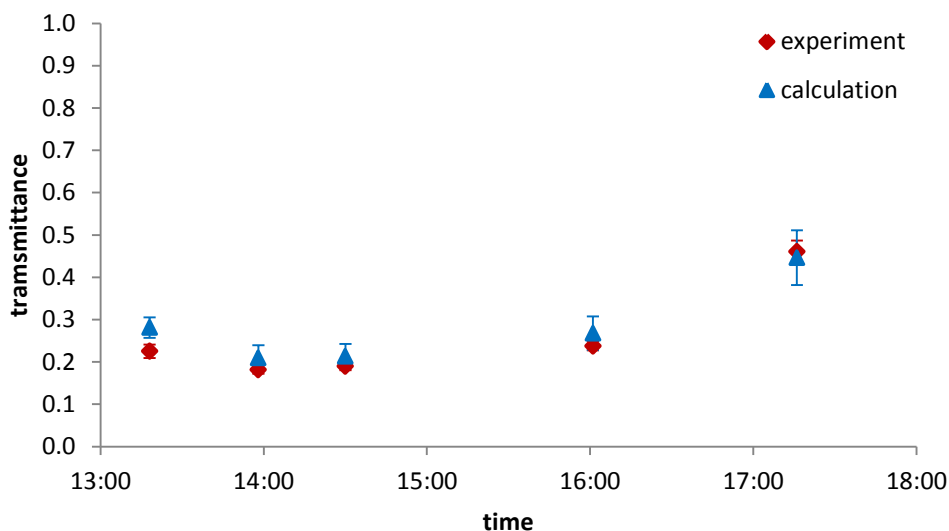


รูปที่ 6.7 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 0 องศา

รูปที่ 6.7 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้

หน้าต่างกระจกใส มูลิ์สีครีม ปรับมุมบิดเป็น 0 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมของแต่ละเวลาจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.37 ถึง 0.65 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่า ค่า SHGC ที่เวลา 13.58 น. จะมีค่าลดลงจากเวลา 13.18 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 14.30 น. แล้วมีค่าลดลงที่เวลา 16.01 น. และมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 17.16 น. ในขณะที่ค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลา 13.58 น. จะมีค่าลดลงจากเวลา 13.18 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 17.16 น. จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีช่วงที่เหมือนกันคือ ช่วงเวลาจาก 13.18 น. ถึง 14.30 น. และช่วงเวลาจาก 16.01 น. ถึง 17.16 น. ทั้งนี้ เนื่องจากค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมนั้นแปรตามค่าอัตราส่วน q/I การพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมจึงต้องพิจารณาทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ์และค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก ตัวอย่างเช่น เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเวลา 13.18 น. และ 13.58 น. ที่ได้การทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เวลา 13.18 น. มีค่ามากกว่าเวลา 13.58 น. เนื่องจาก ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกที่เวลา 13.58 น. มีค่ามากกว่าที่เวลา 13.18 น. ค่อนข้างมาก ในขณะที่ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เวลา 13.58 น. มีค่ามากกว่าที่เวลา 13.18 น. เล็กน้อย ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน q/I ที่เวลา 13.58 น. มีค่าน้อยกว่าที่เวลา 13.18 น. ในทำนองเดียวกันกับการเปรียบเทียบผลระหว่างเวลา 16.01 น. และ 17.16 น. ซึ่งค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เวลา 16.01 น. มีค่ามากกว่าเวลา 17.16 น. นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองของทุกเวลาที่ศึกษา ยกเว้นเวลา 14.30 น. จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน q/I โดยที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกของการทดลองจะเป็นค่าเดียวกับค่าที่เป็นข้อมูลขาเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทุกเวลาที่ศึกษา ยกเว้นที่เวลา 14.30 น. เช่นเดียวกับค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลิ์ที่มีค่าที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทุกเวลาที่ศึกษา ยกเว้นที่เวลา 14.30 น. และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะ

เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามาก คืออยู่ในช่วง 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา



รูปที่ 6.8 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 0 องศา

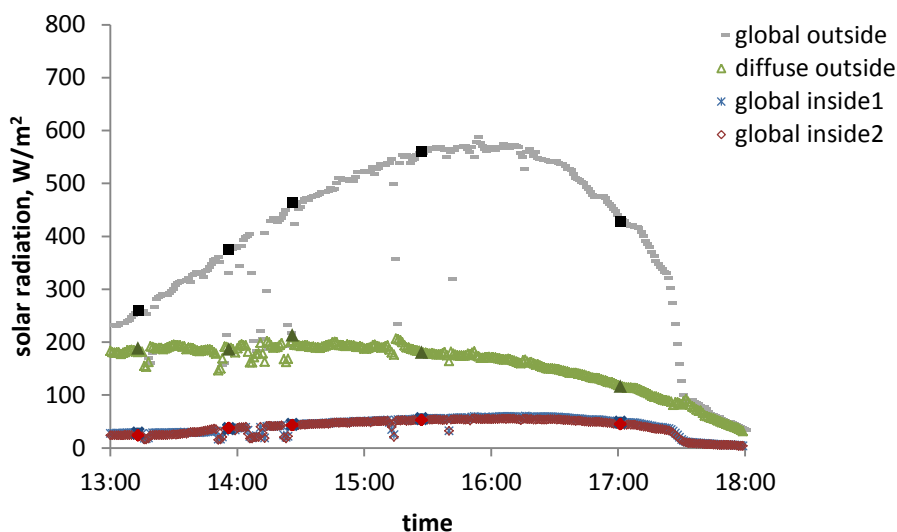
รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ส่งผลให้เมื่อนำค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองซึ่งมีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 13.18 น. และค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 17.16 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.5 มาหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก จะได้ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เมื่อปรับสเกลแล้วมีค่าลดลงจากเวลา 13.18 น. ถึง 13.58 น. หลังจากนั้นมู่ลี่เพิ่มขึ้นจนเวลา 17.16 น. และจะเห็นว่า ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.18 ถึง 0.46 กล่าวคือ การปรับมุมบิดเป็น 0 องศา มู่ลี่จะบังแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่ง โดยจะบังน้อยที่สุดที่เวลา 17.16 น. เนื่องจากแสงอาทิตย์จะตกกระทบหน้าต่างกระจกทำมุมใกล้เคียง 0 องศามากที่สุด จึงส่งผลให้ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมมีค่าน้อยที่สุด และจะเห็นว่าค่าการส่งผ่านรังสี

แสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ซึ่งเป็นผลรวมของค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาวดังแสดงในสมการที่ (3.4) จะพบว่าในกรณีของหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม มุมปิด 0 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาวที่เวลา 13.18 น. และ 17.16 น. ซึ่งเป็นเวลาที่แสงอาทิตย์ทำมุมตกกระทบหน้าต่างกระจกใกล้ 90 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ เนื่องจากการปรับมุมปิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา แสงอาทิตย์ส่วนมากจะโดนมู่ลี่บังเมื่อแสงอาทิตย์ทำมุมตกกระทบใกล้ 90 องศา และ 0 องศา ในขณะที่ช่วงระหว่างเวลาที่กล่าวมา ผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นจะใกล้เคียงกับผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาว

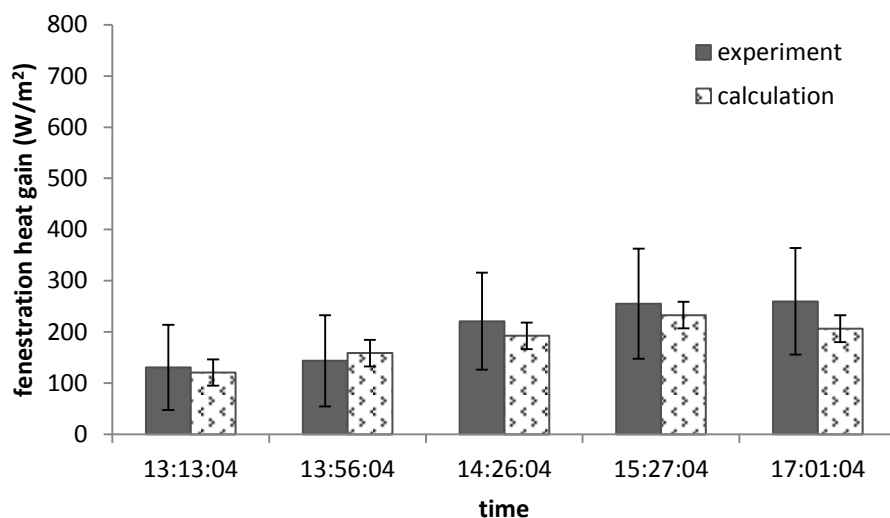
6.1.3 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีมซึ่งปรับมุมปิดเป็น 45 องศา

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมปิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.9 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ปรับมุมปิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.10 ถึง 6.12 ตามลำดับ



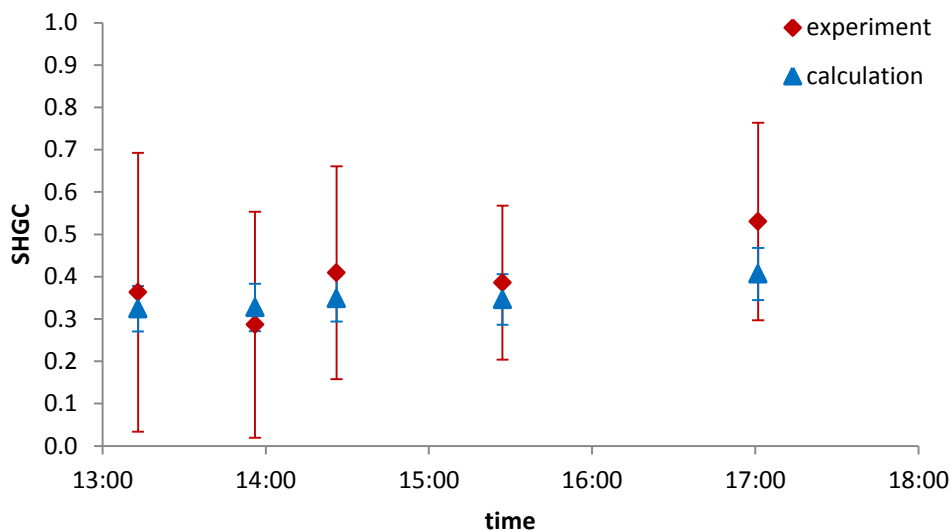
รูปที่ 6.9 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 45 องศา

รูปที่ 6.9 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา ที่วัดในวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.30 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และที่หลังเวลา 17.30 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังเวลา 17.30 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.52 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 16.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม และปรับมุมบิดเป็น 45 องศา จะมีค่าน้อยมาก คือ มีค่าไม่เกิน 60 W/m^2 โดยมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13.00 น. จนมีค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 16.30 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และจะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดด้านหลังมู่ลี่ทั้งสองตัวจะมีลักษณะการกระจายตัวและแนวโน้มใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.10 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 45 องศา

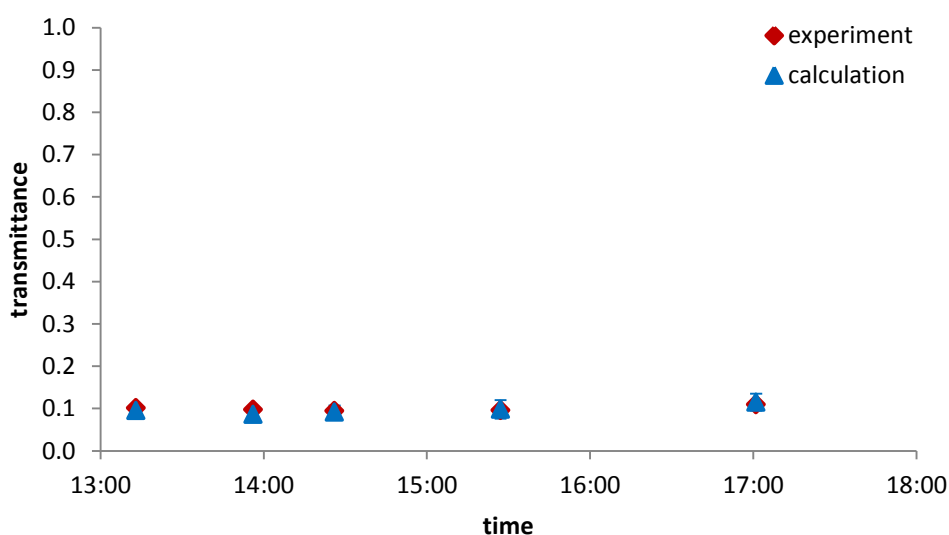
รูปที่ 6.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดเป็น 45 องศา พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่ เวลา 17.01 น. ที่มีค่าต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 13.13 น. ซึ่งเป็นช่วงที่แสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจกได้ไม่นาน มุมตกกระทบจะมีค่าใกล้เคียง 90 องศา และค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.27 น. และจะมีค่าลดลง แปรตามค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก (มีค่าอยู่ในช่วง 40 ถึง 65 เปอร์เซ็นต์) ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ จะมีค่าน้อย (มีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ไม่สามารถระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.11 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง มู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 45 องศา

รูปที่ 6.11 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดเป็น 45 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากการทดลองของแต่ละเวลาในกรณีนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.29 ถึง 0.53 ส่วนค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.35 ถึง 0.41 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่า ค่า SHGC ที่เวลา 13.56 น. จะมีค่าลดลงจากเวลา 13.13 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 14.26 น. แล้วมีค่าลดลงที่เวลา 15.27 น. และมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 17.01 น. ในขณะที่ค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13.13 น. จนถึงเวลา 17.01 น. โดยจะมีค่า SHGC ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ทั้งนี้แนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแตกต่างกัน เนื่องจาก ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมนั้นแปรตามค่าอัตราส่วน q/I การพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมจึงต้องพิจารณาทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่และค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก ตัวอย่างเช่น เมื่อเปรียบเทียบค่า SHGC ระหว่างเวลา 13.13 น. และ 13.56 น. ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองทั้งสองเวลาจะมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่ารังสี

แสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกที่เวลา 13.56 น. มีค่ามากกว่าที่เวลา 13.13 น. ค่อนข้างมาก ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน q/I ที่เวลา 13.13 น. มีค่ามากกว่า ทำให้ค่า SHGC ที่เวลา 13.13 น. มีค่ามากกว่า ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลาเดียวกัน จะเห็นได้ว่า ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองที่เวลา 13.56 น. มีค่ามากกว่า 13.13 น. ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน q/I ที่ทั้งสองเวลามีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ค่า SHGC ที่ทั้งสองเวลามีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่า ค่า SHGC จากการทดลองและจากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่เวลา 17.01 น. ค่า SHGC จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าจากผลเฉลยทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก เนื่องจาก ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ต่างกันระหว่างการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขึ้นอยู่กับค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ และที่เวลา 17.01 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่าจากผลเฉลยทางคณิตศาสตร์มากกว่าที่เวลาอื่นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามาก ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา ทำให้ไม่สามารถทำนายแนวโน้มที่แท้จริงของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองได้



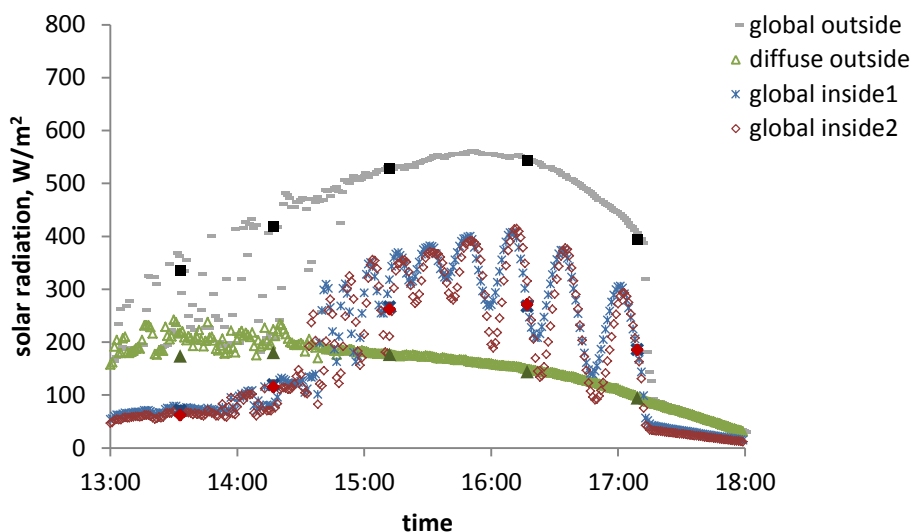
รูปที่ 6.12 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิด 45 องศา

รูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีครีม ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม พบว่าค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีค่าน้อยมาก คือ อยู่ในช่วง 0.09 ถึง 0.11 เนื่องจาก การปรับมุมบิดเป็น 45 องศา มู่ลี่จะบังแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ แสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่ห้องได้น้อย ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจึงมีค่าน้อย

เมื่อพิจารณา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ซึ่งเป็นผลรวมค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาวดังแสดงในสมการที่ (3.4) จะพบว่าค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมในกรณีของมู่ลี่สีครีม มุมบิด 45 องศา จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นยาวมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นสั้น เนื่องจาก มู่ลี่บังแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ แสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าห้องโดยตรงได้น้อย ค่า SHGC ในส่วนของคลื่นสั้นจึงน้อย ในขณะที่แสงอาทิตย์ที่ถูกมู่ลี่บังเป็นส่วนใหญ่ จะถูกดูดกลืนในใบมู่ลี่ และคายออกมาเป็นรังสีคลื่นยาว ส่งผลให้ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวมีค่ามาก

6.1.4 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น -45 องศา

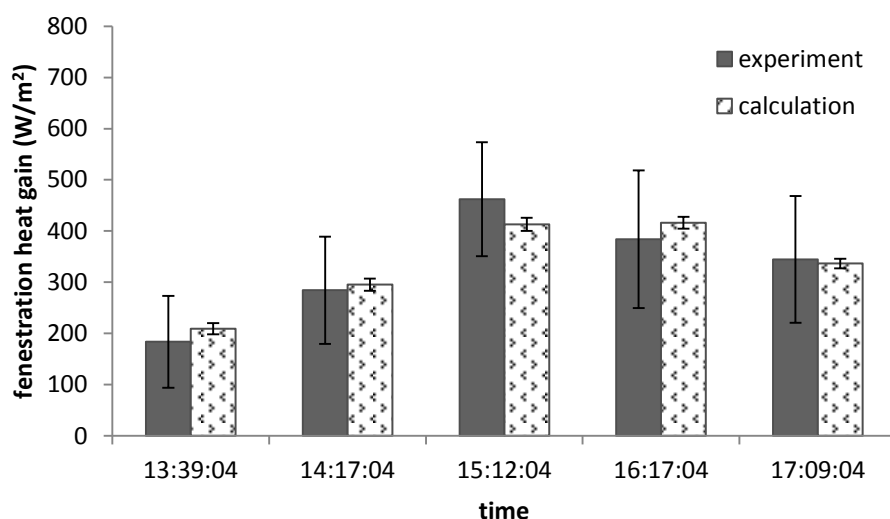
ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.13 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.14 ถึง 6.16 ตามลำดับ



รูปที่ 6.13 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา

รูปที่ 6.13 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา ที่วัดในวันที่ 5 มีนาคม พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.12 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และหลังเวลา 17.12 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังเวลา 17.12 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก และจะเห็นได้ว่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.55 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 14.25 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 14.00 น. จนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.10 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง โดยจะมีค่าแกว่งขึ้นลงเป็นคาบในช่วงเวลา 14.25 น. ถึง 17.13 น. ในการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่วัดภายในห้องทดลองนั้น จะติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์สองตัวด้านหลังมู่ลี่ โดยให้ตัวหนึ่งอยู่ด้านบน อีกตัวหนึ่ง

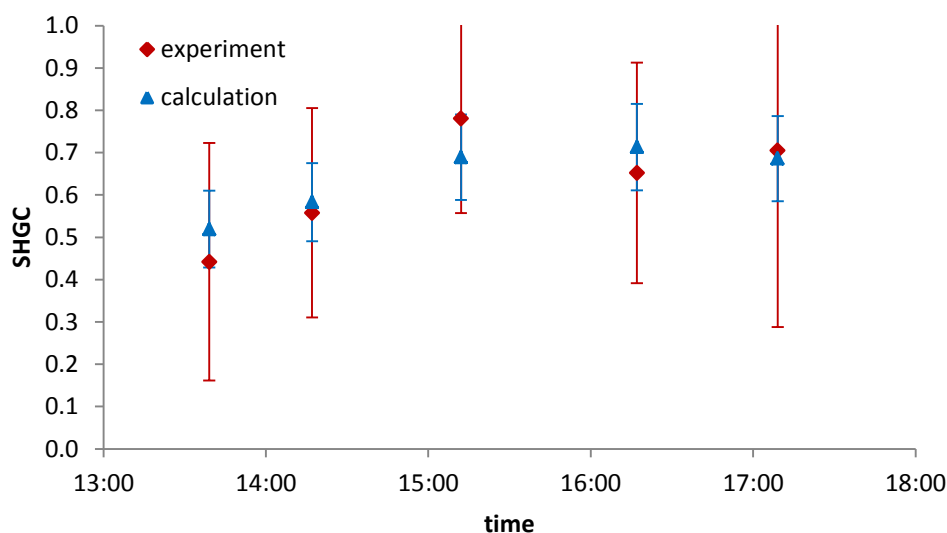
อยู่ด้านล่าง ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในแต่ละเวลาจึงมีสองค่า และจะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่นี้จะมีลักษณะการกระจายตัวและแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้านล่าง (global inside 2) จะมีแนวโน้มต่ำกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ที่วัดด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งด้านบน(global inside 1) เล็กน้อย เนื่องจากการติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่างกัน และค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่เป็นค่าเฉพาะของแต่ละเครื่องที่มีค่าต่างกัน



รูปที่ 6.14 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา

รูปที่ 6.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าต่างกันมากที่สุดที่เวลา 15.12 น. ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องจะมีค่าน้อยที่สุดในช่วงที่แสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.12 น. จากการทดลอง และ 16.17 น. จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และหลังจากนั้นค่าจะลดลง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก ในขณะที่ค่าความ

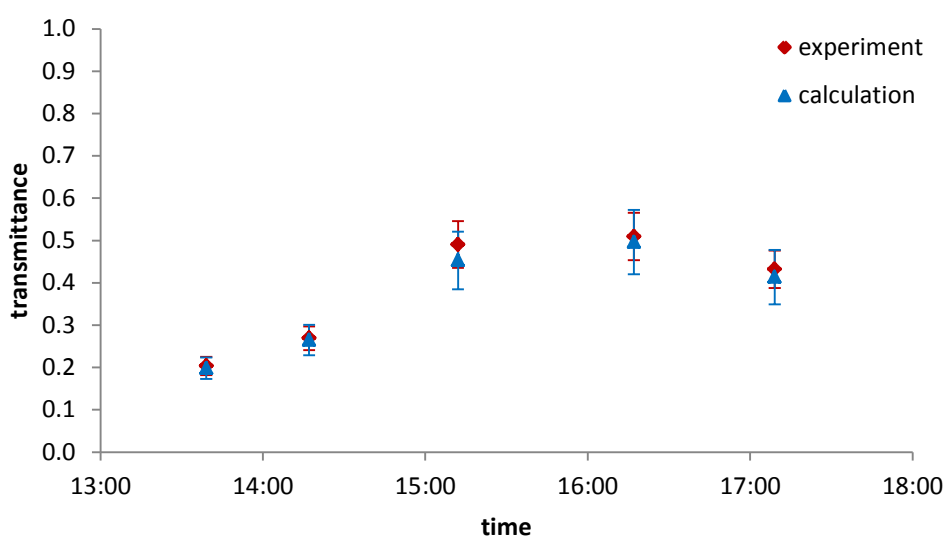
คลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ จะมีค่าน้อย ทำให้ยากต่อการระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.15 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา

รูปที่ 6.15 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดเป็น -45 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมของแต่ละเวลาในกรณีนี้จะมีค่อนข้างสูง คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.44 ถึง 0.78 กล่าวคือ การปรับมุมบิดเป็น -45 องศา จะเป็นการเปิดรับแสงอาทิตย์ แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเข้าห้องได้มาก ทำให้ค่า SHGC มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเหมือนกัน คือมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป ยกเว้นที่เวลา 17.09 น. และเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลา 15.12 น. และ 17.09 น. ส่วนที่เวลาอื่น ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้

ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน q/I ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงแปรตามค่าอัตราส่วน q/I ส่งผลให้แนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามากคืออยู่ในช่วง 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา



รูปที่ 6.16 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด -45 องศา

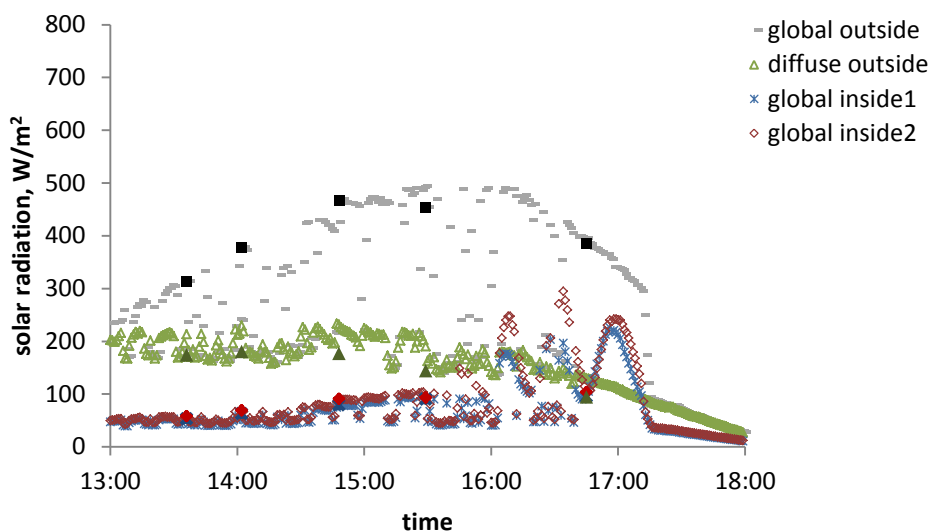
รูปที่ 6.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จากรูป จะเห็นว่า ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.51 กล่าวคือการปรับมุมบิดเป็น -45 องศา แสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านเข้าห้องได้มาก ในช่วงเวลาที่พิจารณา ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่ามากที่สุดที่เวลา 16.17 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง เนื่องจาก จากรูปที่ 6.13 จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก

และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดได้ทั้ง 5 จุดที่ศึกษา มีแนวโน้มสอดคล้องกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.17 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง จึงส่งผลให้ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่อค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกมีแนวโน้มดังที่กล่าวมา นอกจากนี้ จะเห็นว่าค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ซึ่งเป็นผลรวมของค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาวดังแสดงในสมการที่ (3.4) จะพบว่าในกรณีของหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า มุมบิด -45 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาวที่ทุกเวลาที่ศึกษา เนื่องจากที่มุมบิด -45 องศา แสงอาทิตย์ส่วนมากจะสามารถส่งผ่านเข้าห้องได้โดยตรง

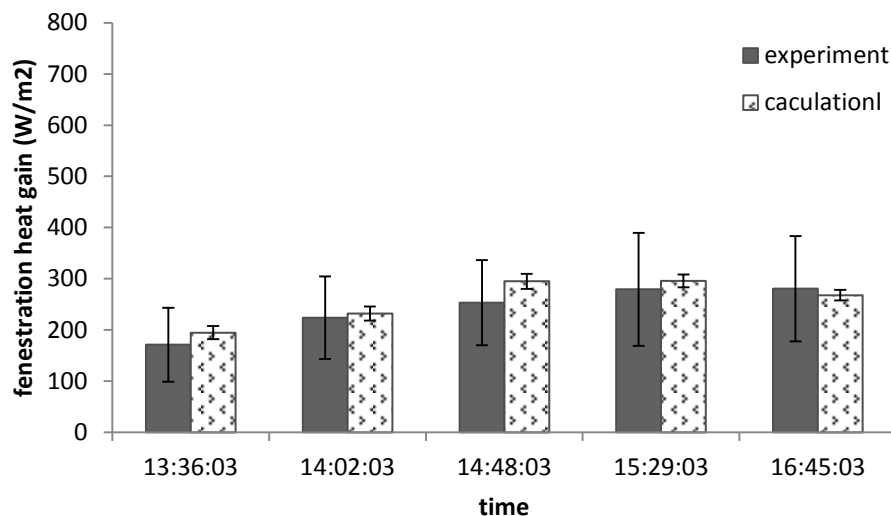
6.1.5 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น 0 องศา

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.17 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.18 ถึง 6.20 ตามลำดับ



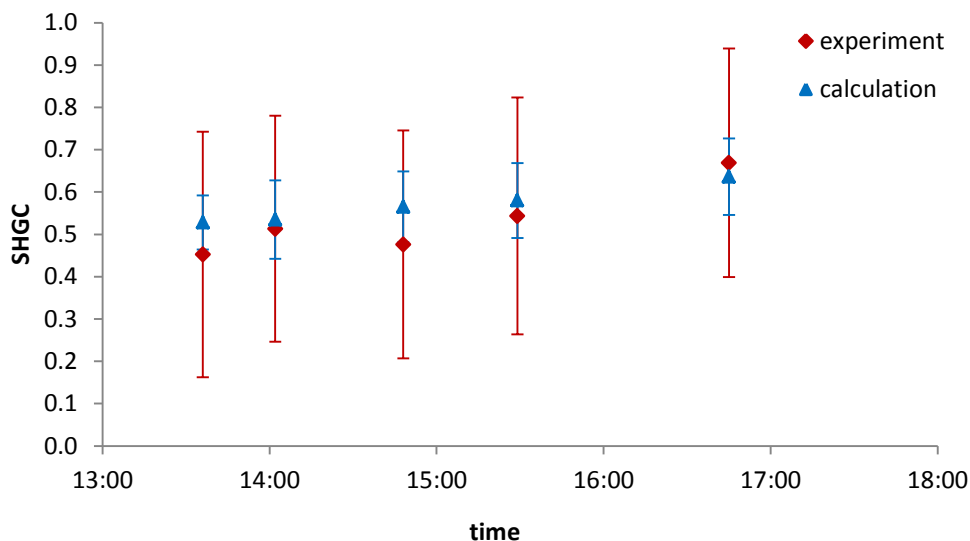
รูปที่ 6.17 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา

รูปที่ 6.17 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ที่วัดในวันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.14 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และที่หลังเวลา 17.14 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังเวลา 17.14 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.28 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 15.24 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดเป็น 0 องศา จะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 14.25 น. จนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.34 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และจะมีค่าแกว่งขึ้นลงเป็นคาบในช่วงเวลา 15.30 น. ถึง 17.14 น.



รูปที่ 6.18 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมปิด 0 องศา

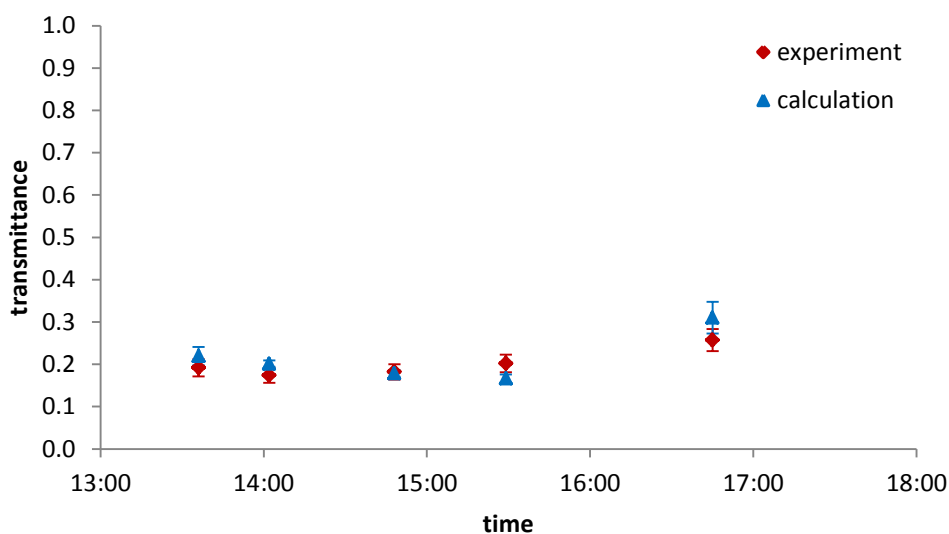
รูปที่ 6.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดเป็น 0 องศา พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน การถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 13.36 น. และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนกระทั่งที่เวลา 15.29 น. หลังจากนั้นจะลดลง มีแนวโน้มแปรตามค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณา ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ จะมีค่าน้อย ทำให้ยากต่อการระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.19 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง มู่ลี่สีฟ้า ที่มุมปิด 0 องศา

รูปที่ 6.19 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดเป็น 0 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมของแต่ละเวลาจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.45 ถึง 0.67 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นว่า ค่า SHGC ที่เวลา 14.02 น. จะมีค่าเพิ่มจากเวลา 13.36 น. แล้วจะมีค่าลดลงที่เวลา 14.48 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 16.45 น. ในขณะที่ค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13.36 น. ถึง 16.45 น. จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีช่วงที่เหมือนกันคือ ช่วงเวลาจาก 13.36 น. ถึง 14.02 น. และช่วงเวลาจาก 15.29 น. ถึง 16.45 น. ทั้งนี้ เนื่องจากค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมนั้นแปรตามค่าอัตราส่วน q/I การพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมจึงต้องพิจารณาทั้งค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่และค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก ตัวอย่างเช่น เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างเวลา 13.36 น. และ 14.02 น. ที่ได้มีการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เวลา 13.36 น. มีค่าน้อยกว่าเวลา 14.02 น. เนื่องจาก ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกที่เวลา 13.36 น. มีค่าน้อยกว่าที่เวลา 14.02 น. ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับค่า

การถ่ายเทความร้อน ส่งผลให้ค่าอัตราส่วน q/I ที่เวลา 13.36 น. มีค่าน้อยกว่าที่เวลา 14.02 น. นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองของทุกเวลาที่ศึกษายกเว้นเวลา 16.45 น. จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถอธิบายได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วน q/I โดยที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกของการทดลองจะเป็นค่าเดียวกับค่าที่เป็นข้อมูลขาเข้าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทุกเวลาที่ศึกษายกเว้นเวลา 16.45 น. เช่นเดียวกับค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มีค่าที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทุกเวลาที่ศึกษายกเว้นที่เวลา 16.45 น. และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามาก ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา



รูปที่ 6.20 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 0 องศา

รูปที่ 6.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของ

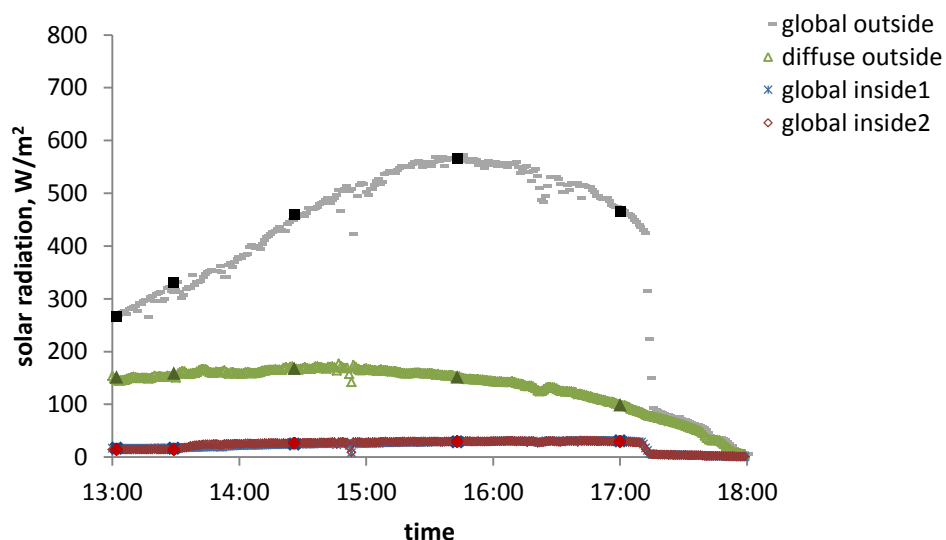
หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ส่งผลให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องการทดลองซึ่งมีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 13.36 น. และค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 16.45 น. ดังแสดงในรูปที่ 6.17 เมื่อนำมาหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก จะได้ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เมื่อปรับสเกลแล้วจะมีค่าลดลงจากเวลา 13.36 น. ถึง 14.02 น. หลังจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นจนเวลา 16.45 น. ดังรูปที่ 6.20 และจะเห็นว่า ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.17 ถึง 0.31 กล่าวคือ การปรับมุมบิดเป็น 0 องศา มู่ลี่จะบังแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่ง โดยจะบังน้อยที่สุดที่เวลา 16.45 น. เนื่องจากแสงอาทิตย์จะตกกระทบหน้าต่างกระจกทำมุมใกล้เคียง 0 องศามากที่สุด จึงส่งผลให้ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมมีค่าน้อยที่สุด และจะเห็นว่าค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

เมื่อพิจารณา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ซึ่งเป็นผลรวมของค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาวดังแสดงในสมการที่ (3.4) จะพบว่าในกรณีของหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า มุมบิด 0 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาวที่เวลา 13.36 น. และ 16.45 น. ซึ่งเป็นเวลาที่แสงอาทิตย์ทำมุมตกกระทบหน้าต่างกระจกใกล้ 90 องศา และ 0 องศา ตามลำดับ เนื่องจากการปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา แสงอาทิตย์ส่วนมากจะโดนมู่ลี่บังเมื่อแสงอาทิตย์ทำมุมตกกระทบใกล้ 90 องศา และ 0 องศา ในขณะที่ช่วงระหว่างเวลาที่กล่าวมา ผลของ SHGC ในส่วนคลื่นสั้นจะใกล้เคียงกับผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นยาว

6.1.6 ผลการวิเคราะห์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าซึ่งปรับมุมบิดเป็น 45 องศา

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องการทดลองของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา ในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 18.00 น. จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.21 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดในระหว่างวันจำนวน 5 จุด จะถูกนำมาประมวลผลในโปรแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วนำไปเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

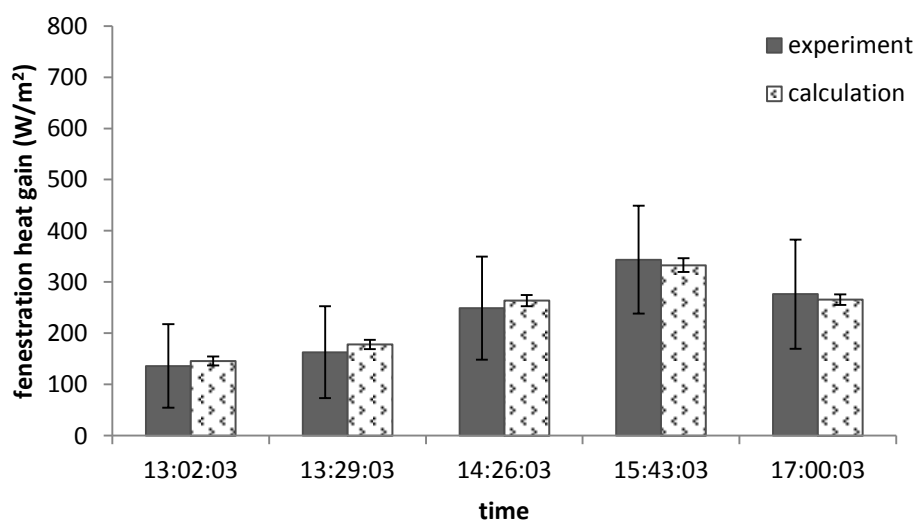
โดยจะเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในกรณีของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.22 ถึง 6.24 ตามลำดับ



รูปที่ 6.21 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา

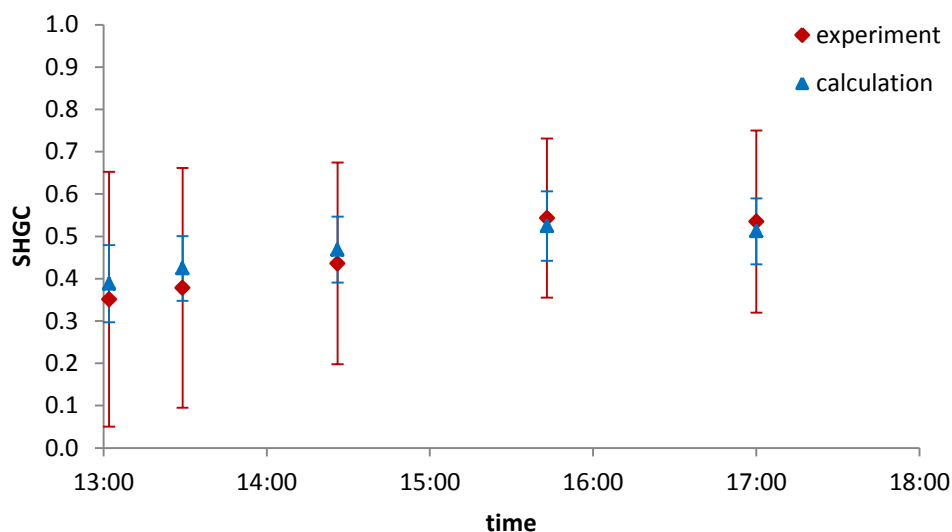
รูปที่ 6.21 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่วัดภายในห้องทดลองของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา ที่วัดในวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 จากรูป จะเห็นว่าในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลาประมาณ 17.15 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่ามากกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และที่หลังเวลา 17.15 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ช่วงหลังเวลา 17.15 น. จะมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยมาก รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และจะมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.43 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง ในขณะที่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากในช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 16.25 น. หลังจากนั้นจะมีค่าค่อยๆลดลง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า และปรับมุมบิดเป็น 45 องศา จะมีค่าน้อย

มาก คือ มีค่าไม่เกิน 30 W/m^2 โดยมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13.00 น. จนมีค่ามากที่สุดที่ที่เวลาประมาณ 17.06 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และจะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดด้านหลังมู่ลี่ทั้งสองตัวจะมีลักษณะการกระจายตัวและแนวโน้มใกล้เคียงกัน



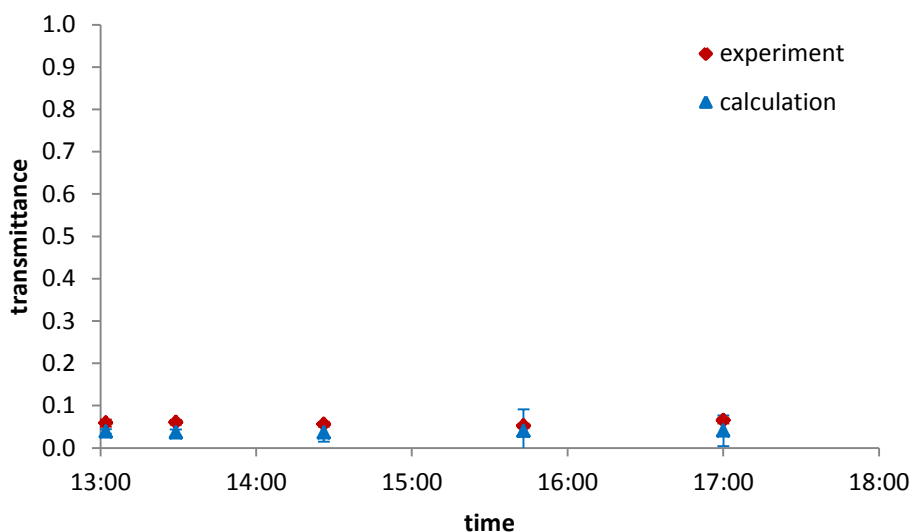
รูปที่ 6.22 ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา

รูปที่ 6.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่ห้องทดลองที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้าปรับมุมบิดเป็น 45 องศา พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 13.02 น. ซึ่งเป็นช่วงที่แสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจก มุมตกกระทบจะมีค่าใกล้เคียง 90 องศา และค่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากที่สุดที่เวลา 15.43 น. และจะมีค่าลดลง แปรตามค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการทดลองจะมีค่ามาก (มีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์) ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ จะมีค่าน้อย (มีค่าอยู่ในช่วง 4 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ไม่สามารถระบุถึงสาเหตุของความแตกต่างระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.23 ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้ง มู่ลี่สีฟ้า ที่มุมปิด 45 องศา

รูปที่ 6.23 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดเป็น 45 องศา พบว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมของแต่ละเวลาในกรณีนี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.38 ถึง 0.53 เมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่า SHGC ที่ได้ พบว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเหมือนกัน คือ ค่า SHGC จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป และมีค่าสูงสุดที่เวลา 15.43 น. หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามากกว่าค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เวลา 15.43 น. และ 17.00 น. ส่วนที่เวลาอื่นค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นแปรตามค่าอัตราส่วน q/I ส่งผลให้แนวโน้มและความสอดคล้องของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองจะมีค่ามาก ซึ่งเป็นผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมา



รูปที่ 6.24 ค่าการส่งผ่านรังสีที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ที่มุมบิด 45 องศา

รูปที่ 6.24 แสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละเวลา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกใส มู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา โดยค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่นี้จะเป็นค่าที่ปรับสเกลให้สเกลเต็มเป็น 1 ด้วยการหารด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกให้สอดคล้องกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม พบว่าค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก และมีค่าน้อยมาก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.05 กล่าวคือ การปรับมุมบิดเป็น 45 องศา มู่ลี่จะบังแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ แสงอาทิตย์ส่องผ่านเข้าสู่ห้องได้น้อย ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์รวมจึงมีค่าน้อย

เมื่อพิจารณา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม ซึ่งเป็นผลรวมค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนคลื่นยาวดังแสดงในสมการที่ (3.4) จะพบว่าค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมในกรณีของมู่ลี่สีฟ้า มุมบิด 45 องศา จะมาจากผลของ SHGC ในส่วนคลื่นยาวมากกว่าผลของ SHGC ในส่วนของคลื่นสั้นเนื่องจาก มู่ลี่บังแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ แสงอาทิตย์ส่องผ่านเข้าห้องโดยตรงได้น้อย ค่า SHGC ในส่วนของคลื่นสั้นจึงน้อย ในขณะที่เดียวกันแสงอาทิตย์ที่ถูกมู่ลี่บังเป็นส่วนใหญ่นี้ จะ

ถูกดูดกลืนในไบมูลี่ และคายออกมาเป็นรังสีคลื่นยาว ส่งผลให้ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวมีค่ามาก

ในการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่ระหว่างผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์บันตลี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มูลี่ที่ใช้ศึกษาจะใช้มูลี่สีครีม และสีฟ้า ซึ่งจะคุณสมบัติทาง optic ของมูลี่ ได้แก่ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้น และค่าการเปล่งรังสีต่างกัน มูลี่สีครีมจะมีค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นเป็น 0.71 และค่าการเปล่งรังสีเป็น 0.83 ส่วนมูลี่สีฟ้าจะมีค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นเป็น 0.35 และค่าการเปล่งรังสีเป็น 0.74 จากงานวิจัยของ Chaiyapinunt, S. และ Khamporn, N. [35] พบว่าค่าการเปล่งรังสีที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่อค่า SHGC ของรังสีแบบตรงน้อยมาก และไม่มีผลต่อค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในส่วนของรังสีคลื่นสั้น แต่ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของไบมูลี่เป็นหลัก โดยที่ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะแปรผกผันกับค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของไบมูลี่ ส่วนค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะแปรผันตามค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของไบมูลี่ ดังนั้นตามงานวิจัยที่กล่าวเบื้องต้น จะได้ว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเมื่อใช้มูลี่สีฟ้าจะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้มูลี่สีครีม และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในส่วนของรังสีคลื่นสั้นเมื่อใช้มูลี่สีครีมจะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้มูลี่สีฟ้า แต่ในการทดลองจริง ค่าที่ได้จากการทดลอง จะเป็นค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมในส่วนของรังสีคลื่นสั้น โดยตัวแปรทั้งสองนี้จะเป็นค่าที่รวมผลของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และแบบกระจายเข้าด้วยกัน ไม่ใช่ผลของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงอย่างเดียว ส่งผลให้ไม่สามารถแสดงผลกระทบของค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้นของมูลี่ต่อสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกและมูลี่ได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่ระหว่างผลการทดลอง และผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จะเห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมูลี่เข้าสู่ห้อง และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดลองจะมีค่ามาก สาเหตุหลักเกิดจากวิธีการหาค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจก ซึ่งเป็นผลของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับภาระทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศหักลบด้วยค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจาก

ภาระการทำความร้อนจากแหล่งความร้อนอื่นๆ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของทั้งค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง และค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นจะมีค่าประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือ ถ้าปริมาณความร้อนของห้องทดลองมีค่าเป็น 1200 W/m^2 ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนของห้องทดลองนี้จะมีค่าประมาณ 60 W/m^2 และถ้าค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นมีค่าเป็น 1000 W/m^2 ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นจะมีค่าประมาณ 50 W/m^2 ทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกเป็น 200 W/m^2 โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนจะเป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองกับค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นตามสมการที่ (5.10) จะได้ 78 W/m^2 นั่นคือ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกจะเป็น 39 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองกับค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่นจะอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ แต่เมื่อเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกแล้ว จะมีค่ามาก ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลจากค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกมีค่ามาก แต่ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองจะเป็นค่าที่วัดจากเครื่องวัดความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง ค่าความคลาดเคลื่อนจึงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ และค่าที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน

การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาด้วยการทดลองที่ห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถสรุปได้ว่า มีความแม่นยำในการทำนายค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ หรือค่า SHGC ในส่วนคลื่นสั้น ในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจก และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมนั้น ค่าที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงเกินไป ด้วยเหตุนี้เพื่อให้สามารถตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จึงทำการเปรียบเทียบค่า SHGC ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองที่พัฒนาและผลการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. [36] ซึ่งเป็นการทดลองที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ที่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

6.2 การเปรียบเทียบค่า Solar Heat Gain Coefficient ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลองของ Collins, MR. และ Harrison, S.J.

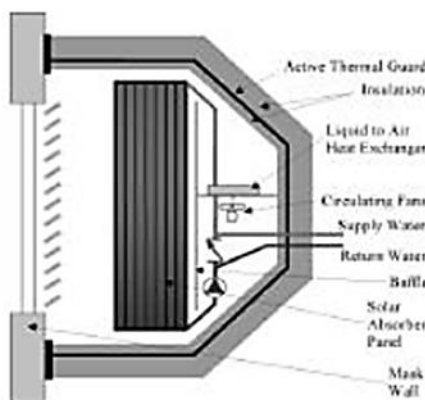
6.2.1 การทดลอง

Collins, M.R. และ Harrison, S.J. ได้สร้าง Solar Calorimetry Laboratory (SCL) ดังแสดงในรูปที่ 6.19 โดยตั้งห้องทดลองสำหรับวัดปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์บนหลังคาของอาคาร เพื่อวัดค่าความร้อนสุทธิ (net heat gain) ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกเข้าสู่ช่องว่างระหว่างผนังที่เรียกว่า mask wall และอุปกรณ์ป้องกันความร้อน (active thermal guard) และใช้สมดุลพลังงานเพื่อหาค่าความร้อนสุทธิที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจก

การวัดค่าเพื่อหาค่า SHGC ของระบบหน้าต่างกระจก จะวัดค่าข้อมูลของสภาพอากาศ ได้แก่ ความเร็วลม ทิศทางลม อุณหภูมิอากาศภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ รวมทั้งมีการติดตั้งเครื่องวัดความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ 2 ตัวกับ mask wall เพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและแบบกระจาย โดยมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมห้องทดลองและเครื่องวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์เคลื่อนตามมุม azimuth และมุม altitude ของดวงอาทิตย์



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.25 (ก) ห้องทดลองสำหรับวัดปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ และ (ข) ภาพตัดขวางของห้องทดลอง

6.2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

การทดลองที่จะนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะเลือกกรณีหน้าต่างกระจกแบบใสสองชั้นที่มีช่องว่างอากาศขนาด 13 มิลลิเมตร มู่ลี่ที่ใช้ในการทดลองจะเลือกใช้มู่ลี่สีขาว และดำ และปรับมุมบิดของใบมู่ลี่สามมุม คือ 0 45 และ -45 องศา รวมเป็น 10 กรณี โดยจะติดตั้งมู่ลี่ห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 40 มิลลิเมตร และศึกษาเฉพาะที่ค่ามุมตกกระทบที่ระบบหน้าต่างกระจกเป็น 30 และ 45 องศา ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกแบบใสหนึ่งชั้น และมู่ลี่ที่ศึกษา จะแสดงในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2 ตามลำดับ ตารางที่ 6.1 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของหน้าต่างกระจกที่ศึกษา

คุณสมบัติ	
ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก	0.84
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้าและด้านหลัง	0.07
ค่าการดูดกลืนรังสี	0.09
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.84
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.84
ค่าความต้านทานความร้อน, $(m^2 \cdot K)/W$	0.0031
ความหนา, mm	3

ตารางที่ 6.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมู่ลี่ที่ศึกษา

คุณสมบัติ	ชนิดของมู่ลี่	
	สีขาว	สีดำ
ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้น	0.68	0.10
ค่าการเปล่งรังสี	0.75	0.89
ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่, mm	52.3	
ความหนาของใบมู่ลี่, mm	0.17	
ความกว้างของมู่ลี่เมื่อวัดตามผิวโค้ง, mm	25.4	
ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ทั้งสองใบ, mm	22.2	
สภาพนำความร้อน, $W/(m \cdot K)$	120	

ข้อมูลสภาพอากาศที่วัดจากห้องทดลอง ที่จะนำมาเป็นขาเข้าเพื่อนำไปประมวลผลในโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบค่า SHGC ของระบบหน้าต่างกระจก แสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและแบบกระจายที่ใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สีของมู่ลี่	มุมตกกระทบ, °	มุมบิดของมู่ลี่, °	$I_d (W/m^2)$	$I_a (W/m^2)$
สีขาว	30	0	701.61	164.58
สีขาว	45	0	504.48	163.42
สีขาว	30	45	759.53	166.73
สีขาว	45	45	606.44	181.14
สีขาว	30	-45	730.72	160.40
สีขาว	45	-45	592.67	167.16
สีดำ	30	0	754.73	177.03
สีดำ	30	45	650.11	240.45
สีดำ	45	45	643.21	160.82
สีดำ	30	-45	719.82	191.34

6.2.3 การเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่า SHGC ระหว่างผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J.

จากการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. จะได้ค่า SHGC และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบหน้าต่างกระจก โดยจะเป็นค่าที่รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจก แต่ในการทำนายผลเฉลยจากแบบจำลองที่พัฒนา ค่า SHGC และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบหน้าต่างกระจกที่ได้ จะเป็นค่าที่พิจารณาเฉพาะหน้าต่างกระจก กล่าวคือ ไม่รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจก ซึ่งค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองที่เป็นค่าที่รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจก จะสามารถแปลงเป็นค่า SHGC ที่พิจารณาเฉพาะหน้าต่างกระจกโดยการพิจารณาพื้นที่หน้าต่างกระจกและกรอบหน้าต่างกระจก แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะไม่สามารถแปลงได้ การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จึง

พิจารณาเฉพาะค่า SHGC ของระบบหน้าต่างกระจก ซึ่งเป็นค่า SHGC ที่เป็นผลของรังสีแสงอาทิตย์รวม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าจากผลการทดลองและผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ค่า SHGC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จะใช้สมการที่ (5.4) ในการคำนวณ และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นเป็น 0.2 ผลการเปรียบเทียบค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองและผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่า SHGC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลอง

สีของมู่ลี่	$\theta, ^\circ$	$\phi, ^\circ$	$SHGC_{exp}$	$SHGC_m$	error _m , %	$SHGC_o$	error _o , %*
สีขาว	30	0	0.59±0.01	0.610	3.34	0.616	4.41
สีขาว	45	0	0.56±0.01	0.525	-6.27	0.532	-5.00
สีขาว	30	45	0.46±0.01	0.456	-0.89	0.435	-5.43
สีขาว	45	45	0.44±0.01	0.439	-0.27	0.410	-6.82
สีขาว	30	-45	0.65±0.01	0.634	-2.41	0.632	-2.77
สีขาว	45	-45	0.65±0.01	0.655	0.78	0.671	3.23
สีดำ	30	0	0.65±0.01	0.654	0.66	0.668	2.77
สีดำ	30	45	0.64±0.01	0.607	-5.17	0.599	-6.41
สีดำ	45	45	0.64±0.01	0.600	-6.22	0.584	-8.75
สีดำ	30	-45	0.68±0.01	0.687	0.97	0.686	0.88

* θ คือ มุมตกกระทบรังสี ϕ คือ มุมบิดของมู่ลี่ $SHGC_{exp}$ คือ ค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง $SHGC_m$ คือ ค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา error_m คือ ค่าคลาดผิดพลาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาเทียบกับการทดลอง $SHGC_o$ คือ ค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เก่า และ error_o คือ ค่าคลาดผิดพลาดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่าเทียบกับการทดลอง

จากตารางที่ 6.4 จะเห็นว่าค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ มุมบิดของมู่ลี่ สีของมู่ลี่ และข้อมูลสภาพอากาศ ทั้งนี้ การทดลองของ Collins,

M.R. และ Harrison, S.J. จะให้ค่า SHGC ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 0.01 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จึงสามารถใช้การทดลองนี้ตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ จะเห็นว่า ค่า SHGC ที่ได้จากการผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งแบบเก่า และที่พัฒนาจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า SHGC ที่ได้จากการทดลองมาก คือมีความผิดพลาดไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ โดยค่า SHGC ที่ได้จากการผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจะมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจะให้ผลเฉลยของค่า SHGC ที่มีความแม่นยำขึ้น



บทที่ 7

Parametric study

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาผลของการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ มุมบิดของมู่ลี่ ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก และค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของใบมู่ลี่ ที่มีต่อค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และจะกล่าวถึงการศึกษาผลของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่ ในการศึกษาจะพิจารณาที่สภาพภูมิอากาศที่มีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง 392.83 W/m^2 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย 174.76 W/m^2 ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก $35.49 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน $26.20 \text{ }^\circ\text{C}$ ค่าความเร็วลม 1.2 m/s และมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ 45 องศา

7.1 การศึกษาผลของมุมบิดของมู่ลี่

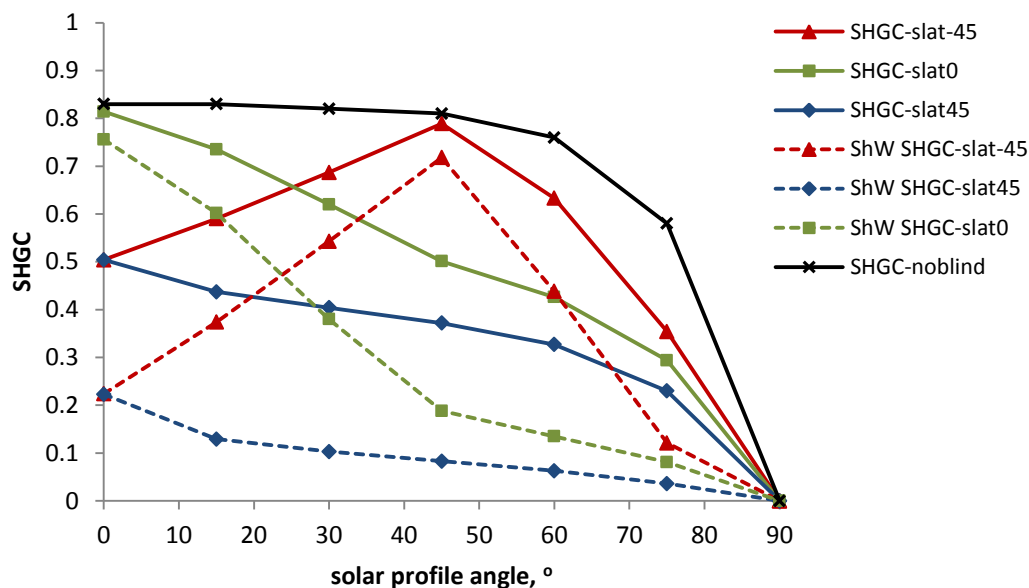
การศึกษาผลของการปรับมุมบิดของมู่ลี่ที่มีต่อค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เป็นการศึกษาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ค่า SHGC ในส่วนของคลื่นสั้น (การส่งผ่านรังสีคลื่นสั้น) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม โดยใช้หน้าต่างกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เป็น 40 มิลลิเมตร ค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกแสดงในตารางที่ 7.1 และใช้มู่ลี่สี่เหลี่ยมที่มีค่าคุณสมบัติเชิง optic ดังตารางที่ 7.2 การศึกษาจะทำในเงื่อนไขการปรับมุมบิดมู่ลี่เป็นมุม -45 0 และ 45 องศา ที่มุม solar profile ต่างๆ โดยให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับหน้าต่างกระจกมีค่าคงที่ และแสดงผลการศึกษาในรูปแบบที่ 7.1 ถึง 7.5

ตารางที่ 7.1 ค่าคุณสมบัติ optic ของหน้าต่างกระจกใส

คุณสมบัติ	
ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก	0.801
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้า	0.069
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหลัง	0.069
ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก	0.130
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.84
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.84

ตารางที่ 7.2 ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของมูลิที่ศึกษาผลของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก

คุณสมบัติ	
ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นสั้น	0.71
ค่าการเปล่งรังสี	0.83
ค่ารัศมีความโค้งของใบมูลิ, <i>mm</i>	71.5
ความหนาของใบมูลิ, <i>mm</i>	0.3
ความกว้างของมูลิเมื่อวัดตามผิวโค้ง, <i>mm</i>	25.4
ระยะห่างระหว่างใบมูลิทั้งสองใบ, <i>mm</i>	20
สภาพนำความร้อน, $W/(m \cdot K)$	120

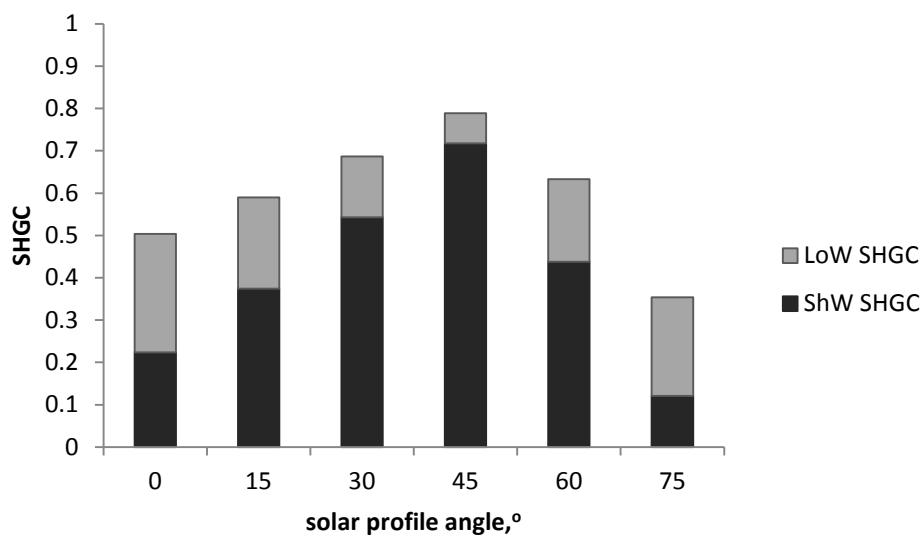


รูปที่ 7.1 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 0 และ 45 องศา

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่า การติดตั้งมู่ลี่ด้านหลังหน้าต่างกระจกจะสามารถลดค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะขึ้นอยู่กับมุมบิดของมู่ลี่ และมุม solar profile การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา เมื่อมุม solar profile เพิ่มขึ้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะค่อยๆเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมุม solar profile เป็น 45 องศา ค่า SHGC ของรังสีอาทิตย์แบบตรงจะลดลง ในขณะที่การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 และ 45 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะค่อยๆลดลง เมื่อมุม solar profile เพิ่มขึ้น โดยที่การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศาจะให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงน้อยที่สุดที่ทุกมุม solar profile สำหรับค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา ใบมู่ลี่บังแสงอาทิตย์ได้เป็นส่วนใหญ่ แสงอาทิตย์ผ่านเข้าห้องได้น้อย ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจึงมีค่าน้อยมากที่ทุกมุม solar profile การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะเป็นการเปิดรับแสงอาทิตย์ส่องผ่านสู่ห้อง ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจึงมีค่ามาก คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุม solar profile เพิ่มขึ้นจนถึง 45 องศา เนื่องจาก ที่มุม solar profile 45 องศา มู่ลี่จะเปิดรับแสงอาทิตย์มากที่สุด หลังจากนั้น ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะมีค่าลดลงเมื่อมุม solar profile เพิ่มขึ้น การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็นมุม 0 องศา ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะมีค่ามาก

เมื่อมุม solar profile มีค่าน้อย เนื่องจากแสงอาทิตย์ส่วนหนึ่งสามารถส่งผ่านเข้าห้องได้ และจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อมุม solar profile มากกว่า 45 องศา เนื่องจากการบังแสงอาทิตย์ของใบมู่ลี่

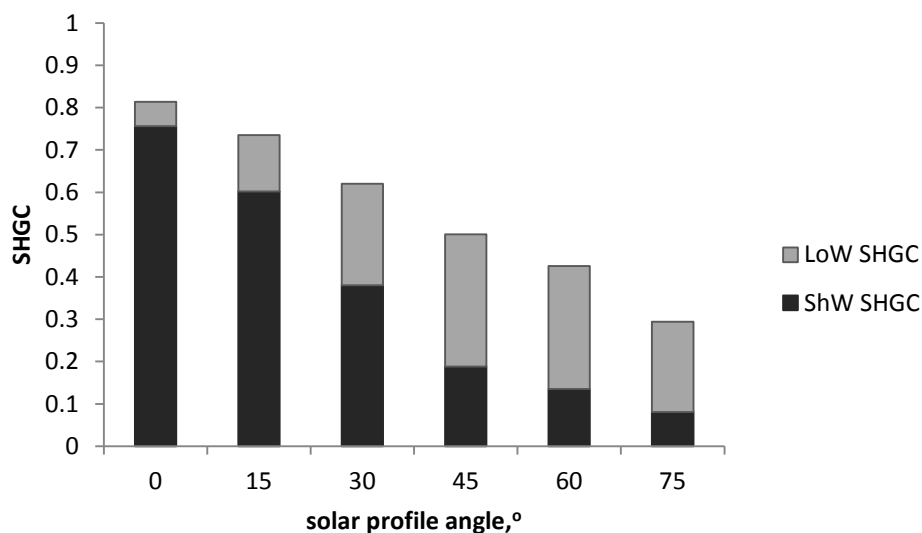
เนื่องจาก ค่า SHGC ของแสงอาทิตย์แบบตรง เป็นผลรวมของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว รูปที่ 7.2 ถึง 7.4 จะแสดงแผนภูมิแท่งของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แต่ละมุม solar profile โดยแผนภูมิแท่งแต่ละแท่งจะแบ่งเป็นส่วนของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว เพื่อให้สามารถพิจารณาผลของการปรับมุมบิดของใบมู่ลี่ได้ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 7.2 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 องศา

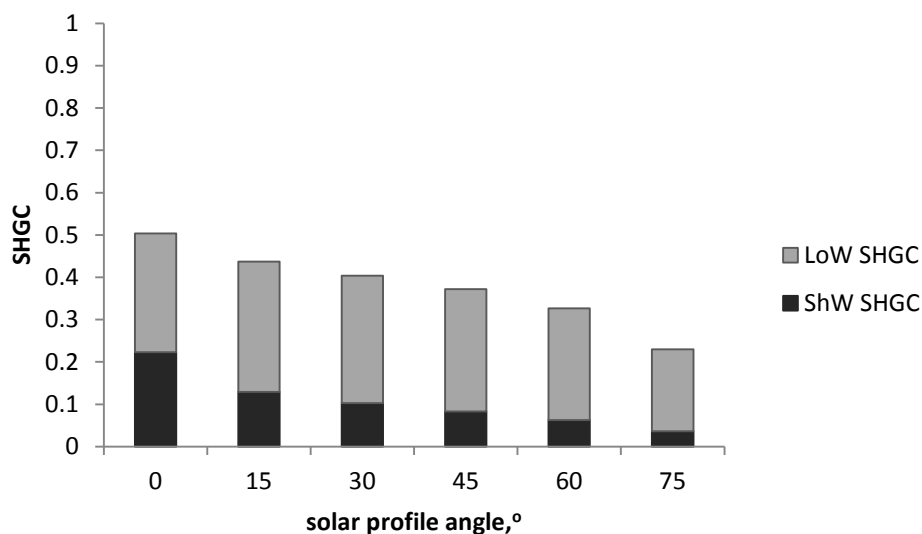
จากรูปที่ 7.2 จะเห็นว่า การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุม solar profile เพิ่มขึ้น จนกระทั่งมุม solar profile เป็น 45 องศา จะมีค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นมากที่สุด เนื่องจากการปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา จะเปิดรับให้แสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าห้อง และที่มุม solar profile เป็น 45 องศา แสงอาทิตย์จะสามารถส่งผ่านเข้าห้องได้มากที่สุด เมื่อพิจารณาค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว จะเห็นว่า ในกรณีที่มู่ลี่บังแสงอาทิตย์ได้มาก รังสีแสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้าสู่ห้องได้น้อย มู่ลี่จะดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ส่วนที่ถูกบังแล้วคายความร้อนเข้าสู่ห้อง ซึ่งรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนแล้วคายความร้อนเข้าสู่ห้องจะถูกพิจารณาเป็นส่วนของรังสีคลื่นยาว ส่งผลให้ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวในกรณีที่มู่ลี่บัง

แสงอาทิตย์ได้มากจะมีค่ามาก โดยส่วนของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทาง optic ของใบบ่มด้วย



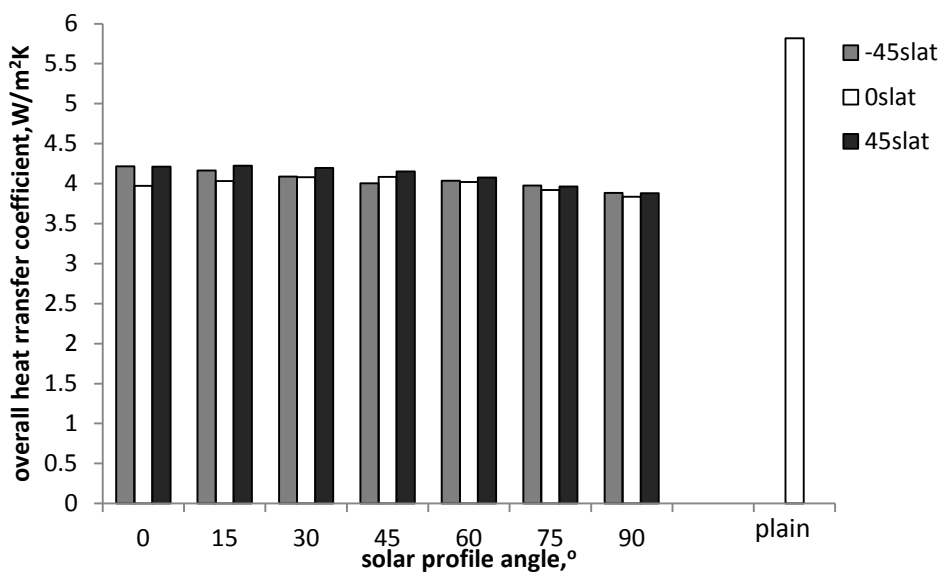
รูปที่ 7.3 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม 0 องศา

จากรูปที่ 7.3 จะเห็นว่า การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ช่วงมุม solar profile ระหว่าง 0 ถึง 45 องศา ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะมีค่ามากกว่าค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว เนื่องจากแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านเข้าห้องได้มาก และหลังจากมุม solar profile 45 องศา การส่งผ่านแสงอาทิตย์เข้าสู่ห้องจะลดลงเนื่องจากการบังของมู่ลี่ ค่า SHGC ในส่วนรังสีคลื่นยาวจะมีอิทธิพลมากในช่วงนี้ เนื่องจาก ใบบ่มจะบังแสงอาทิตย์เป็นส่วนมาก ส่งผลให้มีการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ที่ใบบ่ม แล้วคายความร้อนเข้าสู่ห้องเป็นสัดส่วนที่มากกว่าความร้อนที่เกิดจากการส่งผ่านความร้อน



รูปที่ 7.4 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปแบบของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวของหน้าต่างกระจกใส เมื่อปรับของมุมสี่เป็นมุม 45 องศา

จากรูปที่ 7.4 จะเห็นว่า การปรับมุมบิดของมุมสี่เป็น 45 องศา ที่ทุกมุม solar profile ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะมีค่าน้อยกว่าค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว เนื่องจากใบมู่ลี่บังแสงอาทิตย์เป็นส่วนใหญ่ และจากสาเหตุนี้ ใบมู่ลี่จะดูดกลืนความร้อนของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบใบมู่ลี่นี้ กลายเป็นความร้อนเข้าสู่ห้อง ส่งผลให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง จะประกอบด้วยสัดส่วนของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวมากกว่า



รูปที่ 7.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกใสตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกใสที่ติดตั้งมู่ลี่ เมื่อปรับของมู่ลี่เป็นมุม -45 0 และ 45 องศา

จากรูปที่ 7.5 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่าจะแสดงที่ด้านขวามือ จะเห็นได้ว่าการติดตั้งมู่ลี่จะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับมุมบิดของใบมู่ลี่ และมุม solar profile เมื่อปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อมุม solar profile เปลี่ยน ในขณะที่การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่ามุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 องศา เนื่องจาก การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา มู่ลี่จะดูดกลืนแสงอาทิตย์มาก ส่งผลให้ความร้อนที่ถูกดูดกลืนในระบบหน้าต่างกระจกมีค่ามากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงมีค่ามากกว่า

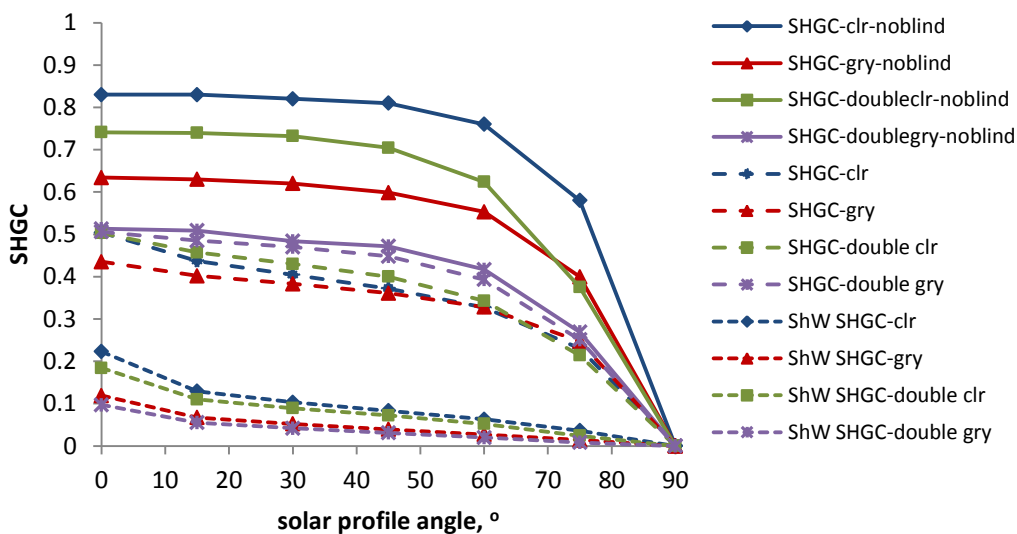
7.2 การศึกษาผลของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก

การศึกษาผลของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจกที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เป็นการศึกษาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ค่า SHGC ในส่วนของคลื่นสั้น (การส่งผ่านรังสีคลื่นสั้น) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน โดยใช้หน้าต่างกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร หน้าต่างกระจกสีชาหนา 6 มิลลิเมตร หน้าต่างกระจกใสสองชั้นที่แต่ละชั้นหนา 6 มิลลิเมตร มีช่องว่างระหว่างอากาศ 6 มิลลิเมตร และหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้นโดยที่ชั้นแรกเป็นหน้าต่างกระจกสีชา และชั้นที่สองเป็นหน้าต่างกระจกใส โดยที่แต่ละชั้นหนา 6

มิลลิเมตร มีช่องว่างระหว่างอากาศ 6 มิลลิเมตร หน้าต่างกระจกแต่ละชั้นมีสภาพนำความร้อนเท่ากับ $0.917 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกแสดงในตารางที่ 7.3 และใช้มู่ลี่สีครีม ที่มีค่าคุณสมบัติเชิง optic ดังตารางที่ 7.2 การศึกษาจะทำในเงื่อนไขมู่ลี่ติดตั้งห่างจากหน้าต่างกระจก 40 มิลลิเมตร และปรับมุมปิดเป็นมุม 45 องศา ที่มุม solar profile ต่างๆ โดยให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับหน้าต่างกระจกมีค่าคงที่ ผลการศึกษาจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.6 และ 7.7

ตารางที่ 7.3 ค่าคุณสมบัติ optic ของหน้าต่างกระจกใส หน้าต่างกระจกสีชา หน้าต่างกระจกใสสองชั้น และ หน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น

คุณสมบัติ	กระจกใส	กระจกสีชา	กระจกใสสองชั้น	กระจกสีชาสองชั้น
ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก	0.801	0.436	0.650	0.342
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้า	0.069	0.048	0.115	0.062
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหลัง	0.069	0.048	0.114	0.100
ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกชั้นที่ 1	0.130	0.516	0.137	0.532
ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกชั้นที่ 2	-	-	0.098	0.064
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.84	0.84	0.84	0.84
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.84	0.84	0.84	0.84

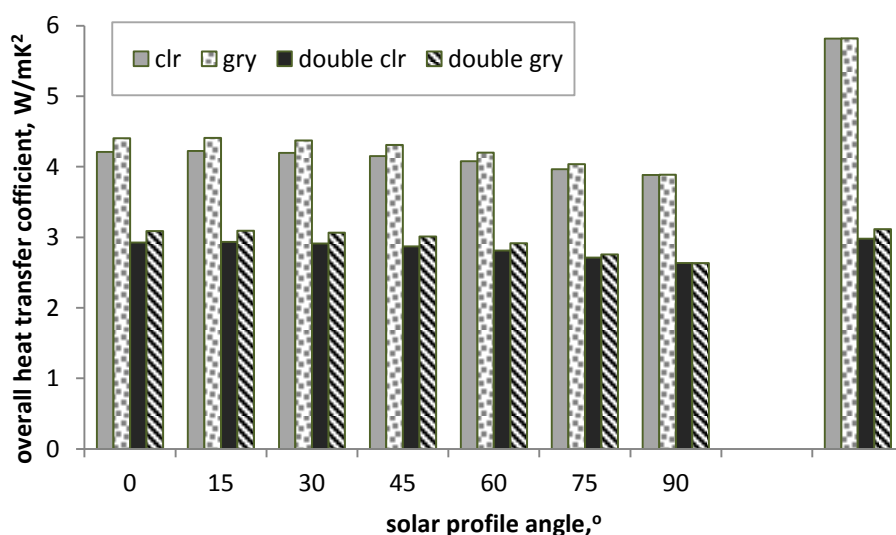


รูปที่ 7.6 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มีมุมปิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบต่างๆ

จากรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของหน้าต่างกระจกที่มีค่าคุณสมบัติทาง optic ที่ต่างกัน และมุม solar profile สำหรับช่วงมุม solar profile ที่ศึกษา (แสงอาทิตย์เริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจก มุม solar profile จะมีค่าใกล้เคียง 90 องศา และมีค่าลดลงเมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนต่ำลง) เมื่อมุม solar profile 0 ถึง 75 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบใสจะมีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ หน้าต่างกระจกใสสองชั้น หน้าต่างกระจกสีชา และหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น ตามลำดับ และเมื่อมุม solar profile มากกว่า 75 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบใสจะมีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ หน้าต่างกระจกสีชา หน้าต่างกระจกใส และหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ จะเห็นว่า เมื่อมุม solar profile 0 ถึง 60 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้นจะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกใสสองชั้น หน้าต่างกระจกใส และหน้าต่างกระจกสีชา ตามลำดับ และเมื่อมุม solar

profile มากกว่า 60 องศา ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้นจะมีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ หน้าต่างกระจกใส หน้าต่างกระจกใส และหน้าต่างกระจกใสสองชั้นตามลำดับ ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การใช้หน้าต่างกระจกใส เมื่อติดตั้งมู่ลี่ด้านหลังกระจกและปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 45 องศา จะสามารถลดค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้มากที่สุด ในขณะที่การใช้หน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น เมื่อติดตั้งมู่ลี่ด้านหลังกระจกจะลดค่า SHGC ได้น้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น จะเห็นว่า ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะแปรผันตามค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากของหน้าต่างกระจกแต่ละชนิด โดยมีค่ามากที่สุดในกรณีหน้าต่างกระจกใส รองลงมาคือ หน้าต่างกระจกใสสองชั้น หน้าต่างกระจกสีชา และหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวซึ่งเป็นค่าที่ได้จากค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงหักออกด้วยค่า SHGC ในส่วนของรังสีของคลื่นสั้น จะพบว่า ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวจะแปรผันตามค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ คือมีค่ามากที่สุดในกรณีของหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น รองลงมาคือ หน้าต่างกระจกสีชา หน้าต่างกระจกใสสองชั้น และหน้าต่างกระจกใส ตามลำดับ และเนื่องจากมุมบิดของมู่ลี่ที่ศึกษาคือ มุม 45 องศา ซึ่งจะมีอิทธิพลของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวมากกว่าค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นดังที่กล่าวมาในรูปแบบที่ 7.4 จึงส่งผลให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกสีชามีค่ามากที่สุด

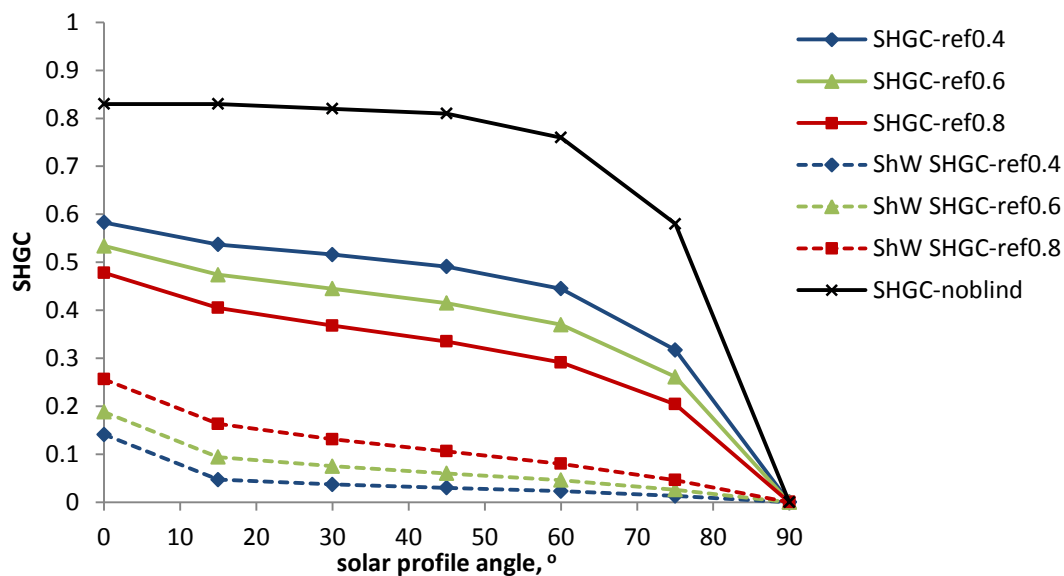


รูปที่ 7.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่สีครีม ที่มุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้หน้าต่างกระจกแบบต่างๆ

จากรูปที่ 7.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่าจะแสดงที่ด้านขวามือ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะขึ้นอยู่กับชนิดของหน้าต่างกระจก หรือค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนมุม solar profile โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้หน้าต่างกระจกสีขามีค่ามากที่สุด รองลงมาคือหน้าต่างกระจกใส หน้าต่างกระจกสีขาสองชั้น และหน้าต่างกระจกใสสองชั้น ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เทียบกับหน้าต่างกระจกตัวเปล่า จะพบว่า หน้าต่างกระจกชั้นเดียวจะสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกได้มากกว่าหน้าต่างกระจกสองชั้น อย่างไรก็ตาม หน้าต่างกระจกสองชั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมน้อยกว่าหน้าต่างกระจกชั้นเดียว

7.3 การศึกษาผลของค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของมู่ลี่

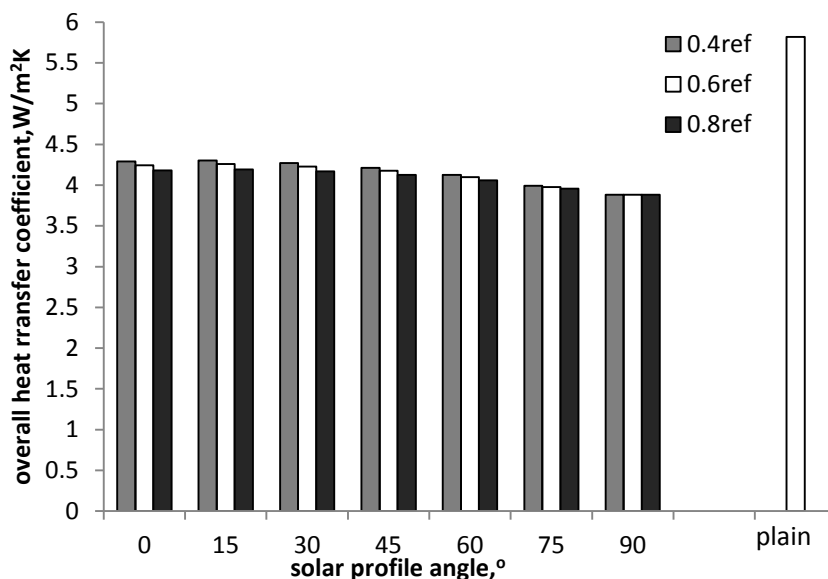
ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของใบมู่ลี่เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เป็นอย่างมาก การศึกษาจะทำในเงื่อนไขของหน้าต่างกระจกแบบใสที่มีค่าคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 7.1 และคุณสมบัติของมู่ลี่ยกเว้นค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่จะแสดงในตารางที่ 7.2 โดยจะศึกษาที่มุมบิดของมู่ลี่เป็นมุม 45 องศา ที่มุม solar profile ต่างๆ โดยให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับหน้าต่างกระจกมีค่าคงที่ ระยะห่างระหว่างมู่ลี่และหน้าต่างกระจกเท่ากับ 40 มิลลิเมตร และค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ศึกษาจะมีค่าเป็น 0.4 0.6 และ 0.8



รูปที่ 7.8 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มีมุมปิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเป็น 0.4 0.6 และ 0.8

จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่า ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มีมุมปิดของมู่ลี่ 45 องศา ขึ้นอยู่กับค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของมู่ลี่ โดยที่ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใบมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเท่ากับ 0.4 รองลงมาคือมีค่าเป็น 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ ที่ทุกมุม solar profile ตรงกันข้ามกับค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นที่มีค่ามากที่สุดเมื่อใบมู่ลี่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเท่ากับ 0.8 รองลงมาคือ 0.6 และ 0.4 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาว กับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น จะพบว่า ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวจะมีแนวโน้มเหมือนกับค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง คือ จะมีค่ามากที่สุดเมื่อใบมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเท่ากับ 0.4 รองลงมาคือมีค่าเป็น 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ ที่ทุกมุม solar profile เนื่องจาก มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์น้อย จะดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์มาก ส่งผลให้คายความร้อนจากใบมู่ลี่เข้าสู่ห้องมาก ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวจึงมีค่ามาก ส่วนมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์มาก การดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์จะน้อย ความร้อนจะคายเข้าสู่ห้องได้น้อย ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวจึงมีค่าน้อย



รูปที่ 7.9 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มีมุมบิดของมู่ลี่ 45 องศา เมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเป็น 0.4 0.6 และ 0.8

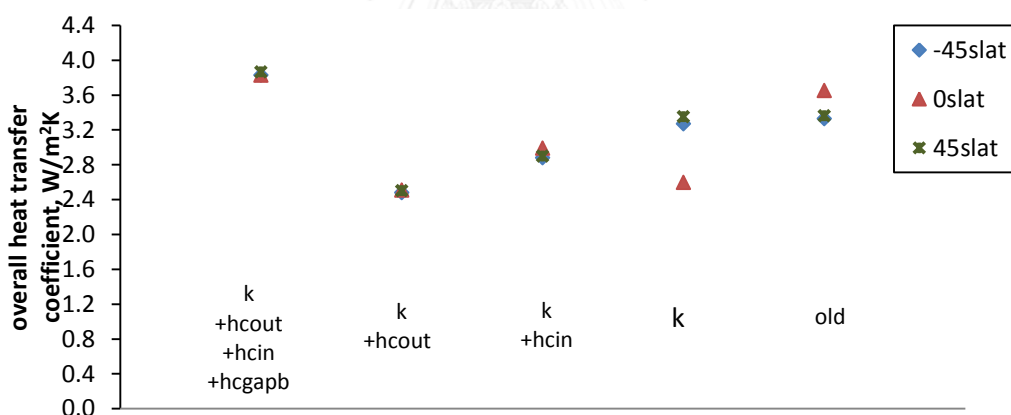
จากรูปที่ 7.9 ด้านขวามือจะแสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากเป็น 0.4 จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ เนื่องจากมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์น้อย จะสามารถดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ได้มาก ความร้อนที่ถูกดูดกลืนในระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งจะมีปริมาณมาก ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่ามาก แต่จะเห็นได้ชัดว่า การเปลี่ยนค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของมู่ลี่จะมีผลน้อยมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

7.4 การศึกษาผลของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพัฒนาวิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆในหลายส่วน เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายกลไกของการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ได้ใกล้เคียงกลไกที่แท้จริงได้มากขึ้น โดยจะพัฒนาในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีของพื้นดินที่มีผลต่อค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในแต่ละช่วงของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

และสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ ในหัวข้อนี้จะศึกษาเปรียบเทียบผลเฉลยที่ได้จากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละส่วน

การศึกษาผลของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่ จะศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง โดยใช้หน้าต่างกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เป็น 40 มิลลิเมตร ค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกแบบใสแสดงในตารางที่ 7.1 และใช้มู่ลี่สี่เหลี่ยมที่มีค่าคุณสมบัติเชิง optic ดังตารางที่ 6.2 การศึกษาจะทำในเงื่อนไขการปรับมุมบิดเป็นมุม -45° และ 45° องศา และจะพิจารณาที่มุม solar profile เป็น 61.02° องศา ที่มีสภาพภูมิอากาศที่มีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง 293.58 W/m^2 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย 189.80 W/m^2 ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก 34.12°C ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน 25.79°C ค่าความเร็วลม 1.2 m/s และมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ 38.53° องศา ผลการศึกษาของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.10 ถึง 7.13 และผลการศึกษาของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.14 ถึง 7.17



รูปที่ 7.10 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45° และ 45° องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

จากรูปที่ 7.10 จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในส่วนที่ต่างกัน โดยที่

k คือ มีการพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่

hcout คือ มีการพัฒนาการหาค่าการพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

hcin คือ มีการพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

hcgapb คือ มีการพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างกระจกด้านในกับมู่ลี่

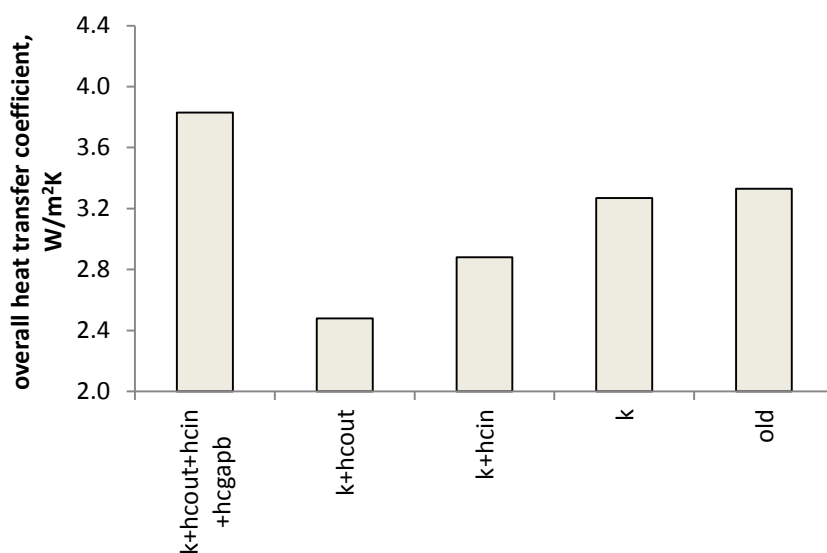
old คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า

และ $k+hcout+hcin+hcgapb$ จะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาล่าสุด คือมีการพัฒนาทุกส่วนที่กล่าวมา

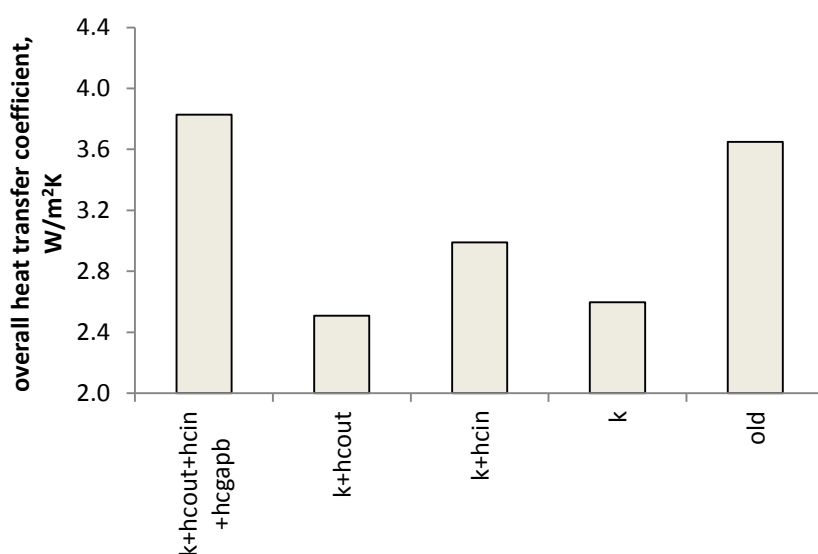
จะเห็นได้ว่า

- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า (old) ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีสภาพนำความร้อนของมู่ลี่คงที่ที่ทุกมุมบิดของมู่ลี่ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 0 องศา มีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น -45 และ 45 องศา ความแตกต่างที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการแผ่รังสีคลื่นยาวซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคุณสมบัติทาง optic ในช่วงความยาวคลื่นยาวที่มีค่าแปรตามค่าการสะท้อนที่ผิวของมู่ลี่ และมุมบิดของมู่ลี่
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่การพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ (k) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิดเป็น 0 องศาต่ำกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเมื่อปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น -45 และ 45 องศา เนื่องจาก ในการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่แบบใหม่ จะรวมผลของอากาศที่อยู่ระหว่างใบมู่ลี่ และสภาพนำความร้อนของอากาศจะมีค่าน้อยกว่าสภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่ การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ซึ่งมีสัดส่วนของอากาศมากกว่ากรณี -45 และ 45 องศา จึงให้สภาพนำความร้อนของมู่ลี่ที่ต่ำกว่า และทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าต่ำกว่า
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ ร่วมกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่ จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ใกล้เคียงกันในแต่ละมุมบิดของมู่ลี่ที่พิจารณา จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนต่างๆ ของระบบหน้าต่างที่ติดตั้งมู่ลี่จะมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมากกว่าสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

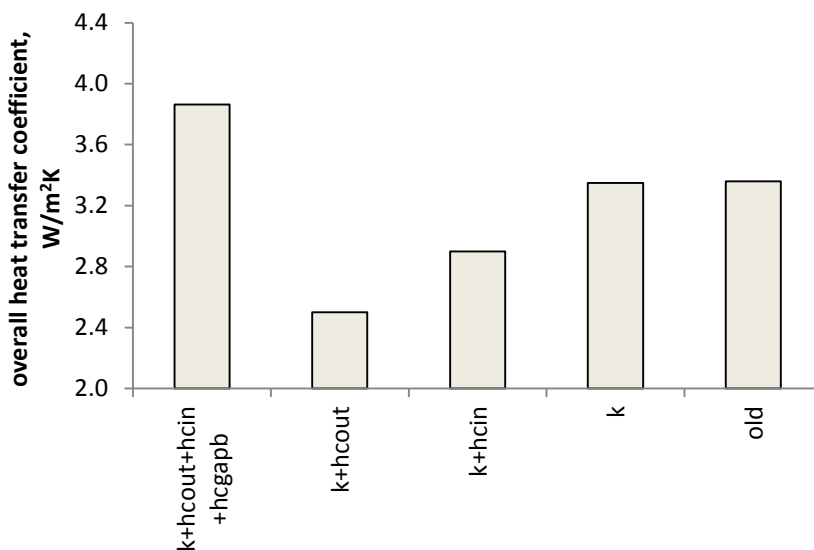
รูปที่ 7.11 ถึง 7.13 จะเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากกรณีเดียวกันกับรูปที่ 7.10 โดยแยกพิจารณาแต่ละมุมบิดของมู่ลี่ และปรับสเกลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



รูปที่ 7.11 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 7.12 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 0 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ



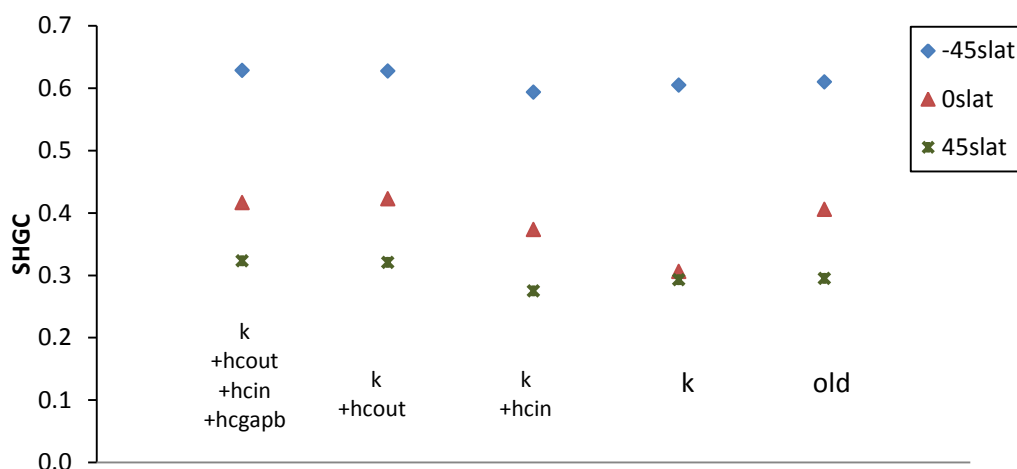
รูปที่ 7.13 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

จากรูปที่ 7.11 ถึง 7.13 จะเห็นได้ว่า

- การพัฒนาในส่วนของการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ (k) โดยแบบเก่าจะใช้สภาพนำความร้อนของวัสดุของมู่ลี่เป็นค่าหนึ่ง แต่แบบใหม่จะพิจารณาถึงผลของการเปิดปิดของใบมู่ลี่ คือจะพิจารณาส่วนของอากาศรวมด้วย จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแบบจำลองแบบเก่า และจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนในกรณีปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา ซึ่งจะมีช่องว่างของอากาศมากกว่าการปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 และ 45 องศา อากาศจะมีสภาพนำความร้อนที่น้อยกว่าวัสดุที่ใช้ทำมู่ลี่ที่โดยทั่วไปจะใช้อลูมิเนียม ส่งผลให้สภาพนำความร้อนประสิทธิผลของมู่ลี่มีค่าลดลงจากแบบจำลองเก่า
- จากการเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งกรณี k+hcin และ k จะเห็นได้ว่า การพัฒนาการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารเมื่อปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น -45 และ 45 องศา จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมลดลง แต่เมื่อปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 องศา จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้น โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารแบบเก่าจะพิจารณาเป็นแบบจำลองการไหลผ่านแผ่นเรียบ มีค่าขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ และอุณหภูมิห้อง แต่แบบจำลอง

ใหม่จะพิจารณาให้มุมเป็นวัสดุที่มีรูพรุน อากาศสามารถไหลผ่านได้ จึงพิจารณาผลของการไหลของอากาศในรูปของ Nusselt number ระยะห่างระหว่างมุมลี้กับหน้าต่างกระจก และมุมบิดของมุมลี้ร่วมด้วย จะเห็นได้ว่า ที่มุมบิดของมุมลี้ 0 องศา อากาศไหลผ่านมุมลี้ได้ง่ายกว่ามุมบิดของมุมลี้ -45 และ 45 องศา การปรับมุมบิดของมุมลี้เป็น 0 องศาจึงให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมุมลี้เข้าสู่อาคารเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

- จากการเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งกรณี $k+h_{\text{cout}}$ และ k จะเห็นได้ว่าการพัฒนาการหาค่าการพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ทุกมุมบิดของมุมลี้ที่พิจารณามีค่าลดลง เนื่องจาก การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกแบบเก่าจะขึ้นอยู่กับความเร็วลม และทิศทางของอาคาร ที่ความเร็วลมต่ำกว่า 2 m/s เมื่ออาคารอยู่ต้นลม จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกเป็นค่าคงที่เท่ากับ $12.27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{-K})$ ในขณะที่การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกแบบใหม่จะขึ้นอยู่กับความเร็วลม ทิศทางของอาคาร และผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศภายนอกและผิวกระจก ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกมีค่าต่ำกว่า $12.27 \text{ W}/(\text{m}^2\text{-K})$ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าลดลงจากแบบจำลองเก่า
- เมื่อรวมผลของการพัฒนาสภาพนำความร้อนของมุมลี้ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมุมลี้เข้าสู่อาคาร สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมุมลี้ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมุมลี้เข้าสู่อาคาร ($k+h_{\text{cout}}+h_{\text{cin}}+h_{\text{cgapb}}$) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองแบบเก่า เนื่องจาก การพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแบบจำลองใหม่จะพิจารณาให้อากาศสามารถไหลผ่านมุมลี้ได้ ในขณะที่แบบจำลองเก่า จะพิจารณาให้มุมลี้เป็นเสมือนหน้าต่างกระจกที่อากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ จะทำให้อากาศถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกได้ดีขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจึงมีค่ามากขึ้น

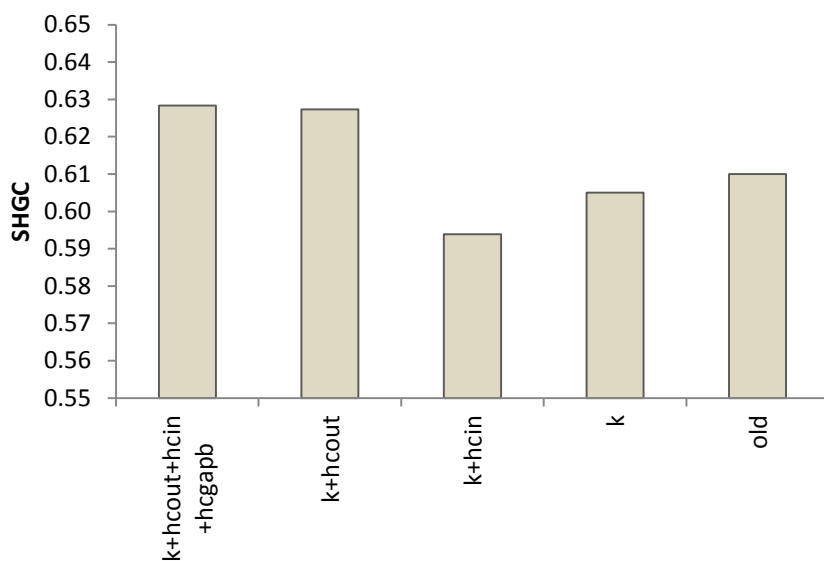


รูปที่ 7.14 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิด -45 0 และ 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

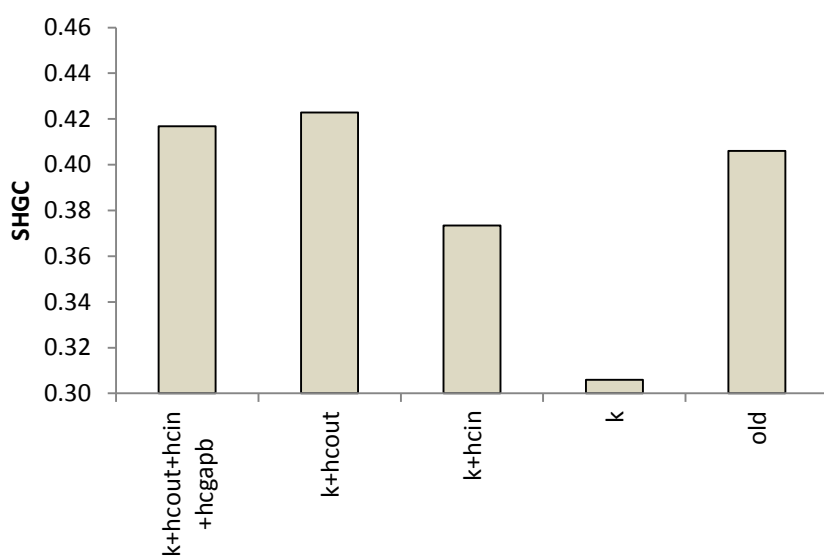
จากรูปที่ 7.14 จะเป็นค่า SHGC ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาในส่วนที่ต่างกัน โดยที่ k คือมีการพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ hcout คือมีการพัฒนาการหาค่าการพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก hcin คือมีการพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร hcgapb คือมีการพัฒนาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างกระจกด้านในกับมู่ลี่ และ old คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเก่า โดย k+hcout+hcin +hcgapb จะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาล่าสุด คือมีการพัฒนาทุกส่วนที่กล่าวมา

ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่แสดงในรูปที่ 7.14 ในกรณีของมุมบิดของมู่ลี่ -45 องศา จะมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ 0 และ 45 องศา ยกเว้นที่การพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ (k) จะให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเมื่อปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็น 0 และ 45 องศา มีค่าใกล้เคียงกัน

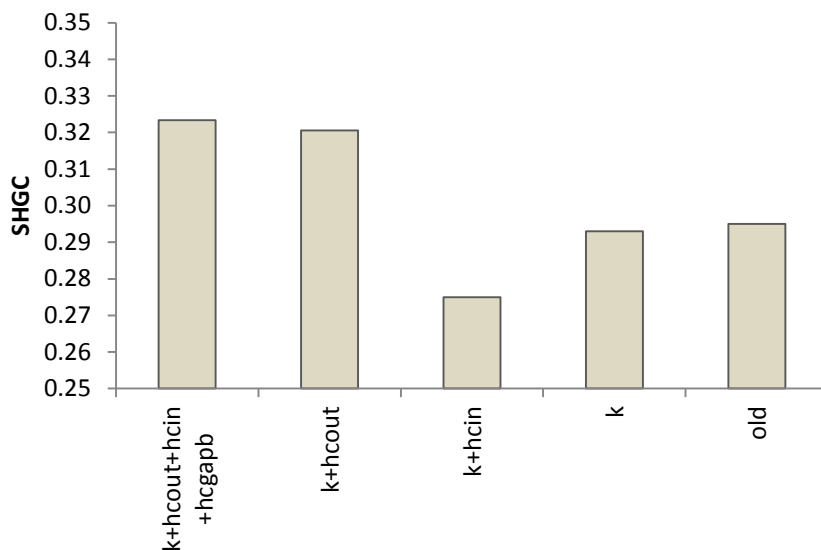
เมื่อพิจารณาในแต่ละมุมบิดของมู่ลี่ จะพบ ค่า SHGC ที่ได้จากแต่ละแบบจำลองจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นลดลงเป็นแนวโน้มเดียวกัน ยกเว้นที่การพัฒนาการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และค่า SHGC ที่ได้จากแต่ละแบบจำลองจะมีค่าต่างกันไม่มาก จึงยากที่จะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น รูปที่ 7.15 ถึง 7.17 จะเป็นค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากกรณีเดียวกัน โดยแยกพิจารณาแต่ละมุมบิดของมู่ลี่ และปรับสเกลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์



รูปที่ 7.15 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมุมนับ -45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 7.16 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมุมนับ 0 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 7.17 ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่มุมบิต 45 องศาที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ

จากรูปที่ 7.15 ถึง 7.17 จะเห็นได้ว่า

- การพัฒนาในส่วนของการหาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ (k) โดยแบบเดิมจะใช้สภาพนำความร้อนของวัสดุของมู่ลี่เป็นค่าหนึ่ง แต่แบบใหม่จะพิจารณาถึงผลของการเปิดปิดของใบมู่ลี่ คือจะพิจารณาส่วนของอากาศรวมด้วย จะให้ค่า SHGC ที่มีค่าน้อยกว่าค่า SHGC ของแบบจำลองแบบเก่า และจะเห็นความแตกต่างต่างได้ชัดที่มุมบิตของมู่ลี่เป็น 0 องศา เนื่องจากจะมีสัดส่วนของอากาศมากกว่ามุมบิตอื่นๆ ส่งผลให้สภาพนำความร้อนประสิทธิภาพของใบมู่ลี่มีค่าลดลง ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจึงมีค่าลดลง
- จากการเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งกรณี k+hcin และ k จะเห็นได้ว่า การพัฒนาการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารเมื่อปรับมุมบิตของมู่ลี่เป็น -45 และ 45 องศา จะให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงลดลง แต่เมื่อปรับมุมบิตของมู่ลี่เป็น 0 องศา จะให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม เนื่องจาก เมื่อพิจารณาที่มุมบิตของมู่ลี่ที่มุมหนึ่ง ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะขึ้นอยู่กับค่า inward flowing fraction ของชั้นหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ (ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้น และค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นมีค่าคงที่) และค่า inward flowing fraction จะขึ้นอยู่กับสภาพนำความร้อน

รวม และชุดค่าต้านทานความร้อน จากสมการที่ (3.10) และ (3.11) จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคารมีผลต่อเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเท่านั้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในกรณีนี้จึงแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

- จากการเปรียบเทียบแผนภูมิแท่งกรณี $k+h_{\text{cout}}$ และ k จะเห็นได้ว่า การพัฒนาการหาค่าการพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก จะให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงมีค่าเพิ่มขึ้นที่ทุกมุมบิดของมู่ลี่ที่พิจารณา เนื่องจาก แบบจำลองแบบใหม่จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองเก่า ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่า inward-flowing fraction ของชั้นหน้าต่างกระจก และมู่ลี่มีค่าเพิ่มขึ้น ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจึงมีค่าเพิ่มขึ้น
- เมื่อรวมผลของการพัฒนาสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร ($k+h_{\text{cout}}+h_{\text{cin}}+h_{\text{cgapb}}$) ค่า SHGC ที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้แบบจำลองแบบเก่า เนื่องจาก การพัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแบบจำลองใหม่จะพิจารณาให้อากาศสามารถไหลผ่านมู่ลี่ได้ ในขณะที่แบบจำลองเก่า จะพิจารณาให้มู่ลี่เป็นเสมือนหน้าต่างกระจกที่อากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้ จะทำให้อากาศถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกได้ดีขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจึงมีค่ามากขึ้น ค่า inward flowing fraction มีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงมีค่ามากขึ้น

บทที่ 8

สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้มีจุดประสงค์ประการแรก คือ เพื่อศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และตรวจสอบผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยศึกษางานวิจัยที่เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกตัวเปล่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ รวมทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจก จากนั้น พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้น การคำนวณสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายของการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ได้ใกล้เคียงสิ่งที่เกิดขึ้นจริงได้มากขึ้น และสามารถทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่อาคารได้แม่นยำมากขึ้น การตรวจสอบผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเปรียบเทียบผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนากับข้อมูลการทดลองจากโครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน และผลการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. จากการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่อาคาร สามารถสรุปได้ดังนี้

- การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาด้วยการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวม และค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์กับผลการทดลองจากโครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน จะได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนามีความแม่นยำในการทำนายค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ แต่

ในการทำนายค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจก และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมจะให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่ามากเกินไป

- การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาด้วยการเปรียบเทียบค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมกับการทดลองของ Collins, M.R. และ Harrison, S.J. ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ จะได้ว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจะให้ผลเฉลยของค่า SHGC ที่มีความแม่นยำขึ้น

จุดประสงค์อีกประการหนึ่ง คือ เพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีต่อการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ในรูปของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม โดยจะศึกษาผลของการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ มุมบิดของมู่ลี่ ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ สามารถสรุปได้ดังนี้

- การติดตั้งมู่ลี่ด้านหลังหน้าต่างกระจก ช่วยลดการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้าสู่อาคารได้ เมื่อพิจารณาการปรับมุมบิดของมู่ลี่ จะพบว่า การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็นมุมต่างๆ จะมีผลต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ การปรับมุมบิดของมู่ลี่เป็นมุม -45 องศา จะมีการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้าสู่อาคารมากที่สุด เนื่องจากมู่ลี่สามารถบังรังสีแสงอาทิตย์ได้น้อย รองลงมาคือ มุม 0 และ 45 องศา ตามลำดับ
- เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจก จะพบว่า ค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกจะมีผลต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นสั้นจะแปรผันตามค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากของหน้าต่างกระจกแต่ละชนิด โดยมีค่ามากที่สุดในกรณีหน้าต่างกระจกใส รองลงมาคือหน้าต่างกระจกใสสองชั้น หน้าต่างกระจกสีชา และหน้าต่างกระจกสีชาสองชั้น ตามลำดับ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีคลื่นยาวจะแปรผันตามค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์ของการเปลี่ยนชนิดของหน้าต่างกระจกจะต้องพิจารณาค่าการสะท้อนรังสีของมู่ลี่ และการบังของมู่ลี่เพิ่มเติม

- เมื่อพิจารณาการสะท้อนรังสีของมู่ลี่ ค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะแปรผกผันกับค่าการสะท้อนรังสีของมู่ลี่ เนื่องจาก มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์น้อย จะดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์มาก ส่งผลให้คายความร้อนจากใบมู่ลี่เข้าสู่ห้องมาก

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองที่ใช้ในการตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ห้องทดลองชั้น 4 จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน และค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมมาก คือ มีค่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก ค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจก เป็นผลของค่าอัตราทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ หักลบด้วยภาระการทำความเย็นจากแหล่งความร้อนอื่นๆ จากการทดลองจะได้ค่าอัตราการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศและค่าภาระการทำความเย็นจากแหล่งความร้อนอื่นๆ ประมาณ $1000 \pm 50 \text{ W/m}^2$ คือมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ค่าการถ่ายเทความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกซึ่งเป็นผลของสองค่าข้างต้น จะมีค่าอยู่ในช่วง 100 ถึง 400 W/m^2 และค่าคลาดเคลื่อนของการทดลองคำนวณจากรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนของค่าอัตราการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศและค่าภาระการทำความเย็นจากแหล่งความร้อนอื่นๆ ส่งผลให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 W/m^2 ทำให้เปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการทดลองจึงมีค่าค่อนข้างมาก ส่วนค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมจะคำนวณจากค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจก จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนมากเช่นกัน ปัญหาของการหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกจึงเป็นวิธีการทดลอง อาจจะต้องสร้างห้องทดลองและหาวิธีการทดลองใหม่ที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่น้อยลง สามารถศึกษาจากการทดลองของ Collins, MR. และ Harrison, S.J. ซึ่งเป็นตัวอย่างของการทดลองที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์รวมน้อย

2. ควรหาบทความวิจัย หรือการทดลองที่สามารถตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติม จากการศึกษาบทความวิจัยที่ผ่านมา ผู้วิจัยยังไม่พบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สามารถนำมาตรวจสอบได้ มีงานวิจัยให้ผลการทดลองเป็นค่า SHGC และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ แต่ค่าที่ได้จะ

รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายได้จะไม่รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจก โดยที่ค่า SHGC สามารถแปลงจากค่าที่รวมผลของกรอบหน้าต่างกระจกเป็นแบบไม่รวมผลได้ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมไม่สามารถทำได้



รายการอ้างอิง

1. Finlayson, E.U., Arasteh, D.K., Huizenga, C., Rubin, M.D., and Reilly, M.S., *WINDOW 4.0: Documentation of calculation procedures*. 1993, Lawrence Berkeley Laboratory, Energy & Environment Division: Berkeley, CA.
2. Furler, R.A., *Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses*. ASHRAE Transactions: Symposia, 1991. IN-91-19-1.
3. Klems, J.H., and Warner, J.L. , *A comparison between calculated and measured SHGC for complex glazing systems*. ASHRAE Transactions, 1996. 102(1): p. 931-939.
4. Klems, J.H., *A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: 1. Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation*. ASHRAE Transactions, 1994. 100(1): p. 1065-1072.
5. Klems, J.H., *A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: 2. Detailed Description of the Matrix Layer Calculation*. ASHRAE Transactions, 1994. 100(1): p. 1073-1086.
6. Klems, J.H., and J.L. Warner, *Measurement of Bi-directional Properties of Complex shading devices*. ASHRAE Transactions, 1995. 101(1): p. 791-801.
7. Organization, I.S., *ISO 9050, Glass in building, Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors*. 2003: Geneva.
8. Organization, I.S., *ISO 15099, Thermal Performance of Windows, Doors and Shading Devices-Detailed Calculations*. 2003: Geneva. p. 931-939.
9. Kimura, K., *Scientific Basis for Air Conditioning, Chapter 3, Radiative and Convective Heat Transfer*. 1977, London: Applied Science Publishers.
10. Curcija, D., and Goss, W.P., *New Correlations for Convective Heat Transfer Coefficient on Indoor Fenestration Surfaces, Compilation of More Recent Work*, in

ASHRAE/DOE/BTECC Conference, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI*. 1995: Clearwater, FL.

11. Wright, J.L., *A Correlation to Quantify Convective Heat Transfer Between Vertical Window Glazings*. ASHRAE Transactions, 1996. 106(2).
12. EnergyPlus, *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculation*. 2005.
13. Chaiyapinunt, S., and Worasinchai, S., *Development of a mathematical model for a curved slat venetian blind with thickness*. Solar Energy, 2009. 83: p. 1093-1113.
14. Chaiyapinunt, S., and Worasinchai, S., *Development of a model for calculating the longwave optical properties and surface temperature of a curved slat venetian blind*. Solar Energy, 2009. 83: p. 817-831.
15. Collins, M.R., and Wright, J.L., *Calculating center-glass performance indices of windows with a diathermanous layer*. ASHRAE Transactions, 2006. 112(2): p. 22-29.
16. Yazdanian, M., and Klems, J.H., *Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise building*. ASHRAE Transaction, 1994. 100(1).
17. Wright, J.L., *Calculating centre-glass performance indices of glazing systems with shading devices*. ASHRAE Transaction, 2008. 114(2).
18. Lomanowski, B.A., and Wright, J.L., *Modelling fenestration with shading devices in building energy simulation: a practical approach*, in *Eleventh International IBPSA Conference*. 2009: Glasgow, Scotland.
19. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ นพรัตน์ คำพร, การศึกษาและวิเคราะห์เชิงทดลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ของอาคารภายใต้ภาวะภูมิอากาศของประเทศไทย, รายงานการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม .2008.
20. Duarte, N., Naylor, D., Oosthuizen, P.H., and Harrison, S.J., *An interferometric study of free convection at a window glazing with a heated venetian blind*. ASHRAE Transactions, 2001. 107(2): p. 390-405.

21. Collins, M.R., Harrison, S.J, Naylor, D., and Oosthuizen, P.H., *Heat Transfer from an Isothermal Vertical Surface with Adjacent Heated horizontal Louvers: validation*. ASME Journal of Heat Transfer, 2002. 124: p. 1078-1087.
22. X.D., F., *A Study of the U-factor of the Window with a high-reflectivity venetian blind*. Solar Energy, 2000. 68(2): p. 207-214.
23. Ye, P., Harrison, S.J., Oosthuizen, P.H., and Naylor, D., *Convective Heat Transfer from a Window with a Venetian blind: Detailed Modeling*. ASHRAE Transactions, 1999. 105(2): p. 1-7.
24. Shahid, H., and Naylor, D., *Energy performance assessment of a window with a horizontal Venetian Blind*. Energy and Building, 2005. 37(8): p. 836-843.
25. Pfrommer, P., Lomas, K.J., and Kupke, C., *Solar radiation transport through slat-type blinds: a new model and its application for thermal simulation of buildings*. Solar Energy, 1996. 57(2): p. 77-91.
26. Chantrasrisalai, C., and Fisher, D.E., *Comparative analysis of one-dimensional slat-type blind models*, in *IBPSA-USA National Conference*. 2004: Boulder, CO.
27. Parmelee, G.V., and Aubele, W.W., *The shading of sunlit glass: an analysis of the effect of uniformly spaced flat opaque slats*. 58: p. 377-398.
28. Siegel, R., and Howell, J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. 1972: McGraw-Hill.
29. Yahoda, D.S., and Wright, J.L., *Methods for calculating the effective longwave radiative properties of a venetian blind layer*. ASHRAE Transaction, 2004: p. 463-473.
30. Myers, D.R., *SOLAR RADIATION: Practical Modeling for Renewable Energy Applications*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
31. *Instructuon Manual: CMP Series pyranomer/CMA Series albedometer*, K.Z. B.V., Editor. 2014.
32. *Instructuon Manual: CM6B pyranomer/CM7B albedometer*, K.Z. B.V., Editor. 2003.

33. Laouadi, A., *Thermal modeling of shading devices of windows*. ASHRAE Transaction, 2009. 115(2).
34. กาจพงษ์ สุขเสริม, กานต์ตัญย ศตวรรษธำรง และ ดานิช จันทรวีโรจน์, การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน. 2557, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
35. Chaiyapinunt, S., and Khamporn, N., *Heat transmission through a glass window with a curved venetian blind installed*. Solar Energy, 2014. 110: p. 71-82.
36. Collins, M.R., and Harrison, S.J., *Estimating the solar heat and thermal gain from a window with an interior venetian blind*. ASHRAE Transaction, 2004. 110(1): p. 486-500.
37. American Society for Testing and Materials., *ASTM Standards for Measuring Solar Reflectance and Infrared Emittance of Construction Materials and Comparing their Steady-State Surface Temperatures*.
38. ASHRAE, *ASHRAE Handbook Fundamentals 2013*. 2013, Atlanta, GA.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
39. *ASHRAE Handbook, Fundamentals*. 2005, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
40. *Model fresh&clean : DDFW catalogue*, L. UNI-AIRE CORPORATION CO., Editor.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน

การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดินจะแบ่งเป็นสองตอน คือ ตอนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดาดฟ้าของอาคาร โคลัมโบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และตอนที่ 2 เป็นการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลองที่ใช้ในการทดลอง จะใช้ เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ (pyranometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งบนขาตั้งเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ โดยจะใช้เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ของบริษัท Kipp & Zonan [31, 32] รุ่น CM6B 2 ตัว ติดตั้งในระนาบแนวนอนแบบหงายเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน (global horizontal radiation) และติดตั้งในระนาบแนวนอนแบบคว่ำเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน (reflected-ground global horizontal radiation) รุ่น CMP6 1 ตัว ติดตั้งในระนาบแนวตั้งเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้ง (global vertical radiation) และ รุ่น CMP11 1 ตัว ติดตั้งในระนาบแนวนอนพร้อมอุปกรณ์บังเงาเพื่อวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse horizontal radiation) เก็บข้อมูลค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ผ่านเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ของบริษัท NI รุ่น 9211 โดยเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที

ก.2 การทดลองและการวิเคราะห์ผล

ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดาดฟ้าของอาคาร โคลัมโบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

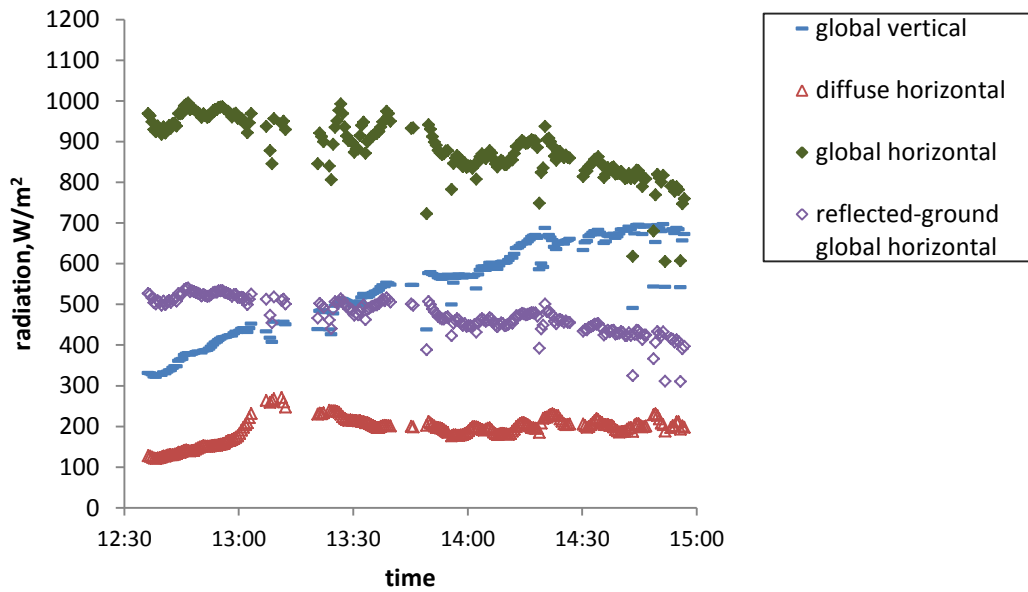
การทดลองกระทำที่ดาดฟ้าอาคารโคลัมโบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าวิธีการทดลองและการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นด้วยวิธีนี้ สามารถทำได้หรือไม่ เนื่องจากพื้นดาดฟ้าเป็นพื้นคอนกรีตซึ่งเป็นชนิดของพื้นผิวที่มีการศึกษามาก่อน สามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นที่ได้ไป

เปรียบเทียบกับแหล่งอ้างอิงอื่นได้ การทดลองกระทำวันที่ 18 19 และ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงในรูปที่ ก.1 สำหรับเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้วัดค่าค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้งจะติดตั้งให้หันไปทางด้านทิศตะวันตก การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน จะทำได้ที่เงื่อนไข คือ วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่เวลา 9.00น. ถึง 15.00น. และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอนที่วัดได้ที่เวลานั้นๆต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่มากที่สุดของวันทำการทดลอง [37] แต่เนื่องจากแดดฟ้าที่ทำการทดลองจะถูกอาคารบังในทุกทิศทาง และแสงอาทิตย์แบบตรงจะเริ่มปรากฏให้เห็นที่แดดฟ้าเวลาประมาณ 11.00 น. จึงเริ่มเก็บข้อมูลช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 15.00น. และเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที

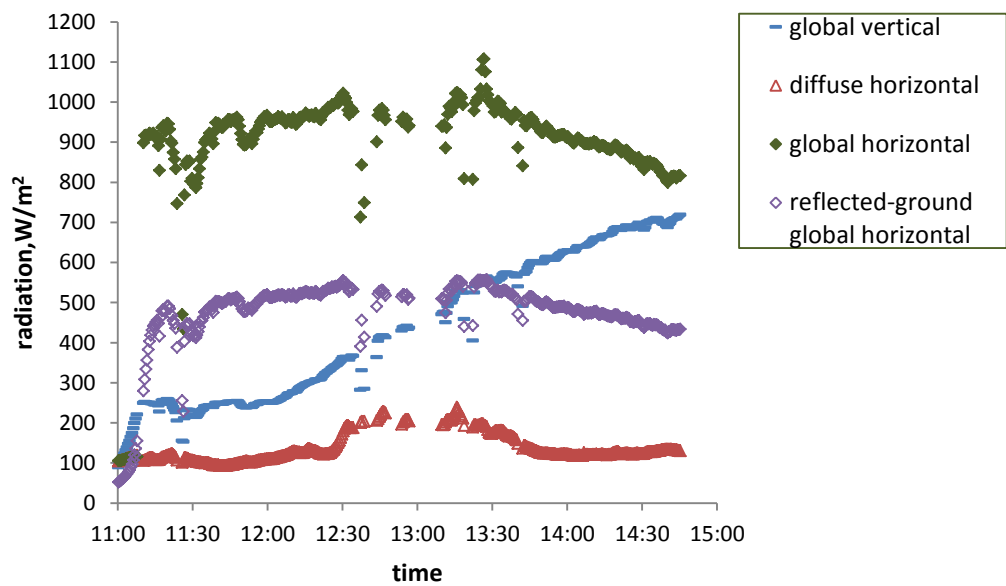


รูปที่ ก.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นแดดฟ้าของอาคาร โคลัมโบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

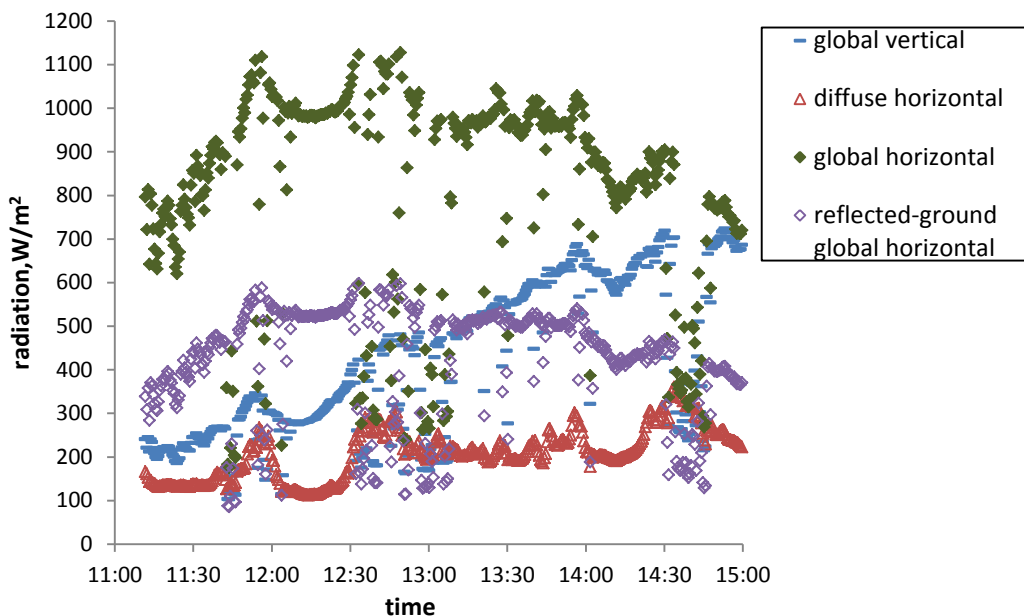
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอนที่ทำการปรับแก้ค่าของการทดลอง วันที่ 18 19 และ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 แสดงในรูปที่ ก.2 ถึง ก.4 ตามลำดับ



รูปที่ ก.2 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนดาดฟ้าอาคารโคลัมโบในวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ ก.3 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนดาดฟ้าอาคารโคลัมโบในวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2558



รูปที่ ก.4 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนดาดฟ้าอาคารโคลัมโบในวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

จากรูป ก.2 ถึง ก.4 จะเห็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน จะเป็นมีแนวโน้มไปทางเดียวกันทุกเวลา จึงหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นจากสมการที่ (4.6)

$$\rho_g = \frac{I_{gl,hor,grd}}{I_{gl,hor}} \quad (4.6)$$

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าหาได้จาก

$$f_{sky} = \frac{I_{d,sky}}{I_d} \quad (4.7)$$

และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นหาได้จาก

$$f_{grd} = \frac{I_{d,grd}}{I_d} \quad (4.8)$$

เมื่อ ρ_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นดิน

$I_{gl,hor}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวนอน, W/m^2

$I_{gl,hor,grd}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน, W/m^2

f_{sky} คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า

$I_{d,sky}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า สามารถหาได้จากสมการที่ (4.4), W/m^2

I_d คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระนาบหน้าต่างกระจก, W/m^2

f_{grd} คือ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น

$I_{d,grd}$ คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น สามารถหาได้จากสมการที่ (4.5), W/m^2

จะได้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นของวันที่ 18 19 และ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เป็น 0.53 0.53 และ 0.52 ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นเฉลี่ยจากสามวันเป็น 0.53 และได้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นเป็น 0.65 : 0.35

การตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ได้ จะกระทำโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ได้ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง และมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ มาคำนวณในสมการ

$$I_{gl,ver} = I_{DN} \cos \theta + I_{d,hor} \left(\frac{1 + \rho_g}{2} \right) + I_{DN} \sin \theta \frac{\rho_g}{2} \quad (4.3)$$

จะได้ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวตั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวตั้งที่วัดได้ พบว่าค่าความแตกต่างของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดในระนาบแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการวัดจะมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 20% ซึ่งถือว่ายอมรับได้

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น ที่เวลา 14.00 น. ของการทดลองวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 โดยมีค่าข้อมูลที่วัดได้แสดงในตารางที่ ก.2 จะหาได้ดังนี้

ตารางที่ ก.1 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัด และมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 ที่เวลา 14.00น.

ข้อมูล	
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน, $I_{gl,hor}(W/m^2)$	910.21
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน, $I_{gl,hor,grd}(W/m^2)$	485.94
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง, $I_{gl,ver}(W/m^2)$	631.23
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, $I_{d,hor}(W/m^2)$	121.79
มุมตกกระทบ, $\theta(^{\circ})$	64.43

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นจากการคำนวณที่สมการที่ (4.6)

$$\rho_g = \frac{I_{gl,hor,grd}}{I_{gl,hor}} = \frac{485.94}{910.21} = 0.534$$

หาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง, I_{DN} จากสมการที่ (4.2)

$$I_{gl,hor} = I_{DN} \sin \theta + I_{d,hor} \quad (4.2)$$

$$\text{จะได้ } I_{DN} = \frac{I_{gl,hor} - I_{d,hor}}{\sin \theta} = \frac{910.21 - 121.79}{\sin(64.43^{\circ})} = 872.57 W/m^2$$

แทนค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง, I_{DN} มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, $I_{d,hor}$ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นในสมการที่ (4.3) เพื่อหาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง

จะได้

$$\begin{aligned} I_{gl,ver} &= I_{DN} \cos \theta + I_{d,hor} \left(\frac{1 + \rho_g}{2} \right) + I_{DN} \sin \theta \frac{\rho_g}{2} \\ &= (872.57) \cos(64.43^{\circ}) + (121.79) \left(\frac{1 + 0.534}{2} \right) + (872.57) \sin(64.43^{\circ}) \left(\frac{0.534}{2} \right) \\ &= 680.18 W/m^2 \end{aligned}$$

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่วัดได้ มีค่า 631.23 W/m^2 จะเห็นว่าค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ จะมีความแตกต่างกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่วัดได้เป็น 7.75%

จากการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ได้ จะได้ว่าค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นที่ได้ จะมีความแตกต่างกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่ได้จากการวัดไม่เกิน 20% ซึ่งถือว่ายอมรับได้ในช่วงเวลาที่ศึกษา จึงสามารถใช้วิธีการทดลองวิธีนี้ในการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้

ในการหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นจะเริ่มจากการหาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในระนาบแนวตั้ง สามารถหาได้จากสมการที่ (4.9) โดยที่ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (4.4) และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$\begin{aligned} I_d &= I_{d,sky} + I_{d,grd} = \frac{I_{d,hor}}{2} + \frac{I_{d,hor}\rho_g}{2} \\ &= \frac{121.79}{2} + \frac{(121.79)(0.534)}{2} = 93.412 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าจากการคำนวณที่สมการที่ (4.7) และจากค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าที่ได้จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{sky} = \frac{I_{d,sky}}{I_d} = \frac{I_{d,hor}}{2 \cdot I_d} = \frac{121.79}{2(93.412)} = 0.65$$

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นจากการคำนวณที่สมการที่ (4.8) และจากค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นที่ได้จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_{grd} = \frac{I_{d,grd}}{I_d} = \frac{I_{d,hor} \cdot \rho_g}{2 \cdot I_d} = \frac{(121.79)(0.534)}{2(93.412)} = 0.35$$

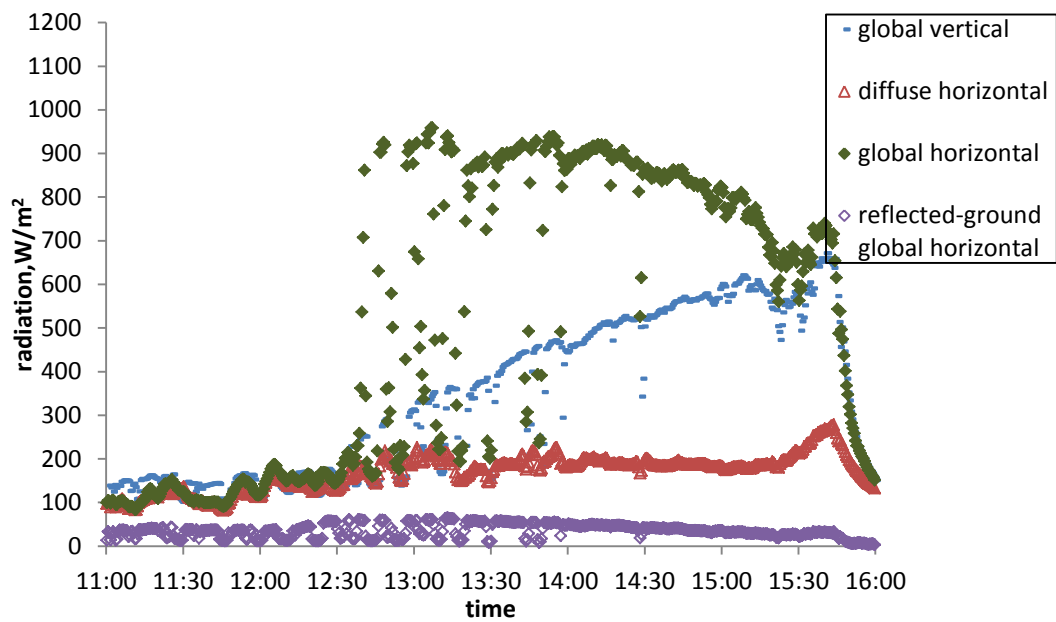
ตอนที่ 2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองกระทำที่พื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 25 28-29 พฤษภาคม 4-5 และ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2558 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงในรูปที่ ก.5 ติดผนังด้านหลังและด้านข้างด้วยกระดาษสีดำ เพื่อไม่ให้แสงอาทิตย์สะท้อนผนังด้านหลังและด้านข้าง ต้องการเฉพาะผลการสะท้อนจากพื้นเท่านั้น เนื่องจากหน้าต่างกระจกที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่หันทางด้านทิศตะวันตก จึงติดตั้งเครื่องมือวัดที่ใช้วัดความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวตั้งหันไปทางด้านทิศตะวันตก



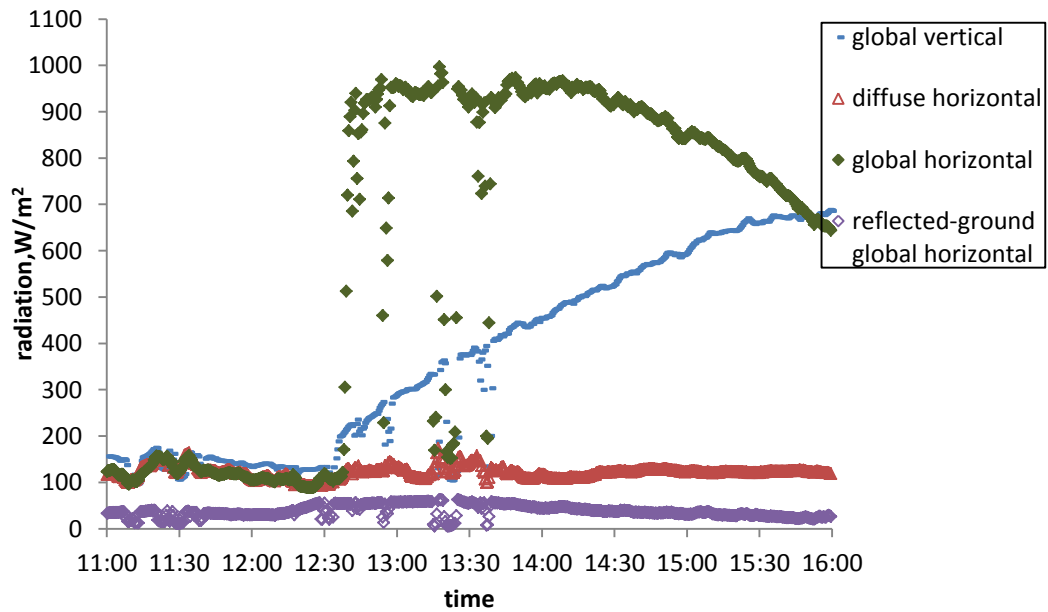
รูปที่ ก.5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นระเบียงห้องทดลองที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอนที่ทำการปรับแก้ค่าของการทดลอง วันที่ 25 28-29 พฤษภาคม 4-5 และ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2558 แสดงในรูปที่ ก.6 ถึง ก.11 ตามลำดับ



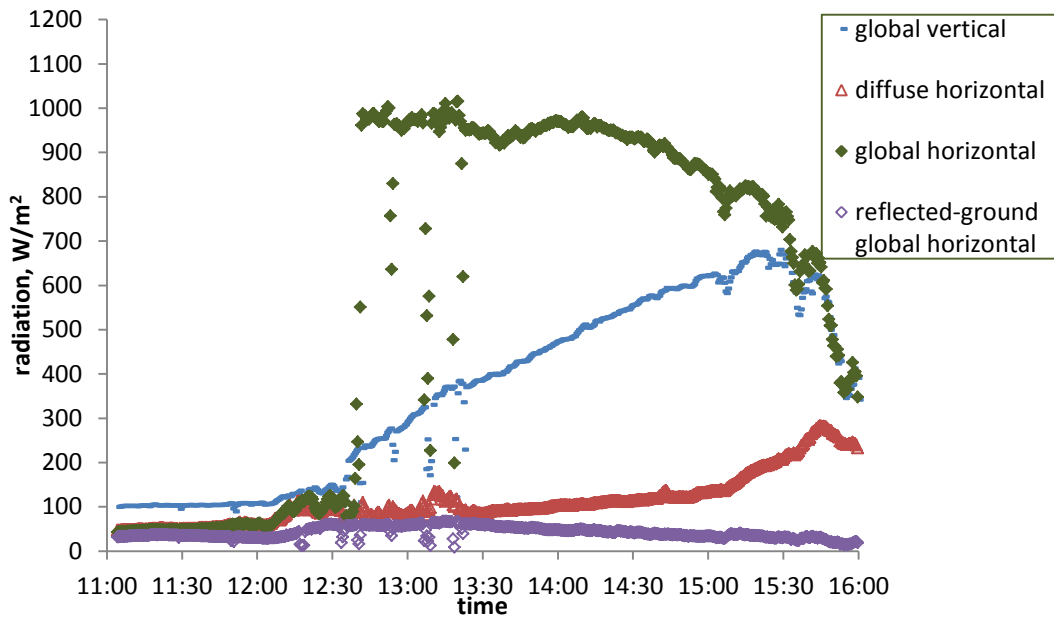
รูปที่ ก.6 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 25 พฤษภาคม

พ.ศ. 2558

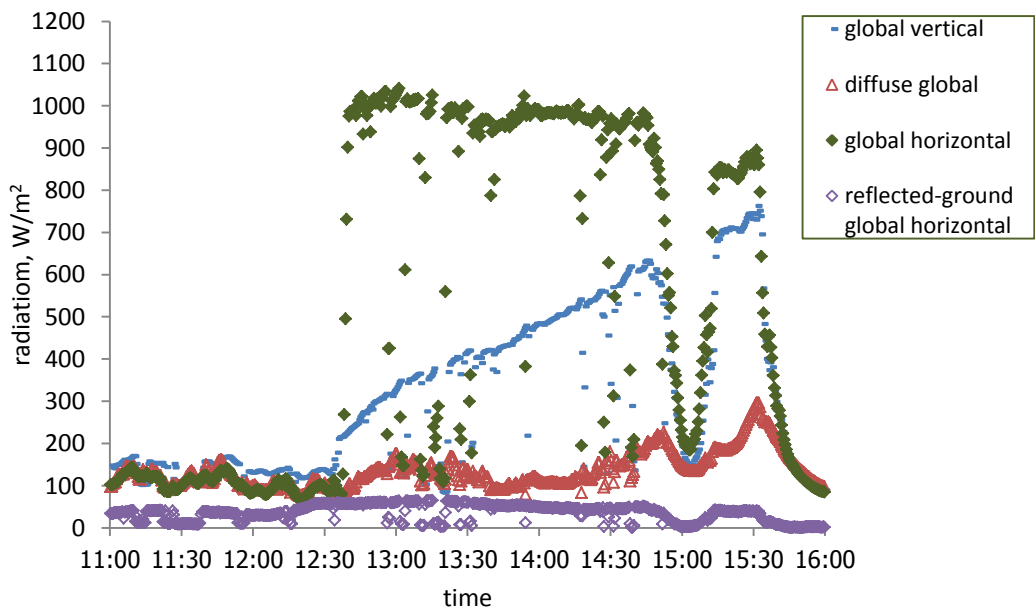


รูปที่ ก.7 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 28 พฤษภาคม

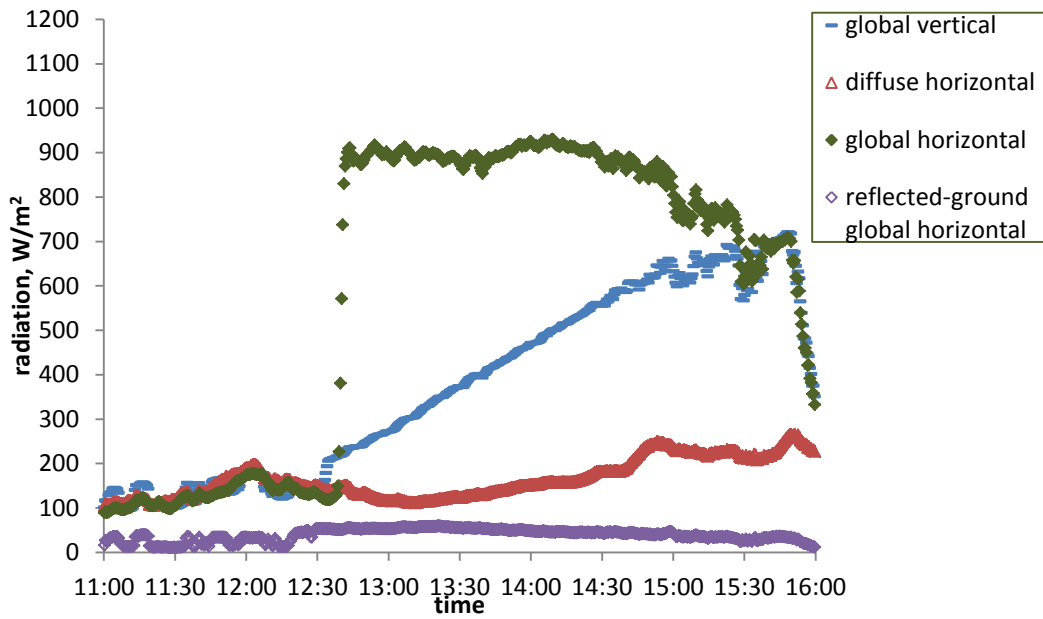
พ.ศ. 2558



รูปที่ ก.8 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

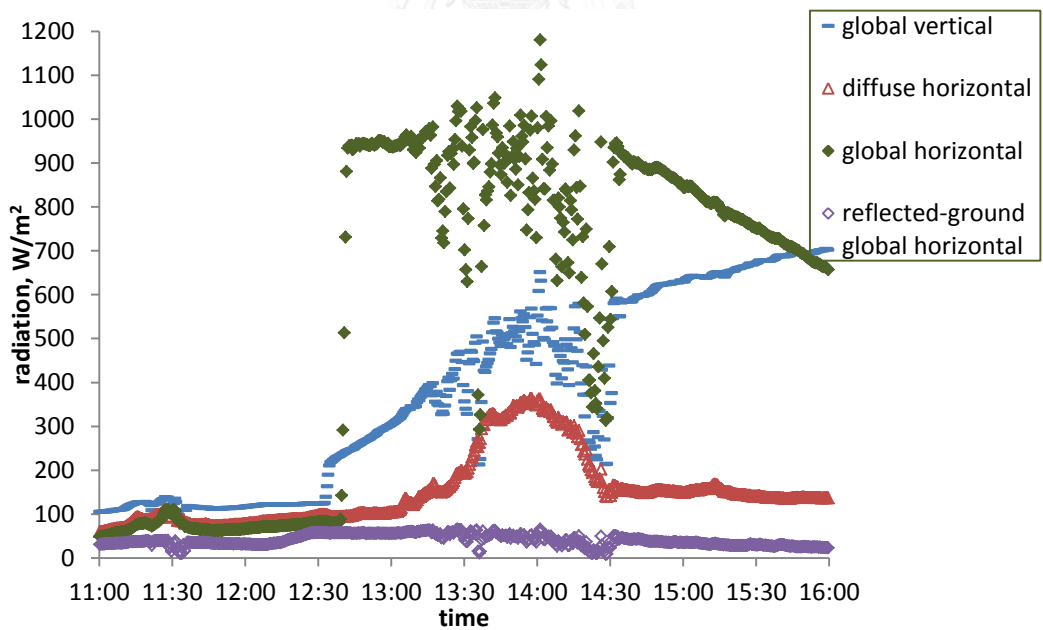


รูปที่ ก.9 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ. 2558



รูปที่ ก.10 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 5 มิถุนายน พ.ศ.

2558



รูปที่ ก.11 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้บนพื้นระเบียงห้องทดลองในวันที่ 9 มิถุนายน พ.ศ.

2558

จากรูป ก.6 ถึง ก.11 จะเห็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอนจะเป็นมีแนวโน้มไปทางเดียวกันที่หลังเวลา 12.30 น. เนื่องจากการบังของอาคาร แสงอาทิตย์แบบตรงจะตกกระทบที่ระเบียงที่เวลานี้ การหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นจะคำนวณเช่นเดียวกับตอนที่ 1 โดยในตอนนี้จะพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอนมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน ได้ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นของวันที่ 25 28-29 พฤษภาคม 4-5 และ 9 มิถุนายน พ.ศ. 2558 เป็น 0.044 0.045 0.051 0.052 0.055 และ 0.050 ตามลำดับ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นเฉลี่ยจาก 6 วันเป็น 0.050 และได้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าต่อรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นเป็น 0.95 : 0.05

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้น ที่เวลา 14.20 น. ของการทดลองวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2558 โดยมีค่าข้อมูลที่วัดได้แสดงในตารางที่ ก.1 จะหาได้ดังนี้

ตารางที่ ก.2 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัด และมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในวันที่ 26 มิถุนายนพ.ศ. 2558 ที่เวลา 14.20น.

ข้อมูล	
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมในแนวนอน, $I_{gl,hor} (W/m^2)$	893.76
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่เป็นผลของการสะท้อนพื้นในแนวนอน, $I_{gl,hor,grd} (W/m^2)$	46.76
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง, $I_{gl,ver} (W/m^2)$	519.17
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, $I_{d,hor} (W/m^2)$	190.12
มุมตกกระทบ, $\theta (^{\circ})$	59.84

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นจากการคำนวณที่สมการที่ (4.6)

$$\rho_g = \frac{I_{gl,hor,grd}}{I_{gl,hor}} = \frac{46.76}{893.76} = 0.0523$$

หาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง, I_{DN} จากสมการที่ (4.2)

$$I_{gl,hor} = I_{DN} \sin \theta + I_{d,hor} \quad (4.2)$$

จะได้
$$I_{DN} = \frac{I_{gl,hor} - I_{d,hor}}{\sin \theta} = \frac{893.76 - 190.12}{\sin(59.84^\circ)} = 813.81 \text{ W} / \text{m}^2$$

แทนค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่วัดในระนาบแนวตั้ง, I_{DN} มุมตกกระทบ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดในระนาบแนวนอน, $I_{d,hor}$ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์บนพื้นในสมการที่ (4.3) เพื่อหาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้ง

จะได้

$$\begin{aligned} I_{gl,ver} &= I_{DN} \cos \theta + I_{d,hor} \left(\frac{1 + \rho_g}{2} \right) + I_{DN} \sin \theta \frac{\rho_g}{2} \\ &= (813.81) \cos(59.84^\circ) + (190.12) \left(\frac{1 + 0.0523}{2} \right) + (813.81) \sin(59.84^\circ) \left(\frac{0.0523}{2} \right) \\ &= 527.30 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่วัดได้ มีค่า $519.17 \text{ W} / \text{m}^2$ จะเห็นว่า ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ จะมีความแตกต่างกับค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมวัดในระนาบแนวตั้งที่วัดได้เป็น 1.56%

ในการหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้า และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นจะเริ่มจากการหาค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในระนาบแนวตั้ง สามารถหาได้จากสมการที่ (4.9) โดยที่ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (4.4) และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นสามารถหาได้จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$\begin{aligned} I_d &= I_{d,sky} + I_{d,grd} = \frac{I_{d,hor}}{2} + \frac{I_{d,hor} \rho_g}{2} \\ &= \frac{190.12}{2} + \frac{(190.12)(0.0523)}{2} = 100.03 \text{ W} / \text{m}^2 \end{aligned}$$

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าจากการคำนวณที่สมการที่ (4.7) และจากค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าที่หาได้จากสมการที่ (4.4) จะได้

$$f_{sky} = \frac{I_{d,sky}}{I_d} = \frac{I_{d,hor}}{2 \cdot I_d} = \frac{190.12}{2(100.03)} = 0.95$$

ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นจากการคำนวณที่สมการที่ (4.8) และจากค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์กระจายที่เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่กระจายจากท้องฟ้าแล้วสะท้อนพื้นที่หาได้จากสมการที่ (4.5) จะได้

$$f_{grd} = \frac{I_{d,grd}}{I_d} = \frac{I_{d,hor} \cdot \rho_g}{2 \cdot I_d} = \frac{(190.12)(0.0523)}{2(100.03)} = 0.05$$

ก.3 การหามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ [38]

ในการทดลองเพื่อหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน ตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญและมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ คือมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ (incident angle) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ และวันและเดือนที่วัดรังสีแสงอาทิตย์ มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์จะสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

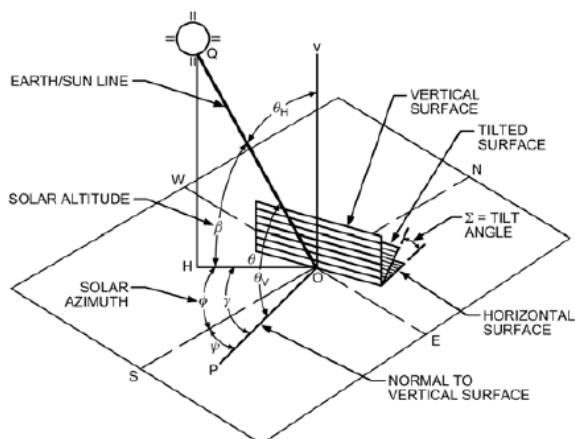
$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \quad (ก.1)$$

เมื่อ θ คือ มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์, $^{\circ}$

β คือ มุม solar altitude สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (ก.2), $^{\circ}$

γ คือ มุม surface-solar azimuth สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (ก.8), $^{\circ}$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ มุม solar altitude และมุม surface-solar azimuth แสดงในรูปที่ ก.12



รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ มุม solar altitude และมุม surface-solar azimuth [38]

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ L คือ ละติจูดท้องถิ่น (local latitude), $^{\circ}$ N

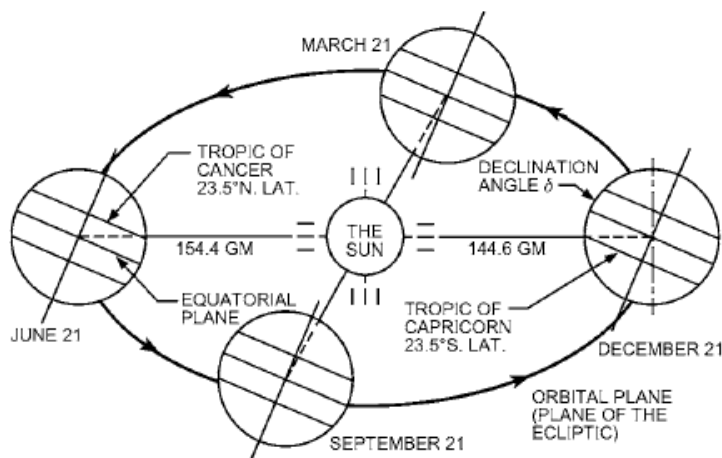
δ คือ มุม solar declination สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (ก.3), $^{\circ}$

H คือ มุม solar hour สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการ (ก.4), $^{\circ}$

เนื่องจาก ระนาบศูนย์สูตรของโลก (equatorial plane) จะเอียงทำมุมกับระนาบวงโคจรของโลก (orbital plane) เป็นมุม 23.45 องศา มุม solar declination ซึ่งเป็นมุมระหว่างเส้นระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (earth/sun line) กับระนาบศูนย์สูตรของโลกจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งปี ดังแสดงในรูปที่ ก.13 และสามารถหาได้จากสมการได้ดังนี้

$$\delta = 23.45 \sin \left(360^{\circ} \frac{n + 284}{365} \right) \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ n คือ วันที่ในหนึ่งปี โดยนับวันที่ 1 มกราคมมีค่าเป็น 1 วันที่ 1 กุมภาพันธ์มีค่าเป็น 32



รูปที่ ก.13 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ [38]

มุม solar hour เป็นเวลาที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า สามารถหาได้ดังนี้

$$H = 15(AST - 12) \quad (ก.4)$$

เมื่อ AST คือ เวลาสุริยะ (apparent solar time) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (ก.5), ชั่วโมง

$$AST = LTS + ET / 60 + (LON - LSM) / 15 \quad (ก.5)$$

เมื่อ LTS คือ เวลาท้องถิ่น, ชั่วโมง

ET คือ equation of time สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (ก.6), นาที

LON คือ ลองติจูดท้องถิ่น (เส้นเมริเดียนที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น), °E

LSM คือ ลองติจูดของเวลามาตรฐาน (local standard meridian longitude) โดยจะมีค่าเป็นลบ เมื่ออยู่ในครึ่งทรงกลมตะวันตก สามารถหาได้จากสมการที่ (ก.7), °E

equation of time สามารถประมาณได้จากสมการต่อไปนี้

$$ET = 2.2918(0.0075 + 0.1868 \cos(\Gamma) - 3.2077 \sin(\Gamma) - 1.4615 \cos(2\Gamma) - 4.089 \sin(2\Gamma)) \quad (ก.6)$$

$$\text{โดยที่ } \Gamma = 360^\circ \frac{n-1}{365}$$

$$LSM = 15TZ \quad (ก.7)$$

เมื่อ TZ คือ time zone, ชั่วโมง $\pm UTC$

มุม surface-solar azimuth จะถูกนิยามให้ผลต่างระหว่างมุม solar azimuth และมุม surface azimuth ดังแสดงในรูปที่ ก.12 และสามารถหาได้ดังนี้

$$\gamma = \phi - \psi \quad (ก.8)$$

เมื่อ ϕ คือ มุม solar azimuth สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (ก.9), °

ψ คือ มุม surface azimuth โดยที่พื้นผิวหันเข้าทิศใต้จะมีค่าเป็น 0 องศา และทิศตะวันตกจะมีค่าเป็น 90 องศา, °

$$\sin \phi = \sin H \cos \delta / \cos \beta \quad (\text{ก.9})$$

ตัวอย่างการคำนวณค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ จะใช้ข้อมูลที่เวลา 14.00 น. ของการทดลอง วันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 การวัดกระทำที่ประเทศไทย จะใช้ค่าละติจูดท้องถิ่นเป็น 13.73°N ลองติจูดท้องถิ่นเป็น 100.57°E โดยเครื่องวัดรังสีจะหันไปทางด้านทิศตะวันตกเฉียงใต้เล็กน้อย จึงใช้ค่ามุม surface azimuth เป็น 84 องศา และจะหาค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ได้ดังนี้ จากสมการที่ (ก.6) จะหา equation of time ได้ดังนี้

สำหรับ วันที่ 19 พฤษภาคม จะได้ $n = 139$

$$\Gamma = 360^{\circ} \frac{n-1}{365} = 360^{\circ} \frac{139-1}{365} = 136.11^{\circ}$$

และจะได้

$$\begin{aligned} ET &= 2.2918(0.0075 + 0.1868 \cos(\Gamma) - 3.2077 \sin(\Gamma) - 1.4615 \cos(2\Gamma) - 4.089 \sin(2\Gamma)) \\ &= 3.8465 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ก.5) จะหาเวลาสุริยะ ได้ดังนี้

สำหรับประเทศไทย จะมี time zone เป็น +7 UTC

$$LSM = 15TZ = 15(7) = 105$$

และจะได้

$$\begin{aligned} AST &= LTS + ET / 60 + (LON - LSM) / 15 \\ &= 14 + 3.8465 / 60 + (100.57 - 105) / 15 = 13.769^{\circ} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ก.4) จะหามุม solar hour ได้ดังนี้

$$H = 15(AST - 12) = 15(13.769 - 12) = 26.535^{\circ}$$

จากสมการที่ (ก.3) จะหามุม solar declination ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \delta &= 23.45 \sin\left(360^{\circ} \frac{n+284}{365}\right) = 23.45 \sin\left(360^{\circ} \frac{139+284}{365}\right) \\ &= 19.713^{\circ} \end{aligned}$$

จากสมการที่ (ก.2) จะหามุม solar altitude ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \sin \beta &= \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \\ &= \cos(13.73^{\circ}) \cos(19.713^{\circ}) \cos(26.535^{\circ}) + \sin(13.73^{\circ}) \sin(19.713^{\circ}) \\ &= 0.89822 \end{aligned}$$

จะได้ $\beta = \sin^{-1}(0.89822) = 63.925^{\circ}$

จากสมการที่ (ก.9) จะหามุม solar azimuth ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\sin \phi &= \sin H \cos \delta / \cos \beta = \sin(26.535^\circ) \cos(19.713^\circ) / \cos(63.925^\circ) \\ &= 0.95681\end{aligned}$$

จะได้ $\phi = \sin^{-1}(0.95681) = 73.099^\circ$

จากสมการที่ (ก.8) จะหามุม surface-solar azimuth ได้ดังนี้

$$\gamma = \phi - \psi = 73.099 - 84 = -10.901^\circ$$

และจากสมการที่ (ก.1) จะหาค่ามุมตกกระทบรังสีแสงอาทิตย์ ได้ดังนี้

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma = \cos(63.925^\circ) \cos(-10.901^\circ) = 0.43162$$

จะได้ $\theta = \cos^{-1}(0.43162) = 64.43^\circ$

ดังนั้น ค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์จะเท่ากับ 64.43 องศา



ภาคผนวก ข

การหาค่าดัชนีที่ใช้วิเคราะห์จากการทดลอง

การตรวจสอบความแม่นยำของผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา จะใช้ค่าที่ได้จากการทดลองในโครงการวิศวกรรมเครื่องกล เรื่อง การศึกษาเชิงทดลองค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่แบบแนวนอน [34] ในการวิเคราะห์ ในบทนี้จะกล่าวถึง การหาค่าที่ใช้วิเคราะห์จากการทดลอง

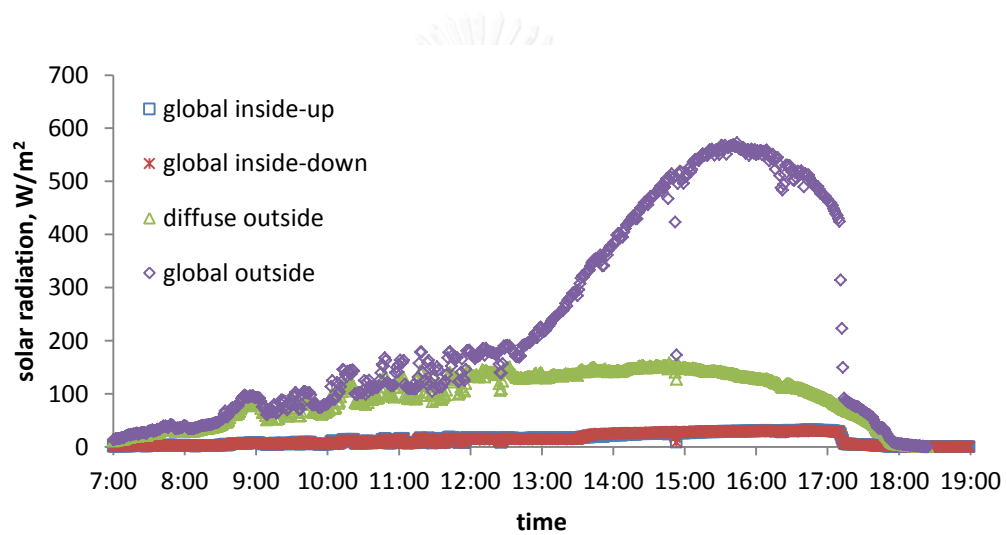
ข.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

การวิเคราะห์จะเลือกกรณีหน้าต่างกระจกแบบใส เมื่อติดตั้งมู่ลี่สีครีม และสีฟ้า เมื่อปรับมุมบิดของใบมู่ลี่สามมุม คือ 0 45 และ -45 องศา รวมเป็น 6 กรณี โดยจะติดตั้งมู่ลี่ห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 40 มิลลิเมตร การทดลองจะมีการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ข้อมูลที่จะได้จากการทดลอง ได้แก่ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวม และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดบริเวณด้านหน้าหน้าต่างกระจก ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่สองตำแหน่ง อุณหภูมิผิวของผนังแต่ละด้าน อุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกของเครื่องทำน้ำเย็น และอัตราการไหลของน้ำจากเครื่องทำน้ำเย็น

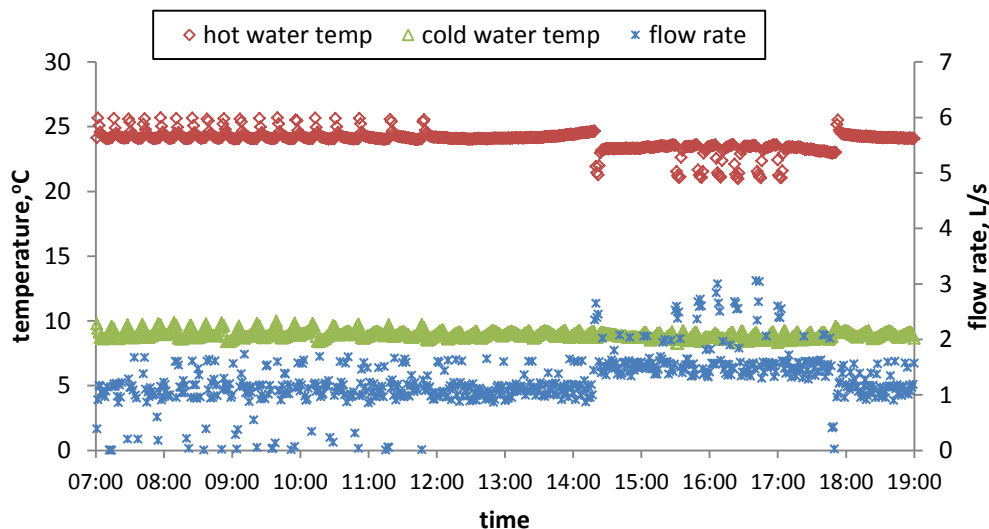
การติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ ข.1 ตัวอย่างค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ และค่าอัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าและขาออกของเครื่องปรับอากาศจะแสดงในรูปที่ ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการทดลองในวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา



รูปที่ ข.1 การติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ในการทดลอง [34]



รูปที่ ข.2 ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา



รูปที่ ข.3 ค่าอัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำเย็นขาเข้าและขาออกของเครื่องปรับอากาศ ที่วัดได้ในการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปริมาณบิตของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา

ข.2 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภาระการทำความเย็นสามารถหาได้จากการนำค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง ซึ่งมีค่าเท่ากับภาระทำความเย็น (cooling load) ของเครื่องปรับอากาศหักลบด้วยภาระทำความเย็นที่เกิดจากความร้อนแหล่งอื่นๆ ตามสมการที่ (ข.1)

$$q_{\text{exp}} = q_r - q_i \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ q_{exp} คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่ที่ได้จากการทดลอง, W

q_r คือ ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง, W

q_i คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น, W

ข.2.1 การหาปริมาณความร้อนของห้องทดลอง

ภาระทำความเย็น คือปริมาณความร้อนในพื้นที่ปรับอากาศ ที่ระบบปรับอากาศสามารถกำจัดออกไป ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองจึงหาได้จากภาระทำความเย็น ในการวิเคราะห์จะให้ ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองมีค่าเท่ากับภาระทำความเย็น โดยระบบปรับอากาศ ที่ใช้

ในการทดลองเป็นแบบเครื่องทำน้ำเย็นที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ จึงสามารถหาค่าภาระการทำความเย็นได้จากสมมูลความร้อนของเครื่องทำน้ำเย็น ดังสมการที่ (ข.2)

$$q_{cl} = \dot{m}_w c_{p,w} \Delta T_{water} = \rho_{water} \dot{V} c_{p,w} (T_{water,out} - T_{water,in}) \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ	q_{cl}	คือ ภาระการทำความเย็น, W
	\dot{m}_w	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น, kg/s
	$c_{p,w}$	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, J/(kg·K)
	ΔT_{water}	คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างน้ำเย็นขาเข้าและน้ำขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, °C
	ρ_{water}	คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำ, kg/m ³
	\dot{V}	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ, m ³ /s
	$T_{water,out}$	คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกจากเครื่องปรับอากาศ, °C
	$T_{water,in}$	คือ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าจากเครื่องปรับอากาศ, °C

ข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองที่นำมาใช้คำนวณเพื่อหาภาระการทำความเย็น คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกจากเครื่องปรับอากาศ และอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าจากเครื่องปรับอากาศ

ข.2.2 การหาปริมาณความร้อนเนื่องจากสาเหตุอื่น

ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น หรือภาระการทำความเย็นที่เกิดจากความร้อนแหล่งอื่นๆ จะเป็นผลรวมของภาระการทำความเย็นเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พื้น และเพดานห้อง ภาระการทำความเย็นเนื่องจากอากาศรั่วซึม (infiltration) ตามรอยแตกของขอบหน้าต่าง ประตู หรือผนัง และภาระการทำความเย็นเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นตัวเกิดความร้อน เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ข.2.1.1 การหาปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม [38]

ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม แบ่งได้เป็นความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$q_{inf il} = \rho_{air} Qc_p (T_{out} - T_{in}) + Q\rho_{air} \Delta W(2501 + 1.805T) \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ	$q_{inf il}$	คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม, W
	ρ_{air}	คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ, kg/m ³

- Q คือ อัตราการไหลของอากาศ สามารถหาได้จากสมการที่ (ข.4) , m^3 / s
- c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $J/(kg \cdot K)$
- T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศภายนอก, $^{\circ}C$
- T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, $^{\circ}C$
- ΔW คือ ผลต่างของค่าอัตราส่วนความชื้น (humidity ratio) ระหว่างอากาศภายในและภายนอกห้องทดลอง, kg_w / kg_{da}

T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอากาศภายในและภายนอกห้องทดลอง, $^{\circ}C$

อัตราการไหลของอากาศที่รั่วซึมออกจากห้อง สามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Sherman และ Grimsrud โดยจะใช้พื้นที่เสมือนของอากาศรั่วซึมในการคำนวณ (effective air leakage area) ดังนี้

$$Q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s |\Delta T| + C_w U^2} \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ A_L คือ พื้นที่เสมือนของอากาศรั่ว, cm^2

C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ stack (stack coefficient) จะใช้ค่า 0.000435 สำหรับอาคารที่สูงเทียบเท่า 3 ชั้นซึ่งเป็นจำนวนชั้นมากที่สุดที่ให้ ในการทดลองที่ห้องทดลองชั้น 4,

$$(L/s)^2 / (cm^4 \cdot K)$$

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอากาศภายนอกและภายในห้อง 4, K

C_w คือ ค่าสัมประสิทธิ์ลม (wind coefficient) จะใช้ค่า 0.000161 สำหรับอาคารที่สูงเทียบเท่า 3 ชั้นซึ่งเป็นจำนวนชั้นมากที่สุดที่ให้ และเป็นอาคารที่อยู่ในเมือง ที่มีอาคารสูงอื่นบัง ในการทดลองที่ห้องทดลองชั้น 4, $(L/s)^2 / (cm^4 \cdot (m/s)^2)$

U คือ ความเร็วลมเฉลี่ยของอากาศภายนอก , m/s

พื้นที่เสมือนของอากาศรั่วจะหาได้จากการผลรวมของพื้นที่ของอากาศรั่วซึมที่เห็นได้ชัดเจนกับพื้นที่เสมือนของอากาศรั่วซึมที่ได้จากค่าอัตราส่วนของพื้นที่อากาศรั่วซึมต่อพื้นที่ของผนังและพื้นที่พิจารณาที่ประมาณโดยวิธีของ Klote และ Mike

ข.2.1.2 การหาปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พื้น และเพดานห้อง

ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พื้น และเพดานห้องสามารถหาได้จาก

$$q_i = UA(T_{so} - T_{si}) \quad (ข.5)$$

เมื่อ q_i คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนของพื้นผิว i ใดๆ , W

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา, $W/(m^2K)$

A คือ พื้นที่ของผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา , m^2

T_{so} คือ อุณหภูมิผิวภายนอกผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา, $^{\circ}C$

T_{si} คือ อุณหภูมิผิวภายในผนัง พื้น หรือเพดานที่พิจารณา, $^{\circ}C$

เนื่องจาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสามารถทำนายปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่โดยไม่รวมผลของกรอบหน้าต่าง จึงต้องมีการหาปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านกรอบหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถใช้สมการที่ (ข.5) ในการคำนวณได้

ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาที่เวลาใดๆ ปริมาณความร้อนของห้องที่เครื่องปรับอากาศกำจัดได้จะมีค่าไม่เท่ากับปริมาณความร้อนเข้ามาในห้อง เนื่องจาก ผลของ time delay ในกระบวนการถ่ายเทความร้อน ผลของ time delay ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจาก [39]

1. time-delay effect ที่เกิดในช่วงที่ความร้อนถูกส่งผ่านผนังของอาคาร ผนังที่มีความหนาแน่นมาก จะชะลอการส่งผ่านความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนนี้ได้ดี การคำนวณจะใช้วิธี Radiant Time Series (RTS) ที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าภาระความร้อน โดยใช้ค่า Wall Conduction Time Series (CTS) ซึ่งเป็นชุดตัวเลขที่สะท้อนถึง time-delay effect ที่ขึ้นอยู่กับชนิด และทิศของผนัง
2. time-delay effect ที่เกิดจากการเปลี่ยน radiant heat gain เป็น radiant cooling load การหน่วงความร้อนในส่วนนี้เกิดเนื่องจากความร้อนในรูปแบบ radiant heat gain

เช่น แสงอาทิตย์ส่องผ่านหน้าต่างกระจกแล้วตกกระทบพื้น จะส่งความร้อนผ่านอากาศที่ไหลผ่านพื้น อากาศจะร้อนขึ้นแล้วไหลไปยังคอลัมน์เย็นของเครื่องปรับอากาศ ความร้อนในอากาศดังกล่าวจึงจะกลายเป็นภาระความร้อนของเครื่องปรับอากาศ การคำนวณจะใช้วิธี RTS ที่มีชุดตัวเลขที่สะท้อนอิทธิพลของ time delay แบ่งเป็น Solar RTS และ Nonsolar RTS

การคำนวณในส่วนของ time-delay effect จะใช้โปรแกรม ASHRAE RTS ของ ASHRAE มาช่วยในการคำนวณ โดยจะพิจารณาผนัง เพดาน และพื้นที่ละด้าน ใส่ข้อมูลสภาพอากาศ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง วัสดุที่ใช้ทำผนัง เพดาน หรือพื้นที่พิจารณา และทิศของผนังที่พิจารณา ในกรณีการพิจารณาผนัง โปรแกรมจะให้ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้อง (room heat gain) ที่ผ่านผนังนั้น และภาระการความเป็นจริง (actual cooling load) ที่มาจากผนังที่พิจารณาในแต่ละชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องของการทดลองนี้ จะนำค่าที่ได้นี้แปลงเป็นแฟกเตอร์ time-delay effect

$$f_{td} = \frac{q_{i,actual}}{q_{i,cal}} \quad (ข.6)$$

เมื่อ f_{td} คือ แฟกเตอร์ time-delay effect

$q_{i,actual}$ คือ ค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศสามารถกำจัดได้จริงที่ชั่วโมงที่ i , W/m^2

$q_{i,cal}$ คือ ค่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ชั่วโมงที่ i , W/m^2

ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนของพื้นผิวใดๆ ที่คำนวณได้จากสมการ (ข.5) จะถูกปรับแก้ด้วยแฟกเตอร์ time-delay effect ดังนี้

$$q_{i,td} = f_{td} \cdot q_i \quad (ข.7)$$

เมื่อ $q_{i,td}$ คือ ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนของพื้นผิว i ใดๆที่รวมผลของ time delay , W

ข.2.1.3 การหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ

ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับการทดลองนี้ จะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ เครื่องวัดความสบายเชิงความร้อนของ

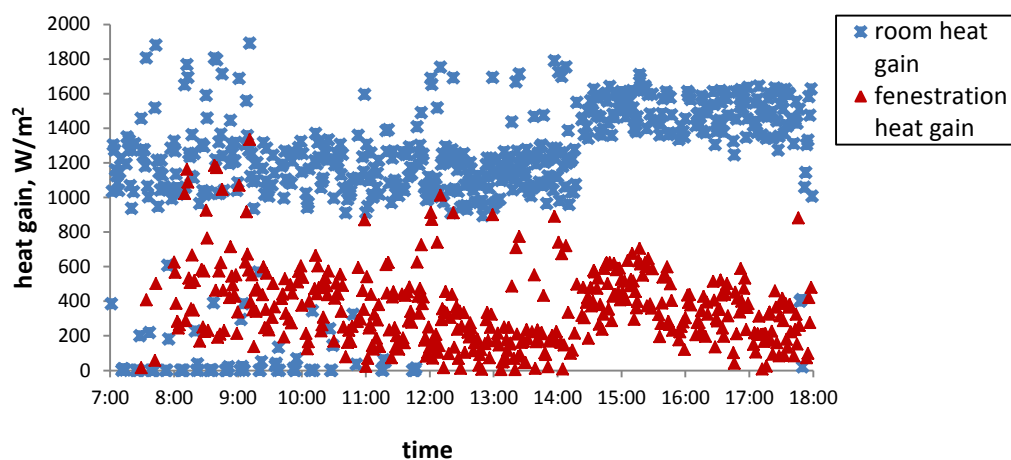
INNOVA และส่วนของคอลย์เย็นของเครื่องปรับอากาศของ UNI-Aire โดยมีค่าความร้อนที่เกิดขึ้น แสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ [38, 40]

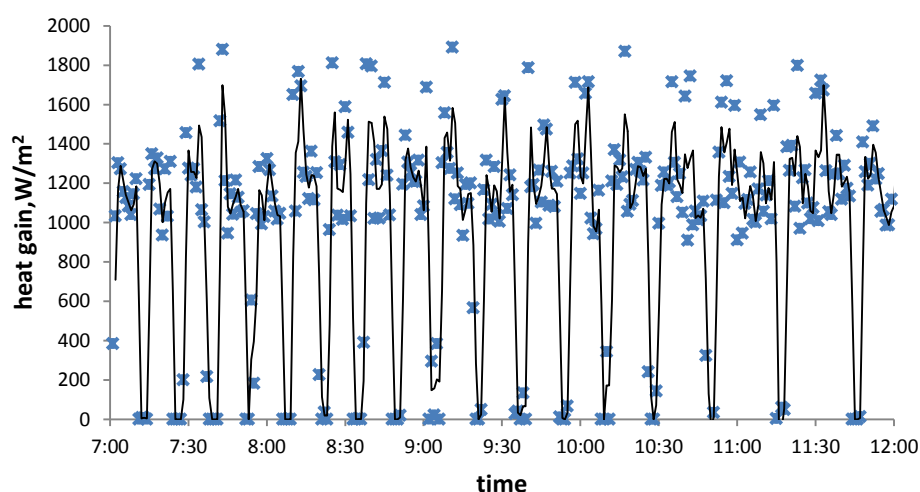
อุปกรณ์	ค่าความร้อน, W
คอมพิวเตอรืตั้งโต๊ะ	270
เครื่องวัดความสบายเชิงความร้อน	120
เครื่องปรับอากาศของ UNI-Aire	165

ข.3 ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่

ในการทดลอง จะเก็บข้อมูลทุกๆ 1 นาที ตั้งแต่เวลา 7.00น. ถึง 19.00น. การวิเคราะห์เพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่จะหาในทุกๆ 1 นาทีเช่นกัน แต่เนื่องจากตัวควบคุมการทำงานของระบบปรับอากาศเป็นระบบที่ทำมาจากวงจรไฟฟ้ากลไก PLC ทำให้อัตราการไหลของน้ำของเครื่องทำน้ำเย็นมีค่าแกว่งเป็นบางช่วง ทำให้ได้ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง และค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่มีค่าแกว่งเป็นดังรูปที่ ข. 4 ที่เป็นผลของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา และรูปที่ ข.5 เป็นผลของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองในวันเดียวกัน แต่จะเชื่อมต่อกจุดเพื่อให้เห็นผลที่เป็นคาบชัดเจนมากขึ้น ดังนั้น การหาค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองต้องพิจารณาเฉลี่ยค่าเป็นคาบ



รูปที่ ข.4 ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง และค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา



รูปที่ ข.5 ค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา

ตัวอย่างการคำนวณที่จะแสดงต่อไปนี้จะเป็นการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนที่เวลา 13.56น. ของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56น.

ข้อมูล*	สัญลักษณ์		หน่วย
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวม	I	360.95	W / m^2
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย	I_d	172.31	W / m^2
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (บน)	I_{sr1}	20.11	W / m^2
ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (ล่าง)	I_{sr2}	23.53	W / m^2
อุณหภูมิอากาศภายนอก	T_{out}	36.13	$^{\circ}C$
อุณหภูมิอากาศภายในห้อง	T_{in}	25.70	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวเพดาน (2ตำแหน่ง)	$T_{si,1}$	25.25	$^{\circ}C$
	$T_{si,2}$	27.21	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านในผนังฝั่งทิศเหนือ (3ตำแหน่ง)	$T_{si,3}$	27.39	$^{\circ}C$
	$T_{si,4}$	28.32	$^{\circ}C$
	$T_{si,5}$	28.63	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านในของประตู	$T_{si,6}$	27.15	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านในผนังฝั่งทิศตะวันออก (1ตำแหน่ง)	$T_{si,7}$	26.76	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านในผนังฝั่งทิศใต้ (3ตำแหน่ง)	$T_{si,8}$	26.49	$^{\circ}C$
	$T_{si,9}$	26.41	$^{\circ}C$
	$T_{si,10}$	27.36	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านในผนังฝั่งทิศตะวันตก (6ตำแหน่ง)	$T_{si,11}$	25.78	$^{\circ}C$
	$T_{si,12}$	26.02	$^{\circ}C$
	$T_{si,13}$	25.93	$^{\circ}C$
	$T_{si,14}$	26.05	$^{\circ}C$
	$T_{si,15}$	25.63	$^{\circ}C$
	$T_{si,16}$	27.91	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวพื้น(2ตำแหน่ง)	$T_{si,17}$	26.76	$^{\circ}C$
	$T_{si,18}$	27.60	$^{\circ}C$

ข้อมูล*	สัญลักษณ์		หน่วย
อุณหภูมิผิวด้านล่างของพื้น (วัดที่เพดานชั้นล่าง)	$T_{so, floor}$	33.46	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังฝั่งทิศใต้	$T_{so, sw}$	32.66	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังฝั่งทิศเหนือ**	$T_{so, nw}$	32	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของเพดาน**	$T_{so, ceiling}$	32	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังฝั่งทิศตะวันออก	$T_{so, ew}$	32.09	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของประตู	$T_{so, door}$	30.86	$^{\circ}C$
อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังฝั่งทิศตะวันตก	$T_{so, ww}$	40.41	$^{\circ}C$
อัตราการไหลของน้ำเย็น	\dot{V}	1.19	L/min
อุณหภูมิน้ำออกจากเครื่องทำน้ำเย็น	$T_{water, out}$	24.39	$^{\circ}C$
อุณหภูมิน้ำเข้าจากเครื่องทำน้ำเย็น	$T_{water, in}$	8.93	$^{\circ}C$

*ใช้ค่าความเร็วลมภายนอกเป็น 1.2 m/s

**อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังฝั่งทิศเหนือ และเพดานเป็นค่าประมาณ เนื่องจาก ผนังฝั่งทิศเหนือจะมีผนังกระจกบัง และเพดานด้านบนจะเป็นพื้นที่ใต้หลังคาจึงไม่สามารถวัดได้โดยตรง

ข้อมูลของผนัง เพดาน พื้น และประตู ได้แก่ พื้นที่ อุณหภูมิผิวด้านในเฉลี่ย อุณหภูมิผิวด้านนอกเฉลี่ย และผลต่างอุณหภูมิผิว แสดงในตารางที่ ข.3 และความหนาของโครงสร้าง สภานำความร้อนของวัสดุ และค่าความต้านทานความร้อนรวมของแต่ละชั้นของผนัง เพดาน พื้น และประตู แสดงในตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ อุณหภูมิผิวด้านในเฉลี่ย อุณหภูมิผิวด้านนอกเฉลี่ย และผลต่างอุณหภูมิผิวของผนัง เพดาน พื้น และประตู

	x	พื้นที่, $A_x (m^2)$	อุณหภูมิผิวด้าน ในเฉลี่ย*, $T_{si,x} (^{\circ}C)$	อุณหภูมิผิวด้าน นอกเฉลี่ย, $T_{so,x} (^{\circ}C)$	ผลต่าง อุณหภูมิผิว, $\Delta T_{s,x} (^{\circ}C)$
พื้น	floor	10.61	27.17	33.46	6.29
ผนังฝั่งทิศใต้	sw	13.61	26.66	32.66	6.00
ผนังฝั่งทิศเหนือ	nw	14.93	28.24	32	3.76
เพดาน	ceiling	10.61	26.80	32	5.20
ผนังฝั่งทิศตะวันออก	ew	5.90	26.76	32.09	5.33
ประตู	door	1.60	27.15	30.86	3.17
ผนังฝั่งทิศตะวันตก	ww	7.819	26.16	40.41	14.25

*อุณหภูมิผิวด้านในเฉลี่ยของพื้นผิวใดๆ จะเป็นค่าที่ได้จากการถ่วงน้ำหนักอุณหภูมิผิวที่วัดได้ด้วยพื้นที่

ตารางที่ ข.4 ความหนาของโครงสร้าง สภานำความร้อนของวัสดุ และค่าความต้านทานความร้อนรวมของแต่ละชั้นของผนัง เพดาน พื้น และประตู

ชนิดวัสดุ	ความหนาของวัสดุ, m						
	พื้น	ผนังฝั่ง ทิศใต้	ผนังฝั่ง ทิศเหนือ	เพดาน	ผนังฝั่งทิศ ตะวันออก	ประตู	ผนังฝั่งทิศ ตะวันตก
ไม้	-	-	-	-	-	0.04	-
ยิปซัม	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	-	0.01
ใยแก้ว	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	-	0.051
อะลูมิเนียม	-	-	-	-	-	-	0.005
คอนกรีต	0.150	-	-	-	-	-	-

ชนิดวัสดุ	สภาพนำความร้อนของวัสดุ, $W/(m \cdot K)$						
	พื้น	ผนังฝั่ง ทิศใต้	ผนังฝั่ง ทิศเหนือ	เพดาน	ผนังฝั่งทิศ ตะวันออก	ประตู	ผนังฝั่งทิศ ตะวันตก
ไม้	0.087						
ยิปซัม	0.17						
ใยแก้ว	0.036						
อะลูมิเนียม	237						
คอนกรีต	1.40						
	ค่าความต้านทานความร้อน, $(m^2 \cdot K)/W$						
ไม้	-	-	-	-	-	0.460	-
ยิปซัม	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	-	0.059
ใยแก้ว	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	-	1.417
อะลูมิเนียม	-	-	-	-	-	-	-
คอนกรีต	0.107	-	-	-	-	-	-
ค่าความต้านทานของ ฟิล์มอากาศของผนัง ด้านนอก, $(m^2 \cdot K)/W$	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.044
ค่าความต้านทานของ ฟิล์มอากาศของผนัง ด้านใน, $(m^2 \cdot K)/W$	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120	0.120
ค่าความต้านทานความ ร้อนรวม, $(m^2 \cdot K)/W$	1.814	1.716	1.716	1.716	1.716	0.700	1.640

จากค่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น อุณหภูมิน้ำเย็นขาออกจากเครื่องปรับอากาศ และ อุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้าจากเครื่องปรับอากาศ จะสามารถหาค่าปริมาณความร้อนห้องทดลองได้จาก สมการที่ (ข.2) โดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ และค่าความหนาแน่น ของน้ำ $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

ค่าปริมาณความร้อนห้องทดลอง จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{cl} &= \rho_{water} \dot{V} c_p (T_{water,out} - T_{water,in}) \\ &= (1000 \text{ kg} / \text{m}^3) \left(1.19 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) (4.18 \times 10^3 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})) (24.39 - 8.93^\circ \text{C}) \\ &= 1281.69 \text{ W} \end{aligned}$$

ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึมของห้องทดลอง จะพิจารณาผลรวมพื้นที่รั่วซึมที่ขอบประตู บริเวณขอบผนังห้อง ขอบหน้าต่างกระจกซึ่งสามารถประมาณได้เป็นพื้นที่เสมือนของอากาศรั่วเท่ากับ 426 cm^2

จากนั้น สามารถหา อัตราการไหลของอากาศได้จากสมการที่ (ข.4) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ stack, C_s เป็น $0.000435 \text{ (L/s)}^2 / (\text{cm}^4 \cdot \text{K})$ ในการทดลองที่ห้องทดลองชั้น 4 (เป็นค่าสำหรับอาคารที่สูงเทียบเท่า 3 ชั้นซึ่งเป็นจำนวนชั้นมากที่สุดที่ให้) และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ลม, C_w เป็น $0.000161 \text{ (L/s)}^2 / (\text{cm}^4 \cdot (\text{m/s})^2)$ ในการทดลองที่ห้องทดลองชั้น 4 (เป็นค่าสำหรับอาคารที่สูงเทียบเท่า 3 ชั้นซึ่งเป็นจำนวนชั้นมากที่สุดที่ให้ และเป็นอาคารที่อยู่ในเมือง ที่มีอาคารสูงอื่นบัง)

อัตราการไหลของอากาศที่รั่วซึม จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q &= \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s |\Delta T| + C_w U^2} \\ &= \left(\frac{426}{1000} \right) \left(\sqrt{(0.000435 \cdot |36.13 - 25.70|) + (0.000161 \cdot 1.2^2)} \right) \\ &= 0.029418 \text{ m}^3 / \text{s} \end{aligned}$$

ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึมของห้องทดลอง จะเริ่มจากการหาค่าอัตราส่วนความชื้น โดยที่อุณหภูมิของอากาศภายนอกห้อง $T_{out} = 36.13^\circ \text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 90% จะมีค่าอัตราส่วนความชื้นเป็น $0.03561 \text{ kg}_w / \text{kg}_{da}$ และที่อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง $T_m = 25.70^\circ \text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 50% จะมีค่าอัตราส่วนความชื้นเป็น $0.01035 \text{ kg}_w / \text{kg}_{da}$ และจะสามารถคำนวณหา ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึมของห้องทดลอง ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{inf} &= \rho_{air} Q c_p (T_{air,out} - T_{room}) + Q \rho_{air} \Delta W (2501 + 1.805 T) \\ &= (1.2)(0.029418)(1000)(36.13 - 25.70) + (0.029418)(1.2)(0.03561 - 0.01035) \left(2501 + 1.805 \left(\frac{25.70 + 36.13}{2} \right) \right) \\ &= 370.48 \text{ W} \end{aligned}$$

ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามาโดยการนำความร้อนผ่านผนัง พื้น และเพดานห้องจะใช้ค่าพื้นที่ และผลต่างอุณหภูมิผิวของผนัง เพดาน พื้น และประตูในตารางที่ ข.3 และค่าความต้านทานความร้อนรวมของผนัง เพดาน พื้น และประตูในตารางที่ ข.4 หาได้จากสมการที่ (ข.5) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนรวม ผลที่ได้จะแสดงในตารางที่ ข.5

ตารางที่ ข.5 ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนของผนัง เพดาน พื้น

	พื้น	ผนังฝั่งทิศใต้	ผนังฝั่งทิศเหนือ	เพดาน	ผนังฝั่งทิศตะวันออกเฉียง	ประตู	ผนังฝั่งทิศตะวันตก
ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อน, W	36.790	47.587	32.714	32.152	18.326	7.246	67.939

จากการใส่ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง วัสดุที่ใช้ทำผนัง เพดาน หรือพื้นที่ที่พิจารณา และทิศของผนังที่พิจารณาในโปรแกรม ASHRAE RTS จะได้ค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศสามารถกำจัดได้จริง (cooling load) และค่าปริมาณความร้อน (heat gain) ที่คำนวณได้ในแต่ละชั่วโมงทั้ง 24 ชั่วโมง แต่ในกรณีนี้จะพิจารณาเฉพาะที่ชั่วโมงที่ 13 เนื่องจากศึกษาที่เวลา 13.56 น. และจะนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ (ข.6) จะได้แฟกเตอร์ time-delay effect ที่ชั่วโมงที่ 13 และค่าปริมาณความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนัง เพดาน และพื้นที่รวมผลของ time delay เป็นดังตารางที่ ข.6 โดยละทิ้งผลของ time delay ของประตู เนื่องจาก พื้นที่ของประตู มีค่าน้อย และประตูทำจากไม้ เป็นวัสดุที่อมความร้อนน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นที่ศึกษา (ตัวอย่างการคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศสามารถกำจัดได้จริงและค่าปริมาณความร้อนของโปรแกรม ASHRAE RTS จะมีแสดงในหนังสือ ASHRAE Handbook : 2013 Fundamental Volume บทที่ 18 หน้า 18.35-18.49 [38])

ตารางที่ ข.6 แฟกเตอร์ time-delay effect ที่ชั่วโมงที่ 13 และปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนของผนัง เพดาน ผนังที่รวมผลของ time delay

	พื้น	ผนังฝั่งทิศใต้	ผนังฝั่งทิศเหนือ	เพดาน	ผนังฝั่งทิศตะวันออกเฉียง	ประตู	ผนังฝั่งทิศตะวันตก
แฟกเตอร์ time-delay effect ที่ชั่วโมงที่ 13	0.894	0.691	0.691	0.665	1.271	-	0.687
ปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนรวมผลของ time delay, w	32.890	32.904	22.620	21.394	23.294	7.246	46.678

ตัวอย่างการหาค่าแฟกเตอร์ time-delay effect ของพื้น จะใส่ข้อมูลในโปรแกรม ASHRAE RTS ดังแสดงในตารางที่ ข.7 โดยที่สภาพอากาศที่ใช้จะเป็นสภาพอากาศมาตรฐานของประเทศไทยที่จัดทำโดยทาง ASHRAE ซึ่งจะมีข้อมูลสภาพอากาศของแต่ละเดือน เมื่อโปรแกรมประมวลผล จะได้ค่า cooling load และ heat gain ในตัวอย่างนี้เป็นข้อมูลของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56 น. จึงใช้ค่าที่เดือนที่ 3 ชั่วโมงที่ 13 ได้ค่า cooling load เป็น 1318.10 Btu/h และ heat gain เป็น 1473.75 Btu/h แล้วนำมาหา ค่าแฟกเตอร์ time-delay effect ของพื้นตามสมการที่ (ข.6) เมื่อ cooling load นิยามเป็นค่าปริมาณความร้อนที่เครื่องปรับอากาศสามารถกำจัดได้จริงที่ ชั่วโมงที่ 13 และ heat gain นิยามเป็นค่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ ชั่วโมงที่ 13 ค่าแฟกเตอร์ time-delay effect ของพื้น

$$f_{td} = \frac{q_{i,actual}}{q_{i,cal}} = \frac{1318.10}{1473.75} = 0.894$$

ตารางที่ ข.7 ตัวอย่างการใส่ข้อมูลเพื่อหา time delay effect ของพื้น

ตัวแปร		หมายเหตุ
azimuth (surface azimuth measured in degree from south)	-	
tilt (horizontal = 0°, vertical = 90°)	90°	
latitude	13.73 °N	
longitude	100.57 °E	
ground reflectivity	20%	ใช้ค่าของ weathered concrete (อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch14, table 5)
room temperature	78.26 °F	
area	130.16 ft ²	
input U	0.0474 Btu/(h-ft ² °F)	
CTS type	8" LW concrete, batt insulation, gyp board	อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch18, table 16
outside surface absorptance	0.7	ใช้ค่าของ concrete (อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch18, table 15)
outside surface h	0.68 (h-ft ² °F)/ Btu	
outside surface emittance	0.91	ใช้ค่าของ concrete, rough (อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch4, table 5)

ตัวแปร		หมายเหตุ
outside surface delta R (difference between long-wave radiation incident on surface from sky and surroundings and radiation emitted by blackbody at outdoor air temperature)	0 Btu/(h-ft ²)	เนื่องจากพื้นไม่มีส่วนที่สัมผัสกับแสงอาทิตย์
RTS zone type	MW no carpet 10% glass	เลือก medium construction (อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch18, table 19)
%convective	54%	เนื่องจากเลือกประเภท heat gain เป็น conduction heat gain through walls and floors (อ้างอิงจาก ASHRAE 2009F, Ch18, table 14)

ค่าปริมาณความร้อนรวมที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนรวมผลของ time delay จะสามารถหาได้จากผลรวมของปริมาณความร้อนที่เข้าห้องในแต่ละส่วนของตารางที่ ข.6 จะได้

$$q_{dt} = \sum q_{i,dt} = 187.03W$$

ค่าปริมาณความร้อนรวมของอุปกรณ์ภายในห้อง จะหาได้จากผลรวมของค่าความร้อนที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ในตารางที่ ข.1 ซึ่งมีค่าเป็น 555 W

ค่าความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนของกรอบหน้าต่างกระจก จะสามารถหาได้จากสมการที่ (ข.5) โดยกรอบหน้าต่างกระจกมีพื้นที่ 0.109 m² เนื่องจากไม่ได้วัดอุณหภูมิที่กรอบหน้าต่างกระจก จะใช้ค่าอุณหภูมิผิวภายในเฉลี่ยของผนังฝั่งทิศตะวันตกซึ่งเป็นผนังฝั่งที่ติดตั้งหน้าต่าง

กระจกแทน และค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนรวมของกรอบหน้าต่างกระจกอลูมิเนียมของหน้าต่างที่มีความหนา 6 มิลลิเมตร จะหาได้จากตารางที่ 1 บทที่ 15 ของหนังสือ ASHRAE Handbook : 2013 Fundamental Volume [38] มีค่าเป็น $17.32 W/(m^2 \cdot K)$ ดังนั้น จะได้ค่าปริมาณความร้อนเป็น

$$q_{frame} = 26.902W$$

ค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น จะเป็นผลรวมของความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึมของห้องทดลอง ความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนของผนัง เพดาน พื้น ที่รวมผลของ time delay ความร้อนรวมของอุปกรณ์ภายในห้อง และความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากการนำความร้อนของกรอบหน้าต่างกระจก จะคำนวณได้ดังนี้

$$q_i = q_{inf} + q_{di} + q_{app} + q_{frame} = 370.48 + 187.03 + 555 + 26.902 \\ = 1139.41W$$

ดังนั้น ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ได้จากการทดลอง จะได้เป็น

$$q_{exp} = q_r - q_i = 1281.69 - 1139.41 = 142.28W$$

และ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ได้จากอัตราส่วนของค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ต่อพื้นที่หน้าต่างกระจก (พื้นที่ของหน้าต่างกระจก $0.88 m^2$) ได้เท่ากับ $161.68 W/m^2$

ข.3 การคำนวณหาค่า Solar Heat Gain Coefficient และค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จากการทดลอง จะสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$q = U \cdot (T_{out} - T_{in}) + SHGC \cdot I \quad (3.1)$$

ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกจะได้รับการคำนวณในหัวข้อ ข.2 เนื่องจาก ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่เกิดจากส่วนของการส่งผ่านความร้อนของรังสีแสงอาทิตย์ (พจน์ที่สองทางขวามือของสมการที่ (3.1)) จะมีอัตราส่วนที่มากกว่าค่าที่เกิดจากส่วนของการนำและพาความร้อนมาก จึงประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเป็นค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนา นอกจากนี้ จะทราบค่าอุณหภูมิของอากาศภายนอกห้อง อุณหภูมิของอากาศภายในห้อง และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดหน้าหน้าต่างกระจก จึงสามารถหาค่า SHGC ได้

ตัวอย่างการคำนวณที่จะแสดงต่อไปนี้จะต่อเนื่องจากการหาค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกในหัวข้อ ข.2 ค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศาที่มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2 จะหาได้ดังนี้

$$SHGC = \frac{q_{\text{exp}} - U(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{I} = \frac{161.68 - 4.13(36.13 - 25.60)}{360.95} = 0.327$$

ค่าการส่งผ่านรังสีผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ในที่นี้จะป็นอัตราส่วนของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่อค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก โดยที่ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการทดลองจะสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดจากด้านหลังมู่ลี่จากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์สองตัว

$$T_{\text{exp}}^{\#I} = \frac{I_{r1} + I_{r2}}{2 \cdot I} \quad (5.8)$$

เมื่อ $T_{\text{exp}}^{\#I}$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ได้จากการทดลอง

I_{r1} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1, W/m^2

I_{r2} คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 2, W/m^2

ตัวอย่างการคำนวณ จะต่อเนื่องจากการหาค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกในหัวข้อ ข.2 ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศาที่มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2 จะหาได้ดังนี้

$$T_{\text{exp}}^{\#I} = \frac{I_{r1} + I_{r2}}{2 \cdot I} = \frac{20.11 + 23.53}{2(360.95)} = 0.06$$

ข.4 การหาค่าความคลาดเคลื่อน

ข.4.1 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง จะแบ่งการวิเคราะห์เป็น ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ในบทที่ 5 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B รุ่น CMP6 และรุ่น CMP11 มีค่าเป็น 8.23% 7.68% และ 3.82% ตามลำดับ โดยที่เครื่องมือวัด

รังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B ใช้วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหน้าหน้าต่างกระจก เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B พร้อมแหวนบังเงาใช้วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6 ใช้วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ด้านหลังมู่ลี่ (ตัวบน) และเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP11 ใช้วัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ด้านหลังมู่ลี่ (ตัวล่าง) สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก เนื่องจากข้อจำกัดของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ ที่ต้องใช้ขาตั้งสามขาเป็นฐาน การติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้อยู่ในระดับเดียวกับหน้าต่างกระจกจึงทำได้ยาก อีกทั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์จะถูกติดตั้งให้มีมุมเอียงขนานกับหน้าต่างกระจก โดยใช้เครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำเพื่อให้เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์มีมุมเอียงขนานกับหน้าต่างกระจก โดยที่เครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำจะมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 4^\circ$ จึงส่งผลให้มีค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก จะแสดงการคำนวณของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56น. กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้า ปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2

ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบที่ตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจก, I_{DN} จะหาได้จาก

$$I_D = I_{DN} \cos \theta \quad (\text{ข.8})$$

จะได้ $I_{DN} = \frac{I_D}{\cos \theta} \quad (\text{ข.9})$

และค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวม, I_D จะหาได้จาก

$$I_D = I - I_d \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่ $I = 360.95 \text{ W/m}^2$, $I_d = 172.31 \text{ W/m}^2$ และ $\theta = 70.95^\circ$

จะได้ $I_D = 360.95 - 172.31 = 188.64 \text{ W/m}^2$

จากสมการที่ (ข.9) จะได้ $I_{DN} = \frac{I_D}{\cos \theta} = \frac{188.64}{\cos(70.95^\circ)} = 577.95 \text{ W/m}^2$

เครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำมีค่าความคลาดเคลื่อนเป็น $\pm 4^\circ$ จึงทำให้มุมตกกระทบมีค่าเป็น อยู่ใน ช่วง 66.95° ถึง 74.95°

ให้ $\theta_1 = 66.95^\circ$ และ $\theta_2 = 74.95^\circ$

จะได้ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมดังนี้

$$I_{D,1} = I_{DN} \cos \theta_1 = 577.95 \cos(66.95^\circ) = 226.29 \text{ W/m}^2$$

$$I_{D,2} = I_{DN} \cos \theta_2 = 577.95 \cos(74.95^\circ) = 150.07 \text{ W/m}^2$$

จะได้ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวม ดังนี้

$$I_1 = I_{D,1} + I_d = 226.29 + 172.31 = 398.60 \text{ W/m}^2$$

$$I_2 = I_{D,2} + I_d = 150.07 + 172.31 = 322.38 \text{ W/m}^2$$

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก จะได้

$$u_{I_1} = \frac{|I - I_1|}{I} = \frac{|360.95 - 398.60|}{360.95} \times 100\% = 10.43\%$$

$$u_{I_2} = \frac{|I - I_2|}{I} = \frac{|360.95 - 322.38|}{360.95} \times 100\% = 10.67\%$$

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจก จะมีค่าประมาณ 10.55% ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมซึ่งรวมผลของการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจกที่วัดโดยเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B ของตัวอย่างการคำนวณ มีค่าเป็น

$$u_r = \sqrt{8.23^2 + 10.55^2} = 13.38\%$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (ตัวบน) ซึ่งรวมผลของการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจกที่วัดโดยเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6 ของตัวอย่างการคำนวณ มีค่าเป็น

$$u_{r,1} = \sqrt{7.68^2 + 10.55^2} = 13.04\%$$

และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (ตัวล่าง) ซึ่งรวมผลของการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจกที่วัดโดยเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP11 ของตัวอย่างการคำนวณ มีค่าเป็น

$$u_{I,r2} = \sqrt{3.82^2 + 10.55^2} = 11.22\%$$

เนื่องจาก ค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเนื่องจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับมุมเอียงของหน้าต่างกระจกมีค่าขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 1% ถึง 12% ในการหาค่าความคลาดเคลื่อน จึงใช้ค่าความคลาดเคลื่อนในส่วนนี้เป็นค่าเฉลี่ยประมาณ 4% จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมใหม่เป็น 9.15% ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (ตัวบน) เป็น 8.66% และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมที่วัดด้านหลังมู่ลี่ (ตัวล่าง) เป็น 5.53%

2. ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแหวนบังเงา จะเป็นค่าคลาดคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นมาสำหรับการวัดค่าความเข้มของแสงอาทิตย์แบบกระจาย เนื่องจาก การวัดค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย จะติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับแหวนบังเงา ส่วนของแหวนบังเงาต้องบังแสงอาทิตย์แบบตรงไม่ให้เกิดกระทบเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ตลอดการวัด แต่เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องมีการเลื่อนเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์เพื่อให้อยู่ในรัศมีการบังของแสงบังเงา จึงประมาณค่าความคลาดเคลื่อนนี้เท่ากับ 1% ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงกระจายที่วัดในระนาบแนวนอนที่วัดด้วยเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B สามารถคำนวณได้เป็น

$$u_{I,d} = \sqrt{8.23^2 + 1^2} = 8.29\%$$

ข.4.2 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ติด

มู่ลี่

ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองจากสมการที่ (ข.1) สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนได้จาก

$$u_{q_{exp}} = \sqrt{(u_{q_r})^2 + (-u_{q_l})^2} \quad (ข.11)$$

เมื่อ u_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณ i ใดๆ

โดยที่ ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อน, u_{q_r} ของห้องทดลองจะหาได้จาก

$$u_{q_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_r}{\partial \dot{V}} u_{\dot{V}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_{water,out}} u_{T_{water,out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_{water,in}} u_{T_{water,in}}\right)^2} \quad (ข.12)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \frac{\partial q_r}{\partial \dot{V}} &= \rho c_{p,w} (T_{\text{water,out}} - T_{\text{water,in}}) \\ \frac{\partial q_r}{\partial T_{\text{water,out}}} &= \rho \dot{V} c_{p,w} \\ \frac{\partial q_r}{\partial T_{\text{water,in}}} &= -\rho \dot{V} c_{p,w} \end{aligned}$$

และค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น, u_{q_i} สามารถหาได้จาก

$$u_{q_i} = \sqrt{u_{q_{inf\,i}}^2 + u_{q_{fd}}^2 + u_{q_{app}}^2 + u_{q_{frame}}^2} \quad (\text{ข.13})$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม, $u_{q_{inf\,i}}$ สามารถหาได้จาก

$$u_{q_{inf\,i}} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial Q} u_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial T_{out}} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial T_{in}} u_{T_{in}}\right)^2} \quad (\text{ข.14})$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial Q} &= \rho_{air} c_p (T_{out} - T_{in}) + \rho_{air} \Delta W \left(2501 + 1.805 \left(\frac{T_{out} + T_{in}}{2} \right) \right) \\ \frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial T_{out}} &= \rho_{air} Q c_p + \frac{1.805 \rho_{air} Q \Delta W}{2} \\ \frac{\partial q_{inf\,i}}{\partial T_{in}} &= -\rho_{air} Q c_p + \frac{1.805 \rho_{air} Q \Delta W}{2} \end{aligned}$$

โดยที่ ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของอากาศ, u_Q สามารถหาได้จาก

$$u_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial A_L} u_{A_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{out}} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{in}} u_{T_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial U} u_U\right)^2} \quad (\text{ข.15})$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad \frac{\partial Q}{\partial A_L} &= \frac{(C_s |T_{out} - T_m| + C_w U^2)^{0.5}}{1000} \\ \frac{\partial Q}{\partial T_{out}} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_m| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot C_s T_{out} \\ \frac{\partial Q}{\partial T_{in}} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_m| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot C_s T_{in} \\ \frac{\partial Q}{\partial U} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_m| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot 2C_w U \end{aligned}$$

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากความร้อนภายนอกที่ผ่านเข้ามา โดยการนำความร้อนของพื้นผิว i ไตๆที่รวมผลของ time delay, $u_{q_{fd}}$ ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องเนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆ, $u_{q_{app}}$ และ ค่าความร้อนที่เข้าห้อง

เนื่องจากการนำความร้อนของกรอบหน้าต่างกระจก, u_{frame} จะประมาณค่าความคลาดเคลื่อนนี้เท่ากับ 5%

การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC และค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จากการทดลองจะสามารถหาได้จากสมการที่ (5.3) และ (5.8) ตามลำดับ

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนของห้องทดลองของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56น. กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2 และมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 ดังตารางที่ ข.8

ตารางที่ ข.8 ค่าความคลาดเคลื่อนรวมของปริมาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

เครื่องมือวัด	ปริมาณที่วัด	ค่าความคลาดเคลื่อน
เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B	ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมทั้งที่วัดด้านหน้าหน้าต่างกระจก	9.15%
เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B พร้อมแหวนบังเงา	ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย	8.29%
เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6	ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมทั้งด้านหลังมู่ลี่ (ตัวบน)	8.66%
เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP11	ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์รวมทั้งด้านหลังมู่ลี่ (ตัวล่าง)	5.53%
เทอร์โมคัปเปิล ชนิด J	ค่าอุณหภูมิ	0.5 °C
Flow meter	อัตราการไหลของน้ำ	0.0001 L/min

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อน, u_{q_r} ของห้องทดลองจะหาได้จาก

$$u_{q_r} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_r}{\partial \dot{V}} u_{\dot{V}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_{water, out}} u_{T_{water, out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_{water, in}} u_{T_{water, in}}\right)^2}$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\partial q_r}{\partial \dot{V}} = \rho c_{p,w} (T_{water, out} - T_{water, in}) = (1000 \text{ kg/m}^3)(4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)})(24.39 - 8.93^\circ \text{C})$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial T_{water, out}} = \rho \dot{V} c_{p,w} = (1000 \text{ kg/m}^3) \left(1.19 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right) (4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)})$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial T_{water, in}} = -\rho \dot{V} c_{p,w} = -(1000 \text{ kg/m}^3) \left(1.19 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right) (4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)})$$

$$u_{\dot{V}} = 0.0001 \frac{\text{L}}{\text{min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 1.67 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$u_{T_{water, out}} = 0.5^\circ \text{C}$$

$$u_{T_{water, in}} = 0.5^\circ \text{C}$$

$$\therefore u_{q_r} = 58.619 \text{ W}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากอากาศรั่วซึม, $u_{q_{inf \#}}$ สามารถหาได้จาก

$$u_{q_{inf \#}} = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{inf \#}}{\partial Q} u_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{inf \#}}{\partial T_{out}} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{inf \#}}{\partial T_{in}} u_{T_{in}}\right)^2}$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\partial q_{inf \#}}{\partial Q} = \rho_{air} c_p (T_{out} - T_{in}) + \rho_{air} \Delta W \left(2501 + 1.805 \left(\frac{T_{out} + T_{in}}{2}\right)\right)$$

$$= (1.2)(1000)(36.13 - 25.70) + (1.2)(0.03561 - 0.01035) \left(2501 + 1.805 \left(\frac{36.13 + 25.70}{2}\right)\right)$$

$$\frac{\partial q_{inf \#}}{\partial T_{out}} = \rho_{air} Q c_p + \frac{1.805 \rho_{air} Q \Delta W}{2}$$

$$= (1.2)(1000)(0.029418) + \frac{1.805(1.2)(0.029418)(0.03561 - 0.01035)}{2}$$

$$\frac{\partial q_{inf \#}}{\partial T_{in}} = -\rho_{air} Q c_p + \frac{1.805 \rho_{air} Q \Delta W}{2}$$

$$= -(1.2)(1000)(0.029418) + \frac{1.805(1.2)(0.029418)(0.03561 - 0.01035)}{2}$$

โดยที่ ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการไหลของอากาศ, u_Q สามารถหาได้จาก

$$u_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial A_L} u_{A_L}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{out}} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{in}} u_{T_{in}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial U} u_U\right)^2}$$

$$\text{เมื่อ } \frac{\partial Q}{\partial A_L} = \frac{(C_s |T_{out} - T_{in}| + C_w U^2)^{0.5}}{1000} = \frac{(0.000435 \cdot |36.13 - 25.70| + 0.000161 \cdot (1.2)^2)^{0.5}}{1000}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q}{\partial T_{out}} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_{in}| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot C_s T_{out} \\ &= \frac{426}{1000} \cdot 0.5 \cdot (0.000435 \cdot |36.13 - 25.70| + 0.000161 \cdot (1.2)^2)^{-0.5} \cdot (0.000435) \\ \frac{\partial Q}{\partial T_{in}} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_{in}| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot C_s T_{in} \\ &= \frac{426}{1000} \cdot 0.5 \cdot (0.000435 \cdot |36.13 - 25.70| + 0.000161 \cdot (1.2)^2)^{-0.5} \cdot (0.000435) \\ \frac{\partial Q}{\partial U} &= \frac{A_L}{1000} \cdot 0.5 \cdot (C_s |T_{out} - T_{in}| + C_w U^2)^{-0.5} \cdot 2C_w U \\ &= \frac{426}{1000} \cdot 0.5 \cdot (0.000435 \cdot |36.13 - 25.70| + 0.000161 \cdot (1.2)^2)^{-0.5} \cdot 2(0.000161)(1.2)\end{aligned}$$

$u_{AL} = 42.6 \text{ cm}^2$ จากการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนพื้นที่เสมือนของอากาศรั่ว
เป็น 10%

$$u_{T_{out}} = 0.5^\circ \text{ C}$$

$$u_{T_{in}} = 0.5^\circ \text{ C}$$

$$u_U = 0.1 \text{ m/s}$$

$$\therefore u_Q = 3.0935 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\therefore u_{q_{infil}} = 46.268 \text{ W}$$

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนที่เข้าห้องเนื่องจากสาเหตุอื่น, u_{q_i} สามารถหาได้จาก

$$u_{q_i} = \sqrt{u_{q_{infil}}^2 + u_{q_{rd}}^2 + u_{q_{app}}^2 + u_{q_{frame}}^2}$$

$$\text{เมื่อ } u_{q_{infil}} = 46.268 \text{ W}$$

$$u_{q_{rd}} = \frac{2}{100} \times 187.03 = 3.7406 \text{ W}$$

$$u_{q_{app}} = \frac{2}{100} \times 555 = 11.1 \text{ W}$$

$$u_{q_{frame}} = \frac{2}{100} \times 26.902 = 0.53804 \text{ W}$$

$$\therefore u_{q_i} = 47.731 \text{ W}$$

ดังนั้น จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลอง

$$u_{q_{exp}} = \sqrt{(u_{q_r})^2 + (-u_{q_i})^2} = \sqrt{(56.619)^2 + (-47.731)^2} = 74.054 \text{ W}$$

ข.4.3 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของหาค่า Solar Heat Gain Coefficient

จากการวิเคราะห์การหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ที่ได้จากการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองจะหาได้จากสมการ

$$u_{SHGC_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} u_q\right)^2 + \left(-\frac{\Delta T}{I} u_U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I} u_{T_{in}}\right)^2 + \left(-\frac{(q-U\Delta T)}{I^2} u_I\right)^2} \quad (5.11)$$

โดยค่าปริมาณความร้อนของห้องทดลองที่ใช้คำนวณจะเป็นอัตราส่วนของปริมาณความร้อนต่อพื้นที่หน้าต่างกระจก นั่นคือ

$$\dot{q}_{exp} = \frac{q_{exp}}{H \cdot W} \quad (ข.16)$$

\dot{q}_{exp} คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลอง, W/m^2

H คือ ความสูงของหน้าต่างกระจก, m

W คือ ความกว้างของหน้าต่างกระจก, m

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เป็นอัตราปริมาณความร้อนต่อพื้นที่หน้าต่างกระจกจะสามารถหาได้จาก

$$u_{\dot{q}_{exp}} = \sqrt{\left(\frac{1}{H \cdot W} u_{q_{exp}}\right)^2 + \left(\frac{q_{exp}}{H^2 \cdot W} u_H\right)^2 + \left(\frac{q_{exp}}{H \cdot W^2} u_W\right)^2} \quad (ข.17)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนของห้องทดลองของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56น. กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่สีฟ้าปรับมุมปิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2 และมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 ดังตารางที่ ข.7

ค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนที่เป็นอัตราปริมาณความร้อนต่อพื้นที่หน้าต่างกระจกจะหาได้จาก

$$\begin{aligned} u_{\dot{q}_{exp}} &= \sqrt{\left(\frac{1}{H \cdot W} u_{q_{exp}}\right)^2 + \left(\frac{q_{exp}}{H^2 \cdot W} u_H\right)^2 + \left(\frac{q_{exp}}{H \cdot W^2} u_W\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{(1)(0.8)} (74.054)\right)^2 + \left(\frac{142.28}{(1)^2 (0.8)} (0.0005)\right)^2 + \left(\frac{142.28}{(1)(0.8)^2} (0.0005)\right)^2} \\ &= 92.568W / m^2 \end{aligned}$$

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า SHGC ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองจะหาได้จาก

$$\begin{aligned}
 u_{SHGC_{exp}} &= \sqrt{\left(\frac{1}{I} u_q\right)^2 + \left(-\frac{\Delta T}{I} u_U\right)^2 + \left(-\frac{U}{I} u_{T_{out}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I} u_m\right)^2 + \left(-\frac{(q-U\Delta T)}{I^2} u_l\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{360.95} (92.568)\right)^2 + \left(-\frac{(36.13-25.70)}{360.95} (0.2065)\right)^2 + \left(-\frac{4.13}{360.95} (0.5)\right)^2 + \left(\frac{4.13}{360.95} (0.5)\right)^2} \\
 &\quad + \left(-\frac{(161.68) - (4.13)(36.13-25.70)}{360.95^2} (92.543)\right)^2} \\
 &= 0.270
 \end{aligned}$$

ข.4.4 การหาค่าความคลาดเคลื่อนของหาค่าการส่งผ่านรังสีของแสงอาทิตย์

จากการวิเคราะห์การหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการส่งผ่านรังสีของแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการส่งผ่านของรังสีแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ที่ได้จากการทดลองจะหาได้จากสมการ

$$u_{T_{exp}^{RH}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2I} u_{I_{r1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{2I} u_{I_{r2}}\right)^2 + \left(-\frac{(I_{r1} + I_{r2})}{2I^2} u_l\right)^2} \quad (5.12)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของปริมาณความร้อนของห้องทดลองของการทดลองวันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.56น. กรณีหน้าต่างกระจกแบบใสที่ติดตั้งมู่ลี่ฟ้าปรับมุมบิดของใบมู่ลี่เป็น 45 องศา มีค่าข้อมูลที่วัดได้จากห้องทดลองดังตารางที่ ข.2 และมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมที่เป็นผลของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด และค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 5 ดังตารางที่ ข.7

ค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดจากเครื่องวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u_{I_{r1}} &= \frac{8.66}{100} \times 20.11 = 1.7415W / m^2 \\
 u_{I_{r2}} &= \frac{5.53}{100} \times 23.53 = 1.3012W / m^2
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (5.11) จะหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u_{T_{exp}^{RH}} &= \sqrt{\left(\frac{1}{2(360.95)} (1.7415)\right)^2 + \left(\frac{1}{2(360.95)} (1.3012)\right)^2 + \left(-\frac{(20.11+23.53)}{2(360.95)^2} (87.750)\right)^2} \\
 &= 0.015
 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้หาผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของจะมีความซับซ้อน การหาผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายการส่งผ่านความร้อนของแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ จะใช้โปรแกรม GBSIM (Glass with Blind SIMulation program) เขียนด้วยภาษา Fortran และประมวลผลผ่านซอฟต์แวร์ Microsoft Developer Studio

โปรแกรมจะถูกพัฒนาขึ้นตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และมีการเพิ่มเติมส่วนที่พัฒนาในบทที่ 4 โครงสร้างของโปรแกรมจะประกอบด้วย subroutine ย่อยหลัก 3 โปรแกรม คือ

1. โปรแกรมย่อย sys_optic สำหรับคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อยนี้จะประกอบด้วย ค่าการส่งผ่านความร้อนของระบบ ค่าการสะท้อนของระบบ และค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่
2. โปรแกรมย่อย sur_temp มีหน้าที่ในการคำนวณสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นกระจก และมู่ลี่หลังจากที่ได้ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อยนี้ ประกอบด้วย ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิชั้นหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ ค่า inward-flowing fraction และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม
3. โปรแกรมย่อย comfort มีหน้าที่ในการคำนวณค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน ได้แก่ ค่าPPD(solar) และ PPD(surface)

การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ จะพัฒนาโปรแกรมในส่วนของโปรแกรมย่อย sur_temp โดยพัฒนา subroutine สำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร ส่วนสภาพนำความร้อนของมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ของพื้นดิน จะเป็นส่วนที่ฝังกระจายอยู่ใน subroutine อื่นๆของโปรแกรม

ตัวอย่างโค้ดของโปรแกรมของ subroutine สำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในเข้าสู่อาคาร

```

SUBROUTINE hcacross_coeff(ts,tin,gwidth,tiltr, hcacross,dhcacross)
! new update 11/4/2015
! Purpose: To calculate across convective heat transfer coefficient
! Input :          ts - inner glass surface temperature, K
!          tin - indoor air temperature, K
!          tilt - slat angle, degree
! Output : hcacross - interior convective heat transfer coeff.
!          dhcacrossl - derivative of hcacross wrt tleft
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT( IN) :: ts,tin,gwidth,tiltr
REAL,INTENT(OUT) :: hcacross,dhcacross
!
! Local variable
!
REAL :: winheight
REAL :: tilt
REAL :: tave
REAL :: speheat
REAL :: dens,cond,visc,pr
REAL :: ddens,dcond,dvisc,dpr
REAL :: rah1,rah2,rah
REAL :: racv
REAL :: nu
REAL :: dspe1,dspe2,dspe3,dspeheat
REAL :: tabs,tsum
REAL :: hg
REAL :: c1,c2,c3,c4,c5,c6
REAL :: drah,dnu
REAL :: hc,dhc
!
! Local parameter
!

```

```

REAL, PARAMETER :: DTOR = 0.017453293    ! Degree-To-Radian
!
tilt =tiltr*DTOR
winheight = 1
tave = 0.25*ts+0.75*tin
! *** hcacross value ***
! first of all, calculate fluid properties
!
CALL gas_prop(0.5*ts,1.5*tin, dens,ddens,cond,dcond,visc,dvisc,pr,dpr)
! calculate specific heat of air
IF(tave>333) THEN
speheat = 1009.
ELSE IF(tave>313) THEN
speheat = ((tave-313.)/20.)*(1009.-1005.)+1005.
ELSE
speheat = 1005.
END IF
!
! calculate Rayleigh number based on the height,H
rah1 = (dens**2)*(winheight**3)*9.81*speheat*abs(ts-tin)
rah2 = (tin+0.25*(ts-tin))*visc*cond
rah = rah1/rah2
racv = (2.5*(10**5))*(EXP(0.72*90)**0.2)
IF (rah>racv) THEN
    nu = 0.13*((rah**(1./3))-racv**(1./3))+0.56*(racv**0.25)
ELSE
    nu = 0.56*(rah**0.25)
END IF
hc = nu*cond/winheight
hcacross = hc*(1-EXP((-4.6/0.1)*gwidth))
! *** dhcacross value ***
! derivative of specific heat wrt average temperature
dspe1 = 4*(1.9327*10**(-10))*tave**3
dspe2 = 3*(7.9999*10**(-7))*tave**2
dspe3 = 2*(1.1407*10**(-3))*tave

```

```

dspeheat = dspe1-dspe2+dspe3-0.4489
! derivative of Rayleigh number based on the height
tabs = ABS(ts-tin)
tsum = 0.25*ts+0.75*tin
hg = (winheight**3)*9.81
c1 = (hg*(dens**2)*tabs*4*dspeheat)/(cond*visc*tsum)
c2 = (hg*speheat*(dens**2)*tabs)/(4*cond*visc*(tsum**2))
c3 = (hg*speheat*(dens**2)*tabs/(ts-tin))/ (cond*visc*tsum)
c4 = (2*hg*speheat*dens*tabs*4*ddens)/ (cond*visc*tsum)
c5 = (hg*speheat*(dens**2)*tabs*4*dcond)/((cond**2)*visc*tsum)
c6 = (hg*speheat*(dens**2)*tabs*4*dvisc)/(cond*(visc**2)*tsum)
drah = c1-c2+c3+c4-c5-c6
IF(rah>racv) THEN
dnu = 0.13/3*(rah**(-2./3))*drah
ELSE
    dnu = 0.14*(rah**(-0.75))*drah
END IF
dhc = 4*dcond*nu/winheight+dnu*cond/winheight
dhc across = dhc*(1-EXP((-4.6/0.1)*gwidth))
END SUBROUTINE hc across _coeff

```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวน้ำเพชร ทรงศิริทัตต์ เกิดวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัด พิษณุโลก สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนเฉลิมขวัญสตรี จ.พิษณุโลก และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557 และศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปี พ.ศ. 2557

