

การศึกษาความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่



นางสาวนภารัตน์ พานิชชีวะกุล

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

A study of thermal comfort of a person sitting near a glass window with a venetian blind installed.

Miss Naparat Panitchewakul



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	การศึกษาความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่
โดย	นางสาวนภารัตน์ พานิชชีวะกุล
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)

นภารัตน์ พานิชชีวะกุล : การศึกษาความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ (A study of thermal comfort of a person sitting near a glass window with a venetian blind installed.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. นพรัตน์ คำพร, 196 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ให้มีความแม่นยำ ซึ่งการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กระทำด้วยการปรับปรุงในหลายๆ ส่วน ได้แก่ การปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ สภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ การปรับปรุงสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และเพิ่มเติมการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในชั้นของกระจกและมู่ลี่ จากนั้นตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นกับผลการทดลองของหน้าต่างกระจกใสกับมู่ลี่สีครีมที่มุมปิดใบมู่ลี่เท่ากับ 0, 45 และ -45 องศา พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกันดี

จากนั้นจึงทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ได้แก่ ชนิดของกระจกที่ใช้ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ และสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ โดยในส่วนของชนิดของกระจกที่ใช้พบว่าการใช้กระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำ จะช่วยลดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก ผู้อยู่อาศัยจึงมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง ในส่วนของค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ พบว่ายิ่งใบมู่ลี่มีค่าการสะท้อนรังสีสูง ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลงเช่นเดียวกัน และในส่วนของสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ พบว่าเมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง สัดส่วนนี้แทบจะไม่มีผลกระทบต่อความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยเลยเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง

# # 5770205921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: THERMAL COMFORT / GLASS WINDOW / VENETIAN BLIND / CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT / THERMAL CONDUCTIVITY

NAPARAT PANITCHEWAKUL: A study of thermal comfort of a person sitting near a glass window with a venetian blind installed.. ADVISOR: PROF. SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D., CO-ADVISOR: NOPPARAT KHAMORN, Ph.D., 196 pp.

This thesis is about the development of a mathematical model for predicting the thermal comfort of a person sitting near a glass window with a venetian blind installed. The mathematical model is developed in many parts that are the convective heat transfer coefficient used in various points in the fenestration system, the thermal conductivity of the blind layer, the ratio between the sky diffuse solar radiation and the ground diffuse solar radiation affecting on the fenestration system and the addition of diffuse solar radiation absorbed in the fenestration system. The accuracy of the mathematical model is verified by comparing the predicted results with the experimental results in case of clear glass window with the cream venetian blind at slat angle 0, 45 and -45 degree and the agreement is good.

Besides, the effects of parameters of a glass window and a venetian blind on the thermal comfort of a person sitting near a glass window with a venetian blind installed are also investigated that are the type of the glass, the slat reflectivity and the ratio between the sky diffuse solar radiation and the ground diffuse solar radiation affecting on the fenestration system. Firstly, using the glass that has the low value of solar transmittance can decrease the thermal discomfort of a person. Secondly, the increasing of the slat reflectivity can also decrease the thermal discomfort of a person. Last but not least, the increasing of sky diffuse ratio and reducing of ground diffuse ratio almost affects nothing on the thermal discomfort of a person when the slat angle is at 0 degree. But it increases the thermal discomfort of a person when the slat angle is at 45 degree and decreases the thermal discomfort of a person when the slat angle is at -45 degree.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือ ผลักดัน และให้คำแนะนำต่าง ๆ มากมายจากศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รวมถึงอาจารย์ ดร.นพรัตน์ คำพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำแนะนำทั้งในส่วนของการเขียนโปรแกรมและการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง และศาสตราจารย์ ชานทวี เวชพฤติ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและความรู้ต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างมากแก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและน้องสาว ที่คอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา สุดทำยนี้ขอขอบคุณนางสาว น้ำเพชร ทรงศิริทัตต์ ผู้ที่เป็นทั้งเพื่อนและคอยช่วยเหลือกันตลอดในช่วงเวลาที่เรียน ตลอดจนการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ฉ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	พ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 แนวทางการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ และการคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ .....	4
2.1.1 งานวิจัยของ Yahoda, D.S. และ Wright, J.L. [1].....	4
2.1.2 งานวิจัยของ Oosthuizen, P.H., Sun, L., Harrison, S.J., Naylor, D.b, Collins, M. [2].....	4
2.1.3 งานวิจัยของ EnergyPlus [3].....	4
2.1.4 งานวิจัยของ A. Laouadi, Ph.D [7].....	5
2.1.5 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และศุภกิจ วรศิลป์ชัย [8] .....	5
2.1.6 งานวิจัยของ Yazdanian and Klems [9] .....	5

2.1.7 งานวิจัยของ Wright, J.L [10] .....	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสบายเชิงความร้อน.....	6
2.2.1 งานวิจัยของ Fanger [11].....	6
2.2.2 งานวิจัยของ Olesen, B.W. [12] .....	7
2.2.3 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [13-15] .....	8
2.2.4 งานวิจัยของ Gennusa, M.L., และคณะ [16].....	8
2.2.5 งานวิจัยของ Hien, W.N. และคณะ [17].....	9
2.2.6 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และศุภกิจ วรศิลป์ชัย [18] .....	9
2.2.7 งานวิจัยของ Anderson, T. และ Luther, M. [19] .....	9
2.2.8 งานวิจัยของ Buratti, C. และคณะ [20].....	10
2.2.9 งานวิจัยของ Khamporn, N. และ Chaiyapinunt, S. [21].....	10
บทที่3 ทฤษฎีและสมการการหาค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort).....	11
3.1 การหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature).....	13
บทที่4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	21
4.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง .....	21
4.2 การหาค่าการส่งผ่านรังสีของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่.....	22
4.3 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวของชั้นกระจกและมู่ลี่ .....	27
4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว.....	29
4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน .....	31
4.3.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก .....	31
4.3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก .....	32
4.3.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ .....	34
4.3.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร .....	34



4.3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร .....	35
4.3.3 การหาสภาพนำความร้อนของชั้นกระจกและชั้นมู่ลี่ .....	35
4.3.4 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นกระจก .....	38
4.3.5 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ผิว .....	39
4.3.6 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ .....	40
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม .....	43
4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก .....	44
4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก .....	44
4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ .....	44
4.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร .....	45
บทที่ 5 การทดลอง .....	46
ก. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	46
5.1. ห้องทดลอง .....	46
5.2 อุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการทดลอง .....	47
5.2.1 อุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer) .....	47
5.2.2 เครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) .....	49
5.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ .....	50
5.2.4 เครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน .....	50
5.2.4.1 หัววัดอุณหภูมิอากาศ .....	50
5.2.4.2 หัววัดอุณหภูมิผิว .....	52
5.2.4.3 หัววัดความชื้นของอากาศ .....	52
5.2.4.4 หัววัดความเร็วของอากาศ .....	53
5.2.4.5 หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ .....	54

5.3	วิธีการทดลอง .....	56
ข.	การทดลองเพื่อปรับปรุงข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	58
	การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจาก ห้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบบน พื้นที่แนวตั้ง บริเวณแดดฟ้าของตึกโคลัมโบ .....	58
	การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจาก ห้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบ ระบบหน้าต่างกระจกติดมุขี่ของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาค วิศวกรรมเครื่องกล .....	63
บทที่ 6	ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ .....	69
6.1	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง .....	69
6.1.1	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมุขี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มุขี่ทำมุมบิด 0 องศา .....	71
6.1.2	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมุขี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มุขี่ทำมุมบิด 45 องศา .....	73
6.1.3	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมุขี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มุขี่ทำมุมบิด -45 องศา .....	74
6.2	เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น กับค่าที่ได้จากการ ทดลอง .....	78
6.2.1	กรณีใบมุขี่ทำมุมบิด 0 องศา .....	79
6.2.2	กรณีใบมุขี่ทำมุมบิด 45 องศา .....	94
6.2.3	กรณีใบมุขี่ทำมุมบิด -45 องศา .....	110

6.3 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง.....	127
บทที่7 Parametric study.....	130
7.1 ชนิดของกระจกที่ใช้ .....	131
7.2 ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ (Slat reflectance) .....	141
7.3 สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่าง กระจกติดมู่ลี่ .....	149
บทที่8 สรุปผลงานวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	159
8.1 สรุปผลงานวิจัย.....	159
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ .....	162
รายการอ้างอิง .....	164
ภาคผนวก ก.....	169
ภาคผนวก ข.....	178
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	196

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สภาวะสิ่งแวดล้อมของอาคารชนิดต่าง ๆ .....	7
ตารางที่ 2.2	ช่วงของค่า PPD และ PMV ของสภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ .....	8
ตารางที่ 4.1	MoWITT constant [9]. .....	32
ตารางที่ 4.2	ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติ ของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ [23] .....	33
ตารางที่ 6.1	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา.....	72
ตารางที่ 6.2	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา.....	73
ตารางที่ 6.3	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบ มู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา .....	75
ตารางที่ 7.1	ค่าคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกที่ใช้ในการศึกษา .....	131
ตารางที่ 7.2	ค่าคุณสมบัติของมู่ลี่ที่ใช้ในการศึกษา .....	132

## สารบัญญภาพ

รูปที่ 3.1	นิยามของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย [23].....	13
รูปที่ 3.2	ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวตั้ง [23].....	14
รูปที่ 3.3	ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน [23].....	15
รูปที่ 3.4	ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำนั่ง [23].....	19
รูปที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองมู่ลี่ชนิดใบโค้ง และนิยามมุมบิดของใบมู่ลี่ [23].....	21
รูปที่ 4.2	ระบบหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน.....	22
รูปที่ 4.3	ทิศทางของรังสีที่ส่งผ่านมู่ลี่ [23] .....	23
รูปที่ 4.4	นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ bi-directional properties [23] .....	24
รูปที่ 4.5	นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ directional-hemispherical properties [23].....	24
รูปที่ 4.6	นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth [23].....	27
รูปที่ 4.7	ตำแหน่งจุดต่อ 3 จุด และการกระจายตัวของอุณหภูมิของชั้นกระจกและมู่ลี่ [23].....	28
รูปที่ 4.8	โครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของกรณีตัวอย่างของกระจก 2 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน [23].....	30
รูปที่ 4.9	โครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการพาความร้อนของกรณีตัวอย่างของกระจก 1 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน.....	34
รูปที่ 4.10	นิยามปริมาตรควบคุมของหน่วยย่อยของชั้นมู่ลี่ที่พิจารณา .....	37
รูปที่ 4.11	โครงข่ายความต้านทานความร้อนรวม กรณีตัวอย่างของกระจก 2 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน.....	38
รูปที่ 5.1	รายละเอียดต่างๆของห้องทดลอง [23].....	46
รูปที่ 5.2	การติดตั้ง pyranometer ภายนอกห้อง.....	48
รูปที่ 5.3	การติดตั้ง pyranometer พร้อมแหวนบังเงา .....	48
รูปที่ 5.4	การติดตั้ง pyranometer ภายในห้องทดลอง .....	49
รูปที่ 5.5	แสดงเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) [23].....	49

รูปที่ 5.6	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ [23].....	50
รูปที่ 5.7	หัววัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลอง [23].....	51
รูปที่ 5.8	เครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบมือถือ [23].....	51
รูปที่ 5.9	หัววัดอุณหภูมิผิว [23] .....	52
รูปที่ 5.10	หัววัดความชื้นของอากาศ [23].....	53
รูปที่ 5.11	หัววัดความเร็วของอากาศ [23].....	53
รูปที่ 5.12	หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ [23] .....	54
รูปที่ 5.13	ตำแหน่งต่างๆของหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟในการจำลองสภาพของมนุษย์ ในตำแหน่งต่างๆ [23].....	54
รูปที่ 5.14	ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดในห้องทดลอง .....	55
รูปที่ 5.15	ตำแหน่งการติดตั้งการวัดอุณหภูมิผิวของผนังภายใน [23] .....	55
รูปที่ 5.16	แสดงมุม solar profile ( $\phi_s$ ) และใบมู่ลี่ที่มุมบิด 0, 45 และ -45 องศา ตามลำดับ .....	56
รูปที่ 5.17	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า และพื้นดินบริเวณคาดฟ้าของตึกโคลัมโบ.....	58
รูปที่ 5.18	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 18 พฤษภาคม 2558 .....	61
รูปที่ 5.19	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 19 พฤษภาคม 2558.....	61
รูปที่ 5.20	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 21 พฤษภาคม 2558.....	62
รูปที่ 5.21	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและการจัดเตรียมพื้นที่บริเวณระเบียงของห้องทดลอง .....	64
รูปที่ 5.22	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 .....	64
รูปที่ 5.23	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 28 พฤษภาคม 2558 .....	65
รูปที่ 5.24	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 29 พฤษภาคม 2558.....	65
รูปที่ 5.25	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 4 มิถุนายน 2558 .....	66
รูปที่ 5.26	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 5 มิถุนายน 2558 .....	66
รูปที่ 5.27	ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 9 มิถุนายน 2558 .....	67

รูปที่ 6.1	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของ วันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	79
รูปที่ 6.2	เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	80
รูปที่ 6.3	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	80
รูปที่ 6.4	เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและ ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	81
รูปที่ 6.5	เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	81
รูปที่ 6.6	เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD)ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	82
รูปที่ 6.7	เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	83
รูปที่ 6.8	เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา.....	84

รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 84

รูปที่ 6.10 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 85

รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 85

รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 86

รูปที่ 6.13 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 87

รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 88

รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 88

รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา..... 89



- รูปที่ 6.17 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา..... 89
- รูปที่ 6.18 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา..... 90
- รูปที่ 6.19 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา..... 94
- รูปที่ 6.20 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา..... 95
- รูปที่ 6.21 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ..... 95
- รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา..... 96
- รูปที่ 6.23 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา..... 96
- รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา..... 97

รูปที่ 6.25 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 98

รูปที่ 6.26 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 99

รูปที่ 6.27 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้ กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 99

รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและ ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 100

รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 100

รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่(Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 101

รูปที่ 6.31 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 103

รูปที่ 6.32 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 103

รูปที่ 6.33 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 104

รูปที่ 6.34 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและ ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ..... 104

รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 105

รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ (Total PPD) เข้ามาภายในห้องของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา..... 105

รูปที่ 6.37 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 110

รูปที่ 6.38 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 111

รูปที่ 6.39 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 111

รูปที่ 6.40 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและ..... 112

- รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 112
- รูปที่ 6.42 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา..... 113
- รูปที่ 6.43 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 115
- รูปที่ 6.44 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 115
- รูปที่ 6.45 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้ กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา..... 116
- รูปที่ 6.46 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา..... 116
- รูปที่ 6.47 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำ มุมบิด -45 องศา..... 117
- รูปที่ 6.48 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและ ใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา..... 117

- รูปที่ 6.49 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 119
- รูปที่ 6.50 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 120
- รูปที่ 6.51 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้ กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา..... 120
- รูปที่ 6.52 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 121
- รูปที่ 6.53 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและ ใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 121
- รูปที่ 6.54 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบ หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้ กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ..... 122
- รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำ มุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 133
- รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุม บิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 133

- รูปที่ 7.3 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 134
- รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้นและใบมู่ลี่ทำ มุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 136
- รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 136
- รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 137
- รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 138
- รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 139

- รูปที่ 7.9 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 139
- รูปที่ 7.10 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 142
- รูปที่ 7.11 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 143
- รูปที่ 7.12 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 143
- รูปที่ 7.13 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 145
- รูปที่ 7.14 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 145

- รูปที่ 7.15 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 146
- รูปที่ 7.16 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 147
- รูปที่ 7.17 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 148
- รูปที่ 7.18 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 148
- รูปที่ 7.19 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตักกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 150
- รูปที่ 7.20 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตักกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30 45 และ 60 องศา..... 151



- รูปที่ 7.21 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 151
- รูปที่ 7.22 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 153
- รูปที่ 7.23 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 153
- รูปที่ 7.24 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 154
- รูปที่ 7.25 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด - 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา..... 155

- รูปที่ 7.26 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 156
- รูปที่ 7.27 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา ..... 156



## รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

$a_p$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน
$A_i^{fH}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของแต่ละชั้นที่เป็น directional hemisphere
$A_{i,r}^{fH}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้จากการสะท้อนจากพื้นดินของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere
$A_{i,M}^f$	คือ	directional front absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น
$A_{i,M}^b$	คือ	directional back absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น
$A_i^f$	คือ	directional front absorptance matrix ของ layer i
$A_i^b$	คือ	directional back absorptance matrix ของ layer i
$A_i^{dif,sky}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าของแต่ละชั้น
$A_i^{dif,grd}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินของแต่ละชั้น
$b$	คือ	ระยะห่างระหว่างผิวกระจกกับกึ่งกลางของชั้นมู่ลี่, (m)
$B_n$	คือ	ค่า Radiosity ของพื้นผิวที่ n, ( $W/m^2$ )
$c_t$	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน, ( $W/(m^2 \cdot K^{4/3})$ )
$C_p$	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, (J/(kg-K))
$f_p$	คือ	ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาพฉายผิวคนต่อพื้นที่รับแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์
$f_{cl}$	คือ	อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด
$F_{p-n}$	คือ	ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวที่ n
$F_{p-win}$	คือ	ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวของหน้าต่างกระจก
$g$	คือ	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, ( $m/s^2$ )
$Gr$	คือ	Grashof number
$H$	คือ	ค่าความสูงของหน้าต่างกระจก, (m)
$h$	คือ	ความกว้างของชั้นมู่ลี่, (m)
$h_c$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและเสื้อผ้า, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_c$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในอาคาร, ( $W/m^2 \cdot K$ )

$h_{cg}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศ และโอเพอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์, ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$h_{c,gap}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_{c,gapb}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_{c,across,i}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_{c,in}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_{c,out}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก, ( $W/m^2 \cdot K$ )
$h_{r,j-k}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิว $j$ และ $k$ (โดยทั่วไป $j = k-1$ ) ถ้าผิว $k$ เป็นผิวด้านนอกสุดของระบบกระจก ผิว $j$ จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอก ถ้าผิว $j$ เป็นผิวด้านในสุดของระบบกระจก ผิว $k$ จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายในห้อง
$I_{cl}$	คือ	ค่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า, ( $(m^2 \cdot K)/W$ )
$I_{dif,sky}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
$I_{dif,grn}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
$I_{dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
$I_{dir,r}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้จากการสะท้อนจากพื้นดินที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
$I_{dir,nor}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์, ( $W/m^2$ )
$I_{glo,hor}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ, ( $W/m^2$ )
$I_{glo,ver}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้ง, ( $W/m^2$ )
$I_{tr,dir-dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวผนังคนโดยไม่มีกำบังมู่ลี่, ( $W/m^2$ )
$I_{tr,dir-dif}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบถูกมู่ลี่และสะท้อนเข้ามากระทบผิวผนังคน, ( $W/m^2$ )
$I_{tr,dif-dif}$	คือ	ค่ารังสีแบบกระจายที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามากระทบผิวผนังคน, ( $W/m^2$ )
$I_{ref,tr,dir-dif}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นดินและสะท้อนกลับมาส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบถูกมู่ลี่และสะท้อนเข้ามากระทบผิวผนัง

		คน, ( $W/m^2$ )
$I_{ref, tr, dir-dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นดินและสะท้อนกลับมาส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวผนังคนโดยไม่มีการสัมผัสกับโมลิ่ง, ( $W/m^2$ )
$k_{air}$	คือ	ค่า thermal conductivity ของก๊าซระหว่างชั้นกระจก, ( $W /m \cdot K$ ) หรือ สภาพนำความร้อนของอากาศ, ( $W /m \cdot K$ )
$k_b$	คือ	สภาพนำความร้อนของโมลิ่ง, ( $W/m \cdot K$ )
$k_{eff}$	คือ	สภาพนำความร้อนประสิทธิผลของชั้นโมลิ่ง, ( $W/m \cdot K$ )
$L_p$	คือ	ความหนาของชั้นโมลิ่ง, (m)
$L_s$	คือ	ความยาวของโมลิ่งตามแนวโค้ง, (m)
$M$	คือ	อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม, ( $W/m^2$ )
$Nu$	คือ	Nusselt number
$P_a$	คือ	ความดันย่อยของไอน้ำ, (kPa)
$P_{sat@T_a}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ, (kPa)
$Pr$	คือ	Prandtl number
$Q_i$	คือ	net heat flux, ( $W/m^2$ )
$Q_{across,i}$	คือ	ค่า heat flux ที่ถูกส่งผ่านจากชั้น $i$ ข้ามชั้นโมลิ่งที่เป็นชั้น diathermanous layer สู่จุด $i+2$ .
$Q_{abs,i}$	คือ	ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่ $i$ , ( $W/m^2$ ) โดยที่ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้น
$Ra$	คือ	Rayleigh number
$Ra_H$	คือ	Rayleigh number ที่มีค่าขึ้นกับความสูงของหน้าต่างกระจก
$R_i$	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ $i$ กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน ( $m^2 \cdot K/W$ )
$R_c$	คือ	รัศมีความโค้งของโมลิ่ง, (m)
$R_i^f$	คือ	bi-directional front reflectance matrix ของ layer $i$
$R_i^b$	คือ	bi-directional back reflectance matrix ของ layer $i$
$R^{H}$	คือ	directional-hemispherical front reflectance

$R_{M,\{1,M\}}^f$	คือ	bi-directional front reflectance matrix ของระบบ M ชั้น
$R_{M,\{1,M\}}^b$	คือ	bi-directional back reflectance matrix ของระบบ M ชั้น
$RH$	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง, (%)
$s$	คือ	ค่าความกว้างของใบมู่ลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ, (m)
$T_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศภายใน, (°C)
$T_{cl}$	คือ	อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่, (°C)
$T_g(\theta)$	คือ	ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกชั้นกับมุมตกกระทบ
$T_{smrt}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature), (°C)
$T_o$	คือ	ค่าอุณหภูมิโอเพอร์เรทีฟ, (°C)
$T_{tmrt}$	คือ	ค่า Unirradiant mean Radiant Temperature, (°C)
$T^H$	คือ	directional-hemispherical front transmittance
$T_i$	คือ	อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของระบบกระจกที่ชั้นที่ $i$ , (°C)
$T_i^f$	คือ	bi-directional front transmittance matrix ของ layer $i$
$T_i^b$	คือ	bi-directional back transmittance matrix ของ layer $i$
$T_k$	คือ	ค่าอุณหภูมิตัวใหม่ของชั้นกระจกที่ $k$
$T_k^0$	คือ	ค่าอุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นกระจกที่ $k$
$\delta T_k$	คือ	ค่าผลต่างอุณหภูมิรวม
$T_{M,\{1,M\}}^f$	คือ	bi-directional front transmittance matrix ของระบบ M ชั้น
$T_{M,\{1,M\}}^b$	คือ	bi-directional back transmittance matrix ของระบบ M ชั้น
$T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of direct to diffuse solar radiation.
$T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of diffuse solar radiation from the sky.
$T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of diffuse solar radiation reflected from the ground.
$T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of direct reflecte

ground to diffuse solar radiation.

$T_{sj}$	คือ	ค่าอุณหภูมิของผิว j
$T_{sk}$	คือ	ค่าอุณหภูมิของผิว k
$T_{mf}$	คือ	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์ม, (K)
$T_{b,n}$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน, (K)
$t_s$	คือ	ความหนาของใบมู่ลี่, (m)
$u^T$	คือ	auxiliary row vector
$v$	คือ	ค่าความเร็วของกระแสลมอิสระที่ความสูง 10 เมตร, (m/s)
$v_a$	คือ	ค่าความเร็วของอากาศภายใน, (m/s)
$w$	คือ	ความกว้างของช่องกระจก, (mm)
$W$	คือ	งานภายนอก มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับกิจกรรมโดยส่วนใหญ่, (W/m <sup>2</sup> )
$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$	คือ	ค่า front direct-to-direct transmittance ของมู่ลี่ใบโค้งที่คิดผลของความหนาของใบมู่ลี่
$\tau_{bl-ct,dir,dir,r}^f$	คือ	ค่า front direct reflected ground-to-direct transmittance ของมู่ลี่ใบโค้งที่คิดผลของความหนาของใบมู่ลี่
$\epsilon_p$	คือ	ค่าการเปล่งรังสีของโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.97)
$\Lambda$	คือ	propagation matrix
$\Delta\Omega$	คือ	มุม solid angle
$\sum J_{sk}^j$	คือ	ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว j (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว k
$\sum J_{sj}^k$	คือ	ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว k (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว j
$\beta$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ, (1/K)
$\rho$	คือ	ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	คือ	ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน
$\mu$	คือ	ค่าความหนืดของก๊าซ, (kg/m-s)
$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann, (W/(m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> ))
$\gamma$	คือ	มุมเอียงของหน้าต่างกระจก, (°)
$\omega$	คือ	ค่าความพรุนของชั้นมู่ลี่

$\theta_i$	คือ	มุม incident ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา, ( $^{\circ}$ )
$\phi_b$	คือ	มุมบิดของใบมู่ลี่, ( $^{\circ}$ )
$\phi_{cr}$	คือ	ค่ามุมวิกฤติ, (rad)
$\varphi_s$	คือ	ค่า openness factor





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน อาคารสำนักงานขนาดใหญ่ และอาคารพาณิชย์ทั่วไป มักติดตั้งหน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคาร เพื่อให้ผู้อยู่อาศัยสามารถเห็นทิวทัศน์ได้อย่างชัดเจนและยังเพิ่มความสวยงามให้กับอาคาร แต่นอกจากผลดีในแง่ของความสวยงามแล้ว การใช้หน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคารยังส่งผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานภายในอาคาร โดยเฉพาะในส่วนของระบบปรับอากาศ เนื่องจากหน้าต่างกระจกเป็นส่วนที่รับทั้งแสงสว่างและความร้อนเข้าสู่ภายในตัวอาคาร จึงกลายเป็นภาระการทำความเย็นซึ่งต้องถูกกำจัดออกไปเพื่อรักษาภาวะอากาศภายในอาคารให้มีความสุขสบายต่อผู้อยู่อาศัย ในการออกแบบอาคารที่ใช้หน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคารเพื่อให้มีการอนุรักษ์พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีสภาวะภายในอาคารที่มีความสบายเชิงความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กระจกที่มีการติดตั้งฟิล์มกรองแสง การใช้กระจก 2 ชั้นเพื่อลดปริมาณแสงที่ส่งผ่านตัวกระจกเข้าสู่อาคาร เป็นต้น แต่วิธีหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยม คือ การติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดต่าง ๆ ไว้ด้านหลังหน้าต่างกระจก ซึ่งชนิดที่นิยมใช้ในอาคารทั่วไป คือ มู่ลี่ โดยมู่ลีนั้นสามารถลดการส่งผ่านของแสงผ่านกรอบอาคารเข้ามาภายในได้ แต่ในขณะเดียวกันก็มิให้อุณหภูมิผิวของมู่ลี่มีค่าสูงขึ้นและแผ่รังสีความร้อนเข้ามาภายในได้เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความไม่สบายเชิงความร้อนต่อผู้อยู่อาศัยที่อยู่บริเวณใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ ทำให้อาจมีการเร่งหรือลดอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศเพื่อให้เกิดความสบายเชิงความร้อน ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงการเลือกชนิดของหน้าต่างกระจก การใช้อุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ทั้งในด้านของประโยชน์และผลกระทบที่เกิดจากการใช้ จะทำให้สามารถลดภาระการทำความเย็น และยังคงความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ให้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับของจริงมากยิ่งขึ้น และเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นกับผลการทดลอง

1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) ของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) ของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ กระทำต่อเนื่องมาจากการงานในระดับปริญญาตรี ซึ่งศึกษาเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ พบว่าการจำลองชั้นมู่ลี่เป็น Effective layer ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ยังมีความแตกต่างจากมู่ลี่ในของจริงค่อนข้างมาก เนื่องจากจำลองให้ชั้นมู่ลี่เป็นเสมือนกระจกอีกชั้นหนึ่งซึ่งอากาศไม่สามารถไหลผ่านได้ แตกต่างกับมู่ลี่ของจริงที่มีอากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ได้ ส่งผลให้ค่าความสบายเชิงความร้อนที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ยังมีค่าไม่แม่นยำเท่าที่ควร งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองระบบกระจกหน้าต่างที่มีการติดตั้งมู่ลี่ให้มีความใกล้เคียงกับระบบของจริงมากยิ่งขึ้น โดยจะตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองจากผลการทดลอง

### 1.4 แนวทางการวิจัย

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ของระบบกระจกหน้าต่างที่มีการติดตั้งมู่ลี่ พบว่ามีรูปแบบของการจำลองที่แตกต่างกันอย่างหลากหลาย ส่งผลให้ผลการทำนายที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ กันมีความแตกต่างกันไม่มากนักน้อย ซึ่งจากการศึกษานี้สามารถสังเกตเห็นได้ว่า ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ซึ่งจำลองชั้นมู่ลี่เป็นเสมือนกระจกอีกชั้นหนึ่ง (Effective layer) ที่อากาศไม่สามารถไหลผ่านได้น่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ผลการทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนที่ได้จากแบบจำลองนี้แตกต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่คิดผลการไหลผ่านของอากาศระหว่างใบมู่ลี่ ซึ่งการจำลองมู่ลี่เป็นเสมือนกระจกนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างชั้นกระจกและชั้นมู่ลี่จึงเทียบได้กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก และสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่เป็นเสมือนค่าคงที่ค่าหนึ่งเนื่องจากจำลองให้ชั้นมู่ลี่เป็นเหมือนชั้นกระจก จึงเป็นสภาพนำความร้อนของวัสดุชนิดเดียว และจากลักษณะการจำลองชั้นมู่ลี่แบบนี้มีลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างจากมู่ลี่ของจริงมาก ผลลัพธ์จากการทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่จึงยังไม่แม่นยำเท่าที่ควร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนได้แม่นยำและใกล้เคียงกับของจริงมากยิ่งขึ้น โดยจะปรับปรุงในส่วนจากรูปแบบการจำลองของชั้นมู่ลี่ให้มีการไหลผ่านของอากาศได้เพื่อให้ใกล้เคียงกับใบมู่ลี่ของจริงที่มีอากาศไหลผ่านระหว่างใบได้ ส่งผลให้การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างชั้นกระจกและชั้นมู่ลี่เปลี่ยนแปลงไปด้วย และสภาพ

ความร้อนของชั้นมู่ลี่จึงไม่ใช่ค่าคงที่ของวัสดุเดียวแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงมุมบิดของใบมู่ลี่ที่ส่งผลต่อการเปิดปิดของช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ และปรับปรุงในส่วนอื่นๆในแบบจำลองที่ยังบกพร่องจากที่ได้ทำการศึกษามา

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้และความเข้าใจในเรื่องความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) มากยิ่งขึ้น โดยเน้นในส่วนของผลกระทบที่มาจากระบบกระจกหน้าต่างที่มีการติดตั้งมู่ลี่

1.5.2 สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) ของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ให้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับระบบของจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานต่อในภายภาคหน้า

1.5.3 มีความรู้ในเรื่องพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ที่ส่งผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ และสามารถนำความรู้เหล่านี้ไปเลือกใช้ชนิดของกระจกและมู่ลี่ได้อย่างเหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิผลทั้งในแง่ของการลดภาระการทำความเย็น และยังคงความสบายเชิงความร้อนแก่ผู้อยู่อาศัย

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ และการคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

##### 2.1.1 งานวิจัยของ Yahoda, D.S. และ Wright, J.L. [1]

ในปี พ.ศ. 2547 Yahoda และ Wright ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่ในช่วงของการแผ่รังสีคลื่นยาว โดยได้ใช้แบบจำลองหีบปิด (enclosed model) เพื่อคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างกันของพื้นผิวต่างๆ และจากแบบจำลองนี้ทำให้สามารถพิจารณาว่ามู่ลี่นั้นเป็นชั้นเสมือน (effective layer) ที่มีค่าคุณสมบัติในช่วงของการแผ่รังสีคลื่นยาวคงที่ตลอดพื้นผิว

##### 2.1.2 งานวิจัยของ Oosthuizen, P.H., Sun, L., Harrison, S.J., Naylor, D.b, Collins, M. [2]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ให้กับหน้าต่างกระจก โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะเกี่ยวข้องกับการพาความร้อนโดยธรรมชาติและการแผ่รังสีจากหน้าต่างกระจกเข้ามาสู่ภายในห้อง โดยศึกษาอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ 3 ชนิด คือ Venetian blind Vertical blind และ Plane blinds โดยเริ่มแรกศึกษาถึงผลของการพาความร้อนโดยธรรมชาติจากผิวของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ทั้งสามแบบโดยไม่คิดถึงผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ต่อมาจึงมีการศึกษาและทดลองเพิ่มเติมเฉพาะมู่ลี่ชนิด Venetian blind โดยคำนึงถึงผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผลให้มีการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ที่ตัวมู่ลี่ส่งผลให้เกิดเป็นความร้อนขึ้น

##### 2.1.3 งานวิจัยของ EnergyPlus [3]

ในปี พ.ศ. 2548 โปรแกรม EnergyPlus ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเป็นการรวมโปรแกรมทางด้านพลังงานที่นิยมใช้ในอดีต 2 โปรแกรมคือ DOE และ BLAST โดยเป็นการรวมลักษณะเด่น ๆ เข้าไว้ด้วยกัน [4] และเพิ่มเติมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่เข้ามาด้วย [5, 6] โดยหลักการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่ทำได้โดยใช้การวิเคราะห์แบบหีบปิดเพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังคงได้พิจารณาถึงผลของความหนาของใบมู่ลี่ และตัวปรับแก้เพื่อคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

#### 2.1.4 งานวิจัยของ A. Laouadi, Ph.D [7]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อหาวิธีคำนวณค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ โดยคำนึงถึง Energy generation และ conversion โดยใช้รูปแบบการจำลองของชั้นมู่ลี่เป็นชั้นที่มีรูพรุน และคำนึงถึงผลของรูพรุนที่มีต่อการนำความร้อนและการพาความร้อนภายในชั้นนี้ จากนั้นนำไปใช้หาค่า U-factor และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการวัดจริงจากการทดลองของ Huang (2005) พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันดี ซึ่งแต่เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยทั่วไปจะจำลองชั้นของมู่ลี่เป็นชั้นที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ เช่น ในแบบจำลองของ window (LBNL,2008) และ WIS (WinDat,2008) แต่หลายงานวิจัยพบว่าแบบจำลองที่มีการจำลองชั้นมู่ลี่เป็นลักษณะอุณหภูมิสม่ำเสมอเหล่านี้ยังไม่แม่นยำ รวมทั้งยังไม่คำนึงถึงผลของ Energy generation และ conversion

#### 2.1.5 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และศุภกิจ วรศิลป์ชัย [8]

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ใบโค้งที่คิดผลของความหนาของใบมู่ลี่ ในการใช้ตรวจสอบค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ โดยได้จำลองชั้นของมู่ลี่เป็นชั้นเสมือน (effective layer) ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิง optic ของชั้นเสมือนนี้ ขึ้นอยู่กับมุมบิดของใบมู่ลี่ คุณสมบัติเชิง optic ของใบมู่ลี่ และมุม solar profile ผลลัพธ์ที่ได้ออกมาอยู่ในรูปสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่เข้าไปภายในห้องได้กับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ ซึ่งพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองค่อนข้างมีความแม่นยำ

#### 2.1.6 งานวิจัยของ Yazdanian and Klems [9]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก (แบบจำลอง MoWITT) ขึ้นอยู่กับทิศทางของอาคาร และความเร็วลมภายนอกเป็นหลัก ซึ่งกระทำที่อาคารที่มีความสูงไม่มากภายใต้เงื่อนไขเสมือนจริง โดยแบบจำลอง MoWITT นี้มีวิธีในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก ที่แตกต่างกับวิธีการของ ASHRAE ซึ่งวิธีการของ ASHRAE นั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับอาคารที่มีความสูงไม่มาก เพราะมีการจำลองค่าความเร็วลมที่มากเกินไปซึ่งเป็นค่าสำหรับการใช้งานที่อาคารสูง ดังนั้นหากต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกมาใช้งานกับอาคารที่อยู่อาศัยทั่วไปที่มีความสูงไม่มาก แบบจำลอง MoWITT จึงมีความเหมาะสมและค่อนข้างน่าเชื่อถือมากกว่าในการนำมาใช้งาน

### 2.1.7 งานวิจัยของ Wright, J.L [10]

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโครงข่ายความต้านทานในส่วนของการพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกที่มีมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน โดยพิจารณาการไหลของอากาศผ่านชั้น diathermanous และพบว่าหากติดตั้งมู่ลี่ห่างจาก boundary layer ของหน้าต่างกระจกมากเพียงพอ ผลของพื้นผิวของชั้นกระจกกับชั้นมู่ลี่จะไม่กระทบซึ่งกันและกัน ทำให้สามารถพิจารณาตัวต้านทานบางตัวมีค่าเป็นศูนย์ และใช้สมการอย่างง่ายในการคำนวณได้

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความสบายเชิงความร้อน

### 2.2.1 งานวิจัยของ Fanger [11]

ในปี พ.ศ. 2513 Fanger ได้ศึกษาถึงสภาวะความสบายเชิงความร้อนของคนที่อยู่ภายในห้องที่มีการปรับสภาวะอากาศ โดยได้ใช้หลักสมดุลทางความร้อนกับร่างกายของคน และพบว่าสภาวะความสบายเชิงความร้อนของคนนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ 6 ปัจจัยด้วยกันคือค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้น ค่าความเร็วลมของอากาศ ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า กิจกรรมที่ทำ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, MRT) ของผนัง จากนั้น Fanger จึงได้พัฒนาดัชนีเพื่อทำนายสภาวะความสบายของคนที่ยืนอยู่กับตัวแปร 6 ตัวเหล่านี้ โดยการโหวตจากอาสาสมัครและดัชนีนั้นคือค่า Predicted Mean Vote (PMV) และ Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) โดยที่ค่า PMV นั้นได้ถูกแบ่งออกเป็น 7 ระดับด้วยกัน คือ

+3	คือ	ร้อน	(Hot)
+2	คือ	อบอุ่น	(Warm)
+1	คือ	อุ่นเล็กน้อย	(Slightly warm)
0	คือ	ปกติ	(Neutral)
-1	คือ	เย็นเล็กน้อย	(Slightly cool)
-2	คือ	เย็น	(Cool)
-3	คือ	หนาว	(Cold)

และค่า PPD จะบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่ไม่สบายและมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์

### 2.2.2 งานวิจัยของ Olesen, B.W. [12]

ในปี พ.ศ. 2544 Olesen ได้ทำการวิจัยเพื่อแนะนำแนวทางในการเลือก และกำหนดเงื่อนไขสภาวะภายในอาคารให้เหมาะสมสำหรับอาคารที่มีรูปแบบต่าง ๆ กัน โดยชนิดของอาคารที่พิจารณาได้แก่ อาคารสำนักงาน ภัตตาคาร และห้างสรรพสินค้า และได้แบ่งรูปแบบของสภาวะแวดล้อมออกเป็น 3 แบบด้วยกัน โดยได้กำหนดค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า และการทำกิจกรรมดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 สภาวะสิ่งแวดล้อมของอาคารชนิดต่าง ๆ

ชนิดอาคาร	ลักษณะเสื้อผ้า (Clo)		ลักษณะกิจกรรม(Met)	รูปแบบ	อุณหภูมิ (°C)	
	ฤดูร้อน	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน	ฤดูหนาว
สำนักงาน	0.5	1.0	1.2	A	24.5±0.5	22.0±1.0
				B	24.5±1.5	22.0±2.0
				C	24.5±2.5	22.0±3.0
ร้านอาหาร	0.5	1.0	1.4	A	23.5±1.0	20.0±1.0
				B	23.5±2.0	20.0±2.5
				C	23.5±2.5	20.0±3.5
ห้างสรรพสินค้า	0.5	1.0	1.6	A	23.0±1.0	19.0±1.5
				B	23.0±2.0	19.0±3.0
				C	23.0±3.0	19.0±4.0

ตารางที่ 2.2 ช่วงของค่า PPD และ PMV ของสภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ

รูปแบบ	PPD (%)	PMV
A	< 6	-0.2<PMV<+0.2
B	<10	-0.5<PMV<+0.5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7

### 2.2.3 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [13-15]

ในปี พ.ศ. 2545 - 2548 สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของกระจก และกระจกติดฟิล์มในแง่ของสบายเชิงความร้อน โดยพิจารณาภายใต้ข้อมูลภูมิอากาศ ออกแบบมาตรฐานจากข้อมูลภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร เพื่อใช้ในการกำหนดค่าสมรรถนะของกระจกตัวเปล่า และกระจกติดฟิล์ม โดยจากการศึกษาพบว่าสาเหตุที่จะก่อให้เกิดความไม่สบายเชิงความร้อนจะมี 2 ส่วนด้วยกันคือ สาเหตุเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มากกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง ซึ่งจะถือว่าเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้น (shortwave radiation) และสาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิของผิวกระจกที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนแสงอาทิตย์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลมาจากการแผ่รังสีคลื่นยาว (longwave radiation) ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาดัชนีความสบายเชิงความร้อนขึ้นมา 2 ตัวเพื่อที่จะครอบคลุมถึงอิทธิพลทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวซึ่งประกอบไปด้วย Predicted Percentage of Dissatisfied ที่มีผลจากรังสีแสงอาทิตย์ และค่า Predicted Percentage of Dissatisfied ที่มีผลมาจากอุณหภูมิผิวกระจก

### 2.2.4 งานวิจัยของ Gennusa, M.L., และคณะ [16]

งานวิจัยนี้ใช้หลักการและความรู้พื้นฐานทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยสำหรับกรณีที่อยู่อาศัยอยู่ในสถานที่ที่มีขอบเขตจำกัดและได้รับรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบทั้งรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และนำมาสร้างเป็นสมการใหม่เพื่อใช้คำนวณเป็นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ซึ่งแยกพจน์ของผลกระทบจากรังสีแบบตรงและผลกระทบจากรังสีแบบกระจายออกจากกัน รวมทั้งยังคำนึงถึงปริมาณความมกน้อยของรังสีแสงอาทิตย์อันเป็นผลมาจากช่วงเวลาและการบังเงา โดยสร้างขึ้นเป็นสัมประสิทธิ์เพื่อคุณปรับบางพจน์ของสมการให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น



### 2.2.5 งานวิจัยของ Hien, W.N. และคณะ [17]

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลจากการใช้กระจกสองชั้นที่มีระบบระบายอากาศต่อการใช้พลังงานของอาคาร ความสบายเชิงความร้อนและการกลั่นตัวของหยดน้ำจากความชื้นในอากาศ โดยเปรียบเทียบกับการใช้กระจกชั้นเดียว Software ที่นำมาใช้จำลองระบบได้แก่ TAS และ CFD ผลที่ได้จากการจำลองพบว่า การใช้กระจกสองชั้นที่มีการระบายอากาศแบบธรรมชาติสามารถลดปริมาณการใช้พลังงานของอาคาร รวมทั้งยังส่งผลให้ความสบายเชิงความร้อนเพิ่มมากขึ้น และหากใช้พัดลมช่วยในการระบายอากาศจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องการกลั่นตัวของไอน้ำจากปริมาณความชื้นที่สูงได้

### 2.2.6 งานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และศุภกิจ วรศิลป์ชัย [18]

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ใบโค้ง ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิง optic ของรังสีคลื่นยาว เพื่อนำไปใช้คำนวณค่าอุณหภูมิผิวของชั้นมู่ลี่ ซึ่งถูกจำลองเป็นชั้นเสมือน (effective layer) ได้จากหลักสมดุลพลังงาน โดยค่าอุณหภูมิผิวของชั้นมู่ลี่นี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน นอกจากนี้ ยังมีการตรวจสอบความแม่นยำของค่าอุณหภูมิผิวของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด พบว่าค่าที่ได้มีความสอดคล้องกัน

### 2.2.7 งานวิจัยของ Anderson, T. และ Luther, M. [19]

งานวิจัยนี้ศึกษาระบบกระจกหลากหลายชนิดเพื่อปรับปรุงค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบหน้าต่างกระจกของอาคารสำนักงาน โดยใช้ software 2 ตัวในการจำลองระบบ คือ VISION (University of Waterloo 1992) และ Window-6 (Lawrence Berkeley National Laboratory 2011) นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก software โดยดัชนีที่ใช้ชี้วัดความสบายเชิงความร้อนใช้ 2 ค่า คือ Predicted Mean Vote (PMV) และ Predicted Percentage Of Dissatisfied (PPD) ผลการศึกษาพบว่า การควบคุมอุณหภูมิภายในห้องมีความสำคัญมากในการปรับปรุงให้ผู้อยู่อาศัยบริเวณใกล้หน้าต่างกระจกมีความสบายเชิงความร้อนมากยิ่งขึ้น รวมถึงการลดปริมาณการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาภายในห้องและการลดอุณหภูมิผิวภายในของหน้าต่างกระจกก็สำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งอาจทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาหรือใช้ระบบกระจกที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

### 2.2.8 งานวิจัยของ Buratti, C. และคณะ [20]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนและสมรรถนะเชิงพลังงานของห้องเรียนในสถานะไม่คงตัว โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองและการหาคำตอบโดยวิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้ software ของ EnergyPlus และ TRNSYS ในการจำลองสถานะที่ต้องการศึกษา และนำผลมาเปรียบเทียบเมื่อปรับเปลี่ยนชนิดของกระจกและตำแหน่งของหน้าต่างในทิศต่างๆ ที่รับรังสีแสงอาทิตย์มากน้อยต่างกัน ผลการศึกษาพบว่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างเข้ามาภายในอาคารส่งผลกระทบต่อความสบายเชิงความร้อน จากแบบจำลองพบว่ากระจกที่มีการควบคุมปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านได้จะทำให้มีความสบายเชิงความร้อนภายในอาคารมากกว่าและยังส่งผลให้การใช้พลังงานภายในอาคารลดลง

### 2.2.9 งานวิจัยของ Khamporn, N. และ Chaiyapinunt, S. [21]

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ที่มีลักษณะใบโค้งกับหน้าต่างกระจกของอาคารในเขตร้อน โดยพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่เป็นผลมาจากการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ต่อผู้อยู่อาศัยที่นั่งอยู่ใกล้ระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ มีการนำเอาหลักการ shading fraction ของอุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่มาใช้ และเลือกใช้ค่า Predicted Percentage Of Dissatisfied (PPD) มาเป็นดัชนีชี้วัดค่าความสบายเชิงความร้อน นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้ทำการทดลองโดยใช้มู่ลี่ที่มุมบิด 3 ค่า คือ 0, 45 และ -45 องศา และนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่าที่ได้สอดคล้องกันดี ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้ามาตกระบบกับตัวของผู้อยู่อาศัยโดยตรงมากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับ การปรับเปลี่ยนค่ามุมบิดของใบมู่ลี่เพื่อปรับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้ามาภายในห้อง

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีและสมการการหาค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort)

ความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) เป็นสภาวะที่ผู้อยู่อาศัยรู้สึกพอใจกับลักษณะทางความร้อนของสภาวะนั้น ความรู้สึกที่ใช้บอกว่ารู้สึกสบายและรู้สึกไม่สบายนั้นจะเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นของผิวหนังและอุณหภูมิในร่างกาย โดยทั่วไปแล้วความรู้สึกสบายจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิร่างกายถูกกำหนดไว้ให้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ และความชื้นที่ผิวหนังมีค่าต่ำ นอกจากนี้ความรู้สึกสบายนั้นยังเกี่ยวข้องกับระดับของการทำกิจกรรมและลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่รวมทั้งลักษณะและรูปแบบของสถานที่

ในปี พ.ศ. 2515 Fanger [11] ได้สร้างสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนของคนโดยใช้ตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร คือ ค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความเร็วลม ค่าความชื้น ค่า mean radiant temperature ค่าการผลิตพลังงานในร่างกาย และลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่ โดย Fanger กำหนดดัชนีที่ใช้บ่งบอกความสบายเชิงความร้อนขึ้นตัวหนึ่งเรียกว่า Predicted Mean Vote (PMV) ซึ่งได้จากผลการทดลองโดยให้คนกลุ่มใหญ่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะอากาศที่คนเหล่านี้อาศัยอยู่ต่าง ๆ กัน และให้ลงความเห็นถึงความพอใจในสภาวะนั้น ๆ ภายใต้กิจกรรมและการแต่งตัวต่าง ๆ กัน ซึ่ง Fanger ได้กำหนดระดับความพอใจอยู่ 7 ระดับโดยที่มีค่าตัวเลขจาก -3 ถึง +3 โดยมีความหมายเป็น -3 (หนาวมาก) ถึง +3 (ร้อนมาก) และ 0 หมายถึงลักษณะปานกลาง (รู้สึกพอดี) นอกจากค่า PMV แล้ว ยังได้กำหนดค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนขึ้นอีกหนึ่งค่าคือ ค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) ค่า PPD จะเป็นตัวกำหนดเปอร์เซ็นต์ของคนที่ไม่สบายเชิงความร้อน ซึ่งค่า PPD สามารถหามาจากค่า PMV ได้ และถึงแม้ว่าในกรณีที่ค่า PMV มีค่าเป็น 0 ซึ่งหมายถึงสภาวะที่ผู้อยู่อาศัยรู้สึกสบายเชิงความร้อน แต่ค่าของ PPD จะเป็น 5% ซึ่งจะแสดงว่ามีคนบางคน (ประมาณ 5%) จะรู้สึกไม่พอใจในสภาวะนี้ จึงเห็นได้ว่าค่า PPD ดูเหมือนจะให้ข้อมูลได้ละเอียดกว่าค่า PMV สมการสำหรับคำนวณหาค่า PMV และค่า PPD สามารถเขียนได้เป็น

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \cdot [M(1-\eta) - 3.05 \times 10^{-3} \cdot (5733 - 6.99 \cdot M(1-\eta) - P_a) - 0.42 \cdot (M(1-\eta) - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((T_{cl} + 273)^4 - (T_{smrt} + 273)^4) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)] \quad (3.1)$$

และ

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad (3.2)$$

เมื่อ	$M$	คือ	อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม, ( $W/m^2$ )
	$W$	คือ	งานภายนอก มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับกิจกรรมโดยส่วนใหญ่, ( $W/m^2$ )
	$P_a$	คือ	ความดันย่อยของไอน้ำ, (kPa)
	$f_{cl}$	คือ	อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด
	$T_{smrt}$	คือ	ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature), ( $^{\circ}C$ )
	$T_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศภายใน, ( $^{\circ}C$ )
	$T_{cl}$	คือ	อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่, ( $^{\circ}C$ )
	$h_c$	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและเสื้อผ้า, ( $W/m^2 K$ )

โดยที่ค่าความดันย่อยของไอน้ำ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ คือ

$$P_a = RH \cdot P_{sat@T_a} \quad (3.3)$$

โดย 
$$P_{sat@T_a} = e^{\left(\frac{18.4854 - \frac{51695248}{T_a + 27315}}{T_a + 27315}\right)} \quad (3.4)$$

เมื่อ	$P_{sat@T_a}$	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ, (kPa)
	$RH$	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง, (%)

สำหรับอุณหภูมิผิวเสื้อผ้าที่สวมใส่หาได้โดยใช้วิธีการคำนวณซ้ำ โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} [3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{smrt} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)] \quad (3.5)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จาก

$$h_c = 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad \text{เมื่อ} \quad 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{V_a}$$

$$= 12.1\sqrt{V_a} \quad \text{เมื่อ} \quad 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_a} \quad (3.6)$$

เมื่อ	$V_a$	คือ	ค่าความเร็วของอากาศภายใน, (m/s)
-------	-------	-----	---------------------------------

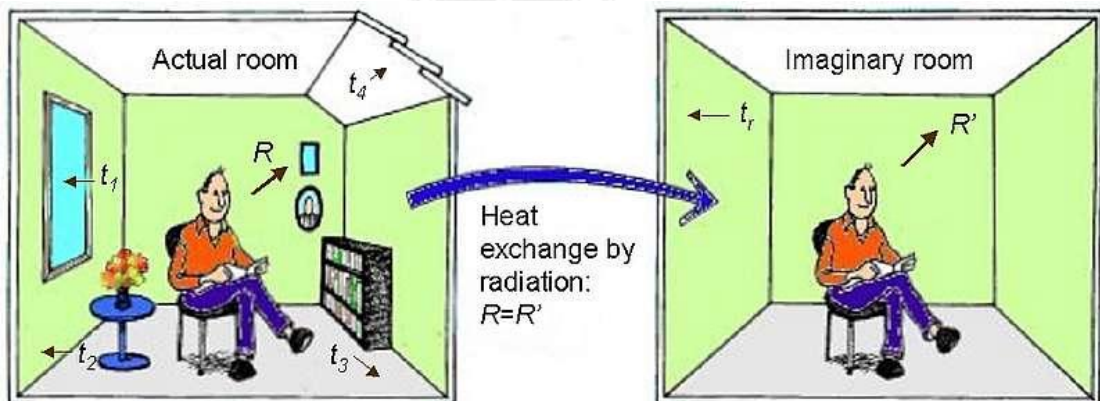
ค่า Clothing area factor,  $f_{cl}$  ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าพื้นที่ผิวของเสื้อผ้าต่อพื้นที่ผิวของร่างกายคนที่ไม่ได้สวมใส่เสื้อผ้า (nude) สามารถหาได้จาก [22]

$$\begin{aligned}
 f_{cl} &= 1.0 + 1.290I_{cl} && \text{เมื่อ } I_{cl} < 0.078 \text{ (m}^2\text{-K)/W} \\
 &= 1.05 + 0.645I_{cl} && \text{เมื่อ } I_{cl} > 0.078 \text{ (m}^2\text{-K)/W}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

เมื่อ  $I_{cl}$  คือ ค่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า, (m<sup>2</sup>-K)/W

### 3.1 การหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature)

ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่มีความสำคัญในการใช้คำนวณหาค่า PMV และ PPD นิยามเป็นค่าอุณหภูมิสมำเสมอของพื้นผิวดำที่ถูกปิดล้อมที่ให้การแผ่รังสีระหว่างคนกับพื้นผิวนั้นเทียบเท่ากับพื้นผิวจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งหากผู้อาศัยในอาคารนั่งอยู่บริเวณใกล้หน้าต่างกระจกจะได้รับผลกระทบจากทั้งปริมาณรังสีที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมาตกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง และค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่สูงขึ้นจากการดูดซับปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ สุดท้ายก็ จะแผ่รังสีคลื่นยาวมาสู่ผู้อยู่อาศัย ซึ่งผลกระทบดังกล่าวถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย



รูปที่ 3.1 นิยามของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย [23]

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอโดย Chaiyapinunt, et.al.[15] แบ่งค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ออกเป็นสองค่าคือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลจากอุณหภูมิผิวนิ่งห้องเพียงอย่างเดียว และค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมผลของอุณหภูมิผิวและผลจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวคนด้วย ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ไม่ได้รวมผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ จะถูกเรียกว่า Unirradiant mean radiant temperature,  $T_{tmrt}$  ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

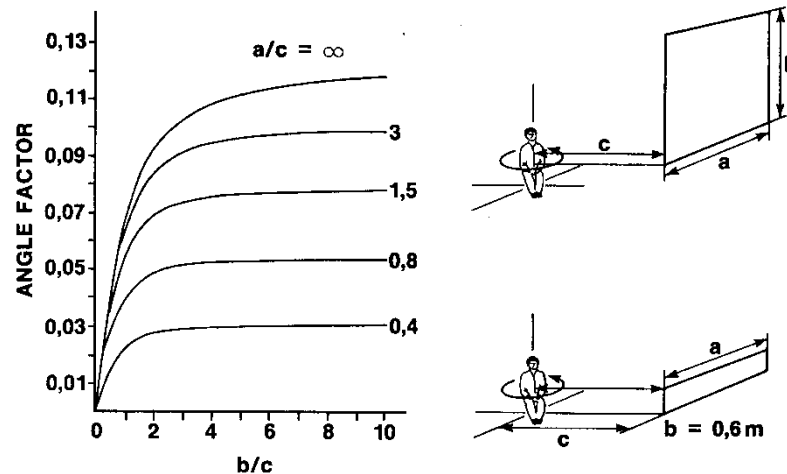
$$\sigma(T_{tmrt} + 273)^4 = B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + \dots + B_n \cdot F_{p-n}
 \tag{3.8}$$

- เมื่อ  $T_{tmrt}$  คือ ค่า Unirradiant mean Radiant Temperature, ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $B_n$  คือ ค่า Radiosity ของพื้นผิวที่ n, ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $F_{p-n}$  คือ ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวที่ n หาได้จากรูปที่ 3.2 และ 3.3
- $\Sigma F_{p-n} = 1$
- $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann, ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

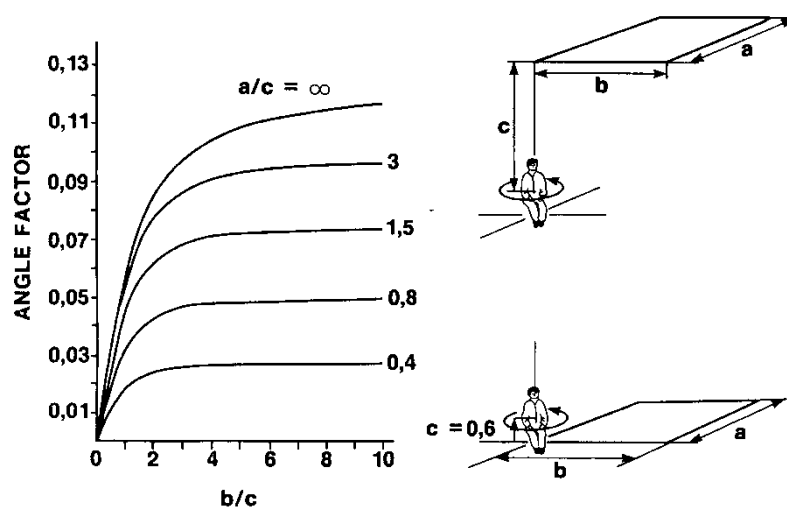
แต่สำหรับพื้นผิวของผนังส่วนใหญ่จะมีค่าการเปล่งรังสี ( $\epsilon$ ) ค่อนข้างสูง จึงสามารถตัดค่าของการสะท้อนรังสีทิ้งไปได้ และถ้าผิวภายในห้องเป็นผิวสีดำ ค่าของ Unirradiant mean radiant temperature ก็สามารถหาได้โดยใช้สัมพัทธ์ต่อไปนี้คือ

$$T_{tmrt} = [(t_1 + 273)^4 \cdot F_{p-1} + (t_2 + 273)^4 \cdot F_{p-2} + \dots + (t_n + 273)^4 \cdot F_{p-n}]^{0.25} - 273 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (3.9)$$

ในการศึกษานี้ กำหนดให้ให้อุณหภูมิผิวของผนังทุกด้านมีค่าคงตัวเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายในห้อง คือ  $25 \text{ } ^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.2 ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวตั้ง [23]



รูปที่ 3.3 ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน [23]

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความสบายเชิงความร้อนภายใต้สิ่งแวดล้อมภายในอาคารนั้น จะมีผลกระทบจากตัวแปรหลายตัวแปรด้วยกัน ซึ่งได้แก่ ค่าของอุณหภูมิอากาศ ความชื้น และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาภายในอาคาร โดยเฉพาะผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในอาคารนั้นจะมีผลกระทบอย่างมากต่อผู้อยู่อาศัย โดยเฉพาะกรณีที่ผู้อยู่อาศัยอยู่ใกล้กับหน้าต่างกระจก โดยผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีผลกระทบทันที ได้แก่ ผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร และส่วนที่เป็นผลมาจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ผนังของกระจกและผนังภายในของอาคารซึ่งในเวลาต่อมาจะแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวออกมา ซึ่งปริมาณของค่าการแผ่รังสีแบบตรงจากดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยผิวหนังของผู้อยู่อาศัยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ คุณสมบัติของหน้าต่างกระจก ตำแหน่งของผู้อยู่อาศัยในอาคาร และค่าการดูดกลืนของผิวหนังคน ส่วนการแผ่รังสีคลื่นยาวจะเกิดจากผลกระทบของค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่ร้อนขึ้นอันเนื่องมาจากการสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ในเนื้อของผนังกระจก และจะเปล่งรังสีความร้อนคลื่นยาวออกมาในภายหลัง

ดังนั้นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ใช้เพื่อหาค่าดัชนีชี้ความสบายเชิงความร้อน จึงต้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยในกรณีที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งจะเรียกว่า ค่า unirradiated mean radiant temperature,  $T_{mrt}$  (ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.9) ซึ่งเป็นผลมาจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของพื้นผิวผนังภายในห้องทุกด้าน และส่วนที่สองคือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยในกรณีที่รวมผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และการแผ่รังสีคลื่น

ยาวของผนังภายในห้อง ซึ่งเรียกว่า ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย,  $T_{smrt}$  โดย La Gennusa et al. [16] ได้นำเสนอสมการเพื่อคำนวณค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยโดยคำนึงถึงผลจาก 2 ส่วนดังกล่าว และยังพิจารณาถึงรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาแต่บางส่วนถูกบังจากใบมู่ลี่ที่ติดตั้งอยู่ด้านหลังหน้าต่างกระจกซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_{smrt} = [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{a_p}{\epsilon_p \cdot \sigma} (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir})]^{0.25} - 273 \quad (3.10)$$

เมื่อ	$a_p$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐาน = 0.6)
	$\epsilon_p$	คือ	ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐาน = 0.97)
	$f_p$	คือ	ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาพฉายผิวคนต่อพื้นที่รับแสงซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์ สามารถหาได้จากรูปที่ 3.4
	$F_{p-win}$	คือ	ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวของหน้าต่างกระจก
	$I_{tr,dif-dif}$	คือ	ค่ารังสีแบบกระจายที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามากระทบผิวหนึ่งคน, ( $W/m^2$ )
	$I_{tr,dir-dif}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบถูกใบมู่ลี่และสะท้อนเข้ามากระทบผิวหนึ่งคน, ( $W/m^2$ )
	$I_{tr,dir-dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวหนึ่งคนโดยไม่มีการสัมผัสถูกใบมู่ลี่, ( $W/m^2$ )

แต่จากการศึกษาพบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นดินสามารถสะท้อนและกลับไปตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่และส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้เช่นเดียวกัน สมการที่ 3.10 จึงถูกปรับปรุงเพิ่มเติม ดังนี้

$$T_{smrt} = [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{a_p}{\epsilon_p \cdot \sigma} (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir} + F_{p-win} I_{ref,tr,dir-dif} + f_p I_{ref,tr,dir-dir})]^{0.25} - 273 \quad (3.11)$$



เมื่อ	$I_{ref,tr,dir-dif}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นดินและสะท้อนกลับมาส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบถูกใบมู่ลี่และสะท้อนเข้ามากระทบผิวผนังคน, ( $W/m^2$ )
	$I_{ref,tr,dir-dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นดินและสะท้อนกลับมาส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวผนังคนโดยไม่มี การสัมผัสถูกใบมู่ลี่, ( $W/m^2$ )

โดยงานของ Chaiyapinunt and Khamporn [23] ได้แสดงไว้ว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ สามารถคำนวณได้จากค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของกระจกรวมกับค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของมู่ลี่ ซึ่งรวมกันด้วยวิธี Matrix Layer calculation ที่คิดค้นโดย Klems [24, 25] ดังนี้

$$I_{tr,dir-dir} = I_{dir} \cdot \tau_{bl-ct,dir,dir}^f \cdot T_g(\theta) \quad (3.12)$$

$$I_{tr,dir-dif} = I_{dir} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} \quad (3.13)$$

$$I_{tr,dif-dif} = I_{dif,sky} \cdot T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH} + I_{dif,grn} \cdot T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH} \quad (3.14)$$

เมื่อ	$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$	คือ	ค่า front direct-to-direct transmittance ของมู่ลี่ใบโค้งที่คิดผลของความหนาของใบมู่ลี่
	$I_{dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$I_{dif,sky}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$I_{dif,grn}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$T_g(\theta)$	คือ	ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกขึ้นกับมุมตกกระทบ
	$T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of M layers only in the part of direct to diffuse solar radiation.

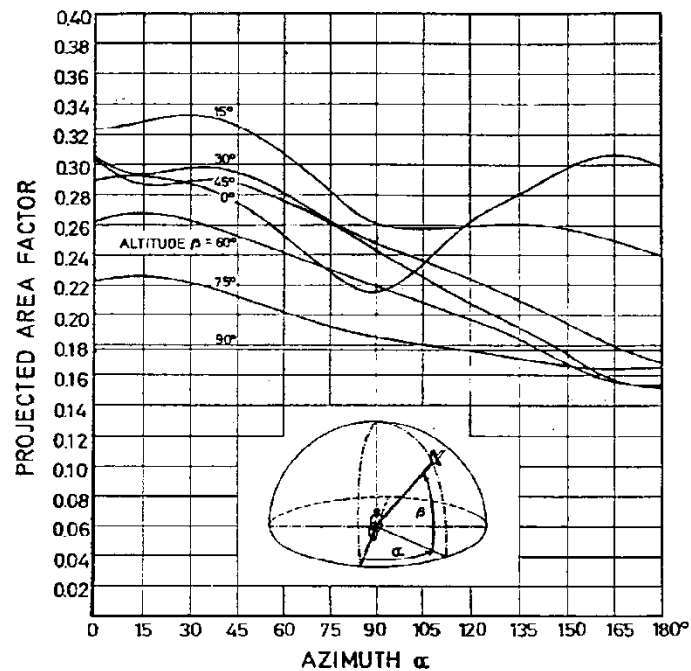
$T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of diffuse solar radiation from the sky.
$T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of diffuse solar radiation reflected from the ground.

และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบพื้นดินและสะท้อนกลับมาส่งผ่านหน้าต่างกระจก

$$I_{ref,tr,dir-dif} = \left( \frac{I_{dir,nor} \sin(\theta) \cdot \rho_g}{2} \right) \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH} \quad (3.15)$$

$$I_{ref,tr,dir-dir} = \left( \frac{I_{dir,nor} \sin(\theta) \cdot \rho_g}{2} \right) \cdot \tau_{bl-ct,dir,dir,r}^f \cdot T_g(\theta) \quad (3.16)$$

เมื่อ	$I_{dir,nor}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์, ( $W/m^2$ )
	$\rho_g$	คือ	ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน แสดงวิธีการหาค่าในบทที่ 5
	$T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH}$	คือ	front hemisphere total transmittance for the glass window and a venetian blind of $M$ layers only in the part of direct reflected ground to diffuse solar radiation.
	$\tau_{bl-ct,dir,dir,r}^f$	คือ	front direct reflected ground-to-direct transmittance ของมู่ลี่ใบโค้งที่คิดผลของความหนาของใบมู่ลี่



รูปที่ 3.4 ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะท่านั่ง [23]

นอกจากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยจะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.11 แล้ว อีกวิธีในการได้มาซึ่งค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย คือ การแปลงค่าจากอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ (operative) ที่ได้จากการวัดโดยตรง ซึ่งถูกนิยามให้เป็นค่าอุณหภูมิสม่ำเสมอของสภาพแวดล้อมปิดที่ให้ผลของการแผ่รังสี และการพาความร้อนจากคนได้เหมือนกับสภาพแวดล้อมจริงที่มีสภาวะไม่สม่ำเสมอ มาเป็นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย โดยใช้สมการ [23]

$$T_{smrto} = \left[ (T_o + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{\epsilon_p \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (3.17)$$

$$h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} & \text{Force convection} \\ 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25} & \text{Free convection} \end{cases} \quad (3.18)$$

เมื่อ	$T_o$	คือ	อุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ, ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$T_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, ( $^{\circ}\text{C}$ )
	$\epsilon_p$	คือ	ค่าการเปล่งรังสีของโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.97)
	$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann, ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

$h_{cg}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศ และโอเปอร์เรทีฟ เทอร์โมมิเตอร์, ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$v_a$	คือ	ค่าความเร็วของอากาศภายใน, (m/s)

ในการศึกษานี้ ทำการทดลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาชนิดภายใน เพื่อใช้ทำนายถึงความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในห้องที่จำลองให้นั่งทำงานโดยหันข้างให้ระบบหน้าต่างกระจก ห้องทดลองอยู่ที่ชั้น 4 ของอาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้าต่างกระจกหันไปทางทิศตะวันตก ซึ่งทำให้หน้าต่างกระจกได้รับรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงในช่วงบ่าย จากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่า PMV ขึ้นกับหลายตัวแปร ซึ่งหากจะพิจารณาเฉพาะในส่วนของความสบายเชิงความร้อนที่มาจากระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ จึงต้องจำลองให้สภาวะภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่ง เพื่อให้ค่า PMV มีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ( $T_{smrt}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น และเนื่องจากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย เป็นผลมาจากทั้งการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์และอุณหภูมิผิวโดยรอบของพื้นผิวผนังภายในห้องทุกด้าน แต่จากสมการที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า ในการศึกษานี้สามารถประมาณให้ค่าอุณหภูมิผิวของผนังห้องทุกด้านมีค่าคงตัวเท่ากับอุณหภูมิอากาศภายในห้อง คือ  $25^\circ C$  เนื่องจากผนังห้องทุกด้านทาด้วยสีดำ ดังนั้นผลจากอุณหภูมิผิวจึงมาจากอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เท่านั้น การคำนวณค่า PMV และ PPD จึงสามารถแบ่งออกได้ PMV และ PPD ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ และ PMV และ PPD ที่เป็นผลมาจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์รวมกับผลจากอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่

## บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นเป็นการจำลองระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน (interior blind) โดยรายละเอียดของแบบจำลองและหลักการคำนวณจะแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยเพื่อให้ง่ายในการวิเคราะห์ปัญหา ดังนี้

ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง

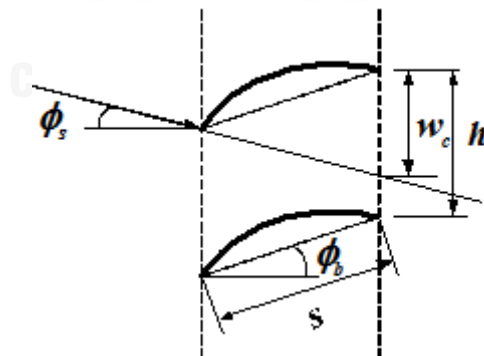
การหาค่าการส่งผ่านรังสีของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวของชั้นกระจกและมู่ลี่

และในหัวข้อสุดท้ายจะอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมเพื่อให้เห็นถึงรายละเอียดและความแตกต่างที่เปลี่ยนแปลงไปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น

### 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง

พิจารณามู่ลี่ชนิดใบโค้ง โดยมีลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง นิยามมุมบิดของใบมู่ลี่ ( $\phi_b$ ) และนิยามมุม solar profile ( $\phi_s$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.1

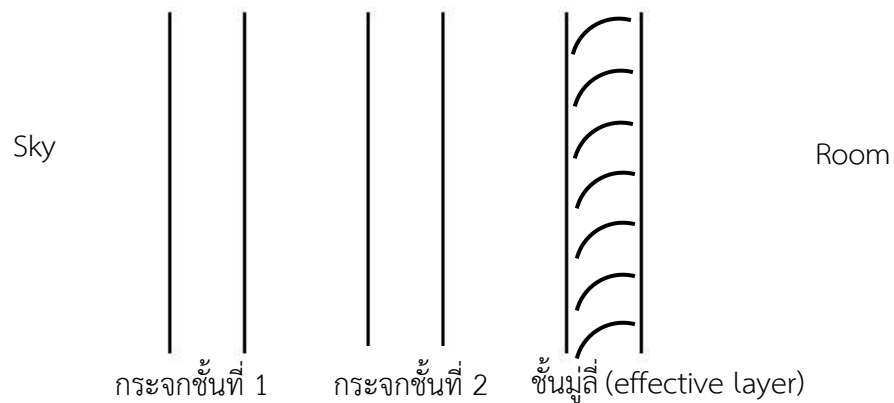


รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองมู่ลี่ชนิดใบโค้ง และนิยามมุมบิดของใบมู่ลี่ [23]

แบบจำลองนี้ครอบคลุมถึงผลกระทบจากความโค้งและความหนาของใบมู่ลี่ โดยมีข้อสมมติฐานเบื้องต้น คือ

1. มวลี่ทั้งชุดจะถูกแบ่งเป็นหน่วยย่อย ๆ วางซ้อนกันโดยแต่ละหน่วยย่อยจะประกอบไปด้วยใบมวลี่ 2 ใบที่อยู่ติดกัน
2. ทุก ๆ หน่วยย่อยที่ประกอบกันเป็นมวลี่นั้นมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบเดียวกัน ดังนั้น การพิจารณาเพียงแค่ว่าหนึ่งหน่วยย่อยก็สามารถใช้เป็นตัวแทน (representative) ของมวลี่ทั้งชุดได้ ซึ่งชุดมวลี่จะสามารถพิจารณาเป็นชั้นเสมือน (effective layer) ที่มีค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบคลื่นสั้น (solar-optical properties) ของมวลี่เป็นเหมือนชั้นของกระจกชนิดพิเศษอยู่หลังระบบกระจกปกติ
3. ใบของมวลี่ที่พิจารณาจะมีความยาวมากกว่าความกว้างของใบมาก ทำให้ผลของขอบทางด้านปลายตามความยาวของมวลี่มีไม่มากนัก และสามารถพิจารณาเป็น 2 มิติได้
4. ใบมวลี่จะถูกสมมติให้มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบกระจายแบบสมบูรณ์ (perfectly diffuse)

เมื่อนำแบบจำลองของมวลี่ มาประกอบเข้ากับระบบกระจก ในที่นี้ขอยกตัวอย่างเป็นระบบกระจก 2 ชั้น สามารถอธิบายเป็นภาพอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.2

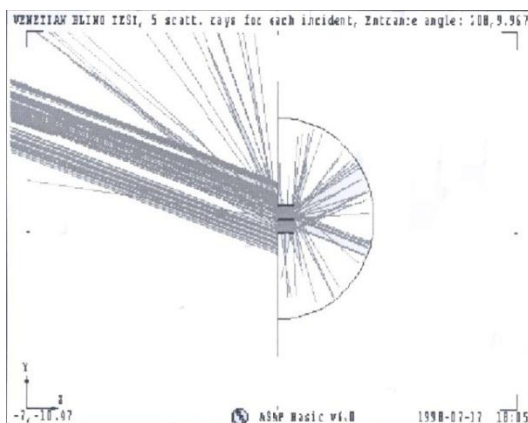


รูปที่ 4.2 ระบบหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ที่ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมวลี่ภายใน

#### 4.2 การหาค่าการส่งผ่านรังสีของระบบหน้าต่างกระจกติดมวลี่

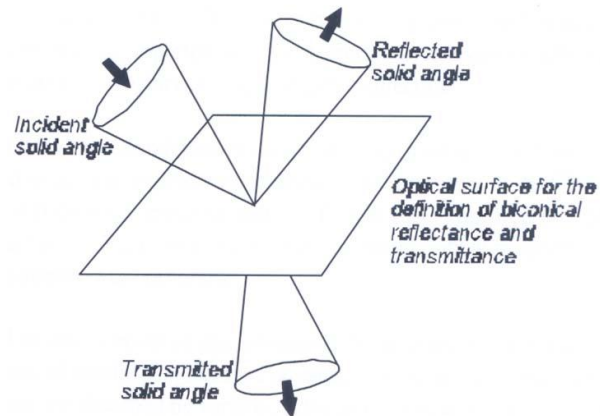
การหาคุณสมบัติเชิง optic ของระบบหน้าต่างกระจกติดมวลี่ อันได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการดูดกลืนรังสี และค่าการสะท้อนรังสีนั้นมีความซับซ้อน เนื่องจาก เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบระบบกระจกติดมวลี่ที่มุมตกกระทบอันหนึ่งนั้น รังสีแสงอาทิตย์ที่เข้ามาในอาคารนั้นจะเข้ามาในทิศทาง

ที่หลากหลาย อันเป็นผลมาจากการลักษณะของมู่ลี่เองที่มีลักษณะเป็นใบซ้อน ๆ กัน และการสะท้อนระหว่างใบมู่ลี่ก็ยังเป็นผลให้ทิศทางของรังสีที่ออกนั้นมีค่าที่เปลี่ยนไปอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.3

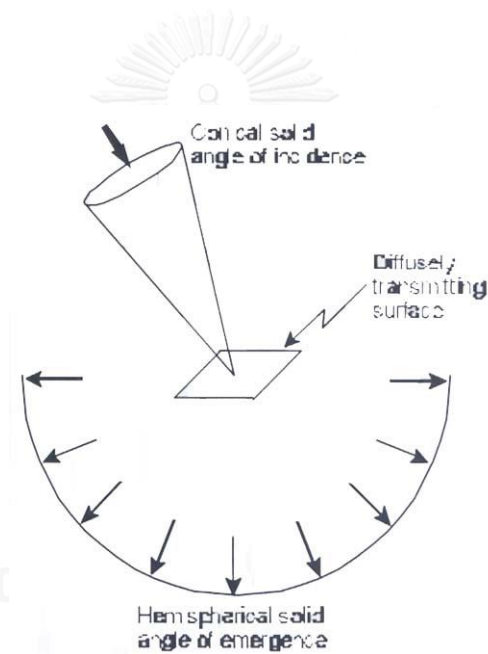


รูปที่ 4.3 ทิศทางของรังสีที่ส่งผ่านมู่ลี่ [23]

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการอธิบายค่าคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่อย่างละเอียดนั้น จำเป็นที่จะต้องอธิบายด้วยการระบุทิศทางเข้า และทิศทางออกของรังสีทั้งหมด และค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการอธิบายนี้จะถูกเรียกว่าเป็นฟังก์ชันการกระจายตัวแบบสองทิศทาง (Bidirectional distribution function) แต่อย่างไรก็ตามในการประเมินค่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารนั้นอาจจะไม่จำเป็นที่จะต้องบอกลงไปในรายละเอียดว่ามีรังสีเข้ามาในอาคารที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นปริมาณเท่าใดบ้าง แต่อาจจะบอกเป็นค่าโดยเฉลี่ยรวมก็เพียงพอ ดังนั้นจึงได้มีการนิยามค่าคุณสมบัติขึ้นมาอีกหนึ่งที่เรียกว่า directional-hemispherical properties ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่กำหนดด้วยทิศทางของรังสีขาเข้าค่าหนึ่ง และค่าที่ออกจากมู่ลี่จะเป็นค่ารวมรังสีขาออกทั้งหมดเข้าด้วยกันในลักษณะครึ่งทรงกลม ดังนั้นการระบุทิศทางของคุณสมบัติดังกล่าวนั้นก็จะเป็นการระบุที่ทิศทางขาเข้าเท่านั้น รูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงนิยามของคุณสมบัติทั้งสองชนิด



รูปที่ 4.4 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ bi-directional properties [23]



รูปที่ 4.5 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ directional-hemispherical properties [23]

ซึ่งค่าคุณสมบัติ directional-hemispherical properties เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติแบบสองทิศทาง (bi-directional properties) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$T^{fH} = u^T \cdot \Lambda \cdot T_{M,\{1,M\}}^f \quad (4.1)$$

$$R^{fH} = u^T \cdot \Lambda \cdot R_{M,\{1,M\}}^f \quad (4.2)$$

โดยที่  $u^T = \{1 \ 1 \ \dots \ 1\}$  (4.3)



$$\text{และ } \Lambda_i = \left\{ \begin{array}{cccc} \Delta\Omega_i^1 \cos(\theta_i^1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta\Omega_i^2 \cos(\theta_i^2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Delta\Omega_i^N \cos(\theta_i^N) \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $T^{fH}$  คือ directional-hemispherical front transmittance

$R^{fH}$  คือ directional-hemispherical front reflectance

$T_{M,\{1,M\}}^f$  คือ bi-directional front transmittance

$R_{M,\{1,M\}}^f$  คือ bi-directional front reflectance

$u^T$  คือ auxiliary row vector

$\Lambda$  คือ propagation matrix

$\Delta\Omega$  คือ มุม solid angle

โดยที่ค่า  $T_{M,\{1,M\}}^f$  ซึ่งเป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของระบบจะสามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix layer Calculation ที่เสนอโดย Klems [26] ดังสมการที่ 4.5 ถึง 4.8

$$T_{M,\{1,M\}}^f = T_M^f \cdot \left( \mathbf{1} - \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{1,M-1\}}^f \quad (4.5)$$

$$R_{M,\{1,M\}}^f = R_{M-1,\{1,M-1\}}^f + \left[ \begin{array}{c} T_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \left( \mathbf{1} - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{1,M-1\}}^f \end{array} \right] \quad (4.6)$$

$$T_{M,\{1,M\}}^b = T_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \left( \mathbf{1} - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_M^b \quad (4.7)$$

$$R_{M,\{1,M\}}^b = R_M^b + \left[ \begin{array}{c} T_M^f \cdot \left( \mathbf{1} - \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f \right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_M^b \end{array} \right] \quad (4.8)$$

เมื่อ  $T_{M,\{1,M\}}^f$  คือ bi-directional front transmittance matrix ของระบบ M ชั้น

$T_{M,\{1,M\}}^b$  คือ bi-directional back transmittance matrix ของระบบ M ชั้น

$R_{M,\{1,M\}}^f$  คือ bi-directional front reflectance matrix ของระบบ M ชั้น

$R_{M,\{1,M\}}^b$	คือ	bi-directional back reflectance matrix ของระบบ M ชั้น
$T_i^f$	คือ	bi-directional front transmittance matrix ของ layer i
$T_i^b$	คือ	bi-directional back transmittance matrix ของ layer i
$R_i^f$	คือ	bi-directional front reflectance matrix ของ layer i
$R_i^b$	คือ	bi-directional back reflectance matrix ของ layer i

และค่าคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่อยู่ในระบบกระจก M ชั้นได้จาก

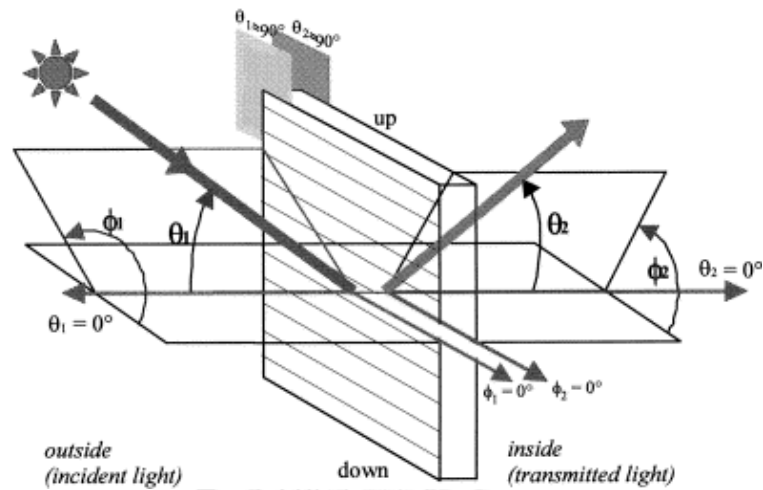
$$A_{i,M}^f = \left[ A_i^f \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{1,M\}}^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{i-1,\{1,i-1\}}^f \right] \\ + \left[ A_i^b \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{1,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot T_{i,\{1,i\}}^f \right] \quad (4.9)$$

$$A_{i,M}^b = \left[ A_i^b \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i-1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{1,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-i,\{i+1,M\}}^b \right] \\ + \left[ A_i^f \cdot \left( 1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{i,M\}}^f \right)^{-1} \right. \\ \left. \cdot \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_{M-i+1,\{i,M\}}^b \right] \quad (4.10)$$

เมื่อ	$A_{i,M}^f$	คือ	directional front absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น
	$A_{i,M}^b$	คือ	directional back absorptance ของกระจกใด ๆ ในระบบกระจก M ชั้น
	$A_i^f$	คือ	directional front absorptance matrix ของ layer i
	$A_i^b$	คือ	directional back absorptance matrix ของ layer i

หมายเหตุ : ค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ สามารถหาได้โดยตรงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ สามารถหาได้จากการอินทิเกรตค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ตามลำดับ โดยอินทิเกรตในช่วง  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ,  $0^\circ < \phi < 180^\circ$  และในช่วง  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ,  $180^\circ < \phi < 360^\circ$  โดย  $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสี และ  $\phi$  คือ มุม azimuth นิยามตามรูปที่ 4.6 จากนั้นนำมาคูณด้วยสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและ

สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการหาสัดส่วนนี้อย่างละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ บทที่ 5 หัวข้อ ข.



รูปที่ 4.6 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth [23]

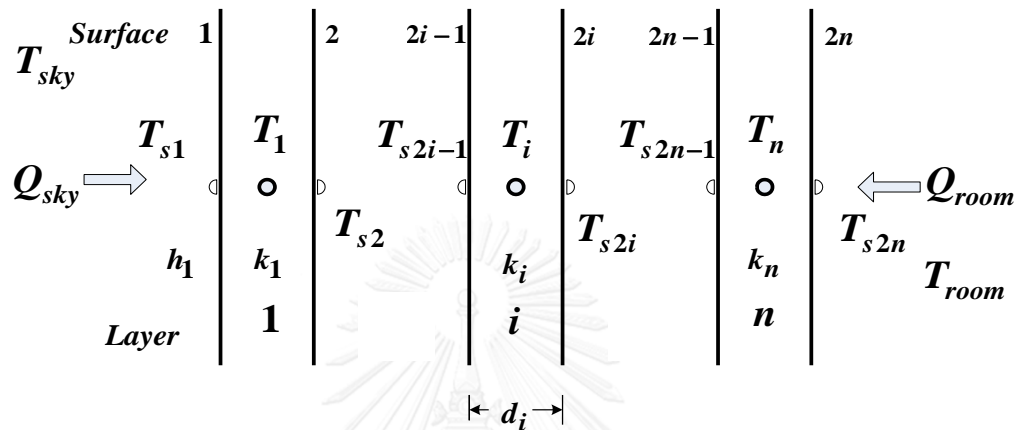
#### 4.3 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวของชั้นกระจกและมู่ลี่

การคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวของชั้นกระจกและมู่ลี่นั้นจะสามารถวิเคราะห์ได้โดยหลักการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 เมตรตามวิธีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Finlayson [27] แต่อย่างไรก็ตามวิธีของ Finlayson นั้นสามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับกระจกหลายชั้นเท่านั้น แต่สำหรับระบบกระจกติดมู่ลี่ วิธีการนี้จะไม่สามารถที่จะทำนายได้โดยตรง แต่จะต้องทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในหลาย ๆ ส่วน เพื่อให้ครอบคลุมถึงกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถทำนายอุณหภูมิผิวของระบบกระจกในกรณีของระบบกระจกที่มีการติดมู่ลี่ได้ด้วย โดยจะพิจารณาว่ามู่ลี่เป็นเหมือนกับ effective layer ชั้นหนึ่ง ที่ประกอบเข้าไปกับระบบกระจกอยู่ภายในอาคาร จากนั้นจึงพิจารณาการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ส่งผ่านระหว่างกระจกและมู่ลี่ การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก การพาความร้อนระหว่างชั้นกระจก การพาความร้อนระหว่างกระจกชั้นในกับชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนจากชั้นมู่ลี่เข้าสู่อาคาร จากนั้นจึงพิจารณาสมดุลพลังงานของระบบกระจกโดยรวม เพื่อที่จะนำไปสู่การประเมินค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละผิวกระจก และค่าอุณหภูมิของมู่ลี่ โดยหลักการในการหาค่าอุณหภูมิ และค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละชั้นนั้น จะเริ่มจากการ

แบ่งให้ในแต่ละชั้นของกระจกและมูลีนั้นประกอบไปด้วยจุดต่อ 3 จุด นั่นคือที่จุดกึ่งกลางกระจก และที่ผิวแต่ละด้านของกระจกดังแสดงในรูปที่ 4.7 และจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้

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



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งจุดต่อ 3 จุด และการกระจายตัวของอุณหภูมิของชั้นกระจกและมูลีน [23]

ภายใต้สภาวะคงตัวนี้ จะทำให้ได้สมดุลความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจก และมูลีนนั้นจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นคือ

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} = 0 \quad (4.11)$$

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} = 0 \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (4.12)$$

$$Q_{across,i} = \frac{(T_i - T_{i+2})}{R_{i+3}} \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (4.13)$$

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

$Q_{across,i}$  คือ ค่า heat flux ที่ถูกส่งผ่านจากชั้น  $i$  ข้ามชั้นมูลีนที่เป็นชั้น diathermanous layer สู่จุด  $i+2$ .

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

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

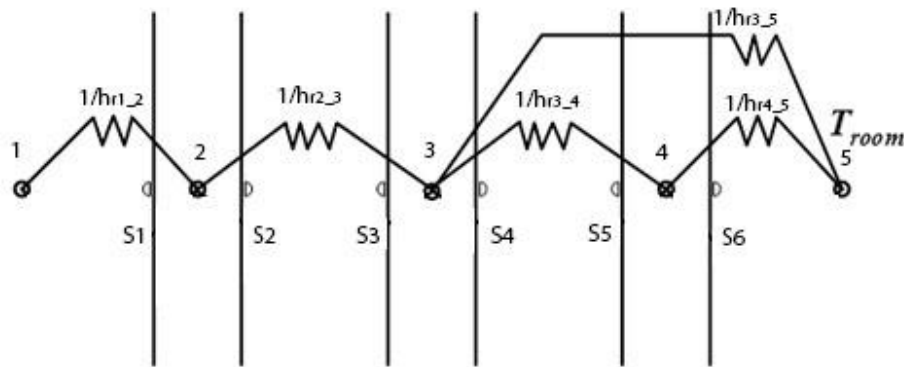
$Q_{abs,i}$  คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่  $i$ , ( $W/m^2$ )  
โดยที่ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้นสามารถหาค่าได้จาก  
ความสัมพันธ์

$$Q_{abs,i} = A_i^{fH} \cdot I_{dir} + A_{i,r}^{fH} \cdot I_{dir,r} + (A_i^{dif,sky} \cdot I_{dif,sky} + A_i^{dif,grad} \cdot I_{dif,grad}) \quad (4.14)$$

เมื่อ	$A_i^{fH}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere
	$A_{i,r}^{fH}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้จากการสะท้อนจากพื้นดินของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere
	$I_{dir}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$I_{dir,r}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ได้จากการสะท้อนจากพื้นดินที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$A_i^{dif,sky}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าของแต่ละชั้น
	$A_i^{dif,grad}$	คือ	ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินของแต่ละชั้น
	$I_{dif,sky}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )
	$I_{dif,grad}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก, ( $W/m^2$ )

#### 4.3.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

ถึงแม้ว่ามู่ลี่จะถูกพิจารณาเป็นชั้นเสมือนที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับเป็นกระจกอีกหนึ่งชั้น แต่เนื่องจากมู่ลี่มีลักษณะพิเศษที่ยอมให้รังสีคลื่นยาวส่งผ่านได้ต่างกับของกระจก ดังนั้นมู่ลี่จึงถูกกำหนดให้เป็นชั้นแบบ diathermanous และการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวจึงมีความซับซ้อน การวิเคราะห์กระทำตามวิธีที่เสนอโดย Wright and Collins [28] โดยรูปที่ 4.8 เป็นโครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของกรณีตัวอย่างของกระจก 2 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน



รูปที่ 4.8 โครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวของกรณีตัวอย่างของกระฉก 2 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน [23]

การวิเคราะห์เริ่มจากการสมมติให้อุณหภูมิผิวของทุกชั้นมีค่าเป็นศูนย์ ยกเว้นผิวของชั้นที่พิจารณา ในขณะที่นั้นซึ่งให้อุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วทำการหาค่าการส่งผ่านรังสีไปสู่ผิวแต่ละผิวโดยวิธี radiosity จากนั้นจึงดำเนินการกำหนดผิวที่ต้องการพิจารณาใหม่ กระทำซ้ำจนครบทุกผิวในระบบกระฉกและมู่ลี่

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาวสามารถหาได้จาก

$$h_{r,j-k} = \frac{\sum J_{sk}^j - \sum J_{sj}^k}{T_{sj} - T_{sk}} \quad (4.15)$$

โดยที่  $h_{r,j-k}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างผิว  $j$  และ  $k$  (โดยทั่วไป  $j=k-1$ ) ถ้าผิว  $k$  เป็นผิวด้านนอกสุดของระบบผิวกระฉกผิว  $j$  จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอก ถ้าผิว  $j$  เป็นผิวด้านในสุดของระบบกระฉก ผิว  $k$  จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายในห้อง

$\sum J_{sk}^j$  คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว  $j$  (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระฉกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว  $k$

$\sum J_{sj}^k$  คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว  $k$  (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระฉกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว  $j$

$T_{sj}$  คือ ค่าอุณหภูมิของผิว  $j$

$T_{sk}$  คือ ค่าอุณหภูมิของผิว  $k$

#### 4.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ในส่วนของ การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน พิจารณาแยกตามลักษณะทางกายภาพ แบ่งออกได้เป็น 5 กรณี คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก
2. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก
3. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่
4. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร
5. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร

##### 4.3.2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกขึ้นอยู่กับทิศทางของอาคาร และ ความเร็วลมภายนอกเป็นหลัก ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Yazdanian and Klems [9] ดังนี้

$$h_{c,out} = \sqrt{[c_t [\Delta T]^{1/3}]^2 + [av^b]^2} \quad (4.16)$$

เมื่อ  $c_t$  คือ ค่าคงที่เนื่องจากการพาความร้อนของการไหลแบบปั่นป่วน ตามนิยามใน ตารางที่ 4.1, ( $W/(m^2 \cdot K^{4/3})$ )

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอก, (K)

$a, b$  คือ ค่าคงที่ตามนิยามในตารางที่ 4.1

$v$  คือ ค่าความเร็วของกระแสลมอิสระที่ความสูง 10 เมตร, (m/s)

ตารางที่ 4.1 MoWITT constant [9].

	$c_t$ $W/(m^2 K^{4/3})$	$a$ , $W/(m^2 K(m/s)^b)$	$b$
Windward	$0.84 \pm 0.015$	$2.38 \pm 0.036$	$0.89 \pm 0.009$
Leeward	0.84	$2.86 \pm 0.098$	$0.617 \pm 0.017$

#### 4.3.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก สามารถที่จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง นั่นคือ

$$h_{c, gap} = \frac{k_{air} \cdot Nu}{w} \quad (4.17)$$

เมื่อ  $k_{air}$  คือ ค่า thermal conductivity ของก๊าซระหว่างชั้นกระจก, ( $W / m \cdot ^\circ C$ )

$w$  คือ ความกว้างของช่องกระจก, (mm)

$Nu$  คือ Nusselt number

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการ

$$Nu = \left[ 1 + (0.0303 Ra^{0.402})^1 \right]^{0.091} \quad (4.18)$$

โดยที่  $Ra = Gr \cdot Pr$  (4.19)

เมื่อ  $Ra$  คือ Rayleigh number

$Gr$  คือ Grashof number

$Pr$  คือ Prandtl number

และ 
$$Gr = \frac{g \beta \rho^2 \omega^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (4.20)$$

เมื่อ  $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิกระจก, (K)

$g$  คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, ( $m/s^2$ )

$\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ, ( $1/K$ )

$\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, ( $kg/m^3$ )



$\mu$  คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, (kg/m-s)

โดยที่คุณสมบัติของก๊าซสามารถที่จะหาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นกระจกทั้งสอง และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$P(T) = P_{273} + \frac{dP}{dT_{ave}} \times T_{ave} \quad (4.21)$$

โดยที่

$$T_{ave} = 0.5 \times (T_{left} + T_{right}) \quad (4.22)$$

เมื่อ  $P_{273}$  คือ ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อุณหภูมิ 273 K

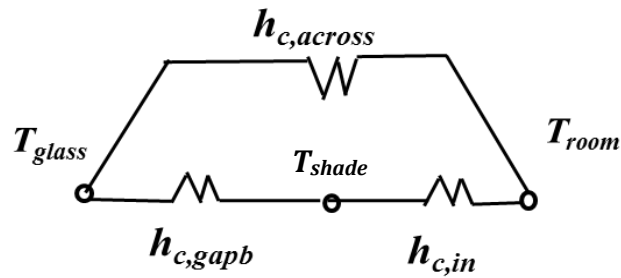
$\frac{dP}{dT_{ave}}$  คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ

โดยที่ค่าคุณสมบัติของอากาศต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ [23]

ค่าคุณสมบัติของอากาศ	ค่าคุณสมบัติที่อุณหภูมิ 273 K	ค่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่าง ๆ เทียบกับอุณหภูมิ
ค่าความหนาแน่น	1.290	-0.0044
ค่าความหนืด	1.73e-5	10.0e-8
สภาพนำความร้อนของอากาศ	0.0241	7.6e-5
ค่า Prandtl number	0.720	0.00180

ในส่วน of ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Wright et al. [10] โดยโครงข่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการพาความร้อนของกรณีตัวอย่างของกระจก 1 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน แสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โคจรถ่ายความต้านทานเฉพาะส่วนของการพาความร้อนของกรณีตัวอย่างของกระจก 1 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน

#### 4.3.2.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$h_{c,gapb} = \frac{k_{air}}{b} \quad (4.23)$$

เมื่อ  $b$  คือ ระยะห่างระหว่างผิวกระจกกับกึ่งกลางของชั้นมู่ลี่ (effective layer), (m)

#### 4.3.2.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในอาคารและมุมบิดของใบมู่ลี่ ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$h_{c,in} = h_c \left( 2 - \exp\left(-4.6 \frac{b}{0.1}\right) \right) \cdot (1 + 0.2|\sin(2\phi_b)|) \quad (4.24)$$

เมื่อ  $h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายในอาคาร ซึ่งหาได้จากสมการที่ 4.25, ( $W/m^2$ )

$\phi_b$  คือ มุมบิดของใบมู่ลี่ นิยามตามรูปที่ 4.1, ( $^\circ$ )

$$h_c = \frac{k_{air} \cdot Nu}{H} \quad (4.25)$$

$$Nu = 0.56(Ra_H \sin \gamma)^{1/4} ; Ra_H \leq Ra_{cv} \quad (4.26)$$

$$Nu = 0.13(Ra_H^{1/3} - Ra_{cv}^{1/3}) + 0.56(Ra_{cv} \sin \gamma)^{1/4} ; Ra_H > Ra_{cv} \quad (4.27)$$

$$Ra_{cv} = 2.5 \times 10^5 \left( \frac{e^{0.72\gamma}}{\sin \gamma} \right) \quad (4.28)$$

$$Ra_H = \frac{\rho^2 H^3 g C_p |T_{b,n} - T_{in}|}{T_{m,f} \mu k_{air}} \quad (4.29)$$

$$T_{m,f} = T_{in} + \frac{1}{4} (T_{b,n} - T_{in}) \quad (4.30)$$

เมื่อ	$H$	คือ	ค่าความสูงของหน้าต่างกระจก, (m)
	$Ra_H$	คือ	Rayleigh number ที่มีค่าขึ้นกับความสูงของหน้าต่างกระจก
	$\gamma$	คือ	มุมเอียงของหน้าต่างกระจก, ( $^{\circ}$ )
	$C_p$	คือ	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, (J/(kg-K))
	$T_{m,f}$	คือ	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของฟิล์ม, (K)
	$T_{b,n}$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน, (K)

#### 4.3.2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร

เป็นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจก โดยข้ามชั้น effective layer เข้าสู่ภายในอาคาร สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$h_{c,across,i} = h_c \left( 1 - \exp\left(-4.6 \frac{b}{0.1}\right) \right) \quad (4.31)$$

เมื่อ  $b$  คือ ระยะห่างระหว่างผิวกระจกกับกึ่งกลางของชั้นมู่ลี่ (effective layer), (m)

#### 4.3.3 การหาสภาพนำความร้อนของชั้นกระจกและชั้นมู่ลี่

สภาพนำความร้อนของกระจกเป็นสภาพนำความร้อนของวัสดุทั่วไปซึ่งไม่มีความซับซ้อน จึงสามารถใช้ค่าคงที่ตามแต่ละชนิดของกระจกได้เลย แต่ค่าสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่นั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากในแต่ละหน่วยย่อยของมู่ลี่ประกอบไปด้วย ใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ติดกันดังนิยามตามรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่านอกจากในหน่วยย่อยดังกล่าวจะประกอบไปด้วยใบมู่ลี่ 2 ใบแล้ว ยังประกอบไปด้วยอากาศที่อยู่ระหว่างใบมู่ลี่ทั้งสอง ซึ่งส่งผลให้สภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่เป็นสภาพนำความร้อนของวัสดุ 2 ชนิด คือ วัสดุที่ใช้ทำใบมู่ลี่ และอากาศ นอกจากนี้สัดส่วนของอากาศในหน่วยย่อยนี้ยังมีการ

เปลี่ยนแปลงไปตามมุมบิดของใบ จึงทำให้สภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลีมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมบิดของใบมู่ลี

การหาสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลีจึงใช้เป็นสภาพนำความร้อนประสิทธิผล โดยใช้แนวคิดของการหาสภาพนำความร้อนของวัสดุพรุน (porous media) จากงานของ Laouadi, A. [7] ซึ่งใบมู่ลีทั้งสองมีลักษณะเป็นได้ทั้งผนังปิดทึบหรือผนังเปิด (เปิดที่สุดเมื่อใบมู่ลีทำมุมบิด 0 องศา) ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของชั้นมู่ลีด้านหน้าและด้านหลังมีจะความแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการไหลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างใบมู่ลีเป็นแบบ cellular flow ซึ่งการไหลลักษณะดังกล่าวถูกแสดงไว้ในงานของ Machin et al. (1998) [29] และ Naylor and Lai (2007) [30] และทำให้การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นมู่ลีเข้ามาภายในห้องมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่จากการศึกษาของ Laouadi, A. พบว่าสามารถละทิ้งผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นมู่ลีเข้ามาภายในห้องได้ เพราะอากาศภายในช่องว่างระหว่างใบมู่ลีมีความเร็วที่ต่ำมากและยังสูญเสียความดันไปมากเมื่อไหลผ่านชั้นมู่ลี ดังนั้นอากาศภายในช่องว่างระหว่างมู่ลีจึงถูกพิจารณาเสมือนเป็นวัสดุของแข็งอีกชนิดหนึ่ง เพื่อนำมาคำนวณหาสภาพนำความร้อนประสิทธิผลของชั้นมู่ลี โดยใช้ความสัมพันธ์

$$k_{eff} = (1 - \omega) \cdot k_b + \omega \cdot k_{air} \quad (4.32)$$

เมื่อ	$k_{eff}$	คือ	สภาพนำความร้อนประสิทธิผลของชั้นมู่ลี, (W/m <sup>2</sup> ·K)
	$k_b$	คือ	สภาพนำความร้อนของใบมู่ลี, (W/m <sup>2</sup> ·K)
	$k_{air}$	คือ	สภาพนำความร้อนของอากาศ, (W/m <sup>2</sup> ·K)
	$\omega$	คือ	ค่าความพรุนของชั้นมู่ลี ซึ่งนิยามว่าเป็น อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของปริมาตรควบคุมของหน่วยย่อยที่พิจารณา โดยปริมาตรควบคุมของหน่วยย่อยที่พิจารณาแสดงในรูปที่ 4.10

$$\text{โดยที่ } \omega = 1 - \frac{(1 - \varphi_s)L_s t_s}{L_p \cdot (h + t_s)} \quad (4.33)$$

เมื่อ  $\varphi_s$  คือ ค่า openness factor ซึ่งนิยามว่าเป็น อัตราส่วนของพื้นที่ผิวมู่ลีที่เปิดต่อพื้นที่ผิวทั้งหมดของมู่ลี ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varphi_s = 1 - \frac{d}{h \cdot \cos \phi_b} \quad (4.34)$$

เมื่อ  $L_s$  คือ ความยาวของใบมู่ลีตามแนวโค้ง, (m)

$t_s$  คือ ความหนาของใบมู่ลี, (m)

$L_p$	คือ	ความหนาของชั้นมูลี่, (m)
$h$	คือ	ความกว้างของชั้นมูลี่, (m)
$\phi_b$	คือ	มุมบิดของใบมูลี่, ( $^{\circ}$ )
$d$	คือ	ระยะที่นิยามตามรูปที่ 4.10 คำนวณได้จากความสัมพันธ์

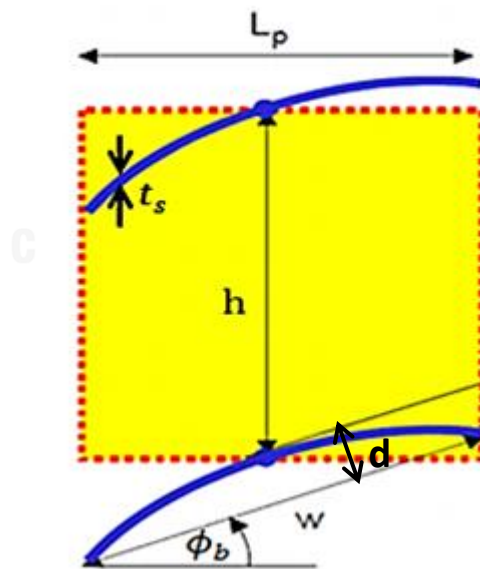
$$d = [R_c - (R_c \cdot \cos(\phi_{cr}))] + t_s \quad (4.35)$$

เมื่อ	$R_c$	คือ	รัศมีความโค้งของใบมูลี่, (m)
	$\phi_{cr}$	คือ	ค่ามุมวิกฤติ, (rad) คำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\phi_{cr} = \sin^{-1}\left(\frac{s}{2R_c}\right) \quad (4.36)$$

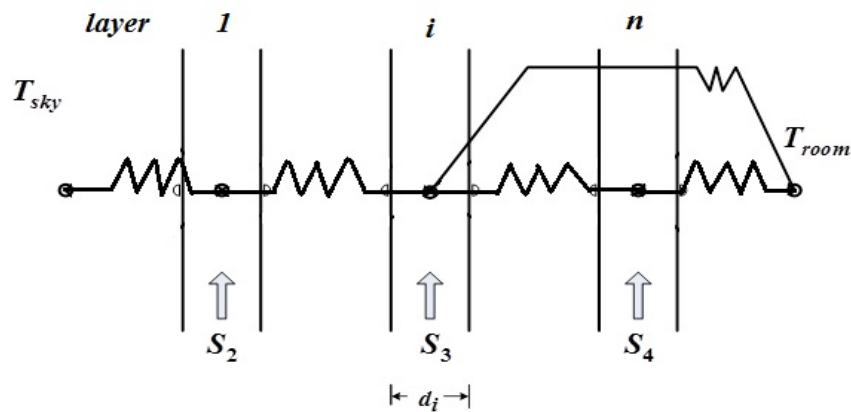
เมื่อ	$s$	คือ	ค่าความกว้างของใบมูลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ, (m)
-------	-----	-----	--

### ปริมาตรควบคุม



รูปที่ 4.10 นิยามปริมาตรควบคุมของหน่วยย่อยของชั้นมูลี่ที่พิจารณา

จากการถ่ายเทความร้อนใน 3 โหมดหลัก คือ การแผ่รังสีคลื่นยาว การพาความร้อน และการนำความร้อนทำให้สามารถที่จะหาค่าความต้านทานความร้อนรวมในแต่ละส่วนได้ ดังนี้



รูปที่ 4.11 โครงข่ายความต้านทานความร้อนรวม กรณีตัวอย่างของกระจก 2 ชั้น ติดตั้งอุปกรณ์บังเงาชนิดมู่ลี่ภายใน

สำหรับพื้นผิวกระจกด้านนอก

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_1}{k_1} \quad (4.37)$$

สำหรับระหว่างชั้นกระจก

$$R_i = \frac{1}{h_{c,gap} + h_{r,gap}} + \frac{0.5d_{i-1}}{k_{i-1}} + \frac{0.5d_i}{k_i} \quad (4.38)$$

สำหรับระหว่างชั้นกระจก/มู่ลี่

$$R_{i+1} = \frac{1}{h_{c,gapb} + h_{r,gapb}} + \frac{0.5d_i}{k_i} + \frac{0.5d_{i+1}}{k_{i+1}} \quad (4.39)$$

สำหรับพื้นผิวมู่ลี่

$$R_{n+1} = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_n}{k_n} \quad (4.40)$$

สำหรับระหว่างกระจกผิวในกับในห้อง

$$R_{i+3} = \frac{1}{h_{c,across,i} + h_{r,across,i}} + \frac{0.5d_i}{k_i} \quad (4.41)$$

#### 4.3.4 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นกระจก

จากค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากอุณหภูมิที่สมมติขึ้น จะทำให้สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ได้จาก

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} \quad (4.42)$$

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (4.43)$$

โดยค่า  $\Delta_i$  ที่ได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ เรียกว่า ค่าคงเหลือของความร้อน (heat flux residual,  $\Delta_j$ ) และเราจะใช้ค่า  $\Delta_j$  ตัวนี้ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวใหม่

#### 4.3.5 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ผิว

ในส่วนของการหาค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจก สามารถหาได้จากค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก โดยใช้หลักสมดุลพลังงาน คือ ถ้าพิจารณาที่ผิวกระจกด้านนอกจะได้ว่าที่สภาวะคงตัวการนำความร้อนผ่านเนื้อกระจกจะต้องมีค่าเท่ากับการพาความร้อนออกจากผิวกระจกนั้นคือ

$$\frac{T_1 - T_{s1}}{R_{k1}} = \frac{T_{s1} - T_{amb}}{R_{h1}} \quad (4.44)$$

จัดรูปสมการเสียใหม่ ให้เขียนให้อยู่ในรูปของ index notation ได้เป็น

$$T_{s2i} = \frac{\left( \frac{T_i}{R_{ki}} + \frac{T_{s2i+1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left( \frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki}} \right)} \quad (4.45)$$

และ

$$T_{s2i+1} = \frac{\left( \frac{T_{i+1}}{R_{ki+1}} + \frac{T_{s2i-1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left( \frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki+1}} \right)} \quad (4.46)$$

จะเห็นได้ว่าสมการ 4.45 และสมการ 4.46 นั้นจะมีลักษณะที่ couple กันอยู่ และจำเป็นที่จะต้องหาค่าไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นในการคำนวณจึงจะเริ่มต้นการคำนวณจากการสมมติค่า  $T_{s2i}$  และ  $T_{s2i+1}$  ก่อน โดยจะสมมติให้มีค่าที่เท่ากับอุณหภูมิกึ่งกลางกระจก นั่นคือ  $T_{s2i} = T_i$  และ  $T_{s2i+1} = T_{i+1}$  จากนั้นจึงค่อยคำนวณค่าอุณหภูมิทั้งสองใหม่จนมีค่าที่ลู่เข้า โดยในการคำนวณนั้นจะถือว่าลู่เข้าเมื่อผลต่างสูงสุดของอุณหภูมิทั้งสองนั้นมีค่าไม่เกิน 0.01

#### 4.3.6 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ

เนื่องจาก  $\Delta_j$  ที่ได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ จึงทำให้สามารถหาค่าอุณหภูมิที่กลางกระจกตัวใหม่ สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$T_k = T_k^0 + \delta T_k \quad (4.47)$$

เมื่อ  $T_k$  คือ ค่าอุณหภูมิตัวใหม่ของชั้นกระจกที่  $k$   
 $T_k^0$  คือ ค่าอุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นกระจกที่  $k$   
 $\delta T_k$  คือ ค่าผลต่างอุณหภูมিরวม

และค่า  $\delta T_k$  จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงเหลือของความร้อน (heat flux residual,  $\Delta_j$ ) ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \delta T_1 &= \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N \\ \delta T_2 &= \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N \\ &\dots \\ \delta T_N &= \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N \end{aligned} \quad (4.48)$$

จะเห็นได้ว่าในการหาค่า  $\delta T_k$  นั้นจำเป็นต้องทราบค่า  $\Delta_j$  และค่าอนุพันธ์ ต่าง ๆ เสียก่อน โดยที่ค่า  $\Delta_j$  สามารถที่จะคำนวณได้โดยตรงจากสมการ 4.42 และสมการ 4.43 แต่สำหรับพจน์อนุพันธ์ ถ้าพิจารณาที่สมการเดียวกันจะเห็นได้ว่าหาค่าได้ไม่ยากนัก เนื่องมาจากว่าในหนึ่งสมการมีค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกัน อยู่หลายตัวด้วยกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนคงเหลือแทนจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ \Delta_2 &= \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ &\dots \\ \Delta_N &= \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \end{aligned} \quad (4.49)$$

หรือสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น



$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix} \quad (4.50)$$

ดังนั้นจะทำให้สามารถหาค่า  $\delta T_k$  ใด ๆ ได้จาก

$$\begin{Bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix} \quad (4.51)$$

หรือ  $\delta T_k = [\partial \Delta_k / \partial T_j]^{-1} \times \Delta_j$

จะเห็นได้ว่าจากการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้สมมติในตอนแรกนั้นจะให้ค่า  $\Delta_j$  มีค่าที่ติดลบเสมอ เนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สมมติในตอนแรกนั้นไม่ได้รับผลของการดูดกลืนรังสีที่มีอยู่ในแต่ละชั้นกระจก ดังนั้นค่าอุณหภูมิใหม่ที่คำนวณได้นั้นจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่า  $\Delta_j$  นั้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากว่าค่า  $\Delta_j$  ที่ได้จะเป็นลบ จึงเป็นผลให้ค่า  $\delta T_k$  มีค่าลบไปด้วย ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการเสียใหม่เพื่อให้ได้ค่า  $\delta T_k$  มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ

$$\delta T_k = -[\partial \Delta_k / \partial T_j]^{-1} \times \Delta_j \quad (4.52)$$

จากสมการ 4.51 จะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้โดยพิจารณาจากค่าอนุพันธ์ของ  $\partial \Delta_i / \partial T_j$  แทน โดยค่าอนุพันธ์  $\partial \Delta_i / \partial T_j$  สามารถหาค่าได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ 4.42 และสมการ 4.43 เทียบกับอุณหภูมิที่กลางของแต่ละชั้นกระจก/มู่ลี่ โดยจะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2(hr_1 + hc_1)^2} \left( \frac{\partial hc_1(T_1 - T_0)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s0}^r}{\partial T_1} - hr_1 \right) \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2(hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2(T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} - hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} = & \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left( \frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s0}^r}{\partial T_2} \right) \\ & - \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_2} + hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left( \frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_3} \right) \\ & + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_3} \right) \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} = & -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} + hr_{gap} \right) \\ & + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_1} \right) \\ & + \frac{1}{R_5^2 (hr_5 + hc_5)^2} \left( (T_2 - T_4) \frac{\partial hc_5}{\partial T_1} + \left( \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_1} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.56)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} = & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_2} - hr_{gap} \right) \\ & + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_2} - hr_3 \right) \\ & + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_5^2 (hr_5 + hc_5)^2} \left( (T_2 - T_4) \frac{\partial hc_5}{\partial T_2} + \left( \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} - hr_5 \right) \right) \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left( \frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_3} \right) \\ & - \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_3} + hr_3 \right) \\ & + \frac{1}{R_5^2 (hr_5 + hc_5)^2} \left( (T_2 - T_4) \frac{\partial hc_5}{\partial T_3} + \left( \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_3} \right) \right) \end{aligned} \quad (4.58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_1} = & \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} \right) \\ & + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left( \frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_1} \right) \end{aligned} \quad (4.59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_2} = & -\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} + hr_3 \right) \\ & + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left( \frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} \right) \end{aligned} \quad (4.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_3}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left( \frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - hr_3 \right) \\ & + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left( \frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} - hr_4 \right) \end{aligned} \quad (4.61)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนทั้ง 3 โหมดหลัก คือ การแผ่รังสีคลื่นยาว การพาความร้อน และการนำความร้อน การเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิต่าง ๆ และการทำซ้ำจนค่าตอบลู่อเข้า จะทำให้ได้ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในทุก ๆ พื้นผิวได้ ส่งผลให้สามารถนำค่าอุณหภูมิจากของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (unirradiated mean radiant temperature,  $T_{tmrt}$ ) ได้ตามสมการที่ 3.9 ในบทที่ 3 และนำค่า  $T_{tmrt}$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยในกรณีที่รวมผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และการแผ่รังสีคลื่นยาวของผนังภายในห้อง ( $T_{smrt}$ ) ตามสมการที่ 3.11 จากนั้นจึงไปคำนวณค่า PMV และ PPD ได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 ต่อไปตามลำดับ

#### 4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมีความแตกต่างไปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัดส่วนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ แต่ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง วิธีการหาค่าการส่งผ่านรังสีของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และวิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิจากของชั้นกระจกและมู่ลี่ยังใช้หลักการเดิม โดยในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม สามารถพิจารณาแยกตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

1. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก
2. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก
3. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่
4. ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

#### 4.4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอกขึ้นอยู่กับทิศทางของอาคาร และความเร็วลมภายนอกเป็นหลัก ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Finlayson [27] ดังนี้

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม (windward side of the building)

$$h_0 = 8.07 \cdot V^{0.605} \quad \text{ถ้า } V > 2 \text{ m/s} \quad (4.62)$$

$$h_0 = 12.27 \quad \text{ถ้า } V < 2 \text{ m/s} \quad (4.63)$$

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ใต้ลม (leeward side of the building)

$$h_0 = 18.64(0.3 + 0.05V)^{0.605} \quad (4.64)$$

โดยที่  $V$  คือ ค่าความเร็วลมภายนอก, (m/s)

#### 4.4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นยังคงใช้ความสัมพันธ์เดียวกับในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองตามสมการที่ 4.17

#### 4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

การพาความร้อนในส่วนนี้นั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ที่ทำให้มีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน และไม่สามารถที่จะหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรงได้ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาได้พยายามศึกษาทั้งโดยจากการทดลอง [31-33] และจากกรรมวิธีเชิงตัวเลข [34-36] โดยจากการการศึกษาต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลัก ๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนในส่วนนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

ระยะของการติดตั้ง

มุมเอียงของมู่ลี่

ระดับของความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ตัวมู่ลี่

ค่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน

ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของผิวกระจก

### ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่

ในส่วนนี้พบว่าค่าที่ได้จากการทดลอง หรือกรรมวิธีเชิงตัวเลขเมื่อนำมาใช้จะให้ค่าไม่แม่นยำ จึงใช้สมการที่ 4.17 โดยสมมติช่องว่างระหว่างกระจกกับมู่ลี่ให้เหมือนกับช่องว่างระหว่างกระจก สมมติฐานนี้ให้ค่าแม่นยำกว่าผลเฉลยจากการนำค่าที่ได้จากการทดลองหรือกรรมวิธีเชิงตัวเลขเมื่อนำมาใช้

#### 4.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร สามารถจำลองได้เป็นการไหลผ่านแผ่นเรียบ และสามารถหาค่าได้จากแบบจำลองของกระจกผิวในจากความสัมพัทธ์

$$h_{c_{room}} = 1.77 \left( |T_{s2n} - T_{room}| \right)^{0.25} \quad (4.65)$$

ในส่วนของสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม จะไม่คำนึงถึงผลของอากาศระหว่างใบมู่ลี่และไม่คำนึงถึงมุมบิดของใบมู่ลี่ ดังนั้นสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ที่ใช้จึงเป็นสภาพนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำใบมู่ลี่เพียงอย่างเดียวคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมบิดของใบมู่ลี่ ในที่นี้มู่ลี่ที่ใช้ทำจากอลูมิเนียมซึ่งมีสภาพนำความร้อนเป็น 120 W/m·K สภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่จึงมีค่าเป็น 120 W/m·K

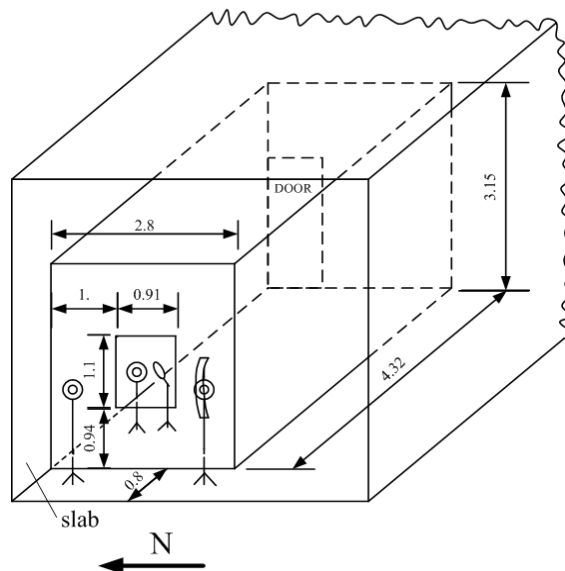
ในส่วนข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัดส่วนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมยังไม่ได้มีการศึกษาเพื่อหาสัดส่วนนี้ จึงประมาณให้รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ด้วยสัดส่วนที่เท่ากัน แต่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นได้มีการทดลองและปรับปรุงเพื่อหาสัดส่วนนี้ให้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับของจริงมากยิ่งขึ้น โดยแสดงวิธีการทดลองเพื่อหาสัดส่วนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่อยู่ในบทที่ 5

## บทที่ 5 การทดลอง

### ก. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 5.1. ห้องทดลอง

การทดลองกระทำที่ห้องทดลองชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยห้องทดลองมีขนาดกว้าง 2.8 เมตร ยาว 3.15 เมตร และสูง 4.32 เมตร ผนังด้านที่ไม่มีหน้าต่างกระจกทั้งสามด้านและเพดานเป็นผนังยิปซัม 2 ชั้น บุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านที่ติดตั้งหน้าต่างกระจกหันหน้าออกทางทิศตะวันตก ผนังด้านนอกเป็นผนังอะลูมิเนียม ส่วนด้านในเป็นผนังยิปซัมบุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว เพดานและผนังภายในของห้องทดลองทุกด้านทาด้วยสีดำ หน้าต่างกระจกที่ใช้ทดสอบมีความกว้าง 0.9 เมตร ความสูง 1.1 เมตร ขอบล่างของหน้าต่างกระจกอยู่สูงจากพื้นของห้องทดลองเป็นระยะ 0.94 เมตร เนื่องจากอาคารมีขอบอาคารทั้งด้านบนและด้านข้าง จึงส่งผลให้หน้าต่างกระจกถูกติดตั้งห่างจากขอบอาคารเป็นระยะ 0.8 เมตร โดยรายละเอียดต่างๆของห้องทดลองแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 รายละเอียดต่างๆของห้องทดลอง [23]

## 5.2 อุปกรณ์การวัดที่ใช้ในการทดลอง

### 5.2.1 อุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์ (Pyranometer)

อุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์ หรือ pyranometer ที่ใช้ในการทดลองเป็นของบริษัท Kipp&Zonen รุ่น CMP6 จำนวน 1 เครื่อง รุ่น CM6B จำนวน 2 เครื่อง และรุ่น CMP11 จำนวน 1 เครื่อง โดย pyranometer ตัวหนึ่งจะใช้งานประกอบกับแหวนบังเงา (shading ring) ค่า sensitivity ของ pyranometer ทั้ง 4 เครื่อง มีค่าเท่ากับ  $14.11 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ,  $10.95 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ,  $11.51 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  และ  $8.6 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  ตามลำดับ มีค่าการตอบสนองในระหว่างความยาวคลื่นแสง 310 ถึง 2800 นาโนเมตร มีค่าความเป็นเชิงเส้น 99% ในช่วง 0 ถึง  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  ระยะเวลาตอบสนอง 18 วินาที pyranometer ตัวหนึ่งจะถูกติดตั้งไว้ภายนอกห้องทดลองบนขาตั้งแบบ 3 ขา เพื่อเป็นตัวแทนในการวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก และอีกตัวหนึ่งจะถูกติดตั้งประกอบกับแหวนบังเงาเพื่อใช้ในการวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก ส่วน pyranometer ที่เหลืออีก 2 ตัวจะถูกติดตั้งภายในห้องทดลองโดยห่างจากระบบกระจกเป็นระยะ 0.2 เมตร และอยู่สูงจากพื้นห้องทดลองประมาณ 1.65 เมตร และ 1.35 เมตร สำหรับ Pyranometer ตัวบนและตัวล่างตามลำดับ pyranometer ทุกตัวถูกติดตั้งในแนวตั้งเพื่อรับรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงและกระจายในระนาบแนวตั้ง โดยเก็บข้อมูลทุก 30 วินาที ตั้งแต่เวลาประมาณ 12:00 น. – 17:30 น. และต่อข้อมูลเข้าเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) รูปการติดตั้ง pyranometer ภายนอกห้อง และรูปการติดตั้ง pyranometer พร้อมแหวนบังเงาแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ และรูปการติดตั้ง pyranometer ภายในห้องทดลองแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.2 การติดตั้ง pyranometer ภายนอกห้อง



รูปที่ 5.3 การติดตั้ง pyranometer พร้อมแหวนบังเงา





รูปที่ 5.4 การติดตั้ง pyranometer ภายในห้องทดลอง

### 5.2.2 เครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger)

เครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ที่ใช้เป็นของบริษัท National Instrument รุ่น NI9211 สามารถรับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาล็อกในช่วง  $\pm 80$  mV ย่านการวัดอยู่ในช่วง -40 ถึง 70 องศาเซลเซียส มีค่าความละเอียดของค่าที่วัดเท่ากับ 24 บิต โดยรูปที่ 5.5 แสดงเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger)



รูปที่ 5.5 แสดงเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) [23]

### 5.2.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

อุณหภูมิผิวต่างๆที่ต้องการวัดในการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิผิวของกระจกด้านนอกและด้านใน อุณหภูมิผิวของใบมู่ลี่ และอุณหภูมิของผนังต่างๆภายในห้อง รวมถึงอุณหภูมิอากาศภายนอกห้องทดลอง ใช้อุปกรณ์ในการวัด คือ เทอร์โมคอปเปิลชนิด J ซึ่งมีค่าความผิดพลาด  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส การติดตั้งเทอร์โมคอปเปิลชนิด J ที่ตำแหน่งต่างๆที่ต้องการวัดใช้เทปกาวยชนิดพิเศษสีดำที่มีค่าการดูดกลืนความร้อนต่ำ เพื่อให้เทอร์โมคอปเปิลอ่านค่าอุณหภูมิของสิ่งที่ต้องการวัดได้แม่นยำมากที่สุด จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้จากเทอร์โมคอปเปิลต่อเข้ากับเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) โดยรูปอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ [23]

### 5.2.4 เครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน

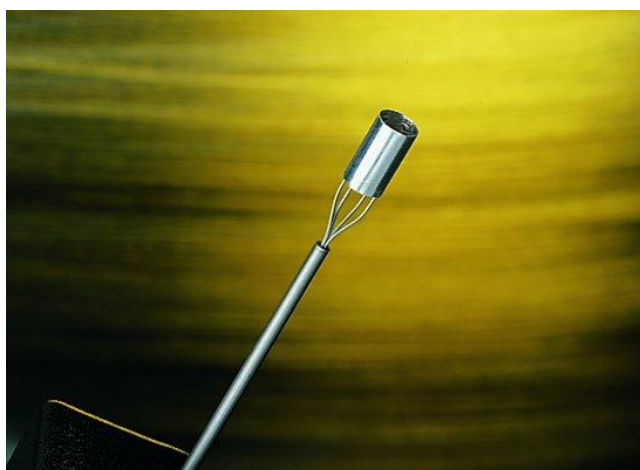
ความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายในห้อง ถูกประเมินโดยใช้หัววัดวัดสภาวะอากาศภายในห้องและบันทึกข้อมูลเข้าสู่เครื่องบันทึกข้อมูลของบริษัท Innova รุ่น Innova1221 โดยหัววัดต่างๆมีดังนี้

#### 5.2.4.1 หัววัดอุณหภูมิอากาศ

อุณหภูมิของอากาศภายในห้องทดลอง นอกจากจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคอปเปิลชนิด J แล้ว ยังมีการใช้หัววัดอุณหภูมิอากาศรุ่น MM0034 ซึ่งเป็นหัววัดเฉพาะสำหรับต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน โดยช่วงค่าการวัดอยู่ระหว่าง -20 ถึง 50

องศาเซลเซียส มีค่าความแม่นยำ  $\pm 0.2$  องศาเซลเซียส โดยหัววัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลอง แสดงอยู่ในรูปที่ 5.7

ส่วนอุณหภูมิอากาศภายนอกห้องทดลองและความเร็วอากาศภายนอกห้องทดลองใช้ เครื่องวัดแบบมือถือ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 หัววัดอุณหภูมิอากาศภายในห้องทดลอง [23]



รูปที่ 5.8 เครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบมือถือ [23]

#### 5.2.4.2 หัววัดอุณหภูมิผิว

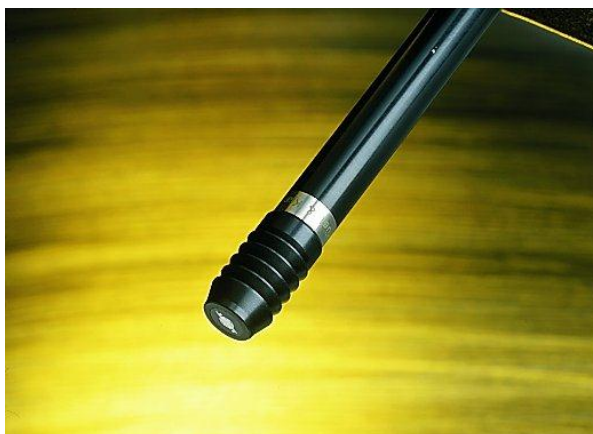
เป็นหัววัดรุ่น MM0035 ซึ่งเป็นหัววัดเฉพาะสำหรับต่อเข้ากับเครื่องเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน โดยช่วงค่าการวัดอยู่ระหว่าง -20 ถึง 100 องศาเซลเซียส ค่าความแม่นยำ  $\pm 0.5$  องศาเซลเซียส หัววัดอุณหภูมิผิวแสดงอยู่ในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 หัววัดอุณหภูมิผิว [23]

#### 5.2.4.3 หัววัดความชื้นของอากาศ

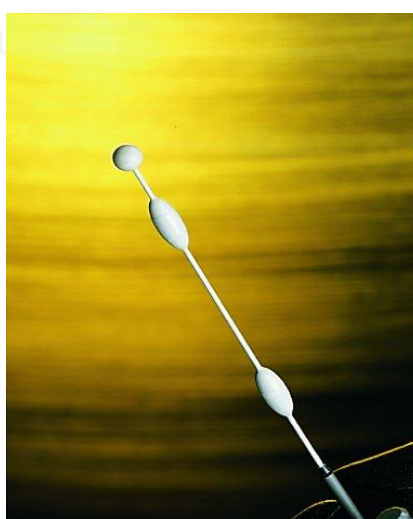
เป็นหัววัดรุ่น MM0037 สำหรับวัดค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ ซึ่งเป็นหัววัดเฉพาะสำหรับต่อเข้ากับเครื่องเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน โดยเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน รุ่น Innova1221 นั้นสามารถประมวลผลออกมาเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ โดยใช้ประกอบกับข้อมูลการวัดค่าอุณหภูมิของอากาศ มีช่วงการวัดของผลต่างระหว่างค่าอุณหภูมิของอากาศและค่าอุณหภูมิน้ำค้างน้อยกว่า 25 องศาเซลเซียส มีค่าความแม่นยำที่ของผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิอากาศ และค่าอุณหภูมิน้ำค้างน้อยกว่า 10 K เท่ากับ  $\pm 0.5$  K หรือ  $\pm 0.05$  kPa และถ้าผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิอากาศ และค่าอุณหภูมิน้ำค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 10 K ถึง 25 K จะมีค่าความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 1$  K หรือ  $\pm 0.1$  kPa โดยรูปที่ 5.10 แสดงหัววัดความชื้นของอากาศ



รูปที่ 5.10 หัววัดความชื้นของอากาศ [23]

#### 5.2.4.4 หัววัดความเร็วของอากาศ

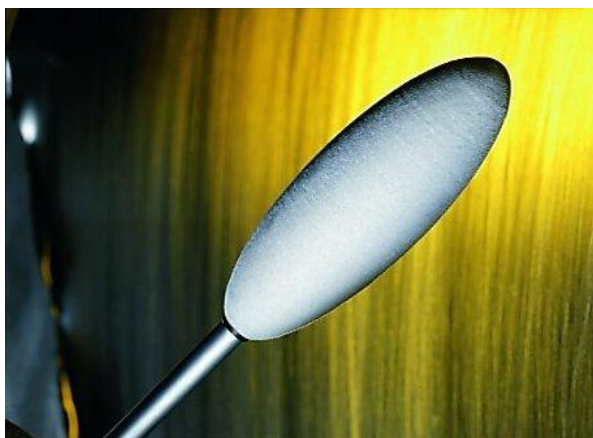
เป็นหัววัดรุ่น MM0038 ซึ่งเป็นหัววัดเฉพาะสำหรับต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน มีหลักการตรวจวัดความเร็วแบบอุณหภูมิต่างคองที่สามารถวัดความเร็วได้ที่อุณหภูมิต่ำได้ดี มีช่วงการวัดระหว่าง 0 ถึง 10 m/s มีความแม่นยำเท่ากับ  $\pm(0.05v_a + 0.05)$  m/s ( $v_a$  เป็นค่าความเร็วอากาศ) ที่ค่าความเร็วอากาศน้อยกว่า 1 m/s และมีความแม่นยำเท่ากับ  $\pm 0.1v_a$  m/s ที่ความเร็วอากาศระหว่าง 1 m/s ถึง 10 m/s โดยหัววัดความเร็วของอากาศแสดงอยู่ในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 หัววัดความเร็วของอากาศ [23]

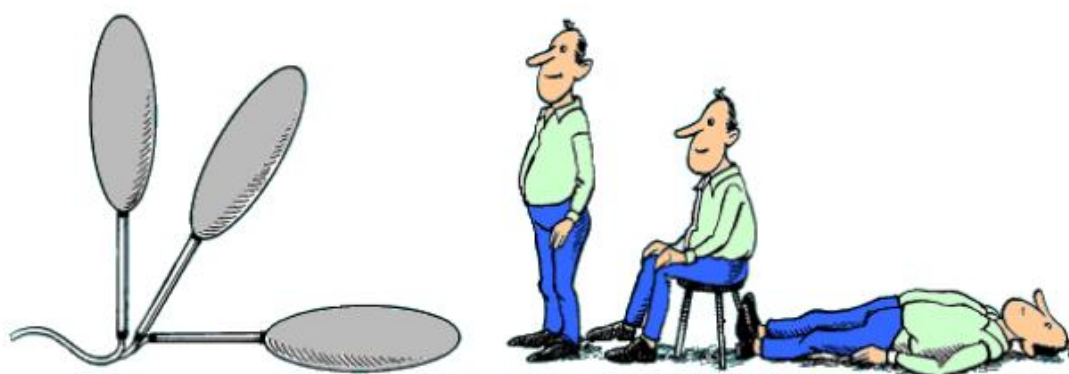
#### 5.2.4.5 หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ

เป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน โดยหัววัดเป็นรูปทรงวงรีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ยาว 160 มิลลิเมตร ตัวหัววัดถูกออกแบบให้มีค่าอัตราส่วนของการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีกับการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนเหมือนกับของร่างกายมนุษย์ การเอียงท่ามุมของหัววัดจะจำลองสภาพของมนุษย์ที่อยู่ในตำแหน่งยืน นั่งและนอน รูปที่ 5.12 แสดงหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ และรูปที่ 5.13 แสดงตำแหน่งต่างๆของหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟในการจำลองสภาพของมนุษย์ในตำแหน่งต่างๆ



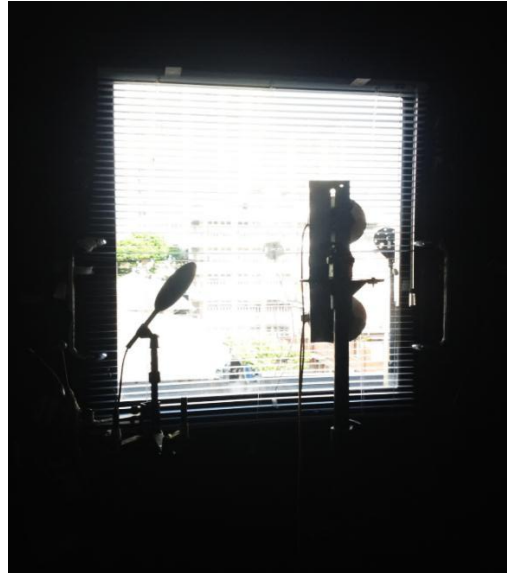
รูปที่ 5.12 หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ [23]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

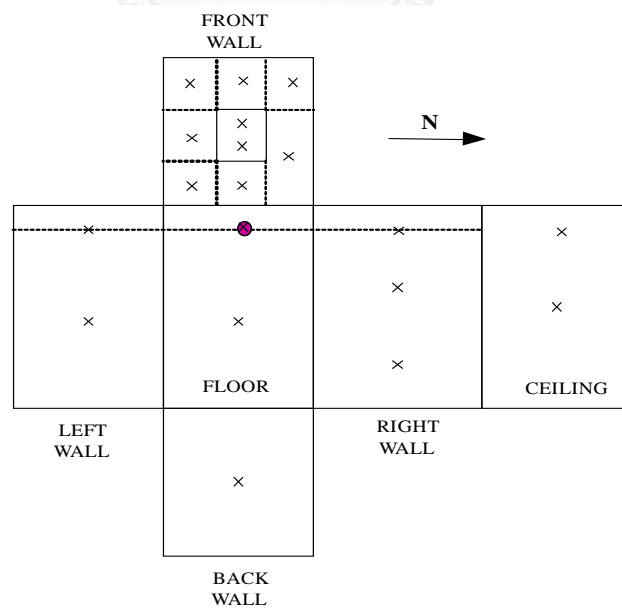


รูปที่ 5.13 ตำแหน่งต่างๆของหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟในการจำลองสภาพของมนุษย์  
ในตำแหน่งต่างๆ [23]

รูปที่ 5.14 และ 5.15 แสดงถึงลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดในห้องทดลอง และตำแหน่งการติดตั้งการวัดอุณหภูมิผิวของผนังภายใน



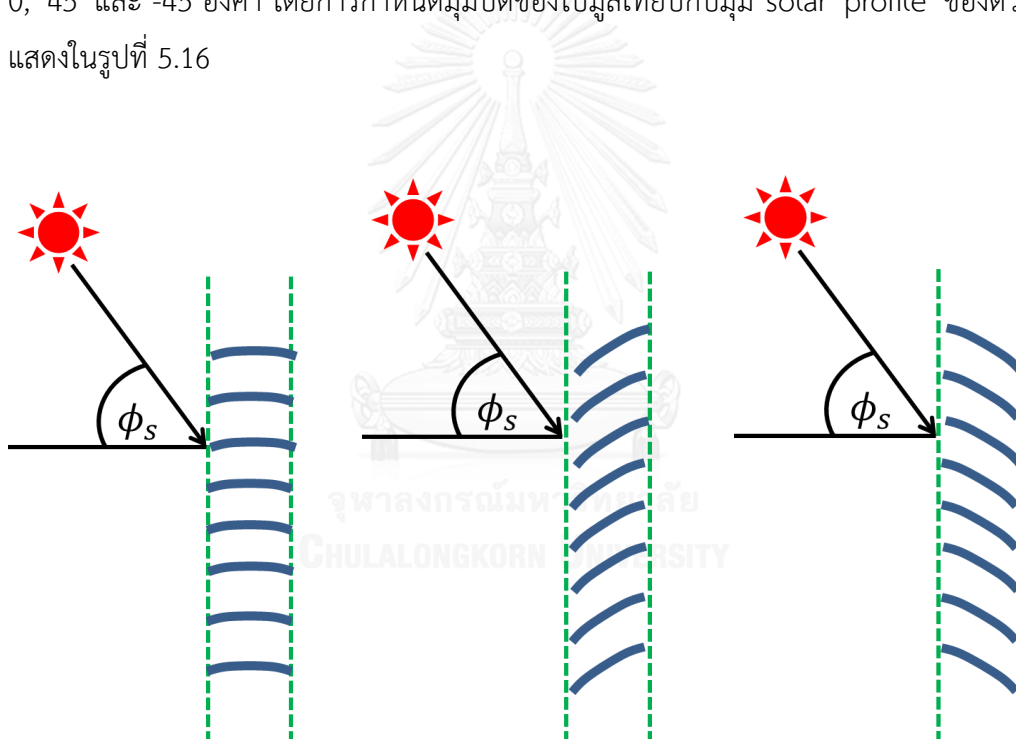
รูปที่ 5.14 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดในห้องทดลอง



รูปที่ 5.15 ตำแหน่งการติดตั้งการวัดอุณหภูมิผิวของผนังภายใน [23]

### 5.3 วิธีการทดลอง

ภายในห้องทดลอง เปิดเครื่องปรับอากาศที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส กำหนดให้แบบจำลองของผู้อยู่อาศัยภายในห้องแต่งกายแบบผู้ทำงานปกติ (office) (clothing insulation = 0.5 clo.) และนั่งทำงานภายในสำนักงาน (1.2 met โดย 1 met = 58 W/m<sup>2</sup>) หันข้างเข้าสู่หน้าต่างกระจกเป็นระยะห่าง 0.2 เมตร หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟจึงถูกติดตั้งให้ทำมุมเอียง 30 องศา กับแกนแนวดิ่งและวางห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 0.2 เมตร เพื่อจำลองลักษณะของผู้อยู่อาศัย รวมทั้งหัววัดอุณหภูมิของอากาศภายในห้อง หัววัดความชื้น หัววัดความเร็วลม ก็ถูกติดตั้งห่างจากหน้าต่างกระจกเป็นระยะเท่ากัน ชนิดของกระจกที่ใช้ทำการทดลอง คือ กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร และชนิดของมู่ลี่ที่ใช้ทำการทดลองเป็นแบบแนวนอน ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม และปรับมุมบิดใบมู่ลี่เป็น 0, 45 และ -45 องศา โดยการกำหนดมุมบิดของใบมู่ลี่เทียบกับมุม solar profile ของดวงอาทิตย์ แสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.16 แสดงมุม solar profile ( $\phi_s$ ) และใบมู่ลี่ที่มุมบิด 0, 45 และ -45 องศา ตามลำดับ



รายละเอียดและคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกและมู่ลี่ที่ใช้ในการทดลองมีดังนี้

### 5.3.1 กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร

สภาพนำความร้อน 0.917 W/m-K

ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก 0.80

ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้า และด้านหลัง 0.08

ค่าการดูดกลืนรังสี 0.12

ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า 0.84

ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง 0.84

### 5.3.2 มู่ลี่ ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม

สภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่ 120 W/m-K

ความกว้างของใบมู่ลี่ วัดตามผิวโค้ง 25.4 มิลลิเมตร

ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบ 20.0 มิลลิเมตร

ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่ 71.5 มิลลิเมตร

ความหนาของใบมู่ลี่ 0.3 มิลลิเมตร

ค่าการสะท้อนรังสี (คลื่นสั้น) 0.71

ค่าการเปล่งรังสี 0.83

ในการทดลอง จะวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน รังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง อุณหภูมิของอากาศภายนอกและภายในห้อง ค่าความเร็ววอากาศภายนอกและภายในห้อง ค่าความชื้นของอากาศภายในห้อง อุณหภูมิผิวของกระจกทั้งด้านนอกและด้านใน อุณหภูมิผิวของใบมู่ลี่ อุณหภูมิผิวของผนังห้องทั้ง 5 ด้านเพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิผิวด้านในของห้องทดลอง และอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดทั้งหมดจะถูกประมวลผลและข้อมูลบางส่วนจะถูกนำไปเป็นข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้มีการปรับปรุงใหม่ในบทที่ 4 โดยข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงอยู่ในภาคผนวก ก จากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งรายละเอียดของการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 6

## ข. การทดลองเพื่อปรับปรุงข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หนึ่งในข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญ คือ รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย ที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ซึ่งจากการวางตัวของ pyranometer ในแนวดิ่งทำให้รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดได้เป็นผลมาจากทั้งรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน โดยสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินนั้นไม่ได้เป็นสัดส่วนที่เท่ากัน จึงมีความจำเป็นต้องทราบถึงสัดส่วนนี้เพื่อให้ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำมากที่สุด โดยการทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดิน กระทำเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบบนพื้นที่แนวดิ่ง บริเวณดาดฟ้าของตึกโคลัมโบ

การทดลองที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อต้องการหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินโดยตรง โดยไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆรอบบริเวณที่วัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ pyranometer จำนวน 4 ตัวและแหวนบังเงา (shading ring) ตามหัวข้อที่ 5.2.1 และเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ตามหัวข้อที่ 5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินบริเวณดาดฟ้าของตึกโคลัมโบ

ความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.1 และ 5.2 [37] แสดงความสัมพันธ์ของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมตกที่กระทบพื้นที่แนวตั้ง ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน และ มุม incident ซึ่งได้จากการทดลองนี้

$$I_{glo,ver} = I_{dir,nor} \cos \theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{I_{glo,hor} \rho_g}{2} \quad (5.1)$$

$$I_{glo,hor} = I_{dir,nor} \sin \theta_i + I_{dif} \quad (5.2)$$

เมื่อ	$I_{glo,ver}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้ง (ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง), ( $W/m^2$ )
	$I_{glo,hor}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ (ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ), ( $W/m^2$ )
	$I_{dif}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ (ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)), ( $W/m^2$ )
	$I_{dir,nor}$	คือ	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์, ( $W/m^2$ )
	$\rho_g$	คือ	ค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหาด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ ใกล้เคียงกัน
	$\theta_i$	คือ	มุม incident ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา, ( $^\circ$ )

จากการจัดรูปสมการที่ 5.1 และ 5.2 จะได้ว่า

$$I_{glo,ver} = I_{dir,nor} \cos \theta_i + [I_{dif,sky} + I_{dif,grn}] + \left[ \frac{I_{dir,nor} \sin \theta_i \cdot \rho_g}{2} \right] \quad (5.3)$$

โดย  $I_{dif,sky} = \frac{I_{dif}}{2}$  และ  $I_{dif,grn} = \frac{I_{dif} \cdot \rho_g}{2}$  ในกรณี isotropic sky condition

วิธีการทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินกระทำโดยนำข้อมูลค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 5.2 มาคูณด้วยค่า cosine ของมุม incident ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ และค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดินที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบกว่าหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน แทนค่าลงในสมการที่ 5.1 จากนั้นตรวจสอบค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 5.1 เปรียบเทียบกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง หากพบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.1 สามารถทดลองวัดและพิสูจน์ได้จริงและค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  มีความแม่นยำในระดับที่เชื่อถือได้ จากนั้นสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินจึงคำนวณจากสมการที่ 5.3 ได้ดังนี้

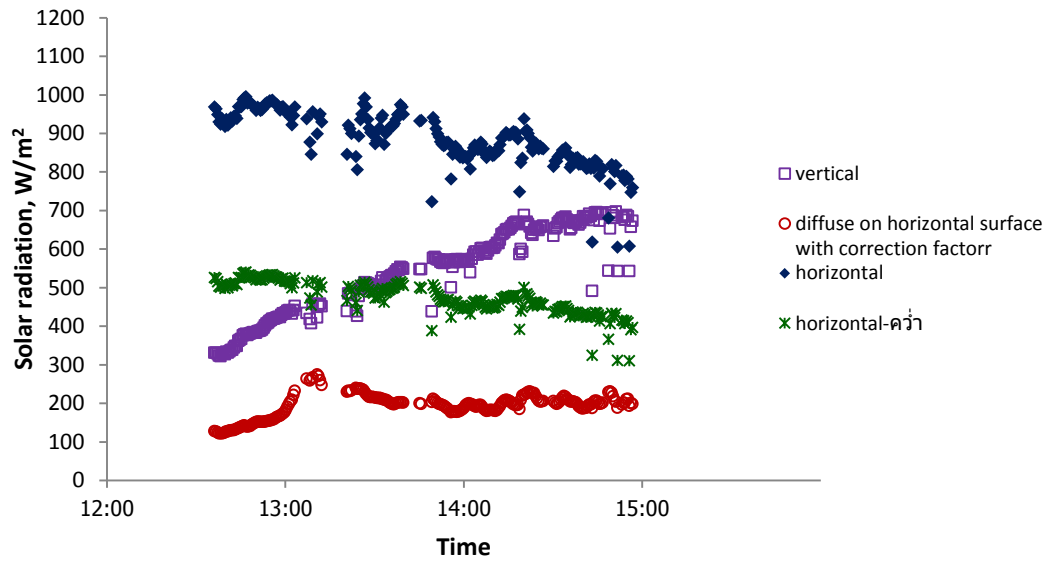
$$\text{สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า มีค่าเป็น } \frac{I_{dif,sky}}{I_{dif,sky}+I_{dif,grn}}$$

$$\text{ซึ่งมีค่าเท่ากับ } \frac{1}{1+\rho_g}$$

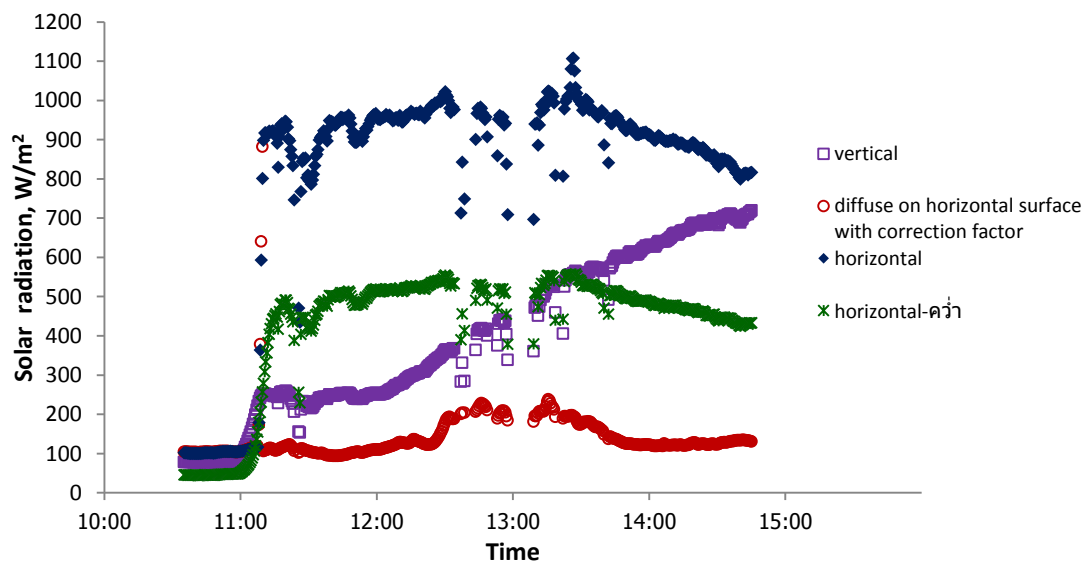
$$\text{และ สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน มีค่าเป็น } \frac{I_{dif,grn}}{I_{dif,sky}+I_{dif,grn}}$$

$$\text{ซึ่งมีค่าเท่ากับ } \frac{\rho_g}{1+\rho_g} \text{ ตามลำดับ}$$

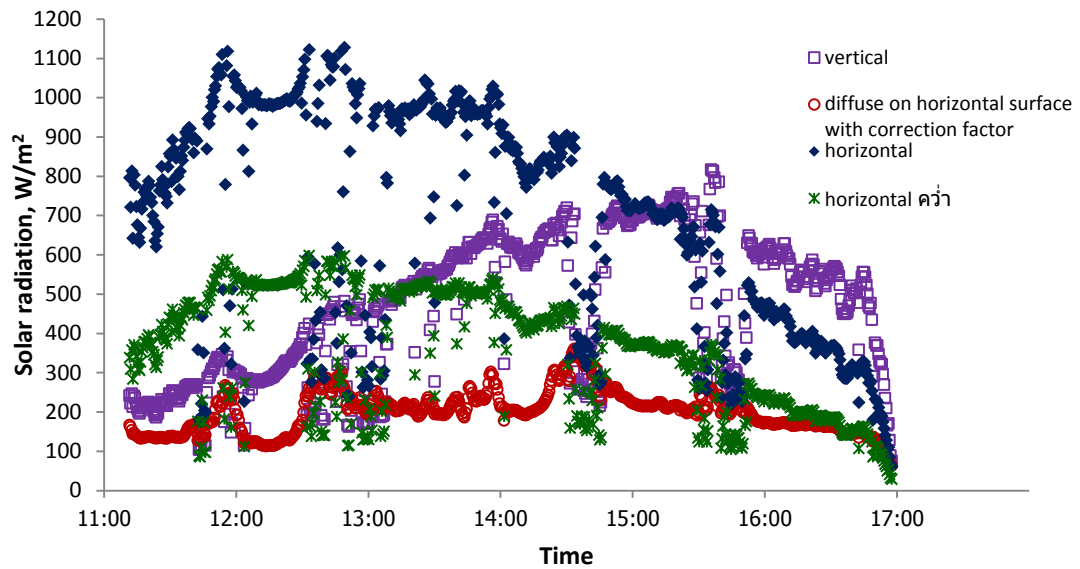
การทดลองเพื่อวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์และนำมาคำนวณตั้งวิธีการข้างต้นเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินนี้ใช้เวลา 3 วัน คือ วันที่ 18 พฤษภาคม 2558 19 พฤษภาคม 2558 และ 21 พฤษภาคม 2558 และผลที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 5.18 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ



รูปที่ 5.18 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 18 พฤษภาคม 2558



รูปที่ 5.19 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 19 พฤษภาคม 2558



รูปที่ 5.20 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 21 พฤษภาคม 2558

จากรูปที่ 5.18, 5.19 และ 5.20 จะเห็นได้ว่า กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย กับกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ มีระยะห่างค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาประมาณหลัง 12:00 ถึงไม่เกิน 15:30 น. ซึ่ง pyranometer แต่ละตัวได้รับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ ค่าที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำจึงเปรียบเสมือนกับค่าที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงายคูณด้วยค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง ส่วนค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้งมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจาก pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้งหันหน้าทางทิศตะวันตก แต่ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออกซึ่งอยู่ด้านหลังของ pyranometer จึงส่งผลให้ pyranometer สามารถอ่านค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้หลังจากที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มาอยู่บริเวณด้านหน้าของ pyranometer แล้ว ซึ่งเป็นเวลาประมาณหลัง 12:00 น. เป็นต้นไป และจะอ่านค่าได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 15:30 น. จากนั้นค่าที่อ่านได้จะเริ่มลดลง ส่วนค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring) มีค่าค่อนข้างต่ำและสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัด

ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน

โดยช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกันจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณหลัง 12:00 ถึงไม่เกิน 15:30 น. ซึ่งจากการทดลองบนดาวตฟ้าตีกโคลัมโบสามารถหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  มีค่าประมาณ 0.53 เมื่อทำการตรวจสอบค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 5.1 เปรียบเทียบกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริงในช่วงเวลาดังกล่าว พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งยอมรับได้ ดังนั้น สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณดาวตฟ้าของตีกโคลัมโบ จึงสามารถคำนวณได้เป็น 0.65 และ 0.35 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณดาวตฟ้าของตีกโคลัมโบ แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

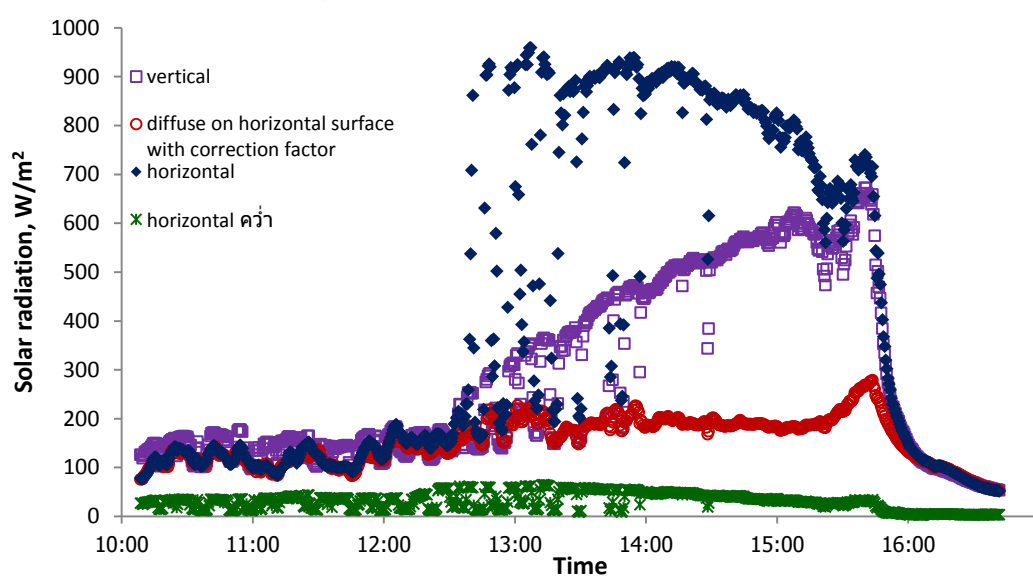
การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุ่ลี่ของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล

การทดลองที่ 2 ใช้หลักการเกี่ยวกับการทดลองที่ 1 ที่ต้องการหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้ง ในที่นี้ คือ ระบบหน้าต่างกระจกติดมุ่ลี่ แต่พื้นที่บริเวณโดยรอบที่ทำการวัดไม่ได้เป็นพื้นที่โล่งเช่นเดียวกับดาวตฟ้าของตีกโคลัมโบ เพราะมีผลของทั้งขอบอาคารด้านบน ด้านข้าง ผนังห้องทดลองและขอบระเบียงเป็นสิ่งกีดขวางรังสีแสงอาทิตย์ เนื่องจากต้องการหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้ง จึงต้องการลดการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ที่มาจากสิ่งกีดขวางบริเวณด้านบนและด้านข้างของอุปกรณ์การวัดรังสีแสงอาทิตย์ ในที่นี้ใช้วิธีนำกระดาษสีดำมาแปะในบริเวณขอบอาคารด้านข้างและผนังภายนอกของห้องทดลองรวมทั้งกระจกหน้าต่าง เพื่อให้อุปกรณ์การวัดรังสีแสงอาทิตย์วัดค่าได้เฉพาะรังสีแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์ทั้งรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นบริเวณด้านหน้าของอุปกรณ์การวัดรังสีแสงอาทิตย์ เพื่อนำค่าที่ได้จากการวัดไปใช้หาค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดิน หรือ  $\rho_g$  และหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุ่ลี่เช่นเดียวกับในการทดลองที่ 1 ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดและการจัดเตรียมพื้นที่บริเวณระเบียงของห้องทดลองแสดงในรูปที่ 5.21



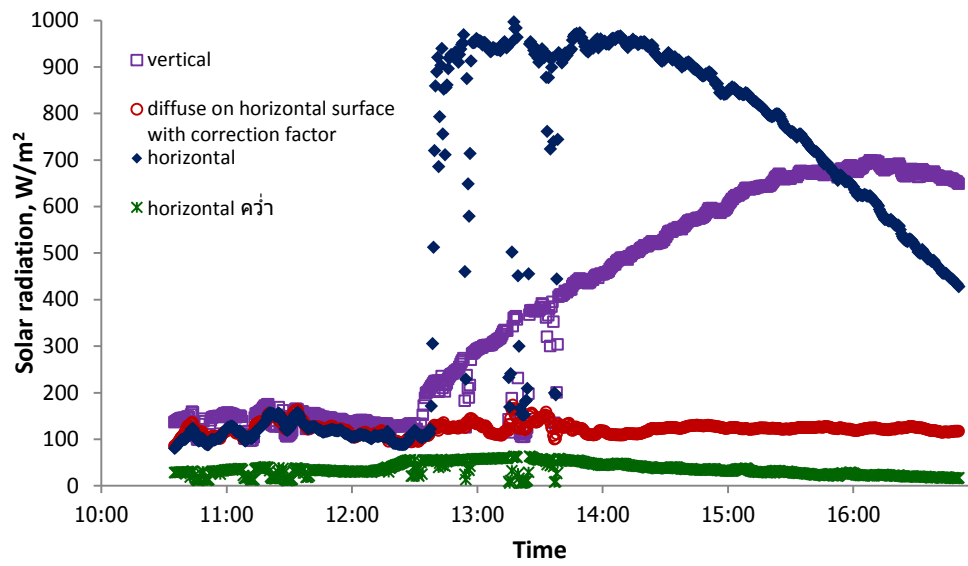
รูปที่ 5.21 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและการจัดเตรียมพื้นที่บริเวณระเบียงของห้องทดลอง

การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุขของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกลนี้ใช้เวลา 6 วัน ในช่วงวันที่ 26 พฤษภาคม ถึง 9 มิถุนายน 2558 และผลที่ได้จากการวัดแสดงในรูปที่ 5.22-5.27 ตามลำดับ

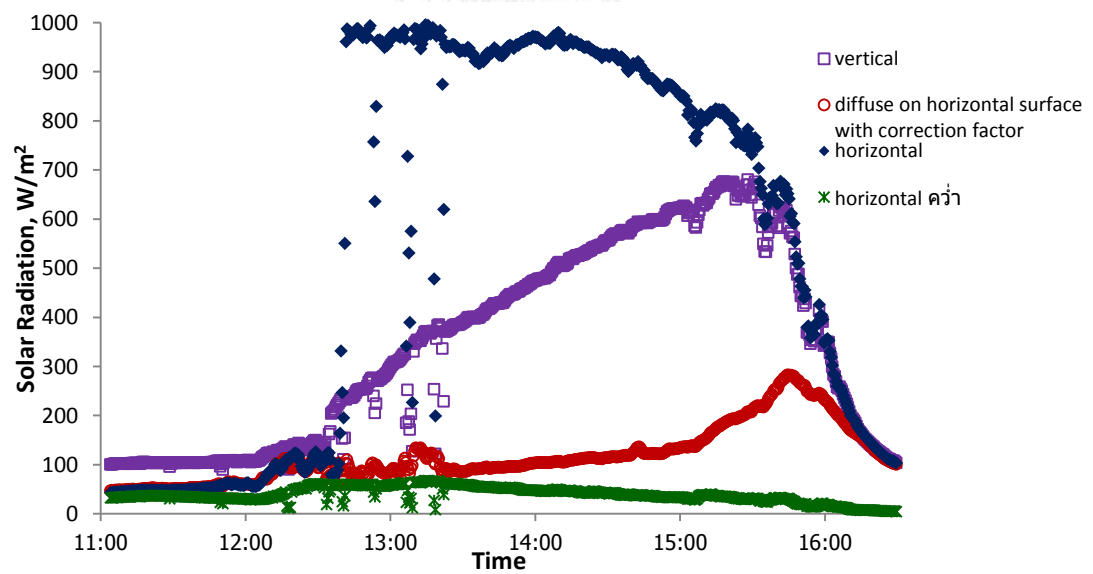


รูปที่ 5.22 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 26 พฤษภาคม 2558

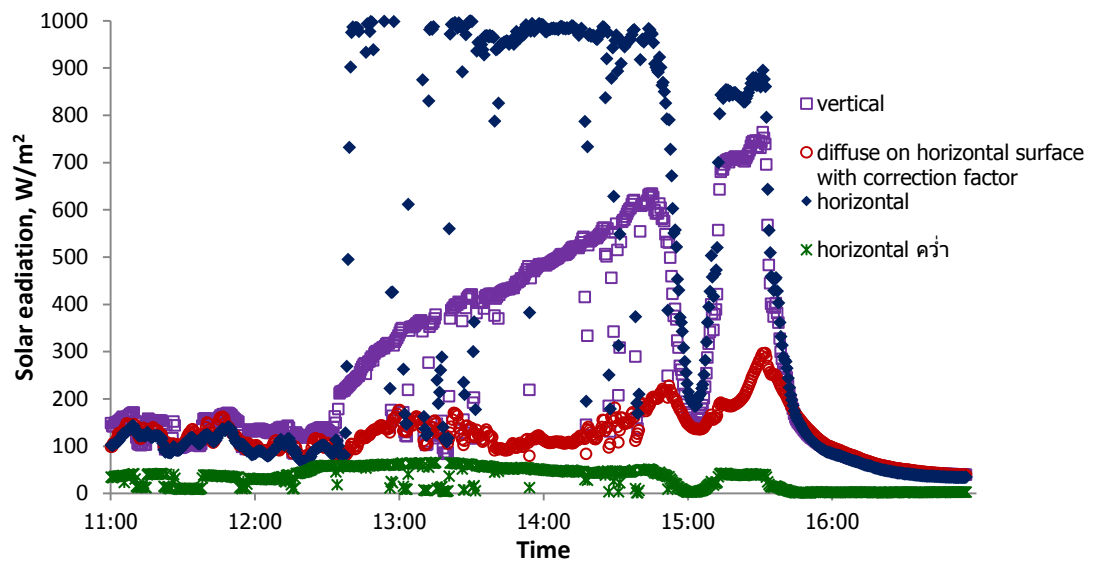




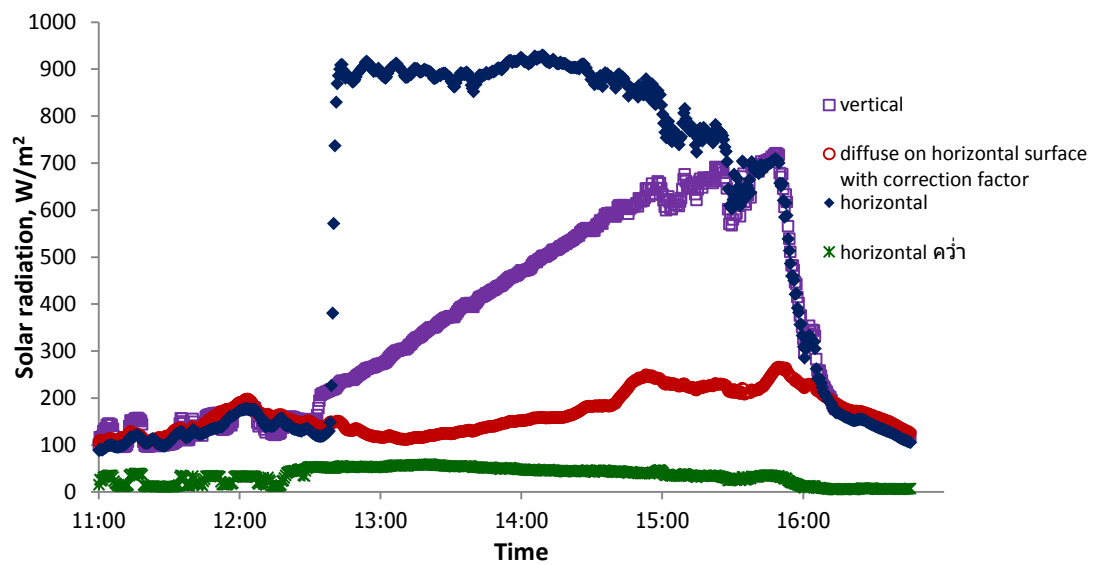
รูปที่ 5.23 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 28 พฤษภาคม 2558



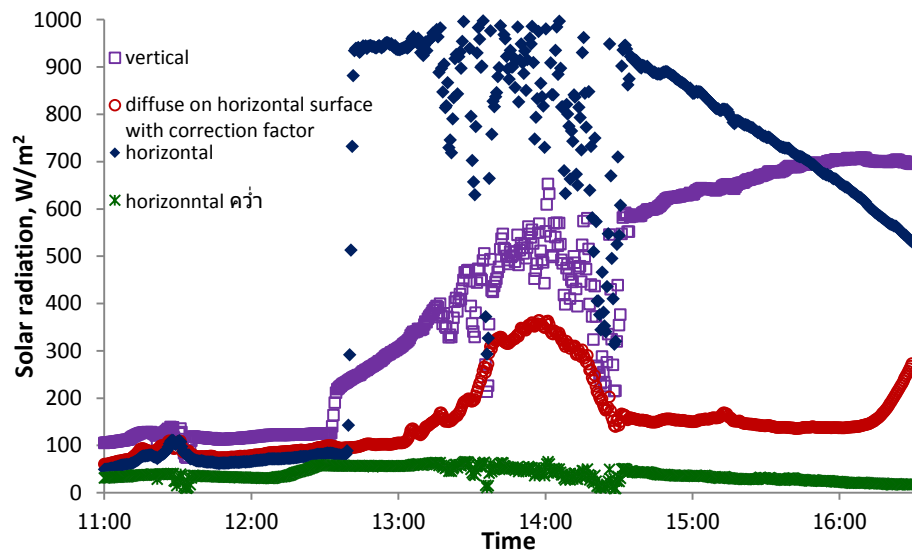
รูปที่ 5.24 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 29 พฤษภาคม 2558



รูปที่ 5.25 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 4 มิถุนายน 2558



รูปที่ 5.26 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 5 มิถุนายน 2558



รูปที่ 5.27 ผลที่ได้จากการวัดของ pyranometer ทั้ง 4 ตัว ในวันที่ 9 มิถุนายน 2558

จากรูปที่ 5.22 ถึง 5.27 ซึ่งเป็นกราฟของค่าที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งบนระเบียงของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล โดยระเบียงหันหน้าออกไปทางทิศตะวันตก และ pyranometer ทุกตัวติดตั้งในลักษณะเช่นเดียวกับของการทดลองที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าที่อ่านได้จาก pyranometer ทุกตัวในช่วงเวลาประมาณก่อน 12:30 น. มีค่าที่ต่ำมาก เนื่องจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่มาจากทิศตะวันออกและยังไม่พ้นการบังของขอบอาคารฮันส์ บันตลี ในช่วงเวลาดังกล่าว pyranometer แต่ละตัวจึงอ่านค่าได้เพียงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย โดยไม่มีในส่วน of ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง แต่เมื่อดวงอาทิตย์เคลื่อนที่พ้นจากการบังของขอบอาคารฮันส์ บันตลีแล้ว ค่าที่ได้จากการวัดของ pyranometer แต่ละตัวจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับในการทดลองที่ 1 บนดาดฟ้าของตึกโคลัมโบ กล่าวคือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้งมีลักษณะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 16:00 น. จากนั้นค่าที่อ่านได้จะเริ่มลดลง ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหายไปกับกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ มีระยะห่างค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาประมาณหลัง 12:30 ถึงไม่เกิน 15:00 น. ซึ่ง pyranometer แต่ละตัวได้รับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ แต่จะเห็นว่ากราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากเนื่องจากบริเวณระเบียงของห้องทดลองมีสิ่งกีดขวางค่อนข้างมาก รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสิ่งกีดขวางเหล่านั้นจึงมีทั้งสะท้อนและถูกดูดกลืนไว้ ส่งผลให้ค่ารังสี

แสงอาทิตย์ที่ได้จากการสะท้อนจากพื้นดินที่วัดได้มีค่าต่ำมาก ส่วนค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring) มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัด และจากรูปที่ 5.24 และ 5.26 พบว่ากราฟของค่าที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้งและแนวระนาบหงายมีค่าที่ตกลงมาเพียงชั่วคราว โดยเป็นผลมาจากการที่รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกบังด้วยเมฆ ซึ่งเมื่อเมฆเคลื่อนที่ออกจากการบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงแล้ว กราฟก็จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ

ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ของการทดลองบนห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ได้ค่าประมาณ 0.05 ดังนั้นสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุขของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล จึงสามารถคำนวณได้เป็น 0.95 และ 0.05 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุขของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล แสดงอยู่ในภาคผนวก ข

## บทที่ 6

### ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

ในบทนี้ ส่วนแรกจะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของแบบจำลองการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ แบบจำลองการพาความร้อนทั้งในส่วนของ การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และการพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมและค่าที่ได้จากการตรวจวัดของการทดลอง เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างจากการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม และส่วนที่สองจะกล่าวถึงผลลัพธ์จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

#### 6.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง

จากบทที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยความแตกต่างในส่วนของ การจำลองสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ จะส่งผลถึงค่าอุณหภูมิผิวของชั้นกระจกและชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ไม่ส่งผลต่อค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ซึ่งขึ้นอยู่กับตรีโกณมิติของรูปแบบการจำลองลักษณะทางกายภาพของแบบจำลอง จากสมการที่ 3.11 พบว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นผลมาจากทั้งค่าอุณหภูมิผิวผนังโดยรอบและผลจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวคนซึ่งในส่วนของ การส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมได้มีการตรวจสอบกับค่าที่วัดได้จากการทดลองและพบว่ามีความแม่นยำค่อนข้างมาก [38] ดังนั้นค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะมีความแม่นยำหรือไม่จึงขึ้นกับผลของค่าอุณหภูมิผิวผนังโดยรอบ ซึ่งในที่นี้ผนังห้องทุกผนังถูกประมาณให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ผนังส่วนที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นเพียงส่วนหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เท่านั้น ซึ่งก็คือ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลกระทบต่อตัวแปร  $T_{mrt}$  เท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อพจน์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่าน

รังสีแสงอาทิตย์ที่มาจากกระทบบนผิวคน ดังนั้น การตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนนี้เพื่อให้สามารถทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ จึงสามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์เฉพาะในส่วนของอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลองได้ แต่เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้จำลองชั้นมู่ลี่เป็นเสมือนชั้นกระจกอีกชั้นหนึ่ง (effective layer) ซึ่งมีอุณหภูมิผิวทั้งด้านนอกและด้านใน แต่ในของจริงมู่ลี่มีลักษณะเป็นใบๆ การวัดอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ของจริงจึงต้องใช้เป็นค่าอุณหภูมิด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพ ( $T_{eff,mea}$ ) ซึ่งสามารถหาได้โดยการรวมผลของการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ออกมาจากกระจกและมู่ลี่ตามสัดส่วนของพื้นที่ภาพฉาย แล้วทำการเฉลี่ยค่าอุณหภูมิของผิวกระจกและมู่ลี่ โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ภาพฉายของแต่ละผิว ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของกระจกและมู่ลี่ มีค่าการเปล่งรังสีเท่ากัน ดังจะได้ความสัมพันธ์ [39]

$$T_{eff,mea} = [F_{sh} \cdot T_b^4 + (1 - F_{sh}) \cdot T_g^4]^{0.25} \quad (6.1)$$

เมื่อ	$T_b$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ที่วัดได้, (K)
	$T_g$	คือ	ค่าอุณหภูมิผิวของกระจกที่วัดได้, (K)
	$F_{sh}$	คือ	shading fraction โดย $F_{sh} = \frac{A_b}{A_{Total}}$
	$A_b$	คือ	พื้นที่ภาพฉายของผิวมู่ลี่, ( $m^2$ )
	$A_{Total}$	คือ	พื้นที่ภาพฉายรวมของผิวกระจกและมู่ลี่, ( $m^2$ ) โดย $A_{Total} = A_b + A_g$
	$A_g$	คือ	พื้นที่ภาพฉายของผิวกระจก, ( $m^2$ )

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ในส่วนของอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น กับค่าที่ได้จากการทดลอง จะพิจารณาเป็น 4 กรณี ได้แก่

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

การเปรียบเทียบผลลัพธ์จะกระทำที่มุมบิดใบมู่ลี่ 3 ลักษณะ คือ มุมบิด 0, 45 และ -45 องศา แต่ละมุมบิดจะพิจารณาที่มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ 3 ตัวอย่าง ได้แก่ มุมตกกระทบประมาณ 40, 45 และ 50 องศา ดังนี้

6.1.1 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

มุมตกกระทบ $\theta$	$I_{dir}$ ( $W/m^2$ )	$I_{dif}$ ( $W/m^2$ )	$v$ (m/s)	$t_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	$t_{in}$ ( $^{\circ}C$ )
40.78 $^{\circ}$	282.66	209.35	1.2	33.35	25.3
45.94 $^{\circ}$	267.59	205.40	1.2	33.32	24.7
52.90 $^{\circ}$	380.73	225.31	1.2	33.42	24.7

ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา แสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

	$\theta = 40.78^\circ$	$\theta = 45.94^\circ$	$\theta = 52.90^\circ$
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง $T_{eff,mea}$ , ( $^\circ\text{C}$ )	37.36	38.02	39.56
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม, ( $^\circ\text{C}$ )	40.75	40.59	43.92
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	38.71	38.44	41.24
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	39.29	39.05	42.12
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	37.66	37.36	40.03

จากตารางที่ 6.1 เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา จะเห็นว่าเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองเดิมจะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองค่อนข้างมาก เมื่อปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ พบว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าลดลงและเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น แต่ยังมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย และเมื่อปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน แต่ยังคงน้อยกว่าเมื่อปรับปรุงในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ เมื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ไปด้วยกัน พบว่าค่าอุณหภูมิผิว



ด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะลดลงอีกและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น

6.1.2 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

มุมตกกระทบ $\theta$	$I_{dir}$ ( $W/m^2$ )	$I_{dif}$ ( $W/m^2$ )	$v$ (m/s)	$t_{out}$ ( $^{\circ}C$ )	$t_{in}$ ( $^{\circ}C$ )
40.22 $^{\circ}$	397.71	188.82	1.2	34.25	24.6
45.36 $^{\circ}$	358.96	211.46	1.2	34.05	24.8
52.31 $^{\circ}$	408.45	204.39	1.2	34.33	25.1

ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา แสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา

	$\theta =$ 40.22 $^{\circ}$	$\theta =$ 45.36 $^{\circ}$	$\theta =$ 52.31 $^{\circ}$
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง $T_{eff,mea}$ , ( $^{\circ}C$ )	39.56	37.48	36.93
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม, ( $^{\circ}C$ )	42.76	42.20	43.09
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่, ( $^{\circ}C$ )	42.05	41.61	42.35

ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, (°C)	39.93	39.49	40.32
ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, (°C)	38.90	37.92	39.28

จากตารางที่ 6.2 เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา จะเห็นว่าเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองเดิมจะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองค่อนข้างมาก เมื่อปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ พบว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าลดลง แต่ลดลงน้อยกว่าเมื่อปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เมื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ไปด้วยกัน พบว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะลดลงอีกและมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น

6.1.3 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีดังนี้

มุมตกกระทบ $\theta$	$I_{dir}$ (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ (W/m <sup>2</sup> )	$v$ (m/s)	$t_{out}$ (°C)	$t_{in}$ (°C)
41.19°	439.62	203.37	1.2	34.26	25.3
46.34°	459.11	190.82	1.2	33.79	26.6
51.54°	466.93	135.05	1.2	33.98	25.0

ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลองเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา แสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

	$\theta = 41.19^\circ$	$\theta = 46.34^\circ$	$\theta = 51.54^\circ$
ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง $T_{eff,mea}$ , ( $^\circ\text{C}$ )	32.66	34.79	34.53
ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม, ( $^\circ\text{C}$ )	36.16	36.00	35.59
ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	34.51	34.49	34.14
ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	34.50	34.66	33.95
ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $^\circ\text{C}$ )	33.69	32.40	33.27

จากตารางที่ 6.3 เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นว่าเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองเดิมจะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองแต่ยังน้อยกว่ากรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา เมื่อปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ หรือปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ พบว่าค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จาก

แบบจำลองมีค่าลดลงใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างมาก โดยทั้งสองการปรับปรุงสามารถลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ลงได้ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบ หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ไปด้วยกัน พบว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองจะลดลงอีก และมีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาผลการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทั้ง 3 กรณี คือ มุมบิดใบมู่ลี่ที่ 0, 45 และ -45 องศา พบว่าเมื่อปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ไปด้วยกันจะลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ได้มากกว่าการปรับปรุงเฉพาะส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ หรือปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง

เนื่องจากการปรับปรุงในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ ได้พิจารณาถึงสภาพนำความร้อนของอากาศภายในช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ซึ่งมีค่าประมาณ  $0.0241 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  จากตารางที่ 4.2 มาเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณสภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ โดยคำนวณเป็นสัดส่วนของอากาศและใบมู่ลี่ในหน่วยย่อยที่พิจารณาและคำนวณออกมาเป็นสภาพนำความร้อนประสิทธิผลของชั้นมู่ลี่ตามสมการที่ 4.32 ซึ่งแตกต่างจากในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมที่ใช้เป็นสภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่ที่ทำจากอลูมิเนียมซึ่งมีค่า เท่ากับ  $120 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  คงที่ จะเห็นได้ชัดว่าสภาพนำความร้อนของอากาศและสภาพนำความร้อนของอลูมิเนียมที่ใช้ทำใบมู่ลี่มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างการจำลองชั้นมู่ลี่ให้มีลักษณะของการนำความร้อนของอากาศมาพิจารณาด้วยจึงมีความใกล้เคียงกับมู่ลี่ของจริงมากยิ่งขึ้น และยังมีสภาพนำความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่โดยใช้สภาพนำความร้อนประสิทธิผลจะลดลงจากค่าที่คำนวณได้เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมที่ใช้สภาพนำความร้อนของชั้นมู่ลี่เป็นสภาพนำความร้อนของอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว

การปรับปรุงในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ทั้งแบบจำลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก โดยพิจารณาถึงผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอก เพิ่มเติมจากแบบจำลองเดิมซึ่งขึ้นกับค่าความเร็วลมภายนอกเพียงอย่างเดียว แบบจำลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร ซึ่งพิจารณาผลของมุมบิดของใบมู่ลี่เพิ่มเติมเข้ามาจากแบบจำลองเดิมซึ่งพิจารณาเฉพาะผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับอุณหภูมิอากาศภายในห้องเท่านั้น แบบจำลองการหาค่าสัมประสิทธิ์

การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ และยังเพิ่มเติมในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร ซึ่งเป็นส่วนที่เปลี่ยนไปจากแบบจำลองเดิมค่อนข้างมาก เพราะในแบบจำลองเดิมพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่แทนด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก โดยไม่มีการพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร ส่งผลให้อุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมยังคงมีค่าที่สูงเกินไป เมื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบของการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ดังกล่าวแล้ว ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคารที่เพิ่มเติมเข้ามา ทั้งนี้เมื่อรวมผลของการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ไปด้วยกัน จึงส่งผลให้สามารถลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้ลงได้มากยิ่งขึ้น

จากตารางที่ 6.1 6.2 และ 6.3 พบว่าเมื่อมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ลดลงได้มากกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ -45 องศา เมื่อพิจารณาที่มุมตกกระทบที่พิจารณานี้ เพราะเลือกพิจารณาเวลาประมาณ 14:30- 15:30 น. ที่มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ประมาณ 40 ถึง 50 องศา เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา จะอยู่ในลักษณะบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้มาก ผลของการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ในชั้นของมู่ลี่จึงค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ จึงทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงจากแบบจำลองเดิมได้มากกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ -45 องศา จากเหตุผลเดียวกันนี้ ที่มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ที่เลือกพิจารณานี้ เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ใบมู่ลี่จะอยู่ในลักษณะที่ให้รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงส่องผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก ดังนั้นผลของการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ในชั้นของมู่ลี่จึงค่อนข้างน้อย เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ จึงทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าลดลงจากแบบจำลองเดิมได้น้อยกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา

จากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น และค่าที่ได้จากการทดลอง ที่ทั้ง 3 มุมบิดของใบมู่ลี่ คือ มุมบิด 0, 45 และ -45 องศา ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงแล้วทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วน

ต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ สามารถช่วยลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ลงได้ โดยจะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใบมู่ลี่อยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างมาก แต่โดยรวมแล้วไม่ว่าใบมู่ลี่จะทำมุมบิดใด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นก็จะช่วยลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ลงให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองได้อย่างชัดเจน

## 6.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น กับค่าที่ได้จากการทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในการทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ โดยจำลองสภาพของผู้อยู่อาศัย และสภาพภายในห้องทดลอง ตามที่ระบุในภาคผนวก ก และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยกรณีที่น่ามาเปรียบเทียบเป็นกรณีที่น่าสนใจหน้าต่างกระจกเป็นกระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร ติดมู่ลี่สีครีมเป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน ซึ่งรายละเอียดและคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกและมู่ลี่ที่ใช้แสดงในหัวข้อที่ 5.3 บทที่ 5 ใบมู่ลี่ปรับมุมบิดของใบ 3 ลักษณะ คือ มุม 0, 45 และ -45 องศา โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แต่ละมุมบิดของใบมู่ลี่เป็นจำนวน อย่างละ 3 วัน ซึ่งผลลัพธ์ที่จะนำมาเปรียบเทียบกันแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ ได้แก่

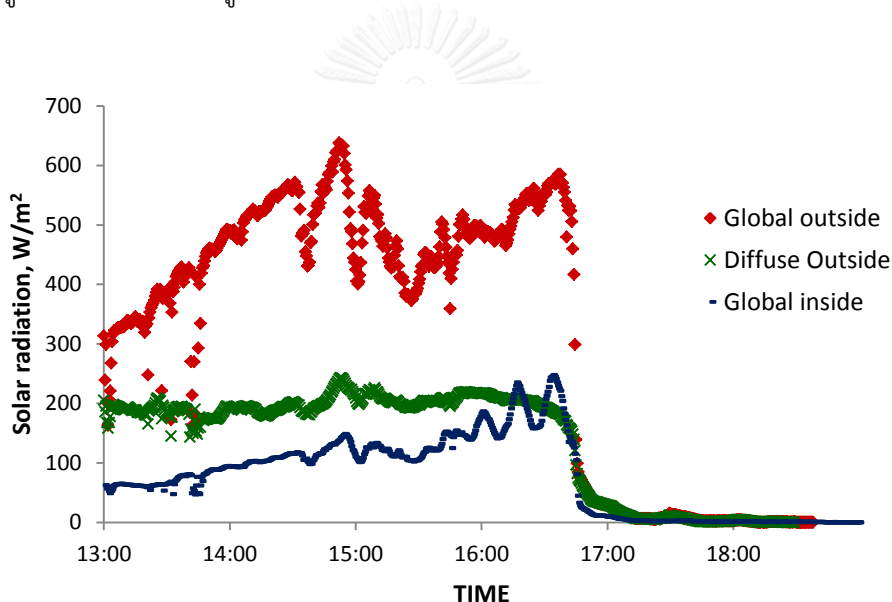
- ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง
- ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่
- ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย
- ค่า PMV

และสุดท้ายนำค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคำนวณเป็นค่า PPD โดยใช้สมการที่ 3.2 ซึ่งค่า PPDรวม (Total PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะคำนวณมาจากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่เป็นผลมาจากทั้งค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่รวมกับผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ( $T_{smrt}$ ) ในกรณีของค่า PPDที่ไม่รวมผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านเข้ามากระทบผู้อยู่อาศัย (Surface PPD) นั้นสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.2 จากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีที่คิดเฉพาะค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว ( $T_{smrt}$ ) ซึ่งผลต่างของค่า PPDรวม (Total PPD) กับค่า Surface PPD จะเป็นค่า PPD ที่เกิดจากผลของรังสีแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว (Solar PPD)

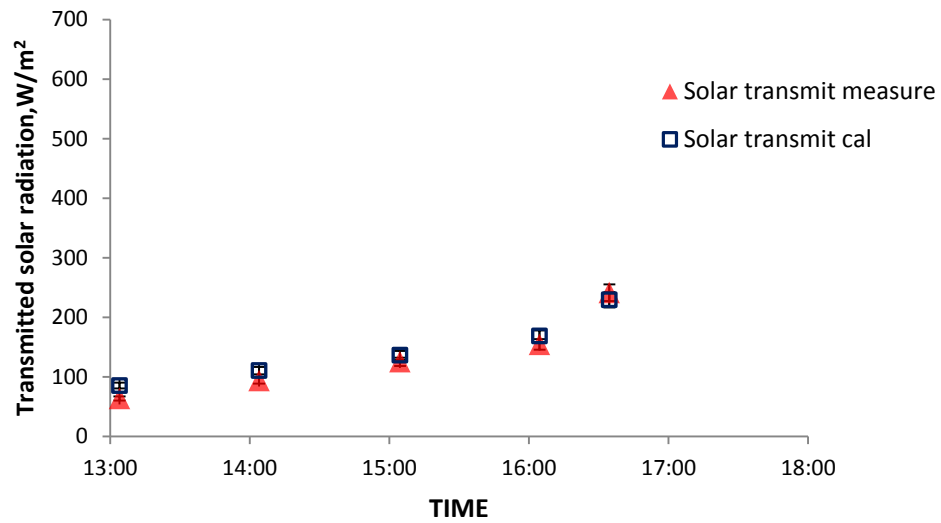
### 6.2.1 กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

กรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ได้ใช้ค่าที่วัดจากการทดลองจำนวน 3 วัน ได้แก่ วันที่ 19 พฤษภาคม 2554 , 19 มิถุนายน 2558 และ 14 กรกฎาคม 2558 เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

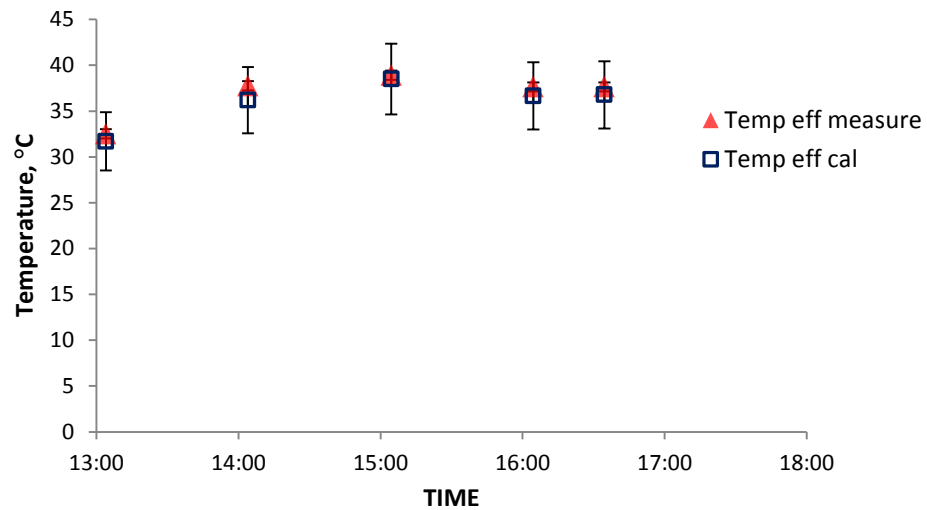
- รูปที่ 6.1 ถึง 6.5 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา และรูปที่ 6.6 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.1 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

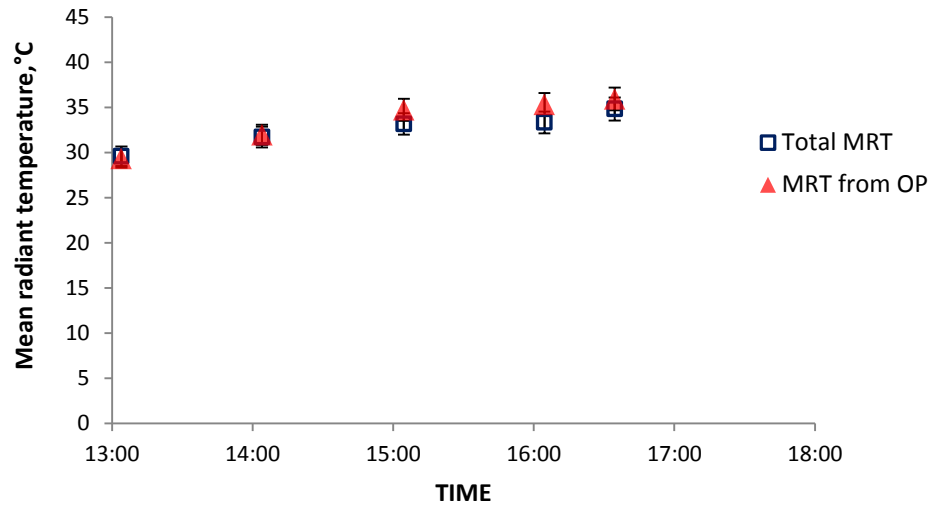


รูปที่ 6.2 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา

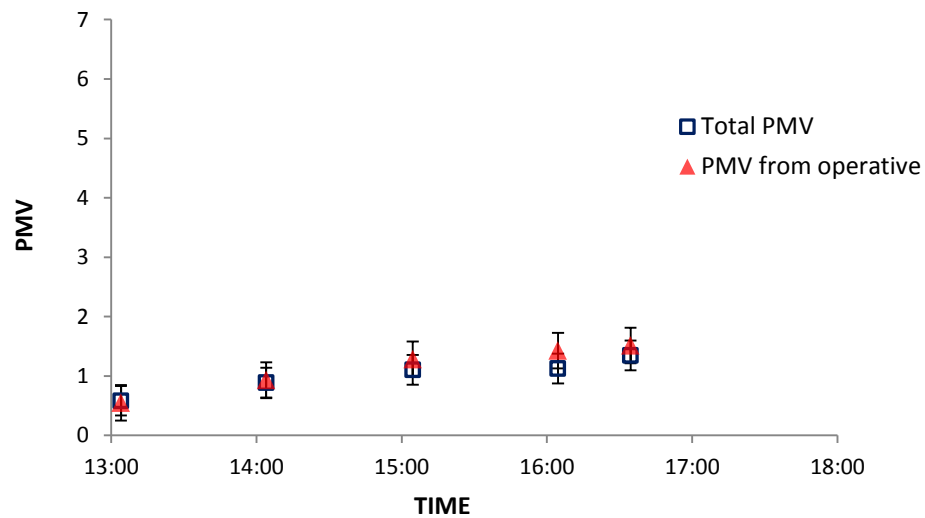


รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา

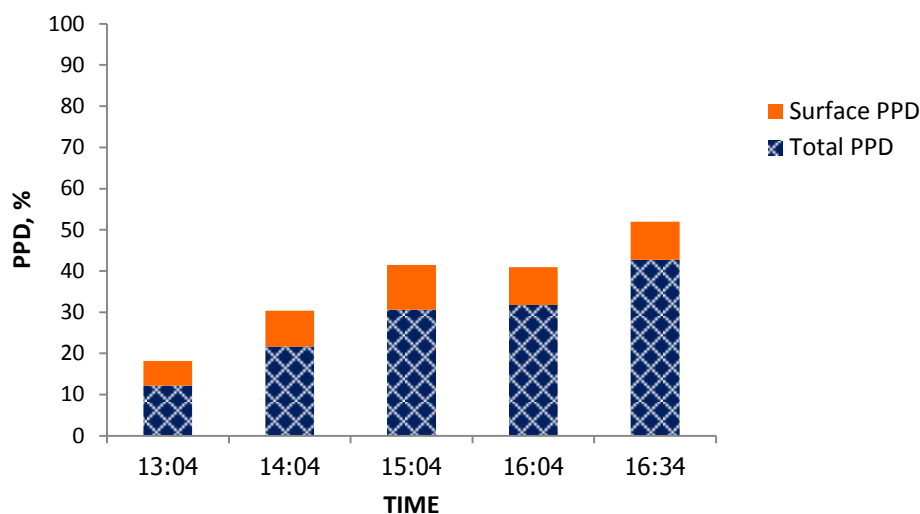




รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

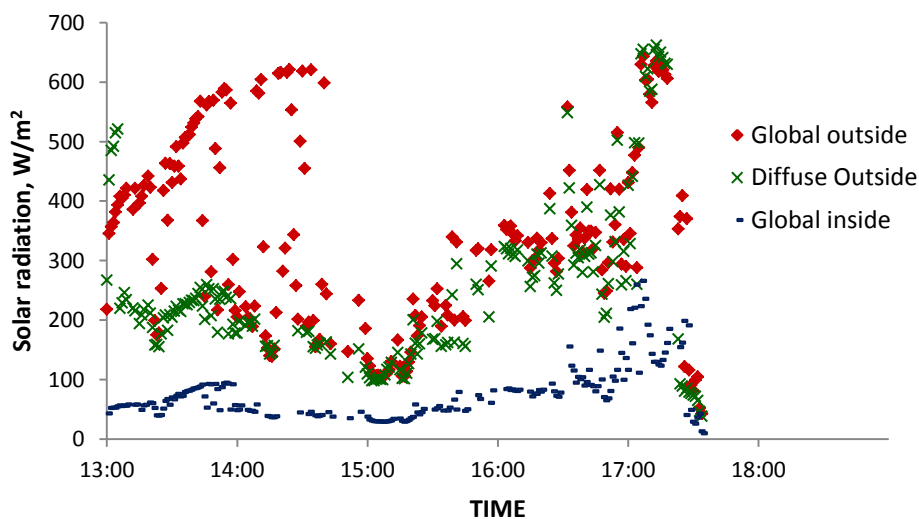


รูปที่ 6.6 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

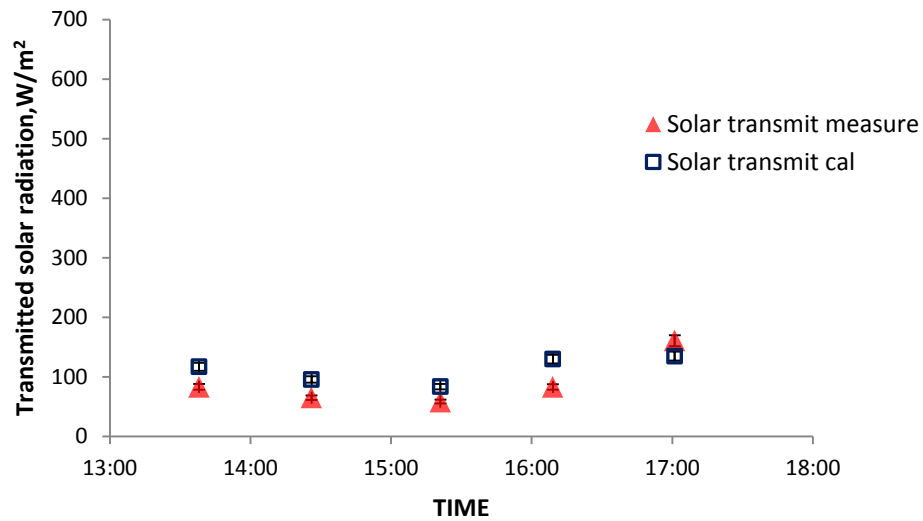
รูปที่ 6.1 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ กล่าวคือ กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะคล้ายๆ พุ่งขึ้นสอดคล้องกับลักษณะการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ส่วนกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองค่อนข้างคงที่ และเมื่อเวลาประมาณ 17:00 น. กราฟทั้ง 3 ตัวจะตกลงเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์เริ่มหมด ส่วนรูปที่ 6.2 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยโดยอยู่ในช่วง 10.68 ถึง 21.43 W/m<sup>2</sup> และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13:00 น. ไปจนถึงเวลาประมาณเกือบ 17:00 น. ซึ่งตรงกับแนวโน้มของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.1 ส่วนรูปที่ 6.3 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 1.6 °C ในรูปที่ 6.4 และ 6.5 จะเห็นว่า

ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.31 ในส่วนของค่า PMV เมื่อพิจารณารูปที่ 6.6 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามแนวโน้มของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง โดยสอดคล้องกับรูปที่ 6.2 ส่วนค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเปลี่ยนแปลงไป

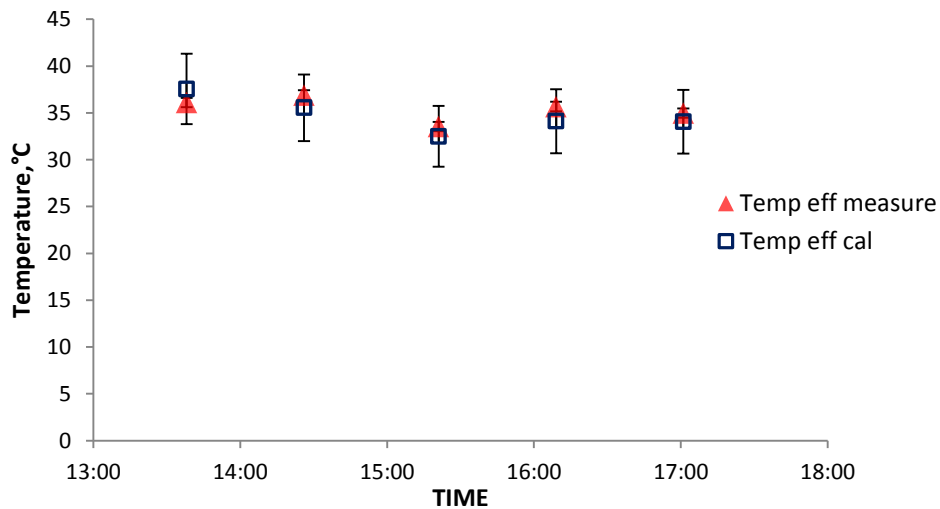
- รูปที่ 6.7 ถึง 6.11 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และรูปที่ 6.12 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



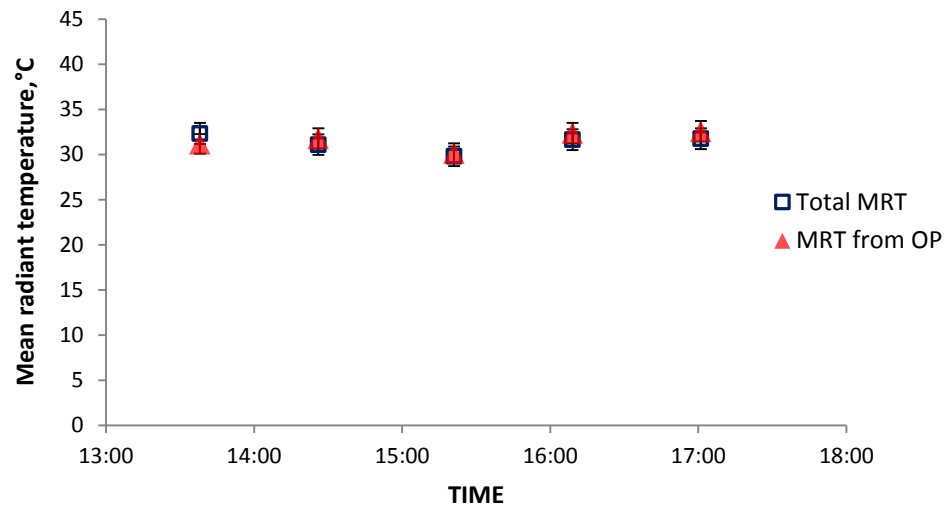
รูปที่ 6.7 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา



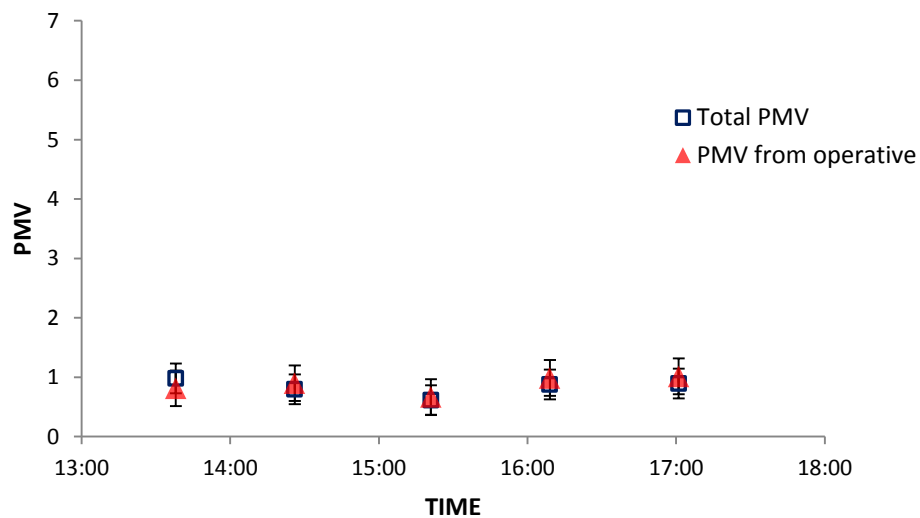
รูปที่ 6.8 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



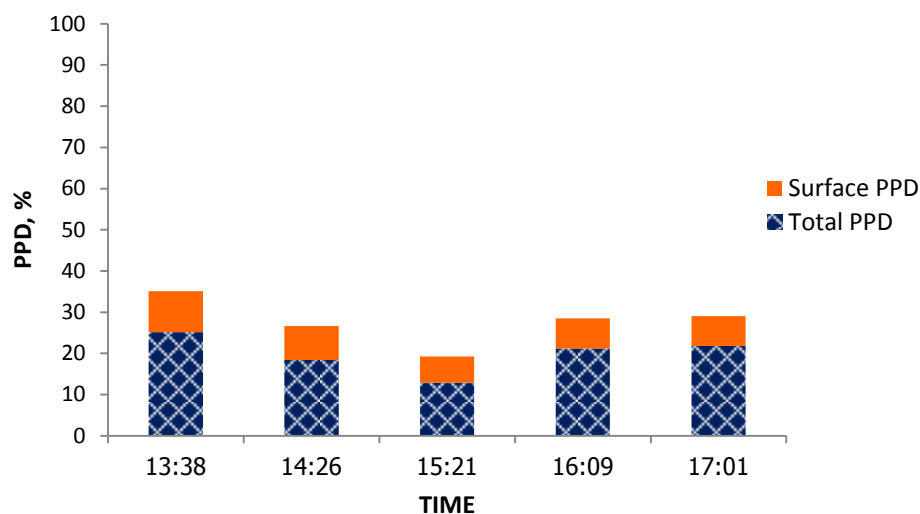
รูปที่ 6.9 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



รูปที่ 6.10 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



รูปที่ 6.11 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

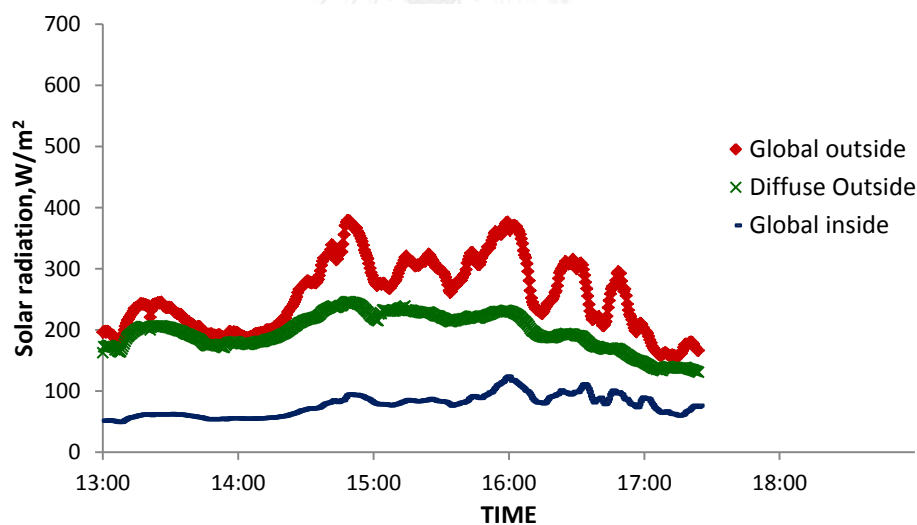


รูปที่ 6.12 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

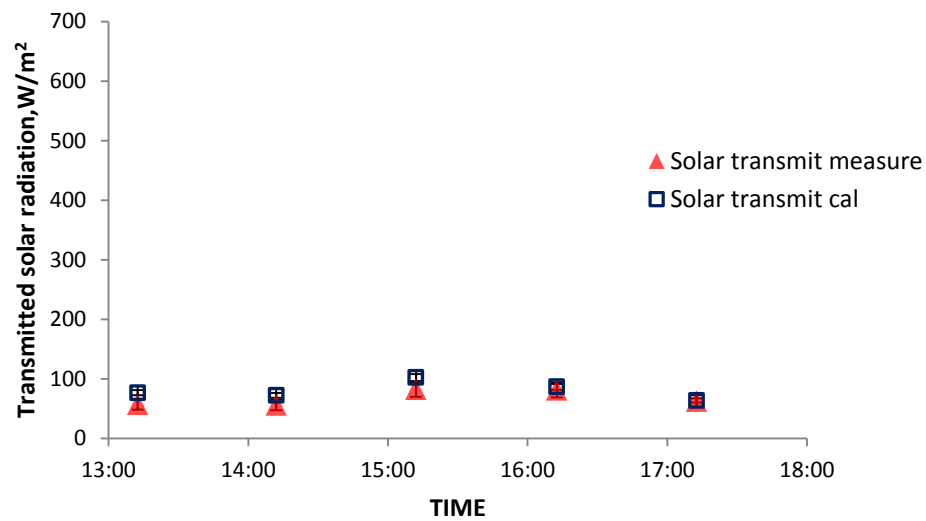
รูปที่ 6.7 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองมีลักษณะกระจายตัว ซึ่งไม่สอดคล้องกับลักษณะการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่สภาวะปกติดังรูปที่ 6.1 ซึ่งมีสาเหตุมาจากการวัดค่าในฤดูฝนซึ่งมีเมฆค่อนข้างมาก รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจึงถูกเมฆบังเป็นบางเวลาทำให้เกิดเป็นลักษณะดังกล่าว ส่วนรูปที่ 6.8 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 25.08 ถึง 46.92 W/m<sup>2</sup> และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.7 ส่วนรูปที่ 6.9 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 1.6 °C ในรูปที่ 6.10 และ 6.11 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีความแตกต่างกัน

ไม่เกิน  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  และค่า PMV มีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.17 เมื่อพิจารณารูปที่ 6.12 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีแนวโน้มตามปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง โดยสอดคล้องรูปที่ 6.8 ส่วนค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเปลี่ยนแปลงไป

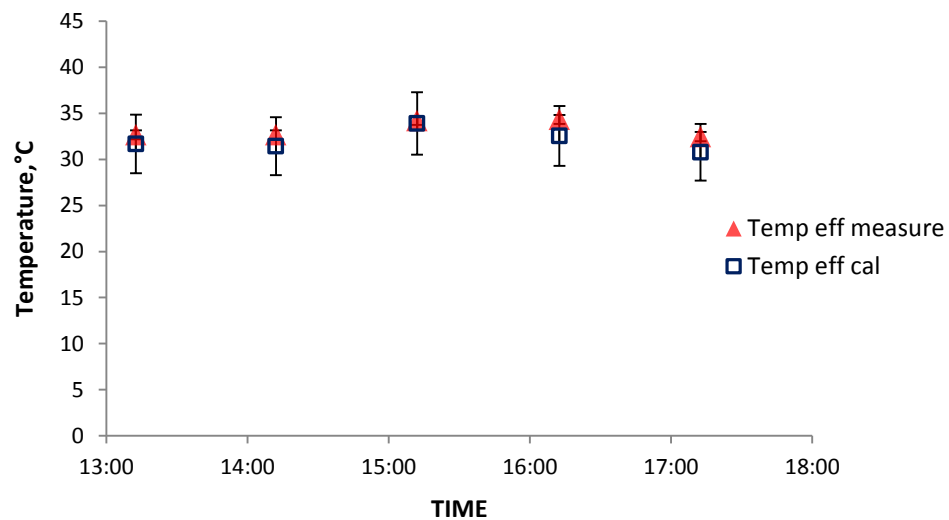
- รูปที่ 6.13 ถึง 6.17 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา และรูปที่ 6.18 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.13 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

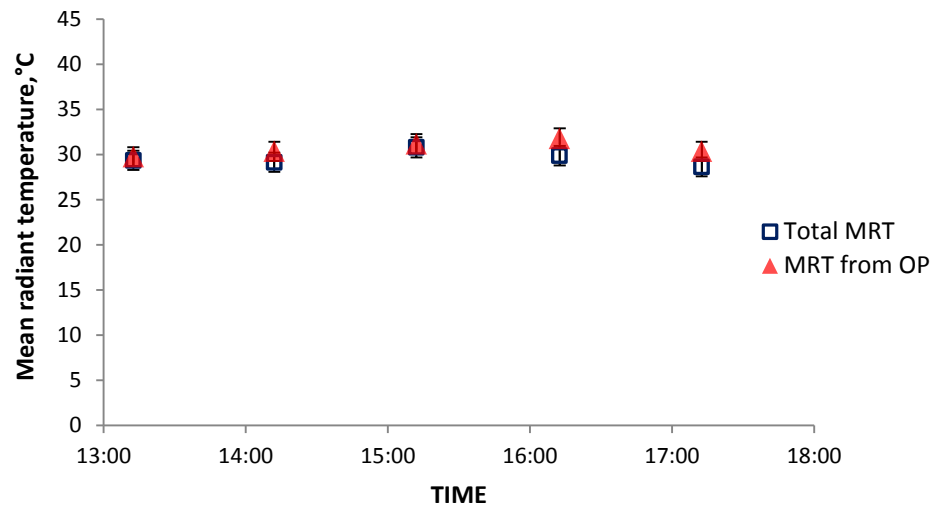


รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา

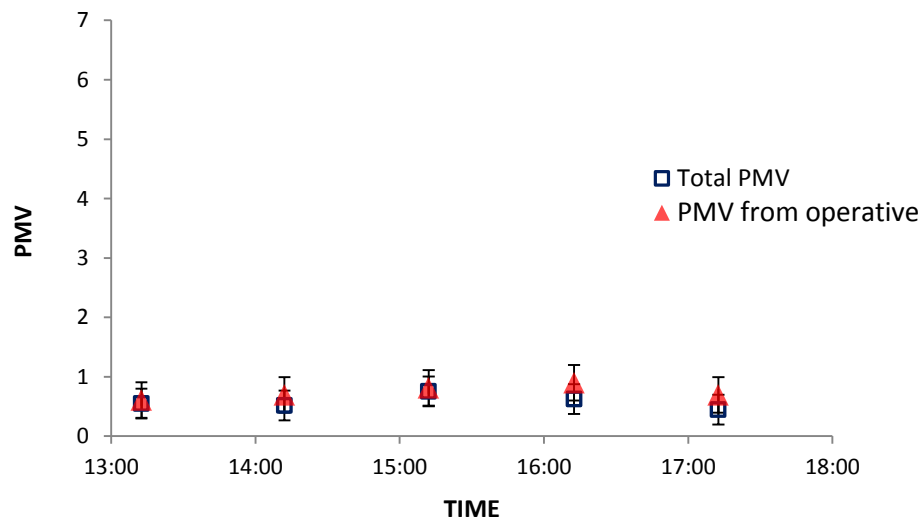


รูปที่ 6.15 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา

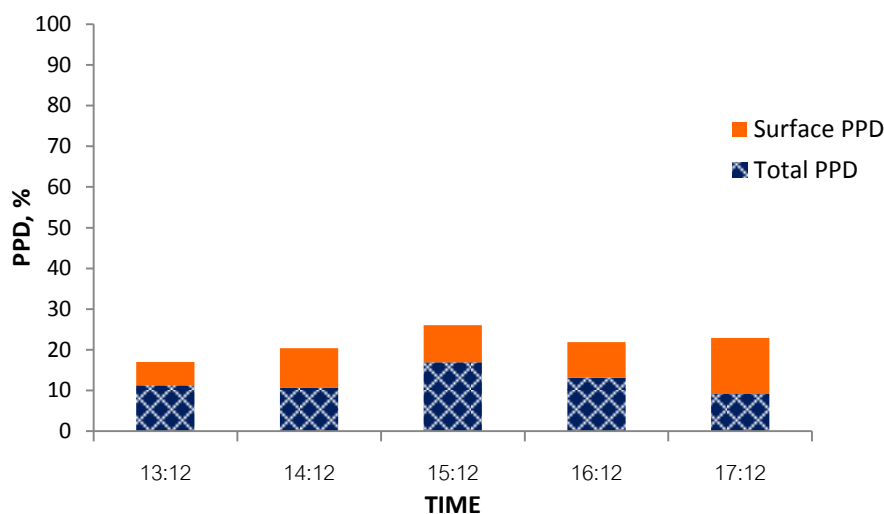




รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



รูปที่ 6.17 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา



รูปที่ 6.18 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

รูปที่ 6.13 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ และผลส่วนใหญ่มาจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย เนื่องจากการวัดค่าในฤดูฝนซึ่งมีเมฆค่อนข้างมาก และในวันนี้มีเมฆเกือบตลอดเวลาที่ทำการวัดจึงส่งผลให้เกิดเป็นลักษณะดังกล่าว ส่วนรูปที่ 6.14 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อย โดยอยู่ในช่วง 1.10 ถึง 19.80 W/m<sup>2</sup> และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.13 ส่วนรูปที่ 6.15 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 1.8 °C ในรูปที่ 6.16 และ 6.17 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMVที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีความแตกต่างกันไม่เกิน 1.9 °C และค่า PMV มีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.28 เมื่อพิจารณารูปที่ 6.18 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของ

ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มตามปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องโดยสอดคล้องรูปที่ 6.14 ส่วนค่าPPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวไม่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเมื่อปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศาทั้ง 3 วัน ได้แก่ วันที่ 19 พฤษภาคม 2554 , 19 มิถุนายน 2558 และ 14 กรกฎาคม 2558 พบว่า จากรูปที่ 6.1 6.7 และ 6.13 ซึ่งแสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ดังจะเห็นได้ว่ามีลักษณะของรูปกราฟที่แตกต่างกันเนื่องจากการวัดค่าคนละเดือน โดยในรูปที่ 6.1 เป็นค่าที่วัดในเดือนพฤษภาคม ซึ่งมีลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งวันโดยกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะค่อยๆเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับลักษณะการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ส่วนกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองค่อนข้างคงที่ แต่ในรูปที่ 6.7 และ 6.13 เป็นค่าที่วัดในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคมตามลำดับ ซึ่งเป็นฤดูฝนจึงมีเมฆค่อนข้างมาก ส่งผลให้ลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวันเหมือนค่าที่วัดในเดือนพฤษภาคม โดยในรูปที่ 6.7 กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองมีลักษณะกระจายตัว ซึ่งไม่สอดคล้องกับลักษณะการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่สภาวะปกติดังรูปที่ 6.1 ส่วนในรูปที่ 6.13 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำและผลส่วนใหญ่มาจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย

รูปที่ 6.2 6.8 และ 6.14 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อย แต่มีแนวโน้มแบบเดียวกัน และยิ่งเวลาเย็นประมาณ 16.30 น.เป็นต้นไป ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์จะเริ่มมีแนวโน้มที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามา

ภายในห้องทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แสดงตัวอย่างในภาคผนวก ข ซึ่งมีบางกรณีที่ค่าทั้งสองไม่ได้อยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน แต่ยังคงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

รูปที่ 6.3 6.9 และ 6.15 แสดงค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อย แต่ยังคงครอบคลุมด้วยแถบความคลาดเคลื่อน ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณานั้น ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากที่สุดไม่เกิน  $1.8^{\circ}\text{C}$  จากการพิจารณาค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่างๆของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิผลที่ได้จากการตรวจวัด เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ในหัวข้อที่ 6.1 พบว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่แล้ว จะให้ค่าที่ต่ำลงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมที่ให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่อนข้างมาก ดังแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในตารางที่ 6.1 ดังนั้น จากรูปที่ 6.3 6.9 และ 6.15 แสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่สามารถช่วยลดค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลงได้ทุกช่วงเวลาให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด จึงทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

รูปที่ 6.4 6.10 และ 6.16 แสดงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยใน 3 วันที่พิจารณา ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกิน  $2^{\circ}\text{C}$  จากสมการที่ 3.11 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นผลมาจากทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ซึ่งค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า

ค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อย ส่วนค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อย จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา จะมีลักษณะเดียวกับค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ กล่าวคือ มีค่าต่ำกว่าค่าจากการตรวจวัดเล็กน้อย แต่ยังคงมีแนวโน้มเดียวกัน และค่าตัวอย่างที่เลือกนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงเวลาอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน จึงมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

รูปที่ 6.5 6.11 และ 6.17 แสดงค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเดียวกับค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย เนื่องจากค่า PMV คำนวณมาจากสมการที่ 3.1 ซึ่งกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในส่วนของการจำลองสภาพภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่ง ดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ก เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่งผลโดยตรงต่อค่า PMV ดังนั้นค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดจึงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยเช่นเดียวกับในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย โดยใน 3 วันที่พิจารณา ค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกิน 0.31 และยังคงครอบคลุมอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อนทุกค่าตัวอย่างที่นำมาพิจารณาเปรียบเทียบกันในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ในกรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ได้แม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

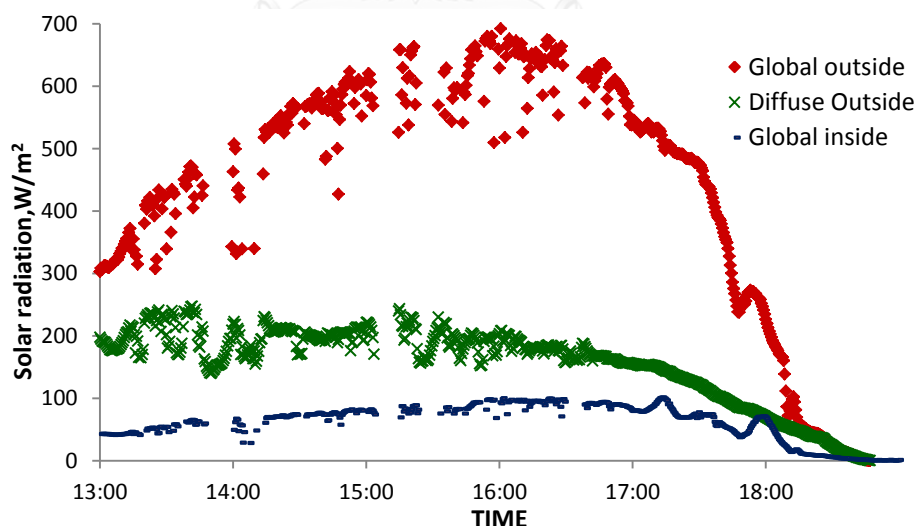
รูปที่ 6.6 6.12 และ 6.18 แสดงค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา จะเห็นได้ว่าค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เนื่องจากการวางตัวของใบมู่ลี่ที่มุมปิด 0 องศา นั้นจะอยู่ในลักษณะที่รังสีแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่สามารถส่งผ่านชั้นมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้ จึงทำให้ชั้นของมู่ลี่ไม่ได้ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ไว้อย่างเต็มที่ ค่า PPD ที่มาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จึงเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่าค่า PPD ที่มาจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง กราฟแท่งที่แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนของค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องในรูปที่ 6.6 6.12 และ 6.18 จึงมีลักษณะดังรูป แต่จากรูปที่ 6.18 ในกรณีของ

วันที่ 14 กรกฎาคม 2558 สังเกตได้ว่าค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวตัวในของชั้นมู่ลี่จะมีสัดส่วนที่มากขึ้นเมื่อรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมมีค่าค่อนข้างต่ำ

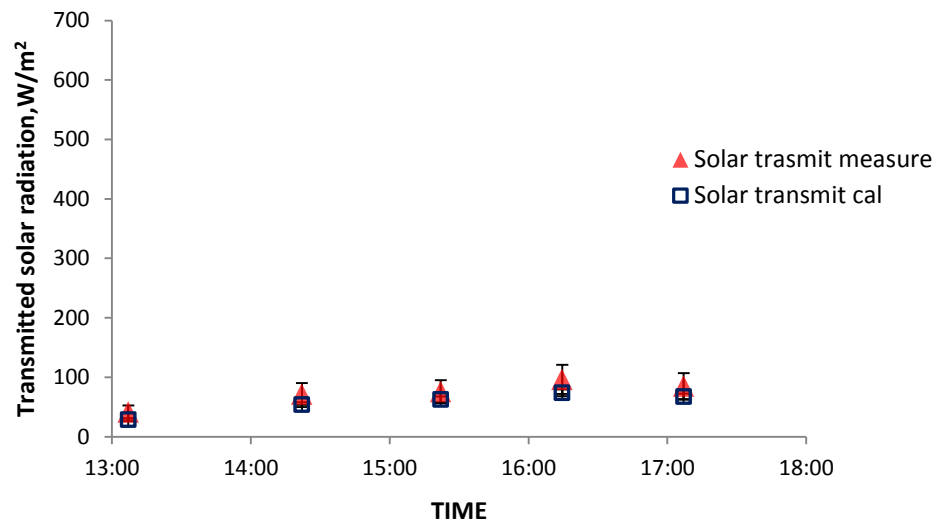
### 6.2.2 กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

กรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ได้ใช้ค่าที่วัดจากการทดลองจำนวน 3 วัน ได้แก่ วันที่ 20 พฤษภาคม 2554 , 7 กรกฎาคม 2558 และ 10 กรกฎาคม 2558 เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

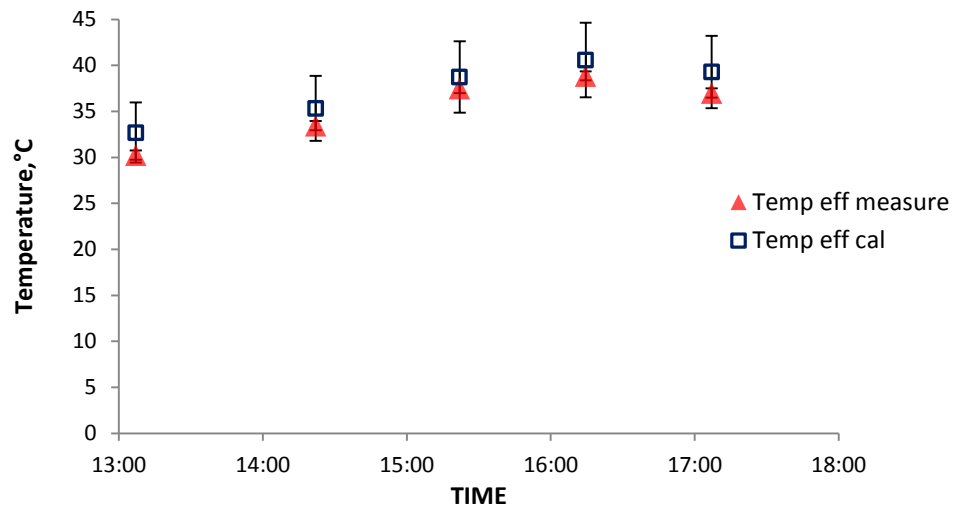
- รูปที่ 6.19 ถึง 6.23 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และรูปที่ 6.24 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวตัวในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวตัวในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



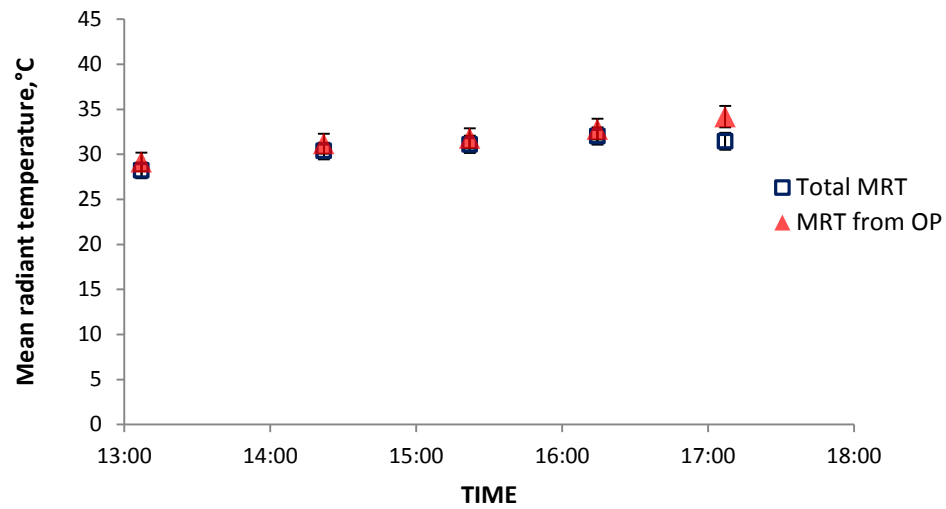
รูปที่ 6.19 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



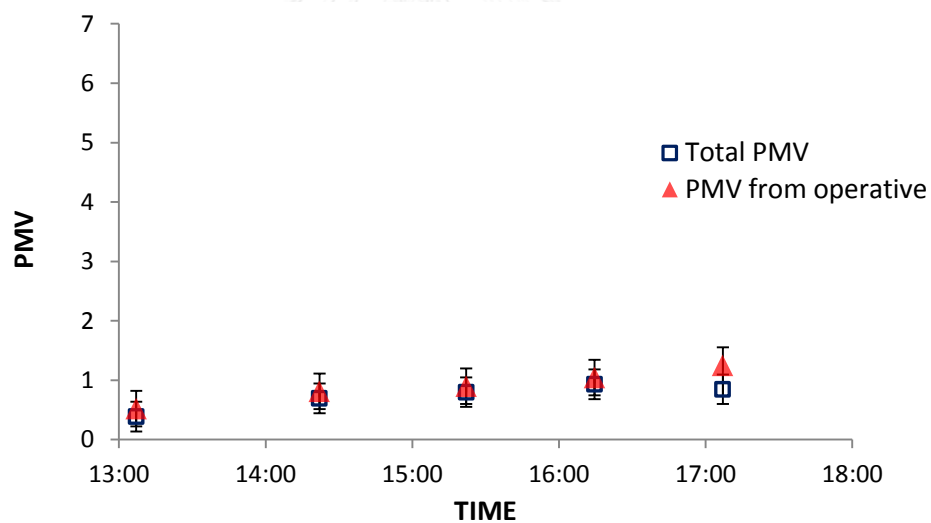
รูปที่ 6.20 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา



รูปที่ 6.21 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา

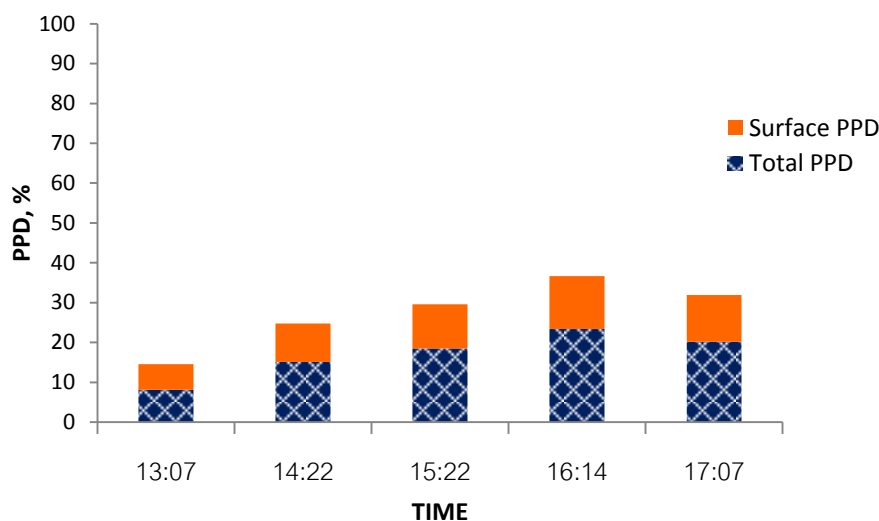


รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



รูปที่ 6.23 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



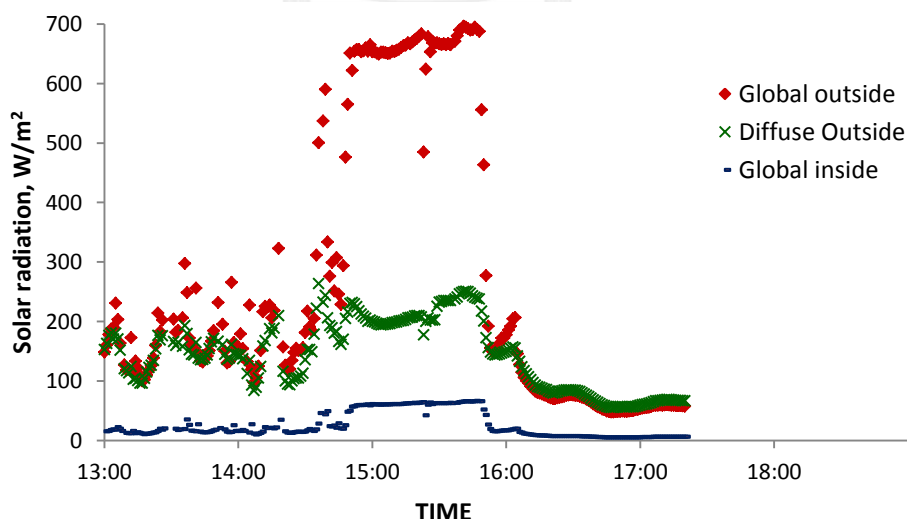


รูปที่ 6.24 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

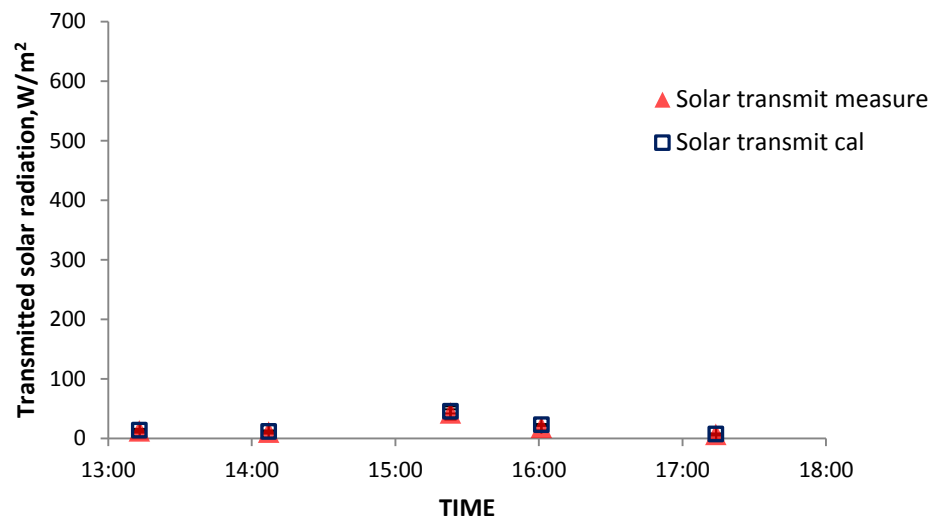
รูปที่ 6.19 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ กล่าวคือ กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะค่อยๆ พุ่งขึ้นจนสูงที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 16:00-17:00 น. และค่อยๆ ลดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ส่วนรูปที่ 6.20 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยอยู่ในช่วง 13.19 ถึง 22.32  $W/m^2$  และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13:00 น. ไปจนสูงสุดในช่วงเวลา 16:00-17:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.19 ส่วนรูปที่ 6.21 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 2.4  $^{\circ}C$  ในรูปที่ 6.22 และ 6.23 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย

และค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน  $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.40 ในส่วนของค่า PMV เมื่อพิจารณารูปที่ 6.24 จะเห็นว่าค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีส่วนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง จึงทำให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับแนวโน้มของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ในรูปที่ 6.21

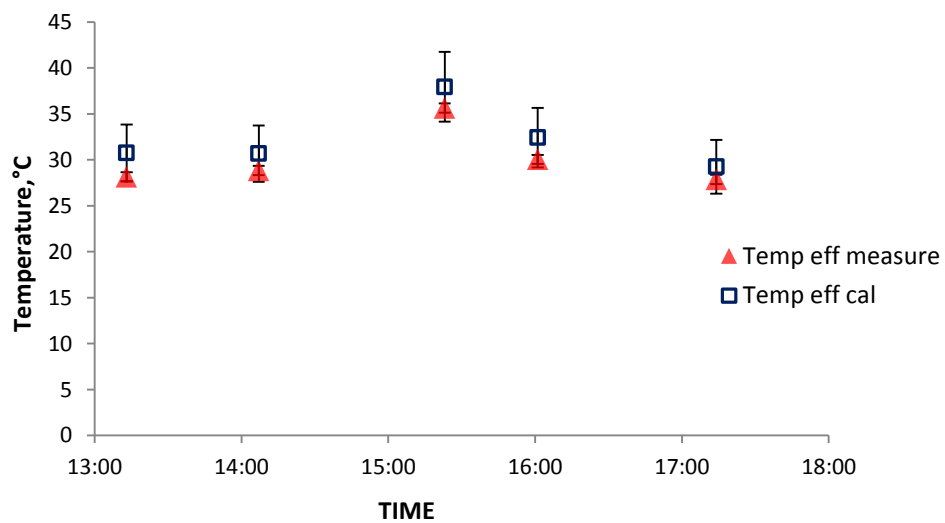
- รูปที่ 6.25 ถึง 6.29 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และรูปที่ 6.30 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



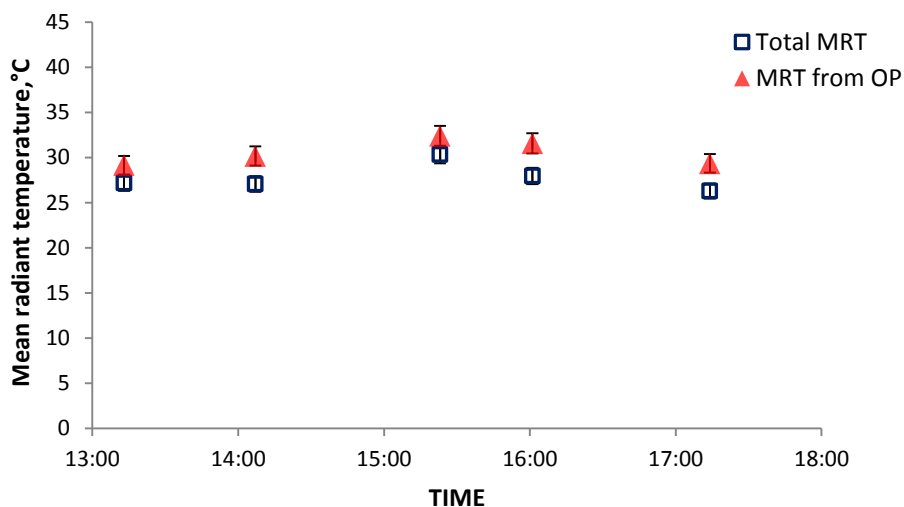
รูปที่ 6.25 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



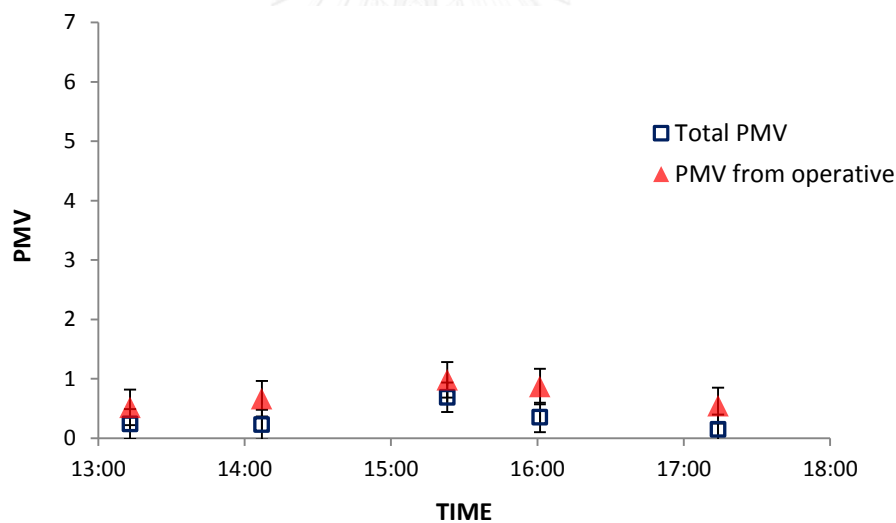
รูปที่ 6.26 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา



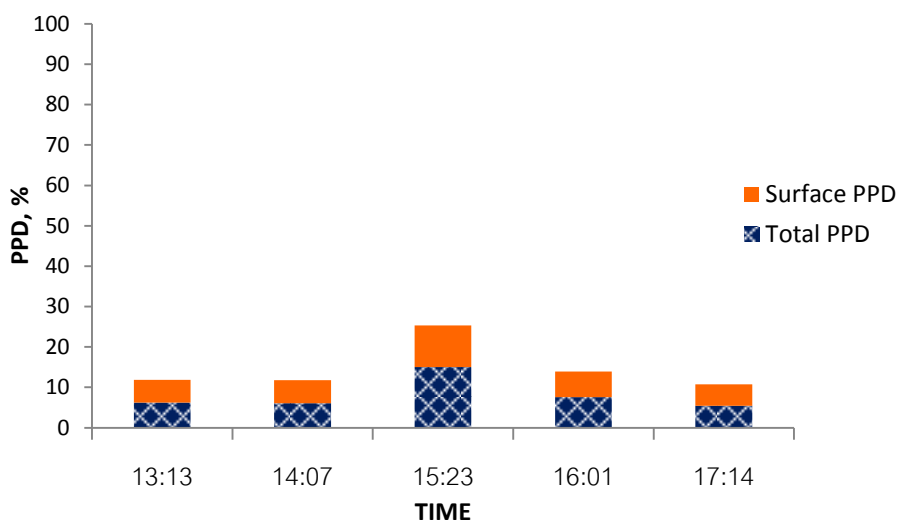
รูปที่ 6.27 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา



รูปที่ 6.28 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



รูปที่ 6.29 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT ) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

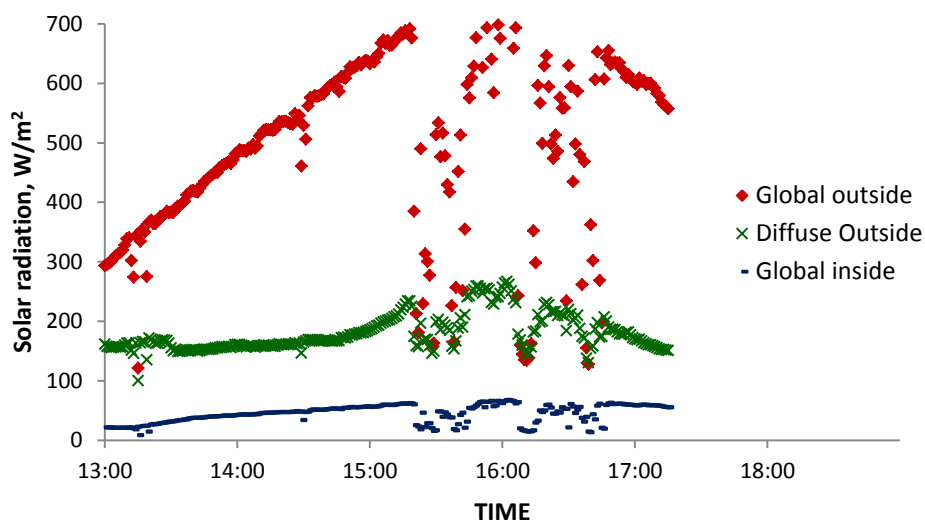


รูปที่ 6.30 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่(Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา

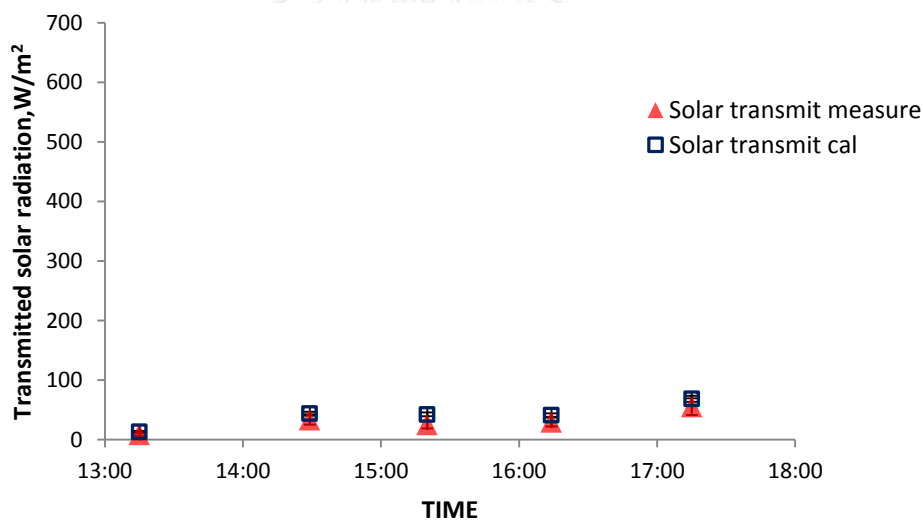
รูปที่ 6.25 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 7 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ไม่สอดคล้องกับลักษณะของการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่สภาวะปกติ กล่าวคือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. และ 16:00-17:00 น. มีค่าค่อนข้างต่ำซึ่งเกิดจากการบังของเมฆ ส่วนเวลาประมาณ 15:00-16:00 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้เป็นสภาวะปกติที่ไม่มีเมฆบัง ส่วนรูปที่ 6.26 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยอยู่ในช่วง 0.66 ถึง 4.22 W/m<sup>2</sup> และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.25 กล่าวคือมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 15:00-16:00 น. ส่วนรูปที่ 6.27 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 2.4°C ในรูปที่ 6.28 และ 6.29 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่มีค่าไม่เกิน  $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.52 ในส่วนของค่า PMV โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกันเมื่อรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคือในช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. และ 16:00-17:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.25 เมื่อพิจารณารูปที่ 6.30 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง จึงทำให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับแนวโน้มของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ในรูปที่ 6.27

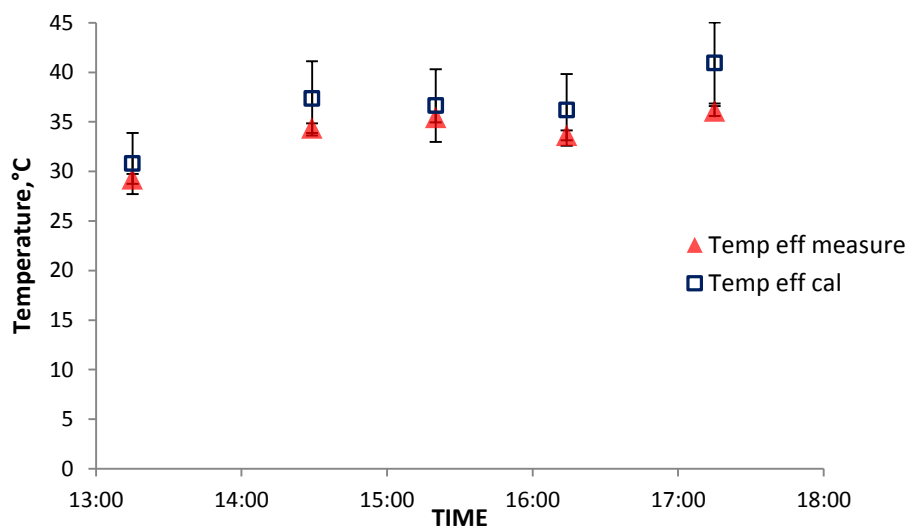
- รูปที่ 6.31 ถึง 6.35 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 14 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และรูปที่ 6.36 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



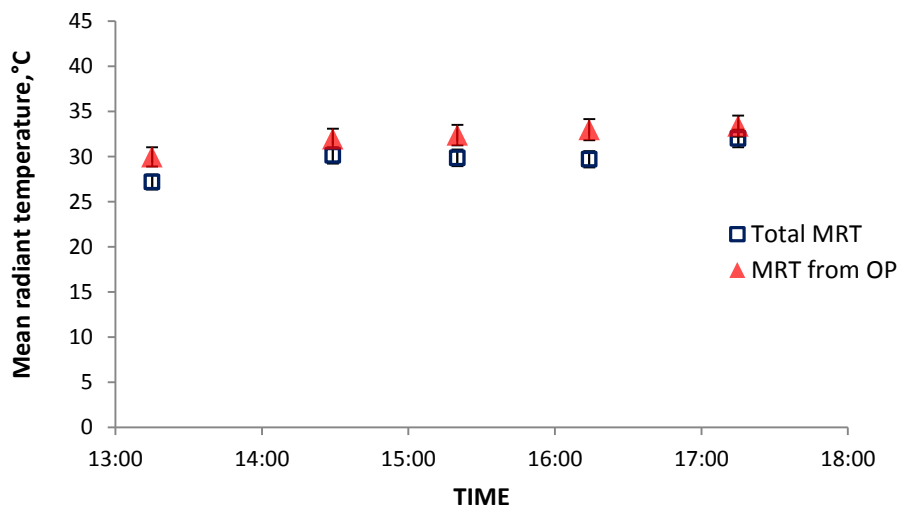
รูปที่ 6.31 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



รูปที่ 6.32 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

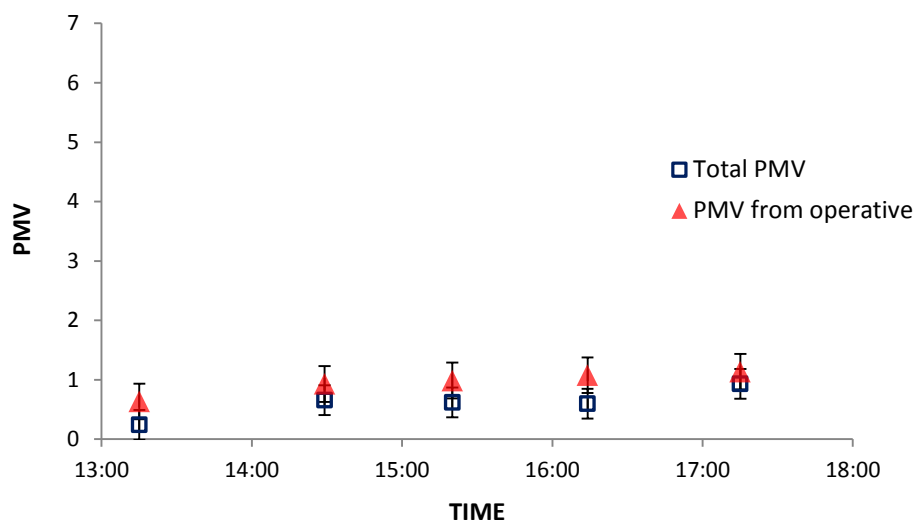


รูปที่ 6.33 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา

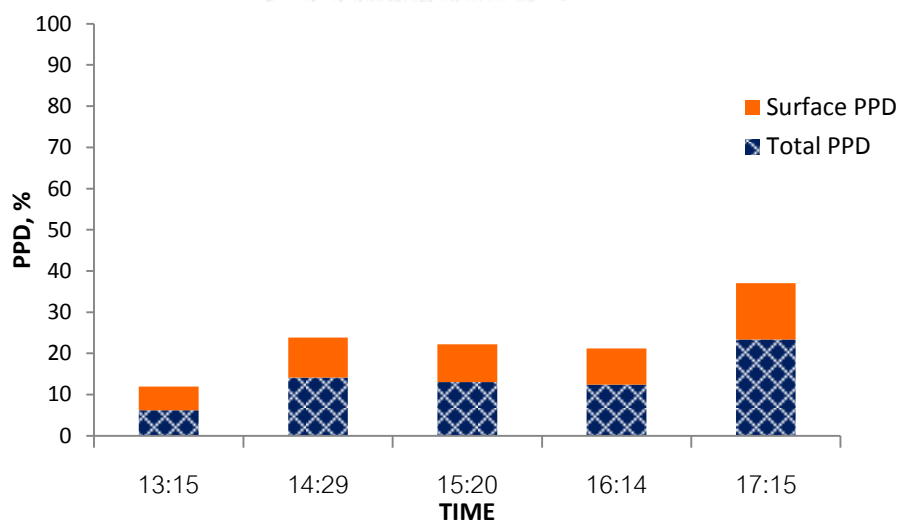


รูปที่ 6.34 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา





รูปที่ 6.35 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา



รูปที่ 6.36 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ (Total PPD) เข้ามาภายในห้อง ของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

รูปที่ 6.31 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 10 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้มีลักษณะไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาประมาณ 15:30-17:00 น. โดยเกิดจากการบังของเมฆ ทำค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีค่าลดต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนรูปที่ 6.32 จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มแบบเดียวกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยอยู่ในช่วง 4.76 ถึง 16.82 W/m<sup>2</sup> ส่วนรูปที่ 6.33 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดแต่ไม่เกิน 4.9 °C ในรูปที่ 6.34 และ 6.35 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่มีค่าไม่เกิน 3.3°C ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.48 ในส่วนของค่า PMV โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าที่ค่อนข้างแตกต่างกันเมื่อรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีความไม่สม่ำเสมอ ซึ่งคือในช่วงเวลาประมาณ 15:30-17:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.31 เมื่อพิจารณารูปที่ 6.36 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง จึงทำให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับแนวโน้มของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ในรูปที่ 6.33

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศาทั้ง 3 วัน ได้แก่ วันที่ 20 พฤษภาคม 2554 , 7 กรกฎาคม 2558 และ 10 กรกฎาคม 2558 พบว่า รูปที่ 6.19 6.25 และ 6.31 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยในรูปที่ 6.19 เป็นค่าที่วัดในเดือนพฤษภาคม ซึ่งมีลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน กล่าวคือกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่

ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะค่อยๆพุ่งขึ้นจนสูงที่สุดที่ช่วงเวลาประมาณ 16:00-17:00 น. และค่อยๆลดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ แต่ในรูปที่ 6.25 และ 6.31 เป็นค่าที่วัดในเดือนกรกฎาคม ซึ่งเป็นฤดูฝนจึงมีเมฆค่อนข้างมาก ส่งผลให้ลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน กล่าวคือ ช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกเมฆบัง กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองจะลดต่ำลงมาอย่างเห็นได้ชัด

รูปที่ 6.20 6.26 และ 6.32 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มาก แต่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดของเดือนพฤษภาคมมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยอยู่ในช่วง  $13.19-22.32 \text{ W/m}^2$  คาดว่าเป็นผลมาจากเป็นการวัดที่คนละปีซึ่งการติดตั้งเครื่องมือวัดอาจมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้ว ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน และอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน จึงมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

รูปที่ 6.21 6.27 และ 6.33 แสดงค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อย แต่มีแนวโน้มแบบเดียวกันและยังอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณา นั้น ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากที่สุดไม่เกิน  $4.9^{\circ}\text{C}$  จากการพิจารณาค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับปรุงทั้งในส่วนของสภาพความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมและค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ประสิทธิภาพที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ในหัวข้อที่ 6.1 พบว่า ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับปรุงทั้งในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่แล้ว จะให้ค่าที่ต่ำลงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมที่ให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่อนข้างมาก ดังแสดงการเปรียบเทียบอยู่ในตารางที่ 6.2 ดังนั้นจากรูปที่ 6.21 6.27 และ 6.33 จะเห็นได้ว่า ค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปรับปรุงในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติด

มูลค่าแล้ว ถึงแม้จะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมแต่ก็ยังให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดอยู่อีกเล็กน้อย แต่โดยรวมแล้วสามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากยิ่งขึ้นและอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน จึงมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

รูปที่ 6.22 6.28 และ 6.34 แสดงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อย ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณานั้น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ไม่เกิน  $3.6^{\circ}\text{C}$  โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดจะแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่อนข้างมากเมื่อค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 6.28 ในช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. และ 16:00-17:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอในรูปที่ 6.25 และรูปที่ 6.34 ในช่วงเวลาประมาณ 15:30-17:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอในกับรูปที่ 6.31 จากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา กับกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา พบว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ เป็นสัดส่วนที่มากกว่ากรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ในรูปที่ 6.4 6.10 และ 6.16 ทั้ง ๆ ที่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่เนื่องจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อย ส่วนค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และที่ได้จากการตรวจวัดกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องส่งผลต่อค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมากกว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ เพราะถึงแม้ว่าที่มุมปิดใบมู่ลี่ 45 องศา ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่ก็ยังไม่สามารถส่งผลมากเพียงพอให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นจนถึงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด แต่ที่ใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา ถึงแม้ว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการ

ตรวจวัด แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด จึงส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดไม่มาก

รูปที่ 6.23 6.29 และ 6.35 แสดงค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเดียวกับค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย เนื่องจากค่า PMV คำนวณมาจากสมการที่ 3.1 ซึ่งกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในส่วนของการจำลองสภาพภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่งดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ก เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่งผลโดยตรงต่อค่า PMV ดังนั้นค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อยเช่นเดียวกับในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย โดยค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดจะแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ค่อนข้างมากเมื่อค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 6.29 ในช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. และ 16:00-17:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอในรูปที่ 6.25 และรูปที่ 6.35 ในช่วงเวลาประมาณ 15:30-17:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอในกับรูปที่ 6.31 แต่ก็ยังครอบคลุมอยู่ภายใต้แถบคลาดเคลื่อนทุกค่าตัวอย่างที่เลือกนำมาพิจารณาช่วงเวลาโดยใน 3 วันที่พิจารณา ค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เกิน 0.52 ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ในกรณีที่มีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ได้แม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้

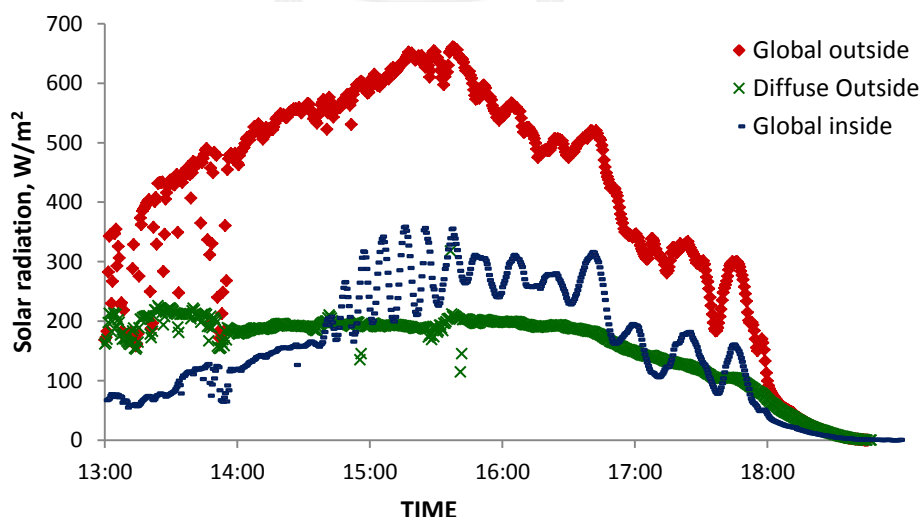
รูปที่ 6.24 6.30 และ 6.36 แสดงค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา เมื่อพิจารณารูปที่ 6.24 6.30 และ 6.36 ร่วมกับรูปที่ 6.6 6.12 และ 6.18 จะเห็นได้ว่าค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีสัดส่วนที่ค่อนข้างมากกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา เทียบกับสัดส่วนของค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เพราะเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา จะอยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้ค่อนข้างมาก ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จึงสามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ได้น้อยจึงมีการดูดกลืนไว้ในชั้นของมู่ลี่ได้มาก ซึ่งการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศา แสดงอยู่ในบทที่ 7

parametric study ในรูปที่ 7.1 7.4 7.7 จากเหตุผลดังกล่าวส่งผลให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่า อุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายใน ห้องมีผลจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มากเมื่อมู่ลี่อยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้มาก

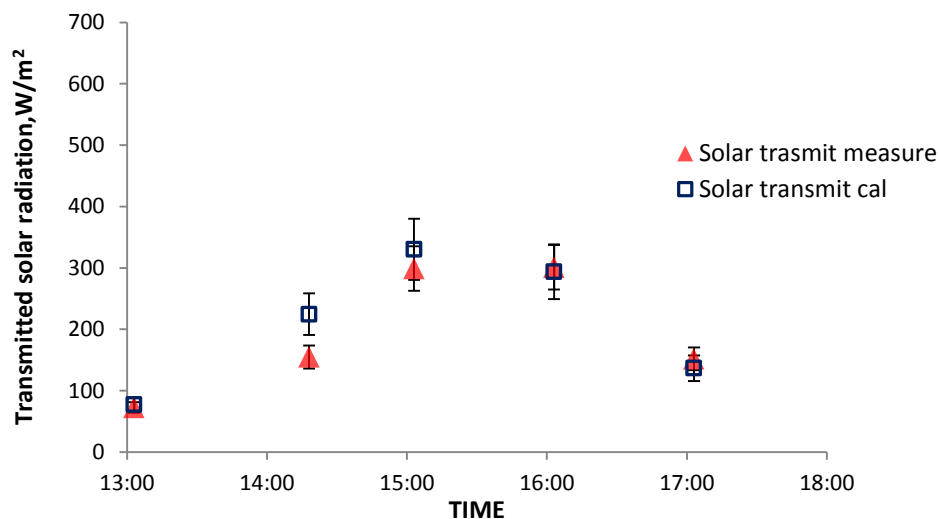
### 6.2.3 กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา

กรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา ได้ใช้ค่าที่วัดจากการทดลองจำนวน 3 วัน ได้แก่ วันที่ 21 พฤษภาคม 2554 , 30 มิถุนายน 2558 และ 16 กรกฎาคม 2558 เปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงอยู่ใน ภาคผนวก ก

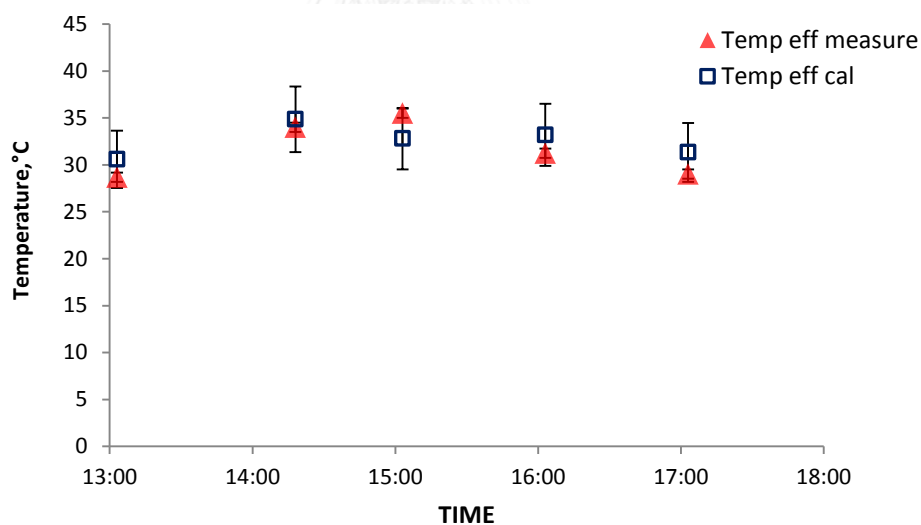
- รูปที่ 6.37 ถึง 6.41 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการ ทดลองของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา และรูปที่ 6.42 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสี แสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผล มาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์



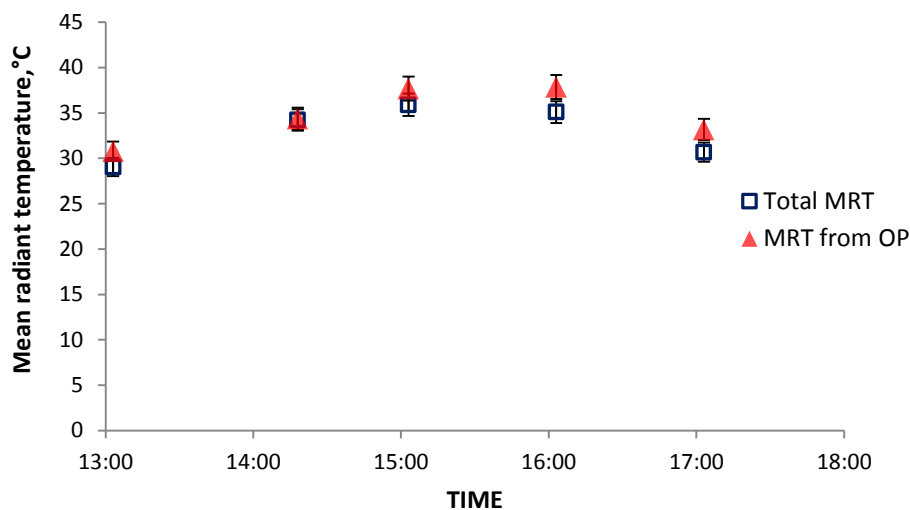
รูปที่ 6.37 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสี แสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา



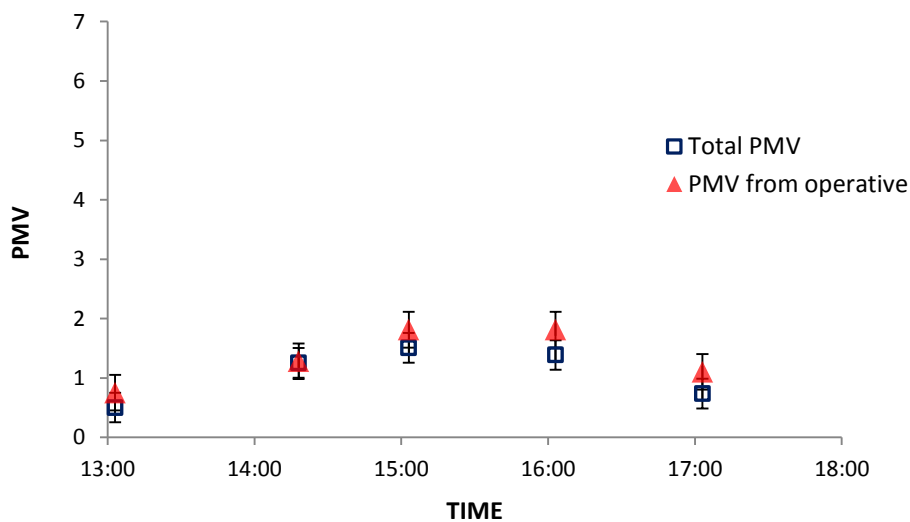
รูปที่ 6.38 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



รูปที่ 6.39 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

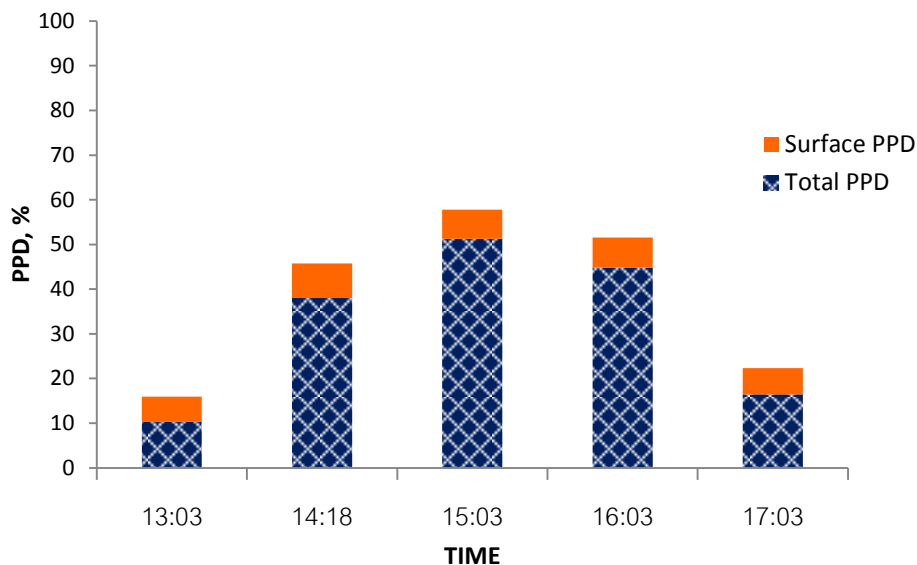


รูปที่ 6.40 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา



รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา



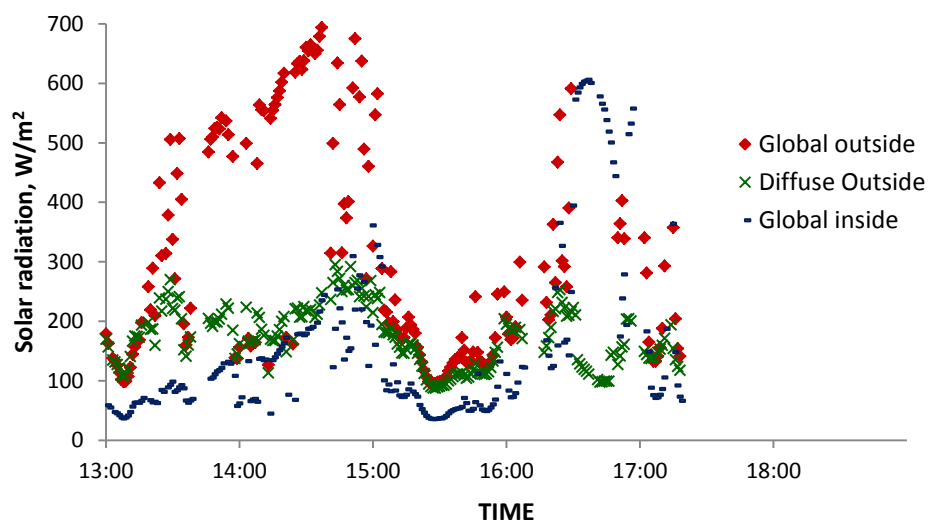


รูปที่ 6.42 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

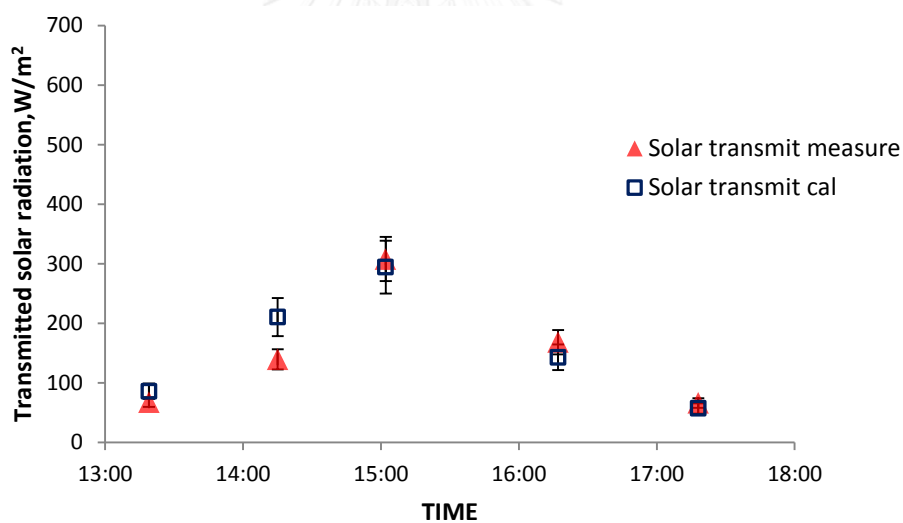
รูปที่ 6.37 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ กล่าวคือ กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะค่อยๆ พุ่งขึ้นจนสูงที่สุดที่ช่วงเวลาประมาณ 15:00-16:00 น. และค่อยๆ ลดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ส่วนรูปที่ 6.38 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยในช่วงเวลา 13:00-15:30 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 4.77 ถึง 69.73  $W/m^2$  แต่ในช่วงเวลา 15:30-17:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 7.21 ถึง 15.42  $W/m^2$  และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 13:00 น. ไปจนสูงสุดที่ช่วงเวลา 15:00-16:00 น. ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.37 ส่วนรูปที่ 6.39 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน  $2.3^{\circ}\text{C}$  ยกเว้นค่าในช่วงเวลาประมาณ 15:00 น. ที่ค่าที่ได้จากการวัดสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นลักษณะที่แตกต่างกับค่าที่นำมาเปรียบเทียบที่ช่วงเวลาอื่นๆ ในรูปที่ 6.40 และ 6.41 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน  $2.8^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.43 ในส่วนของค่า PMV โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่อนข้างมาก เมื่อค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด ในที่นี้ คือ ช่วงเวลาประมาณ 16:00-17:00 น. เมื่อพิจารณารูปที่ 6.42 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง จึงทำให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มแบบเดียวกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง โดยมีค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 15:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.38

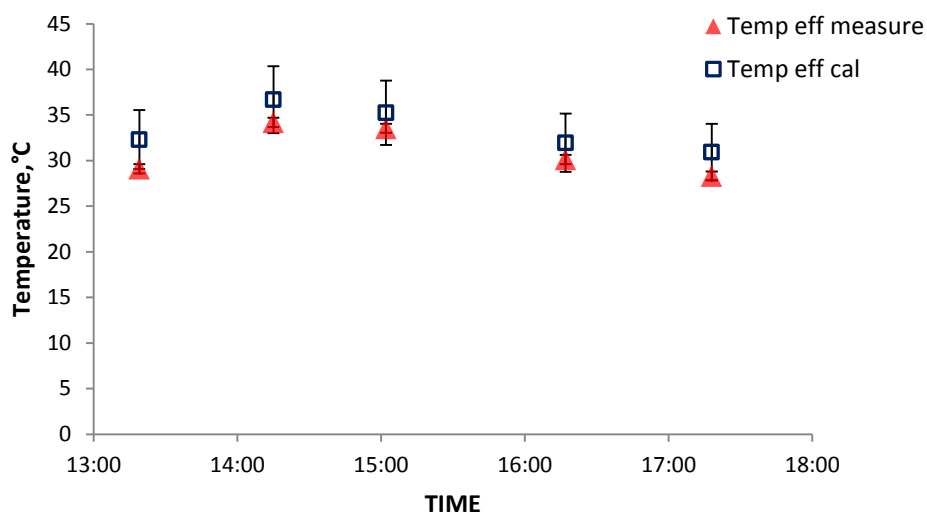
- รูปที่ 6.43 ถึง 6.47 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด  $-45$  องศา และรูปที่ 6.48 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



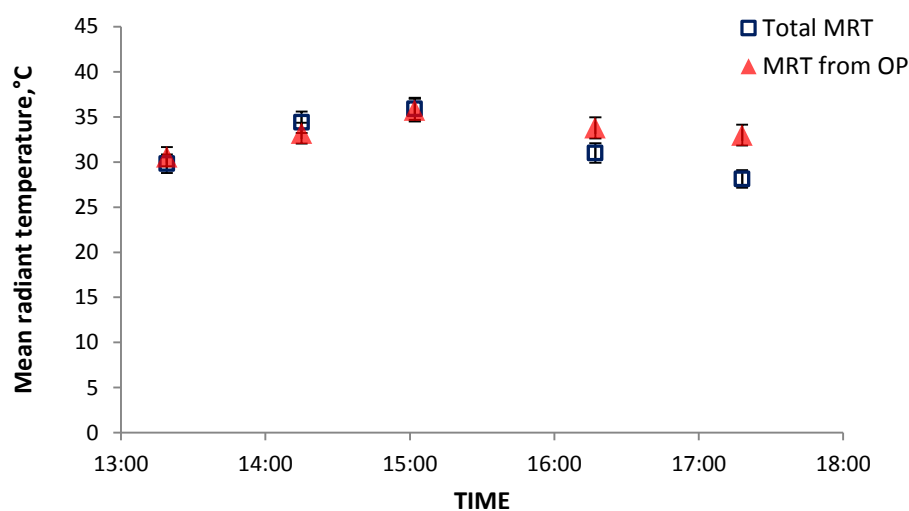
รูปที่ 6.43 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



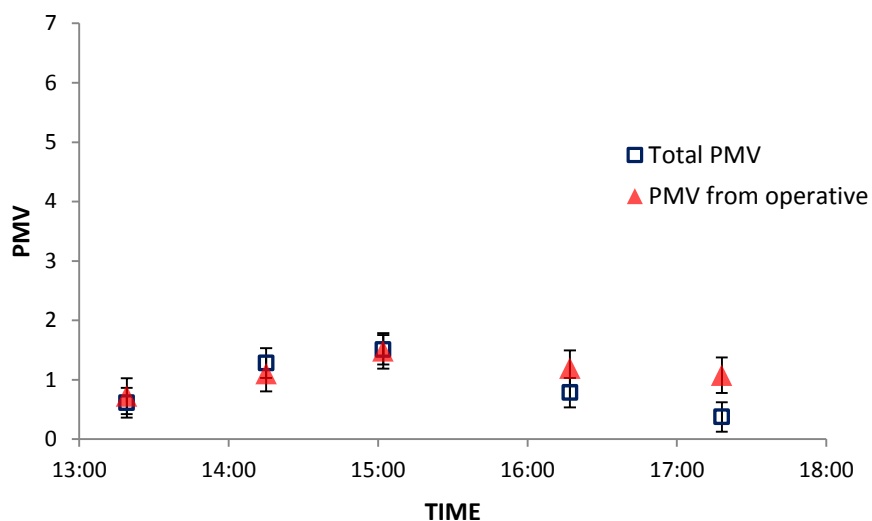
รูปที่ 6.44 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



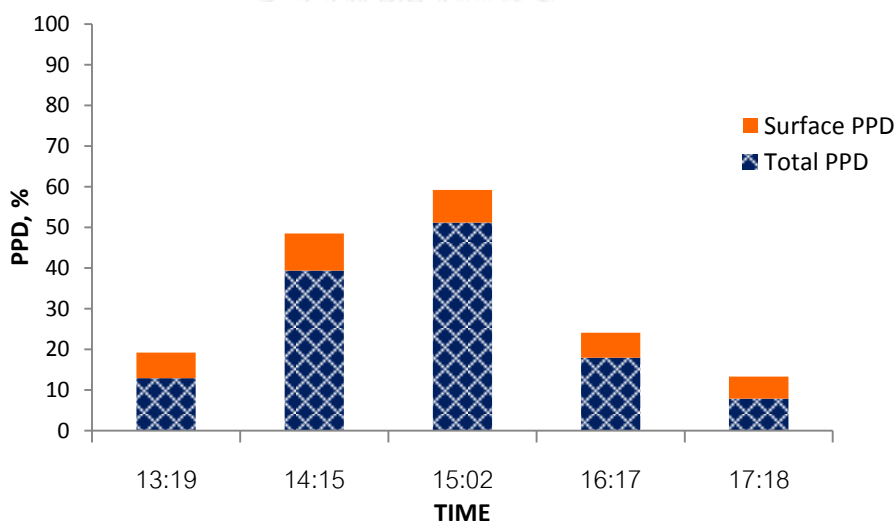
รูปที่ 6.45 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวหนังด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



รูปที่ 6.46 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



รูปที่ 6.47 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา

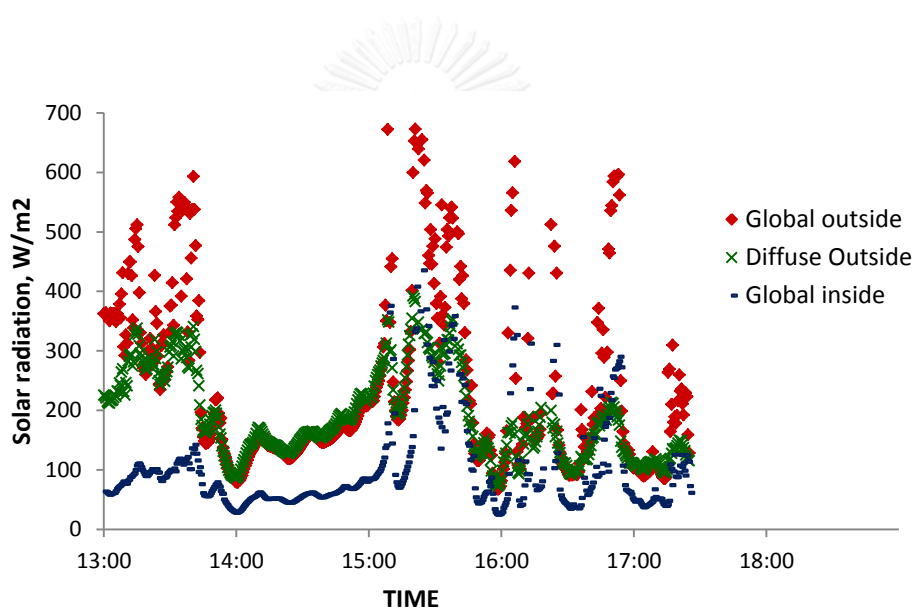


รูปที่ 6.48 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา

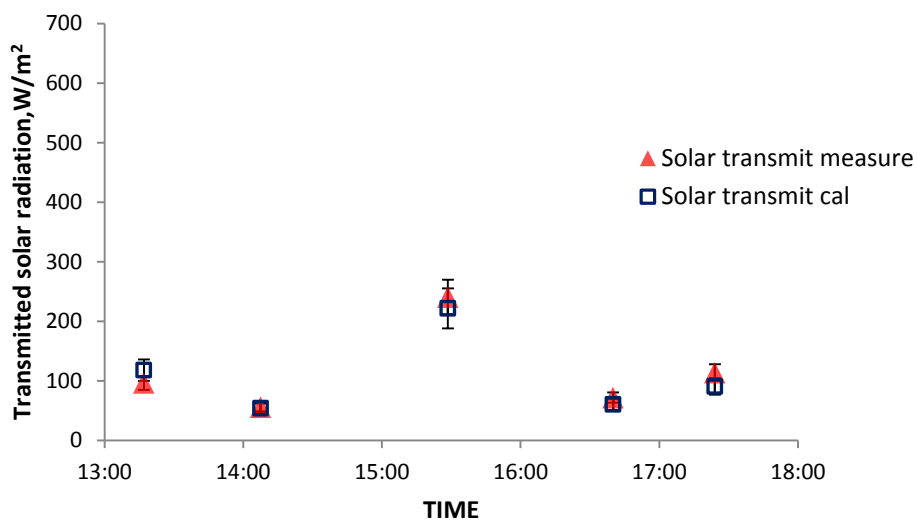
รูปที่ 6.43 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอในช่วงเวลาประมาณ 15:00-17:00 น. เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกบังจากเมฆดังจะเห็นได้ชัดว่ากราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะพุ่งลงทันทีและเมื่อเมฆเคลื่อนที่ออกจากการบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง กราฟก็จะมีลักษณะพุ่งขึ้นทันที ส่วนรูปที่ 6.44 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยในช่วงเวลา 13:00-15:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 18.20 ถึง 70.90  $W/m^2$  แต่ในช่วงเวลาหลัง 15:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 8.96 ถึง 25.39  $W/m^2$  และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับแนวโน้มของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.43 ส่วนรูปที่ 6.45 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 3.2 °C ในรูปที่ 6.46 และ 6.47 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยช่วงเวลาประมาณ 13:00-15:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 1.2 °C ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.18 ในส่วนของค่า PMV แต่ในช่วงเวลาประมาณหลัง 15:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดไม่เกิน 2.8 °C ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย และไม่เกิน 0.70 ในส่วนของค่า PMV โดยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแตกต่างจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่อนข้างมากเมื่อค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นช่วงเวลาประมาณ 15:00-17:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.43 เมื่อพิจารณารูปที่ 6.48 จะเห็นว่า ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง จึงทำให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง มีแนวโน้มแบบเดียวกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่

ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง โดยมีค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 15:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.44

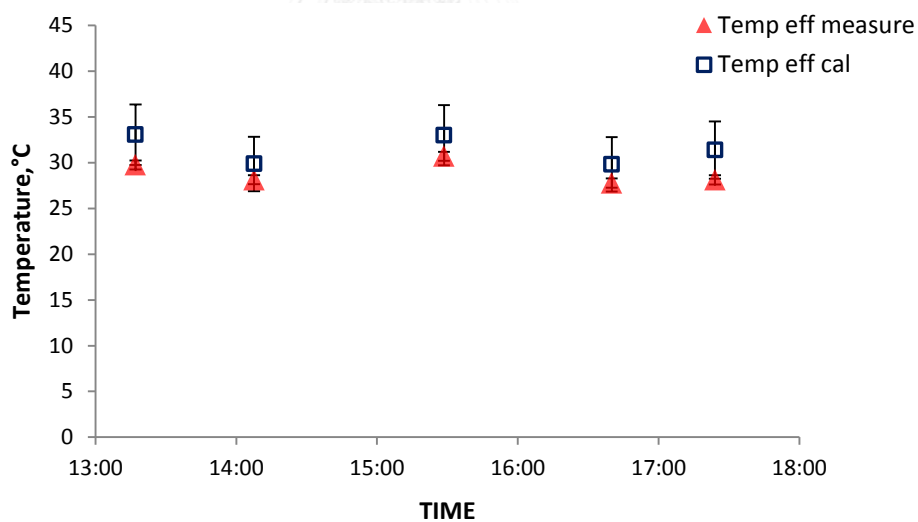
- รูปที่ 6.49 ถึง 6.53 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา และรูปที่ 6.54 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) กับค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (Surface PPD) ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.49 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

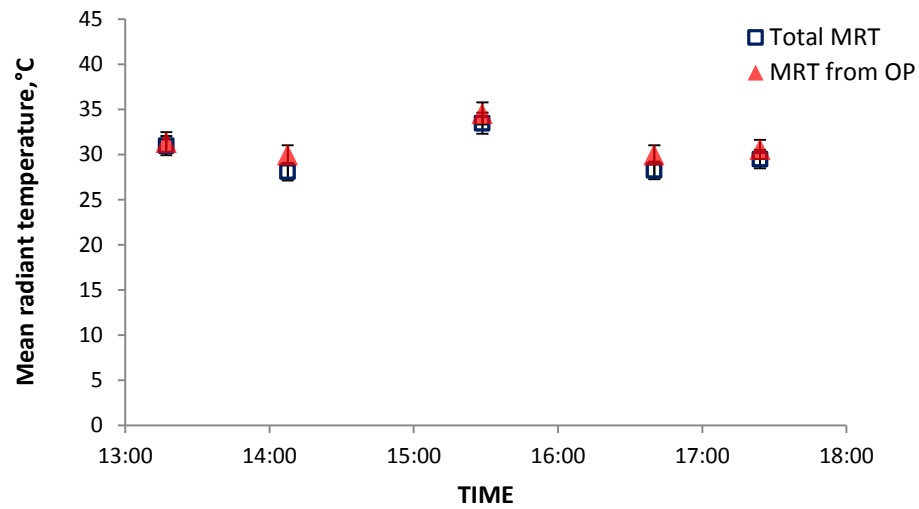


รูปที่ 6.50 เปรียบเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด (Solar transmit measure) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Solar transmit cal) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

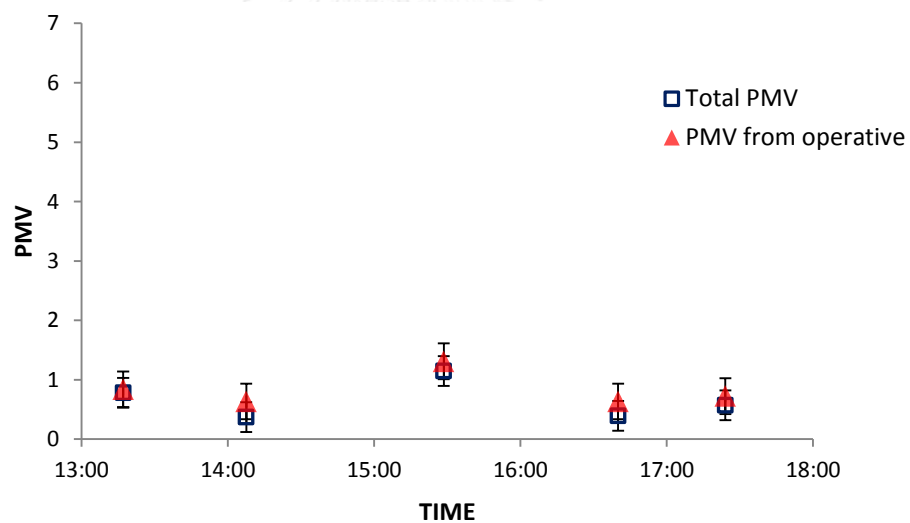


รูปที่ 6.51 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัด (Temp eff measure) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Temp eff cal) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

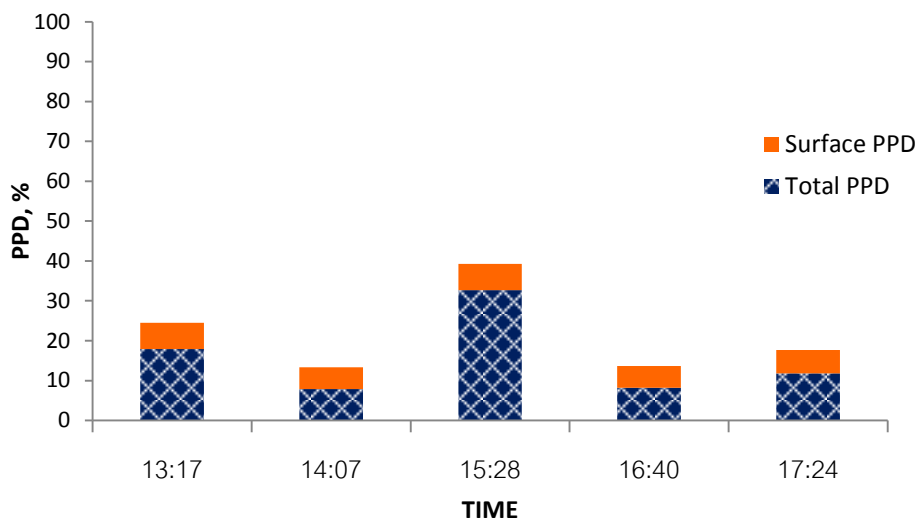




รูปที่ 6.52 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด (MRT from OP) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



รูปที่ 6.53 เปรียบเทียบค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัด (PMV from operative) และที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Total MRT) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา



รูปที่ 6.54 เปรียบเทียบค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Surface PPD) กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Total PPD) ของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา

รูปที่ 6.49 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองของวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 กรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวัน เนื่องจากการวัดค่าในฤดูฝนจึงมีเมฆมาก ส่งผลให้รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกบังจากเมฆ ดังจะเห็นได้ชัดว่ากราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองจะมีลักษณะพุ่งขึ้นเมื่อรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงไม่ถูกบังจากเมฆ และจะมีลักษณะพุ่งลงเมื่อรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกบังจากเมฆ ส่วนรูปที่ 6.50 จะเห็นว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยที่เวลาประมาณ 13:00 น. พบว่าค่าที่เลือกมาพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด จะให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด  $21.63 \text{ W/m}^2$  แต่ในช่วงเวลาหลัง 14:00 น. ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยอยู่ในช่วง 1.40 ถึง  $23.11 \text{ W/m}^2$  และค่าที่ได้ทั้งจากการตรวจวัดและจากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับแนวโน้มของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองในรูปที่ 6.49 ส่วนรูปที่ 6.51 จะเห็นว่า ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้น

มู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 3.3 °C ในรูปที่ 6.52 และ 6.53 จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน 1.7 °C ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยและไม่เกิน 0.26 ในส่วนของค่า PMV เมื่อพิจารณารูปที่ 6.54 จะเห็นว่าเมื่อค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีค่ามากซึ่งตรงกับช่วงเวลาประมาณ 15:00-16:00 น.ของรูปที่ 6.49 ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียวมีสัดส่วนที่น้อยมากอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องในทุกช่วงเวลาที่ยังแนวโน้มแบบเดียวกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง โดยมีค่ามากที่สุดที่เวลาประมาณ 15:00 น. สอดคล้องกับรูปที่ 6.50

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดของกรณีที่ใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศาทั้ง 3 วัน ได้แก่ วันที่ 21 พฤษภาคม 2554 , 30 มิถุนายน 2558 และ 16 กรกฎาคม 2558 พบว่า รูปที่ 6.37 6.43 และ 6.49 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่วัดภายนอกห้องทดลอง และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา โดยในรูปที่ 6.37 เป็นค่าที่วัดในเดือนพฤษภาคม ซึ่งมีลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดทั้งวัน กล่าวคือ กราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะค่อยๆพุ่งขึ้นจนสูงที่สุดที่ช่วงเวลาประมาณ 15:00-16:00 น. และค่อยๆลดต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการรับรังสีแสงอาทิตย์ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ แต่ในรูปที่ 6.43 และ 6.49 เป็นค่าที่วัดในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคมตามลำดับ ซึ่งเป็นฤดูฝนจึงมีเมฆค่อนข้างมาก ส่งผลให้ลักษณะของรังสีแสงอาทิตย์ไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งวันเหมือนค่าที่วัดในเดือนพฤษภาคม โดยช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงถูกเมฆบังกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดภายนอกห้องทดลองและกราฟของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องทดลองมีลักษณะพุ่งลงทันที

รูปที่ 6.38 6.44 และ 6.50 แสดงค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. ถึง 15:00 น. และมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยหลังจากเวลาประมาณ 15:00 น.

รูปที่ 6.39 6.45 และ 6.51 แสดงค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยแต่แนวโน้มแบบเดียวกัน ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณานั้น ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ไม่เกิน  $3.3^{\circ}\text{C}$  และยังคงอยู่ภายใต้แถบความคลาดเคลื่อน แต่จากรูปที่ 6.39 พบว่าที่เวลาประมาณ 15:00 น. ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เพียงจุดเดียว ซึ่งจากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลในช่วงเวลาใกล้เคียงกันกับเวลาดังกล่าว พบว่าได้ผลลัพธ์แบบเดียวกัน ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ไม่เกิดเช่นนี้ในวันที่ทำการทดลองวันอื่น ซึ่งคือในรูปที่ 6.45 และ 6.51 จึงคาดว่า เป็นผลจากการทดลองที่ผิดพลาดในช่วงเวลาประมาณ 15:00 น. เฉพาะการทดลองในวันที่ 20 พฤษภาคม 2554

รูปที่ 6.40 6.46 และ 6.52 แสดงค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยแต่มีแนวโน้มแบบเดียวกัน ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณานั้น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ไม่เกิน  $2.8^{\circ}\text{C}$  และส่วนใหญ่จะครอบคลุมในแถบความคลาดเคลื่อน ยกเว้นในกรณีที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมออย่างมากระหว่างช่วงเวลาที่ประมาณ 16.00 น. และ 17.00 น. ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ความแตกต่างของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะค่อนข้างมาก จากสมการที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่า ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นผลมาจากทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ซึ่งเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีทั้งมากกว่าและน้อยกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่พบว่าค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลอง

คณิตศาสตร์ส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด แสดงให้เห็นว่าที่มุมบิดใบมู่ลี่ -45 องศา ซึ่งใบมู่ลี่บังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้ค่อนข้างน้อย รังสีแสงอาทิตย์จึงสามารถส่องผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก การดुकกลืนรังสีแสงอาทิตย์ในชั้นมู่ลี่จึงต่ำ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีผลกระทบน้อยต่อค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์สูงขึ้นถึงค่าที่ได้จากการตรวจวัดได้ แต่ในจุดที่ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงหรือมากกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการตรวจวัดจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน

รูปที่ 6.41 6.47 และ 6.53 แสดงค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีแนวโน้มเดียวกับค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย เนื่องจากค่า PMV คำนวณมาจากสมการที่ 3.1 ซึ่งกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในส่วนของการจำลองสภาพภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่ง ตั้งแสดงอยู่ในภาคผนวก ก เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่งผลโดยตรงต่อค่า PMV ดังนั้นค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เล็กน้อยเช่นเดียวกับในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ซึ่งในทั้ง 3 วันที่พิจารณา นั้นค่า PMV ที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ไม่เกิน 0.43 °C และยังคงครอบคลุมอยู่ภายใต้แถบคลาดเคลื่อน ยกเว้นในกรณีที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าไม่สม่ำเสมออย่างมาก ดังเช่นในกรณีเวลาประมาณ 16.00 น. และ 17.00 น. ของวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นจึงสามารถใช้งานนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ในกรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ได้แม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้ เมื่อมีปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอ

รูปที่ 6.42 6.48 และ 6.54 แสดงค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะเห็นได้ว่าค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับสัดส่วนของค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เนื่องจากการวางตัวของใบมู่ลี่ที่มุมบิด -45 องศา นั้นจะอยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้เพียงเล็กน้อยและรังสีแสงอาทิตย์ส่วนใหญ่สามารถส่องผ่านชั้นมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้ ซึ่งการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศา แสดงอยู่ในบทที่ 7 parametric study ในรูปที่ 7.1

7.4 และ 7.7 ดังนั้นเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จึงทำให้ชั้นของมู่ลี่ไม่ได้ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ไว้ อย่างเต็มที่ ค่า PPD ที่มาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จึงเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่าค่า PPD ที่มาจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เมื่อพิจารณารูปที่ 6.42 6.48 และ 6.54 ร่วมกับรูปที่ 6.6 6.12 และ 6.18 ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และรูปที่ 6.23 6.29 และ 6.35 ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา จะเห็นได้ชัดว่าสัดส่วนของค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา จะมีค่าน้อยที่สุด รองลงมาเป็นกรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และ 45 องศา ตามลำดับ เนื่องจากใบมู่ลี่ที่มุมบิด -45 องศา จะอยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้น้อยที่สุด รองลงมาเป็นกรณีที่มุมบิด 0 องศา และ 45 องศา ตามลำดับ



### 6.3 วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ให้มีความแม่นยำใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด โดยดัชนีที่ใช้บ่งบอกความสบายเชิงความร้อน ได้แก่ ค่า PMV และค่า PPD ดังแสดงอยู่ในสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่า PMV มาเป็นดัชนีเพื่อชี้วัดความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ โดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณมาจากสมการที่ 3.1 ซึ่งกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในส่วนของการจำลองสภาพภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่ง ดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ก เพื่อให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่งผลโดยตรงต่อค่า PMV จากนั้นจึงนำค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มาตรวจสอบความแม่นยำกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด จากการกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของสมการที่ 3.1 ในส่วนของการจำลองสภาพภายในห้องให้คงที่ที่สภาวะหนึ่ง ดังนั้นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า PMV ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีเพียงตัวเดียว คือ ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ซึ่งเป็นผลมาจากทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ซึ่งหากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จริงจากการทดลอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็น่าจะให้ผลลัพธ์ในการทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ได้ใกล้เคียงกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง

จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.2 พบว่า ในส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการตรวจวัดให้ค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มแบบเดียวกัน แต่จะมีบางกรณีที่ไม่ครอบคลุมด้วยแถบความคลาดเคลื่อน ในส่วนของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการตรวจวัดให้ค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มแบบเดียวกัน และครอบคลุมด้วยแถบความคลาดเคลื่อนทุกตัวอย่างที่พิจารณา เมื่อพิจารณาเป็นผลรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ซึ่งแสดงด้วยค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการตรวจวัดให้ค่าที่ใกล้เคียงและมีแนวโน้มแบบเดียวกัน แต่ค่าที่ได้จากการตรวจวัดส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อย ทั้งในกรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0, 45 และ -45 องศา ซึ่งเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่า

ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยอยู่ในช่วง  $1.10-46.92 \text{ W/m}^2$  ส่วนค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยไม่เกิน  $1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าที่ใกล้เคียงกันมากโดยมีความแตกต่างกันไม่เกิน  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วง  $0.66-22.32 \text{ W/m}^2$  ส่วนค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มากที่สุดไม่เกิน  $4.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อย โดยมีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดกับที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศาจะมากกว่ากรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา แต่ไม่เกิน  $3.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอยู่ในช่วง  $1.40-70.90 \text{ W/m}^2$  ส่วนค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยไม่เกิน  $3.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  แต่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เล็กน้อยแต่ไม่เกิน  $2.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จากการพิจารณาองค์ประกอบของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยออกเป็น 2 ส่วนแยกกัน คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ พบว่า ที่มุมบิดใบมู่ลี่ที่แตกต่างกันให้ผลลัพธ์ในการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดแตกต่างกัน แต่เมื่อนำมาพิจารณาเป็นค่า PMV ซึ่งเป็นผลลัพธ์สุดท้ายที่ต้องการใช้เพื่อทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ พบว่า ทุกมุมบิดของใบมู่ลี่และทุกตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าที่ได้จากการตรวจวัด ให้ค่า PMV ที่ใกล้เคียงกันโดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อย แต่ยังคงครอบคลุมด้วยแถบความคลาดเคลื่อนเกือบทุกตัวอย่าง โดยค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุดเท่ากับ 0.52 ของกรณีรังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำและไม่สม่ำเสมอ เวลาประมาณ 17:00 น. ของวันที่ 30 มิถุนายน 2554 ที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศา ได้แม่นยำอยู่ในระดับที่เชื่อถือได้



เมื่อพิจารณาค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ กับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศา พบว่า ที่มุมบิดของใบมู่ลี่ 0 และ -45 องศา ค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จะมีสัดส่วนที่น้อยเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง เพราะใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะที่ทำให้รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงส่งผ่านชั้นมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้ค่อนข้างมาก จึงมีการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ภายในชั้นมู่ลี่น้อย แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะที่บังให้รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงส่งผ่านชั้นมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้ค่อนข้างน้อย จึงมีการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ภายในชั้นมู่ลี่มาก สัดส่วนของค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ก็จะมากกว่ากรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ -45 องศา ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ยิ่งใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้มากเท่าไร สัดส่วนของค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ก็จะมากขึ้นตาม ในที่นี้สัดส่วนของค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อเทียบกับค่า PPD ที่รวมทั้งผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะมีค่ามากที่สุดเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45, 0 และ -45 องศา ตามลำดับ

## บทที่ 7

### Parametric study

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) ของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นทำ parametric study ในหัวข้อดังนี้

7.1 ชนิดของกระจกที่ใช้

7.2 ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ (Slat reflectance)

7.3 สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

โดยใช้เงื่อนไขสภาวะอากาศภายนอกและภายในห้องคงที่ ดังนี้

- ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ ( $I_{dir,nor}$ ) มีค่า  $671.862 \text{ W/m}^2$
- ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ มีค่า  $195.160 \text{ W/m}^2$
- อุณหภูมิอากาศภายนอกห้อง มีค่า  $34.22 \text{ }^\circ\text{C}$
- อุณหภูมิอากาศภายในห้อง มีค่า  $25.1 \text{ }^\circ\text{C}$

นอกจากนั้นยังจำลองสภาพภายในห้องและผู้อยู่อาศัยให้คงที่ดังแสดงอยู่ในภาคผนวก ก ซึ่งในการกำหนดเงื่อนไขสภาวะอากาศภายนอกและภายในห้อง รวมทั้งจำลองสภาพภายในห้องและผู้อยู่อาศัยให้คงที่นั้น เพื่อที่จะให้เห็นถึงผลจากการเปรียบเทียบตามหัวข้อดังกล่าวได้อย่างชัดเจน ซึ่งแต่ละหัวข้อที่ทำ parametric study นั้น จะพิจารณาที่มุม solar profile ( $\theta_s$ ) ของดวงอาทิตย์ที่กระทำกับหน้าต่างกระจกซึ่งนิยามตามรูปที่ 4.1 จำนวน 3 มุม คือ มุม 30 45 และ 60 องศา และที่มุมบิดใบมู่ลี่จำนวน 3 มุม คือ มุมบิด 0 45 และ -45 องศา

โดยผลของพารามิเตอร์ต่างๆ จะถูกนำมาเปรียบเทียบในส่วนของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (transmitted solar radiation) โดยแบ่งเป็นปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง และปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง, ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (effective inner surface temperature) เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้น

กระจก (inner glass surface temperature) และค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ทั้งส่วนที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เพียงอย่างเดียว (surface PPD) และส่วนที่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งเข้ามาภายในห้องเพียงอย่างเดียว (solar PPD)

### 7.1 ชนิดของกระจกที่ใช้

กระจกที่นำมาศึกษามี 3 ชนิด ได้แก่ กระจกใสหนา 6 มิลลิเมตร กระจกสีชาหนา 6 มิลลิเมตรและกระจกใส 2 ชั้นหนาชั้นละ 6 มิลลิเมตรและมีช่องว่างอากาศตรงกลางเป็นระยะห่าง 6 มิลลิเมตร และใช้มู่ลี่เป็นชนิดแนวนอน ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม ซึ่งรายละเอียดและคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกและมู่ลี่ที่ใช้ในการศึกษาแสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และ 7.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 7.1 ค่าคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกที่ใช้ในการศึกษา

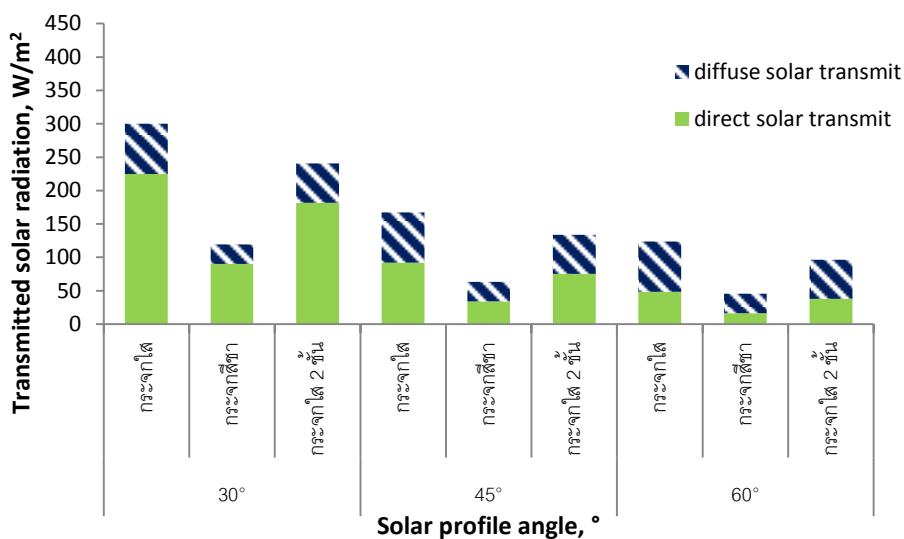
ค่าคุณสมบัติ	กระจกใส	กระจกสีชา	กระจกใส 2 ชั้น
Conductivity	0.917 W/m-K	0.917 W/m-K	0.917 W/m-K
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.840	0.840	0.840
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.840	0.840	0.840
ค่าการส่งผ่านรังสี	0.800	0.340	0.650
ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้า	0.080	0.050	0.130
ค่าการสะท้อนรังสีด้านหลัง	0.080	0.050	0.080
ค่าการดูดกลืนรังสี	0.12	0.61	กระจกใสชั้นที่ 1 0.137 กระจกใสชั้นที่ 2 0.098

ตารางที่ 7.2 ค่าคุณสมบัติของมู่ลี่ที่ใช้ในการศึกษา

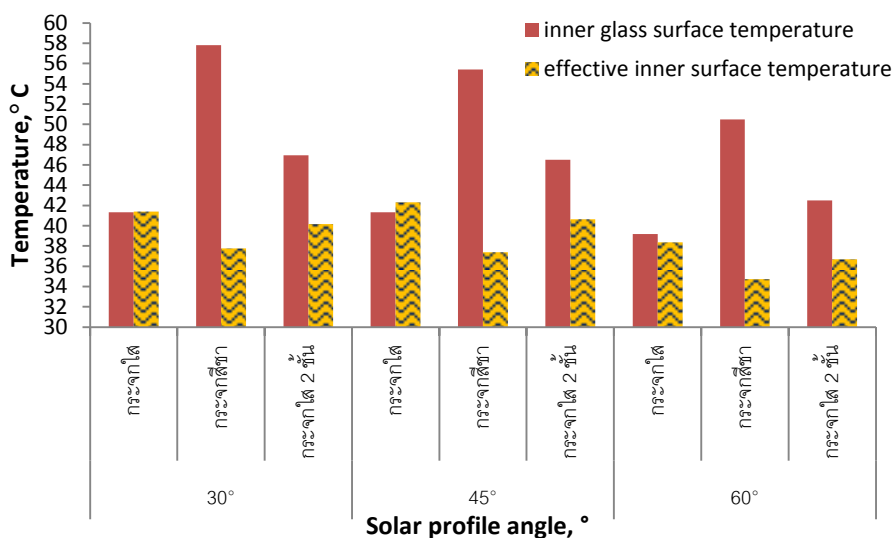
ค่าคุณสมบัติ	
ความหนาของใบมู่ลี่	0.3 mm
ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่	20 mm
ความกว้างของใบมู่ลี่ (วัดตามผิวโค้ง)	25.4 mm
ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่	71.5 mm
สภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่	120 W/m-K
ค่าการส่งผ่านรังสี	0
ค่าการสะท้อนรังสี(คลื่นสั้น)ด้านหน้า	0.71
ค่าการสะท้อนรังสี(คลื่นสั้น)ด้านหลัง	0.71
ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า	0.83
ค่าการเปล่งรังสีด้านหลัง	0.83

- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

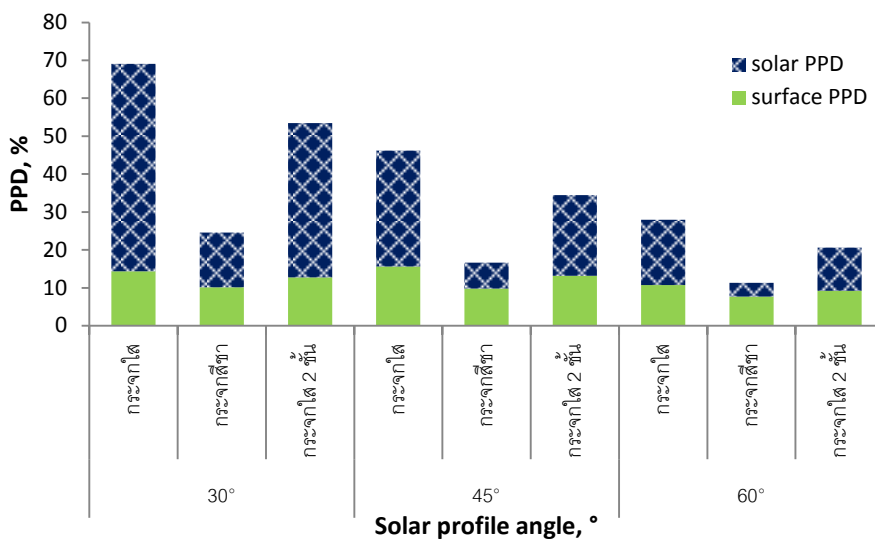
รูปที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้ชนิดของกระจกที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.1 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.2 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



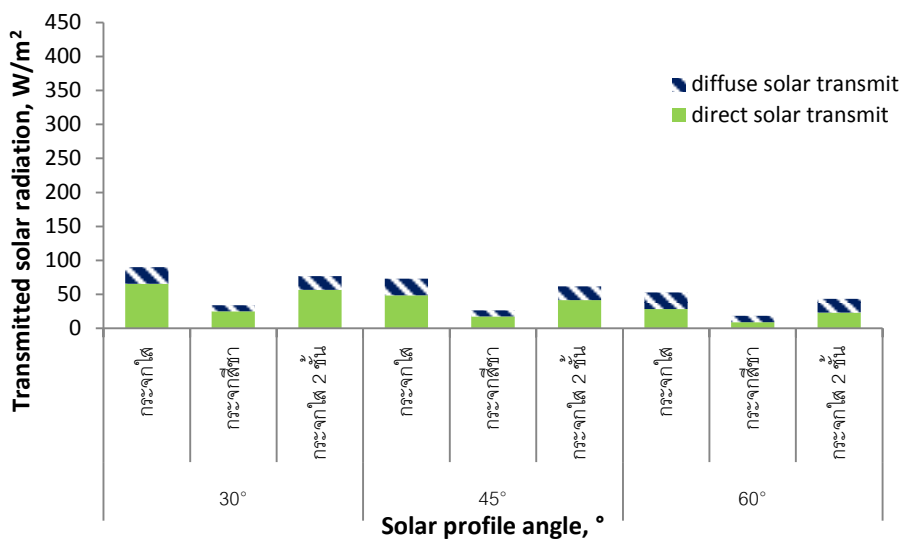
รูปที่ 7.3 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะน้อยที่สุดเมื่อใช้กระจกสีชา กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ เนื่องจากกระจกสีชามีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำที่สุด รองมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงแสงของหน้าต่างกระจกถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และยังมีมุม solar profile มีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยิ่งน้อยลงซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเท่านั้น แต่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายสามารถส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้เท่าเดิมเนื่องจากไม่ขึ้นกับมุม solar profile ของดวงอาทิตย์ และเมื่อกระจกมีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าที่สูง ทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ถูกดูดกลืนในชั้นของกระจกสีชามากที่สุด รองลงมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ ซึ่งแสดงออกมาเป็นค่าของอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกที่สูง แต่เมื่อใช้กระจกที่มีค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์สูงส่งผลให้รังสีแสงอาทิตย์ส่งผ่านไปยังชั้นมู่ลี่ได้น้อย จึงทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีค่าต่ำ ดังนั้นเมื่อใช้กระจกสีชาจะทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่มีค่าต่ำสุด รองลงมา คือ เมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 7.2 จากผลของทั้งปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่นั้น ทำให้ค่า PPDรวม เมื่อใช้กระจกสีชามีค่าต่ำกว่าค่า PPDรวม เมื่อ

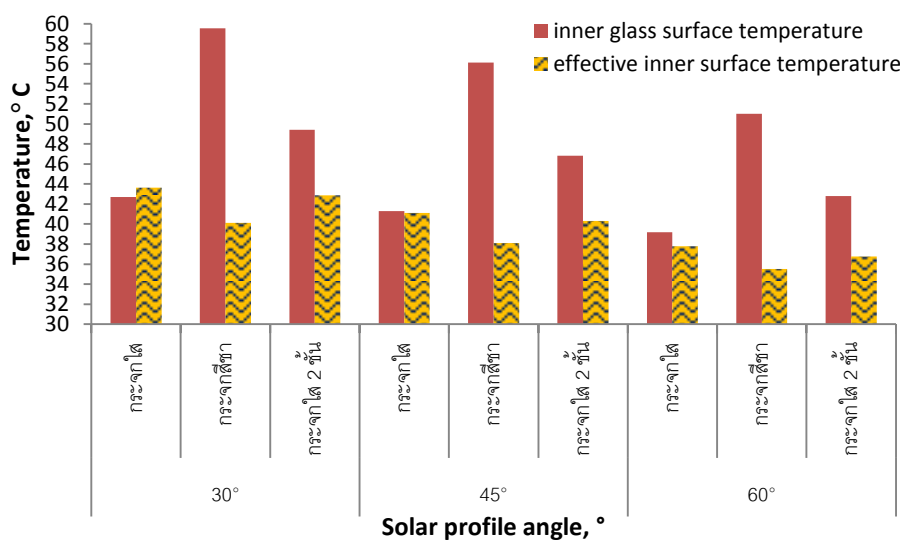
ใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 7.3 และเมื่อพิจารณาค่า PPD แยกเป็นส่วน ของค่า PPD ที่มาจากผลของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามา ภายในห้อง (solar PPD ) และค่า PPD ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (surface PPD) พบว่าค่า solar PPD เมื่อใช้กระจกสีจะต่ำกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้นและกระจกใสอย่าง ชัดเจนที่มุม solar profile ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ที่ ต่ำของกระจกสี แต่พบว่าค่า surface PPD เมื่อใช้กระจกทั้ง 3 ชนิด ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึง สามารถสรุปได้ว่า เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา การใช้กระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ที่ต่ำจะ ช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ลงได้มากไม่ว่าดวง อาทิตย์จะทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกเป็นเท่าไร โดยจะส่งผลอย่างมากในการช่วยลด ค่าความไม่สบายเชิงความร้อนที่มาจากผลของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจก ติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง หรือ solar PPD แต่ส่งผลกระทบต่อค่าความไม่สบายเชิงความร้อน ที่มาจากผลของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ หรือ surface PPD ในที่นี้ การใช้กระจกสีจึง ช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่มีมุมปิดใบมู่ลี่ 0 องศา ลงได้มากที่สุด รองลงมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และ กระจกใส ตามลำดับ

- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

รูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิว ด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้น กระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบาย เชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้ชนิดของกระจกที่แตกต่าง กัน 3 ชนิด ได้แก่ กระจกใส กระจกสี และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา โดย พิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

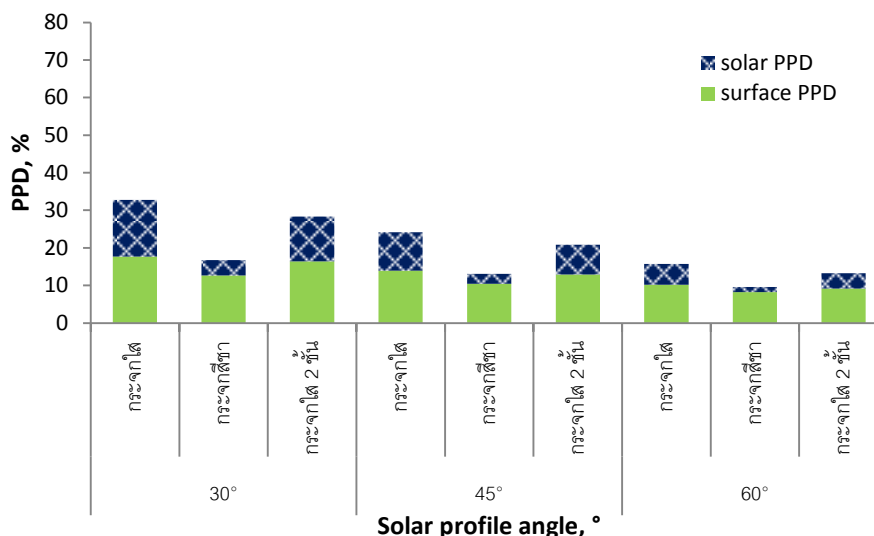


รูปที่ 7.4 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้นและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.5 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา





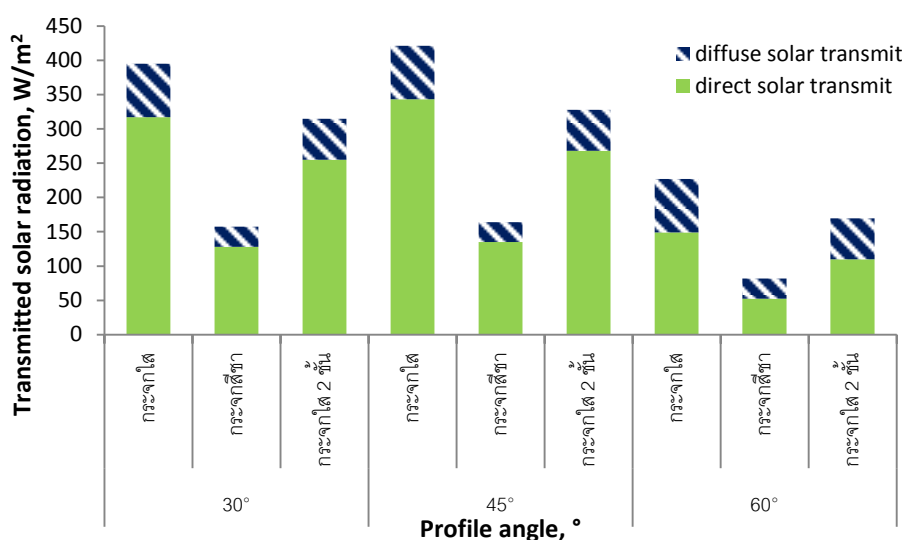
รูปที่ 7.6 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา แนวโน้มของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะเป็นลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา กล่าวคือ เมื่อใช้กระจกสีชาจะทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่ำกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ และยิ่งมุม solar profile มีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยิ่งน้อยลงซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเท่านั้น แต่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายสามารถส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้เท่าเดิมเนื่องจากไม่ขึ้นกับมุม solar profile ของดวงอาทิตย์ ในส่วนของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก และค่า PPD ก็จะมีลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา กล่าวคือ เมื่อใช้กระจกสีชาจะทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ และค่า PPD ต่ำกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ แต่ทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกสูงกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส เช่นเดียวกันดังแสดงอยู่ในรูปที่ 7.5 และ 7.6 เนื่องจากเหตุผลเดียวกับเมื่อใช้ใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา คือ กระจกสีชา มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำที่สุด รองลงมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และ กระจกใส ตามลำดับ แต่ค่า PPD รวมเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา จะเป็นผลมาจากค่า surface PPD มากกว่าค่า solar PPD อย่างชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากเมื่อใช้ใบมู่ลี่ที่ทำมุมปิด 0 องศา ที่ค่า surface PPD ไม่ได้มีผลต่อค่า PPD รวม

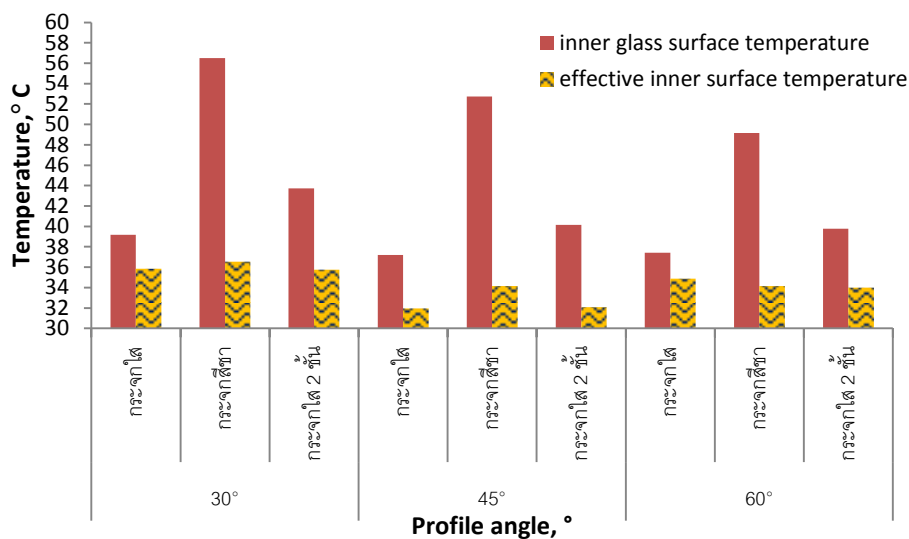
มากเช่นนี้ โดยเกิดจากการวางตัวของใบมู่ลี่เมื่อทำมุมบิด 45 องศาที่สามารถบังรังสีแสงอาทิตย์ได้ดีกว่าใบมู่ลี่ที่ทำมุมบิด 0 องศาทุกมุม solar profile ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา จึงทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา มีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่า solar PPD มีค่าต่ำ ค่า PPDรวมจึงเป็นผลมาจากค่า surface PPD ค่อนข้างมาก

- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

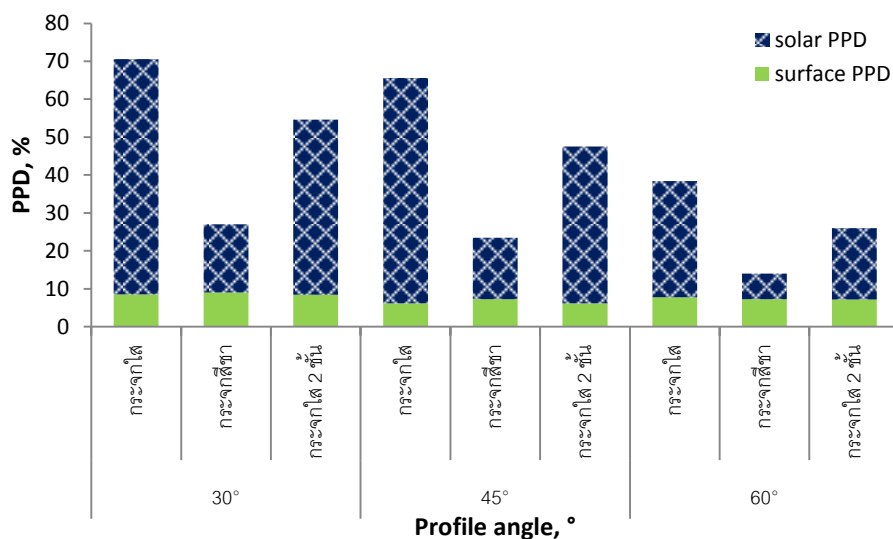
รูปที่ 7.7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.9 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้ชนิดของกระจกที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.7 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.8 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.9 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.7 จะเห็นว่า เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา แนวโน้มของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายใน จะเป็นลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศาและ 45 องศา กล่าวคือ เมื่อใช้กระจกสีชาจะทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องต่ำกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส เนื่องจากเหตุผลเดียวกับเมื่อใช้ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา คือ กระจกสีชา มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำที่สุด รองลงมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และ กระจกใส ตามลำดับ และยิ่งมุม solar profile มีขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยิ่งน้อยลงซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเท่านั้น แต่ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายสามารถส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้เท่าเดิมเนื่องจากไม่ขึ้นกับมุม solar profile ของดวงอาทิตย์ แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์จะสามารถส่งผ่านชั้นมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้มากกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา เห็นได้จากรูปที่ 7.7 เปรียบเทียบกับรูปที่ 7.1 และ 7.4 จากรูปที่ 7.8 จะเห็นได้ว่า แนวโน้มของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา เป็นลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศาที่ทุกมุม solar profile ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก เมื่อใช้กระจกสีชาจะสูงที่สุด รองลงมาเป็นกระจกใส 2 ชั้น และ กระจกใส ตามลำดับ แต่แนวโน้มของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด - 45 องศา แตกต่างจากเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด - 45 องศา เมื่อใช้กระจกสีชาไม่ได้ต่ำที่สุด รองลงมาเป็นกระจกใส 2 ชั้น และ กระจกใส เช่นเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา แต่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด - 45 เมื่อใช้กระจกต่างชนิดกันค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยยิ่งมุม solar profile อยู่ในลักษณะที่รังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาได้มาก ในที่นี้ คือ มุม solar profile 30 และ 45 องศา ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใช้กระจกสีชาจะมีแนวโน้มที่สูงกว่าเมื่อใช้กระจกใสและกระจกใส 2 ชั้น แต่ถ้ามุม solar profile อยู่ในลักษณะที่รังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาได้น้อย ในที่นี้ คือ มุม solar profile 60 องศา ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่เมื่อใช้กระจกใสจะสูงที่สุด แต่เมื่อใช้กระจกสีชาและกระจกใส 2 ชั้น จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และจากรูปที่ 7.9 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่า PPD เมื่อใช้กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา เมื่อดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจก ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา พบว่ามีแนวโน้มแบบเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา คือ ค่า PPD ที่รวมทั้งผลที่มาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและผลที่มาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ หรือค่า PPD รวม เมื่อใช้กระจก

สีชาจะมีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส แต่แตกต่างกับเมื่อใบมู่ลี่ที่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศาตรงที่ค่า PPDรวมนั้นเป็นผลมาจากค่า solar PPD มากกว่าค่า surface PPD อย่างชัดเจน

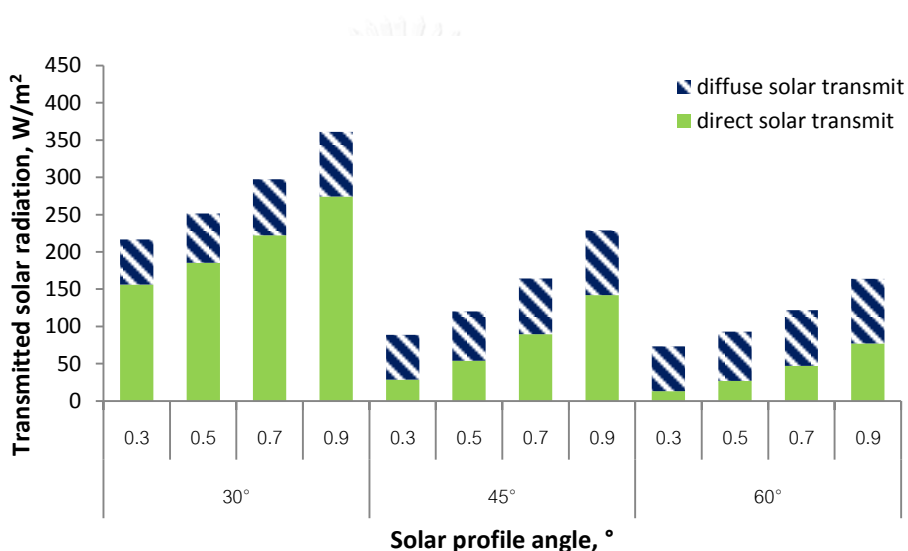
จากการศึกษาชนิดของกระจกที่ใช้ ได้แก่ กระจกใส กระจกสีชา และกระจกใส 2 ชั้น พบว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิดใดก็ตามและดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกเท่าใดก็ตาม การใช้กระจกสีชาจะช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ได้มากที่สุด รองลงมา คือ กระจกใส 2 ชั้น และกระจกใส ตามลำดับ โดยกระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำจะช่วยลดค่า PPD ที่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (solar PPD) ลงได้อย่างชัดเจน แต่แทบจะไม่ส่งผลต่อค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (surface PPD) และยิ่งใบมู่ลี่ทำมุมบิดในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้น้อย ในที่นี้ คือ มุมบิดใบมู่ลี่ -45 องศา ซึ่งปริมาณรังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้มากกว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา เห็นได้จากรูปที่ 7.1 7.4 และ 7.7 ค่า PPDที่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (solar PPD) จะยิ่งมาก การใช้กระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำจึงสามารถช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ หรือค่า PPDรวมลงได้มาก แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิดในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้มาก รังสีแสงอาทิตย์จึงส่งผ่านมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้น้อย ค่า PPD ที่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (solar PPD) จึงน้อย การใช้กระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำจึงสามารถช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่หรือค่า PPDรวมลงได้เป็นสัดส่วนที่น้อยกว่า

## 7.2 ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ (Slat reflectance)

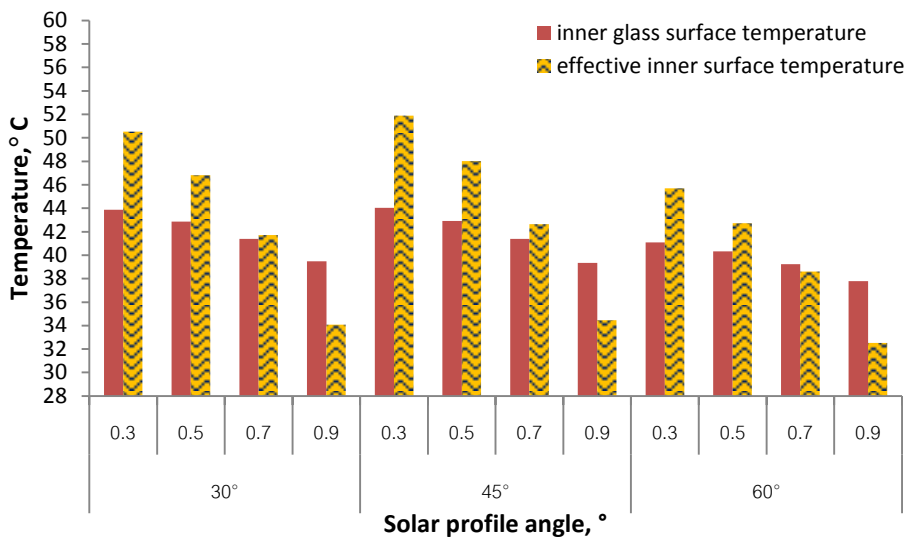
การศึกษาผลของค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่มีต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ได้แก่ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่เท่ากับ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 ซึ่งทำการศึกษากับกระจกชนิดเดียว คือ กระจกใส โดยค่าคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกที่ใช้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และมู่ลี่ที่ใช้เป็นชนิดแนวนอน ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม ซึ่งคุณสมบัติอื่นๆของมู่ลี่ที่ใช้ ยกเว้นค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ต้องการศึกษาแสดงอยู่ในตารางที่ 7.2

- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา

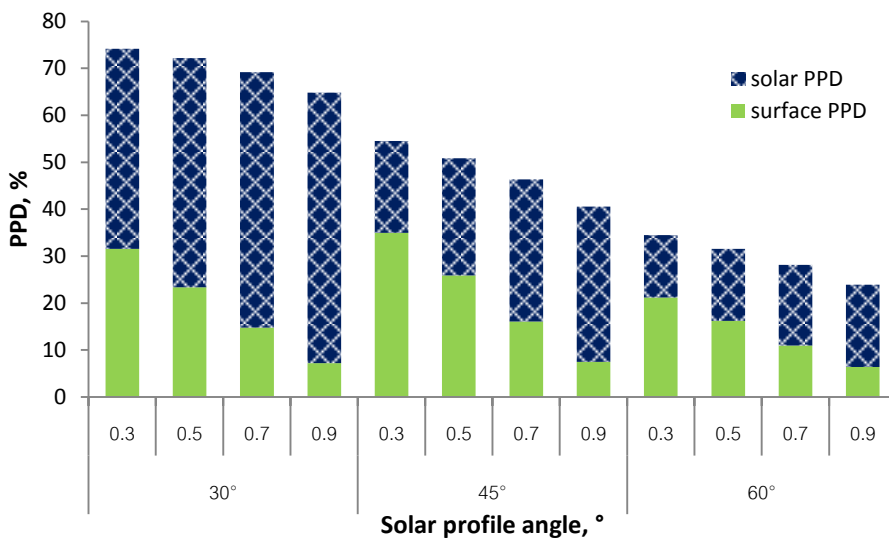
รูปที่ 7.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.12 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.10 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.11 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของโบนู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และโบนู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



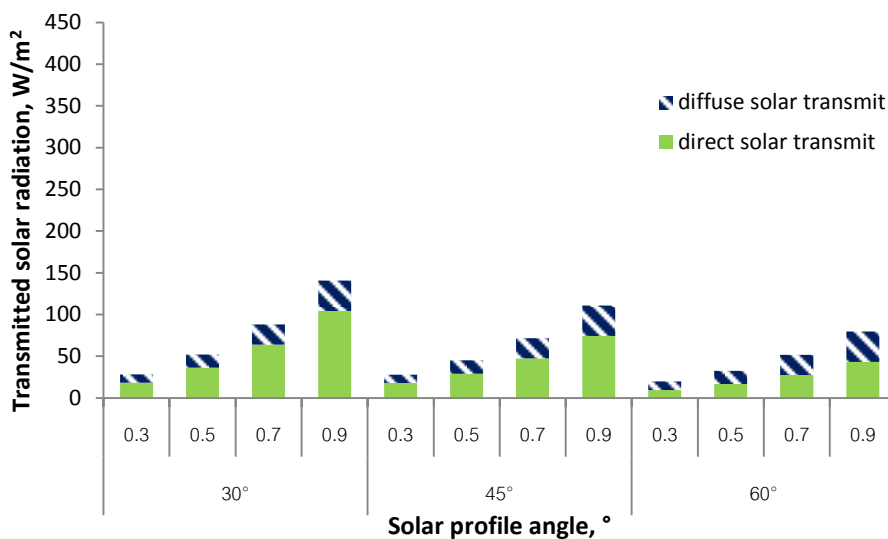
รูปที่ 7.12 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของโบนู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และโบนู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา ยิ่งค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่มีค่ามาก รังสีแสงอาทิตย์ที่โดนถูกใบมู่ลี่จะสามารถสะท้อนเข้าสู่ภายในห้องได้มาก ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยิ่งมีค่ามาก ส่งผลให้การดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ในชั้นมู่ลี่น้อยลง ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จึงมีค่าลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก ดังแสดงในรูปที่ 7.11 จากผลของทั้งปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่นั้น ส่งผลให้ค่า PPD รวมมีค่าลดลง เป็นลักษณะเดียวกันทั้ง 3 มุม solar profile โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่มีค่ามากขึ้น ค่า PPD ที่เป็นผลมาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องหรือ solar PPD จะมีค่ามากขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้มากขึ้น แต่ค่า PPD ที่เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่หรือ surface PPD จะมีค่าลดลง เช่นเดียวกับค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่มีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 7.12

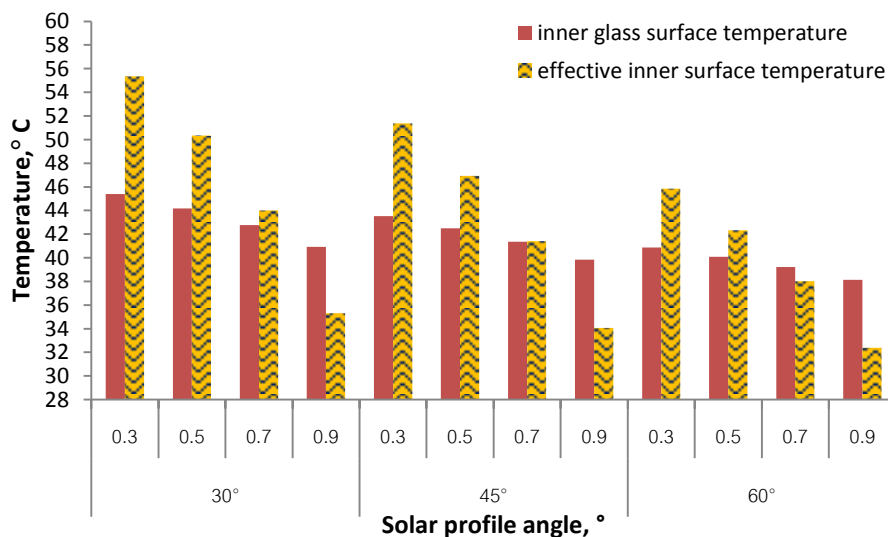
- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา

รูปที่ 7.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

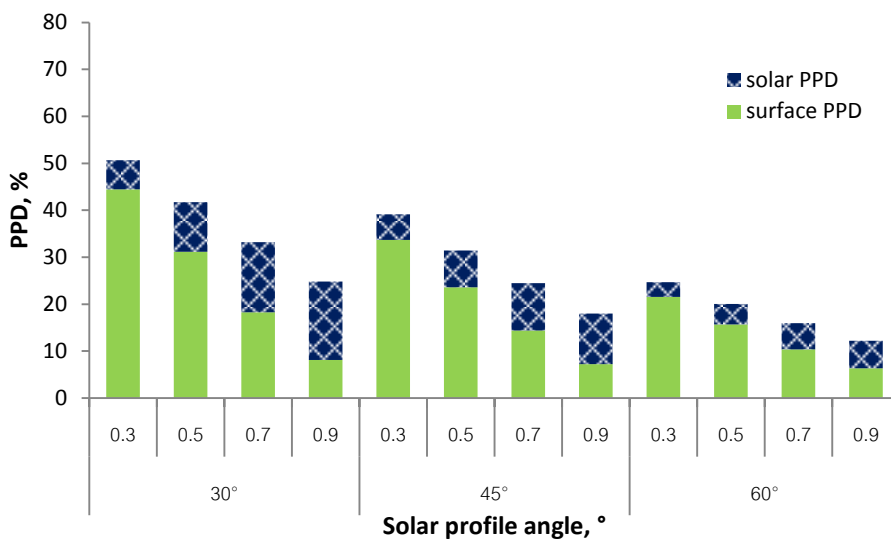




รูปที่ 7.13 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของโบลูมี 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และโบลูมีทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.14 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของโบลูมี 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และโบลูมีทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

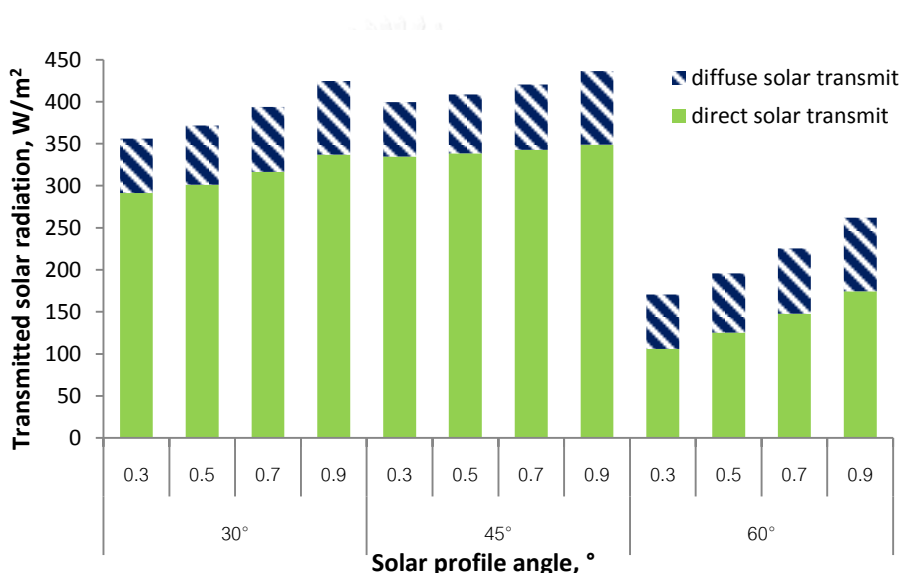


รูปที่ 7.15 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

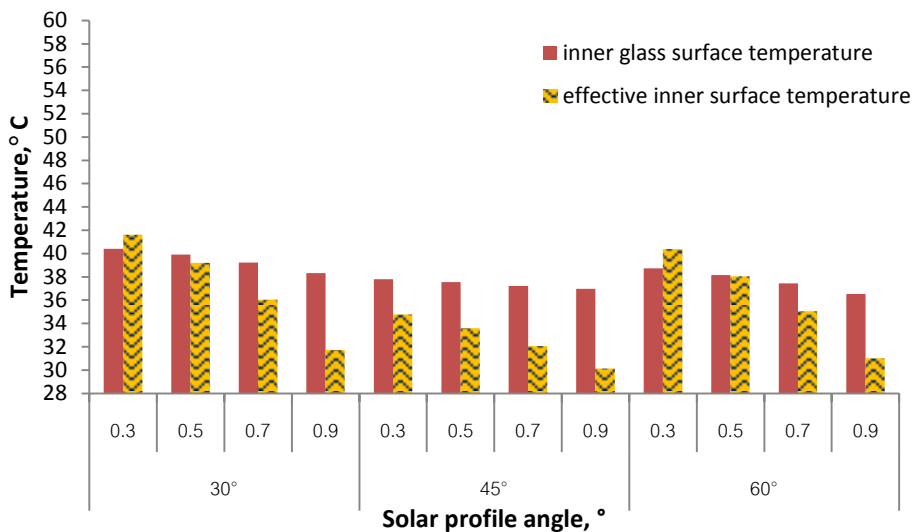
จากรูปที่ 7.13 7.14 และ 7.15 จะเห็นว่า เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา แนวโน้มของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ และค่า PPD รวม จะมีลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา กล่าวคือ ยิ่งใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีมาก ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยังมีค่ามาก แต่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ และค่า PPD รวม จะมีค่าลดลง และเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ซึ่งอยู่ในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้มาก เมื่อค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่มีค่าน้อย ค่า PPD รวมจะเป็นผลมาจากค่า surface PPD มากกว่าค่า solar PPD อย่างชัดเจน แต่ยิ่งค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่มีค่ามากขึ้น ค่า PPD รวมจะเป็นผลมาจากค่า solar PPD มากยิ่งขึ้น

- กรณีใบบู่ลิที่ทำมุมบิด -45 องศา

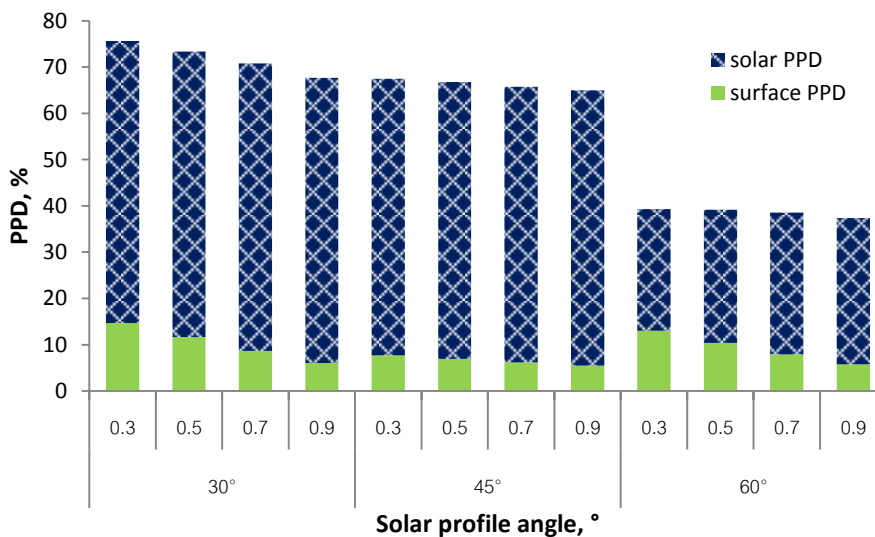
รูปที่ 7.16 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลิเข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลิ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลิ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลิที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบบู่ลิ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบบู่ลิที่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.16 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลิเข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลิที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบบู่ลิ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบบู่ลิที่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.17 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.18 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 และใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.16 7.17 และ 7.18 จะเห็นว่า เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา แนวโน้มของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ จะมีลักษณะเดียวกับเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 และ 45 องศา กล่าวคือ ยิ่งใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีมาก ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะยิ่งมีค่ามาก แต่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ และค่า PPDรวม จะมีค่าลดลง แต่รูปที่ 7.18 จะเห็นได้ว่าค่า PPDรวมเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา เป็นผลมาจากค่า solar PPD มากกว่าค่า surface PPD อย่างชัดเจนที่มุม solar profile ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา ดังนั้นเมื่อใช้มู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีมาก ถึงแม้ว่าจะช่วยลดค่า surface PPD ลงได้ แต่เมื่อประกอบกับค่า solar PPD แล้ว ยังทำให้ค่า PPDรวมลดลงเพียงเล็กน้อย

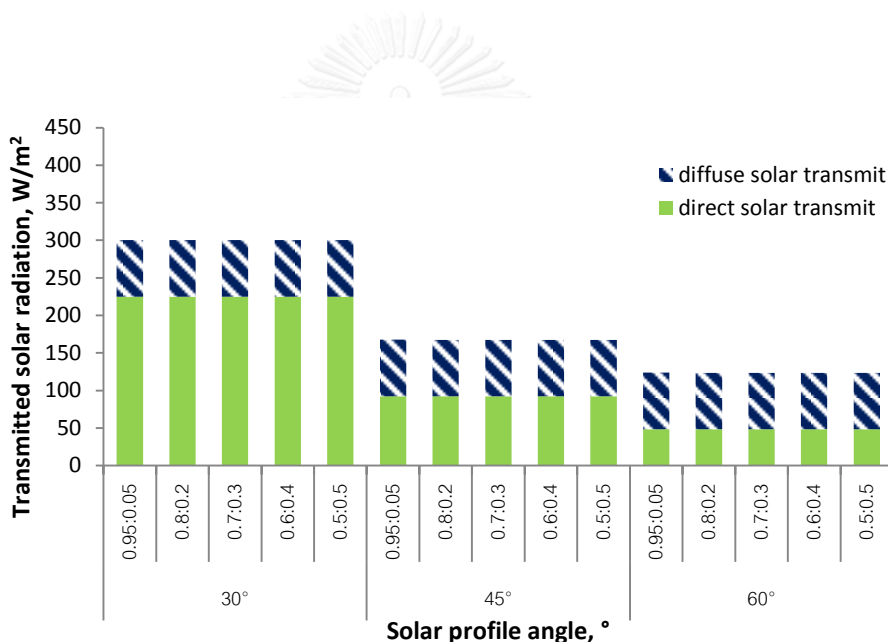
จากการศึกษาผลของค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้ใช้อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่ทั้ง 3 มุมปิดใบมู่ลี่ ซึ่งได้แก่มุมปิด 0 45 และ -45 องศา และดวงอาทิตย์ทำมุม solar profile กับหน้าต่างกระจกทั้ง 30, 45 และ 60 องศา พบว่ายิ่งใบมู่ลี่มีค่าการสะท้อนรังสีมาก ค่า PPDรวม จะยิ่งมีค่าน้อย กล่าวคือ ผู้ใช้อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง แต่จะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้พอสมควร ดังเช่นรูปที่ 7.12 และ 7.15 ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 และ 45 องศา แต่เมื่อใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้น้อยเช่นกรณีใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา ในรูปที่ 7.18 ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่มากขึ้นจะช่วยลดค่า PPDรวมลงได้เพียงเล็กน้อย

### 7.3 สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

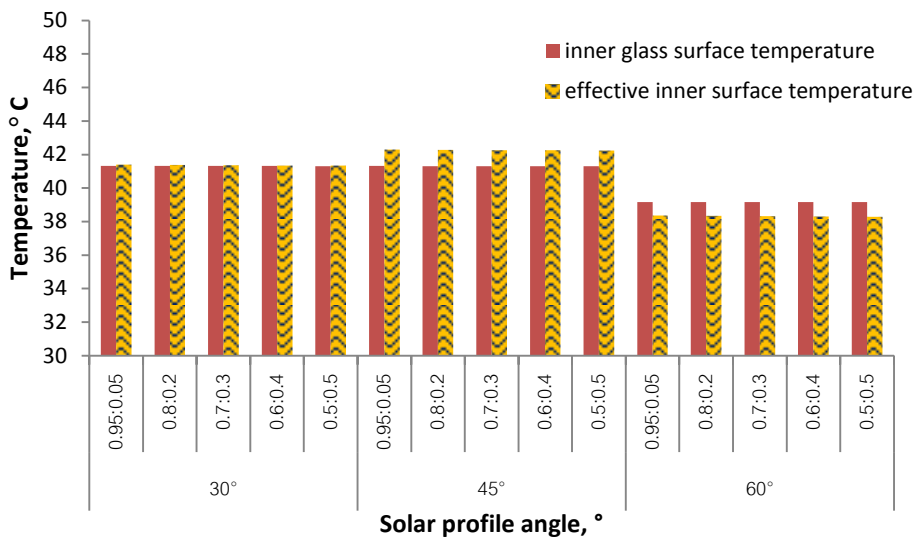
การศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ โดยใช้สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 ซึ่งทำการศึกษากับกระจกชนิดเดียว คือ กระจกใส โดยค่าคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกที่ใช้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.1 และมู่ลี่ที่ใช้เป็นชนิดแนวนอน ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม ซึ่งคุณสมบัติของมู่ลี่ที่ใช้แสดงอยู่ในตารางที่ 7.2

- กรณีใบบูมลิ้ทำมุมบิต 0 องศา

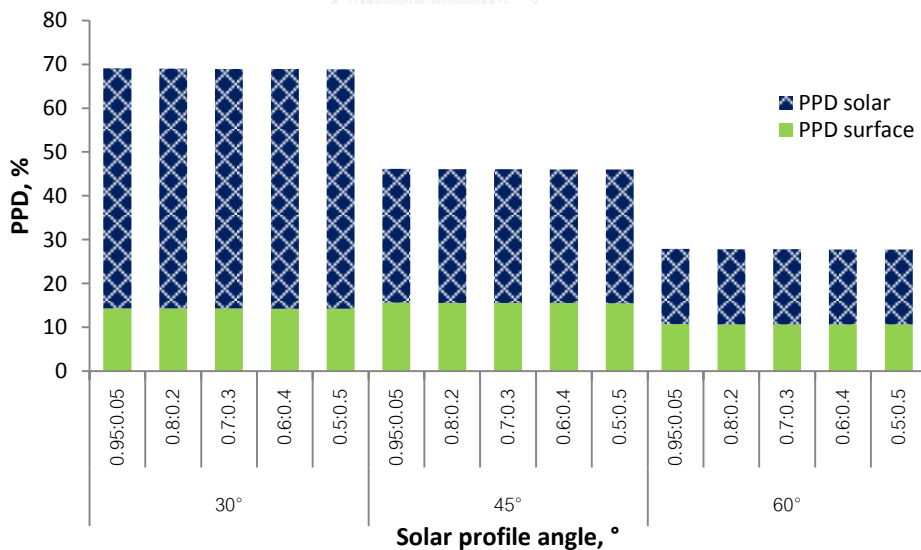
รูปที่ 7.19 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมูลิ้เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมูลิ้ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมูลิ้ เมื่อใช้กระจกใสและใบบูมลิ้ทำมุมบิต 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมูลิ้เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.19 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมูลิ้เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบบูมลิ้ทำมุมบิต 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมูลิ้เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.20 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30 45 และ 60 องศา



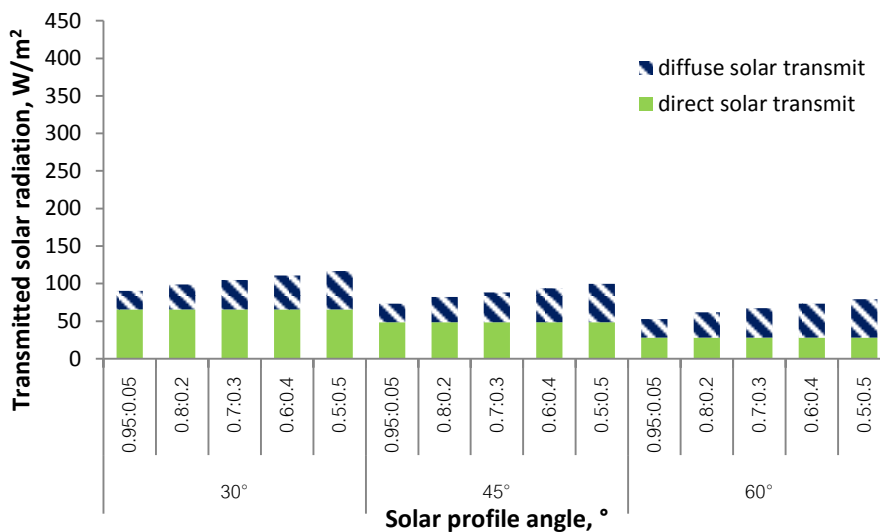
รูปที่ 7.21 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.19 จะเห็นว่า ในกรณีที่ใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ซึ่งเป็นมุมบิดที่สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายทั้งจากท้องฟ้าและพื้นดินกระทบกับตัวมู่ลี่และส่องผ่านเข้ามาภายในห้องได้ใกล้เคียงกัน เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจึงแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง โดยเป็นลักษณะเดียวกันที่ทุกมุม solar profile ทั้ง 30, 45 และ 60 องศา จากรูปที่ 7.20 จะเห็นได้ว่า เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกก็แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณารูปที่ 7.21 จะพบว่า เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ค่า PPDรวมก็แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน โดยเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ค่า PPDรวมจะเป็นผลมาจากค่า solar PPD มากกว่าค่า surface PPD อย่างชัดเจน

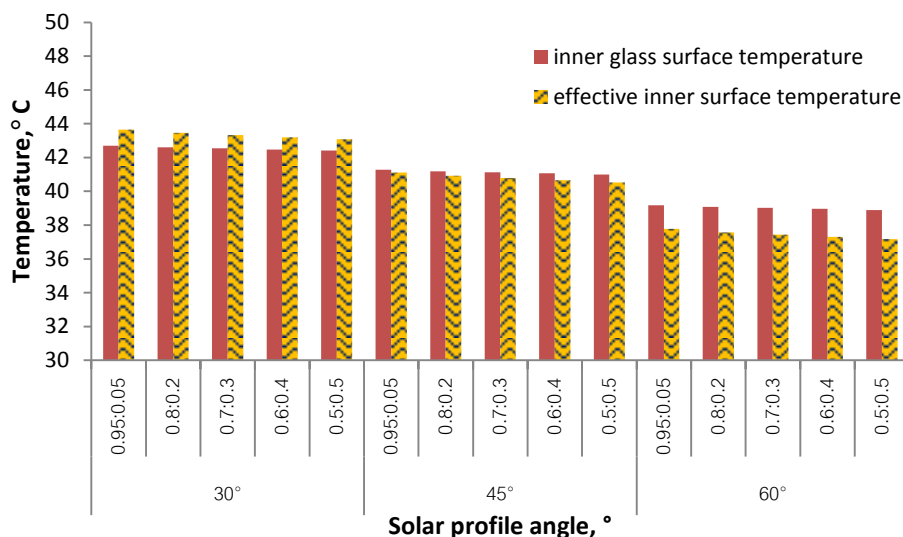
- กรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา

รูปที่ 7.22 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.23 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.24 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

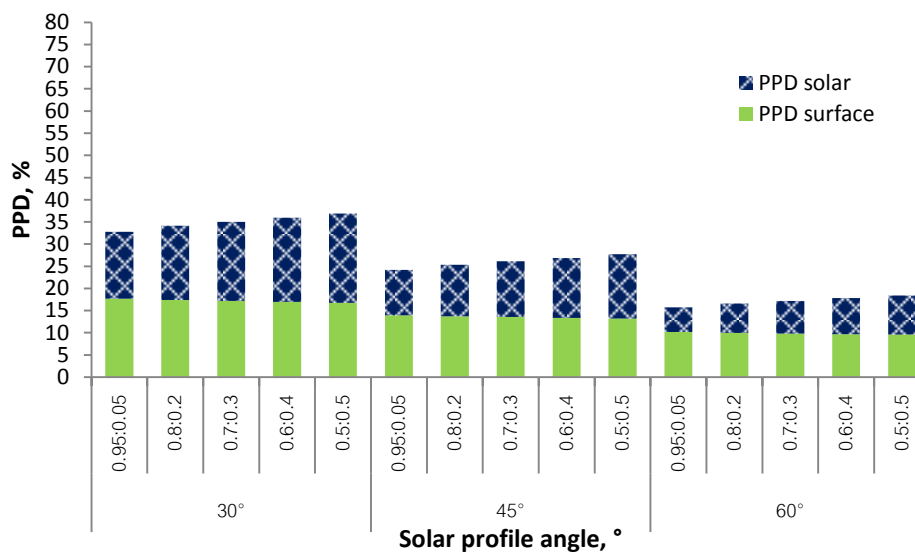




รูปที่ 7.22 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.23 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

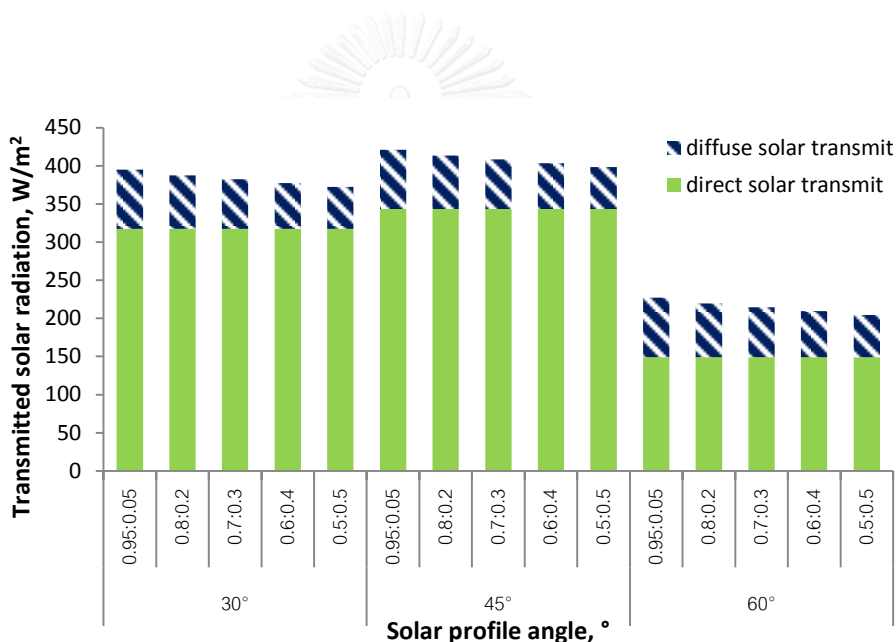


รูปที่ 7.24 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

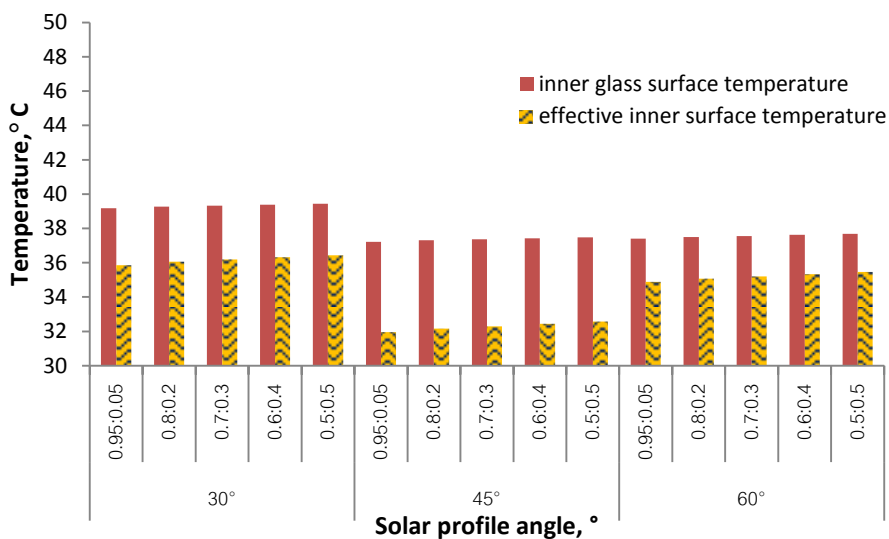
จากรูปที่ 7.22 และ 7.23 เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ซึ่งเป็นมุมบิดที่ใบมู่ลี่มีลักษณะบังรังสีแสงอาทิตย์ รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจึงเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินค่อนข้างมาก ซึ่งเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินและลดสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้า ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเฉพาะในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย แต่ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะคงที่ซึ่งเป็นลักษณะแบบเดียวกันนี้ที่ทุกมุม solar profile ทั้งมุม 30, 45 และ 60 องศา แต่พบว่าค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกจะลดลงเล็กน้อยซึ่งแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณารูปที่ 7.24 เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง พบว่าค่า PPD รวมจะมีค่ามากขึ้น โดยค่า solar PPD จะมีค่ามากขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องได้มากขึ้น แต่ค่า surface PPD แทบจะไม่มี ความเปลี่ยนแปลง

- กรณีใบบู๊ลี่ทำมุมบิด -45 องศา

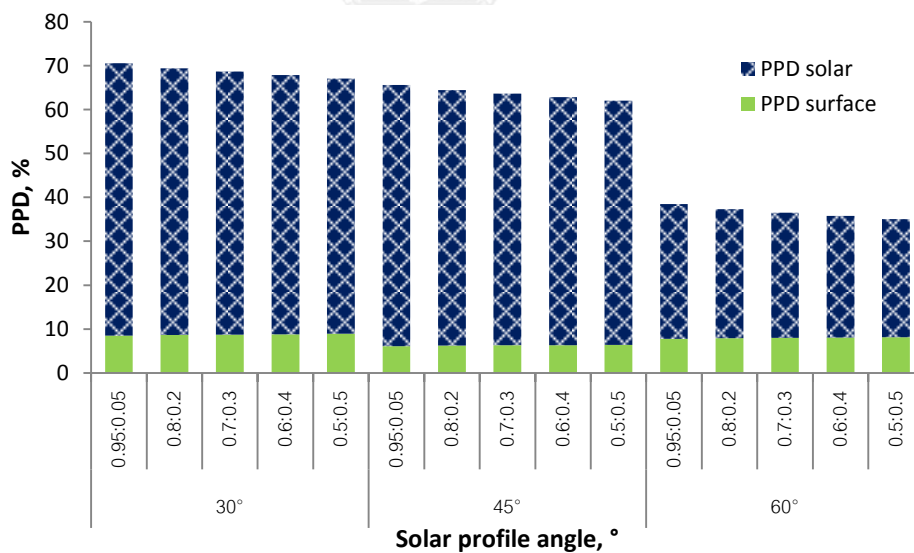
รูปที่ 7.25 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) รูปที่ 7.26 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจก (inner glass surface temperature) และรูปที่ 7.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบบู๊ลี่ทำมุมบิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.25 เปรียบเทียบปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง (Transmitted solar radiation) เมื่อใช้กระจกใสและใบบู๊ลี่ทำมุมบิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.26 เปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ (Effective inner surface temperature) เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา



รูปที่ 7.27 เปรียบเทียบค่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ เมื่อใช้กระจกใสและใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา และใช้ค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เป็น 0.95:0.05, 0.8:0.2, 0.7:0.3, 0.6:0.4 และ 0.5:0.5 โดยพิจารณาที่มุม solar profile จำนวน 3 มุม คือ มุม 30, 45 และ 60 องศา

จากรูปที่ 7.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ซึ่งเป็นมุมบิดที่ใบมู่ลี่มีลักษณะเปิดรับรังสีแสงอาทิตย์ให้ส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่สามารถส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจึงเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินและลดสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้า จึงทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีค่าลดลง โดยลดลงเฉพาะในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย แต่ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจะคงที่ซึ่งเป็นลักษณะแบบเดียวกันนี้ที่ทุกมุม solar profile ทั้งมุม 30, 45 และ 60 องศา แต่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่และค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นกระจกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 7.26 แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 7.27 จะพบว่าเมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ค่า solar PPD จะมีค่าลดลงเล็กน้อย แต่ค่า surface PPD แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาเป็นค่า PPDรวมแล้วพบว่ามู่ลี่มีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ค่า PPDรวมจะเป็นผลมาจากค่า solar PPD มากกว่าค่า surface PPD อย่างชัดเจน

จากการศึกษาผลของค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ พบว่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่เปลี่ยนไปจะให้ผลที่แตกต่างกันเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิดที่แตกต่างกัน เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง สัดส่วนนี้แทบจะไม่มีผลกระทบต่อทั้งปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่และค่า PPDรวมเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะมีค่ามากขึ้น แต่ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จะมีค่าลดลงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า PPDรวมพบว่ามู่ลี่มีค่ามากขึ้น และเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา เมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องจะมีค่าลดลง ส่วนค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่จะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาค่า PPDรวมพบว่ามู่ลี่มีค่าลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตก

กระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่เปลี่ยนแปลงไป แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่เพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ลดลง จะส่งผลให้ผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่มีความไม่สบายเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่เพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ลดลง จะส่งผลให้ผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่มีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง



## บทที่ 8

### สรุปผลงานวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ทำนายผลของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ให้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับของจริงมากยิ่งขึ้น โดยพัฒนาปรับปรุงในส่วน of แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การพาความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ การนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ ปรับปรุงข้อมูลขาเข้าของแบบจำลอง และศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ซึ่งในแต่ละส่วนได้ข้อสรุปดังนี้

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ได้ถูกปรับปรุงในส่วน of ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Yazdanian and Klems [9] ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวกระจกเข้าสู่อาคาร โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Wright et al. [10] ซึ่งเป็นการปรับปรุงโดยเพิ่มการคำนึงถึงมุมบิดของใบมู่ลี่ ความสูงของหน้าต่างกระจก และการพาความร้อนจากผิวกระจกโดยข้ามชั้นมู่ลี่ (effective layer) เข้าสู่ภายในอาคารเพิ่มเติมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม เพื่อให้มีความคล้ายคลึงกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ของจริงมากยิ่งขึ้น ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และค่าที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 บทที่ 6 พบว่า การปรับปรุงในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำลงจากค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม และมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ ได้ปรับปรุงโดยพิจารณาผลของสภาพนำความร้อนของอากาศในช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมบิดของใบมู่ลี่เพิ่มเติมจากแบบจำลองเดิมที่พิจารณาเฉพาะสภาพนำความร้อนของใบมู่ลี่เพียงอย่างเดียว ชั้นมู่ลี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกปรับปรุงนี้จึงมีความใกล้เคียงกับลักษณะของมู่ลี่ของจริงมากยิ่งขึ้น และจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นที่ปรับปรุงเฉพาะในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ และค่าที่ได้จากการทดลอง ในหัวข้อที่ 6.1 บทที่ 6 พบว่าการปรับปรุงในส่วนของการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิม และมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น
3. เมื่อปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งในส่วนของการพาความร้อนในส่วนต่าง ๆ ของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และการนำความร้อนของชั้นมู่ลี่ไปด้วยกันแล้ว จะทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมมากกว่าการปรับปรุงเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่ง และค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีแนวโน้มเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการทดลองมากยิ่งขึ้น
4. ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการปรับปรุง คือ ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมกำหนดให้สัดส่วนดังกล่าวเท่ากัน แต่จากการศึกษาและทำการทดลอง พบว่าบนห้องทดลอง ซึ่งมีผลของขอบอาคารด้านบน ด้านข้าง ผนังห้องทดลอง และขอบระเบียง ส่งผลให้สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินน้อยมาก ดังนั้น สัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่ปรับปรุงแล้วจึงมีค่าเป็น 0.95 และ 0.05 ตามลำดับ
5. เพิ่มเติมในส่วนของการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายในชั้นของกระจกและมู่ลี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมไม่สามารถทำได้ เพราะจะทำให้ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองค่อนข้างมาก จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาให้ชั้นกระจกและมู่ลี่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เดิมดูดกลืนเฉพาะรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ซึ่งไม่เหมือนสภาพจริงของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เพราะได้รับทั้งรังสีแสงอาทิตย์ทั้งแบบตรงและแบบกระจายในเวลาเดียวกัน



6. จากบทที่ 6 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง พบว่า ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 และ 45 องศา จะค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยอยู่ในช่วง  $1.10-46.92 \text{ W/m}^2$  และเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างมาก โดยมีความแตกต่างอยู่ในช่วง  $0.66-22.32 \text{ W/m}^2$  แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลาโดยความแตกต่างจะอยู่ในช่วง  $1.40-70.90 \text{ W/m}^2$  ในส่วนของค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 องศา จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยไม่เกิน  $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$  แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 และ -45 องศา ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดโดยมีค่าไม่เกิน  $4.9 \text{ }^\circ\text{C}$  ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด 45 องศา และไม่เกิน  $3.3 \text{ }^\circ\text{C}$  ของกรณีใบมู่ลี่ทำมุมบิด -45 องศา ในส่วนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิดทั้ง 0 45 และ -45 องศา มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อย แต่ยังคงมีแนวโน้มเดียวกัน โดยความแตกต่างของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจะค่อนข้างมากในช่วงเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าต่ำ แต่ไม่เกิน  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$  เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศาตามลำดับ ในส่วนของค่า PMV ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ดังนั้นจึงมีแนวโน้มเดียวกับค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย กล่าวคือ ค่า PMV ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะต่ำกว่าค่า PMV ได้จากการตรวจวัดเล็กน้อยทั้งมุมบิดใบมู่ลี่ที่ 0 45 และ -45 องศา แต่ยังมีแนวโน้มแบบเดียวกันและครอบคลุมอยู่ในแถบความคลาดเคลื่อน โดยมีความแตกต่างกันมากที่สุดไม่เกิน 0.52 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมบิด 0 45 และ -45 องศา ได้มีความแม่นยำในระดับที่เชื่อถือได้

7. พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่ทำการศึกษานี้ ได้แก่ ชนิดของกระจกที่ใช้ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ และสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่ ในส่วนของชนิดของกระจกที่ใช้พบว่าการใช้กระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ต่ำ จะช่วยลดปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก ส่งผลให้ค่า PPD ที่รวมทั้งผลที่มาจากปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้องและผลที่มาจากค่าอุณหภูมิผิวด้านในของชั้นมู่ลี่หรือ ค่า PPD รวมมีค่าลดลง ผู้อยู่อาศัยจึงมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง โดยจะเห็นได้ชัดเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิดในลักษณะที่ให้รังสีอาทิตย์ส่งผ่านเข้ามาภายในห้องได้มาก ในส่วนของค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ พบว่ายิ่งใบมู่ลี่มีค่าการสะท้อนรังสีมาก ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง แต่จะเห็นได้ชัดในกรณีที่ใบมู่ลี่วางตัวในลักษณะที่บังรังสีแสงอาทิตย์ได้พอสมควร ในส่วนของสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่ พบว่าเมื่อสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าลดลง สัดส่วนนี้แทบจะไม่มีผลกระทบต่อความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยเลยเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 0 องศา แต่เมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด 45 องศา ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนเพิ่มขึ้น และเมื่อใบมู่ลี่ทำมุมปิด -45 องศา ผู้อยู่อาศัยจะมีความไม่สบายเชิงความร้อนลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. เนื่องด้วยข้อจำกัดของเวลาทำให้จำเป็นต้องทำการทดลองในฤดูฝน ซึ่งรังสีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันไม่สม่ำเสมอเพราะมีเมฆค่อนข้างมาก ส่งผลให้ค่าที่วัดได้มีค่าที่แกว่งและเครื่องมือวัดที่ใช้ปรับตัวตามไม่ทัน ผลที่วัดได้จึงนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่อนข้างยาก โดยผลการวัดที่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นั้นต้องเป็นช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์ค่อนข้างสม่ำเสมอในช่วงเวลาที่นานพอสมควรเพื่อให้เครื่องมือวัดปรับตัวให้ทันและอ่านค่าที่ถูกต้อง

2. แหวนบังเงา (shading ring) ถูกออกแบบมาเพื่อบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงจากดวงอาทิตย์ โดยเมื่อติดตั้งแล้วจะสามารถบังได้ทั้งวันเพื่อให้สามารถวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ได้ทั้งวัน ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมากระทำในช่วงเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมซึ่งเป็นฤดูร้อน พบว่าแหวนบังเงาสามารถใช้งานได้ดี โดยบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้ทั้งวัน แต่การทดลองในปีนี้กระทำในช่วงเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม ซึ่งเป็นฤดูฝน พบว่าแหวนบังเงาไม่สามารถติดตั้งครั้งเดียวและบังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้ทั้งวัน โดยในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. แหวนบังเงาจะไม่สามารถขยับให้บังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงได้ ส่วนนี้จึงเป็นข้อบกพร่องของแหวนบังเงาที่ควรมีการแก้ไขให้สามารถใช้งานได้ดีในทุกช่วงเวลา
3. การติดตั้ง thermocouple เพื่อวัดอุณหภูมิผิวของใบมู่ลี่ เกิดปัญหาในเรื่องของน้ำหนักของหัว thermocouple ที่ค่อนข้างมากกดทับใบมู่ลี่ ส่งผลให้ใบมู่ลี่บิดและงอ การแก้ปัญหาเบื้องต้นกระทำโดยนำสายของ thermocouple ไปยึดไว้กับผนังห้องเพื่อช่วยลดแรงกดบนใบมู่ลี่ แต่เป็นการยึดเพียงชั่วคราวจึงสามารถหลุดออกมาได้ ดังนั้น ควรมีการแก้ไขหรือออกแบบการยึด thermocouple เพื่อลดแรงกดบนใบมู่ลี่ให้แข็งแรงและมั่นคงมากยิ่งขึ้น
4. ควรมีอุปกรณ์ที่ใช้วัดมุมบิดของใบมู่ลี่ให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ผลที่ได้จากการทดลองถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด

## รายการอ้างอิง

1. Yahoda, D.S. and J.L. Wright, *Methods for Calculating the Effective Longwave Radiative Properties of a Venetian Blind Layer*. ASHRAE Transactions, 2004: p.463-473.
2. Oosthuizen, P.H., et al., *The effect of coverings on heat transfer from a window to a room*, in *Heat transfer Engineering*. June 2005. p. 47-65.
3. EnergyPlus, *EnergyPlus Engineering Reference : The Reference to EnergyPlus Calculation*. October 2013.
4. Pederson, C.O., et al. *EnergyPlus: The Merger of BLAST and DOE-2*, in *Proceedings of IBPSA's Building Simulation '97*. 8-10 September 1997.
5. Winkelmann, F.C., *Modeling Windows in EnergyPlus*, in *Building Simulation, Seventh International IBPSA Conference*. 13-15 August 2001: Rio de Janeiro, Brazil.
6. Crawly, D.B., et al. *EnergyPlus: An Update*. in *Proceeding of Simbuild 2004, Building Sustainability and Performance Through Simulation*. 4-6 August 2004. Boulder, CO, USA.
7. Laouadi, A., *Thermal Modeling of Shading Devices of Windows*. ASHRAE Transactions, 2009. **155 part 2**: p. 803-814.
8. Chaiyapinunt, S. and S. Worasinchai, *Development of a mathematical model for a curved slat venetian blind with thickness*. Solar Energy, 2009. **83**: p. 1093-1113.
9. Yazdanian, M. and J.H. Klems, *Measurement of the exterior convective film coefficient for windows in low-rise building*. ASHRAE Transactions, 1994. **100**.
10. Wright, J.L., *Calculating center-glass performance indices of windows with a diathermanous layer*. ASHARE Transactions 2008. **114 part2**: p. 199-209.
11. Fanger, P.O., *Thermal comfort analysis and application in environmental engineering*. McGraw-Hill. 1970, Kansas State university.
12. Olesen, B.W., *Guideline for comfort*. ASHRAE Journal, 2000. **42(8)**: p. 41-46.

13. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, นพรัตน์ คำพร, บุญยฤทธิ์ เผือกผ่องสุริยะ และ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์. การศึกษาหน้าต่างกระจกในแง่ความสบายเชิงความร้อน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16. 14-16 ตุลาคม 2545: โรงแรมกะตะป๋อศรีสอรัท, ภูเก็ต.
14. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, นพรัตน์ คำพร, และ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์, การศึกษาหน้าต่างกระจกติดฟิล์มในแง่ความสบายเชิงความร้อน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17. 15-17 ตุลาคม 2546: โรงแรมทวาราวดี, ปราจีนบุรี.
15. Chaiyapinunt , S., et al., *Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission.* Energy and Building, 2005. **37**(7): p. 725-738.
16. Gennusa, M.L., et al., *The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation-a generalised algorithm.* Building and Environment, 2005. **40**: p. 365-375.
17. Hien, W.N., et al., *Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore.* Energy and Building, 2005. **37**: p. 563-572.
18. Chaiyapinunt, S. and S. Worasinchai, *Development of a model for calculating the longwave optical properties and surface temperature of a curved venetian blind.* Solar Energy, 2009. **83**: p. 817-831.
19. Anderson, T. and M. Luther, *Designing for thermal comfort near a glazed exterior wall.* Architectural Science Review, August 2012. **55**: p. 186-195.
20. Buratti, C., et al., *Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings.* Building and Environment, 2013. **59**: p. 482-491.
21. Khamporn, N. and S. Chaiyapinunt, *Effect of installing a venetian blind to a glass window on human thermal comfort.* Building and Environment, 2014. **82**: p. 713-725.
22. 7730, I., *Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.* 1995.

23. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และ นพรัตน์ คำพร, รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ การศึกษาและวิเคราะห์เชิงการทดลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ของอาคารภายใต้ภาวะภูมิอากาศของประเทศไทย, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
24. Klems, J.H. and J.L. Warner, *Measurement of Bi-directional Properties of Complex shading devices*. ASHRAE Transactions, 1995. **101**(1): p. 791-801.
25. Klems, J.H. and J.L.e.a. Warner, *A comparison between calculated and measured SHGC for complex glazing systems*. ASHRAE Transactions, 1996. **102**(1): p. 931-939.
26. 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.
27. Finlayson, E.U., et al., *WINDOW 4.0: Documentation of calculation procedures*. 1993, Energy & Environment Division: Berkeley, CA.
28. Collins, M.R. and J.L. Wright, *Calculating center-glass performance indices of windows with a diathermanous layer*. ASHARE Transactions, 2006. **112 part 2**: p. 22-29.
29. Machin A.D., et al., *Experimental study of free convection at an indoor glazing surface with a Venetian blind*. HVAC&R Research, 1998. **4:2**: p. 153-166.
30. Naylor D. and Lai B.Y., *Experimental study of natural convection in a window with between-panes Venetianblind*. Experimental Heat Transfer, 2007. **20**: p. 1-27.
31. Duarte, N., et al., *An interferometric study of free convection at a window glazing with a heated venetian blind*. ASHRAE Transactions, 2001. **107**(2): p. 390-405.

32. Collins, M.R., et al., *Heat Transfer from an Isothermal Vertical Surface with Adjacent Heated horizontal Louvers: validation*. ASME Journal of Heat Transfer, 2002. **124**: p. 1078-1087.
33. 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.
34. Ye, P., et al., *Convective Heat Transfer from a Window with a Venetian blind: Detailed Modeling*. ASHRAE Transactions, 1999. **105**(2): p. 1-7.
35. Collins, M.R., et al., *Heat Transfer from an Isothermal Vertical Surface with Adjacent Heated horizontal Louvers: Numerical Analysis*. ASME Journal of Heat Transfer, 2002. **124**: p. 1072-1077.
36. H., S. and D. Naylor, *Energy performance assessment of a window with a horizontal Venetian Blind*. Energy and Building, 2005. **37**(8): p. 836-843.
37. Kreider, J.F., P.S. Curtiss, and A. Rabi, *Heating and cooling of buildings, Design for efficiency*. 2 ed. 2002.
38. Chaiyapinunt, S. and N. Khamporn, *Shortwave thermal performance for a glass window with a curved venetian blind*. Solar Energy, 2013. **91**: p. 174-185.
39. นพรัตน์ คำพร, การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะในแง่ความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ภายใน. 2555, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
40. *ASHRAE Handbook—Fundamentals* 2013.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก

ข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ มีดังนี้

1. ค่าคุณสมบัติเชิงแสงของกระจกหน้าต่างที่ใช้ ได้แก่ ความหนาของชั้นกระจก สภาพนำความร้อนของกระจก ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้าและด้านหลัง ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก และค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งแสดงอยู่ในบทที่ 5
2. ค่าคุณสมบัติเชิงแสงของมู่ลี่ที่ใช้ ได้แก่ ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่ ความกว้างของใบมู่ลี่วัดตามผิวโค้ง ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ ความหนาของใบมู่ลี่ ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ ค่าการสะท้อนรังสี ค่าการเปล่งรังสี และมุมบิดของใบมู่ลี่ ซึ่งแสดงอยู่ในบทที่ 5
3. ค่าการจำลองสภาพภายในห้อง ได้แก่ การจำลองลักษณะของผู้อยู่อาศัยโดยกำหนดลักษณะเสื้อผ้าที่ใส่ กิจกรรมที่ทำ ค่าความเร็วลมภายในห้อง ค่าอุณหภูมิภายในห้องที่กำหนดไว้ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน และค่า Project area factor ในที่นี้สภาพภายในห้องถูกกำหนดให้เป็นเงื่อนไขคงที่ ดังนี้
  - ค่าความเป็นฉนวนของเสื้อผ้า  $I_{cl} = 0.5 \text{ clo}$
  - ค่าอัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายของผู้อยู่อาศัยที่ถูกจำลองให้นั่งทำงานโดยหันข้างให้ระบบหน้าต่างกระจก = 1.2 met
  - ค่าความเร็วลมภายในห้อง = 0.15 m/s
  - ค่าอุณหภูมิภายในห้องที่กำหนดไว้ = 25 °C
  - ค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง = 50 %
  - ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน  $a_p$  (ค่ามาตรฐาน = 0.6)
  - ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน  $\epsilon_p$  (ค่ามาตรฐาน = 0.97)
  - ค่า Project area factor  $f_p = 0.25$

ค่าสภาพอากาศภายนอกและภายในห้องทดลอง ได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายและสัดส่วนจากท้องฟ้าและพื้นดินที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ค่าความเร็วลมภายนอกห้อง ค่าอุณหภูมิอากาศ

ภายนอกห้องทดลอง และค่าอุณหภูมิภายในห้องที่วัดได้จริง โดยค่าสภาพอากาศภายนอกและภายในห้องทดลองของวันที่ได้ทำการทดลองแสดงในตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 ค่าสภาพอากาศภายนอกและภายในห้องทดลองของวันที่ได้ทำการทดลอง

- มุมบิดใบมู่ลี่ 0 องศา

19 พฤษภาคม 2554						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:04:33	77.534	119.292	198.035	1.2	32.40	24.7
14:04:33	63.427	292.717	191.040	1.2	33.86	24.5
15:04:33	49.409	304.552	216.555	1.2	33.29	25.7
16:04:33	35.710	271.188	214.300	1.2	32.81	25.6
16:34:33	29.152	384.757	185.703	1.2	33.05	24.8
19 มิถุนายน 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:38:03	70.839	282.371	229.472	1.2	35.69	26.5
14:26:03	59.864	150.483	193.189	1.2	37.64	26.5
15:21:03	47.469	34.666	200.512	1.2	34.87	26.4
16:09:03	37.030	24.265	317.650	1.2	35.02	26.5
17:01:03	26.705	17.022	328.560	1.2	34.74	26.6
14 กรกฎาคม 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:12:33	77.819	30.866	193.546	1.2	34.67	26.1
14:12:03	64.018	15.680	182.841	1.2	33.69	26.4

15:12:03	50.218	66.262	235.541	1.2	35.82	26.3
16:12:33	36.703	39.963	192.694	1.2	35.73	26.5
17:12:33	24.491	20.801	138.358	1.2	34.59	26.4

- มุมบิดใบมู่ลี่ 45 องศา

20 พฤษภาคม 2554						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:07:03	76.946	142.957	178.765	1.2	33.00	25.1
14:14:33	61.081	301.704	228.634	1.2	32.94	24.9
15:22:03	45.364	358.958	211.455	1.2	34.05	24.8
16:14:33	33.491	470.432	180.790	1.2	34.58	24.5
17:07:03	22.547	386.060	154.021	1.2	33.53	25.4
7 กรกฎาคม 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:13:03	77.437	13.702	103.297	1.2	35.28	26.3
14:07:03	64.990	13.466	84.370	1.2	35.81	26.5
15:23:03	47.674	307.594	121.631	1.2	35.57	26.9
16:01:03	38.620	33.815	152.067	1.2	35.46	26.3
17:14:03	24.582	0	59.625	1.2	32.56	26.5
10 กรกฎาคม 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:15:04	77.092	21.274	100.129	1.2	34.42	26.5
14:29:04	60.011	314.196	146.390	1.2	35.48	26.2

15:20:04	48.381	210.438	174.752	1.2	35.47	26.5
16:14:04	36.448	170.037	182.072	1.2	34.58	26.7
17:15:04	24.274	406.394	150.686	1.2	33.76	26.9

- มุมบิดใบมู่ลี่ -45 องศา

21 พฤษภาคม 2554						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:03:03	77.892	47.621	182.538	1.2	32.74	25.4
14:18:03	60.291	347.560	195.160	1.2	34.22	25.1
15:03:03	49.805	408.447	193.695	1.2	33.58	25.5
16:03:03	36.123	358.236	198.969	1.2	33.68	25.5
17:03:03	23.447	178.841	143.256	1.2	32.98	24.8
30 มิถุนายน 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:19:03	75.741	59.574	198.458	1.2	34.93	26.5
14:15:03	62.895	386.864	167.455	1.2	36.32	26.6
15:02:03	52.213	344.110	238.293	1.2	37.69	26.9
16:17:03	35.770	143.448	147.675	1.2	35.50	26.5
17:18:03	24.039	23.894	117.447	1.2	34.82	27.1
16 กรกฎาคม 2558						
time	theta $\theta$ , (°)	$I_{dir}$ , (W/m <sup>2</sup> )	$I_{dif}$ , (W/m <sup>2</sup> )	v, (m/s)	tout, (°C)	tin, (°C)
13:17:03	76.836	22.854	290.052	1.2	35.61	26.5
14:07:33	65.096	0	135.712	1.2	33.01	26.3

15:28:33	46.459	153.611	291.967	1.2	34.80	26.2
16:40:03	30.777	13.886	133.272	1.2	33.42	26.0
17:24:03	22.293	102.252	120.858	1.2	32.68	26.5



### การคำนวณมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ $\theta$ , ( $^{\circ}$ )

การคำนวณมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์คำนวณได้จากตัวแปรต่างๆ โดยอ้างอิงจาก 2013 ASHRAE Handbook—Fundamentals [40] ดังนี้

#### 1. Equation of time และ Apparent solar time

Equation of time (ET) เป็นค่าแก้ไขเนื่องจากแกนโลกเอียงทำมุมกับ elliptic plate และวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม และ Apparent solar time (AST) เป็นค่าเวลาแสดงตำแหน่งทางกายภาพจริงๆ ของดวงอาทิตย์ ซึ่งหาได้จากสมการ ดังนี้

$$ET = 2.2918 \cdot [0.0075 + 0.1868 \cos(\Gamma) - 3.2077 \sin(\Gamma) - 1.4615 \cos(2\Gamma) - 4.089 \sin(2\Gamma)] \quad (ก1)$$

โดยที่  $\Gamma = 360^{\circ} \cdot \left(\frac{n-1}{365}\right)$

เมื่อ  $ET$  คือ Equation of time, (นาทีย)

$n$  คือ the day of the year โดยนับ 1 ที่วันที่ 1 มกราคม ดังนั้น  $1 \leq n \leq 365$

$$AST = LST + ET/60 + (LON - LSM)/15 \quad (ก2)$$

เมื่อ  $AST$  คือ Apparent solar time, (ชั่วโมง)

$LST$  คือ เวลาท้องถิ่น, (ชั่วโมง)

$LSM$  คือ longitude of local standard time meridian,  $^{\circ}E$  of Greenwich (Negative in western hemisphere)

$LON$  คือ longitude of site,  $^{\circ}E$  of Greenwich

## 2. Declination

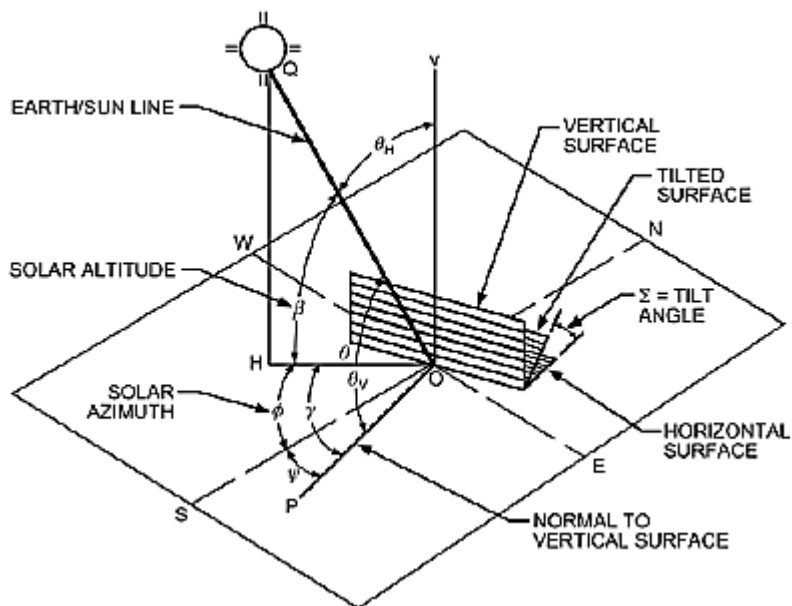
มุม declination ( $\delta$ ) เป็นมุมของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ solar noon กับระนาบเส้นศูนย์สูตร (equatorial plane) จะมีค่าตั้งแต่  $-23.5^\circ$  ถึง  $23.5^\circ$  ในรอบปี ซึ่งหาค่าได้จากสมการ

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360^\circ \cdot \frac{n+284}{365}\right) \quad (ก3)$$

เมื่อ  $\delta$  คือ มุม declination, ( $^\circ$ )

## 3. Sun position

ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ถูกกำหนดจากผู้สังเกตบนโลก โดยกำหนดเป็นมุม altitude ( $\beta$ ) และมุม azimuth ( $\phi$ ) ซึ่งนิยามตามรูปที่ ก1 และมีค่าเปลี่ยนแปลงตาม latitude  $L$  ( $^\circ$ N, negative in the southern hemisphere)



รูปที่ ก1 นิยามมุม altitude ( $\beta$ ) และมุม azimuth ( $\phi$ )

โดยมุม altitude ( $\beta$ ) สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$\sin(\beta) = \cos(L) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(L) \sin(\delta) \quad (ก4)$$

และมุม azimuth ( $\phi$ ) สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$\sin(\phi) = \sin(H) \cos(\delta) / \cos(\beta) \quad (ก5)$$

$$\cos(\phi) = \frac{[\cos(H) \cos(\delta) \sin(L) - \sin(\delta) \cos(L)]}{\cos(\beta)} \quad (ก6)$$

เมื่อ  $H$  คือ hour angle, ( $^{\circ}$ ) หาค่าได้จาก

$$H = 15(AST - 12) \quad (ก7)$$

หมายเหตุ ที่ตำแหน่ง solar noon,  $H = 0^{\circ}$  มุม altitude ( $\beta$ ) จะมีค่ามากที่สุดเป็น  $\beta_{max} = 90^{\circ} - |L - \delta|$

มุม surface solar azimuth ( $\gamma$ ) สามารถหาค่าได้จาก

$$\gamma = \phi - \psi \quad (ก8)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ มุม surface solar azimuth, ( $^{\circ}$ )

$\psi$  คือ มุม surface azimuth, ( $^{\circ}$ ) หาค่าได้จากตารางที่ ก1

ตารางที่ ก1 Surface orientations and azimuths, Measured from South

Orientation	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Surface azimuth $\psi$	$180^{\circ}$	$-135^{\circ}$	$-90^{\circ}$	$-45^{\circ}$	0	$45^{\circ}$	$90^{\circ}$	$135^{\circ}$



#### 4. มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์

มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ( $\theta$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(\beta) \cdot \cos(\gamma)] \quad (ก9)$$

ตัวอย่างการคำนวณมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์  $\theta$ , ( $^{\circ}$ )

พิจารณามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ กรณีวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 เวลา 13:17:03 น. ที่กรุงเทพมหานคร latitude =  $13.73^{\circ}$

ดังนั้น  $n = 197$  จะได้  $\Gamma = 193.315^{\circ}$  แทนค่าลงในสมการที่ ก1 จะได้  $ET = -5.901$  นาที

เวลา 13:17:03 น. คิดเป็น  $LST = 13.2925$  ชั่วโมง ในที่นี้  $LON$  มีค่า 100.52 และ  $LSM$  มีค่า 105.0 แทนค่าลงในสมการที่ ก2 จะได้  $AST = 12.887$  ชั่วโมง

จากสมการที่ ก3 จะคำนวณได้  $\delta = 21.354^{\circ}$

จากสมการที่ ก7 จะคำนวณได้  $H = 13.307^{\circ}$

จากสมการที่ ก4 จะคำนวณได้  $\beta = 75.135^{\circ}$

จากสมการที่ ก5 จะคำนวณได้  $\phi = 56.589^{\circ}$

จากสมการที่ ก8 จะคำนวณได้  $\gamma = -27.411^{\circ}$

ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ ก9 จะคำนวณได้มุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ กรณีวันที่ 16 กรกฎาคม 2558 เวลา 13:17:03 น. ได้เท่ากับ 76.836

## ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณลาดฟ้าของตึกโคลัมโบ

เนื่องจากค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหาด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน โดยช่วงเวลาดังกล่าวจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณหลัง 12:00 ถึงไม่เกิน 15:30 น. ในที่นี้จะเลือกใช้ข้อมูลการวัดที่เวลา 14:00 น. มาเป็นตัวแทนเพื่อแสดงตัวอย่างการคำนวณในการหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณลาดฟ้าของตึกโคลัมโบ เช่นเดียวกัน

โดยข้อมูลการวัดที่ได้จาก pyranometer ทั้ง 4 ตัว เมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม 2558 , 19 พฤษภาคม 2558 และ 21 พฤษภาคม 2558 มีค่าดังนี้

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 18 พฤษภาคม 2558

$I_{glo,ver}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง =  $570.171 \text{ W/m}^2$

$I_{dif}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)  
=  $189.080 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ =  $839.972 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor,คว่ำ}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ =  $447.103 \text{ W/m}^2$

$\theta = 64.391^\circ$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม 2558

$I_{glo,ver}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง =  $631.116 \text{ W/m}^2$

$I_{dif}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)  
=  $122.505 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ =  $913.151 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor,คร่ำ}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ =  $487.668 \text{ W/m}^2$

$$\theta = 64.419^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม 2558

$I_{glo,ver}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง =  $640.792 \text{ W/m}^2$

$I_{dif}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)  
=  $212.038 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ =  $923.070 \text{ W/m}^2$

$I_{glo,hor,คร่ำ}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ =  $479.485 \text{ W/m}^2$

$$\theta = 64.469^\circ$$

การคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ได้จากค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_{glo,hor,คร่ำ} / I_{glo,hor}$  ซึ่งจากข้อมูลการวัดของวันที่ 18 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.532 จากข้อมูลการวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.534 และจากข้อมูลการวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.519 ดังนั้นค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลจากการวัดของทั้งวันที่ 18 พฤษภาคม 2558 , 19 พฤษภาคม 2558 และ 21 พฤษภาคม 2558 จึงมีค่าเป็น 0.53

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$I_{glo,ver} = I_{dir,nor} \cos \theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{I_{glo,hor} \rho_g}{2} \quad (5.1)$$

$$I_{glo,hor} = I_{dir,nor} \sin \theta_i + I_{dif} \quad (5.2)$$

พบว่า เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ได้จากการวัด ได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 5.2 มาคูณด้วยค่า cosine ของมุม incident ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ และค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดินที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหาวด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงวิธีหาค่าดังกล่าวบน แทนค่าลงในสมการที่ 5.1 จะได้ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{glo,ver,cal}$ ) มีค่าดังนี้

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 18 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $721.798 \cos(64.391) + \frac{189.080}{2} + \frac{839.972 \times 0.53}{2} = 629.113 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $570.171 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{629.113 - 570.171}{570.171} \times 100\% = 10.338\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $876.572 \cos(64.419) + \frac{122.505}{2} + \frac{913.151 \times 0.53}{2} = 681.729 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $631.166 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{681.729 - 631.166}{631.166} \times 100\% = 8.011\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $787.976 \cos(64.469) + \frac{212.038}{2} + \frac{923.070 \times 0.53}{2} = 690.250 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $640.792 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{690.250 - 640.792}{640.792} \times 100\% = 7.718\%$

จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการวัดจริง มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10.338 % ในกรณีนี้ จึงสามารถประมาณได้ว่าความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.1 สามารถทดลองวัดและพิสูจน์ได้จริงและค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์

จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ที่คำนวณได้ค่อนข้างมีความแม่นยำ จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินได้จากสมการที่ 5.3 ดังนี้  $I_{dif,sky} = \frac{I_{dif}}{2}$  และ  $I_{dif,grn} = \frac{I_{dif} \cdot \rho_g}{2}$  และคำนวณต่อมาเป็นสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{1+\rho_g}$  และสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{\rho_g}{1+\rho_g}$  ตามลำดับ

ซึ่งจากข้อมูลการวัดของวันที่ 18 พฤษภาคม 2558, 19 พฤษภาคม 2558 และ 21 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณแดดฟ้าของตึกโคลัมโบได้เป็น  $\frac{1}{1+0.53} = 0.65$  และคำนวณสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งบริเวณแดดฟ้าของตึกโคลัมโบได้เป็น  $\frac{0.53}{1+0.53} = 0.35$

**ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุขของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล**

เนื่องจากการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ในที่นี้เลือกใช้ข้อมูลการวัดที่เวลา 14:00 น. มาเป็นตัวแทนเพื่อแสดงตัวอย่างการคำนวณในการหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  และหาค่าสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจกติดมุขของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกล

โดยข้อมูลการวัดที่ได้จาก pyranometer ทั้ง 4 ตัว เมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 , 28 พฤษภาคม 2558, 29 พฤษภาคม 2558, 4 มิถุนายน 2558, 5 มิถุนายน 2558 และ 9 มิถุนายน 2558 มีค่าดังนี้

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 26 พฤษภาคม 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 458.734 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 185.016 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 887.767 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor,คร่ำ} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคร่ำ} = 50.454 \\ \text{W/m}^2$$

$$\theta = 64.614^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 28 พฤษภาคม 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 453.879 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 117.206 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 953.048 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor,คร่ำ} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคร่ำ} = 44.163 \\ \text{W/m}^2$$

$$\theta = 64.772^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 29 พฤษภาคม 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 475.008 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 103.393 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 970.741 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor,คร่ำ} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคร่ำ} = 48.097 \\ \text{W/m}^2$$

$$\theta = 64.746^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 4 มิถุนายน 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 484.170 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 112.140 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 985.856 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor,คร่ำ} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ} = 49.073 \\ \text{W/m}^2$$

$$\theta = 64.981^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 5 มิถุนายน 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 471.614 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 152.213 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 924.494 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor,คร่ำ} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ} = 48.708 \\ \text{W/m}^2$$

$$\theta = 65.044^\circ$$

- ข้อมูลการวัดของวันที่ 9 มิถุนายน 2558

$$I_{glo,ver} \text{ ที่ได้จากได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวตั้ง} = 552.240 \text{ W/m}^2$$

$$I_{dif} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่ติดตั้งเข้ากับแหวนบังเงา (shading ring)} \\ = 358.653 \text{ W/m}^2$$

$$I_{glo,hor} \text{ ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบ} = 980.096 \text{ W/m}^2$$

$I_{glo,hor,cr}$  ที่ได้จากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำ = 52.469  
W/m<sup>2</sup>

$$\theta = 65.246^\circ$$

การคำนวณเพื่อหาค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ได้จากค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $I_{glo,hor,cr} / I_{glo,hor}$  ซึ่งจากข้อมูลการวัดของวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0568 จากข้อมูลการวัดของวันที่ 28 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0463 จากข้อมูลการวัดของวันที่ 29 พฤษภาคม 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0496 จากข้อมูลการวัดของวันที่ 4 มิถุนายน 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0498 จากข้อมูลการวัดของวันที่ 5 มิถุนายน 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0527 และจากข้อมูลการวัดของวันที่ 9 มิถุนายน 2558 สามารถคำนวณได้เท่ากับ 0.0535 ดังนั้นค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดินหรือ  $\rho_g$  ที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลจากการวัดของทั้งวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 , 28 พฤษภาคม 2558, 29 พฤษภาคม 2558, 4 มิถุนายน 2558, 5 มิถุนายน 2558 และ 9 มิถุนายน 2558 จึงมีค่าเป็น 0.05

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2

$$I_{glo,ver} = I_{dir,nor} \cos\theta_i + \frac{I_{dif}}{2} + \frac{I_{glo,hor}\rho_g}{2} \quad (5.1)$$

$$I_{glo,hor} = I_{dir,nor} \sin\theta_i + I_{dif} \quad (5.2)$$

พบว่า เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ได้จากการวัด ได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 5.2 มาคูณด้วยค่า cosine ของมุม incident ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวระนาบ และค่าการสะท้อนรังสีจากพื้นดินที่ได้จากการเฉลี่ยของค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบคว่ำหารด้วยค่าจากการวัดของ pyranometer ที่วางตัวในแนวระนาบหงาย ในช่วงเวลาที่ pyranometer ทั้งสองตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ดังที่แสดงวิธีหาค่าดังกล่าวบน แทนค่าลงในสมการที่ 5.1 จะได้ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{glo,ver,cal}$ ) มีค่าดังนี้



$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $777.861 \cos(64.614) + \frac{185.016}{2} + \frac{887.767 \times 0.05}{2} = 448.182 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $458.734 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{458.734 - 448.182}{458.734} \times 100\% = 2.300\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 28 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $924.352 \cos(64.772) + \frac{117.206}{2} + \frac{953.048 \times 0.05}{2} = 477.137 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $453.879 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{477.137 - 453.879}{453.879} \times 100\% = 5.124\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 29 พฤษภาคม 2558 มีค่าเป็น  $959.004 \cos(64.746) + \frac{103.393}{2} + \frac{970.741 \times 0.05}{2} = 485.107 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $475.008 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{485.107 - 475.008}{475.008} \times 100\% = 2.126\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 4 มิถุนายน 2558 มีค่าเป็น  $964.188 \cos(64.981) + \frac{112.140}{2} + \frac{985.856 \times 0.05}{2} = 488.490 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $484.170 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{488.490 - 484.170}{484.170} \times 100\% = 0.892\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 5 มิถุนายน 2558 มีค่าเป็น  $851.813 \cos(65.044) + \frac{152.213}{2} + \frac{924.494 \times 0.05}{2} = 458.617 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $471.614 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{471.614 - 458.617}{471.614} \times 100\% = 2.756\%$

$I_{glo,ver,cal}$  จากการคำนวณจากข้อมูลการวัดของวันที่ 9 มิถุนายน 2558 มีค่าเป็น  $684.322 \cos(65.246) + \frac{358.653}{2} + \frac{980.096 \times 0.05}{2} = 490.371 \text{ W/m}^2$  แต่ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการวัดจริง มีค่าเป็น  $552.240 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นจึงมีความคลาดเคลื่อนคิดเป็น  $\frac{552.240 - 490.371}{552.240} \times 100\% = 11.203\%$

จะเห็นว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบพื้นที่แนวตั้งที่ได้จากการคำนวณและที่ได้จากการวัดจริง มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 11.203 % ในกรณีนี้ จึงสามารถประมาณได้ว่าความสัมพันธ์ของสมการที่ 5.1 สามารถทดลองวัดและพิสูจน์ได้จริงและค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์จากพื้นดิน หรือ  $\rho_g$  ที่คำนวณได้ค่อนข้างมีความแม่นยำ จากนั้นจึงสามารถคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าและพื้นดินได้จากสมการที่ 5.3 ดังนี้  $I_{dif,sky} = \frac{I_{dif}}{2}$  และ  $I_{dif,grn} = \frac{I_{dif} \cdot \rho_g}{2}$  และคำนวณต่อมาเป็นสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{1+\rho_g}$  และสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดิน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{\rho_g}{1+\rho_g}$  ตามลำดับ

ซึ่งจากข้อมูลการวัดของวันที่ 26 พฤษภาคม 2558 , 28 พฤษภาคม 2558, 29 พฤษภาคม 2558, 4 มิถุนายน 2558, 5 มิถุนายน 2558 และ 9 มิถุนายน 2558 สามารถคำนวณสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากท้องฟ้าที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกลได้เป็น  $\frac{1}{1+0.05} = 0.95$  และคำนวณสัดส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่มาจากพื้นดินที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ของห้องทดลอง ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันตลี ภาควิศวกรรมเครื่องกลได้เป็น  $\frac{0.05}{1+0.05} = 0.05$

### ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการวัด

1. ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดได้

เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ (pyranometer) ที่ใช้วัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีจำนวน 2 ตัว โดยความไม่แน่นอนจากการวัดของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์แต่ละตัว ประกอบด้วย

- ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์

ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากสมการ

$$u_{Ins} = \sqrt{u_{nl}^2 + u_t^2 + u_d^2 + u_{tl}^2 + u_z^2 + u_{ns}^2} \quad (\text{ข1})$$

เมื่อ	$u_{nl}$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น
	$u_t$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว
	$u_d$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดของทิศทาง
	$u_{tl}$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความลาดเอียง
	$u_z$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าไหลเลื่อนที่ศูนย์
	$u_{ns}$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพ

เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1 ( $I_{glo,1}$ ) เป็นรุ่น CM6B มีค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ดังนี้

$$u_{nl} = 1.2\%$$

$$u_t = 2\%$$

$$u_d = 2\%$$

$$u_{tl} = 1\%$$

$$u_z = 7.5\%$$

$$u_{ns} = 1\%$$

ข้อมูลการวัดรังสีแสงอาทิตย์ภายในห้องของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 1 วันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น. มีค่า  $63.3816 \text{ W/m}^2$  สามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดในส่วนต่างๆ ตามสมการที่ ข1 ได้ 8.23%

เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 2 ( $I_{glo,2}$ ) เป็นรุ่น CMP11 มีค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ดังนี้

$$u_{nl} = 0.2\%$$

$$u_t = 1\%$$

$$u_d = 1\%$$

$$u_{tl} = 0.2\%$$

$$u_z = 3.5\%$$

$$u_{ns} = 0.5\%$$

ข้อมูลการวัดรังสีแสงอาทิตย์ภายในห้องของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ตัวที่ 2 วันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น. มีค่า  $67.1458 \text{ W/m}^2$  สามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดในส่วนต่างๆ ตามสมการที่ ข1 ได้ 3.82%

- ค่าความไม่แน่นอนของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจก

เนื่องจากเครื่องมือวัดระนาบคานาค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 4 องศา และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์หาได้จากสมการ

$$I_{dir,nor} = \frac{I_{dir}}{\cos \theta} \quad (\text{ข2})$$

$$I_{dir} = I_{glo} - I_{dif} \quad (\text{ข3})$$

เมื่อ  $I_{dir}$  คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $\text{W/m}^2$ )

$I_{glo}$  คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่, ( $\text{W/m}^2$ )

$I_{dif}$	คือ	รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจก ติดมู่ลี่, ( $W/m^2$ )
$\theta$	คือ	มุมตกกระทบ, ( $^{\circ}$ )

ข้อมูลการวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่วันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น. มีค่า 343.672 และ 193.189  $W/m^2$  ตามลำดับ และรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่มีมุมตกกระทบ  $59.864^{\circ}$  จากสมการ ข2 สามารถคำนวณหาค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตั้งฉากกับดวงอาทิตย์ ( $I_{dir,nor}$ ) ได้เป็น 299.735  $W/m^2$  แต่เนื่องจากเครื่องมือวัดระนาบมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4 องศา มุมตกกระทบจึงมีค่าอยู่ระหว่าง  $59.864^{\circ} - 4^{\circ} = 55.864^{\circ}$  ถึง  $59.864^{\circ} + 4^{\circ} = 63.864^{\circ}$  ส่งผลให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่มีค่าอยู่ระหว่าง 132.034 ถึง 168.199  $W/m^2$  ดังนั้นค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบตั้งฉากกับระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่วัดได้จึงสามารถมีค่าอยู่ระหว่าง  $I_{glo,1} = 325.223$  ถึง  $I_{glo,2} = 361.388$   $W/m^2$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกที่มีผลต่อค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้ สามารถประมาณได้เป็น

$$u_{I_{glo,1}}(\%) = \frac{|I_{glo} - I_{glo,1}|}{I_{glo}} \times 100\% = \frac{|343.672 - 325.223|}{343.672} \times 100\% = 5.368\%$$

$$u_{I_{glo,2}}(\%) = \frac{|I_{glo} - I_{glo,2}|}{I_{glo}} \times 100\% = \frac{|343.672 - 361.388|}{343.672} \times 100\% = 5.155\%$$

ค่าความไม่แน่นอนของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกจึงมีค่าประมาณ 5.3 %

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่วัดได้จากเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ทั้ง 2 ตัว

$$u_{I_{glo,in1}} = \sqrt{8.23^2 + 5.3^2} = 9.79\%$$

$$u_{I_{glo,in2}} = \sqrt{3.82^2 + 5.3^2} = 6.54\%$$

2. ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟหาได้จากสมการ

$$T_{smrto} = \left[ (T_o + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_p \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad (ข4)$$

$$h_{cg} = \max of \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} & \text{Force convection} \\ 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25} & \text{Free convection} \end{cases} \quad (ข5)$$

เมื่อ	$T_o$	คือ	อุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ, (°C)
	$T_a$	คือ	อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, (°C)
	$\varepsilon_p$	คือ	ค่าการเปล่งรังสีของโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.95)
	$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann, (W/(m <sup>2</sup> -K <sup>4</sup> ))
	$h_{cg}$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศ และโอเปอร์เรทีฟ เทอร์โมมิเตอร์, (W/m <sup>2</sup> -°C)
	$v_a$	คือ	ค่าความเร็วลม, m/s

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟจึงสามารถหาได้จากสมการ

$$u_{T_{smrto}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{smrto}}{\partial T_o} u_{T_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{smrto}}{\partial T_a} u_{T_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{smrto}}{\partial v_a} u_{v_a}\right)^2} \quad (ข6)$$

- ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ

ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ สามารถหาได้จากข้อมูลจากผู้ผลิตเครื่องมือวัด ได้แก่

$$u_{T_o} = \pm 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u_{T_a} = \pm 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u_{v_a} = 0.05 v_a + 0.05 \text{ m/s}$$

ข้อมูลการตรวจวัดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ วันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น. ได้ข้อมูลดังนี้

$$T_o = 28.3 \text{ } ^\circ\text{C}, T_a = 26.5 \text{ } ^\circ\text{C}, v_a = 0.23 \text{ m/s}$$

จากสมการที่ ข5 จะได้  $h_{cg} = 8.021 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$

จากสมการที่ ข4 จะได้  $T_{smrto} = 31.78 \text{ } ^\circ\text{C}$

จัดรูปสมการที่ ข4 ข5 และ ข6 จะได้

$$u_{T_{smrto}} = \sqrt{\left( \frac{0.25 \cdot [4 \cdot (T_o + 273)^3 + \frac{hcg}{\epsilon_p \sigma}]}{(T_{smrto} + 273)^3} \cdot u_{T_o} \right)^2 + \left( \frac{-0.25 \cdot \frac{hcg}{\epsilon_p \sigma}}{(T_{smrto} + 273)^3} \cdot u_{T_a} \right)^2 + \left( \frac{2.475 \cdot [T_o - T_a] \cdot \frac{v^{-0.45}}{\epsilon_p \sigma}}{(T_{smrto} + 273)^3} \cdot u_{v_a} \right)^2} \quad (๗7)$$

แทนค่าในสมการที่ ๗7 จะได้  $u_{T_{smrto}} = 0.812$

$$\text{คิดเป็น } u_{T_{smrto}} (\%) = \frac{0.812}{31.78} \times 100\% = 2.56\%$$



### ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องสามารถหาได้จากการจัดรูปสมการ 3.12-3.16 ซึ่งจะได้

$$I_{trans,cal} = (I_{glo} - I_{dif}) \cdot [T_{dir,dir}^{fH} + T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{dir,dir,r}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH}] + I_{dif} \cdot [0.95 \cdot T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH} + 0.05 \cdot T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH}] \quad (ข8)$$

ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$uI_{trans,cal} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{trans,cal}}{\partial I_{glo}} \cdot uI_{glo}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_{trans,cal}}{\partial I_{dif}} \cdot uI_{dif}\right)^2} \quad (ข9)$$

จากสมการที่ ข8 และ ข9 จัดรูปได้

$$uI_{trans,cal} =$$

$$\sqrt{\left[ \left( T_{dir,dir}^{fH} + T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{dir,dir,r}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH} \right) \cdot uI_{glo} \right]^2 + \left[ \left( - \left( T_{dir,dir}^{fH} + T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{dir,dir,r}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left( 0.95 \cdot T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH} + 0.05 \cdot T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH} \right) \right) \cdot uI_{dif} \right]^2} \quad (ข10)$$

ข้อมูลการวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่วันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น.

$$I_{glo} = 343.671 \text{ W/m}^2, I_{dif} = 193.189 \text{ W/m}^2, \theta = 59.864^\circ, T_{dir,dir}^{fH} = 0.012, \\ T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} = 0.127, T_{dir,dir,r}^{fH} = 0.012, T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH} = 0.139, T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH} = \\ 0.386, T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH} = 0.384$$

$$\text{และ } I_{trans,cal} = 95.543 \text{ W/m}^2$$



- เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกระทบบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ( $I_{glo}$ ) เป็นรุ่น CMP6 มีค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ดังนี้

$$u_{nl} = 1\%$$

$$u_t = 4\%$$

$$u_d = 2\%$$

$$u_{tl} = 1\%$$

$$u_z = 6\%$$

$$u_{ns} = 1\%$$

- เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์และแหวนบังเงาสำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกระทบบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ ( $I_{dif}$ ) เป็นรุ่น CM6B มีค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัด ดังนี้

$$u_{nl} = 1.2\%$$

$$u_t = 2\%$$

$$u_d = 2\%$$

$$u_{tl} = 1\%$$

$$u_z = 7.5\%$$

$$u_{ns} = 1\%$$

- ค่าความไม่แน่นอนของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ให้ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกมีค่าประมาณ 5.3 %

- ค่าความไม่แน่นอนของแหวนบังเงา ประมาณ 1 %

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกระทบบระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่รวมผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ไม่ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจก ( $u_{I_{glo}}$ ) ที่คำนวณได้มีค่า =  $32.072 \text{ W/m}^2$  คิดเป็น 9.33% และค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่รวมผลของการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์ไม่ได้ระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกและความไม่แน่นอนของแหวนบังเงา ( $u_{I_{dif}}$ ) ที่คำนวณได้มีค่า =  $19.005 \text{ W/m}^2$  คิดเป็น 9.84% แทนค่าลงในสมการที่ ข10 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน

ระบบกระจกติดมู่ลี่เข้ามาภายในห้องมีค่าเป็น  $6.531 \text{ W/m}^2$  คิดเป็น  $u_{I_{trans,cal}}(\%) = \frac{6.531}{95.543} \times 100\% = 6.84\%$

2. ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_{smrt} = [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir} + F_{p-win} I_{ref,tr,dir-dif} + f_p I_{ref,tr,dir-dir})]^{0.25} - 273 \quad (ข11)$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณได้จากสมการ

$$u_{T_{smrt}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{smrt}}{\partial T_{tmrt}} \cdot u_{T_{tmrt}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{smrt}}{\partial I_{glo}} \cdot u_{I_{glo}}\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{smrt}}{\partial I_{dif}} \cdot u_{I_{dif}}\right)^2} \quad (ข12)$$

$$\text{โดยที่ } \frac{\partial T_{smrt}}{\partial T_{tmrt}} = [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} \cdot (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir} + F_{p-win} I_{ref,tr,dir-dif} + f_p I_{ref,tr,dir-dir})]^{-0.75} \cdot (T_{tmrt} + 273)^3$$

$$\frac{\partial T_{smrt}}{\partial I_{glo}} = 0.25 \cdot [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} \cdot (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir} + F_{p-win} I_{ref,tr,dir-dif} + f_p I_{ref,tr,dir-dir})]^{-0.75} \cdot \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} \cdot$$

$$[F_{p-win} \cdot (T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH}) + f_p (T_{dir,dir}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{dir,dir,r}^{fH})]$$

$$\frac{\partial T_{smrt}}{\partial I_{dif}} = 0.25 \cdot [(T_{tmrt} + 273)^4 + \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} \cdot (F_{p-win} I_{tr,dif-dif} + F_{p-win} I_{tr,dir-dif} + f_p I_{tr,dir-dir} + F_{p-win} I_{ref,tr,dir-dif} + f_p I_{ref,tr,dir-dir})]^{-0.75} \cdot \frac{\alpha_p}{\varepsilon_p \sigma} \cdot$$

$$F_{p-win} \cdot (0.95 \cdot T_{\{1,M\},dif,sky}^{fH} + 0.05 \cdot T_{\{1,M\},dif,grn}^{fH} - T_{\{1,M\},dir,dif}^{fH} - \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{\{1,M\},dir,dif,r}^{fH}) - f_p \cdot (T_{dir,dir}^{fH} + \frac{\tan\theta \cdot \rho_g}{2} \cdot T_{dir,dir,r}^{fH})]$$

จากข้อมูลที่ได้จากการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกรณีของวันที่ 19 มิถุนายน 2558 เวลา 14:26:03 น. ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย ( $T_{smrt}$ ) มีค่า 31.0953 °C และจากสมการที่ ข12 จะได้ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณได้ มีค่า 1.135 °C คิดเป็น  $n_{T_{smrt}}(\%) = \frac{1.135}{31.0953} \times 100\% = 3.65\%$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว นภรัตน์ พานิชชีวะกุล เกิดวันที่ 4 พฤศจิกายน 2534 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2556 และในปีการศึกษา 2557 ได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในโครงการตรีโท 5 ปี ในระหว่างการศึกษามีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้เผยแพร่ ดังนี้

Napat Panitchewakul, Nopparat khamporn and Somsak Chaiyapinunt, Human thermal comfort study on the enclosure with the glass window and blind, The 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering 17-19th December 2014, The Empress, Chiang Mai และ

Napat Panitchewakul and Somsak Chaiyapinunt, Effect of installing a curved venetian blind to a glass window on human thermal comfort, The 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering 16-18 December 2015