

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะในแง่ความสบายเชิงความร้อนของ
หน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ภายใน

นายนพรัตน์ คำพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO PREDICT THERMAL COMFORT
PERFORMANCE OF GLASS WINDOW INSTALLED WITH INTERIOR VENETIAN BLIND

Mr. Nopparat Khamporn

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนาย
สมรรถนะในแง่ความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่าง
กระจกที่มีการติดมู่ลี่ภายใน

โดย

นายณพรัตน์ คำพร

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ขงเจริญ)

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)

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

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ทวี เวชพุดิ)

นพรัตน์ คำพร : การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะในแง่ความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ภายใน. (DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO PREDICT THERMAL COMFORT PERFORMANCE OF GLASS WINDOW INSTALLED WITH INTERIOR VENETIAN BLIND)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์, 191 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ด้านหลังหน้าต่างกระจกในแง่ความสบายเชิงความร้อนของผู้ที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจก และทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ทำนายผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ตัวมู่ลี่จะถูกจำลองเป็นชั้นเสมือน ที่มีค่าคุณสมบัติเชิงแสงของชั้นเสมือนในช่วงความยาวคลื่นสั้น และในช่วงความยาวคลื่นยาว ค่าคุณสมบัติเชิงแสงรวมของระบบหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ จะถูกคำนวณด้วยวิธี Matrix layer calculation ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามารถคำนวณได้จากค่าการส่งผ่านรังสีของระบบหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ อุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ จะคำนวณจากการสมดุลทางความร้อน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะสามารถทำนายค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย และค่า Percentage of people dissatisfied(PPD) ค่าอุณหภูมิผิวของผนังเทียบเท่าด้านที่เป็นหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่จะหาค่าได้จากการเฉลี่ยตามสัดส่วนพื้นที่ฉาย และอุณหภูมิผิวระหว่างกระจก และมู่ลี่ การทดลองถูกกระทำขึ้นในห้องทดลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบสมรรถนะของหน้าต่างกระจกใสที่มีการติดตั้งมู่ลี่ โดยมีการปรับมุมใบเป็น 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา ตามลำดับ ผลที่ได้จากการศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมเอียงของใบ และที่ทำนายค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกันดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าสมรรถนะในแง่ความสบายเชิงความร้อนได้แม่นยำในขอบเขตที่ยอมรับได้ และพบว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อค่า PPD

ในการศึกษานี้พบว่าค่าความรู้สึกไม่สบายของคนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ สามารถพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ ความไม่สบายเชิงความร้อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิผิวกระจกและมู่ลี่ที่สูงขึ้น และความไม่สบายเชิงความร้อนอันเนื่องมาจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามากระทบผู้คนที่อยู่ภายใน ซึ่งถูกอธิบายด้วยค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย โดยจะมีค่าแปรตามการปรับมุมเอียงของใบมู่ลี่ การติดตั้งมู่ลี่เข้ากับหน้าต่างกระจกสามารถช่วยลดความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านได้ดี และยังช่วยให้ความรู้สึกไม่สบายเชิงความร้อนของคนที่อยู่ใกล้ลดลง ระดับของความรู้สึกไม่สบายจะขึ้นกับการปรับมุมใบของมู่ลี่

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

5171813021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : VENETIAN BLIND / THERMAL COMFORT / SOLAR RADIATION / PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED /

NOPPARAT KHAMPORN : DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL TO PREDICT THERMAL COMFORT PERFORMANCE OF GLASS WINDOW INSTALLED WITH INTERIOR VENETIAN BLIND, ADVISOR : PROF.SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D., 191 pp.

This thesis presents the development of a mathematical model for calculating the thermal comfort performance of a glass window with a venetian blind installed for the occupant who sitting near the glass window. A computer program is also developed for predicting the results from the mathematics model. The accuracy of the mathematical model is checked by comparing the predicted results with the experimental results. The venetian blinds is modeled as an effective layer. The optical properties of an effective layer include the shortwave and longwave optical properties. The combined optical properties of the glass window system are developed by using matrix layer calculation method. The solar radiation that transmitted through the glass window system (glass window and the venetian blind) is calculated from the calculated transmittance of the glass window system. The glass window and blind surface temperature are calculated by using heat balancing method. The mean radiant temperature and the Percentage of people dissatisfied (PPD) can be predicted from the developed mathematical model. The inside effective surface temperature of the glass window and a venetian blind are determined by averaging the surface temperatures according to the fraction of projected area of the glass window and blind. This effective surface temperature will be used for calculating the mean radiant temperature. The experiment is performed in the test room with the clear glass window and a venetian blind by adjusting the blinds slat angle to 0, 45 and -45 degree, respectively. The study shows that the predicted transmitted solar radiation through the glass window system and the predicted mean radiant temperature agree with the experimental results quite well. The mean radiant temperature is found to be the main parameter that effect on the PPD.

In this study it is found that the thermal discomfort can be divided into two portions as the thermal discomfort due to higher surface temperature of the glass window system and the thermal discomfort due to the transmitted solar radiation through glass window system that incident on the occupant. This two portions of thermal discomfort are dependent on the mean radiant temperature. It is also found that the mean radiant temperature in this study is dependent on the slat angle. Installing the blind to the glass window can reduce the thermal discomfort of the occupant dependent on the slat angle adjustment.

Department :Mechanical Engineering Student's Signature.....

Field of Study :Mechanical Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year :2012.....

กิตติกรรมประกาศ

หากจะเปรียบเทียบการเรียนในระดับปริญญาตรีบัณฑิตในสาขาวิศวกรรมเครื่องกลเป็นการเดินทาง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็เป็นผลผลิตของการเดินทางที่ยาวนานถึง 5 ปี นอกจากนี้ในการเดินทางก็เต็มไปด้วยอุปสรรคตั้งแต่เริ่มต้นออกเดินทางจนถึงนาทีที่ถึงจุดหมายปลายทาง แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการได้ทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ก็ได้เป็น โอกาสให้ผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ได้พิสูจน์ความอดทนและความสามารถของตนเองที่จะเอาชนะกับอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ปัญหาที่เกิดขึ้น เริ่มตั้งแต่การเลือกหัวข้อ อุปสรรคของการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง ปัญหาจากการตรวจวัดค่าสภาวะภูมิอากาศที่แปรปรวนซึ่งไม่เอื้ออำนวยต่อการเก็บข้อมูล จนถึงการเผยแพร่ผลงาน แต่ผู้เขียนได้รับความกรุณาจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจจนสามารถแก้ไขปัญหามาได้ทุกประเด็น งานนี้ทำให้ผู้เขียนได้เรียนรู้ทักษะใหม่ ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการทำวิจัยในอนาคตต่อไป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากท่านศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญที่สุดในการผลักดันวิทยานิพนธ์นี้ให้ลุล่วงจนสำเร็จเป็นรูปเล่ม โดยท่านคอยกระตุ้นเตือนและยังได้กรุณาให้คำแนะนำ สนับสนุนทางวิชาการและคำปรึกษาในทุกๆ เรื่อง ไม่ว่าจะเป็นส่วนของการทำวิทยานิพนธ์โดยตรง หรือคำปรึกษาในส่วนอื่น ๆ อีกทั้งยังสละเวลาคอยควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ศาสตราจารย์ชาน ทวี เวชพฤติ และ ผศ.ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ได้กรุณาได้ให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะต่างๆ ที่มีประโยชน์เป็นอย่างดียิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความรู้อย่างลึกซึ้งในรายวิชาต่างๆ สำหรับการเรียนในภาคทฤษฎี

ขอกราบขอบพระคุณ แม่ส้มลิ้ม คำพร ที่คอยให้กำลังใจเสมอมาในยามที่ท้อแท้ และสิ้นหวังกับชีวิต และทำให้มีชีวิตต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ ที่เข้ามาในชีวิต จนทำให้หมาพบความสำเร็จ ณ วันนี้ได้ ขอขอบคุณน้อง สุกกิจ วรศิลป์ชัย ที่แนะนำความรู้เรื่อง มูเต้ จนทำให้ต่อยอดองค์ความรู้ได้ไม่อย่างยากลำบาก

ขอขอบพระคุณท่านอธิการบดีมหาวิทยาลัยสยาม ดร. พรชัย มงคลวนิช ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงท่านคณบดีมหาวิทยาลัยเซ็นต์จอห์น อาจารย์อำพล พิชัยเชิดเพื่อนที่คอยให้กำลังใจในยามที่หมดกำลังใจเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การศึกษาเกี่ยวกับความสบายเชิงความร้อน.....	6
2.2 การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย.....	8
2.3 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของกระจกชนิดต่าง ๆ.....	11
2.4 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่.....	12
2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน.....	13
บทที่ 3 ทฤษฎี และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	19
3.1 วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบกระจกที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ และที่มีการติดตั้งมู่ลี่.....	19
3.1.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ของกระจก.....	21
3.1.2 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของกระจกติดมู่ลี่.....	24

	หน้า
3.1.3 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีกระจายแสงอาทิตย์ของกระจกติดมู่ลี่	32
3.2 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก	34
3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)	35
3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)	37
3.3 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่	38
3.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่	38
3.3.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic คลื่นยาวของมู่ลี่	56
3.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่	62
3.4.1 การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม	65
3.4.2 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นกระจก	73
3.4.3 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิว	74
3.4.4 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ	75
3.5 การพัฒนาแบบจำลองวิธีการคำนวณค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน ของคนที่นั่งใกล้ หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่	80
3.5.1 การหาค่าความสบายเชิงความร้อน	80
3.5.2 การพัฒนาหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature)	82
3.5.3 การหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยการตรวจวัด	93
บทที่ 4 การทดลอง และ โปรแกรมคอมพิวเตอร์	95
4.1 ห้องทดลอง	95
4.1.1 เครื่องมือวัด	97
4.2 การทดลอง	106
4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง	108
4.3.1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากความละเอียดของเครื่องมือวัด	108
4.3.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเครื่องมือวัด	113
4.3.3 ค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	114
4.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์	114
4.4.1 โปรแกรม BLIND_COMFORT	114
4.4.2 โปรแกรมย่อย BLIND_OPTIC	115

	หน้า
4.4.3 โปรแกรมย่อย BLIND_OPTIC_FIT	115
4.4.4 โปรแกรมย่อย SOLAR_BLIND_CAL	118
4.4.5 โปรแกรมย่อย SURFACE_TEMP	118
4.4.6 โปรแกรมย่อย CAL_BLIND_COMFORT	119
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์	120
5.1 สมรรถนะของกระจกตัวเปล่า	120
5.2 สมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่	126
5.2.1 ผลการวิเคราะห์กระจกติดมู่ลี่ปรับมุมเป็น 0 องศา	127
5.2.2 ผลการวิเคราะห์กระจกติดมู่ลี่ปรับมุมเป็น 45 องศา	138
5.2.3 ผลการวิเคราะห์กระจกติดมู่ลี่ปรับมุมเป็น -45 องศา	150
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	164
6.1 สรุปผลการวิจัย	164
6.2 ข้อเสนอแนะ	167
รายการอ้างอิง	169
ภาคผนวก	174
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	191

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 รูปแบบอาคารที่สภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ	7
ตารางที่ 2.2 ช่วงของค่า PPD และค่า PMV ของสภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ	7
ตารางที่ 3.1 ค่า angular weighting function	34
ตารางที่ 3.2 ค่า effective ground reflectance, ของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ.....	34
ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาคูณสมบัติของกระจกชนิดเคลือบ	38
ตารางที่ 3.4 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของ คุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ	70
ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ A, B, C, D, E และ F_{max} ในการกำหนดค่า Angle Factor	87
ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ A_{ij} และ B_{ij} ที่ใช้ในการกำหนดค่า Project area factor	93
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคสำหรับเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง	98
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ที่ได้ จาก curve fitting	116

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางเดินของรังสีกรณีกระจกตัวเปล่า และกระจกติดมู่ลี่	2
รูปที่ 2.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth	14
รูปที่ 3.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth	25
รูปที่ 3.2 ทิศทางของรังสีที่ส่งผ่านมู่ลี่	26
รูปที่ 3.3 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ bi-directional properties.....	27
รูปที่ 3.4 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ directional-hemispherical properties	27
รูปที่ 3.5 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของชุดกระจกและมู่ลี่.....	30
รูปที่ 3.6 รังสีที่ตกกระทบในแต่ละมุมตกกระทบ.....	32
รูปที่ 3.7 คำมูมที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ สำหรับพื้นผิวแนวตั้ง และพื้นผิว แนวนอน	40
รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม solar altitude มุม solar-wall azimuth และมุม solar profile.....	40
รูปที่ 3.9 รูปร่างของใบมู่ลี่แบบใบตรงและใบโค้งและมุมที่เกี่ยวข้อง.....	43
รูปที่ 3.10 ผลของความโค้งของใบมู่ลี่ที่มีต่อการบังแสงอาทิตย์ในมุมเฉพาะบางตำแหน่ง ...	43
รูปที่ 3.11 รังสีตกกระทบบนใบมู่ลี่และมุมที่เกี่ยวข้อง	45
รูปที่ 3.12 ลักษณะของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาในตำแหน่งมุมบิดต่าง ๆ	46
รูปที่ 3.13 ส่วนรอบล้อมปิด 6 ผิวที่ประกอบจากใบมู่ลี่โค้ง 2 ใบที่อยู่ชิดกัน	47
รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของส่วนย่อยของรังสีแบบกระจายที่ตกกระทบบนมู่ลี่	54
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิง optic ของชั้นเสมือนที่เป็นมู่ลี่ใบ โค้งและมู่ลี่ใบตรง มู่ลี่ใบโค้งที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 50 มม. ระยะห่าง ระหว่างใบมู่ลี่เท่ากับ 20 มม. ความยาวที่ฉายลงระนาบเรียบเท่ากับ 25.2 มม. ความหนาเท่ากับ 0.3 มม. มีค่าการสะท้อนของใบมู่ลี่เท่ากับ 0.5 มุมบิดของใบ มู่ลี่เท่ากับ 0 องศา $t_{dir} = \tau_{bl-ct,dir,dir}^f$, $t_{dif} = \tau_{bl-ct,dir,dif}^f$, $r_{dif} = \rho_{bl-ct,dir,dif}^f$, $a_{dif} = \alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$, -F = มู่ลี่ใบตรงที่ไม่มี ความหนา	56
รูปที่ 3.16 ส่วนล้อมรอบปิด 6 พื้นผิวที่ประกอบขึ้นจากใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ชิดกัน.....	57
รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของใบมู่ลี่โค้ง.....	58

รูปที่ 3.18	มูลิ์พร้อมทั้งค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิว	60
รูปที่ 3.19	ค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบคลื่นยาวของชั้นเสมือน abs = ค่าการดูดกลืนรังสี trans = ค่าการส่งผ่านรังสี refl = ค่าการสะท้อนรังสี	62
รูปที่ 3.20	การกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก และมูลิ์	63
รูปที่ 3.21	ปริมาตรควบคุมของมูลิ์	67
รูปที่ 3.22	ระยะช่องว่างอากาศระหว่างกระจกและมูลิ์	72
รูปที่ 3.23	นิยามของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย	83
รูปที่ 3.24	การแผ่รังสีคลื่นยาวออกจากกระจก และมูลิ์ มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ	84
รูปที่ 3.25	ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวดิ่ง.	86
รูปที่ 3.26	ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน	86
รูปที่ 3.27 ก	ตำแหน่งคนในทำนั่งเทียบกับผนังตั้งฉากในตำแหน่งสูงกว่า และต่ำกว่า ศูนย์กลางของคน	87
รูปที่ 3.27 ข	ตำแหน่งคนในทำนั่งเทียบกับผนังระนาบด้านบน และด้านล่าง ในตำแหน่งสูง กว่า และต่ำกว่าศูนย์กลางของคน	88
รูปที่ 3.27 ค	ตำแหน่งคนในทำยืนเทียบกับผนังตั้งฉากในตำแหน่งสูงกว่า และต่ำกว่า ศูนย์กลางของคน	88
รูปที่ 3.27 ง	ตำแหน่งคนในทำนั่งเทียบกับผนังระนาบด้านบน และด้านล่าง ในตำแหน่งสูง กว่า และต่ำกว่าศูนย์กลางของคน	88
รูปที่ 3.28	ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำนั่ง	91
รูปที่ 3.29	ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำยืน	91
รูปที่ 4.1	ลักษณะของห้องทดลอง	96
รูปที่ 4.2	ตำแหน่งการติดตั้งการวัดอุณหภูมิผิวของผนังด้านใน	96
รูปที่ 4.3	การติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ภายนอกพร้อมกับอุปกรณ์บังเงา	97
รูปที่ 4.4	เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวของห้อง	99
รูปที่ 4.5	เครื่องจับเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิ	100
รูปที่ 4.6	เครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน	101

รูปที่ 4.7	หัววัดอุณหภูมิอากาศ.....	102
รูปที่ 4.8	เครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบมือถือ.....	102
รูปที่ 4.9	หัววัดอุณหภูมิผิว.....	103
รูปที่ 4.10	หัววัดความชื้น.....	103
รูปที่ 4.11	หัววัดความเร็วของอากาศ.....	104
รูปที่ 4.12	หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ.....	105
รูปที่ 4.13	ตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่มุมเอียงต่างๆ ที่จำลองลักษณะของ คน.....	105
รูปที่ 4.14	ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดภายในห้องทดลอง.....	106
รูปที่ 4.15	ลักษณะของหน้าต่างกระจกซึ่งมีมู่ลี่ติดตั้งอยู่พร้อมเครื่องมือวัด.....	108
รูปที่ 4.16	ลักษณะการปรับมุมใบของมู่ลี่ ที่มุมต่างๆ.....	109
รูปที่ 4.17	ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ที่แปรตามมุมตก กระทบ.....	116
รูปที่ 4.18	ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุม 0 องศา ที่แปรตามมุม profile.....	117
รูปที่ 4.19	ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา ที่แปรตามมุม profile.....	117
รูปที่ 4.20	ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา ที่แปรตามมุม profile.....	118
รูปที่ 5.1	ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจก ใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2554.....	120
รูปที่ 5.2	ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	121

รูปที่ 5.3	ค่ารังสีแสงอาทิตย์รวมที่ผ่านหน้าต่างกระจก และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	122
รูปที่ 5.4	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553	123
รูปที่ 5.5	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	124
รูปที่ 5.6	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	125
รูปที่ 5.7	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553.....	126
รูปที่ 5.8	ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	128
รูปที่ 5.9	ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	129
รูปที่ 5.10	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	130

รูปที่ 5.11	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	131
รูปที่ 5.12	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	132
รูปที่ 5.13	ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	133
รูปที่ 5.14	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	134
รูปที่ 5.15	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	135
รูปที่ 5.16	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	136

รูปที่ 5.17	ค่า PPD ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	137
รูปที่ 5.18	ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	137
รูปที่ 5.19	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	138
รูปที่ 5.20	ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการดัดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	139
รูปที่ 5.21	ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการดัดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	140
รูปที่ 5.22	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกดัดมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิโอเปอเรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554..	141
รูปที่ 5.23	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	142

รูปที่ 5.24	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	143
รูปที่ 5.25	ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	144
รูปที่ 5.26	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใสที่มีการดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากคำนวณ และการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	145
รูปที่ 5.27	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	146
รูปที่ 5.28	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	147
รูปที่ 5.29	ค่า PPD ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	148
รูปที่ 5.30	ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	149

รูปที่ 5.31	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และ มู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554...	149
รูปที่ 5.32	ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	150
รูปที่ 5.33	ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	151
รูปที่ 5.34	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิโอเปอเรทิฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	152
รูปที่ 5.35	ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	153
รูปที่ 5.36	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	154
รูปที่ 5.37	ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	155

รูปที่ 5.38	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใสที่มีการติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้ จากคำนวณ และการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	157
รูปที่ 5.39	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้ จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ กระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการ ตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	158
รูปที่ 5.40	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และ มู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	159
รูปที่ 5.41	ค่า PPD ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	160
รูปที่ 5.42	ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจาก การตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของ วันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554.....	161
รูปที่ 5.43	ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และ มู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554	161
รูปที่ 5.44	การเปรียบเทียบค่า PPD ของกระจกใสที่ไม่มีการติดมู่ลี่ และค่า PPD ของ กระจกใสที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่ตำการปรับมุมบิดของใบเท่ากับ 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา.....	162

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน	
A_i, A_j	คือ พื้นที่ของพื้นผิว i และ j	m^2
$A_{i:M}^f$	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^{FH}	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่เป็น directional hemisphere	
$A_i^{diff,sky}$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้าของแต่ละชั้น	
$A_i^{diff,grnd}$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแบบกระจายจากพื้นดินของแต่ละชั้น	
A_b	คือ ค่าพื้นที่ฉายของผิวของมู่ลี่	m^2
A_g	คือค่า พื้นที่ฉายของผิวของกระจก	m^2
A_{Total}	คือ ค่าพื้นที่ฉายรวมของผิวของกระจก และมู่ลี่	m^2
b	คือ ระยะติดตั้งมู่ลี่	mm
bf	คือ ค่า correction factor ของสันของใบมู่ลี่	
B_n	คือ ค่า Radiosity ของพื้นผิว	W/m^2
d	คือ ความหนาของกระจก	mm
f_p	คือ ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาพฉายผิวดน ต่อพื้นที่รับแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์	
f_{cl}	คือ อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด	
F_{sh}	คือค่า shading fraction	
F_{ji}	คือ ค่า view factor จากผิว j ไปยังผิว i	
F_{p-n}	คือ ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวที่ n	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
g	คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
G_f	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1)	W/m^2
G_b	คือ ค่า irradiation flux ที่ถูกส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหลังของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2)	W/m^2
G_1	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1)	W/m^2
G_2	คือ ค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2)	W/m^2
G_i	คือ ค่า irradiation บนผิว i	W/m^2
Gr	คือ Grashof number	
h	คือ ค่าระยะห่างของใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ชิดกัน	mm
h_i	คือ ระยะห่างของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีในส่วนของรังสีตรงซึ่งมีส่วนที่รังสีทะลุออกจากมู่ลี่โดยไม่กระทบใบมู่ลี่	mm
$h_{r,j-k}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิว j และ k (โดยทั่วไป $j = k-1$) ถ้าผิว k เป็นผิวด้านนอกสุดของระบบกระจก ผิว j จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอก ถ้าผิว j เป็นผิวด้านในสุดของระบบกระจก ผิว k จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายในห้อง	$W/m^2 K$
h_r	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$	
h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและเสื้อผ้า	$W/m^2 K$
$h_{c,gap}$	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก	$W/m^2 K$
h_{cg}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์	$W/m^2 - ^\circ C$
I_{total}	คือ ค่า total irradiation ที่ตกกระทบระบบกระจก หรือค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม	W/m^2

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
I_{dir}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง หรือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวหนังคน	W/m^2
I_{diff}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย หรือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ แบบกระจายที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวหนังคน	W/m^2
$I_{diff,sky}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจก	W/m^2
$I_{diff,grnd}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจก	W/m^2
I_{sky}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า	W/m^2
I_{grnd}	คือ ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน	W/m^2
I_{tran}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่าน ที่ได้จากการคำนวณ	W/m^2
J_j	คือ ค่า radiosity จากผิว j	W/m^2
k	คือ ค่าการนำความร้อนของก๊าซระหว่างชั้นกระจก	$W/m \cdot K$
k_{air}	คือ ค่าการนำความร้อนช่องว่างอากาศระหว่างใบมู่ลี่	$W/m \cdot K$
k_b	คือ ค่าการนำความร้อนของใบมู่ลี่	$W/m \cdot K$
k_{ef}	คือ ค่าการนำความร้อนเทียบเท่าของมู่ลี่ และช่องว่างอากาศ	$W/m \cdot K$
k_g	คือ ค่าการนำความร้อนของกระจก	$W/m \cdot K$
κ	คือ ค่า openness factor	
L_i	คือ ความยาวที่วัดตามผิวโค้ง i	
M	คือ จำนวนของชั้นของระบบกระจก	
M	คือ อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม	W/m^2
MRT	คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature)	$^{\circ}C$
N_i	คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น	
Nu	คือ Nusselt number	
PMV	คือ ค่าดัชนีคาดการณ์โหวตเฉลี่ย (Predicted Mean Vote)	
PPD	คือ ค่าดัชนีคาดการณ์ร้อยละของความไม่พอใจ	%
Pr	คือ Prandtl number	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_a	คือ ความดันย่อยของไอน้ำ	kPa
$P_{sat@T_a}$	คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ	kPa
q	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบกระจก	W/m^2
q_b	คือ ความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ใบมู่ลี่	W/m^2
q_{i-j}	คือ ค่าความร้อนที่ไม่นับส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วง ความยาวคลื่นสั้นจากจุด i สู่อุณหภูมิ j	W/m^2
q_{conv}	คือ ค่าการพาความร้อนเฉลี่ยระหว่างกระจกกับมู่ลี่	W/m^2
$q_{r,transmit}$	คือ ค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยจากผิวกระจกผ่านมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง	W/m^2
Q_i	คือ net heat flux หรือ ค่า flux ของความร้อนจากพื้นผิว i	W/m^2
$Q_{across,i}$	เป็นค่า heat flux ที่ถูกส่งผ่านจากชั้น i ข้ามชั้นมู่ลี่ ที่เป็นชั้น diathermanous layer สู่อุณหภูมิ $i+2$.	W/m^2
$Q_{abs,i}$	คือ ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ของกระจกชั้นที่ I	W/m^2
$\Sigma Q_{sk}^r(j)$	คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว j (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว k	W/m^2
$\Sigma Q_{sj}^r(k)$	คือ ค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว k (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบบนผิว j	W/m^2
Q_{sky}^r	คือ ค่าความร้อนจากการแผ่รังสีจากภายนอก	W/m^2
Q_{room}^r	คือ ค่าความร้อนจากการแผ่รังสีจากภายในห้อง	W/m^2
Q_{net}^r	คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิในรูปของการแผ่รังสี	W/m^2
Ra	คือ Rayleigh number	
RH	คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง	%
R_c	คือ รัศมีความโค้งของใบมู่ลี่	mm
R_λ	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบบน θ และความยาวคลื่น λ	
$R_\lambda(0)$	คือ ค่า reflectance ที่มุมตกกระทบบนศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
R_i^f	คือ bi-directional front reflectance matrix ของ layer i	
R_i^b	คือ bi-directional back reflectance matrix ของ layer i	
$R_{M,\{1,M\}}^f$	คือ bi-directional front reflectance matrix ของระบบ M ชั้น	
$R_{M,\{1,M\}}^b$	คือ bi-directional back reflectance matrix ของระบบ M ชั้น	
R_i	คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน	$m^2 \cdot K/W$
R_k	คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของแต่ละผิวกระจก	$m^2 \cdot K/W$
R_{tot}	คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมทั้งหมดของระบบกระจก	$m^2 \cdot K/W$
R_{i-j}	คือ ค่าความต้านทานของการส่งผ่านความร้อนในรูปการนำ การพา และการแผ่รังสีจากจุด i สู่อุณหภูมิที่จุด j	$m^2 \cdot K/W$
s	คือ ค่าความกว้างของใบมู่ลี่ชนิดใบตรง หรือ เป็นความยาวของ ใบมู่ลี่โค้งที่ฉายแสงลงบนระนาบเรียบ (ระยะห่างจากด้านหน้าใบมู่ลี่ ถึงปลายใบมู่ลี่)	mm
sw	คือ ความยาวของใบมู่ลี่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่	mm
SHGC	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient	
SHGC _d	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจก และ ของกระจกติดมู่ลี่จากรังสีตรง	
SHGC _D	คือ diffuse SHGC	
SHGC _{DS}	คือ sky-diffuse SHGC	
SHGC _{DG}	คือ ground-diffuse SHGC	
S_i	คือ ค่าความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ในชั้น i	W/m^2
t_b	คือ ความหนาของใบมู่ลี่	mm
t_c	คือ ระยะบังเพิ่มเติมจากผลของความโค้งของโลมู่ลี่	mm
T	คือ ค่าอุณหภูมิของมู่ลี่	$^{\circ}C$

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_{eff}	คือ ค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าของกระจก และมู่ลี่	$^{\circ}C$
T_b	คือ อุณหภูมิของผิวมู่ลี่	$^{\circ}C$
T_i	คือ ค่าอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของระบบกระจกที่ชั้นที่ I	$^{\circ}C$
T_{sj}	คือ ค่าอุณหภูมิของผิว j	$^{\circ}C$
T_{sk}	คือ ค่าอุณหภูมิของผิว k	$^{\circ}C$
T_g	คือ ค่าอุณหภูมิผิวกระจก	$^{\circ}C$
T_{in}	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน	$^{\circ}C$
T_{out}	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก	$^{\circ}C$
T_{sky}	คือ ค่าอุณหภูมิของท้องฟ้า	$^{\circ}C$
T_{room}	คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศในห้อง	$^{\circ}C$
T_o	คือ ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ	$^{\circ}C$
T_a	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง	$^{\circ}C$
T_{mrt}	คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature)	$^{\circ}C$
T_{umrt}	คือ ค่า Unirradiant mean Radiant Temperature	$^{\circ}C$
T_{cl}	คือ ค่าอุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่	$^{\circ}C$
ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิกระจก	K
T_{λ}	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ	
$T_{\lambda}(0)$	คือ ค่า transmittance ที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ	
T^{H}	คือ directional-hemispherical transmittance	
$T_{M,\{1,M\}}^f$	คือ bi-directional front transmittance matrix ของระบบ M ชั้น	
$T_{M,\{1,M\}}^b$	คือ bi-directional back transmittance matrix ของระบบ M ชั้น	
T_i^f	คือ bi-directional front transmittance matrix ของ layer i	
T_i^b	คือ bi-directional back transmittance matrix ของ layer i	
u^T	คือ auxiliary row vector	
$u_{Ins,total}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์	W/m^2

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
u_{nl}	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น	W/m^2
u_t	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว	W/m^2
u_d	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดของทิศทาง	W/m^2
u_{Ht}	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความลาดเอียง	W/m^2
u_z	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าไหลเลื่อนที่ศูนย์	W/m^2
u_{ns}	คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพ	W/m^2
u_{T_o}	คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ	$^{\circ}C$
u_{T_a}	คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิอากาศ	$^{\circ}C$
u_{v_a}	คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็วลม	m/s
u_{shade}	คือ ค่าความไม่แน่นอนจากการติดตั้งแหวนบังเงา	W/m^2
$u_{I_{tran}}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน ซึ่งได้จากการตรวจวัด	W/m^2
$u_{I_{glob}}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด	W/m^2
$u_{I_{diff}}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย ที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด	W/m^2
$u_{I_{tran}}$	คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน ซึ่งได้จากการตรวจวัด	W/m^2
U	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
U_{total}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
US_{ij}	คือ ผลรวมของค่าที่ไม่สั้นไขว้ (uncrossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j	
v_c	คือ ความยาวของส่วนที่รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงบนใบมู่ลี่	
V_a	คือ ค่าความเร็วของอากาศภายใน	m/s
w	คือ ระยะที่บังรังสีจากใบมู่ลี่ชนิดใบตรง	mm
w_t	คือ ระยะบังรังสีของใบมู่ลี่ที่รวมผลของความหนาของใบมู่ลี่เข้าไป	mm

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
W	คือ งานภายนอก มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับกิจกรรมโดยส่วนใหญ่	W/m^2
XS_{ij}	คือ ผลรวมของค่าเส้นไขว้ (crossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j	
θ	คือ มุมตกกระทบของรังสี	degree
θ_1	คือ มุมที่นิยามตามสมการที่	degree
θ_3	คือ มุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของความโค้งของ ส่วนที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง	degree
ϕ	คือ มุม azimuth	degree
ϕ_b	คือ มุมบิดของใบมู่ลี่	degree
ϕ_{cr}	คือ มุมวิกฤติ	degree
ϕ_s	คือ มุม solar profile	degree
Λ	คือ propagation matrix	
Ω	คือ มุม solar profile	degree
$\Delta\Omega$	คือ มุม solid angle	degree
ω	คือ ความกว้างของช่องกระจก	mm
ϖ	คือ ค่าความพรุนของมู่ลี่	mm
ξ	คือ พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับสถานะของท้องฟ้า และพื้นดิน	
ρ	คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ	kg/m^3
ρ	คือ effective ground reflectance	
ρ_λ	คือ ค่า reflectivity ที่ความยาวคลื่น λ หรือค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อน (reflectivity) มุมตกกระทบ θ	
μ	คือ ค่าความหนืดของก๊าซ	$kg/m \cdot s$
λ	คือ ความยาวคลื่น	nm
ζ	คือ มุมหักเหของแสง	degree
τ_λ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmissivity) มุมตกกระทบ θ	
β	คือ มุม solar altitude	degree

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
β	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ	$1/K$
γ	คือ มุม solar-wall azimuth	degree
σ	คือ ค่า Stefan-Boltzmann constant	$W/m^2 \cdot K^4$
ε_b	คือ ค่าการเปล่งรังสีที่ของใบมู่ลี่	
ε_g	คือ ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวกระจก หรือ ค่าการเปล่งรังสีของ โอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.95)	
ε_p	คือ ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน	
ε_{sky}	คือ ค่าการเปล่งรังสีของท้องฟ้า	
ε_{L-bl}^f	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน	
ε_{L-bl}^b	คือ ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน	
$\rho_{dif,dif}^b, \rho_{dif,dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ด้านหน้าและด้านหลังใบ	
$\rho_{bl-c,dir,dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายของชั้นเสมือน	
$\rho_{bl-ct,dir,dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบ ตรง	
$\rho_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจาก รังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า	
$\rho_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$	คือ ค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจาก รังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน	
ρ_{L-bl}^f	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน	
ρ_{L-bl}^b	คือ ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน	
$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายของชั้นเสมือน.	
$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาในกรณีของรังสีแบบ ตรง	
$\alpha_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า.	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\alpha_{bl-ct, gnd-dif, dif}^f$	คือ ค่าคุณลักษณะรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน	
α_{L-bl}^f	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน	
α_{L-bl}^b	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน	
$\tau_{bl-ct, dir, dir}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีจากรังสีตรงของมู่ลี่แบบใบโค้งที่มีความหนาในส่วนที่ไม่ตกกระทบมู่ลี่	
$\tau_{dif, dif}$	คือ ค่าการส่งผ่านของใบมู่ลี่ (จะมีค่าเท่ากับทั้งผิวด้านหน้าและด้านหลังของใบมู่ลี่)	
$\tau_{bl-ct, dir, dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจาย (ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงด้านหน้าในส่วนที่เกิดจากกระสะท้อนไปมาของรังสีที่ตกกระทบ) ของชั้นเสมือน	
$\tau_{bl-ct, dir, dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายที่คิดผลของความหนา	
$\tau_{bl-ct, sky-dif, dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า	
$\tau_{bl-ct, gnd-dif, dif}^f$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบโค้งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน	
τ_{L-bl}^f	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน	
τ_{L-bl}^b	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน	

บทที่ 1

บทนำ

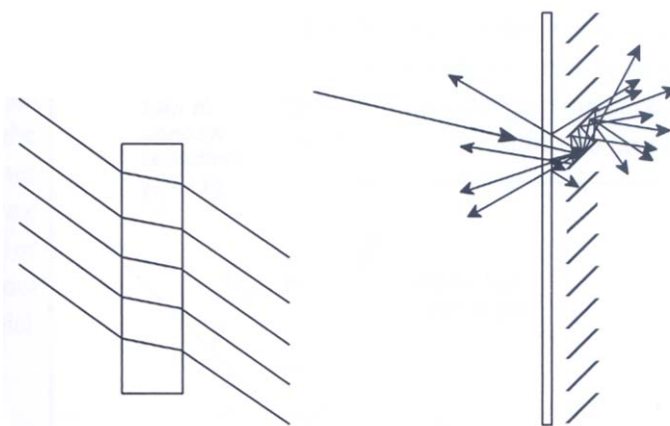
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบัน อาคารสำนักงาน และอาคารพาณิชย์ในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่มักมีหน้าต่างกระจกจำนวนมากเป็นส่วนหนึ่งของกรอบอาคาร หน้าต่างกระจกมีประโยชน์ในแง่ของการทำให้ตัวอาคารมีลักษณะโดดเด่นและสวยงาม อีกทั้งยังช่วยทำให้ผู้ที่อยู่อาศัยภายในอาคารเห็นทิวทัศน์ภายนอกได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องของการนำแสงสว่างจากธรรมชาติเข้าสู่ตัวอาคาร ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานในส่วน of แสงสว่างลงได้ แต่เนื่องจากประเทศไทยมีลักษณะของภูมิอากาศร้อนชื้นเกือบตลอดทั้งปี ดังนั้นการเลือกใช้หน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคารจำนวนมากจึงส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานในอาคาร โดยเฉพาะการใช้พลังงานในส่วน of ระบบปรับอากาศ อันเป็นผลมาจากความร้อนจากแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาสู่ภายในอาคาร ก่อให้เกิดเป็นภาระการทำความเย็นที่เครื่องปรับอากาศจะต้องกำจัดออกไป นอกจากนี้การใช้หน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคารนั้นยังส่งผลกระทบต่อสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) ของผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกอันเกิดจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมาตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยโดยตรง และเกิดจากรความร้อนที่สะสมไว้ในตัวหน้าต่างกระจก ซึ่งทำให้อุณหภูมิผิวกระจกสูงขึ้น สุดท้ายจะแผ่รังสีความร้อนจากผิวกระจกมายังผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ[1, 2] พบว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจะเป็นตัวแปรหลักที่มีผลกระทบต่อความสบายของผู้อยู่อาศัยในอาคารที่นั่งใกล้กับกระจก โดยค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่เกิดจากการแผ่รังสีจากผิวกระจกที่มีอุณหภูมิสูงกว่าผิวของผู้อยู่อาศัย และกรณีที่เกิดจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาตกกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง ดังนั้นการที่จะออกแบบอาคารให้มีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าจึงต้องมีความเข้าใจถึงสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกในแง่ของการส่งผ่านความร้อน และความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย

อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงผู้อยู่อาศัยมักนิยมติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายใน เช่น ฝ้าม่าน หรือติดตั้งมู่ลี่ไว้หลังหน้าต่างกระจกไว้เพื่อควบคุมแสงสว่าง และความเป็นส่วนตัว อีกทั้งยังควบคุมความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในห้อง และยังช่วยให้ผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้กับหน้าต่างกระจกมีความสบายเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์บังเงาที่ติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปในระบบหน้าต่างกระจกนั้นจะส่งผลกระทบต่อ การส่งผ่านความร้อนทั้งในส่วนของการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนโดยธรรมชาติจากกระจก และมีผลทำให้ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนรวม(The overall heat transfer coefficient, U) และค่า Solar Heat Gain Coefficient(SHGC) รวมทั้งค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย มีค่าเปลี่ยนแปลงไป อันเป็นผลเนื่องมาจากอุปกรณ์บังเงาภายในได้ไปเพิ่ม

ความซับซ้อนของคุณสมบัติทาง optic ของระบบกระจกที่ประกอบด้วยตัวกระจกและอุปกรณ์บังเงาภายใน และจะทำให้คุณสมบัติโดยรวมของระบบหน้าต่างกระจก จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของกระจก และคุณสมบัติเฉพาะตัวของอุปกรณ์บังเงาภายใน

โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์บังเงาภายในส่วนใหญ่มักมีค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่ไม่แน่นอนที่แปรตามการตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของมู่ลี่ ตัวมู่ลี่จะทำให้เส้นทางเดินของรังสีที่ถูกส่งผ่านระบบกระจกเปลี่ยนไป คือ เมื่อรังสีผ่านเนื้อกระจกมาตกกระทบที่ใบของมู่ลี่ (slat) รังสีที่ตกกระทบบมู่ลี่นั้นจะเกิดการสะท้อน โดยบางส่วนจะเกิดการสะท้อนออกจากมู่ลี่เข้าหาตัวกระจก บางส่วนจะสะท้อนออกจากมู่ลี่และส่งผ่านเข้าอาคาร โดยตรง และบางส่วนจะสะท้อนไปโดนใบมู่ลี่ที่อยู่ใกล้เคียงและเกิดการสะท้อนกลับไปมาภายใน (inter-reflection) ระหว่างใบมู่ลี่ ซึ่งจะพบว่าลักษณะทางเดินของรังสีที่ตกกระทบบมู่ลี่โดยรวมนั้นจะมีทิศทางไม่แน่นอน และถือเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเชิง optic ที่ไม่แน่นอน (nonspecular optical element) ต่างกับกระจกที่มีลักษณะทางเดินของรังสี และคุณสมบัติลักษณะทางเดินของรังสี และคุณสมบัติเชิงแสงที่แน่นอน (specular optical element) ทำให้การประเมินค่าการส่งผ่าน ค่าการสะท้อน กระจกได้ยาก ซึ่งจะส่งผลให้การประเมินความร้อนที่ลดได้จากการใช้มู่ลี่กระจกได้ยากเช่นกัน



รูปที่ 1.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางเดินของรังสีกรณีกระจกตัวเปล่า และกระจกติดมู่ลี่

นอกเหนือจากผลการส่งความร้อนผ่านระบบกระจกจะมีความสำคัญแล้ว ความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบกระจกก็ถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ผู้อยู่อาศัยอยู่ใกล้บริเวณกระจกที่ไม่มีอุปกรณ์บังเงาภายใน (unshaded window) จะมีอิทธิพลของการแผ่รังสีคลื่นสั้น และคลื่นยาวที่มีผลต่อความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัย[7,8,10,29] และเป็นผลให้ผู้อยู่อาศัยมีความสบายเชิงความร้อนลดลง ถึงแม้ว่าสภาวะอากาศภายในจะอยู่ในสภาวะสบายก็ตาม และในการใช้มู่ลี่นั้นอาจจะมีประโยชน์ในการช่วยลดค่าการแผ่รังสีคลื่นสั้น และคลื่นยาวจากระบบ

กระจกได้ ซึ่งอาจเป็นผลให้สามารถเพิ่มค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยบริเวณกระจกได้เช่นกัน

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้ คือ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ใบโค้งในแง่ของความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายในเพิ่มเติมจากงานของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และนพรัตน์ คำพร[3,4] โดยทำการทดลองในห้องทดลองที่มีการสร้างขึ้นและทำการติดตั้งระบบหน้าต่างกระจก และมีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดและอุปกรณ์ประมวลผลในการหาค่าสมรรถนะ ในการศึกษาที่มู่ลี่ใบโค้งจะถูกจำลองให้เป็นชั้นเสมือน(effective layer) จากผลการทดลองที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่พิจารณาถึงความสบายเชิงความร้อน นอกจากนี้จะปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาค่าการพาความร้อนของช่องว่างอากาศที่อยู่ระหว่างหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ เพื่อให้การคำนวณสมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะยืนยันด้วยผลการทดลอง ผลที่ได้จากการศึกษานี้จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้คำนวณสมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ใบโค้งที่พิจารณาถึงความสบายเชิงความร้อน นอกจากนี้ยังได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นสำหรับคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ใบโค้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ใบโค้งในแง่ของความสบายเชิงความร้อนเมื่อผู้อยู่อาศัยนั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมเอียงใบมู่ลี่ —45 องศา 0 องศา และ 45 องศา ภายใต้สภาวะอากาศที่ได้จากการทดลอง

1.2.2 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่สำหรับคำนวณดัชนีความสบายเชิงความร้อน ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยจากการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง โดยห้องทดลองจะทำการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน ของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาวิธีการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่แบบใบโค้ง หลักการคำนวณคุณสมบัติทาง optic ของระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ด้วยวิธี Matrix layer วิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างที่มีการติดมู่ลี่ภายใน รวมทั้งศึกษาความแตกต่าง และเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ สำหรับคำนวณสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ วิธีการคำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนของระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ต่อผู้อยู่อาศัย

1.3.2 พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณค่าการถ่ายความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และประเมินค่าความความสบายเชิงความร้อน ทำนายสมรรถนะทางความร้อนด้วยค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน อุณหภูมิผิวกระจก อุณหภูมิของใบมู่ลี่ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ค่า PMV และค่า PPD

1.3.3 ทำการทดลองหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ใบโค้ง ที่มีการปรับมุมใบเป็น -45 องศา 0 องศา และ 45 องศา ทำการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องมือก่อนการทดลอง จากผลการทดลองที่ได้จะถูกเอาไปใช้สำหรับพิสูจน์ความถูกต้องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาสำหรับทำนายสมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ในแง่ของความสบายเชิงความร้อน โดยพารามิเตอร์ที่ถูกนำมาพิจารณาได้แก่ อุณหภูมิผิว ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ค่า PMV และค่า PPD

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาวิธีการคำนวณคุณสมบัติเชิง optic ของกระจก และมู่ลี่

1.4.2 ศึกษาวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

1.4.3 ศึกษาวิธีการคำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้กับ ระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

1.4.4 พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ความความสบายเชิงความร้อนที่พิจารณาถึงผลกระทบจากหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน

1.4.5 ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน

1.4.6 ทำการทดลอง และทำการตรวจวัด หาค่าความสบายเชิงความร้อน และความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านระบบหน้าต่างกระจกใส ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่มีการปรับมุมใบของมู่ลี่เป็น -45 องศา 0 องศา และ 45 องศา

1.4.7 ยืนยันความถูกต้องผลที่ได้จากการทำนายที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยผลการที่ได้จากการตรวจวัดในห้องทดลอง

1.4.8 ทำการปรับปรุงแบบจำลองที่ได้เพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับจำลองสมรรถนะเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ในแง่ของความสบายเชิงความร้อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสมรรถนะทางความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ภายใน โดยพิจารณาถึงความสบายเชิงความร้อนเมื่อผู้อยู่อาศัยนั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน

1.5.2 มีความเข้าใจเกี่ยวกับสมรรถนะของหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่ ในแง่ของการถ่ายเทความร้อน และความสบายเชิงความร้อน

1.5.3 ได้ทราบวิธีการตรวจวัดหาค่าความร้อนที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกติดตั้งมู่ลี่ และวิธีการตรวจวัดค่าความสบายเชิงความร้อน

1.5.4 ได้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ และสำหรับคำนวณผลกระทบของมู่ลี่ต่อค่าความสบายเชิงความร้อน

1.5.5 ได้องค์ความรู้ เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ และการเลือกใช้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ได้อย่างเหมาะสม เพื่อการประหยัดพลังงาน และคำนึงถึงความสบายเชิงความร้อน

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และที่ใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ โดยได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยต่าง ๆ ดังนี้

การศึกษาเกี่ยวกับความสบายเชิงความร้อน

การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของกระจกชนิดต่าง ๆ

การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน

2.1 การศึกษาเกี่ยวกับความสบายเชิงความร้อน

วัตถุประสงค์หลักของระบบปรับอากาศก็เพื่อให้ผู้อยู่อาศัยที่อยู่ในบริเวณปรับอากาศมีความรู้สึกสบาย สำหรับคำนิยามของความสบายเชิงความร้อนตามมาตรฐานของ ASHRAE[5,6] คือสถานะที่ซึ่งผู้อยู่อาศัยภายในบริเวณมีความรู้สึกพอใจต่อสภาพทางความร้อนรอบตัว

ในปีพ.ศ. 2513 Fanger [18] ได้ศึกษาถึงสถานะความสบายเชิงความร้อนของคนที่อาศัยอยู่ในห้องที่มีการปรับสภาวะอากาศ โดยได้ใช้หลักสมดุลทางความร้อนกับร่างกายของคน และพบว่าสถานะความสบายเชิงความร้อนของคนนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ 6 ปัจจัยด้วยกันคือค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความชื้น ค่าความเร็วลมของอากาศ ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า กิจกรรมที่ทำ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean Radiant Temperature, MRT) จากนั้น Fanger จึงได้พัฒนาดัชนีเพื่อทำนายสถานะความสบายของคนที่ยืนอยู่กับตัวแปร 6 ตัวเหล่านี้ โดยทำการโหวตจากอาสาสมัครจำนวนมากและกำหนดเป็นค่าดัชนีบ่งบอกค่าความสบายเชิงความร้อนคือค่า 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)

และสำหรับค่า PPD จะบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนคนที่รู้สึกไม่สบายเชิงความร้อน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 5 เปอร์เซ็นต์ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์

ในปี พ.ศ. 2543 Olesen B. W. [32] ได้ทำการวิจัยเพื่อแนะนำแนวทางในการเลือก และกำหนดเงื่อนไขสภาวะภายในอาคารให้เหมาะสมสำหรับอาคารที่มีรูปแบบต่าง ๆ กัน โดยชนิดของอาคารที่พิจารณาได้แก่ อาคารสำนักงาน ภัตตาคาร และห้างสรรพสินค้า และได้แบ่งรูปแบบของสภาวะแวดล้อมออกเป็น 3 แบบด้วยกัน โดยได้กำหนดค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า และการทำกิจกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 รูปแบบอาคารที่สภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ

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 การศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย คือค่าอุณหภูมิสมมูลของผิวสมมุติภายในของห้องที่มีสีดำ โดยส่งผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผู้อยู่อาศัยภายในกับผนังห้องนั้นได้เหมือนกับห้องจริงที่มีค่าของอุณหภูมิผิวของผนังไม่สมมูล สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจก ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจะเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมากต่อค่าความสบายเชิงความร้อน

ในปี พ.ศ. 2535 Athienitis และ Haghghat [7] ได้ทำการวิจัยศึกษาหาผลกระทบของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่มีต่อสภาวะความสบายเชิงความร้อนภายในห้อง โดยการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโกลบที่ตำแหน่งใกล้กับหน้าต่างกระจก ทำการตรวจวัดค่ารังสีแบบตรง และรังสีแบบกระจาย ที่ผ่านหน้าต่างกระจกใส โดยจะอธิบายผลกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งรังสีแบบตรง และรังสีแบบกระจาย รวมทั้งค่าของอุณหภูมิโกลบให้อยู่ในรูปของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย จากผลจากวิจัยพบว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโกลบ และอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่รังสีแสงอาทิตย์แบบตรง มีค่าเท่ากับ 430 W/m^2 จะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด และจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศภายในห้องเท่ากับ $4.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และผลของรังสีกระจายจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศ ภายในห้องเท่ากับ $3.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จากผลของงานวิจัยนี้จะพบว่าค่ารังสีแบบตรง และค่ารังสีแบบกระจายมีผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น

ในปี พ.ศ. 2543 Lyon, Arasteh และ Huizenga [29] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ ต่อสภาวะความสบายเชิงความร้อนคนที่นั่งใกล้บริเวณกระจกสำหรับสภาวะอากาศออกแบบในฤดูร้อน และฤดูหนาว รวมไปถึงลักษณะความต้านทานเสื้อผ้าที่ต่างกัน โดยได้อธิบายผลกระทบของการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ในรูปของค่า SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) และการแผ่รังสีคลื่นยาวในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) และผลจากกระแสลมเย็น (draft) โดยผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อสภาวะความสบายจะถูกอธิบายให้อยู่ในรูปของค่าดัชนีคาดการณ์ร้อยละของความไม่พอใจ (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) จากการศึกษาพบว่าค่าการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบคนนั้น หน้าต่างกระจกที่มีคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีที่สูงจะทำให้ค่า PPD อันเนื่องมาจากรังสีแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวสูงขึ้น และกระจกที่มีค่าการดูดกลืนรังสีที่สูงก็จะทำให้ค่า PPD อันเนื่องมาจากอุณหภูมิผิวของกระจกมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ใช้

คำนวณค่า PPD นั้น ถ้านำค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้นี้ประยุกต์ใช้ตามวิธีของ Fanger[19] เพื่อหาค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนจะทำให้ค่าดัชนีที่ได้มีค่าที่สูงเกินสเกลที่กำหนดไว้ ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีความสบาย PMV ที่เกิดขึ้นต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการส่งผ่านความร้อนแทนการหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยโดยตรง และการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$\frac{dPMV}{dq} = \frac{\partial PMV}{\partial MRT} \cdot \frac{\partial MRT}{\partial (\alpha f_p q)} \cdot \frac{\partial (\alpha f_p q)}{\partial q} \quad (2.1)$$

เมื่อ α = ค่าการดูดกลืนรังสีที่ผิวคน

f_p = ค่า project area factor

q = ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบที่ผิวคน W/m^2

ในปี พ.ศ. 2544 สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [1] และในปี พ.ศ. 2547 สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ นพรัตน์ คำพร และศุภกิจ วรศิลป์ชัย [2] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของกระจกและกระจกติดฟิล์มที่นิยมใช้ตามท้องตลาดจำนวนมาก ในแง่ของความสบายเชิงความร้อน โดยพิจารณาภายใต้ข้อมูลภูมิอากาศออกแบบมาตรฐานจากข้อมูลภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร เพื่อใช้ในการกำหนดค่าสมรรถนะของกระจกตัวเปล่า และกระจกติดฟิล์ม โดยจากการศึกษาพบว่าสาเหตุที่จะก่อให้เกิดความไม่สบายเชิงความร้อนจะมี 2 ส่วนด้วยกันคือ สาเหตุเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มากกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง ซึ่งจะถือว่าเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้น (shortwave radiation) และสาเหตุเนื่องจากอุณหภูมิของผิวกระจกที่มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นผลมาจากการแผ่รังสีคลื่นยาว (longwave radiation) ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติทาง optic ได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการดูดกลืนรังสี ที่มีต่อดัชนีความสบายเชิงความร้อนขึ้นมา 2 ตัวเพื่อที่จะครอบคลุมถึงอิทธิพลทั้ง 2 ส่วนดังกล่าวซึ่งประกอบไปด้วย Predicted Percentage of Dissatisfied ที่มีผลจากรังสีแสงอาทิตย์ และค่า Predicted Percentage of Dissatisfied ที่มีผลมาจากอุณหภูมิผิวกระจก

Gennusa และคณะ [26,27] ได้นำเสนอสมการสำหรับการคำนวณหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยในทุกกรณี โดยสมการสามารถหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยได้ทั้งในกรณีที่มีผลมาจากอุณหภูมิผิวภายในห้องเพียงอย่างเดียว และสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีที่เป็นผลมาจากการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์(รังสีแบบตรง และรังสีแบบกระจาย)ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาในห้อง โดยสมการที่นำเสนอ นั้น จำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิผิวภายในทั้งหมด ค่าของรังสีตรง และรังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาในห้อง ค่าตัวประกอบรูปร่างระหว่างพื้นผิวกับคน(angle factor) และตัว

ประกอบพื้นที่ภาพฉาย(projected area factor) ของคนที่รังสีตรงมากระทบ ซึ่งวิธีการคำนวณค่า อุณหภูมิแผ่รังสีที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ Gennusa และคณะ [26,27] ได้ทำการจำลองการวิเคราะห์ค่าความสบายเชิงความร้อนในรูปของค่า PPD(predicted percentage of dissatisfied) โดยทำการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆภายในห้องที่กำหนดขึ้นและนำไปประมวลค่า PPD ผลจากการศึกษาพบว่าตำแหน่งภายในของห้องที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบจะก่อให้เกิดค่า PPD สูงกว่า ค่า PPD กรณีที่ไม่มีรังสีมาตกกระทบ แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษานี้ใช้ได้เฉพาะกรณีที่มีแสงอาทิตย์ผ่านกระจกเข้ามาเท่านั้น ยังไม่ครอบคลุมไปถึงกรณีที่แสงอาทิตย์ส่งผ่านผนังที่มีกระจกติดมู่ลี่ เนื่องจากการคำนวณคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่มีความซับซ้อนกว่า

ในปี พ.ศ. 2553 Bessoudo และคณะ [8] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงสภาวะของอากาศที่อยู่ใกล้กับหน้าต่างกระจกที่มีผลกระทบต่อความสบาย ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาไว้ภายใน ภายใต้ภูมิอากาศภายนอกในช่วงฤดูหนาว ในการทดลองจะมีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายใน 2 ชนิด คือ อุปกรณ์บังเงาแบบม้วน(roller shade) และมู่ลี่(venetian blind) และทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะความสบาย โดยการทดลองนี้จะมีค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกไม่เกิน -15°C และอุณหภูมิภายในถูกควบคุมไว้ไม่ให้เกิน 24°C จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบอย่างมากต่อความสบายคือค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย(mean radiant temperature) ซึ่งจะคำนวณโดยการตรวจวัดจากค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีสมมาตร(radiant temperature asymmetry) โดยอุปกรณ์บังเงาแบบม้วนจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีสมมาตรมีค่าสูงสุดไม่เกิน 5°C เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มี การติดตั้งอุปกรณ์บังเงาจะมีค่าอุณหภูมิแผ่รังสีสมมาตรมีค่ามากกว่า 15°C ซึ่งอุปกรณ์บังเงาแบบม้วนจะทำให้เกิดสภาวะความสบายเชิงความร้อนมากขึ้น สำหรับกรณีของมู่ลี่ จะทำการตรวจวัดที่ตำแหน่งมุมใบเปิดสุดที่ตำแหน่ง 0 องศา เปิดปานกลางที่ตำแหน่ง 45 องศา และตำแหน่งปิดสุด 90 องศา จากผลการทดลองพบว่ามุมของใบมู่ลี่มีผลต่อค่าอุณหภูมิแผ่รังสีสมมาตร โดยจะมีค่าเป็น 20°C 10°C และ 2°C ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ตำแหน่งมุมใบเปิดสุด จะมีรังสีแสงอาทิตย์ลอดผ่าน ใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีสมมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น และสำหรับกรณีใบปิดสุดจะไม่มีรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาตกกระทบหัววัด ซึ่งให้ผลคล้ายกับอุปกรณ์บังเงาแบบม้วน จากนั้น Bessoudo และคณะ [8] ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำนวณหาอุณหภูมิผิวกระจก และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลอง โดยให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผู้วิจัยสามารถทำเปรียบเทียบได้เฉพาะอุปกรณ์บังเงาแบบม้วนเท่านั้น อุปกรณ์บังเงาที่เป็นมู่ลี่มีความซับซ้อนในส่วนของค่า angle factor ระหว่างใบมู่ลี่กับคน และค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ซึ่งพิจารณาถึงมุมใบของมู่ลี่

2.3 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของกระจกชนิดต่าง ๆ

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ ได้แก่ ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสี(Transmittance) การสะท้อนรังสี(Reflectance) และค่าการดูดกลืนรังสี (Absorptance) รวมทั้งคุณสมบัติทาง optic โดยรวมของหน้าต่างกระจกแบบหลายชั้น

ในปีพ.ศ. 2534 Furler [20] ได้เสนอวิธีการในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass) ซึ่งค่าคุณสมบัติทาง optic ของกระจกประกอบไปด้วยค่าการส่งผ่าน (transmittance) และค่าการสะท้อน (reflectance) ที่แปรตามมุมตกกระทบ โดยในการคำนวณค่าคุณสมบัติเหล่านี้จำเป็นต้องทราบค่าความยาวคลื่น มุมตกกระทบ ความหนาของกระจก และค่าคุณสมบัติที่ตำแหน่งตั้งฉากกับตัวกระจก โดยค่าคุณสมบัติทาง optic นี้ได้แบ่งการคำนวณเป็น 2 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงรังสีความร้อนแสงอาทิตย์(Solar range) และช่วงการมองเห็น (Visible range) โดยช่วงความยาวคลื่นของรังสีความร้อนจะอยู่ในช่วง 780 ถึง 2500 นาโนเมตร และช่วงความยาวคลื่นของการมองเห็นจะอยู่ในช่วง 320 ถึง 780 นาโนเมตร แต่อย่างไรก็ตามค่าการส่งผ่าน และการสะท้อนนี้มีลักษณะค่อนข้างเรียบในแต่ละช่วง เป็นผลให้สามารถพิจารณาค่าคุณสมบัติทาง optic เหล่านี้ออกเป็น 2 ช่วงได้โดยใช้แบบจำลอง 2-band model จากนั้นจึงหาค่าความยาวคลื่นเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละช่วง โดยค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นในแต่ละช่วงมีค่าเท่ากับ 897.7 นาโนเมตรสำหรับช่วงรังสีความร้อนแสงอาทิตย์ และ 575 นาโนเมตรสำหรับช่วงการมองเห็น นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลอง และการตรวจวัดคุณสมบัติทาง optic ที่มุมตกกระทบต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้คำนวณค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกชนิดไม่เคลือบที่มุมตกกระทบอื่น โดยใช้ค่าคุณสมบัติของกระจกจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งตั้งฉากกับกระจกเพียงค่าเดียว

ในปีพ.ศ. 2536 Finlayson และคณะ [19] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบ (coated glass) โดยใช้วิธีประมาณค่า ซึ่งผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทำสมการเส้นถดถอยออกเป็นสองแบบจำลองด้วยกันคือ แบบจำลองของกระจกใส (clear glass) และแบบจำลองของกระจกชนิดเคลือบ โดยมีเงื่อนไขการพิจารณาว่า ถ้าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) มีค่ามากกว่า 0.645 การคำนวณคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกนั้นก็จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส แต่ถ้าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645 การคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกนั้นก็จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกชนิด

เคลือบคำนวณ นอกจากนี้ยังได้หาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบในทิศทางครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัม (hemispherical properties) เพื่อที่จะนำคุณสมบัติดังกล่าวไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย

2.4 การศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่

การหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ จำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ และคุณสมบัติรวมของทั้งหน้าต่างและมู่ลี่ แต่เนื่องจากมู่ลี่มีลักษณะทางโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียว โดยมีใบมู่ลี่วางเป็นระยะห่างซ้อนกันหลายใบ และคั่นด้วยด้วยช่องว่างอากาศ ทำให้คุณสมบัติทาง optic มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก อีกทั้งคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ยังขึ้นกับ มุมเอียงของใบ ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ ความกว้างใบ สีของใบมู่ลี่ ดังนั้นคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่จึงเป็นแบบ non specular

ในปี พ.ศ. 2538 Klems และ Warner [24] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษา และวัดค่าคุณสมบัติ Bi-directional properties ของมู่ลี่โดยใช้ scanning radiometer และพบว่าค่าการส่งผ่าน และค่าการสะท้อนของมู่ลี่นั้นจะขึ้นอยู่กับระนาบของการตกกระทบ (plane of incident) ของรังสีเข้าและรังสีออก เป็นผลให้ค่าการส่งผ่าน และค่าการสะท้อนของมู่ลี่ต้องอธิบายด้วยฟังก์ชันการกระจายตัวของการส่งผ่านแบบสองทิศทาง (Bi-directional Transmittance Distribution Function, BTDF) และฟังก์ชันการกระจายตัวของการสะท้อนแบบสองทิศทาง (Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF) และเนื่องจากค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะ (มุมเอียง) ของมู่ลี่ด้วย ดังนั้นค่า BTDF และค่า BRDF ที่ได้จะเป็นค่าที่มุมเอียงใดมุมเอียงหนึ่ง โดยที่คณะผู้วิจัยได้ทดลองที่มุมเอียงของมู่ลี่ที่ 3 มุมด้วยกันคือ 0 45 และ 90 องศา และข้อมูลเหล่านี้ได้ถูกใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ โดยวิธี Matrix layer calculation เพื่อหาค่าคุณสมบัติทาง optic รวมของระบบกระจกที่มีการติดมู่ลี่

ในปี พ.ศ. 2537 Klems [21,22] ได้พัฒนาวิธีการทำนายค่าความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่ โดยจะทำการหาค่าคุณสมบัติของมู่ลี่ได้แก่ คุณสมบัติการส่งผ่านรังสี และการสะท้อนรังสีแบบสองทิศทางด้วยเครื่อง scanning radiometer และเมื่อได้ค่าคุณสมบัติทาง optic แบบสองทิศทางของกระจก และมู่ลี่แต่ละชั้นแล้ว จึงใช้วิธีการคำนวณแบบ Matrix Layer เพื่อให้ได้คุณสมบัติทาง optic รวมของระบบหน้าต่างกระจกที่มีมู่ลี่ ได้แก่อค่าการส่งผ่านรังสีแบบมีทิศทางเชิงครึ่งทรงกลม (directional-hemispherical transmittance) และค่าดูดกลืนรังสีในแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างกระจกและมู่ลี่

ในปี พ.ศ. 2539 Pfrommer P. และคณะ [33] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมู่ลี่โดยได้พิจารณาแยกคุณสมบัติทาง optic ออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่จะถูกส่งผ่านโดยตรง (direct-direct transmittance) และส่วนที่จะส่งผ่านเนื่องจากการสะท้อนระหว่างใบมู่ลี่ (direct-diffuse transmittance) ซึ่งเป็นการพิจารณาตามหลักทางเรขาคณิตเพื่อที่จะทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประเมินค่าคุณสมบัติทาง optic ของอุปกรณ์บังเงาแบบ slat-type และเป็นผลให้สามารถพิจารณาหาคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ได้

Yahoda และ Wright [38,39] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optic ทั้งแบบรังสีคลื่นสั้น และแบบรังสีคลื่นยาว ของมู่ลี่ที่มีลักษณะใบตรง และไม่คิดความหนาของใบมู่ลี่ โดยพิจารณาให้มู่ลี่มีคุณสมบัติเป็นชั้นเสมือน (effective layer) โดยวิธีนี้จำเป็นต้องรู้ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิตของมู่ลี่ และค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงอยู่สองลักษณะคือ ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีแบบตรงไปตรง (direct-direct transmittance) และค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีแบบตรงไปกระจาย (direct-diffuse transmittance) ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ทราบค่าคุณสมบัติทาง optic ของใบมู่ลี่ที่ถูกพิจารณาให้เป็นชั้นเสมือนที่มีมุมเอียงต่างๆ

ในปี พ.ศ. 2552 Chaiyapinunt และ Worasinchai [11,12] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optic ทั้งแบบรังสีคลื่นสั้น และแบบรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่ที่มีลักษณะใบโค้ง และพิจารณาถึงความหนาของใบมู่ลี่ โดยพิจารณาให้มู่ลี่มีคุณสมบัติเป็นชั้นเสมือน (effective layer) โดยวิธีนี้จำเป็นต้องรู้ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิตของมู่ลี่ และค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้จะทำให้ได้ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรง และแบบกระจาย ซึ่งค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงจะมีสองลักษณะคือ ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีแบบตรงไปตรง (direct-direct transmittance) และค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีแบบตรงไปกระจาย (direct-diffuse transmittance) ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ทราบค่าคุณสมบัติทาง optic ของใบมู่ลี่ใบโค้งที่พิจารณาถึงความหนาที่ถูกพิจารณาให้เป็นชั้นเสมือนที่มีมุมเอียงต่างๆ

2.5 การศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน

Klems [22-24] ได้พัฒนาวิธีการเพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่มีอุปกรณ์บังเงาภายในที่เป็นมู่ลี่ และพบว่า ค่าคุณสมบัติการส่งผ่าน ค่าคุณสมบัติการสะท้อน และคุณสมบัติการดูดกลืนของระบบกระจกที่มีอุปกรณ์บังเงาภายในที่เป็นมู่ลี่ติดอยู่นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีแล้วนั้น จะยังคงขึ้นอยู่กับลักษณะการเอียงของรังสีที่มาตกกระทบ

อีกด้วย (เกิดมุม azimuth ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ดังนั้น ในการประเมินค่า Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) ของระบบกระจกที่มีอุปกรณ์บังเงาภายในใด ๆ ต้องประเมินจากสมการ

$$\text{SHGC}(\theta, \phi) = T^{\text{th}}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_i^f(\theta, \phi) \quad (2.1)$$

เมื่อ SHGC คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

T^{th} คือ ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้า

A_i^f คือ ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของแต่ละชั้นกระจก และมู่ลี่

N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจก และมู่ลี่

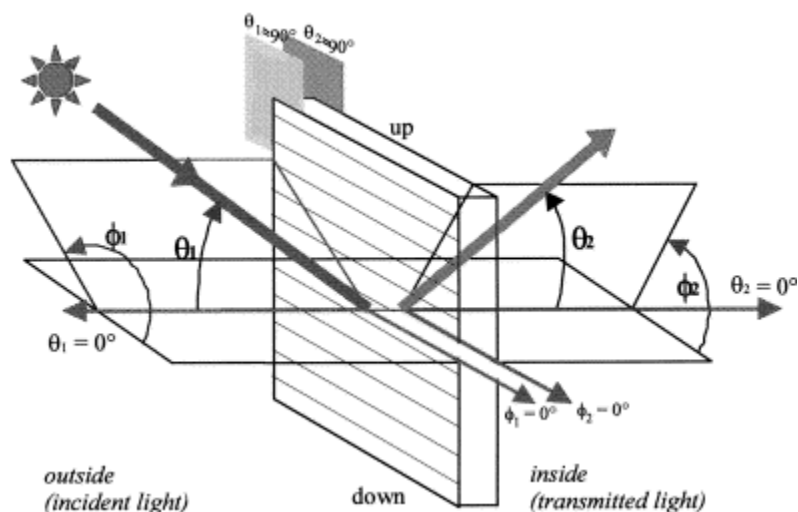
θ คือ มุมตกกระทบของรังสี

ϕ คือ มุม azimuth ของรังสี

โดยที่ Klems ได้พิจารณาแยกตัวแปรในสมการ 2.1 ออกเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ

-ตัวแปรที่มีคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับค่าเชิง optic ได้แก่ค่า T^{th} และ A_i^f ที่สามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix layer calculation

-และตัวแปร N_i ซึ่งเป็นปริมาณทาง calorimetric ที่มีค่าขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบเป็นหลัก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับค่าเชิง optic โดยสามารถหาค่าได้จากการทดลอง



รูปที่ 2.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth

ในปี พศ. 2541 Machin และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาเชิงทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยธรรมชาติระหว่างผิวชั้นในของกระบอก และใบมู่ลี่ โดยใช้เทคนิค flow visualization ด้วยตัวเครื่อง Mach-Zehnder Interferometer โดยใช้ใบมู่ลี่อลูมิเนียม ติดตั้งเข้ากับผิวที่ถูกให้ความร้อนสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่น(isothermal plate) แต่ใบมู่ลี่ไม่ได้ถูกให้ความร้อน โดยกำหนดระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่กับผิวที่ถูกให้ความร้อน 3 ตำแหน่ง และปรับมุมเอียงของใบมู่ลี่ 4 ตำแหน่ง ใช้แสงเลเซอร์จากเครื่อง interferometer แสดงภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ และวัดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ บนแผ่นอลูมิเนียม จากการศึกษาพบว่าเมื่อใบมู่ลี่ถูกติดตั้งใกล้กับแผ่นกระบอกที่ให้ความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จะมีแกว่งมีลักษณะเป็นคาบ และพบว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงที่สุดเมื่อเมื่อใบมู่ลี่ถูกติดตั้ง ใกล้กับแผ่นความร้อน และมีค่าลดลงเมื่อมู่ลี่ติดตั้งห่างจากแผ่นให้ความร้อนมากที่สุด แต่การศึกษาในทุกกรณี จะพบว่า ผลกระทบของใบมู่ลี่ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างน้อย ซึ่งน้อยกว่า 13%

ในปี พศ. 2542 Ye P. และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบระหว่างผิวกระบอกชั้นใน และใบมู่ลี่ที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยธรรมชาติ โดยใช้ระเบียบวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(CFD) วิเคราะห์การไหลเป็นแบบ 2 มิติ และในแบบจำลองที่ศึกษานั้นจะไม่คิดผลกระทบจากการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างใบของมู่ลี่ และผิวกระบอกชั้นใน โดยกำหนดให้ใบมู่ลี่มีลักษณะเป็นใบตรง อีกทั้งยังไม่คิดถึงผลกระทบของความหนาใบมู่ลี่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จากแบบจำลองที่ตำแหน่งใดๆ ตามผิวของหน้าต่างกระบอก จะมีลักษณะแกว่งเป็นลักษณะคาบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Machin และคณะ[30] แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าการทดลอง โดยในแบบจำลองได้ศึกษาถึงผลของระยะการติดตั้ง และมุมเอียงของมู่ลี่ที่จะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยพิจารณาที่ระยะต่าง ๆ คือ 15, 20, 25, 30 และ 40 มม. และที่มุมเอียง 0, 45, -45 และ 80 องศา จากการศึกษาพบว่าระยะติดตั้งมู่ลี่ และมุมเอียงของมู่ลี่นั้นจะมีผลกระทบโดยตรงต่อการพาความร้อนออกจากกระบอก โดยที่ที่ระยะติดตั้งเท่ากับ 15 มม. นั้นการติดตั้งมู่ลี่จะมีผลกระทบโดยตรงต่อการพาความร้อนโดยที่ที่มุมเอียง 0 องศาจะมีผลกระทบมากที่สุด และที่มุมเอียง -45 นั้นก็จะมีผลกระทบพอสมควร ในขณะที่ที่มุมเอียง 45 องศาผลกระทบจะมีค่าค่อนข้างน้อย ในขณะที่ที่ระยะติดตั้งมากกว่า 20 มม. การติดตั้งมู่ลี่แทบจะไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเลย อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ยังไม่ได้รวมถึงผลของพลังงานที่ถูกดูดกลืนไว้ในมู่ลี่ที่อาจจะส่งผลกระทบต่อการพาความร้อนในส่วนนี้ได้

ในปี พ.ศ. 2543 Fang [18] ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกที่มีการติดมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน โดยได้พิจารณาในกรณีของกระจก 1 ชั้น และ 2 ชั้น ที่ติดมู่ลี่ที่มีค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวสูง (high reflectivity venetian blind) โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือวัดชนิด Hot box เพื่อศึกษาถึงตัวแปรต่าง ๆ ที่น่าจะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนี้ และพบว่าค่าคุณสมบัตินี้จะแปรหลักรวม ๆ ตามมุมเอียงของมู่ลี่ และผลต่างของอุณหภูมิภายใน และภายนอก จากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการแปรค่าตัวแปร 2 ตัวนี้ และทดลองที่สภาวะต่าง ๆ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยกับข้อมูลที่ได้ โดยสมการที่ได้นั้น จะมีความผิดพลาดเมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 6.8 % และ 4.4 % สำหรับกระจก 1 ชั้น และ 2 ชั้นที่ติดมู่ลี่ ตามลำดับ

ในปี พ.ศ. 2544 Phillips และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกชั้นใน และใบมู่ลี่ โดยใช้วิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยในแบบจำลองนั้น จะคิดผลกระทบของการแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อนรวมเข้าไปด้วย โดยใบมู่ลี่เป็นแผ่นอลูมิเนียมแบบใบตรง และไม่คิดผลของความหนาใบมู่ลี่ ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Machin และคณะ [30] จากการศึกษาพบว่าใบมู่ลี่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนน้อยมาก ยกเว้นเมื่อใบมู่ลี่อยู่ใกล้กับผิวของกระจกมากๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Machin และคณะ[30] นอกจากนั้นยังพบว่าใบมู่ลี่ยังช่วยลดการแผ่รังสีความร้อนจากผิวกระจกไปสู่ภายในห้องเป็นอย่างมาก(สูงสุดประมาณ 33%) ถึงแม้มุมของใบมู่ลี่จะอยู่ในตำแหน่งเปิดสุด (0 องศา) แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการคำนวณ จึงทำให้ไม่สามารถทำการศึกษา การติดมู่ลี่เต็มแผ่นกระจกได้ ซึ่งศึกษาได้เพียง 10 ใบมู่ลี่เท่านั้น

ในปี พ.ศ. 2544 Duarte N. และคณะ [16] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการติดตั้งมู่ลี่ที่มีผลต่อการพาความร้อนจากกระจก โดยได้เพิ่มเติมส่วนของการดูดกลืนของรังสีที่มู่ลี่ที่อาจจะมีผลต่อค่าการพาความร้อนจากผิวกระจกชั้นใน โดยใช้เครื่องมือวัดชนิด Mach-Zehnder interferometer และจากการศึกษาพบว่าปริมาณการดูดกลืนของรังสีนั้นมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนมากขึ้นนั้นจะส่งผลให้การพาความร้อนออกจากกระจกนั้นมีค่าที่ลดลง และปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนนั้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากกระจกนั้นมีค่าที่ขึ้นกับมุมเอียง และระยะการติดตั้งของมู่ลี่มากขึ้น

ในปี พ.ศ. 2545 Collin และคณะ [13,14] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขและการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ผลของมู่ลี่ที่ถูกทำให้ร้อนโดยแสงอาทิตย์ต่อการถ่ายเทความร้อนในรูปของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ และการแผ่รังสีจากผิวด้านในของกระจก โดยใช้แบบจำลอง Finite

element 2 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัว โดยจากผลการทดลองคณะผู้วิจัยพบว่าเมื่อมีการติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติม มู่ลี่จะส่งผลต่อการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนจากกระจกในลักษณะเป็นคาบ (periodic) โดยค่าการพาความร้อน และการแผ่รังสีจะมีค่าน้อยในช่วงที่มีใบมู่ลี่อยู่ และมีค่ามากที่ช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับการทดลอง โดยทำการตรวจสอบในสองส่วนคือส่วนของการพาความร้อน โดยธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรมกับการพาความร้อนที่วัดได้จากเครื่องมือวัด และในส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาวนั้น ตรวจสอบโดยใช้แบบจำลองทำนายค่าอุณหภูมิของมู่ลี่ กับค่าที่ได้จากการวัดโดยตรง จากการตรวจสอบพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขนั้นสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองเป็นอย่างดี

ในปี พ.ศ. 2545 Collins และ Harrison [14] ได้พัฒนาต่อยอดจากงานเก่า[13] โดยที่ถึงแม้ว่าแบบจำลองเชิงเลขนั้นจะสามารถใช้ในการทำนายค่าการพาความร้อนจากผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ได้เป็นอย่างดี แต่การประยุกต์ใช้งานนั้นยังกระทำได้ค่อนข้างยาก อันเนื่องจากพฤติกรรมของระบบมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมาก และในการทำนายเชิงตัวเลขนั้น เมื่อตัวแปรบางตัวมีค่าที่เปลี่ยนไป เช่น มุมเอียงของมู่ลี่เปลี่ยนไป เป็นต้น จะทำให้ลักษณะเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาเปลี่ยนไป ดังนั้นในการวิเคราะห์หาผลเฉลยจะต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใหม่ และทำการวิเคราะห์ใหม่ในทุก ๆ ครั้งที่มีการเปลี่ยนค่าตัวแปร นอกจากนั้นจำนวนจุดต่อของการคำนวณที่ใช้ นั้นก็ต้องละเอียดในระดับหนึ่งเพื่อที่จะสามารถทำนายได้ถูกต้องซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณนั่นเอง ดังนั้นจึงได้ทำการกำหนดสภาวะที่อาจจะเกิดขึ้น และวิเคราะห์ในแต่ละกรณีไว้ จากนั้นจึงใช้การวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายเทความร้อนทั้งในส่วนของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ และการแผ่รังสีจากผิวกระจกด้านใน ที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรพื้นฐานต่าง ๆ เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ที่สามารถประยุกต์ใช้ได้ง่ายขึ้น

ในปี พ.ศ. 2548 Shahid และ Naylor [37] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของกระจกใส 1 และ 2 ชั้นที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน โดยใช้แบบจำลอง finite volume 2 มิติ และได้พบว่าในกรณีที่ไม่มีรังสีแสงอาทิตย์การติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติมกับระบบกระจกนั้นสามารถที่จะช่วยลดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม (U-value) ได้ จากนั้นจึงได้ศึกษาถึงตัวแปรอื่น ๆ ที่อาจมีผลต่อค่า ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนี้ เช่น มุมเอียงของมู่ลี่ ระยะเวลาติดตั้ง และค่าการเปล่งรังสีของมู่ลี่

ในปี พ.ศ. 2552 Laouadi [28] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ โดยการปรับปรุงแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อยู่ โดยได้เพิ่มการวิเคราะห์ผลของการแผ่รังสี และการถ่ายเทมวลลงใน สมการอนุรักษ์พลังงาน และพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนเทียบเท่า (effective thermal properties) ของมู่ลี่และช่องว่างอากาศระหว่างใบมู่ลี่ ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่า การนำความร้อน พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ผ่านช่องว่างของมู่ลี่ และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการ ตรวจวัดของการวิจัยที่ผ่านมา โดยเปรียบเทียบผลจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U) โดยพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยมีค่าความความ ผิดพลาดสูงสุดไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 3

ทฤษฎี และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี สมการ และการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าสมรรถนะทางความร้อน และสมรรถนะความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะเกี่ยวข้องกับหลักการพื้นฐานทางด้านการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกตัวเปล่า มู่ลี่ตัวเปล่า และคุณสมบัติเชิง optic รวมทั้งคุณสมบัติเชิง optic รวมของระบบหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ หลักการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่โดยอาศัยหลักการสมดุลความร้อนระหว่างชั้นของกระจกและมู่ลี่ และหลักการทางด้านการคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน โดยหลักการทั้งหมดนี้จะถูกนำมาพัฒนาให้มีความสัมพันธ์เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะของหน้าต่างกระจก ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน ที่พิจารณาถึงความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยภายใน เนื่องจากความรู้พื้นฐานต่างๆ ที่ใช้เป็นแนวทางในการศึกษามีค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงได้แบ่งความรู้ทั้งหมดออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาดังนี้ คือ

วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจก

วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

การพัฒนาแบบจำลองวิธีการคำนวณค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน ของคนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

3.1 วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก และหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณค่าความร้อนที่ส่งผ่านระบบกระจกที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ และที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์การส่งความร้อนผ่านระบบกระจกที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่นั้นจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าการวิเคราะห์การส่งความร้อนผ่านระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ค่อนข้างมาก โดยพื้นฐานแล้วจะเห็นได้ว่ามู่ลี่เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเชิง optic เป็นแบบ non specular และไม่ทึบรังสีในช่วงความยาวคลื่นยาว การถ่ายเทความร้อนผ่านระบบมักจะถูกบรรยายด้วยส่วนของการนำความร้อน และส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์จะนิยมเขียนอยู่ในรูปของ solar heat gain coefficient (SHGC)

ความร้อนที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจก และหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ เข้ามายังภายในอาคาร สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ซึ่งการถ่ายเทความร้อน 3 ลักษณะดังกล่าวนี้จะแบ่งเป็น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยในสองลักษณะแรกจะสามารถคิดรวมกันให้เป็นผลที่เกิดเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศภายใน ส่วนลักษณะที่สาม จะเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวของหน้าต่างกระจกและสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ และเกิดจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับหน้าต่างกระจกโดยตรง รวมทั้งเกิดจากการสะท้อนรังสีจากพื้นดินและสิ่งก่อสร้างหรืออาคารที่อยู่ใกล้เคียง สำหรับสมการการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก และหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

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

เมื่อ	q	คือ ค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านระบบกระจก, W/m^2
	U	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
	T_{out}	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก, $^\circ C$
	T_{in}	คือ ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน, $^\circ C$
	$SHGC$	คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient
	I_{total}	คือ ค่า total irradiation ที่ตกกระทบระบบกระจก, W/m^2

โดยในการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์มายังผิวโลกนั้น รังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนหนึ่งจะเกิดการชนกับอนุภาค และฝุ่นผงต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ และทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีส่วนนี้ในทุก ๆ ทิศทาง และจากนั้นจึงส่งผ่านมาสู่พื้นผิวของโลกในรูปของรังสีกระจาย ดังนั้นปริมาณรังสีทั้งหมดที่ผิวโลกนั้นจะประกอบไปรังสีสองส่วนนั้นคือ รังสีแสงอาทิตย์แบบตรง (direct radiation) และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse radiation) ดังสมการที่ 3.2

$$I_{total} = I_{dir} + I_{diff} \quad (3.2)$$

เมื่อ	I_{dir}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบ, W/m^2
	I_{diff}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบ, W/m^2

ดังนั้นสมการที่ 3.1 สามารถเขียนแยกการคำนวณเป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายได้เป็นตามสมการที่ 3.3

$$q = U \cdot (t_{out} - t_{in}) + (SHGC_d) \cdot I_{dir} + (SHGC_D) \cdot I_{diff} \quad (3.3)$$

เมื่อ $SHGC_d$ คือ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง
 $SHGC_D$ คือ ค่า SHGC ในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย

จากสมการที่ 3.3 จะพบว่าเทอมแรกที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการเป็นความร้อนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคาร และสองเทอมสุดท้ายเป็นความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ ในหัวข้อย่อยถัดไปจะกล่าวถึงการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.3

3.1.1 การคำนวณค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ของกระจก

เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ได้ตกกระทบกับหน้าต่างกระจก จะมีรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนที่ตกกระทบและส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาโดยตรง และจะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจก และพลังงานความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้นี้เองจะทำให้ตัวกระจกนั้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยเมื่อตัวกระจกและมู่ลี่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของอากาศในห้องและอุณหภูมิของอากาศภายนอก ก็จะทำให้เกิดถ่ายเทความร้อนออกมาโดยการนำความร้อน พาคความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว เข้ามาทั้งในอาคาร และออกจากอาคาร โดยสัดส่วนของปริมาณความร้อนดังกล่าวจะถูกเรียกว่า inward-flowing fraction, N_i และ outward-flowing fraction, N_o ตามลำดับ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสถานะของอากาศที่อยู่ล้อมรอบระหว่างด้านทั้งสองของหน้าต่างกระจก ดังนั้นค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ก็คือสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงส่วนของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกแล้วผ่านเข้ามาเข้ามาภายในห้องกลายเป็นความร้อนที่ได้รับ โดยเป็นส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาโดยตรง และส่วนที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจกแล้วถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลัง ดังนั้นค่า SHGC จึงเป็นคุณสมบัติใช้บอกลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแต่ละชนิด

ค่า SHGC ยังสามารถแบ่งออกเป็นค่า SHGC ในส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ โดยเขียนเป็น $SHGC_d(\theta)$ และค่า SHGC สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย โดยเขียนเป็น $SHGC_D$ สำหรับค่า $SHGC_d(\theta)$ ในสมการที่ 3.2 เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบ ซึ่งจะขึ้นกับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์นั้น ค่า $SHGC_d(\theta)$ จะสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.4

$$SHGC_d(\theta) = T_{1,M}(\theta) + \sum_{i=1}^M N_i A_i(\theta) \quad (3.4)$$

เมื่อ $SHGC_d$ คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกในส่วนของค่ารังสีแสงอาทิตย์

แบบตรง

$T_{1,M}(\theta)$ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกจากชั้นที่ 1 ถึง M

$A_i(\theta)$ คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i

N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น

θ คือ มุมตกกระทบของรังสี

ϕ คือ มุม azimuth

M คือ จำนวนของชั้นของกระจก

สำหรับค่า $SHGC_D$ เป็นค่า SHGC ที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.5

$$SHGC_D = \int_0^{\pi/2} SHGC_d(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่ต้องใช้ในการคำนวณค่า SHGC นั้นจะประกอบไปด้วยตัวแปร 2 ชนิด คือ

1. ตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติเชิง optic

ซึ่งได้แก่ค่า $T(\theta)$ และ $A_i(\theta)$ โดยที่ค่าคุณสมบัติเชิง optic นี้จะแปรตามค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ และจะมีค่าคงที่ไม่แปรตามตัวแปรทางความร้อน เช่น อุณหภูมิของกระจก

2. ตัวแปรทางความร้อน

ซึ่งได้แก่ค่า N_i ของกระจกแต่ละชั้น ค่าตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับการพาความร้อน (อุณหภูมิอากาศ และความเร็วลม) และการแผ่รังสีคลื่นยาว (อุณหภูมิของชั้นกระจก)

3.1.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกระจก, U

สำหรับการคำนวณค่า U ของกลางกระจก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6

$$U = \frac{1}{1/h_o + \sum_{i=1}^{M-1} (1/h_{c, gap})_i + \sum_{i=1}^{M-1} (d_i/k_i) + 1/h_i} \quad (3.6)$$

เมื่อ	h_o, h_i	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอกและผิวภายใน, W/m^2K
	$h_{c,gap}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของก๊าซที่อยู่ระหว่างชั้นของกระจก, W/m^2K
	d_i	=	ความหนาของกระจกชั้นที่ i , m
	k	=	ค่า Thermal Conductivity, $W/(m-K)$

3.1.1.2 การหาค่า inward-flowing Fraction (N_i) ของกระจก

สำหรับส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจก ซึ่งประกอบด้วย รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีที่มองเห็นได้ และรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะมีผลทำให้กระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดความร้อนสะสมไว้ในตัวกระจกนั้น บางส่วนจะถูกกระจายออกไปข้างนอกอาคารโดยกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านเข้ามายังภายในอาคารและกลายเป็นความร้อน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามานั้นเรียกว่า ค่า Inward flowing fraction, N_i ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของอากาศที่ผิวทั้งสองด้านของกระจก รวมทั้งก๊าซที่บรรจุอยู่ระหว่างชั้นของกระจกในกรณีของหน้าต่างกระจกหลายชั้น สำหรับสมการที่ใช้หาค่าของ inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจกนั้นสามารถที่จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$N_i = \frac{\sum_{k=1}^i R_k}{R_{tot}} \quad (3.7)$$

เมื่อ	R_k	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวมที่แต่ละผิวกระจก, m^2/W
	R_{tot}	คือ	ค่าความต้านทานความร้อนรวมทั้งหมดของระบบกระจก, m^2/W

สำหรับกระจก 1 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_i}} \quad (3.8)$$

สำหรับกระจก 2 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_{c,gap}} + \left(\frac{d_2}{k_2}\right) + \frac{1}{h_i}} \quad (3.9)$$

$$N_2 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_{c,gap}} + \left(\frac{d_2/2}{k_2}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_{c,gap}} + \left(\frac{d_2}{k_2}\right) + \frac{1}{h_i}} \quad (3.10)$$

โดยที่

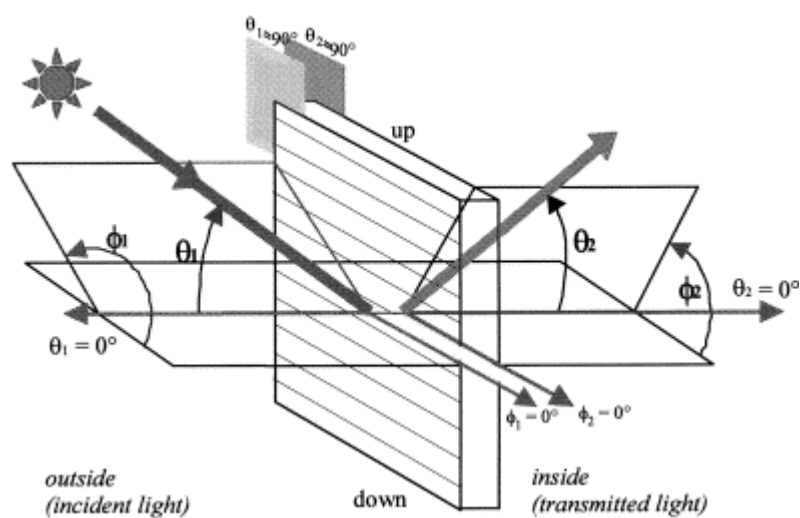
- N_i = ค่า inward-flowing fraction ของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$
- k_i = ค่า Thermal conductivity ($W/m \cdot K$) ของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$
- d_i = ความหนาของกระจกชั้นที่ i , $i = 1, 2, \dots, n$, (m)
- h_i = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของอากาศภายใน, W/m^2K
- h_o = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของอากาศภายนอก, W/m^2K
- $h_{c,gap}$ = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของก๊าซระหว่างชั้นของกระจก, W/m^2K

3.1.2 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงของกระจกติดมู่ลี่

ในขณะที่มีมู่ลี่มีคุณสมบัติเชิง optic เป็นแบบ non specular และไม่ที่บรังสีในช่วงความยาวคลื่นยาว เมื่อพิจารณาตัวมู่ลี่เป็นชั้นเสมือน (effective layer) เหมือนชั้นของกระจกชนิดพิเศษอยู่หลังระบบกระจกปกติ การคำนวณค่า solar heat gain coefficient (SHGC) ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ก็จะสามารถทำได้โดยเลียนแบบการคำนวณค่า solar heat gain coefficient (SHGC) ของระบบกระจกปกติ แต่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแปรตามทั้งค่ามุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ θ และมุม azimuth ตามนิยามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 ดังนั้นค่า solar heat gain coefficient (SHGC) ของระบบกระจกที่มีมู่ลี่ติดตั้งเข้าไปด้วยจะสามารถเขียนได้เป็น

$$SHGC_d(\theta, \phi) = T^{JH}(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_i^f(\theta, \phi) \quad (3.11)$$

- เมื่อ $SHGC_d$ คือ ค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกติดมู่ลี่
- T^{FH} คือ directional-hemispherical transmittance
- A_i^f คือ directional front absorptance ของ layer i
- N_i คือ ค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น
- θ คือ มุมตกกระทบของรังสี
- ϕ คือ มุม azimuth
- M คือ จำนวนของชั้นของระบบกระจก



รูปที่ 3.1 นิยามของมุมตกกระทบ และมุม azimuth

ตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่เข้าไปด้วยนั้นจะประกอบด้วยตัวแปร 2 ชนิดคล้ายคลึงของระบบกระจกปกติ คือ

1. ตัวแปรที่เป็นคุณสมบัติเชิง optic

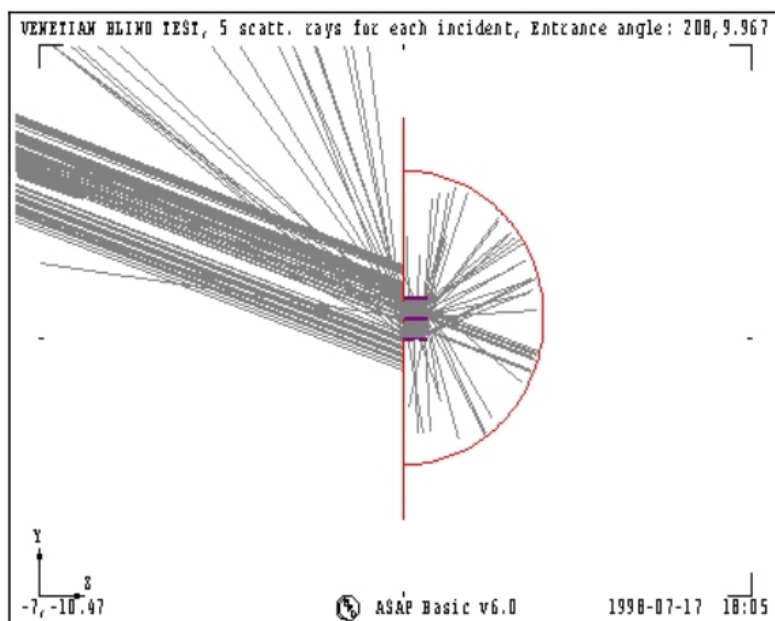
ซึ่งได้แก่ค่า T^{FH} และ A_i^f และสามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix Layer Calculation ที่เสนอโดย Klems [10-13] โดยที่ค่าคุณสมบัติเชิง optic นี้จะมีค่าคงที่ไม่แปรตามตัวแปรทางความร้อน เช่น อุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

2. ตัวแปรทางความร้อน

ซึ่งได้แก่ค่า N_i ของกระจกแต่ละชั้น และมู่ลี่ต่าง ๆ นั้นเอง ค่าตัวแปรเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับ การพาความร้อน (อุณหภูมิอากาศ และความเร็วลม) และการแผ่รังสีคลื่นยาว (อุณหภูมิของชั้นกระจก และมู่ลี่)

3.1.2.1 การหาค่าคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกติดมู่ลี่

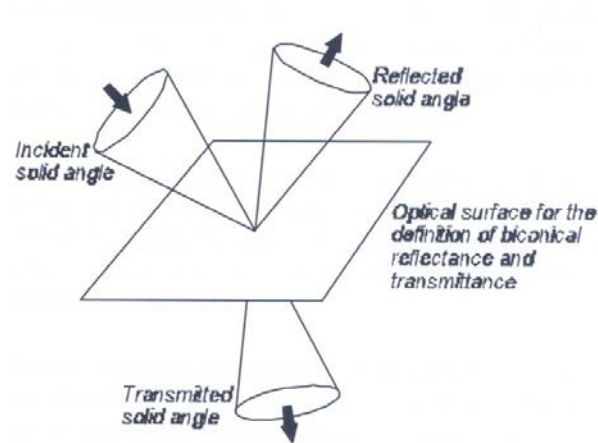
ในกรณีที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบระบบกระจกติดมู่ลี่ที่มุมตกกระทบอันหนึ่ง นั้น รังสีแสงอาทิตย์ที่เข้ามาในอาคารนั้นจะเข้ามาในทิศทางที่หลากหลาย อันเป็นผลมาจากการ ลักษณะของมู่ลี่เองที่มีลักษณะเป็นใบซ้อน ๆ กัน และการสะท้อนระหว่างใบมู่ลี่ก็ยังเป็นผลให้ ทิศทางของรังสีที่ออกนั้นมีค่าที่เปลี่ยนไปอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.2



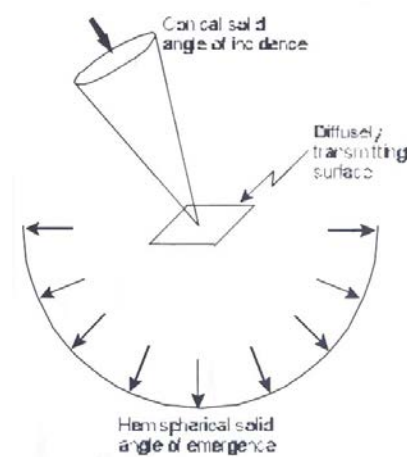
รูปที่ 3.2 ทิศทางของรังสีที่ส่งผ่านมู่ลี่ [31]

ซึ่งจากรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าการอธิบายค่าคุณสมบัติทาง optic ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ อย่างละเอียดนั้น จำเป็นที่จะต้องอธิบายด้วยการระบุทิศทางเข้า และทิศทางออกของรังสีทั้งหมด และค่าคุณสมบัติที่ใช้ในการอธิบายนี้จะถูกเรียกว่าเป็นฟังก์ชันการกระจายตัวแบบสองทิศทาง (Bidirectional distribution function)

แต่อย่างไรก็ตามในการประเมินค่าความร้อนที่เข้าสู่อาคารนั้นอาจจะไม่จำเป็นที่จะต้อง บอกลงไปในรายละเอียดว่ามีรังสีเข้ามาในอาคารที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นปริมาณเท่าใดบ้าง แต่อาจจะ บอกเป็นค่าโดยรวมโดยเฉลี่ยก็เพียงพอ ดังนั้นจึงได้มีการนิยามค่าคุณสมบัติขึ้นมาอีกหนึ่งที่เรียกว่า directional-hemispherical properties ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติที่กำหนดด้วยทิศทางของรังสีขาเข้าค่า หนึ่ง และค่าที่ออกจากรังสีขาออกทั้งหมดเข้าด้วยกันในลักษณะครึ่งวงกลม ดังนั้น การระบุทิศทางของคุณสมบัติดังกล่าวนั้นก็จะเป็นการระบุที่ทิศทางขาเข้าเท่านั้น รูปที่ 3.3 และ 3.4 แสดงนิยามของคุณสมบัติทั้งสองชนิด



รูปที่ 3.3 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ bi-directional properties [31]



รูปที่ 3.4 นิยามของค่าคุณสมบัติแบบ directional-hemispherical properties [31]

ในสมการที่ 3.11 นั้นค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่ใช้ในการคำนวณค่า SHGC นั้นเป็นค่าคุณสมบัติชนิด directional-hemispherical properties ที่ได้จากการหาปริพันธ์ของรังสีที่เข้ามาในอาคารเรียบร้อยแล้ว และจะมีค่าที่แปรตามทิศทางตกกระทบของรังสีเท่านั้น และค่าคุณสมบัติ directional-hemispherical properties เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติแบบสองทิศทาง (bi-directional properties) ดังแสดงในสมการที่ 3.12 และ 3.13

$$T^{FH} = u^T \cdot \Lambda \cdot T_{M,\{1,M\}}^f \quad (3.12)$$

$$R^{FH} = u^T \cdot \Lambda \cdot R_{M,\{1,M\}}^f \quad (3.13)$$

โดยที่

$$u^T = \{1 \quad 1 \quad \dots \quad 1\} \quad (3.14)$$

และ

$$\Lambda_i = \begin{Bmatrix} \Delta\Omega_i^1 \cos(\theta_i^1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Delta\Omega_i^2 \cos(\theta_i^2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Delta\Omega_i^N \cos(\theta_i^N) \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

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

Λ คือ propagation matrix

$\Delta\Omega$ คือ มุม solid angle

โดยที่ค่า $T_{M,\{1,M\}}^f$ ซึ่งเป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของระบบจะสามารถหาค่าได้จากวิธี Matrix layer Calculation ที่เสนอโดย Klems [22-23] ดังสมการที่ 3.16 ถึง 3.19

$$T_{M,\{1,M\}}^f = T_M^f \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f\right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{1,M-1\}}^f \quad (3.16)$$

$$R_{M,\{1,M\}}^f = R_{M-1,\{1,M-1\}}^f + \left[\begin{array}{c} T_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b\right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot T_{M-1,\{1,M-1\}}^f \end{array} \right] \quad (3.17)$$

$$T_{M,\{1,M\}}^b = T_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_M^f \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b\right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_M^b \quad (3.18)$$

$$R_{M,\{1,M\}}^b = R_M^b + \left[\begin{array}{c} T_M^f \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_M^f\right)^{-1} \\ \cdot \Lambda \cdot R_{M-1,\{1,M-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_M^b \end{array} \right] \quad (3.19)$$

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

$$A_{i;M}^f = \left[A_i^f \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{1,M\}}^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{i-1,\{1,i-1\}}^f \right] + \left[A_i^b \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{1,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i+1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot T_{i,\{1,i\}}^f \right] \quad (3.20)$$

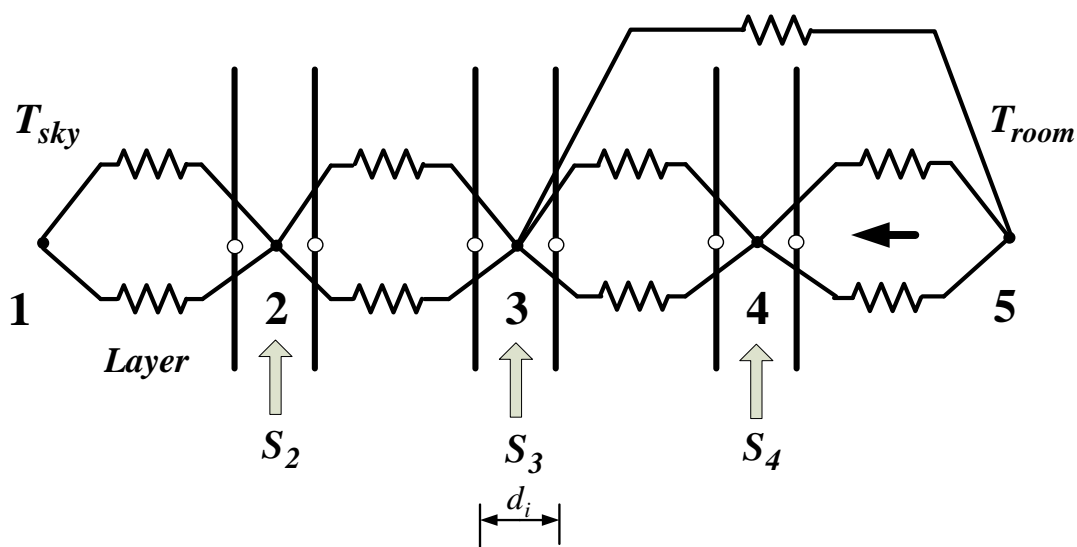
$$A_{i;M}^b = \left[A_i^b \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{(M-i),\{i-1,M\}}^f \cdot \Lambda \cdot R_{i,\{1,i\}}^b \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot T_{M-i,\{i+1,M\}}^b \right] + \left[A_i^f \cdot \left(1 - \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot R_{(M-i+1),\{i,M\}}^f \right)^{-1} \cdot \Lambda \cdot R_{i-1,\{1,i-1\}}^b \cdot \Lambda \cdot T_{M-i+1,\{i,M\}}^b \right] \quad (3.21)$$

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

3.1.2.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, U และค่า inward-flowing fraction, N ของระบบกระจกติดมู่ลี่

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม สามารถหาได้โดยใช้สมการ 3.6 เหมือนกับกรณีของกระจกที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ แต่ในกรณีของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่จะเกิดการแผ่รังสีข้ามชั้นของมู่ลี่ได้ซึ่งไม่เหมือนกับกรณีของกระจกที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเขียนขยายเทอมของค่าผลรวมความต้านทานในแต่ละชั้นของกระจก และมู่ลี่ในสมการที่ 3.6 เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้น สำหรับการหาค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่นั้น ถ้าพิจารณาให้มู่ลี่นั้นเป็นเสมือน effective layer อันหนึ่งที่มาประกอบเข้ากับระบบกระจก และพิจารณาลักษณะการพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวที่เหมาะสมจะทำให้ในการหาค่า inward-flowing fraction ของกระจกติดมู่ลี่นั้นสามารถที่จะหาได้จากความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกันกับการหาในกรณีที่เป็นระบบกระจกล้วน ๆ ได้ แต่เนื่องจากมู่ลี่มีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากกระจกตรงที่ว่ามู่ลี่นั้นมีคุณสมบัติเป็นการทึบรังสี (opaque) ในช่วงความยาวคลื่นยาว ทำให้การหาค่า

inward-flowing fraction ของระบบกระจกที่มีมู่ลี่ติดตั้งนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากจะมีการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวจากกระจกผ่านมู่ลี่ไปสู่ด้านในได้ ในกรณีที่อุณหภูมิผิวของกระจกด้านที่ติดอยู่กับมู่ลี่และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่มีค่าเท่ากัน แต่อุณหภูมิของผิวกระจกด้านที่ติดอยู่กับมู่ลี่อาจมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิด้านในที่อยู่หลังมู่ลี่ และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ซึ่งสามารถแสดงได้จากกรณีตัวอย่างของกระจก 2 ชั้น ติดตั้งมู่ลี่ไว้ด้านหลังกระจก รูปที่ 3.5 แสดงถึงการจำลองการถ่ายเทความร้อนในส่วนที่ไม่เกี่ยวกับการส่งผ่านรังสีในช่วงความยาวคลื่นสั้นด้วยค่าความต้านทานที่เป็นโครงข่ายลักษณะคล้ายคลึงกับงานของ Collins and Wright[16]



รูปที่ 3.5 โครงข่ายความต้านทานทางความร้อนของชุดกระจกและมู่ลี่

ค่าความร้อนที่ถูกส่งออกมาจากตำแหน่งกึ่งกลางชั้นของกระจกและมู่ลี่ สามารถเขียนอยู่ในรูปที่สัมพันธ์กับค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนได้เป็น

$$q_{1-2} = \frac{T_1 - T_2}{R_{1-2}} \quad q_{2-3} = \frac{T_2 - T_3}{R_{2-3}} \quad q_{3-4} = \frac{T_3 - T_4}{R_{3-4}} \quad q_{4-5} = \frac{T_4 - T_5}{R_{4-5}} \quad (3.22)$$

ในขณะที่ความร้อนส่วนหนึ่งจะสามารถส่งผ่านมู่ลี่จากกระจกแผ่นใน (ที่อยู่ชิดกับมู่ลี่) ข้ามมู่ลี่เข้าสู่ห้อง ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$q_{3-5} = \frac{T_3 - T_5}{R_{3-5}}$$

เมื่อ q_{i-j} เป็นค่าความร้อนที่ไม่นับส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงความยาวคลื่นสั้นจากจุด i สู่อุณหภูมิ j

T_i เป็นค่าอุณหภูมิของจุด i ของชั้นที่พิจารณา

R_{i-j} เป็นค่าความต้านทานของการส่งผ่านความร้อนในรูปการนำ การพา และการแผ่รังสี จากจุด i สู่อุณหภูมิ j

และค่าสมมูลของพลังงานในแต่ละชั้นของกระจกหรือมู่ลี่ที่พิจารณาจะเขียนได้เป็น

$$q_{1-2} + S_2 = q_{2-1} \quad q_{2-3} + S_3 = q_{3-4} + q_{3-5} \quad q_{3-4} + S_4 = q_{4-5} \quad (3.23)$$

เมื่อ S_i เป็นค่าความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ในชั้น i

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.18 และ 3.19 จัดรูปใหม่จะได้

$$q_{1-2}R_{1-2} + q_{2-3}R_{2-3} + q_{3-4}R_{3-4} + q_{4-5}R_{4-5} = T_1 - T_5 \quad (3.24)$$

$$q_{3-5}R_{3-5} = T_3 - T_5 \quad (3.25)$$

$$q_{3-4}R_{3-4} + q_{4-5}R_{4-5} = T_3 - T_5 \quad (3.26)$$

และจากการที่นำความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.23 มาแทนค่าในสมการที่ 3.24 3.25 และ 3.26 และจัดรูปใหม่จะได้ความสัมพันธ์ของความร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้าสู่ภายในห้องโดยหักส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงความยาวคลื่นสั้นออกเป็น

$$q_{3-5} + q_{4-5} = U_{total}(T_1 - T_5) + N_2S_2 + N_3S_3 + N_4S_4 \quad (3.27)$$

โดยที่ U_{total} เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

N_i เป็นค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้น i

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$U_{total} = \frac{(R_{3-4} + R_{4-5} + R_{3-5})}{[R_{3-5}(R_{1-2} + R_{2-3} + R_{3-4} + R_{4-5}) + (R_{1-2} + R_{2-3})(R_{3-4} + R_{4-5})]} \quad (3.28)$$

และค่า inward-inflowing fraction ของแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$N_2 = U_{total}R_{1-2} \quad (3.29)$$

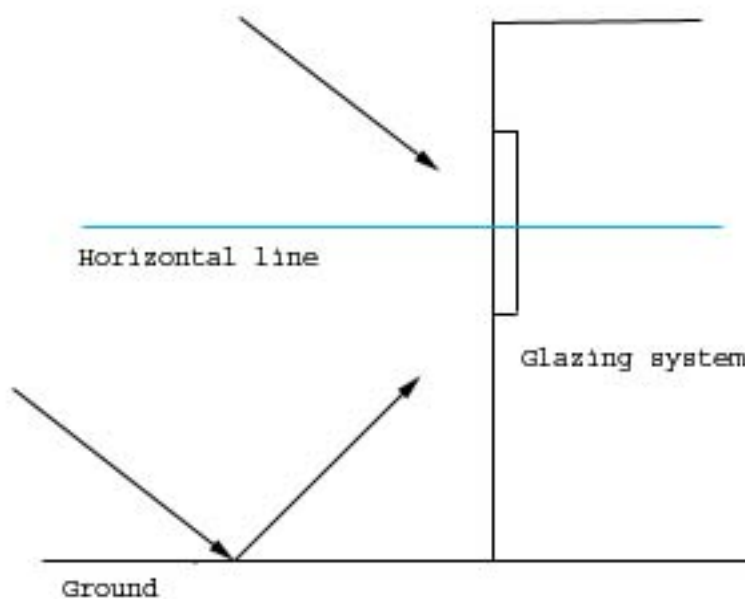
$$N_3 = U_{total} (R_{1-2} + R_{2-3}) \quad (3.30)$$

$$N_4 = U_{total} \left[(R_{1-2} + R_{2-3} + R_{3-4}) + \frac{R_{3-4}(R_{1-2} + R_{2-3})}{R_{3-5}} \right] - \frac{R_{3-4}}{R_{3-5}} \quad (3.31)$$

สำหรับชุดกระจกติดมู่ลี่ที่มีกระจกเพียง 1 ชั้น หรือมากกว่า 2 ชั้น ก็จะสามารถทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและค่า inward flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจกและมู่ลี่ได้ในทำนองเดียวกัน

3.1.3 การคำนวณหาค่า SHGC ของรังสีกระจายแสงอาทิตย์ของกระจกติดมู่ลี่

เนื่องจากระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่นั้นมีลักษณะการส่งผ่านรังสีที่ไม่สมมาตรในช่วงมุม ตกกระทบเหนือแนวระดับ และในช่วงมุมตกกระทบต่ำกว่าแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 รังสีที่ตกกระทบในแต่ละมุมตกกระทบ

ดังนั้นในการหาค่า SHGC ของรังสีกระจายจึงจะต้องแบ่งการหาค่า diffuse SHGC ออกเป็น 2 ส่วน นั่นคือ ส่วนบนที่เป็นการกระเจิงของรังสีจากท้องฟ้า (หรือส่วนครึ่งบน, upper) และส่วนล่างที่เป็นการสะท้อนของรังสีจากพื้นดิน (หรือส่วนครึ่งล่าง, lower) จากนั้นจึงค่อยรวมทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน โดยการรวมค่า diffuse SHGC สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$SHGC_D = \frac{SHGC_{DS} + \xi \cdot SHGC_{DG}}{1 + \xi} \quad (3.32)$$

โดยที่

$$\xi = \frac{2 \cdot \rho \cdot I_{total}}{I_{diff}} \quad (3.33)$$

เมื่อ $SHGC_D$ คือ diffuse SHGC

$SHGC_{DS}$ คือ sky-diffuse SHGC

$SHGC_{DG}$ คือ ground-diffuse SHGC

ξ คือ พารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับสถานะของท้องฟ้า และพื้นดิน

ρ คือ effective ground reflectance

I_{total} คือ total global solar intensity, W/m^2

I_{diff} คือ diffuse solar radiation, W/m^2

โดยที่ค่า $SHGC_{DS}$ และ $SHGC_{DG}$ นั้นสามารถหาค่าได้จากการอินทิเกรตค่า SHGC ที่ได้จากวิธี matrix layer calculation ในช่วง $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $0^\circ < \phi < 180^\circ$ และในช่วง $0^\circ < \theta < 90^\circ$, $180^\circ < \phi < 360^\circ$ ตามลำดับ โดยการอินทิเกรตทำได้โดยใช้ค่า weighting function ดังสมการที่ 3.34 และ 3.35

$$SHGC_{DS} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 0^\circ < \phi < 180^\circ \quad (3.34)$$

$$SHGC_{DG} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w(\theta_i, \phi_j) \cdot SHGC(\theta_i, \phi_j) \quad \text{เมื่อ } 180^\circ < \phi < 360^\circ \quad (3.35)$$

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

n คือ จำนวนมุม azimuth ที่พิจารณา

โดยค่า weighting function มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.1

สำหรับค่าการสะท้อนแสงอาทิตย์ของพื้นแต่ละชนิดก็จะมีค่าที่แตกต่างกัน โดยสามารถหาค่าได้จาก ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่า angular weighting function

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

ตารางที่ 3.2 ค่า effective ground reflectance, ρ ของพื้นผิวชนิดต่าง ๆ [6]

พื้นผิว	มุมตกกระทบ					
	20	30	40	50	60	70
คอนกรีตใหม่	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
คอนกรีตเก่า	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23	0.25
หญ้า	0.21	0.22	0.23	0.25	0.28	0.31
หิน	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ทางลูกรัง	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
ยางมะตอย	0.09	0.09	0.10	0.10	0.11	0.12

3.2 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก

การคำนวณค่าความร้อนถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ ที่นำเสนอในหัวข้อ 3.1 จำเป็นต้องทราบเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจกของกระจกชนิดเคลือบ และชนิดไม่เคลือบ

3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)

สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบนั้น กระจกจะมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogenous) และจะมีค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกที่ผิวด้านหน้า และผิวด้านหลังที่เท่ากัน โดยในการหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะสามารถหาค่าได้จากขั้นตอนที่เสนอโดย Furler [20]

โดยทั่วไปทางผู้ผลิตมักจะให้ค่า transmittance และ ค่า reflectance ของกระจกที่มุมศูนย์ องศาที่ได้จากการทดลองของผู้ผลิต โดยจากค่า transmittance และ reflectance ที่มุมตกกระทบศูนย์ องศาเหล่านี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของกระจกเช่น ค่าการหักเหของแสง, refraction coefficient, extinction coefficient และค่า absorption coefficient เป็นต้น และสามารถนำไปใช้ในการหาค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่มุมตกกระทบอื่นได้

โดยที่ค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านี้จะขึ้นอยู่กับค่า reflectivity และค่า reflectivity ที่มุมตกกระทบศูนย์องศาจะมีความสัมพันธ์กับค่า transmittance และ reflectance ที่มุมศูนย์องศา ดังแสดงสมการที่ 3.36 และ 3.37 [21]

$$\rho_{\lambda}(0) = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_{\lambda}(0)) \cdot R_{\lambda}(0)}}{2(2 - R_{\lambda}(0))} \quad (3.36)$$

โดย

$$\beta = T_{\lambda}(0)^2 - R_{\lambda}(0)^2 + 2R_{\lambda}(0) + 1 \quad (3.37)$$

เมื่อ ρ_{λ} คือ ค่า reflectivity ที่ความยาวคลื่น λ

$T_{\lambda}(0)$ คือ ค่า transmittance ที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ

$R_{\lambda}(0)$ คือ ค่า reflectance ที่มุมตกกระทบศูนย์องศา และความยาวคลื่น λ

และจากค่า reflectivity ที่มุมตกกระทบศูนย์องศาจะทำให้สามารถหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ได้ ดังนี้

ค่า refractive index

$$n_{\lambda} = \frac{1 + \sqrt{\rho_{\lambda}(0)}}{1 - \sqrt{\rho_{\lambda}(0)}} \quad (3.38)$$

ค่า extinction coefficient

$$k_\lambda = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln \left(\frac{R_\lambda(0) - \rho_\lambda(0)}{\rho_\lambda(0) T_\lambda(0)} \right) \quad (3.39)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น, nm
 d คือ ความหนาของกระจก, mm

ค่า absorption coefficient

$$\alpha_\lambda = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} \quad (3.40)$$

ในการหาค่าคุณสมบัติที่มุมตกกระทบอื่นก็สามารถหาค่าได้จากค่าต่าง ๆ เหล่านี้ โดยในกรณีที่มุมตกกระทบอื่นที่ไม่ใช่ศูนย์องศาจะเกิดการหักเหของแสงตาม Snell's law

$$\zeta = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{n_\lambda} \right) \quad (3.41)$$

เมื่อ ζ คือ มุมหักเหของแสง, degree
 θ คือ มุมตกกระทบ, degree

และที่มุมตกกระทบนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนที่ผิว reflectivity ที่เปลี่ยนไปด้วย โดยสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$\rho_\lambda(\theta) = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{n_\lambda \cos \theta - \cos \zeta}{n_\lambda \cos \theta + \cos \zeta} \right)^2 + \left(\frac{n_\lambda \cos \zeta - \cos \theta}{n_\lambda \cos \zeta + \cos \theta} \right)^2 \right) \quad (3.42)$$

และจะสามารถหาค่า transmittivity ได้จาก

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (3.43)$$

จากนั้นจะทำให้สามารถหาค่าการส่งผ่าน (transmittance) และค่าการสะท้อน (reflectance) ที่มุมตกกระทบใด ๆ ที่รวมผลของการสะท้อนในเนื้อกระจกแล้วได้จากสมการที่ 3.44 และ 3.45

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 e^{(-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 e^{(-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta)}} \quad (3.44)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot (1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \zeta}) \quad (3.45)$$

เมื่อ	T_λ	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
	R_λ	คือ ค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่มุมตกกระทบ θ และความยาวคลื่น λ
	τ_λ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmissivity) มุมตกกระทบ θ
	ρ_λ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflectivity) มุมตกกระทบ θ

3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)

สำหรับกระจกชนิดเคลือบค่าคุณสมบัติเชิง optic เหล่านี้จะมีค่าที่ซับซ้อนมากขึ้นอันเป็นผลมาจากการสะท้อนที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบ และในปัจจุบันยังไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้จะพิจารณาตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ที่ได้เสนอโดย Finlayson และคณะ [19] โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ

1. กรณีที่ค่า transmittance มีค่ามากกว่า 0.645, $T(0) > 0.645$ จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{clr}(\theta) \quad (3.46)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{clr}(\theta)) + \bar{\rho}_{clr}(\theta) \quad (3.47)$$

2. กรณีที่ค่า transmittance มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645, $T(0) \leq 0.645$ จะสามารถหาค่าได้จาก

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{bnz}(\theta) \quad (3.48)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{bnz}(\theta)) + \bar{\rho}_{bnz}(\theta) \quad (3.49)$$

เมื่อ

$$\bar{\tau}_x(\theta) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cos(\theta) + \bar{\tau}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\tau}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\tau}_4 \cos^4(\theta) \quad (3.50)$$

$$\bar{\rho}_x(\theta) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cos(\theta) + \bar{\rho}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\rho}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\rho}_4 \cos^4(\theta) \quad (3.51)$$

และ x เป็นตัวห้อยที่เป็น clr หรือ bnz

โดยค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ นั้นจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาคุณสมบัติของกระจกชนิดเคลือบ [20]

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

3.3 วิธีการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่ ตามวิธีการของ Chaiyapinunt และ Worasinchai [10,11] คุณสมบัติเชิง optical ของมู่ลี่นั้นสามารถแบ่งเป็นคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นสั้น และคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาว

3.3.1 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic คลื่นสั้นของมู่ลี่

ในปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าคุณสมบัติในส่วนนี้ของมู่ลี่นั้นได้มีการนำเสนอในหลาย ๆ รูปแบบจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [33, 34] โดยแต่ละแบบจำลองนั้นก็มีการวิเคราะห์ที่คล้ายคลึงกันคือ พิจารณาจากลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่เทียบกับมุม solar profile เป็นหลัก และค่าคุณสมบัติที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่ (ความกว้างของใบ ระยะห่างระหว่างใบ) และค่าการสะท้อนรังสีที่ผิวมู่ลี่ และคุณสมบัติของใบมู่ลี่ ในช่วงความยาวคลื่นสั้น และในช่วงความยาวคลื่นยาว

ในการศึกษานี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพัฒนาโดย Chaiyapinunt และ Worasinchai[10] ที่ครอบคลุมถึงผลกระทบจากความโค้งและความหนาของใบมู่ลี่ ซึ่งจะแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาใบมู่ลี่เป็นแบบใบตรงและไม่มีความหนา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวจะมีข้อสมมติฐานเบื้องต้นดังนี้

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

3. ใบของมู่ลี่ที่พิจารณาจะมีความยาวมากกว่าความกว้างของใบมาก ทำให้ผลของขอบมู่ลี่มีไม่มากนักและสามารถพิจารณาเป็น 2 มิติได้
4. ในกรณีที่การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของมู่ลี่ซึ่งไม่คำนึงถึงตำแหน่งของรังสีที่ส่งผ่านเข้ามาว่าจะไปในทิศทางไหนบ้าง และสนใจเพียงแต่ปริมาณของรังสีที่ส่งผ่านเข้ามา จะเรียกแบบจำลองของมู่ลี่ที่ใช้สมมติฐานในลักษณะนี้ว่าแบบจำลองแบบ 1 มิติ (one-dimensional slat-type blind model)
5. ใบมู่ลี่จะถูกสมมติให้มีคุณสมบัติการสะท้อนรังสีแบบกระจายแบบสมบูรณ์(perfectly diffuse)

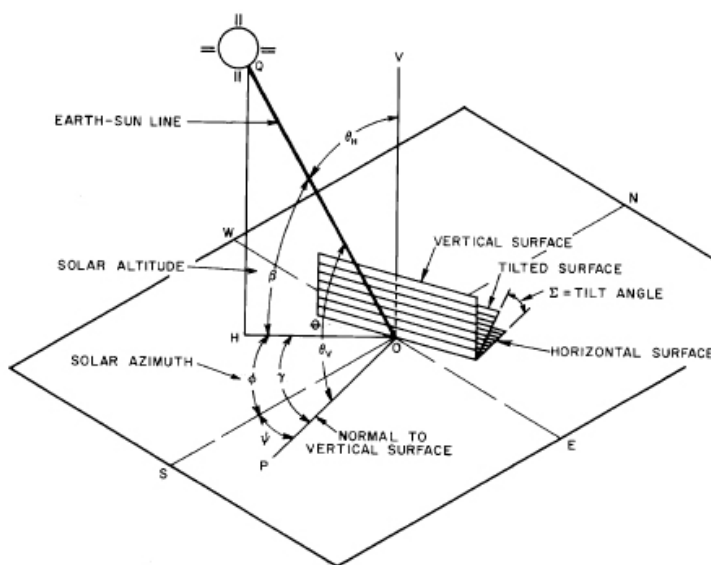
3.3.1.1 มุม solar altitude มุม solar- wall azimuth และ มุม solar profile

ในลักษณะการส่งรังสีผ่านระบบกระจกใด ๆ นั้นมักจะพิจารณามุมตกกระทบของรังสีที่มาตกกระทบ โดยรังสีที่มาตกกระทบระบบกระจกใด ๆ นั้นจะถือว่าไม่มีการหักเหของแสงเมื่อแสงทะลุผ่านเนื้อกระจกเข้ามายังผิวด้านในของกระจก ทั้งนี้เนื่องมาจากกระจกนั้นมีลักษณะที่เป็นเอกพันธ์ (homogeneous) นอกจากนั้นลักษณะการสะท้อนของรังสีผ่านเนื้อกระจกยังมีลักษณะแบบ specular ในขณะที่มู่ลี่นั้นจะมีลักษณะเป็นใบวางซ้อน ๆ กัน และมีช่องว่างระหว่างใบอยู่ กล่าวคือมู่ลี่นั้นไม่มีลักษณะเป็นเอกพันธ์อย่างในกรณีของกระจก และเป็นผลให้การสะท้อนของรังสีของมู่ลี่มีลักษณะแบบ nonspecular ดังนั้นจึงเป็นผลให้ระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่มีค่าคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกที่ขึ้นกับค่ามุม solar altitude และมุม solar-wall azimuth ผสมกัน

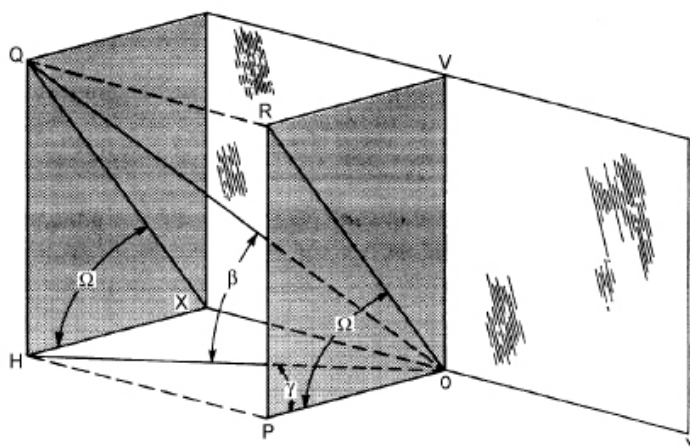
เนื่องจากมู่ลี่มีลักษณะที่ไม่เป็นเอกพันธ์นี้จะทำให้การส่งของรังสีผ่านมู่ลี่นั้นขึ้นกับทั้งความสูงของดวงอาทิตย์ (solar altitude) และมุมเอียงของดวงอาทิตย์เทียบกับทิศของกระจก (solar-wall azimuth) และเป็นผลให้การคำนวณค่าคุณสมบัติมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการนิยามมุมขึ้นมาอีกมุมหนึ่งเรียกว่า มุม solar profile โดยจะมีความสัมพันธ์กับความสูง และมุมเอียงของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระบบกระจก ดังสมการที่ 3.52

$$\Omega = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta}{\cos \gamma} \right) \quad (3.52)$$

เมื่อ	Ω	คือ มุม solar profile, deg
	β	คือ มุม solar altitude, deg
	γ	คือ มุม solar-wall azimuth, deg



รูปที่ 3.7 ค่ามุมที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ สำหรับพื้นผิวแนวตั้ง และพื้นผิวแนวนอน[6]



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุม solar altitude มุม solar-wall azimuth และมุม solar profile[6]

และเมื่อมุม altitude จะสัมพันธ์กับมุมตกกระทบตั้งสมการ

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \Sigma + \sin \beta \cdot \cos \Sigma \tag{3.53}$$

สำหรับกระจกตั้งฉาก (Σ คือ ค่ามุมเอียงตัวของกระจก ซึ่งโดยทั่วไปกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่จะอยู่ในแนวตั้งฉากเสมอ($\Sigma = 90^\circ$)) จะได้

$$\cos \theta = \cos \beta \cdot \cos \gamma \tag{3.54}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุม altitude กับมุมตกกระทบเป็น

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{\cos \gamma} \right) \quad (3.55)$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะช่วยลดตัวแปรที่ใช้ในการประเมินถึงผลของทิศทางของรังสีได้จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะของมุม solar profile (ซึ่งรวมผลของความสูง และความเอียงแล้ว) เทียบกับลักษณะทางเรขาคณิตของมู่ลี่เพื่อหาค่าคุณสมบัติทาง optic ของมู่ลี่ต่อไป นอกจากนี้จากการพิจารณามุมตกกระทบ และมุม solar-wall azimuth รวมเป็นมุม solar profile จะทำให้ได้นิยามของ SHGC ใหม่ ดังนี้

$$SHGC(\Omega) = T^{FH}(\Omega) + \sum_{i=1}^n N_i A_i^f(\Omega) \quad (3.56)$$

โดยที่

$$\Omega = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta}{\cos \gamma} \right) \quad (3.57)$$

หรือ มุม solar profile อาจเขียนอยู่ในรูปของมุมตกกระทบ และมุม azimuth ตามที่นิยามในรูป 3.1 โดยกำหนดให้ $\phi_s = \Omega =$ มุม solar profile ได้เป็น

$$\phi_s = \Omega = \tan^{-1} (\sin \phi \tan \theta) \quad (3.58)$$

นั่นคือ ในการคำนวณค่า SHGC ของระบบกระจกนั้นจะเริ่มจากการกำหนดมุมตกกระทบ และมุม solar-wall azimuth จากนั้นทำการคำนวณหาค่ามุม solar altitude และมุม solar profile เพื่อคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิง optic และค่า SHGC ต่อไป

3.3.1.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่

รังสีแสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบบนระบบกระจกจะประกอบด้วยรังสีแบบตรง (direct solar radiation) และรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย (diffuse solar radiation) และเมื่อรังสีทั้ง 2 ชนิดมาตกกระทบบนมู่ลี่ รังสีแต่ละชนิดจะมีการเปลี่ยนทิศทางไปในลักษณะที่แตกต่างกัน ในกรณีของรังสีแบบตรงมาตกกระทบบนมู่ลี่จะมีการส่งรังสีผ่านมู่ลี่แยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. รังสีแบบตรงที่มาตกกระทบบนระบบกระจก และลอดผ่านใบมู่ลี่เข้ามาสู่ด้านในของอาคารเลย (direct transmittance)

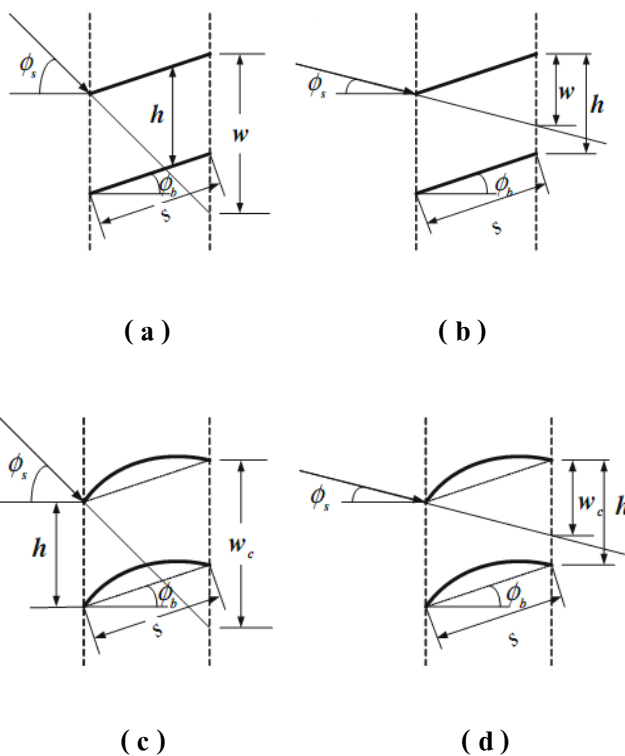
2. รังสีแบบตรงที่เข้ามาตกกระทบใบมู่ลี่และเกิดการสะท้อนที่ใบมู่ลี่ (direct reflected transmittance)

กรณีรังสีแบบกระจายมาตกกระทบใบมู่ลี่จะมีการส่งผ่านมู่ลี่แยกออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน

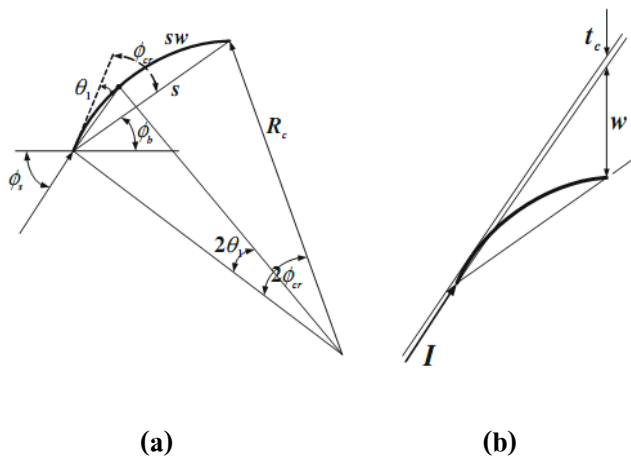
1. รังสีแบบกระจายที่มาตกกระทบระบบกระจก และลอดผ่านระหว่างใบมู่ลี่เข้ามาสู่ด้านในของอาคารเลย (diffuse transmittance)
2. รังสีแบบกระจายที่มาตกกระทบระบบกระจกและเกิดการสะท้อนที่ใบมู่ลี่ (diffuse-reflected transmittance)

3.3.1.2.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแสงอาทิตย์แบบตรง

การวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบตรงนั้นจะซับซ้อนกว่าการวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบกระจาย กล่าวคือ รังสีแบบตรงจะเข้ามากระทบกับมู่ลี่ที่ทิศทางอันหนึ่ง โดยที่การส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนที่ใบมู่ลี่นั้นจะมีค่าเท่าใด จะต้องทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาทิศของรังสีที่ตกกระทบเทียบกับทิศทางของใบมู่ลี่ด้วย ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองของมู่ลี่ในส่วนของรังสีแบบกระจายนั้นจะกำหนดให้รังสีแบบกระจายเข้ามาตกกระทบระบบกระจกในทุกทิศทาง ดังนั้นค่าการส่งผ่าน การสะท้อน และการดูดกลืนที่ใบมู่ลี่ของรังสีส่วนนี้นั้นจึงจะขึ้นอยู่กับมุมเอียงของมู่ลี่เป็นสำคัญ รูปที่ 3.9 จะแสดงถึงการตกกระทบของรังสีบนใบมู่ลี่แบบใบตรงและแบบใบโค้งในลักษณะที่ต่างกัน ในรูปที่ 3.9 (a) (c) แสดงถึงการที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในมุม solar profile, ϕ_s ที่ทำให้ไม่มีส่วนของรังสีสามารถส่งผ่านออกจากใบมู่ลี่อีกที ในขณะที่รูปที่ 3.9 (b) (d) จะแสดงถึงการที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบในมุม solar profile ที่ทำให้มีบางส่วนของรังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านลอดช่องว่างของใบมู่ลี่โดยตรงได้ ดังนั้นใบมู่ลี่จะมีลักษณะในการบังแสงอาทิตย์แตกต่างกันไป และในรูปดังกล่าวยังแสดงให้เห็นว่าการมีส่วนโค้งและความหนาของใบมู่ลี่จะมีผลต่อการบังแสงอาทิตย์ต่างกัน ซึ่งก็จะส่งผลให้มีค่าการส่งผ่านรังสีของชุดมู่ลี่แตกต่างกันไป รูปที่ 3.10 แสดงถึงลักษณะของการบังแสงอาทิตย์เพิ่มเติมของมู่ลี่ใบโค้ง เมื่อเปรียบเทียบกับมู่ลี่ใบตรง



รูปที่ 3.9 รูปร่างของใบมู่ลี่แบบใบตรงและใบโค้งและมุมที่เกี่ยวข้อง [11]



รูปที่ 3.10 ผลของความโค้งของใบมู่ลี่ที่มีต่อการบังแสงอาทิตย์ในมุมเฉพาะบางตำแหน่ง [11]

การบังกันของใบมู่ลี่ต่อรังสีแสงอาทิตย์ในกรณีที่มีรังสีส่วนหนึ่งผ่านทะลุออกไปโดยไม่กระทบใบมู่ลี่ที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 (b) และ (d) นั้นจะสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตเป็น

$$w = s \cdot \frac{\sin(\phi_s + \phi_b)}{\cos \phi_s} \quad \text{เมื่อ} \quad |w| \leq h \quad (3.59)$$

เมื่อ	w	เป็นระยะที่บังรังสีจากใบมู่ลี่โดยตรง
	s	เป็นค่าความกว้างของใบมู่ลี่ชนิดโดยตรง
	ϕ_s	เป็นค่ามุม solar profile
	ϕ_b	เป็นมุมบิดของใบมู่ลี่
	h	เป็นค่าระยะห่างของใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ชิดกัน

ในกรณีที่ใบมู่ลี่เป็นใบแบบ โค้ง จะมีกรณีเฉพาะเมื่อรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบใบมู่ลี่บางตำแหน่ง ความโค้งของใบมู่ลี่จะส่งผลให้เกิดการบังเพิ่มเติมขึ้นจากกรณีของใบมู่ลี่แบบโดยตรง ดังนั้นการบังรังสีแสงอาทิตย์จากมู่ลี่ใบโค้งซึ่งแสดงในรูปที่ 3.10 สามารถกำหนดได้โดยการนิยามค่ามุมวิกฤติที่ส่งผลต่อการบังจากความโค้งของใบมู่ลี่ที่ต่างจากใบมู่ลี่โดยตรงเป็น

$$\phi_{cr} = \sin^{-1} \left[\frac{s}{2R_c} \right] \quad \text{เมื่อ } |w| \leq h \quad (3.60)$$

เมื่อ	ϕ_{cr}	เป็นค่ามุมวิกฤติ
	s	เป็นค่าความกว้างของใบมู่ลี่ที่ถูกฉายในระนาบเรียบ
	R_c	เป็นรัศมีความโค้งของใบมู่ลี่
	h	เป็นค่าระยะห่างของใบมู่ลี่

ผลของความโค้งของใบมู่ลี่จะก่อให้เกิดการบังเพิ่มเติมต่อเมื่อขนาดของผลรวมของมุม solar profile กับมุมบิดของใบมู่ลี่มีค่าน้อยกว่าค่ามุมวิกฤติที่นิยามไว้ในสมการที่ 3.60 ซึ่งเงื่อนไขของการบังเพิ่มเติมจากความโค้งของใบสามารถเขียนได้เป็น

$$|\phi_s + \phi_b| < \phi_{cr} \quad (3.61)$$

และระยะการบังเพิ่มเติมจากผลของความโค้งของใบสามารถเขียนได้เป็น

$$t_c = R_c (1 - \cos \theta_1) / \cos \phi_s \quad (3.62)$$

และ	$t_c = 0$	เมื่อ	$ \phi_s + \phi_b \geq \phi_{cr}$	(3.63)
-----	-----------	-------	------------------------------------	--------

$$\theta_1 = \phi_{cr} - |\phi_s + \phi_b| \quad \text{เมื่อ} \quad |\phi_s + \phi_b| < \phi_{cr} \quad (3.64)$$

เมื่อ t_c เป็นระยะบังเพิ่มเติมจากผลของความโค้งของใบมู่ลี่

θ_1 เป็นมุมที่นิยามตามสมการที่ 3.64

ดังนั้น ค่าการบังสีแสงอาทิตย์จากใบมู่ลี่โค้งตามรูปที่ 3.9 สามารถเขียนได้เป็น

$$w_c = |w| + t_c \quad (3.65)$$

เมื่อ w_c คือระยะการบังของรังสีของใบมู่ลี่โค้งในกรณีที่มีบางส่วนของรังสีทะลุออกมาโดยไม่กระทบกับใบมู่ลี่

ในกรณีที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบใบมู่ลี่ในตำแหน่งที่ไม่มีส่วนใดของใบมู่ลี่สามารถทะลุออกมาโดยไม่กระทบใบมู่ลี่ตามรูปที่ 3.9 c ระยะที่รังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบสามารถหาได้จากความสัมพันธ์โดยอ้างอิงกับรูปที่ 3.11 เป็น

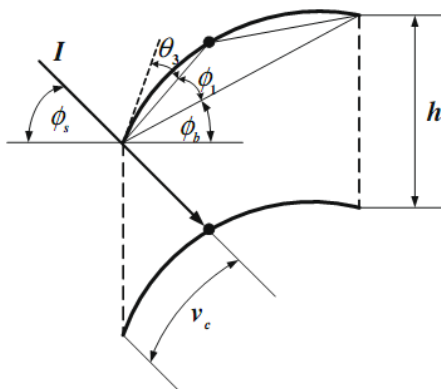
$$v_c = 2R_c \theta_3 \quad (3.66)$$

เมื่อ v_c เป็นความยาวของส่วนที่รับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงบนใบมู่ลี่

θ_3 เป็นมุมที่มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของความโค้งของส่วนที่ได้รับรังสีแสงอาทิตย์

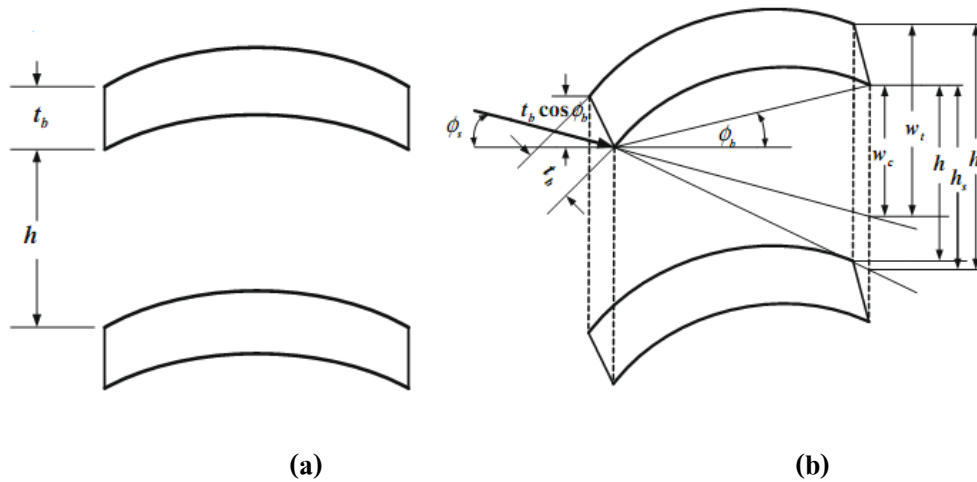
โดยตรง ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$2R_c \sin \theta_3 \sin(\phi_{cr} - \theta_3 + \phi_s + \phi_b) = h \cos \phi_s \quad (3.67)$$



รูปที่ 3.11 รังสีตกกระทบบนใบมู่ลี่และมุมที่เกี่ยวข้อง

สำหรับผลของความหนาของใบมู่ลี่นั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยกำหนดให้ใบมู่ลี่มีความหนาเท่ากับ t_b และสันของขอบใบมู่ลี่ถูกสมมติให้ตั้งฉากกับใบมู่ลี่และทึบแสง และค่าการสะท้อนของรังสีของใบมู่ลี่มีค่าเท่ากับค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ รูปที่ 3.11 แสดงถึงใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนา 2 ใบ ในตำแหน่งมุมบิดเท่า 0 องศา และในตำแหน่งมุมบิดมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 3.12 ลักษณะของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาในตำแหน่งมุมบิดต่างๆ

ความหนาของใบมู่ลี่จะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ใช้ในการวิเคราะห์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ค่ามุมบิดของใบมู่ลี่ ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$w_t = w_c + t_b \cos \phi_b - t_b \sin \phi_b \tan \phi_s \quad (3.68)$$

$$h_t = h + t_b / \cos \phi_b \quad (3.69)$$

เมื่อ w_t เป็นระยะบังของรังสีของใบมู่ลี่ที่รวมผลของความหนาของใบมู่ลี่เข้าไป

t_b เป็นความหนาของใบมู่ลี่

h_t เป็นระยะห่างของใบมู่ลี่โค้งที่มีความหนาซึ่งจะนำไปใช้ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีในส่วนของรังสีตรงซึ่งมีส่วนที่รังสีทะลุออกจากมู่ลี่โดยไม่กระทบใบมู่ลี่

3.3.1.2.1.1 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ไม่ตกกระทบบนใบมู่ลี่

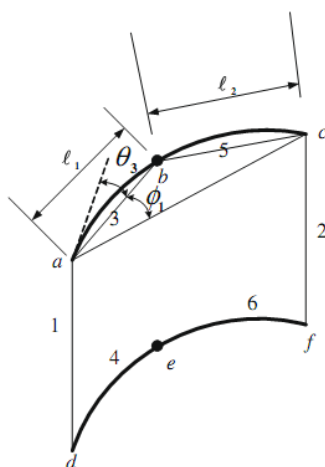
ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ไม่ตกกระทบมู่ลี่จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tau_{bl-c,dir,dir}^f = 1 - \frac{w_t}{h_t} \quad \text{เมื่อ} \quad w_t \leq h_t \quad (3.70)$$

เมื่อ $\tau_{bl-c,dir,dir}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีจากรังสีตรงของมู่ลี่แบบใบโค้งที่มีความหนาในส่วนที่ไม่ตกกระทบมู่ลี่

3.3.1.2.1.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบตรงในส่วนที่ตกกระทบบนใบมู่ลี่

การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีในส่วนที่รังสีมีการตกกระทบบนใบมู่ลี่นั้นสามารถกระทำโดยสมมติให้ใบมู่ลี่มีคุณลักษณะเชิง optic เป็นแบบกระจาย (diffuse) และเพื่อความเรียบง่ายในช่วงแรกจะพิจารณามู่ลี่เป็นแบบใบโค้งที่ไม่มีความหนา ใบมู่ลี่จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่โดนรังสีกระทบ และส่วนที่ไม่โดนรังสีกระทบ การวิเคราะห์กระทำโดยอ้างอิงทฤษฎี radiosity แบบจำลองจะจำลองใบมู่ลี่ 2 ใบ ที่อยู่ชิดกันเป็นลักษณะส่วนรอบล้อมผิวปิดที่มีผนัง 6 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยมีผิวจินตนาการ 2 ผิว อยู่ที่ส่วนด้านหน้าและด้านหลังของช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่



รูปที่ 3.13 ส่วนรอบล้อมปิด 6 ผิวที่ประกอบจากใบมู่ลี่โค้ง 2 ใบที่อยู่ชิดกัน[11]

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

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.71)$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.72)$$

เมื่อ A_i, A_j เป็นพื้นที่ของพื้นผิว i และ j

ค่า view factors ของผิวจำเพาะแต่ละผิวสามารถคำนวณหาค่าได้โดยใช้วิธี Hottel's crossed string (Siegel and Howell, 2002) [41] ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$F_{ij} = \frac{\sum XS_{ij} - \sum US_{ij}}{2L_i} \quad (3.73)$$

เมื่อ $\sum XS_{ij}$ เป็นผลรวมของค่าเส้นไขว้ (crossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j
 $\sum US_{ij}$ เป็นผลรวมของค่าที่ไม่เส้นไขว้ (uncrossed string) ที่เชื่อมผิว i และผิว j
 L_i เป็นความยาวที่วัดตามผิวโค้ง i

ตัวอย่างของการคำนวณค่า F_{ij} ของมุมโค้งที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 เป็น

$$F_{35} = \frac{ab + bc - ac}{2L_3} \quad (3.74)$$

$$F_{35} = \frac{af + be - ae - bf}{2L_3} \quad (3.75)$$

ความยาวที่วัดตามผิวโค้งของผิวโค้งที่กำหนดไว้ในส่วนล้อมรอบปิดจะเขียนได้เป็น

$$ab = L_3 = de = L_4 = v_c \quad \text{เมื่อ} \quad v_c = 2R_c \theta_3$$

$$bc = L_5 = ef = L_6 = sw - v_c$$

$$ad = L_1 = cf = L_2 = h$$

$$ac = df = s$$

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

$$cd = \sqrt{(df \cos \phi_b)^2 + (h + df \sin \phi_b)^2} \quad (3.76)$$

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

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

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

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

เมื่อ	sw	เป็นความยาวของใบมู่ลี่วัดตามผิวโค้งของใบมู่ลี่
	s	เป็นความยาวของใบมู่ลี่ที่ฉายแสงลงบนระนาบเรียบ (ระยะห่างจากด้านบนใบมู่ลี่ถึงปลายใบมู่ลี่)
	h	เป็นระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบ
	R_c	เป็นรัศมีมีความโค้งของใบมู่ลี่
	ϕ_b	เป็นมุมบิดของใบมู่ลี่
	ϕ_{cr}	เป็นค่ามุมวิกฤติ
	θ_3	เป็นค่าครึ่งหนึ่งของมุมที่กวาดครอบคลุมส่วนโค้งบนใบมู่ลี่ซึ่งโดนรังสีตกกระทบโดยตรงตามนิยามที่กำหนดในสมการที่ 3.66 และ 3.67
	v_c	เป็นความยาวของส่วนโค้งบนใบมู่ลี่ซึ่งโดนรังสีตกกระทบโดยตรง

จากรูปร่างทางเรขาคณิตของส่วนล้อมรอบปิดที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 ค่า l_1, l_2, ϕ_1 และ θ_3 จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$l_1 = 2R_c \sin \theta_3$$

$$l_2 = 2R_c \sin(\phi_{cr} - \theta_3) = 2R_c \sin \phi_1 \quad (3.77)$$

$$\phi_1 = \phi_{cr} - \theta_3$$

ในส่วนล้อมรอบแบบผิวปิดค่า irradiation บนผิว i , G_i สามารถเขียนอยู่ในรูปผลบวกของค่า radiosity จากผิวที่เหลือที่ตกกระทบลงบนผิว i ได้เป็น

$$G_i = \sum_{j=1}^6 J_j F_{ji} \quad (3.78)$$

เมื่อ	G_i	เป็นค่า irradiation บนผิว i
	J_j	เป็นค่า irradiation บนผิว j
	F_{ij}	เป็นค่า view factor จากผิว j ไปยังผิว i

ค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิวจะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
 J_1 &= Q_1 \\
 J_2 &= Q_2 \\
 J_3 &= Q_3 + \rho_{dif,dif}^b G_3 + \tau_{dif,dif} G_4 \\
 J_4 &= Q_4 + \tau_{dif,dif} G_3 + \rho_{dif,dif}^f G_4 \\
 J_5 &= Q_5 + \rho_{dif,dif}^b G_5 + \tau_{dif,dif} G_6 \\
 J_6 &= Q_6 + \tau_{dif,dif} G_5 + \rho_{dif,dif}^f G_6
 \end{aligned} \tag{3.79}$$

เมื่อ Q_i เป็นค่า flux ของความร้อนจากผิว i , W/m^2
 $\tau_{dif,dif}$ เป็นค่าการส่งผ่านของใบมู่ลี่ (จะมีค่าเท่ากับทั้งผิวด้านหน้าและด้านหลังของใบมู่ลี่)
 $\rho_{dif,dif}^b$ และ $\rho_{dif,dif}^f$ เป็นค่าการสะท้อนรังสีของใบมู่ลี่ที่ด้านหน้าและด้านหลังใบ

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

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

$$Q_3 = \tau_{dir,dif} \tag{3.80}$$

$$Q_4 = \rho_{dir,dif}^f \tag{3.81}$$

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

$$Q_3 = \rho_{dir,dif}^b \tag{3.82}$$

$$Q_4 = \tau_{dir,dif} \tag{3.83}$$

สำหรับผิว 5 และ 6 ซึ่งเป็นผิวที่ไม่ได้รับรังสีแบบตรงตกกระทบโดยตรง ค่า flux ของความร้อนจากผิวเหล่านี้สามารถเขียนได้เป็น

$$Q_5 = Q_6 = 0 \tag{3.84}$$

จากที่ค่า irradiation ที่ผิว 1 และ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สมการที่ 3.77 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_k = \sum_{j=3}^6 J_j F_{jk} \quad (3.85)$$

เมื่อแทนค่า G_3 ถึง G_6 จากสมการที่ 3.79 ลงไปในสมการที่ 3.85 และจัดรูปสมการใหม่เขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์จะได้

$$[X] \cdot \{J_j\} = \{Q_j\} \quad (3.86)$$

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

$$\begin{bmatrix} J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_6 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

ค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิวจะหาค่าได้โดยการทำ inverse เมทริกซ์ในสมการที่ 3.87

$$\{J_j\} = [X]^{-1} \{Q_j\} \quad (3.88)$$

ค่า irradiation บนพื้นผิว 1 และ 2 สามารถหาได้จาก

$$G_1 = \sum_{j=3}^6 J_j F_{j1} \quad (3.89)$$

$$G_2 = \sum_{j=3}^6 J_j F_{j2} \quad (3.90)$$

ดังนั้นสำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบบนโคมู๊ดี้จากด้านหน้าในขนาดหนึ่งหน่วย ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงด้านหน้าในส่วนที่เกิดจากการสะท้อนไปมาของรังสีที่ตกกระทบจะมีค่าเท่ากับค่า irradiation บนผิว 2 ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\tau_{bl-c,dir,dif}^f = G_2 \quad (3.91)$$

เมื่อ $\tau_{bl-c,dir,dif}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจาย (ค่าการส่งผ่านรังสีแบบตรงด้านหน้าในส่วนที่เกิดจากการสะท้อนไปมาของรังสีที่ตกกระทบ) ของชั้นเสมือน

ในทำนองเดียวกันค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของชั้นเสมือนจะมีค่าเท่ากับค่า irradiation บนผิว 1 ซึ่งจะเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-c,dir,dif}^f = G_1 \quad (3.92)$$

เมื่อ $\rho_{bl-c,dir,dif}^f$ เป็นค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายของชั้นเสมือน

และค่าการดูดกลืนรังสีของชั้นเสมือนก็สามารถหาได้จาก

$$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-c,dir,dif}^f - \rho_{bl-c,dir,dif}^f \quad (3.93)$$

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

ในกรณีที่มีมุมบิวดอยู่ในตำแหน่งที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบแล้วมีรังสีแบบตรงบางส่วนสามารถลอดทะลุมุมลิ้อออกไปด้านหลังโดยไม่ตกกระทบมุมลิ้อเลยนั้น ใบมุมลิ้อตลอดทั้งใบจะรับรังสีส่วนที่เหลือทั้งหมด ดังนั้นส่วนล้อมรอบปิดที่ใช้พิจารณาจะเปลี่ยนจาก 6 ผิวเป็นแบบ 4 ผิว และค่าคุณสมบัติเชิง optic ในส่วนที่รังสีมีการสะท้อนไปมาระหว่างใบมุมลิ้อ 2 ใบ ยังคงทำเหมือนเดิม โดยเปลี่ยนส่วนล้อมรอบปิดจาก 6 ผิวเป็นแบบ 4 ผิว (ละทิ้งผิว 5 และ 6 ผิว 3 และ 4 จะคลุมเต็มความยาวของใบมุมลิ้อ) และค่าคุณสมบัติเชิง optic ในสมการที่ 3.91 ถึง 3.93 จะคำนวณโดยอ้างอิงกับสัดส่วนของค่ารังสีแบบตรงขนาดหนึ่งหน่วยที่ตกกระทบ (หักส่วนที่ผ่านทะลุออกไปโดยไม่กระทบใบมุมลิ้อ) ท้ายสุดค่าการดูดกลืนรังสีทางด้านหน้าของชั้นเสมือนมีค่าเป็น

$$\alpha_{bl-c,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-c,dir,dir}^f - \tau_{bl-c,dir,dif}^f - \rho_{bl-c,dir,dif}^f \quad (3.94)$$

จากนั้นผลของความหนาของใบมุมลิ้อจะถูกมาพิจารณาเพิ่มเติม เมื่อพิจารณารูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมุมลิ้อ 2 ใบในตำแหน่งต่างกันในรูปแบบที่ 3.12 จะเห็นว่ามันจะมีค่าเปลี่ยนแปรไปตามมุมบิวดและมีความซับซ้อนมากพอควร และเนื่องจากขนาดความหนาของใบมุมลิ้อมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างใบมุมลิ้อ ดังนั้นแทนที่จะใช้รูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมุมลิ้อโค้งที่มีความหนาทำการวิเคราะห์ ในการศึกษาจึงเลือกใช้รูปร่างของช่องว่างระหว่างใบมุมลิ้อ 2 ใบที่ประกอบกันเป็นส่วนล้อมรอบผิวปิดแบบเดียวกับของใบมุมลิ้อโค้งที่ไม่มีความหนา แต่ทำการแก้ไขผลของการวิเคราะห์ด้วยค่า correction factor ซึ่งพัฒนาโดย EnergyPlus, 2005 [42] แทน ค่า correction factor สามารถเขียนโดยอ้างอิงกับรูปที่ 3.12 ได้เป็น

$$bf = \frac{t_b \cos(\phi_b + \phi_s)}{\left(h + \frac{t_b}{\cos \phi_s}\right) \cos \phi_s} \quad (3.95)$$

เมื่อ bf เป็นค่า correction factor ของสันของใบมู่ลี่

ค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายที่คิดผลของความหนาจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\tau_{bl-ct,dir,dif}^f = \tau_{bl-c,dir,dif}^f (1 - bf) \quad (3.96)$$

เมื่อ $\tau_{bl-ct,dir,dif}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าแบบรังสีตรง – กระจายที่คิดผลของความหนา

ค่าการสะท้อนรังสีและค่าการดูดกลืนรังสีของมู่ลี่ใบโค้งพร้อมความหนาจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-ct,dir,dif}^f = \rho_{bl-c,dir,dif}^f (1 - bf) + \rho_{dif,dif}^f (bf) \quad (3.97)$$

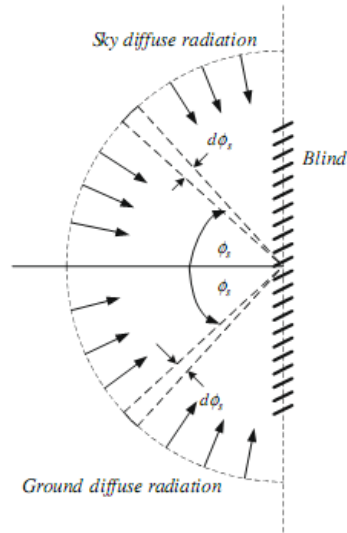
$$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f = 1 - \tau_{bl-ct,dir,dir}^f - \tau_{bl-ct,dir,dif}^f - \rho_{bl-ct,dir,dif}^f \quad (3.98)$$

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

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

3.3.1.2.2 ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่จากรังสีแบบกระจาย

ในกรณีรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายตกกระทบใบมู่ลี่นั้น เนื่องจากรังสีแบบกระจายมาจากทุกทิศทาง ทั้งมาจากด้านบน (ซึ่งจะกำหนดเป็นส่วนที่มาจากท้องฟ้า (sky)) และที่มาจากด้านล่าง (ซึ่งจะกำหนดเป็นส่วนที่สะท้อนมาจากพื้นดิน (ground)) ดังนั้นคุณสมบัติเชิง optic ที่มาจากรังสีแบบกระจายจึงสามารถแบ่งเป็นส่วนที่มาจากท้องฟ้า และส่วนที่มาจากพื้นดิน ค่าคุณสมบัติเชิงคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่ที่มาจากรังสีกระจายจะสามารถหาได้จากการอินทิเกรตคุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่ที่มาจากรังสีแบบตรงในแต่ละทิศทางให้ครอบคลุมส่วนย่อยของท้องฟ้าและพื้นดินซึ่งมีการกระจายตัวแปรตามมุม solar profile ตามรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การกระจายตัวของส่วนย่อยของรังสีแบบกระจายที่ตกกระทบมู่ลี่

ค่าการส่งผ่านรังสีของมู่ลี่ใบ โคนึ่งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\tau_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\pi} [\tau_{bl-ct,dir,dir}^f(\phi_s) + \tau_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s)] \cdot I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\pi} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.99)$$

$$\tau_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\pi/2}^0 [\tau_{bl-ct,dir,dir}^f(\phi_s) + \tau_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s)] \cdot I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\pi/2}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.100)$$

เมื่อ

$\tau_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคนึ่งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$\tau_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคนึ่งที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\tau_{bl-ct,dir,dir}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคนึ่งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีทะลุผ่านมู่ลี่โดยไม่ตกกระทบใบมู่ลี่ ที่มุม solar profile ϕ_s

$\tau_{bl-ct,dir,dif}^f$ เป็นค่าการส่งผ่านรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคนึ่งที่มีความหนาจากรังสีแบบตรงในส่วนที่รังสีตกกระทบใบมู่ลี่และสะท้อนไปมา ที่มุม solar profile ϕ_s

I_{sky} เป็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า

I_{gnd} เป็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน

ค่าการสะท้อนรังสีและค่าการดูดกลืนของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีกระจายจะสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \rho_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s) I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.101)$$

$$\rho_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \rho_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s) I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.102)$$

$$\alpha_{bl-ct,sky-dif,dif}^f = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \alpha_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s) I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{sky}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.103)$$

$$\alpha_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 \alpha_{bl-ct,dir,dif}^f(\phi_s) I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^0 I_{gnd}(\phi_s) \cos \phi_s d\phi_s} \quad (3.104)$$

เมื่อ $\rho_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ เป็นค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากท้องฟ้า

$\rho_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ เป็นค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\rho_{bl-ct,dir,dif}^f$ เป็นค่าการสะท้อนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบตรง

$\alpha_{bl-ct,sky-dif,dif}^f$ เป็นค่าดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มา จากท้องฟ้า

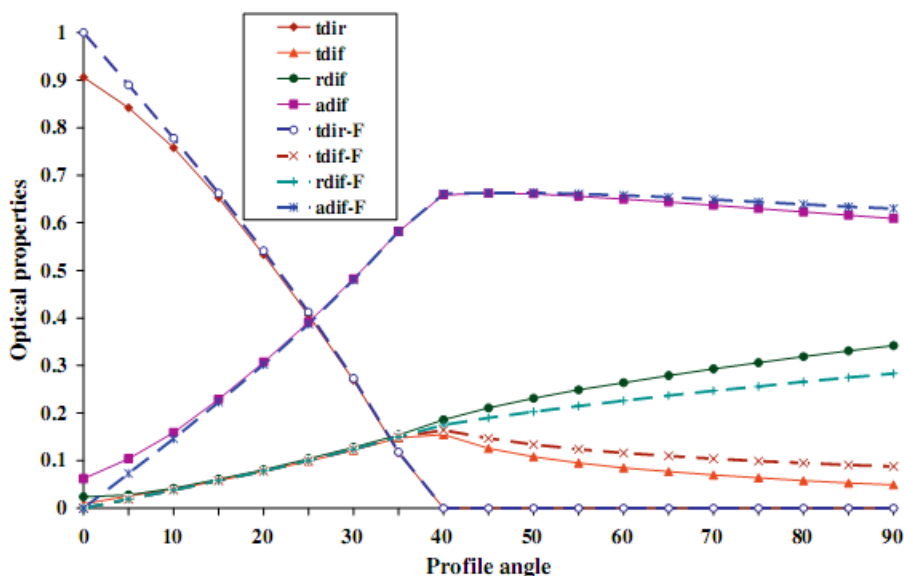
$\alpha_{bl-ct,gnd-dif,dif}^f$ เป็นค่าดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบกระจายที่มาจากพื้นดิน

$\alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$ เป็นค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้าของมู่ลี่ใบ โคง์ที่มีความหนาจากรังสีแบบตรง

I_{sky} เป็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า

I_{gnd} เป็นค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ของรังสีแบบกระจายจากพื้นดิน

รูปที่ 3.15 แสดงถึงตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบคลื่นสั้นของชั้นเสมือนที่เป็นมู่ลี่ใบโค้งและมู่ลี่ใบตรง



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างของการเปรียบเทียบของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของชั้นเสมือนที่เป็นมู่ลี่ใบโค้ง และมู่ลี่ใบตรง มู่ลี่ใบโค้งที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 50 มม. ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่เท่ากับ 20 มม. ความยาวที่ฉายลงในระนาบเรียบเท่ากับ 25.2 มม. ความหนาเท่ากับ 0.3 มม. มีค่าการสะท้อนของใบมู่ลี่เท่ากับ 0.5 มุมบิดของมู่ลี่เท่ากับ 0 องศา $tdir = \tau_{bl-ct,dir,dir}^f$, $tdif = \tau_{bl-ct,dir,dif}^f$, $rdif = \rho_{bl-ct,dir,dif}^f$, $adif = \alpha_{bl-ct,dir,dif}^f$, -F = มู่ลี่ใบตรงที่ไม่มีความหนา[11]

3.3.2 การคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic คลื่นยาวของมู่ลี่

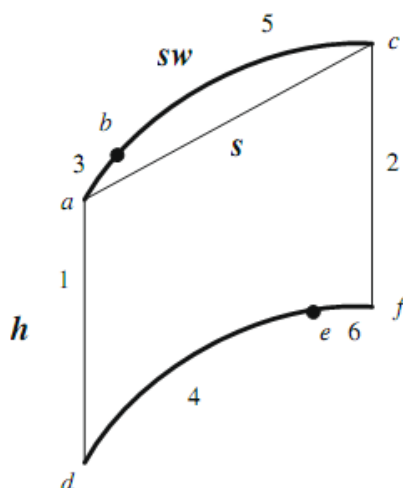
เนื่องจากมู่ลี่นั้นมีลักษณะเป็นใบวางซ้อนกันเป็นชั้น ๆ และการแผ่รังสีคลื่นยาวถึงแม้ว่าจะมีความถี่ต่ำก็สามารถส่งผ่านได้โดยผ่านช่องระหว่างใบเหล่านี้ ซึ่งแตกต่างกับกรณีของกระจกที่เป็นเนื้อกระจก และการแผ่รังสีคลื่นยาวไม่สามารถที่จะส่งผ่านได้ นอกจากนั้นค่าคุณสมบัติคลื่นยาวของมู่ลี่ยังคงแปรตามค่าการสะท้อนที่ผิวมู่ลี่และมุมเอียงของมู่ลี่อีกด้วย

ดังนั้นเพื่อเป็นการคำนวณหาค่าคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อให้เป็นระนาบเสมือนประกอบเข้าไปกับระบบกระจก จึงได้ทำการจำลองให้มู่ลี่นั้นประกอบไปด้วย

พื้นผิวปิดหลาย ๆ ผิว ที่วางซ้อน ๆ กันอยู่ โดยแต่ละพื้นผิวปิดจะประกอบไปด้วยมู่ลี่สองใบ และพื้นผิวที่แทนอากาศด้านหน้า และด้านหลัง โดยจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้ คือ

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

จากสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และทำวิเคราะห์แบบผิวปิด โดยให้พื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว [12] ดังแสดงในรูปที่ 3.16

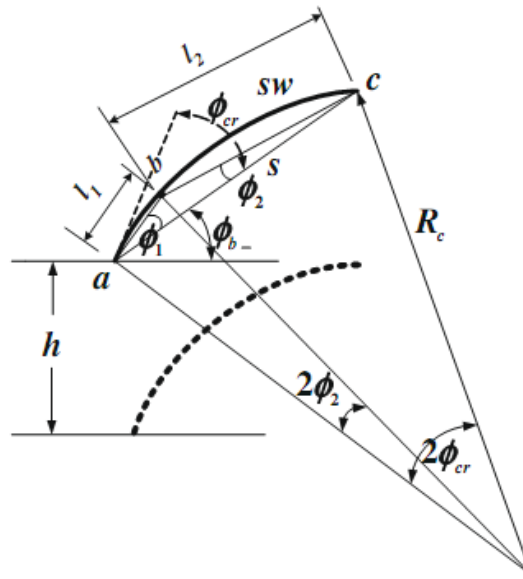


รูปที่ 3.16 ส่วนล้อมรอบปิด 6 พื้นผิวที่ประกอบขึ้นจากใบมู่ลี่ 2 ใบที่อยู่ชิดกัน[12]

พื้นผิวที่ 1 และ 2 เป็นผิวจินตนาการที่เป็นช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่ที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 2 ใบ จะถูกกำหนดให้เป็น h ความยาวใบมู่ลี่วัดตามความโค้งจะถูกกำหนดให้เป็น sw ความยาวใบมู่ลี่วัดตามระนาบเรียบจะถูกกำหนดให้เป็น s ในกรณีที่ $h/s < 1$ เมื่อปิดใบมู่ลี่ไปในตำแหน่งปิดใบมู่ลี่จะซ้อนกัน ส่วนซ้อนกันจะถูกกำหนดเป็น ab และ ef เนื่องจากใบมู่ลี่เป็นใบแบบโค้งไม่ใช่ใบแบบตรง การหาระยะซ้อนกันของใบมู่ลี่จะมีความซับซ้อนมากกว่าในกรณีใบตรงมาก รูปที่ 3.17 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการหาค่าความยาวดังกล่าว ค่ามูมิวิกฤติในกรณีของค่าคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาวจะถูกกำหนดเป็น

$$\phi_{cr} = \sin^{-1} \left[\frac{s}{2R_c} \right] \quad (3.105)$$

- เมื่อ ϕ_{cr} เป็นค่ามุมวิกฤติในกรณีของค่าคุณสมบัติในช่วงความยาวคลื่นยาว
- s เป็นค่าความยาวใบวัดตามระนาบเรียบ
- R_c เป็นค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่



รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของใบมู่ลี่โค้ง

และจากรูปร่างทางเรขาคณิตที่แสดงในรูปที่ 3.17 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์เป็น

$$sw = 2R_c \phi_{cr} \quad (3.106)$$

$$\phi_1 = \phi_{cr} - \phi_2 \quad (3.107)$$

- เมื่อ sw เป็นค่าความยาวใบมู่ลี่วัดตามความโค้ง
- ϕ_1 เป็นค่าครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของส่วนโค้งของผิว bc
- ϕ_2 เป็นค่าครึ่งหนึ่งของมุมกวาดของส่วนโค้งของผิว ab

ค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบสามารถเขียนได้เป็น

$$l_1 = 2R_c \sin \phi_2 \quad (3.108)$$

$$l_2 = 2R_c \sin \phi_1 \quad (3.109)$$

เมื่อ l_1 เป็นค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว ab

l_2 เป็นค่าความยาวที่ถูกฉายลงในระนาบเรียบของผิว bc

ความสัมพันธ์ของมุม ϕ_1 และ ϕ_2 สามารถเขียนได้เป็น

$$\sin \phi_1 \cos \phi_2 = \frac{h}{2R_c} \quad (3.110)$$

เมื่อ h เป็นค่าระยะห่างระหว่างโบลี่ 2 โบลี่

และจะได้

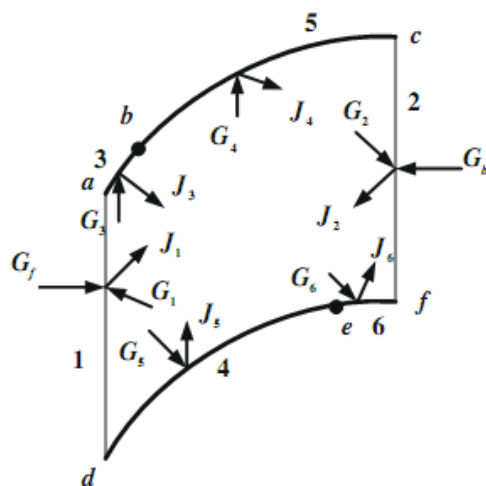
$$\sin(\phi_1 - \phi_2) \cos \phi_2 = \frac{h}{2R_c} \quad (3.111)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.111 จะสามารถหาค่ามุม ϕ_2 ด้วยกระบวนการทำซ้ำ จากนั้นก็จะสามารถกำหนดจุด a และ b ลงบนโบลี่ใบโค้งได้

ในการหาค่าคุณสมบัติเชิง optic ในช่วงความยาวคลื่นยาว จำเป็นต้องใช้ค่า view factor F_{ij} เช่นเดียวกับในตอนหาค่าคุณสมบัติเชิง optic ในช่วงความยาวคลื่นสั้น ค่าความยาวที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในการหาค่า view factor มีดังนี้

$$\begin{aligned} ab = ef = 2R_c \phi_2 \quad bc = de = 2R_c \phi_1 \quad ad = cf = h \quad l_1 = 2R_c \sin \phi_2 \\ l_2 = 2R_c \sin \phi_1, af = \sqrt{(s \cos \phi_b)^2 + (h - s \cdot \sin \phi_b)^2}, \\ cd = \sqrt{(s \cos \phi_b)^2 + (h + s \cdot \sin \phi_b)^2} \\ bd = \sqrt{(h + l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2} \\ ce = \sqrt{(h - l_1 \sin(\phi_1 - \phi_b))^2 + (l_1 \cos(\phi_1 - \phi_b))^2} \\ bf = \sqrt{(h - l_2 \sin(\phi_b - \phi_2))^2 + (l_2 \cos(\phi_b - \phi_2))^2} \\ ae = \sqrt{(h + l_2 \sin(\phi_b + \phi_2))^2 + (l_2 \cos(\phi_b + \phi_2))^2} \\ be = \sqrt{(h + l_1 \sin(\phi_1 + \phi_b) - l_2 \sin(\phi_2 + \phi_b))^2 + (l_2 \cos(\phi_2 + \phi_b) - l_1 \cos(\phi_1 + \phi_b))^2} \\ de = \sqrt{(l_2 \sin(\phi_2 + \phi_b))^2 + (l_2 \cos(\phi_2 + \phi_b))^2} \end{aligned} \quad (3.112)$$

ค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบความยาวคลื่นยาวนั้นสามารถหาได้โดยใช้วิธี radiosity กับส่วนล้อมรอบแบบปิด 6 พื้นผิว ในลักษณะเดียวกับที่ Yahoda and Wright, 2004 [38] วิเคราะห์กับมูลิแบบใบเรียบ แต่ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ส่วนล้อมรอบแบบปิดชนิด 6 ผิว ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.16 ทำการหาค่า irradiation flux บนผิว i, G_i ค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 มูลิพร้อมทั้งค่า irradiation flux บนผิวแต่ละผิว[12]

ค่าการเปล่งรังสีแบบคลื่นยาว ค่าการสะท้อนรังสีแบบคลื่นยาว ค่าการส่งผ่านรังสีแบบคลื่นยาว และค่าการดูดกลืนรังสีแบบคลื่นยาวสามารถเขียนได้เป็น

$$\varepsilon_{L-bl}^f = \frac{G_1}{\sigma T^4} \quad (3.113)$$

$$\varepsilon_{L-bl}^b = \frac{G_2}{\sigma T^4} \quad (3.114)$$

$$\rho_{L-bl}^f = \frac{G_1}{G_f} \quad (3.115)$$

$$\rho_{L-bl}^b = \frac{G_2}{G_b} \quad (3.116)$$

$$\tau_{L-bl}^f = \frac{G_2}{G_f} \quad (3.117)$$

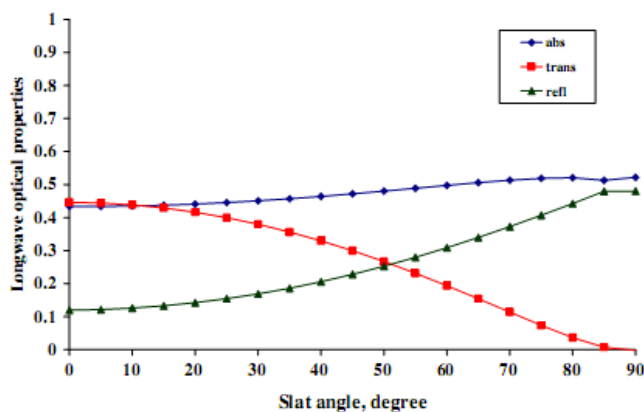
$$\tau_{L-bl}^b = \frac{G_1}{G_b} \quad (3.118)$$

$$\alpha_{L-bl}^f = 1 - \frac{(G_1 + G_2)}{G_f} \quad (3.119)$$

$$\alpha_{L-bl}^b = 1 - \frac{(G_1 + G_2)}{G_b} \quad (3.120)$$

เมื่อ	ε_{L-bl}^f	เป็นค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	ε_{L-bl}^b	เป็นค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	ρ_{L-bl}^f	เป็นค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	ρ_{L-bl}^b	เป็นค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	τ_{L-bl}^f	เป็นค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	τ_{L-bl}^b	เป็นค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	α_{L-bl}^f	เป็นค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหน้าของชั้นเสมือน
	α_{L-bl}^b	เป็นค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่ด้านหลังของชั้นเสมือน
	G_f	เป็นค่า irradiation flux ที่ส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1)
	G_b	เป็นค่า irradiation flux ที่ส่งมากระทบต่อพื้นผิวด้านหลังของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2)
	G_1	เป็นค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหน้าของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 1)
	G_2	เป็นค่า irradiation flux บนพื้นผิวด้านหลังของส่วนล้อมรอบปิด (พื้นผิว 2)
	T	เป็นค่าอุณหภูมิของมูลี่

รูปที่ 3.19 แสดงถึงตัวอย่างของการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบคลื่นยาวของชั้นเสมือนที่เป็นมูลี่ไบ โคง



รูปที่ 3.19 ค่าคุณสมบัติเชิง optic แบบคลื่นยาวของชั้นเสมือน $abs =$ ค่าการดูดกลืนรังสี $trans =$ ค่าการส่งผ่านรังสี $refl =$ ค่าการสะท้อนรังสี[12]

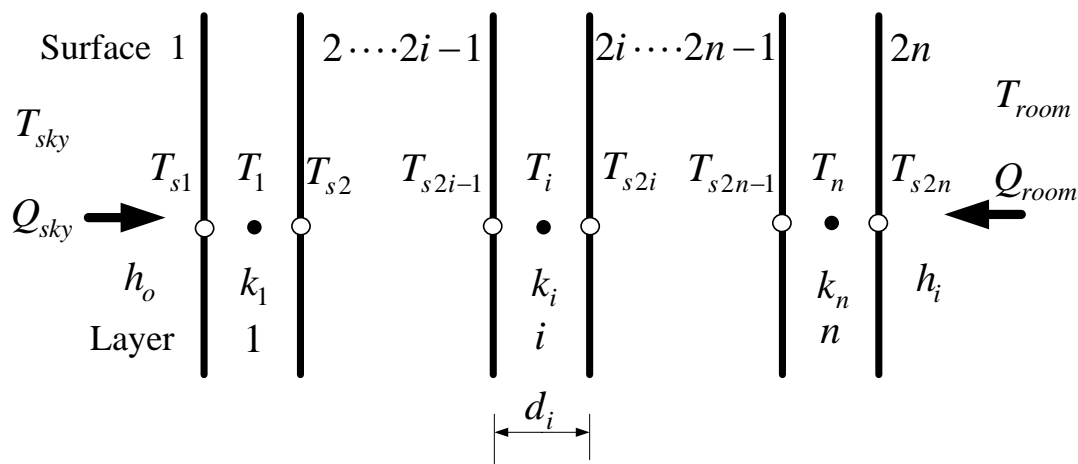
3.4 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

การคำนวณหาอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่นั้นจะสามารถวิเคราะห์ได้โดยหลักของการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นใน 1 มิติตามวิธีที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดย Finlayson [20] แต่อย่างไรก็ตามวิธีของ Finlayson นั้นสามารถที่จะประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับกระจกหลายชั้นเท่านั้น แต่สำหรับระบบกระจกติดมู่ลี่ วิธีการนี้จะไม่สามารถที่จะทำนายได้โดยตรง แต่จะต้องทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในหลาย ๆ ส่วน เพื่อให้ครอบคลุมถึงกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน

ดังนั้นในการศึกษานี้จึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้สามารถทำนายอุณหภูมิผิวของระบบกระจกในกรณีของระบบกระจกที่มีการติดมู่ลี่ได้ด้วย โดยจะพิจารณาว่ามู่ลี่เป็นเหมือนกับ effective layer ชั้นหนึ่ง ที่ประกอบเข้าไปกับระบบกระจกอยู่ภายในอาคาร โดยคุณสมบัติการนำความร้อนของชั้นเสมือนจะถูกปรับปรุงใหม่ จากนั้นจึงพิจารณาการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ระหว่างกระจกชั้นในกับมู่ลี่ การพาความร้อนโดยธรรมชาติจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร และการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ส่งผ่านระหว่างกระจกและมู่ลี่ จากนั้นจึงพิจารณาสมดุลพลังงานของระบบกระจกโดยรวม เพื่อที่จะนำไปสู่การประเมินค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละผิวกระจก ค่าอุณหภูมิของมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกที่มีการติดมู่ลี่ไว้เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน

โดยในการหาอุณหภูมิ และค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแต่ละชั้นนั้น จะเริ่มจากการแบ่งให้ในแต่ละชั้นของกระจกและมู่ลี่นั้นประกอบไปด้วยจุดต่อ 3 จุด นั่นคือที่จุดกึ่งกลางกระจก และที่ผิวแต่ละด้านของกระจกดังแสดงในรูปที่ 3.20 และจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้คือ

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



รูปที่ 3.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก และมู่ลี่

ภายใต้สภาวะคงตัวนี้ จะทำให้ได้สมดุลความร้อนสุทธิที่ถ่ายเทผ่านแต่ละชั้นกระจก และมู่ลี่นั้นจะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} = 0 \quad (3.121)$$

$$Q_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} = 0 \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (3.122)$$

$$Q_{across,i} = \frac{(T_i - T_{i+2})}{R_{i+3}} \quad \text{เมื่อ } i = n-1 \quad (3.123)$$

เมื่อ Q_i คือ net heat flux, W/m^2

$Q_{across,i}$ เป็นค่า heat flux ที่ถูกส่งผ่านกระจกชั้น i ข้ามชั้นมู่ลี่เป็นชั้น diathermanous layer คู่จุด $i+2$

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

R_i คือ ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดกึ่งกลางชั้นกระจกที่ i กับจุดกึ่งกลางของชั้นกระจกก่อนหน้าซึ่งรวมผลของการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผรังสีความร้อน, $m^2 \cdot K/W$

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

โดยที่ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในแต่ละชั้นสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$Q_{abs,i} = A_i^{fH} \cdot I_{dir} + A_i^{diff,sky} \cdot I_{diff,sky} + A_i^{diff,grnd} \cdot I_{diff,grnd} \quad (3.124)$$

เมื่อ	A_i^{fH}	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นที่เป็นค่า directional hemisphere
	$A_i^{diff,sky}$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแบบกระจายจากท้องฟ้าของแต่ละชั้น
	$A_i^{diff,grnd}$	คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแบบกระจายจากพื้นดินของแต่ละชั้น
	I_{dir}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบบนหน้าต่างกระจก, W/m^2
	$I_{diff,sky}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ตกกระทบบนหน้าต่าง กระจก, W/m^2
	$I_{diff,grnd}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่ตกกระทบบนหน้าต่าง กระจก, W/m^2

ค่าการดูดกลืนรังสีในแต่ละชั้นนั้นสามารถหาค่าได้จากค่าคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีจากวิธี Matrix layer calculation [21,22]

จากนั้นถ้าพิจารณาในส่วนของการสมดุลของความร้อนจากการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในระบบกระจกแต่ละชั้นจะได้ว่าความร้อนจากรังสีที่ออกมาจากผิวกระจกแต่ละด้านนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ ส่วนที่แผ่รังสีออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของตัวกระจกเอง ส่วนของการสะท้อนของรังสีที่ด้านหน้า และส่วนจากการส่งผ่านเนื้อกระจกจากรังสีที่มาจากด้านหลัง จากกรณีผู้ที่มีลักษณะพิเศษซึ่งยอมให้รังสีคลื่นยาวส่งผ่านได้ต่างกับของกระจก ดังนั้นผู้ที่จะถูกกำหนดให้เป็นชั้นแบบ diathermanous และการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีคลื่นยาวจึงมีความซับซ้อน การวิเคราะห์กระทำตามวิธีที่เสนอโดย Collins and Wright [15] โดยสมมติให้อุณหภูมิของผิวของชั้นในระบบกระจกทุกชั้นมีค่าเป็นศูนย์กลางแก้วของชั้นที่พิจารณาในขณะนั้น ให้มีค่าอุณหภูมิค่าหนึ่ง แล้วทำการหาค่าการส่งผ่านรังสีไปสู่ผิวแต่ละผิวโดยวิธี radiosity จากนั้นจึงดำเนินการกำหนดผิวที่ต้องการพิจารณาใหม่กระทำซ้ำจนครบทุกผิวในระบบกระจกและผู้หาค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีจะสามารถหาได้จาก

$$h_{r,j-k} = \frac{\sum q_{sk}^{r(j)} - \sum q_{sj}^{r(k)}}{T_{sj} - T_{sk}} \quad (3.125)$$

เมื่อ	$h_{r,j-k}$	เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีระหว่างผิว j และ k (โดยทั่วไป $j=k-1$) ถ้าผิว k เป็นผิวด้านนอกสุดของระบบกระจก ผิว j จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอก ถ้าผิว j เป็นผิวด้านในสุดของระบบกระจก ผิว k จะเป็นเงื่อนไขอากาศภายในห้อง
	$\sum Q_{sk}^{r(j)}$	เป็นค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว j (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบผิว k
	$\sum Q_{sk}^{r(k)}$	เป็นค่า radiosity สุทธิที่เกิดจากผิว k (ในขณะที่ผิวที่เหลือของระบบกระจกจะมีอุณหภูมิเท่ากับ 0 K) ที่ตกกระทบผิว j
	T_{ij}	เป็นค่าอุณหภูมิของผิว j
	T_{sk}	เป็นค่าอุณหภูมิของผิว k

และเมื่อผิวที่พิจารณาเป็นเงื่อนไขอากาศภายนอกและอากาศภายใน ค่า radiosity หรือค่าความร้อนจากการแผ่รังสีจากภายนอก และจากอากาศภายในจะสามารถเขียนได้เป็น

$$Q_{sky}^r = \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 \quad (3.126)$$

$$Q_{room}^r = \sigma T_{room}^4 \quad (3.127)$$

เมื่อ	Q_{sky}^r	คือ ค่าความร้อนจากการแผ่รังสีจากภายนอก
	Q_{room}^r	คือ ค่าความร้อนจากการแผ่รังสีจากภายในห้อง
	σ	คือ ค่า Stefan-Boltzmann constant
	ε_{sky}	คือ ค่าเปล่งรังสีของท้องฟ้า
	T_{sky}	คือ ค่าอุณหภูมิของท้องฟ้า
	T_{room}	คือ ค่าอุณหภูมิของอากาศในห้อง

3.4.1 การคำนวณค่าความต้านทานความร้อนรวม

ภายใต้สภาวะสมดุลความร้อนที่ถูกดูดกลืนที่ผิวกระจกใด ๆ จะต้องมีค่าเท่ากับการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (environment) โดยในการถ่ายเทความร้อนออกนี้จะประกอบไปด้วยการถ่ายเทความร้อนใน 3 โหมดหลัก คือ การแผ่รังสีคลื่นยาว การพาความร้อน และการนำความร้อน

3.4.1.1 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนออกเนื่องจากการแผ่รังสีคลื่นยาว

การพาความร้อนในส่วนนี้สามารถพิจารณาได้จาก

$$Q_{net}^r = h_r (T_1 - T_0) \quad (3.128)$$

เมื่อ T_1 คือ ค่าอุณหภูมิผิวของกระจกด้านที่ 1, °C

T_0 คือ ค่าอุณหภูมิผิวของกระจกด้านที่ 0, °C

และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี คือ

$$h_r = \frac{Q_{net}^r}{(T_1 - T_0)} \quad (3.129)$$

เมื่อ Q_{net}^r คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิในรูปของการแผ่รังสี, W/m^2

h_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

ดังนั้นถ้าพิจารณาที่ผิวกระจกชั้นนอกจะได้

$$h_{r,out} = \frac{Q_{sky}^r - Q_{s1}^r}{T_{sky} - T_{s1}} \quad (3.130)$$

ที่ผิวกระจกชั้นด้านในกับอากาศภายใน

$$h_{r,in} = \frac{Q_{2N}^r - Q_{room}^r}{T_{s2N} - T_{room}} \quad (3.131)$$

ที่ระหว่างชั้นกระจกใด ๆ

$$h_{r,gap,i} = \frac{Q_{2i}^r - Q_{2i+1}^r}{T_{s2i} - T_{2i+1}} \quad (3.132)$$

ระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

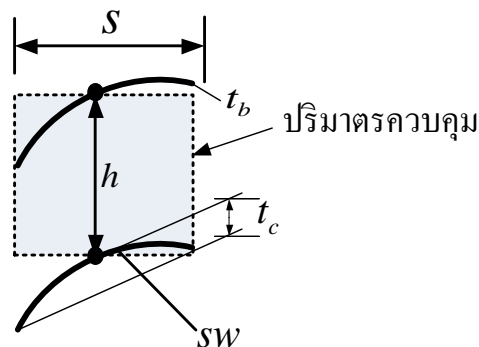
$$h_{r,exchange} = \frac{Q_{2n-2}^r - Q_{2n-1}^r}{T_{s2n-2} - T_{2n-1}} \quad (3.133)$$

3.4.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชั้นเสมือน

เนื่องจากโครงสร้างของมู่ลี่มีลักษณะที่มีความซับซ้อน โดยมีใบของมู่ลี่วางซ้อนกันหลายชั้น และคั่นด้วยช่องว่างของอากาศ โดยคุณสมบัติการนำความร้อนของมู่ลี่ และอากาศที่คั่นกลางระหว่างใบมู่ลี่มีค่าต่างกันอย่างมาก นอกจากนี้มู่ลี่ยังสามารถเป็นได้ทั้งผนังที่ปิดทึบ หรือเป็นผนังที่เปิด ($\phi_b = 0^\circ$) เมื่ออากาศไหลผ่านมู่ลี่ ก็จะเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อน และยังทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างของกระจก และมู่ลี่ไหลข้ามช่องว่างของมู่ลี่ออกมาได้ แต่เนื่องจากความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างของใบมู่ลี่มีค่าค่อนข้างต่ำ ประกอบกับผลจากการศึกษาของ Machin และคณะ[30] ยังพบว่าลักษณะการไหลของอากาศระหว่างช่องว่างนี้มีลักษณะเป็นแบบ cellular flow จึงส่งผลให้ผลกระทบของการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างช่องว่างนี้จึงมีค่าน้อยมาก ดังนั้นการคำนึงถึงผลกระทบของช่องว่างอากาศระหว่างใบมู่ลี่ ต่อการถ่ายเทความร้อน จึงสมมุติให้คุณสมบัติการนำความร้อนของช่องว่างอากาศนี้มีลักษณะเปรียบเสมือนของแข็ง และค่าการนำความร้อนเทียบเท่า (effective thermal conductance) ระหว่างมู่ลี่ และอากาศ [29] สามารถคำนวณได้เป็น

$$k_{ef} = (1 - \varpi) \cdot k_b + \varpi \cdot k_{air} \quad (3.134)$$

- เมื่อ k_{ef} คือ ค่าการนำความร้อนเทียบเท่าของมู่ลี่ และช่องว่างอากาศ, $W / m \cdot K$
 k_b คือ ค่าการนำความร้อนของมู่ลี่, $W / m \cdot K$
 k_{air} คือ ค่าการนำความร้อนช่องว่างอากาศระหว่างใบมู่ลี่, $W / m \cdot K$
 ϖ คือ ค่าความพรุนของมู่ลี่



รูปที่ 3.21 ปริมาตรควบคุมของมู่ลี่

ค่าความพรุนของมู่ลี่ (ϖ) คือค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของช่องว่างอากาศต่อ ปริมาตรทั้งหมดของอากาศ และมู่ลี่ สามารถคำนวณได้จาก

$$\varpi = 1 - \frac{(1 - \kappa) \cdot sw \cdot t_b}{s \cdot (h + t_b)} \quad (3.135)$$

เมื่อ	κ	คือ ค่า openness factor
	sw	คือ ค่าความยาวตามส่วนโค้งของใบมู่ลี่, m
	s	คือ ค่าความกว้างของใบมู่ลี่, m
	t_b	คือ ค่าความหนาของใบมู่ลี่, m

ค่า openness factor คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของมู่ลี่ที่เปิดต่อพื้นที่ผิวทั้งหมดของมู่ลี่

3.4.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

การพาความร้อนจากระบบกระจกหลายชั้นจะสามารถพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพแบ่งออกได้เป็น 4 กรณี คือ

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

3.4.1.3.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวกระจกด้านนอก

จากการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตพบว่า การพาความร้อนออกที่ผิวด้านนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมของอากาศภายนอก และทิศทางของอาคารเป็นหลัก โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Finlayson [19]

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม (windward side of the building)

$$h_0 = 8.07 \cdot V^{0.605} \quad \text{ถ้า } V > 2 \text{ m/s} \quad (3.136)$$

$$h_0 = 12.27 \quad \text{ถ้า } V < 2 \text{ m/s} \quad (3.137)$$

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ใต้ลม (leeward side of the building)

$$h_0 = 18.64(0.3 + 0.05V)^{0.605} \quad (3.138)$$

เมื่อ V คือค่าความเร็วลมภายนอก, m/s

3.4.1.3.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจก

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องกระจกสามารถที่จะหาค่าได้จาก
ความสัมพัทธ์

$$h_{c,gap} = \frac{k \cdot Nu}{\omega} \quad (3.139)$$

เมื่อ k คือ ค่า thermal conductivity ของก๊าซระหว่างชั้นกระจก, $W/m \cdot K$

ω คือ ความกว้างของช่องกระจก, m

Nu คือ Nusselt number

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการ

$$Nu = \left[1 + (0.0303Ra^{0.402})^{1.1} \right]^{0.091} \quad (3.140)$$

โดยที่

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.141)$$

เมื่อ Ra คือ Rayleigh number

Gr คือ Grashof number

Pr คือ Prandtl number

และ

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2\omega^3\Delta\theta}{\mu^2} \quad (3.142)$$

เมื่อ ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิกระจก, K

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก, m/s^2

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซ, $1/K$

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของก๊าซ, kg/m^3

μ คือ ค่าความหนืดของก๊าซ, $kg/m \cdot s$

โดยที่คุณสมบัติของก๊าซสามารถที่จะหาค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นกระจกทั้งสอง และสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$P(T) = P_{273} + \frac{dP}{dT_{ave}} \times T_{ave} \quad (3.143)$$

โดยที่

$$T_{ave} = 0.5 \times (T_{left} + T_{right}) \quad (3.144)$$

เมื่อ P_{273} คือ ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อุณหภูมิ 273 K
 $\frac{dP}{dT_{ave}}$ คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ

โดยที่ค่าคุณสมบัติของอากาศต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิจะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 273 K และค่าการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติของก๊าซเทียบกับอุณหภูมิ [20]

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

3.4.1.3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่

การพาความร้อนในส่วนนี้นั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนค่อนข้างมาก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ที่ทำให้มีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน และไม่สามารถที่จะหาค่าผลเฉลยแม่นยำได้ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาได้พยายามศึกษาทั้งโดยจากการทดลอง [14,17] และจากกรรมวิธีเชิงตัวเลข [13,15] โดยจากการการศึกษาต่าง ๆ ได้แสดงให้เห็นถึงตัวแปรหลัก ๆ ที่มีผลต่อการพาความร้อนในส่วนนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1. ระยะของการติดตั้ง
2. มุมเอียงของมู่ลี่

3. ระดับของความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ตัวมู่ลี่
4. ค่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน
5. ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของผิวกระจก
6. ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่

โดย Collins [14] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยหาค่าการแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนนี้กับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สำคัญ และทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\begin{aligned}
 q_{conv} = & -77.761 + 1.309 \cdot b + 2.178 \cdot T_g + 16.17 \cdot \varepsilon_b + 5.083 \cdot \varepsilon_g - 0.339 \cdot q_b \\
 & - 17.337 \cdot \cos \phi - 0.034 \cdot b^2 + 0.012 \cdot b \cdot T_g - 0.393 \cdot b \cdot \varepsilon_b + 0.009 \cdot b \cdot q_b \\
 & + 0.810 \cdot b \cdot \cos \phi + 0.014 \cdot T_g^2 - 0.182 \cdot T_g \cdot \varepsilon_b - 0.212 \cdot T_g \cdot \varepsilon_g + 0.002 \cdot T_g \cdot q_b \\
 & - 0.254 \cdot T_g \cos \phi + 0.056 \cdot \varepsilon_b \cdot q_b - 0.160 \cdot q_b \cos \phi
 \end{aligned} \tag{3.145}$$

$$\begin{aligned}
 q_{r,transmit} = & 29.822 - 0.434 \cdot b - 1.811 \cdot T_g - 15.422 \cdot \varepsilon_b - 96.784 \cdot \varepsilon_g - 0.032 \cdot q_b \\
 & - 13.485 \cdot \cos \phi + 0.012 \cdot b \cdot T_g + 0.228 \cdot b \cdot \varepsilon_g + 0.002 \cdot b \cdot q_b + 0.019 \cdot T_g^2 \\
 & + 0.563 \cdot T_g \cdot \varepsilon_b + 4.183 \cdot \varepsilon_g + 0.001 \cdot T_g \cdot q_b + 0.654 \cdot T_g \cdot \cos \phi + 8.689 \cdot b^2 \\
 & - 13.458 \cdot \varepsilon_b \cdot \varepsilon_g - 0.111 \cdot \varepsilon_b \cdot q_b - 0.221 \cdot \varepsilon_g \cdot q_b
 \end{aligned} \tag{3.146}$$

โดยที่	q_{conv}	คือ ค่าการพาความร้อนเฉลี่ยระหว่างกระจกกับมู่ลี่, W/m^2
	$q_{r,transmit}$	คือ ค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยจากผิวกระจกผ่านมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง, W/m^2
	b	คือ ระยะติดตั้งมู่ลี่, mm
	T_g	คือ ค่าอุณหภูมิผิวกระจก, $^{\circ}C$
	ε_g	คือ ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวกระจก
	ε_b	คือ ค่าการเปล่งรังสีของใบมู่ลี่
	q_b	คือ ความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ใบมู่ลี่, W/m^2
	ϕ	คือ มุมเอียงของมู่ลี่, deg

จากค่าการพาความร้อนโดยธรรมชาติเฉลี่ยจะทำให้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่ได้จากความสัมพันธ์

$$h_{c,chan} = \frac{q_{conv}}{T_s - T_a} \tag{3.147}$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านในกระจก, K

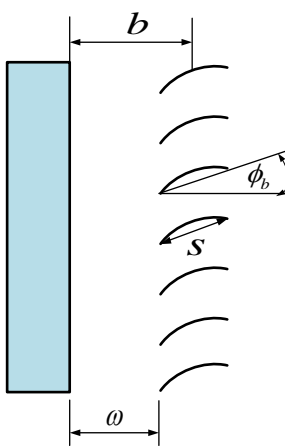
T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายใน, K

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ส่งผ่านจากระหว่างกระจกเข้ามาสู่อากาศภายในห้อง

$$h_{r,transmit} = \frac{q_{r,transmit}}{T_s - T_a} \quad (3.148)$$

โดยสมการที่ 3.145 และ 3.146 นั้นจะมีข้อจำกัดการใช้งานอยู่หลายประการ เช่น ระยะห่างระหว่างผิวกระจกด้านใน กับตำแหน่งกึ่งกลางของมู่ลี่ต้องมีค่าไม่เกิน 40 มม. ค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างผิวกระจก และอากาศด้านในต้องไม่เกิน 15 K ความร้อนที่ดูดกลืนที่มู่ลี่ต้องมีค่าไม่เกิน 150 W/m^2 ประกอบกับการศึกษาพบว่าสมการที่ 3.145 และ 3.146 ให้ค่าได้ไม่แม่นยำ ในการศึกษาจึงหันกลับไปใช้สมการที่ 3.139 โดยปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของช่องว่างระหว่างกระจกและมู่ลี่ ตามการเอียงของใบมู่ลี่ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.149

$$\omega = b - \frac{s \cdot \cos \phi_b}{2} \quad (3.149)$$



รูปที่ 3.22 ระยะช่องว่างอากาศระหว่างกระจกและมู่ลี่

จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่มีมู่ลี่ไม่ได้อยู่ชิดกระจก สมมติฐานดังกล่าวให้ค่าแม่นยำกว่าผลเฉลยของสมการที่ 3.145 และ 3.146

3.4.1.3.4 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อาคาร

สามารถจำลองได้เป็นการไหลผ่านแผ่นเรียบ และสามารถหาค่าได้จากแบบจำลองของกระจกผิวในจากความสัมพันธ์ [19]

$$hc_{room} = 1.77(|T_{s2n} - T_{room}|)^{0.25} \quad (3.150)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนออกของแต่ละส่วนจะทำให้สามารถที่จะหาค่าความต้านทานความร้อนรวมในแต่ละส่วนได้ โดยสำหรับพื้นผิวกระจกด้านนอก

$$R_1 = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d_1}{k_1} \quad (3.151)$$

สำหรับพื้นผิวมู่ลี่

$$R_{N+1} = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d_N}{k_N} \quad (3.152)$$

สำหรับระหว่างชั้นกระจก/มู่ลี่

$$R_{i+1} = \frac{1}{h_{c,gap,i} + h_{r,gap,i}} + \left(\frac{0.5d_i}{k_i} + \frac{0.5d_{i+1}}{k_{i+1}} \right) \quad (3.153)$$

สำหรับระหว่างกระจกผิวในกับอากาศในห้อง

$$R_{i+3} = \frac{1}{h_{r,across,i}} + \frac{0.5d_i}{k_i} \quad (3.154)$$

3.4.2 การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นกระจก

จากค่าอุณหภูมิและค่าความต้านทานความร้อนที่คำนวณได้จากอุณหภูมิที่สมมติขึ้นจะทำให้สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนสุทธิผ่านแต่ละชั้นตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.21 ได้จาก

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} \quad (3.155)$$

$$\Delta_i = \frac{(T_i - T_{i-1})}{R_i} + \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs,i} + Q_{across,i} \quad (3.156)$$

โดยค่า Δ_i ที่ได้จะมีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ และเราจะใช้ค่า Δ_i ตัวนี้ในการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิตัวใหม่

3.4.3 การคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่ผิว

จากค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกจะทำให้เราสามารถที่จะหาค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกได้จากหลักของสมดุลพลังงาน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวกระจกด้านนอกจะเห็นว่าที่สภาวะคงตัวการนำความร้อนผ่านเนื้อกระจกจะต้องมีค่าเท่ากับการพาความร้อนออกจากผิวกระจกนั้นคือ

$$\frac{T_1 - T_{s1}}{R_{k1}} = \frac{T_{s1} - T_{amb}}{R_{h1}} \quad (3.157)$$

จัดรูปสมการเสียใหม่จะได้

$$R_{h1}T_1 - R_{h1}T_{s1} = R_{k1}T_{s1} - R_{k1}T_{amb} \quad (3.158)$$

$$R_{k1}T_{s1} + R_{h1}T_{s1} = R_{h1}T_1 + R_{k1}T_{amb} \quad (3.159)$$

หารตลอดด้วย $R_{k1}R_{h1}$ จะได้

$$\text{หรือ} \quad \frac{R_{k1}T_{s1} + R_{h1}T_{s1}}{R_{k1}R_{h1}} = \frac{R_{h1}T_1 + R_{k1}T_{amb}}{R_{k1}R_{h1}} \quad (3.160)$$

$$\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}} \right) T_{s1} = \left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{amb}}{R_{h1}} \right) \quad (3.161)$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ผิวใหม่ได้เป็น

$$T_{s1} = \frac{\left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{amb}}{R_{h1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{k1}} \right)} \quad (3.162)$$

และพิจารณาในทำนองเดียวกันกับกรณีผิวมู่ลี่ด้านในจะได้

$$T_{s2N} = \frac{\left(\frac{T_N}{R_{kN+1}} + \frac{T_{room}}{R_{hN+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hN+1}} + \frac{1}{R_{kN+1}} \right)} \quad (3.163)$$

และอุณหภูมิผิวที่อยู่ระหว่างชั้นสามารถพิจารณาหาค่าได้จากสมดุลพลังงานเช่นเดียวกัน โดยถ้าพิจารณาที่ผิวด้านในของกระจกชั้นนอกจะได้

$$T_{s2} = \frac{\left(\frac{T_1}{R_{k1}} + \frac{T_{s3}}{R_{h2}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k1}} \right)} \quad (3.164)$$

และที่ผิวกระจก

$$T_{s3} = \frac{\left(\frac{T_2}{R_{k2}} + \frac{T_{s2}}{R_{h2}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{h2}} + \frac{1}{R_{k2}} \right)} \quad (3.165)$$

หรือสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ index notation ได้เป็น

$$T_{s2i} = \frac{\left(\frac{T_i}{R_{ki}} + \frac{T_{s2i+1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki}} \right)} \quad (3.166)$$

และ

$$T_{s2i+1} = \frac{\left(\frac{T_{i+1}}{R_{ki+1}} + \frac{T_{s2i-1}}{R_{hi+1}} \right)}{\left(\frac{1}{R_{hi+1}} + \frac{1}{R_{ki+1}} \right)} \quad (3.167)$$

จะเห็นว่าสมการ 3.166 และ 3.167 นั้นจะมีลักษณะที่ couple กันอยู่ และจำเป็นที่จะต้องหาค่าไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นในการคำนวณจึงจะเริ่มต้นการคำนวณจากการสมมติค่า T_{s2i} และ T_{s2i+1} ก่อน โดยจะสมมติให้มีค่าที่เท่ากับอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก นั่นคือ $T_{s2i} = T_i$ และ $T_{s2i+1} = T_{i+1}$ จากนั้นจึงค่อยคำนวณค่าอุณหภูมิทั้งสองใหม่จนมีค่าที่ลู่อเข้า โดยในการคำนวณนั้นจะถือว่าลู่อเข้าเมื่อผลต่างสูงสุดของอุณหภูมิทั้งสองนั้นมีค่าไม่เกิน 0.01

3.4.4 การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิใหม่จากค่าความร้อนคงเหลือ

ค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกตัวใหม่สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์

$$T_k = T_k^0 + \delta T_k \quad (3.168)$$

เมื่อ T_k คือ ค่าอุณหภูมิตัวใหม่ของชั้นกระจกที่ k

T_k^0 คือ ค่าอุณหภูมิของการคำนวณครั้งก่อนของชั้นกระจกที่ k

δT_k คือ ค่าผลต่างอุณหภูมิรวม

และค่า δT_k จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงเหลือของความร้อน (heat flux residual, Δ_j) ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned}\delta T_1 &= \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_1}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N \\ \delta T_2 &= \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_2}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N \\ &\dots \\ &\dots \\ \delta T_N &= \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_1} \cdot \Delta_1 + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_2} \cdot \Delta_2 + \dots + \frac{\partial T_N}{\partial \Delta_N} \cdot \Delta_N\end{aligned}\tag{3.169}$$

จะเห็นได้ว่าในการหาค่า δT_k นั้นจำเป็นต้องทราบค่า Δ_j และค่าอนุพันธ์ ต่าง ๆ เสียก่อน โดยที่ค่า Δ_j สามารถที่จะคำนวณได้โดยตรงจากสมการ 3.155 และ 3.156 แต่สำหรับพจน์อนุพันธ์ ถ้าพิจารณาที่สมการเดียวกันจะเห็นได้ว่าหาค่าได้ไม่่ง่ายนัก เนื่องมาจากว่าในหนึ่งสมการมีค่าอุณหภูมิที่เกี่ยวข้องกัน อยู่หลายตัวด้วยกัน

อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนคงเหลือแทนจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ \Delta_2 &= \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \cdot \delta T_N \\ &\dots \\ &\dots \\ \Delta_N &= \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} \cdot \delta T_1 + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} \cdot \delta T_2 + \dots + \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \cdot \delta T_N\end{aligned}\tag{3.170}$$

หรือสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix}\tag{3.171}$$

ดังนั้นจะทำให้สามารถหาค่า $\delta\theta_k$ ใด ๆ ได้จาก

$$\begin{Bmatrix} \delta T_1 \\ \delta T_2 \\ \delta T_3 \\ \dots \\ \delta T_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_N} \\ \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_1} & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_2} & \dots & \frac{\partial \Delta_N}{\partial T_N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix} \quad (3.172)$$

หรือ

$$\delta T_k = [\partial \Delta_k / \partial T_j]^{-1} \times \Delta_j \quad (3.173)$$

ถ้าพิจารณาจากสมการ 3.169 ถึง 3.171 จะเห็นได้ว่าจากค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ได้สมมติในตอนแรกนั้นจะให้ค่า Δ_j มีค่าที่ติดลบเสมอ เนื่องจากว่าอุณหภูมิที่สมมติในตอนแรกนั้นไม่ได้รวมถึงผลของการดูดกลืนรังสีที่มีอยู่ในแต่ละชั้นกระจก ดังนั้นค่าอุณหภูมิใหม่ที่กำลังคำนวณได้นั้นจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะทำให้ค่า Δ_j นั้นมีค่าเป็นศูนย์ แต่เนื่องจากว่าค่า Δ_j ที่ได้จะเป็นลบจึงเป็นผลให้ค่า δT_k มีค่าลบไปด้วย ดังนั้นจึงต้องแปลงสมการเสียใหม่เพื่อให้ได้ค่า δT_k มีค่าที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ

$$\delta T_k = -[\partial \Delta_k / \partial T_j]^{-1} \times \Delta_j \quad (3.174)$$

จากสมการ 3.170 ถึง สมการ 3.174 จะเห็นได้ว่าเราสามารถหาค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้โดยพิจารณาจากค่าอนุพันธ์ของ $\partial \Delta_i / \partial T_j$ แทน ซึ่งสามารถหาค่าได้ง่ายกว่า

โดยค่าอนุพันธ์ $\partial \Delta_i / \partial T_j$ สามารถหาค่าได้จากการหาอนุพันธ์ของสมการ 3.155 และ 3.156 เทียบกับอุณหภูมิที่กลางของแต่ละชั้นกระจก/มัลติ โดยจะมีความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนี้

ในกรณีของกระจก 1 ชั้นจะมีค่าเพียง 1 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} = & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left(\frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_1} - h_1 \right) \\ & + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_2^r}{\partial T_1} - h_2 \right) \end{aligned} \quad (3.175)$$

ในกรณีของกระจก 2 ชั้นจะมี 4 ตัวคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left(\frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_1} - h_1 \right) \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} - hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (3.176)$$

$$\frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} + hr_{gap} \right) \quad (3.177)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} + hr_{gap} \right) \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_3^r}{\partial T_1} \right) \end{aligned} \quad (3.178)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} &= -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_2} - hr_{gap} \right) \\ &+ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_3^r}{\partial T_2} - hr_3 \right) \end{aligned} \quad (3.179)$$

ดังนั้นสำหรับกรณีกระจก 2 ชั้นกับมู่ลี่จะรวมเป็น 3 ชั้นจะมีค่าอนุพันธ์เหล่านี้ทั้งหมด 3 คู่ และสามารเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_1} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left(\frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_1} - h_1 \right) \\ &+ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_3^r}{\partial T_1} - hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (3.180)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_2} &= \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left(\frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_2} \right) \\ &- \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} + hr_{gap} \right) \end{aligned} \quad (3.181)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta_1}{\partial T_3} &= \frac{1}{R_1^2 (hr_1 + hc_1)^2} \left(\frac{\partial hc_1 (T_1 - T_0)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s1}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_0^r}{\partial T_3} \right) \\ &+ \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_1 - T_2)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_3} \right) \end{aligned} \quad (3.182)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_2}{\partial T_1} = & -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_1} + hr_{gap} \right) \\
& + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_1} \right) \\
& + \frac{1}{R_5^2 hr_5^2} \left(\frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_1} \right)
\end{aligned} \tag{3.183}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_2}{\partial T_2} = & -\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_2} - hr_{gap} \right) \\
& + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_2} - hr_3 \right) \\
& + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_5^2 hr_5^2} \left(\frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} - hr_5 \right)
\end{aligned} \tag{3.184}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_2}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_2^2 (hr_2 + hc_2)^2} \left(\frac{\partial hc_2 (T_2 - T_1)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s3}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s2}^r}{\partial T_3} \right) \\
& + \frac{1}{R_3^2} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_2 - T_3)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_3} + hr_3 \right) \\
& + \frac{1}{R_5^2 hr_5^2} \left(\frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_3} \right)
\end{aligned} \tag{3.185}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_3}{\partial T_1} = & \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_1} \right) \\
& + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left(\frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_1} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_1} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_1} \right)
\end{aligned} \tag{3.186}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_3}{\partial T_2} = & -\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_2} + hr_3 \right) \\
& + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left(\frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} \right)
\end{aligned} \tag{3.187}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Delta_3}{\partial T_3} = & \frac{1}{R_3^2} + \frac{1}{R_3^2 (hr_3 + hc_3)^2} \left(\frac{\partial hc_3 (T_3 - T_2)}{\partial T_3} + \frac{\partial Q_{s5}^r}{\partial T_3} - \frac{\partial Q_{s4}^r}{\partial T_3} - hr_3 \right) \\
& + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_4^2 (hr_4 + hc_4)^2} \left(\frac{\partial hc_4 (T_3 - T_4)}{\partial T_2} + \frac{\partial Q_{s6}^r}{\partial T_2} - \frac{\partial Q_{room}^r}{\partial T_2} - hr_4 \right)
\end{aligned} \tag{3.188}$$

3.5 การพัฒนาแบบจำลองวิธีการคำนวณค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อนของคนที่นั่งใกล้ หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการพัฒนาวิธีการหาค่าความสบายเชิงความร้อนของคนที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจก ติดมู่ลี่ สำหรับการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ในบริเวณกระจกนั้นจากการศึกษาที่ผ่านมา [1,2,10,29] ได้แสดงให้เห็นว่าความไม่สบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยที่อยู่ใกล้ระบบกระจกนั้นสามารถแยกออกมาเป็นองค์ประกอบย่อยสองส่วนคือ ส่วนของการแผ่รังสีคลื่นสั้นอันเป็นผลมาจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบกระจกเข้ามาโดยตรง และส่วนของการแผ่รังสีคลื่นยาวอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิผิว (surface temperature) ของกระจก ดังนั้นเมื่อนำหลักการดังกล่าวมาใช้กับระบบกระจกที่มีการติดมู่ลี่ ความไม่สบายเชิงความร้อนก็สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนเช่นกันคือ ความไม่สบายเชิงความร้อนในส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบกระจกติดมู่ลี่มากระทบผู้อยู่อาศัย และความไม่สบายเชิงความร้อนจากการแผ่รังสีคลื่นยาวจากอุณหภูมิผิวของมู่ลี่มาสู่ผู้อยู่อาศัย โดยผลกระทบดังกล่าวจะถูกอธิบายด้วยค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลกระทบของรังสีที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่เข้ามากระทบตัวคน และอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลเฉพาะอุณหภูมิผิวนั่งภายในเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการศึกษานี้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่เข้ามา ที่สามารถแปรตามค่ามุมเอียงของใบมู่ลี่ และยังพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลของอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่มีอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ เช่นผนังห้องที่ประกอบด้วย กระจก และมู่ลี่

3.5.1 การหาค่าความสบายเชิงความร้อน

วัตถุประสงค์ของระบบการปรับอากาศและระบายอากาศ ก็คือทำให้คนที่อาศัยอยู่ในบริเวณที่ระบบทำงานนั้นเกิดความสบายเชิงความร้อนขึ้น แต่ค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) จะเป็นสภาวะที่เกี่ยวข้องกับอารมณ์หรือจิตใจของผู้อยู่อาศัยที่จะเกิดความพอใจกับลักษณะทางความร้อนของสภาวะนั้น ความรู้สึกที่ใช้อธิบายว่ารู้สึกสบายและรู้สึกไม่สบายนั้นจะเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นของผิวหนังและอุณหภูมิในร่างกาย โดยทั่วไปแล้วความรู้สึกสบายจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิร่างกายถูกกำหนดไว้ให้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ และความชื้นที่ผิวหนังมีค่าต่ำ นอกจากนี้ความรู้สึกสบายนั้นยังเกี่ยวข้องกับระดับของการทำกิจกรรมและลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่รวมทั้งลักษณะและรูปแบบของสถานที่

ในปี พ.ศ. 2513 Fanger [18] ได้สร้างสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนของคนโดยใช้ตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร คือ ค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความเร็วลม ค่าความชื้น ค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (mean radiant temperature) ค่าการผลิตพลังงานในร่างกาย และลักษณะของเสื้อผ้าที่

สวมใส่ โดย Fanger จะกำหนดดัชนีที่ใช้บ่งบอกความสบายเชิงความร้อนขึ้นตัวหนึ่งเรียกว่า Predicted Mean Vote (PMV) ค่า PMV จะได้จากผลการทดลองโดยให้คนกลุ่มใหญ่ภายใต้เงื่อนไขสภาวะอากาศที่คนเหล่านี้อาศัยอยู่ต่างๆ กัน และให้ลงความเห็นถึงความพอใจในสภาวะนั้น ๆ ภายใต้กิจกรรมและการแต่งตัวต่างๆ กัน ซึ่ง Fanger ได้กำหนดระดับความพอใจอยู่ 7 ระดับ โดยที่มีค่าตัวเลขจาก -3 ถึง +3 นั่นคือ

+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)

นอกจากค่า PMV แล้ว ยังได้กำหนดค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนขึ้นอีกหนึ่งค่าคือ ค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) ค่า PPD จะเป็นตัวกำหนดเปอร์เซ็นต์ของคนที่ไม่สบาย ซึ่งค่า PPD จะสามารถหามาจากค่า PMV ได้ และถึงแม้ว่าในกรณีที่ค่า PMV มีค่าเป็น 0 ซึ่งหมายถึงสภาวะที่ผู้อาศัยรู้สึกสบายเชิงความร้อน แต่ค่าของ PPD จะเป็น 5% ซึ่งจะแสดงว่ามีคนบาง (ประมาณ 5%) จะรู้สึกไม่พอใจในสภาวะนี้ จึงเห็นได้ว่าค่า PPD ดูเหมือนจะให้ข้อมูลได้ละเอียดกว่าค่า PMV สมการสำหรับคำนวณหาค่า PMV และค่า PPD สามารถเขียนได้เป็น

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times \left[\begin{array}{l} (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99(M - W) - P_a) \\ -0.42 \times [(M - W) - 58.15] \\ -1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) \\ -0.0014M (34 - T_a) \\ -3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \left((T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4 \right) \\ -f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a) \end{array} \right] \quad (3.189)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (3.190)$$

เมื่อ

M คือ ค่าอัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม, W/m^2

W คือ งานภายนอก มีค่าเท่ากับศูนย์ สำหรับกิจกรรมโดยส่วนใหญ่, W/m^2

P_a	คือ ความดันย่อยของไอน้ำ, kPa
f_{cl}	คือ อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด
T_{mrt}	คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature), °C
T_a	คือ อุณหภูมิอากาศภายใน, °C
T_{cl}	คือ อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่, °C
h_c	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและเสื้อผ้า, W/ m ² K

โดยที่ค่าความดันย่อยของไอน้ำ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์คือ

$$P_a = RH \cdot P_{sat @ T_a} \quad (3.191)$$

โดย

$$P_{sat @ T_a} = e^{\left(18.4854 - \frac{5169.5248}{T_a + 273.15}\right)} \quad (3.192)$$

เมื่อ $P_{sat @ T_a}$ คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ, kPa

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง, %

สำหรับอุณหภูมิผิวเสื้อผ้าที่สวมใส่หาได้โดยใช้วิธีการคำนวณซ้ำ โดยสามารถคำนวณได้

จากความสัมพันธ์

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} [3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)] \quad (3.193)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

$$= 12.1\sqrt{V_a} \quad \text{เมื่อ } 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{V_a} \quad (3.194)$$

เมื่อ

V_a = ค่าความเร็วของอากาศภายใน, m/s

ค่า Clothing area factor, f_{cl} ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าพื้นที่ผิวของเสื้อผ้าต่อพื้นที่ผิวของร่างกายคนที่ไม่ได้สวมใส่เสื้อผ้า (nude) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.195

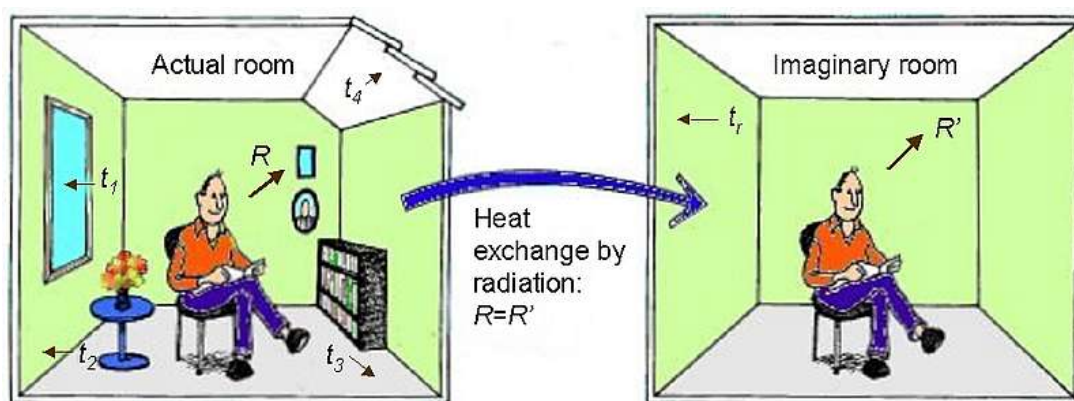
$$f_{cl} = 1.0 + 0.2I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} < 0.5CLO$$

$$= 1.05 + 0.1I_{cl} \quad \text{เมื่อ } I_{cl} > 0.5CLO \quad (3.195)$$

3.5.2 การพัฒนาหาค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย (Mean radiant temperature)

ในการคำนวณหาค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนไม่ว่าจะเป็นค่า PMV หรือค่า PPD ตัวแปรตัวหนึ่งที่มีความสำคัญคือค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ซึ่งจะนิยามเป็นค่าอุณหภูมิสมมติของ

พื้นผิวดำที่ถูกปิดล้อมทำให้การแผ่รังสีระหว่างคนกับพื้นผิวนั้นเทียบเท่ากับพื้นผิวจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งพารามิเตอร์ตัวสุดท้ายจะมีผลอย่างมากต่อความสบายของผู้อยู่อาศัยในอาคารที่นั่งใกล้กับกระจก สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [1,2] ได้ทำการศึกษาผลกระทบจากรังสีที่ผ่านหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ ซึ่งพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อความสบายของผู้อยู่อาศัยที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกจะขึ้นกับปริมาณรังสีที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมาตกกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง และค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่สูงขึ้นจากการดูดซับปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ สุดท้ายก็จะแผ่รังสีคลื่นยาวมาสู่ผู้อยู่อาศัย ซึ่งผลกระทบดังกล่าวถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย



รูปที่ 3.23 นิยามของค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีเฉลี่ย [43]

ในการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ออกเป็นสองค่าคือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลจากอุณหภูมิผิวนั่งห้องเพียงอย่างเดียวและ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมผลของอุณหภูมิผิวและผลจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวคนด้วย ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ไม่ได้รวมผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ จะถูกเรียกว่า Unirradiant mean radiant temperature ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma(T_{umrt} + 273)^4 = B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + \dots + B_n \cdot F_{p-n} \quad (3.196)$$

โดยที่ B_i คือค่า Radiosity ของพื้นผิว i , W/m^2 สามารถคำนวณได้โดย

$$B_i = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_{s,i}^4 + \rho_i \cdot J \quad (3.197)$$

เมื่อ

σ คือ ค่า Stefan Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$

ε_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีของผนังที่ i

ρ_i คือ ค่าการสะท้อนรังสีของผนังที่ i

$T_{s,i}$ คือ ค่าอุณหภูมิผิวของผนังที่ i , K

J คือ ค่าพลังงานการแผ่รังสีที่ปล่อยจากผนังด้านอื่นมาตกกระทบผนังที่ i , W/m^2

F_{p-i} คือค่า Angle Factor ระหว่างผนังกับพื้นผิวที่ i

$\sum_{i=1}^n F_{p-i}$ มีค่าเท่ากับ 1

แต่สำหรับพื้นผิวเป็นของผนังส่วนใหญ่จะมีค่าการเปล่งรังสี (\mathcal{E}) ค่อนข้างสูง และมีค่าการสะท้อนรังสีต่ำ เช่นผนังสีดำ ($\epsilon_{wall} \approx 1$ และ $\rho_{wall} \approx 0$) และผนังด้านอื่น จึงสามารถตัดค่าของการสะท้อนรังสีทิ้งไปได้ และถ้าผิวภายในห้องเป็นผิวสีดำ ค่าของ unirradiant mean radiant temperature ก็สามารถหาได้โดยใช้สัมพัทธ์ต่อไปนี้คือ

$$T_{umrt} = \left[(t_1 + 273)^4 \cdot F_{p-1} + (t_2 + 273)^4 \cdot F_{p-2} + \dots + (t_n + 273)^4 \cdot F_{p-N} \right]^{0.25} - 273^\circ C \quad (3.198)$$

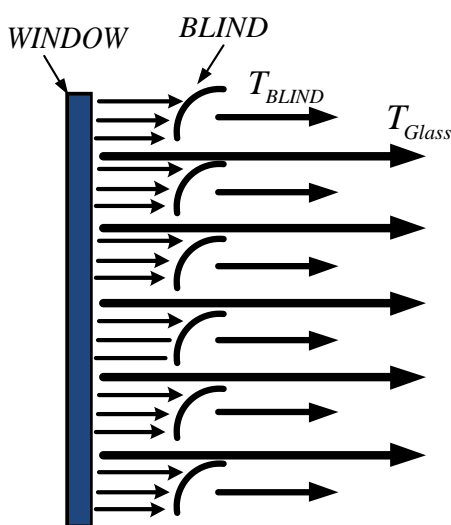
จากสมการที่ 3.198 จะเห็นได้ว่าค่าของยกกำลังสี่ของค่า unirradiant mean radiant temperature จะมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวของสิ่งแวดล้อมยกกำลังสี่ แล้วถ่วงด้วยน้ำหนักของค่า Angle Factor นั้นเอง สำหรับสมการที่ 3.198 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$T_{umrt} = \left[\sum_{i=1}^N F_{p \rightarrow i} (T_i + 273)^4 \right]^{0.25} - 273^\circ C \quad (3.199)$$

เมื่อ

T_i คือค่า อุณหภูมิของผิว i , $^\circ C$

F_{p-i} คือค่า Angle Factor ระหว่างผนังกับพื้นผิวที่ i



รูปที่ 3.24 การแผ่รังสีคลื่นยาวออกจากกระจก และมู่ลี่ มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ

สำหรับพื้นผิวภายในที่เป็นหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่อยู่ด้านหลังกระจก อุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ จะมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากลักษณะของการวางตัวของใบมู่ลี่ที่อยู่ด้านหลังของหน้าต่างกระจก โดยเฉพาะเมื่อมีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ จึงส่งผลทำให้ความร้อนจากรังสีคลื่นยาวที่ถ่ายเทออกมาจากผนังที่เป็นหน้าต่างกระจก และมู่ลี่มีค่าไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ดังนั้นการหาค่าอุณหภูมิผิวของผนังด้านที่มีค่าอุณหภูมิผิวไม่สม่ำเสมอ อย่างเช่น ผนังด้านที่เป็นกระจก และมู่ลี่ สามารถหาได้โดยการรวมผลของการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ออกมาจากกระจก และมู่ลี่ ตามสัดส่วนของพื้นที่ฉาย แล้วทำการเฉลี่ยค่าของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (T_{eff}) โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ฉายของแต่ละพื้นผิว ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของกระจก และมู่ลี่ มีค่าการเปล่งรังสีเท่ากัน จะได้เป็น

$$A_{Total} \cdot T_{eff}^4 = A_b \cdot T_b^4 + A_g \cdot T_g^4 \quad (3.200)$$

เมื่อ

A_b คือค่า พื้นที่ฉายของผิวของมู่ลี่, m^2

A_g คือค่า พื้นที่ฉายของผิวของกระจก, m^2

A_{Total} คือ ค่าพื้นที่ฉายรวมของผิวของกระจก และมู่ลี่, m^2 โดยที่ $A_{Total} = A_b + A_g$

T_{eff} คือ ค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าของกระจก และมู่ลี่, K

T_b คือ ค่าอุณหภูมิของผิวมู่ลี่, K

T_g คือ ค่าอุณหภูมิของผิวกระจก, K

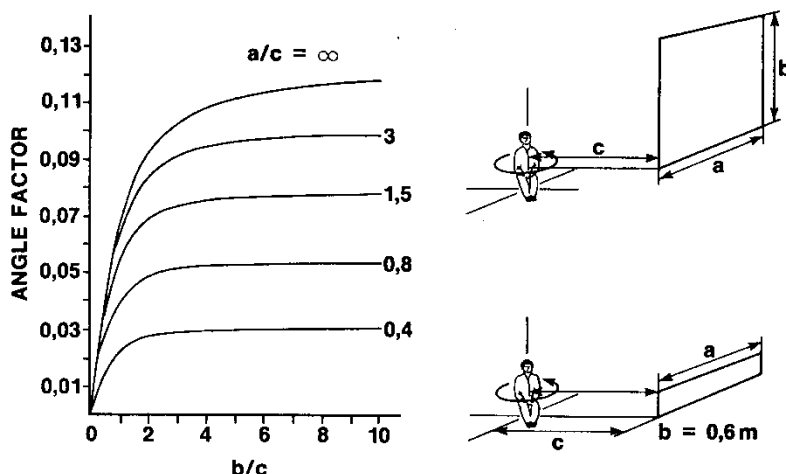
จัดรูปใหม่สมการ 3.200 ใหม่จะได้เป็น

$$T_{eff}^4 = \frac{A_b}{A_{Total}} \cdot T_b^4 + \left(\frac{A_{Total} - A_b}{A_{Total}} \right) \cdot T_g^4 \quad (3.201)$$

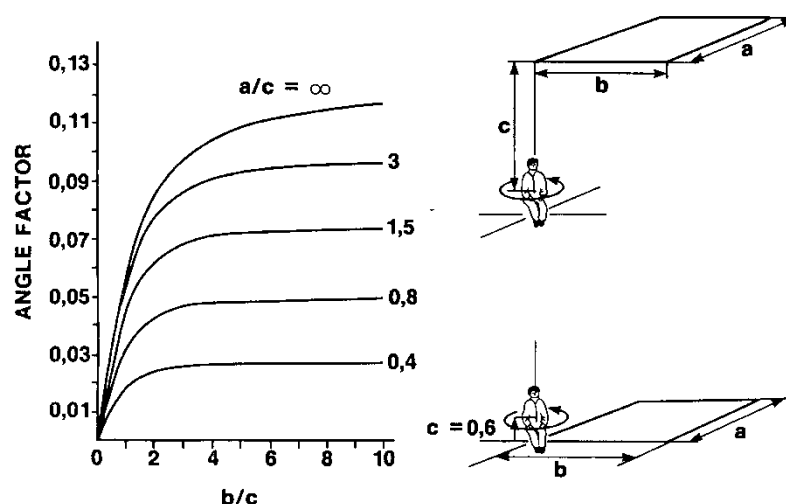
เมื่อกำหนดให้ $F_{sh} = \frac{A_b}{A_{Total}}$ ดังนั้นค่าอุณหภูมิเทียบเท่าของกระจก และมู่ลี่ สามารถเขียนได้เป็น

$$T_{eff} = \left[F_{sh} \cdot T_b^4 + (1 - F_{sh}) \cdot T_g^4 \right]^{0.25} \quad (3.202)$$

เมื่อ F_{sh} คือค่า shading fraction



รูปที่ 3.25 ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวดิ่ง



รูปที่ 3.26 ค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน

สำหรับค่า Angle Factor สำหรับคนในทำนั่ง และทำยืน โดยปรกติสามารถหาได้จากแผนภูมิรูปภาพของ Fanger[18] ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.26 แต่เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยตามข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด แล้วนำมาคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลในการวิเคราะห์ค่อนข้างมาก จึงทำให้การหาค่า angle factor ที่ได้จากแผนภูมินั้นไม่สะดวก และยังก่อให้เกิดความผิดพลาดจากการอ่านได้ ในปี พ.ศ. 2535 Cannistraro[9] ได้พัฒนาวิธีการสำหรับหาค่า angle factor ให้อยู่ในรูปของสมการซึ่งเหมาะสำหรับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบเทียบความถูกต้องกับแผนภูมิของ Fanger[18] พบว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1% ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$F_{p-n} = F_{\max} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-(a/c)}{\tau}\right) \right] \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-(b/c)}{\gamma}\right) \right] \quad (3.203)$$

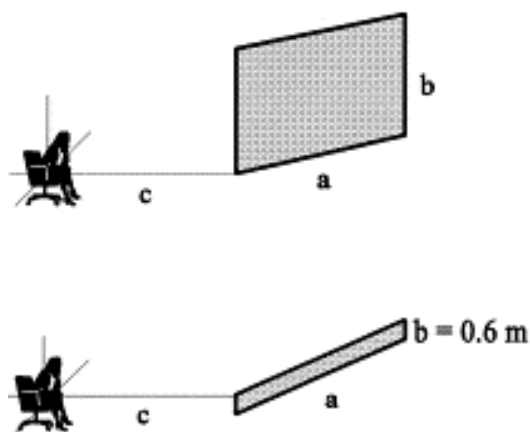
$$\text{โดยที่ } \tau = A + B \frac{a}{c} \quad (3.204)$$

$$\text{และ } \gamma = C + D + \frac{b}{c} + E \frac{a}{c} \quad (3.205)$$

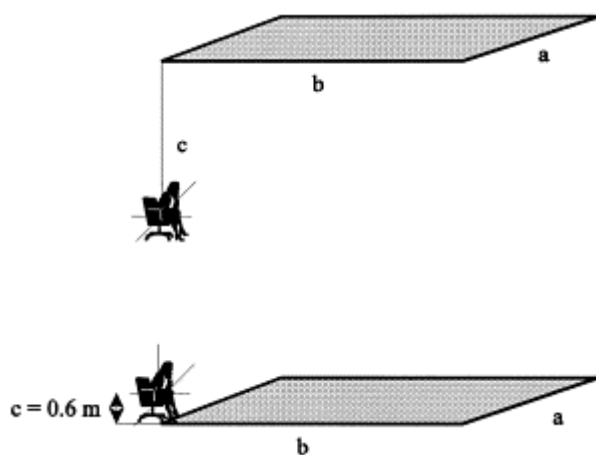
เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ A, B, C, D, E และ F_{\max} คือค่าตัวแปรที่ขึ้นกับตำแหน่งบนพื้นผิวในแต่ละผนังเทียบกับตำแหน่ง และท่าทางของคน (นั่ง หรือยืน) ส่วนสัมประสิทธิ์ a, b และ c เป็นตัวแปรที่กำหนดลักษณะรูปร่างของพื้นผิวภายใน (กว้าง สูง และระยะห่าง) เทียบกับตำแหน่งของคน ซึ่งสามารถหาได้จาก ตารางที่ 3.5 ประกอบการพิจารณาจากรูปที่ 3.27 ก ถึง 3.27 ง

ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ A, B, C, D, E และ F_{\max}

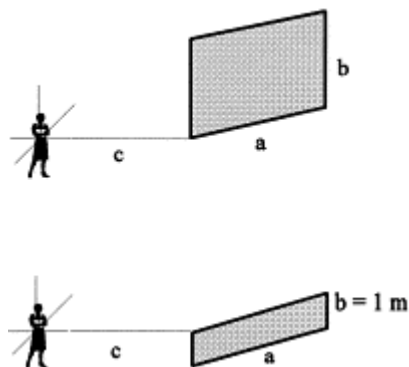
อ้างอิงรูปที่	F_{\max}	A	B	C	D	E
3.27 ก	0.118	1.21590	0.16890	0.71739	0.08733	0.05217
3.27 ข	0.116	1.39569	0.013021	0.95093	0.07967	0.05458
3.27 ค	0.120	1.24186	0.16730	0.61648	0.08165	0.05128
3.27 ง	0.116	1.24186	0.12788	1.22643	0.04621	0.04434



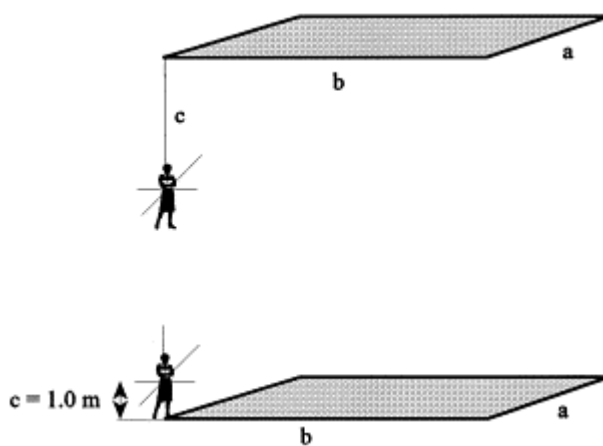
รูปที่ 3.27 ก แสดงตำแหน่งคนในท่า นั่ง เทียบกับผนังตั้งฉากในตำแหน่งสูงกว่าและต่ำกว่าศูนย์กลางของคน



รูปที่ 3.27 ข แสดงตำแหน่งคนในที่นั่งเทียบกับผนังระนาบด้านบน และด้านล่าง ในตำแหน่งสูงกว่า และต่ำกว่าศูนย์กลางของคน



รูปที่ 3.27 ค แสดงตำแหน่งคนในทำยืนเทียบกับผนังตั้งฉากในตำแหน่งสูงกว่าและต่ำกว่าศูนย์กลางของคน



รูปที่ 3.27 ง แสดงตำแหน่งคนในที่นั่งเทียบกับผนังระนาบด้านบน และด้านล่าง ในตำแหน่งสูงกว่า และต่ำกว่าศูนย์กลางของคน

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความสบายเชิงความร้อนภายใต้สิ่งแวดล้อมภายในอาคารนั้น จะมีผลกระทบจากตัวแปรหลายตัวแปรด้วยกัน ซึ่งได้แก่ค่าของอุณหภูมิอากาศ ความชื้น และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาภายในอาคาร โดยเฉพาะผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจก(หน้าต่างกระจก และมู่ลี่) เข้ามาภายในอาคารนั้นจะมีผลกระทบอย่างมากต่อผู้อยู่อาศัย โดยเฉพาะกรณีที่ผู้อยู่อาศัยอยู่ใกล้กับระบบหน้าต่างกระจก โดยผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างระบบต่างกระจกจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีผลกระทบทันทีที่ได้แก่ผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร และส่วนที่เป็นผลจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ผนังของกระจกและผนังภายในของอาคารซึ่งในเวลาต่อมาจะแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวออกมา

ซึ่งปริมาณของค่าการแผ่รังสีแบบตรงจากดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยผิวหนังของผู้อยู่อาศัยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ คุณสมบัติของหน้าต่างกระจก ตำแหน่งของผู้อยู่อาศัยในอาคาร และค่าการดูดกลืนของผิวหนังคน และส่วนการแผ่รังสีคลื่นยาวจะเกิดจากผลกระทบของค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่ร้อนขึ้นอันเนื่องมาจากการสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ในเนื้อของผนังกระจก และจะเปล่งรังสีความร้อนคลื่นยาวออกมาในภายหลัง

ดังนั้นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ใช้เพื่อหาค่าดัชนีชี้ความสบายเชิงความร้อน จึงต้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยในกรณีที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งจะเรียกว่า ค่า unirradiated mean radiant temperature, T_{umrt} (ตามที่แสดงไว้ในสมการที่ 3.198) และส่วนที่สองคือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยในกรณีที่รวมผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์และการแผ่รังสีคลื่นยาวของผนังภายในอาคารซึ่งเรียกว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย, T_{mrt} โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_{umrt} + 273)^4 + \frac{a_p}{(\epsilon_p \cdot \sigma)} \left(\sum_{i=1}^N F_{p-i} I_d + f_p(\alpha, \beta) \cdot I_b \right) \right]^{0.25} - 273 \quad (3.206)$$

โดยที่รังสีแบบกระจายจากท้องฟ้า และพื้นดิน ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่สามารถคำนวณได้โดย

$$I_d = T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,gnd}^{fH} \cdot I_{diff,gnd} \quad (3.207)$$

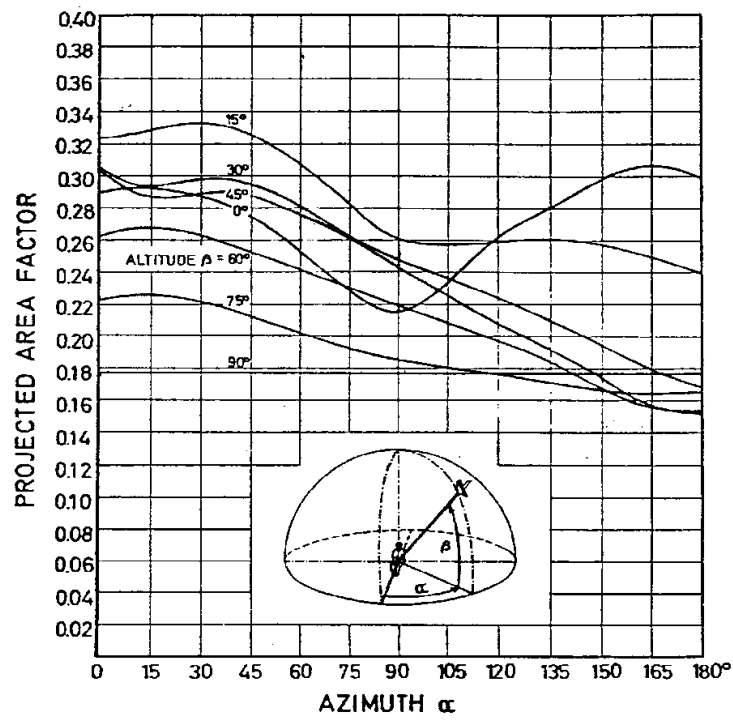
และ รังสีแบบตรงที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ สามารถคำนวณได้โดย

$$I_b = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot I_{dir} \quad (3.208)$$

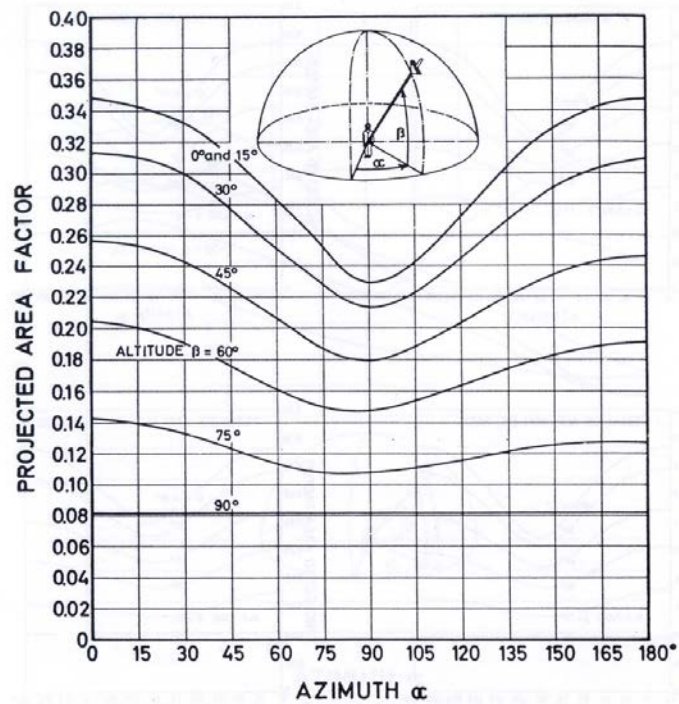
เมื่อ

a_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน

ε_p	คือ ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน
σ	คือ ค่า Stefan Boltzmann constant, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
f_p	คือ ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาพฉายผิวคนต่อพื้นที่รับแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์
I_d	คือ ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวคน (W / m^2)
I_b	คือ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามากระทบผิวคน (W / m^2)
I_{dir}	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W / m^2
$I_{diff,sky}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากท้องฟ้าที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W / m^2
$I_{diff,grnd}$	คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากพื้นดินที่ตกกระทบระบบหน้าต่างกระจก, W / m^2
$T_{\{1,M\}}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีตรงด้านหน้าของระบบหน้าต่างกระจกแบบ directional hemispherical
$T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีกระจายจากท้องฟ้าที่ด้านหน้าของระบบหน้าต่างกระจกแบบ directional-hemispherical
$T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีกระจายจากพื้นดินที่ด้านหน้าของระบบหน้าต่างกระจกแบบ directional-hemispherical



รูปที่ 3.28 ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะท่านั่ง



รูปที่ 3.29 ค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำยืน[19]

สำหรับค่า Project area factor สำหรับคน โดยปรกติสามารถหาได้จากแผนภูมิรูปภาพของ Fanger[18] ดังแสดงในรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29 ซึ่งจะขึ้นกับค่ามุม azimuth (α) และค่ามุม

altitude (β) ระหว่างรังสีแสงอาทิตย์ กับคนที่ถูกรังสีตกกระทบ รวมทั้งลักษณะท่าทางของผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยตามข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ แล้วนำมาคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีจำนวนข้อมูลค่อนข้างมาก จึงทำให้การหาค่า Project area factor ที่ได้จากแผนภูมินั้นไม่สะดวก และยังก่อให้เกิดความผิดพลาดจากการอ่านได้ ในปี พ.ศ. 2534 Rizzo[36] ได้พัฒนาวิธีการสำหรับหาค่า Project area factor สำหรับคนในท่านั่ง และทำยืน โดยนำค่าที่ได้จากการอ่านแผนภูมิของ Fanger[18] ในแต่ละค่ามุม azimuth (α) และค่ามุม altitude (β) มาสร้างเป็นสมการประมาณค่าแบบพหุนาม ซึ่งสมการที่ได้จะเหมาะสำหรับการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ และเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับแผนภูมิของ Fanger[18] พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า 2% ซึ่งค่า Project area factor สามารถคำนวณได้โดย

สำหรับคนในท่านั่ง

$$f_p(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^4 A_i(\beta) \cdot \alpha^i \quad (3.209)$$

เมื่อ

$$A_i(\beta) = \sum_{j=0}^3 A_{ij} \cdot \beta^j \quad (3.210)$$

สำหรับคนในทำยืน

$$f_p(\alpha, \beta) = \sum_{i=0}^4 B_i(\beta) \cdot \alpha^i \quad (3.211)$$

เมื่อ

$$B_i(\beta) = \sum_{j=0}^3 B_{ij} \cdot \beta^j \quad (3.212)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ A_{ij} และ B_{ij} สามารถแสดงดังในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์ A_{ij} และ B_{ij} ที่ใช้ในการกำหนดค่า Project area factor

j	I				
	0	1	2	3	4
สัมประสิทธิ์ A_{ij} สำหรับคนในที่นั่ง					
0	$+2.884 \times 10^{-1}$	$+2.225 \times 10^{-3}$	-9.292×10^{-5}	$+9.027 \times 10^{-7}$	-2.517×10^{-9}
1	$+2.225 \times 10^{-3}$	-7.653×10^{-5}	$+4.021 \times 10^{-6}$	-4.632×10^{-8}	$+1.380 \times 10^{-10}$
2	-5.472×10^{-5}	$+7.286 \times 10^{-7}$	-6.215×10^{-8}	$+7.690 \times 10^{-10}$	-2.341×10^{-12}
3	$+1.802 \times 10^{-7}$	-1.457×10^{-9}	$+3.152 \times 10^{-10}$	-4.015×10^{-12}	$+1.231 \times 10^{-14}$
สัมประสิทธิ์ B_{ij} สำหรับคนในท่ายืน					
0	$+3.453 \times 10^{-1}$	$+1.945 \times 10^{-3}$	-1.023×10^{-4}	$+1.003 \times 10^{-6}$	-2.747×10^{-9}
1	$+6.930 \times 10^{-4}$	$+1.122 \times 10^{-5}$	-1.502×10^{-7}	$+4.040 \times 10^{-10}$	$+8.461 \times 10^{-13}$
2	-7.319×10^{-5}	-1.288×10^{-6}	$+3.036 \times 10^{-8}$	-3.3036×10^{-10}	$+7.489 \times 10^{-13}$
3	$+3.675 \times 10^{-7}$	-1.030×10^{-8}	-2.517×10^{-10}	$+1.969 \times 10^{-12}$	-4.715×10^{-15}

3.5.3 การหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยการตรวจวัด

การหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยด้วยการตรวจวัดทั้งกรณีที่ไม่มีการรังสีมาตกกระทบ และที่มีรังสีมาตกกระทบนั้นจะเป็นการหาค่าโดยทางอ้อม ซึ่งต้องอาศัยการตรวจวัดค่าตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการคำนวณย้อนกลับมาเป็นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย โดยสามารถตรวจวัดได้หลายวิธี สำหรับการหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ไม่มีการรังสีมาตกกระทบนั้น สามารถทำได้โดยทำการตรวจวัดอุณหภูมิผิวของผนังห้อง โดยแบ่งผนังห้องในแต่ละด้านออกเป็นพื้นที่เล็กๆ หลากๆพื้นที่พร้อมกันนั้นยังต้องทำการคำนวณค่า angle factor ซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง และลักษณะท่าทางของคนที่อยู่ภายใน และใช้สมการที่ 3.205 คำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยออกมา นอกจากนี้การหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยสามารถใช้เครื่องตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ แล้วทำการคำนวณย้อนกลับมาเป็นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย โดยอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟถูกนิยามให้เป็น ค่าอุณหภูมิสมำเสมอของสภาพแวดล้อมปิดที่ให้ผลของการแผ่รังสี และการพาความร้อนจากคนได้เหมือนกับสภาพแวดล้อมจริงที่มีสภาวะไม่สมำเสมอ เครื่องตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟจะมีเป็นเซนเซอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงรีสีเทา ทั้งนี้ก็เพื่อให้อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี และการพาความร้อนใกล้เคียงกับคนมากที่สุด มีความยาวเท่ากับ 160 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 54 มิลลิเมตร ภายในจะติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์อยู่ตรงแกนกลาง โดยเซนเซอร์จะทำการสมดุลความร้อนโดยการพาความร้อน และการแผ่รังสีที่รอบนอกผิวกับอุณหภูมิที่อยู่ภายในของเซนเซอร์ สมการสมดุลพลังงานที่โอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ สามารถหาได้โดย

$$\varepsilon_g \sigma (T_o + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4 + h_{cg} (T_o - T_a) = 0 \quad (3.213)$$

เมื่อ

$$h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} \\ 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25} \end{cases} \quad (3.214)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (3.215)$$

เมื่อ T_o คือ อุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ, $^\circ\text{C}$

T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, $^\circ\text{C}$

ε_g คือ ค่าการเปล่งรังสีของโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.95)

h_{cg} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์,

$\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$

σ คือ ค่า Stefan Boltzmann constant, $\text{W/m}^2\text{-K}^4$

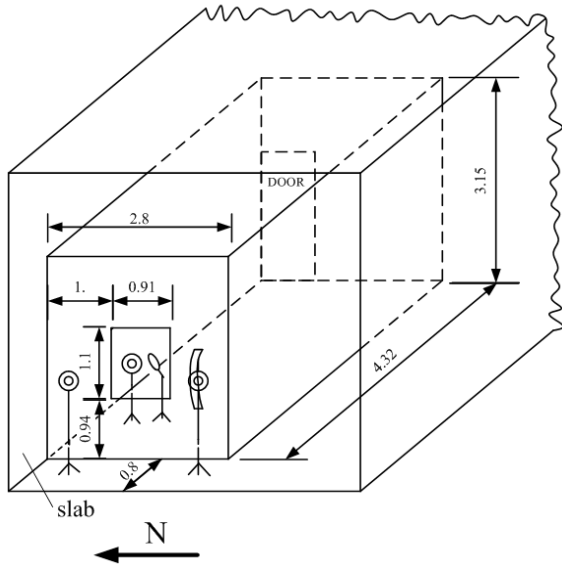
บทที่ 4

การทดลอง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

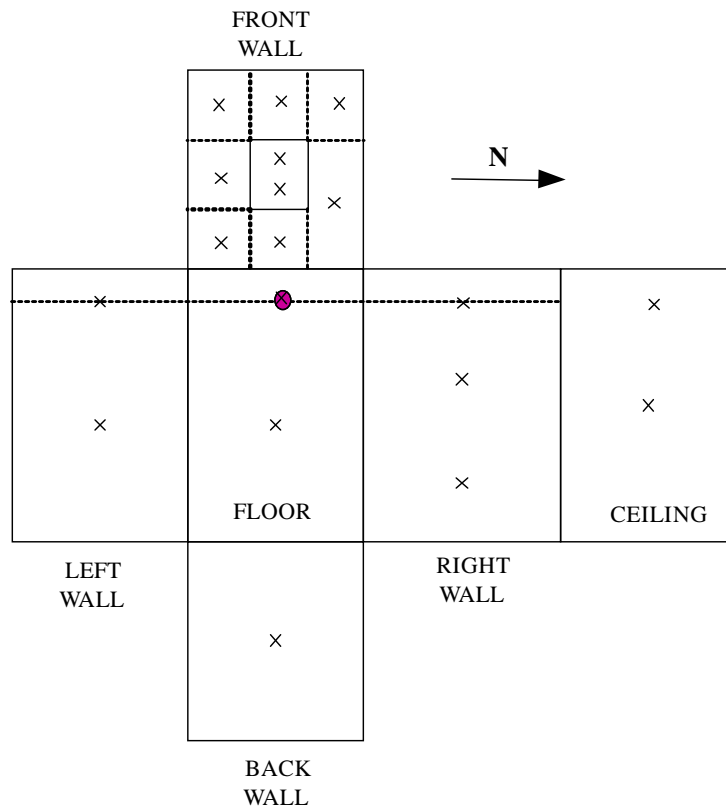
ในบทนี้จะกล่าวถึง การทดลอง การวิเคราะห์ความผิดพลาดของการทดลอง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ในการทดลองได้ทำการเปิดเครื่องปรับอากาศเพื่อรักษาอุณหภูมิด้านในห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียส และกำหนดให้แบบจำลองของผู้อาศัยแต่งตัวแบบผู้ทำงานปกติ (office) (Clothing insulation = 0.5 clo) และมีการทำงานแบบนั่งทำงานในสำนักงาน (1.2 met (1 met = 58 W/m²)) ตำแหน่งของหัววัด อุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ อุณหภูมิอากาศ ความชื้น ความเร็วลม และหัววัดรังสีสมมาตร จะถูกตั้งห่างจากผิวหนังด้านในของหน้าต่างกระจกเป็นระยะ 0.2 เมตร โดยหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเพียงท่ามมเป็น 30 องศา จากแนวตั้งเพื่อจำลองสภาพคนนั่งหันด้านข้างเข้าสู่หน้าต่างกระจก ทำการติดตั้งหัววัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ด้านนอก และด้านใน บนขาตั้งแบบสามขาโดยติดตั้งห่างจากผนังด้านนอกออกมาเป็นระยะ 0.8 เมตร และติดตั้งห่างจากผิวกระจกด้านในออกมาเป็นระยะ 0.2 เมตร ใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด J (มีค่าความไม่แน่นอน $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) สำหรับวัดค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก และอุณหภูมิผิวของกระจก ผิวของใบมู่ลี่ และอุณหภูมิผิวของผนังต่างๆ ภายในห้องทดลอง รายละเอียดของห้องทดลอง และเครื่องมือวัดต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ห้องทดลอง

ห้องทดลองในการศึกษานี้ถูกสร้างขึ้นที่ชั้น 4 อาคารฮันส์ บันดลิ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องมีขนาดหน้ากว้าง (ด้านที่ติดหน้าต่างกระจกและหันออกนอกอาคาร) 2.8 เมตร สูง 3.15 เมตร และมีความยาวของห้องทดลอง 4.32 เมตร ผนังสามด้านและเพดานเป็นผนังยิปซัม 2 ชั้นบุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านที่ติดตั้งหน้าต่างกระจกนั้นอยู่ด้านทิศตะวันตก ด้านนอกเป็นผนังอะลูมิเนียม ผนังด้านในเป็นผนังยิปซัมบุด้วยใยแก้วหนา 2 นิ้ว ผนังด้านในและเพดานทาด้วยสีดำ หน้าต่างกระจกที่ทดสอบมีขนาด กว้าง 0.9 เมตร สูง 1.1 เมตร ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดไว้ให้ขอบด้านล่างอยู่สูงกว่าพื้นเป็นระยะ 0.94 เมตร อุณหภูมิด้านในห้องถูกควบคุมด้วยเครื่องปรับอากาศ ด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ในการสร้างห้อง ทำให้หน้าต่างกระจกถูกบังจากขอบอาคารที่อยู่ด้านข้างและด้านบน ตัวหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งห่างจากขอบอาคารประมาณ 0.8 เมตร รูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะของห้องทดลอง รูปที่ 4.2 แสดงถึงตำแหน่งการติดตั้งตัววัดเพื่อทำการวัดอุณหภูมิผิวผนังด้านใน



รูปที่ 4.1 ลักษณะของห้องทดลอง



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งการวัดอุณหภูมิผิวของผนังด้านใน

4.1.1 เครื่องมือวัด

4.1.1.1 เครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์

อุปกรณ์การวัดประกอบด้วยเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (pyranometer) ของบริษัท Kipp&Zonen รุ่น CMP6 จำนวน 1 เครื่อง และรุ่น CM6B จำนวน 2 เครื่อง พร้อมแหวนบังเงา (shading ring) ที่จัดสร้างขึ้น 1 ชุด โดยค่า sensitivity ของ pyranometer ทั้งสามเครื่องมีค่าเท่ากับ $11.51 \mu V/W/m^2$ $10.95 \mu V/W/m^2$ และ $14.11 \mu V/W/m^2$ ตามลำดับ มีค่าตอบสนองในระหว่างความยาวคลื่นแสง 310 ถึง 2,800 นาโนเมตร มีค่าความเป็นเชิงเส้น 99% ในช่วง 0 ถึง $1000 W/m^2$ ระยะเวลาการตอบสนอง (ที่ 95%) เท่ากับ 18 วินาที (ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.1) โดยเครื่องวัดแสงอาทิตย์ 2 ตัว จะถูกติดตั้งอยู่ภายนอกอาคารบนขาตั้ง โดยให้หัววัดมีระยะห่างจากผนังด้านนอกของอาคารเป็นระยะ 0.8 เมตร หัววัดรังสีแสงอาทิตย์ถูกติดตั้งให้อยู่ในแนวตั้งเพื่อวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายที่ตกกระทบในระนาบแนวตั้ง เครื่องวัดอีกตัวจะถูกติดตั้งบนขาตั้งอยู่ด้านหลังหน้าต่างกระจกมีระยะห่างจากกึ่งกลางกระจกเป็นระยะ 0.2 เมตร เพื่อวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกเข้ามาในห้อง ทำการเก็บข้อมูลทุก 30 วินาที ตั้งแต่เวลาประมาณ 5:00 น. ถึง 19:00 น. ด้วยเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ของบริษัท NI รุ่น 9211 สามารถรับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาล็อกอยู่ในช่วง $\pm 80 mV$ มีค่าความละเอียดของค่าที่วัดเท่ากับ 24 บิต รูปที่ 4.3 แสดงถึงการติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ภายนอกพร้อมกับอุปกรณ์บังเงา



รูปที่ 4.3 การติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์พร้อมกับอุปกรณ์บังเงาที่ติดตั้งภายนอกอาคาร

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคสำหรับเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

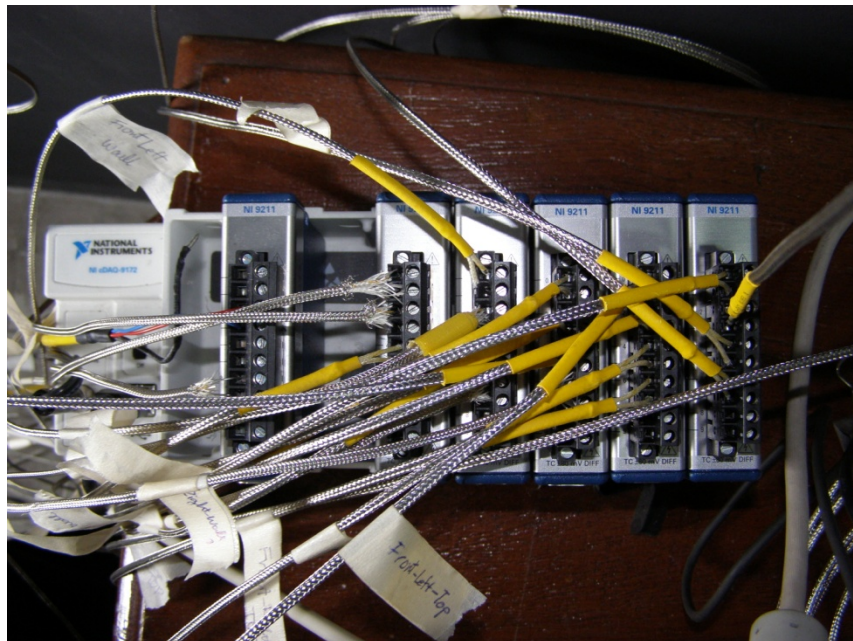
	รุ่น CM6B	รุ่น CMP6
Spectral range	310-2800 nm	310-2800 nm
Sensitivity	ระหว่าง 9 และ 15 $\mu V / W \cdot m^{-2}$	ระหว่าง 5 และ 16 $\mu V / W \cdot m^{-2}$
Response time	< 18 วินาที (95%)	< 18 วินาที (95%)
Non-linearity	$\pm 1.2\%$ ($< 1000 W \cdot m^{-2}$)	$\pm 1\%$ ($< 1000 W \cdot m^{-2}$)
Temperature dependence of sensitivity	$\pm 2\%$ ($-10^{\circ}C$ to $40^{\circ}C$)	$\pm 4\%$ ($-10^{\circ}C$ to $40^{\circ}C$)
Directional error(at 80° with $1000 W/m^2$ beam)	$\pm 20 W / m^2$ (beam $1000 W / m^2$)	$\pm 20 W / m^2$ (beam $1000 W / m^2$)
Tilt error	$\pm 1\%$ (beam $1000 W / m^2$)	$\pm 1\%$ (beam $1000 W / m^2$)
Zero offset due to FIR (ventilated with CV2)	$\pm 15 W / m^2$ ที่ $200 W/m^2$ net thermal	$\pm 15 W / m^2$ ที่ $200 W/m^2$ net thermal
Zero offset due to temperature change	$\pm 4 W / m^2$ ที่ $5 K/hr$	$\pm 4 W / m^2$ ที่ $5 K/hr$
Operating temperature	$-40^{\circ}C$ to $80^{\circ}C$	$-40^{\circ}C$ to $80^{\circ}C$
Irradiance	0 – $1,400 W / m^2$	0 – $2,000 W / m^2$
Non-stability	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$

4.1.1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและเครื่องจัดเก็บข้อมูล

อุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิของผิวหนังต่างกระจกทั้งด้านนอกและด้านใน รวมทั้งอุณหภูมิผิวของผนังห้องและเพดานทำการวัดโดยใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด J (มีค่าความผิดพลาด $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ติดที่ผนังต่าง ๆ โดยใช้เทปกาวชนิดพิเศษที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนความร้อนต่ำ สำหรับการวัดอุณหภูมิของผิวกระจกมีการติดแผ่นบังเงาขนาดเล็กเพื่อลดผลกระทบจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบโดยตรงกับตัวเทอร์มอคัปเปิล ค่าอุณหภูมิที่วัดด้วยเทอร์มอคัปเปิลจะถูกสอบเทียบกับตัวตรวจรู้อุณหภูมิที่มีความละเอียดและแม่นยำ (มีความแม่นยำ $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ค่าอุณหภูมิของผนังต่าง ๆ ถูกจัดเก็บด้วยเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) ของบริษัท National Instrument รุ่น NI9211 สามารถรับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาล็อกอยู่ในช่วง $\pm 80 \text{ mV}$ มีการชดเชยจุดต่อเย็น (cold junction compensation) ในตัว ย่านการวัดอยู่ในช่วง -40 ถึง $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าความละเอียดของค่าที่วัดเท่ากับ 24 บิต รูปที่ 4.4 แสดงถึงเทอร์มอคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวของห้อง และรูปที่ 4.5 แสดงถึงเครื่องจัดเก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์และค่าอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4.4 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวห้อง



รูปที่ 4.5 เครื่องบันทึกข้อมูลแสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิต่างๆ

4.1.1.3 เครื่องวัดความสบายเชิงความร้อน

สำหรับสภาวะอากาศภายในห้องที่ส่งผลต่อความสบายเชิงความร้อน จะถูกตรวจวัดด้วยหัววัด และบันทึกค่าด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล ของบริษัท Innova จำกัด เครื่องบันทึกข้อมูลจะใช้รุ่น Innova 1221 พร้อมติดตั้งมอดูลสำหรับตรวจวัด อุณหภูมิอากาศ ความเร็วอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ operative โดยที่เครื่องบันทึกจะรับข้อมูลการวัดจากหัววัดชนิดต่างๆ ที่ถูกออกแบบเฉพาะให้เชื่อมต่อกับมอดูลของเครื่อง เครื่องดังกล่าวจะแสดงข้อมูลและนำข้อมูลที่ได้รับทำการประมวลข้อมูลผ่าน software เฉพาะเปลี่ยนค่าข้อมูลการวัดมาเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับดัชนีแสดงค่าความสบายเชิงความร้อน รูปที่ 4.6 แสดงถึงเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน

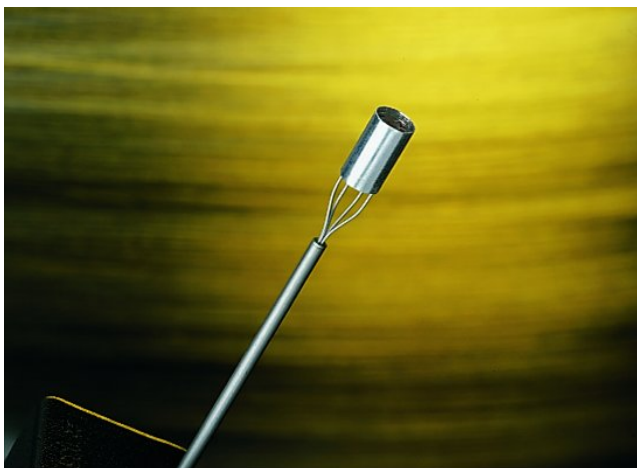


รูปที่ 4.6 เครื่องบันทึกข้อมูลความสบายเชิงความร้อนที่แสดงด้านหน้า และด้านหลังของมอดูล

4.1.1.4 หัววัดอุณหภูมิอากาศ

เป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน เป็นหัววัดรุ่น MM0034 มีช่วงการวัดระหว่าง -20 ถึง 50 °C มีค่าความแม่นยำเท่ากับ ± 0.2 °C ในช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 40 °C มีแผ่นอลูมิเนียมทรงกระบอกปลายเปิดล้อมรอบหัววัด เพื่อป้องกันการผลกระทบจากการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งหัววัดดังกล่าวใช้เป็นหัววัดอุณหภูมิอากาศภายในห้อง และยังใช้เป็นตัวสอบเทียบหัววัดอุณหภูมิอากาศอื่น รูปที่ 4.7 แสดงถึงหัววัดอุณหภูมิอากาศที่ใช้

สำหรับอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายนอกใช้เครื่องวัดแบบมือถือและใช้เทอร์มอคัปเปิลที่ได้รับการสอบเทียบมาเป็นตัววัด รูปที่ 4.8 แสดงถึงเครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบมือถือ



รูปที่ 4.7 หัววัดอุณหภูมิอากาศ



รูปที่ 4.8 เครื่องวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศแบบมือถือ

4.1.1.5 หัววัดอุณหภูมิผิว

เป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน เป็นหัววัดรุ่น MM0035 มีช่วงการวัดระหว่าง -20 ถึง 100 °C มีค่าความแม่นยำเท่ากับ ± 0.5 °C ในช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 40 °C หัววัดทำด้วยวัสดุที่มีความความจุความร้อนต่ำ แต่มีค่าการนำความร้อนสูงระหว่างหัววัดกับแกนด้ามจับมีการติดสปริงเพื่อลดการนำความร้อน รูปที่ 4.9 แสดงถึงหัววัดอุณหภูมิผิว



รูปที่ 4.9 หัววัดอุณหภูมิผิว

4.1.1.6 หัววัดความชื้น

เป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน เป็นหัววัดรุ่น MM0037 จะใช้สำหรับวัดค่าความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ นอกจากนี้ยังสามารถประมวลผลออกมาเป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล รุ่น 1221 โดยตรวจวัดร่วมกับค่าอุณหภูมิอากาศ มีช่วงการวัดของผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิอากาศ และค่าอุณหภูมิน้ำค้างน้อยกว่า 25°C มีค่าความแม่นยำที่ของผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิอากาศ และค่าอุณหภูมิน้ำค้างน้อยกว่า 10 K เท่ากับ $\pm 0.5\text{ K}$ หรือ $\pm 0.05\text{ kPa}$ และถ้าผลต่างระหว่างค่าของอุณหภูมิอากาศ และค่าอุณหภูมิน้ำค้างอยู่ในช่วงระหว่าง 10 K ถึง 25 K จะมีค่าความแม่นยำเท่ากับ $\pm 1\text{ K}$ หรือ $\pm 0.1\text{ kPa}$ รูปที่ 4.10 แสดงถึงหัววัดความชื้นของอากาศ



รูปที่ 4.10 หัววัดความชื้น

4.1.1.7 หัววัดความเร็วลม

เป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน เป็นหัววัดรุ่น MM0038 มีหลักการตรวจวัดความเร็วแบบอุณหภูมิต่างคงที่ สามารถวัดความเร็วได้ที่อุณหภูมิต่ำได้ดี มีช่วงการวัดระหว่าง 0 ถึง 10 m/s มีความแม่นยำเท่ากับ $\pm(0.05v_a + 0.05) \text{ m/s}$ (v_a คือค่าความเร็วลม, m/s) ที่ความเร็วลมน้อยกว่า 1 m/s และมีความแม่นยำเท่ากับ $\pm 0.1v_a \text{ m/s}$ ที่ความเร็วลมระหว่าง 1 m/s ถึง 10 m/s รูปที่ 4.11 แสดงถึงหัววัดความเร็วลม



รูปที่ 4.11 หัววัดความเร็วลม

4.1.1.8 หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ

หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเป็นหัววัดเฉพาะที่สามารถต่อเข้ากับเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน สำหรับหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะมีลักษณะเป็นรูปวงรี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มม. ยาว 160 มม. ตัวหัววัดถูกออกแบบให้มีค่าอัตราส่วนของการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีกับการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนเหมือนกับของร่างกายมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 การเอียงท่ามุมของหัววัดจะจำลองสภาพของมนุษย์ที่อยู่ในตำแหน่งยืน นั่งและนอน หากหัววัดถูกติดตั้งชี้ขึ้น (อยู่ในแนวตั้ง) จะจำลองสภาพคนยืนอยู่ หากหัววัดถูกเอียงท่ามุม 30 องศา กับแนวตั้ง จะจำลองสภาพของคนกำลังอยู่ในท่านั่ง และหากหัววัดถูกเอียงอยู่ในแนวนอน (ท่ามุม 90 องศา กับแนวตั้ง) จะจำลองสภาพคนกำลังนอน ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่อยู่ในตำแหน่งจำลองสภาพนั่ง



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งของหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่มุมเอียงต่างๆ ที่จำลองลักษณะของคน[43]

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงถึงลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดในห้องทดลอง และลักษณะการวัดของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่



รูปที่ 4.14 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดภายในห้องทดลอง



รูปที่ 4.15 ลักษณะของหน้าต่างกระจกซึ่งมีผู้ติดตั้งพร้อมเครื่องมือวัด

4.2 การทดลอง

การทดลองถูกกระทำขึ้นในห้องทดลอง ห้องทดลองถูกสร้างขึ้นจากส่วนโถงและระเบียง ชั้น 4 ของอาคารตึกฮันส์ บันตลี เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งของสถานที่ซึ่งใช้สร้างห้องทดลอง ทำให้ต้องมีการใช้เวลาพอสมควรในการศึกษาและปรับการใช้เครื่องมือวัดให้สอดคล้องกับตำแหน่งและการบังแดดจากขอบอาคารด้านข้างและด้านบน และใช้เวลาส่วนหนึ่งในการปรับวิธีติดตั้งกระจก และปรับตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัด และการปรับเทียบ จากนั้นจึงทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยประมวลผลข้อมูลจากการเก็บข้อมูลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิ กับข้อมูลที่ได้จากเครื่องบันทึกและประมวลค่าความสบายเชิงความร้อน

อุปสรรคอีกส่วนหนึ่งที่พบในการทำการทดลองคือ สภาพภูมิอากาศในช่วงการวัด และตำแหน่งของห้องทดลอง เนื่องจากห้องทดลองหันหน้าไปทางทิศตะวันตก แสงอาทิตย์จะตกกระทบลงบนเครื่องมือวัดและหน้าต่างกระจกค่อนข้างน้อยในช่วงเช้าถึงประมาณ 13:00 น. เพราะรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกในช่วงดังกล่าวจะเป็นรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย ในช่วงบ่ายแสงอาทิตย์ในส่วนรังสีแบบตรงจะเริ่มตกกระทบหน้าต่างกระจกและเครื่องมือวัด จนถึง 18:00 น. ข้อจำกัดหลายอย่างจากการบังของอาคารสูงในช่วงเย็น และเมื่อทำการวัดหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่เข้าไปมู่ลี่จะทำการบังรังสีแสงอาทิตย์ที่จะมาตกกระทบหัววัดที่อยู่ภายในห้อง ทำให้การเก็บข้อมูลรังสีภายในห้องเริ่มมีข้อมูลที่เด่นชัดประมาณ 16:00 น. และเมื่อเวลาผ่านไป ตัวตึกสูง (อยู่คณะวิทยาศาสตร์จะเริ่มบังแสงอาทิตย์) ทำให้ข้อมูลการวัดที่มีคุณภาพของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่จะกระทำได้ในช่วงสั้นๆ เท่านั้น ข้อจำกัดอีกประการที่เป็นอุปสรรคของการทดลอง

คือ จากตำแหน่งที่ห้องทดลองอยู่นั้นเป็นชั้น 4 ของอาคารที่มีความสูงชันต่อชั้นสูงกว่าอาคารปกติ โดยชั้นล่างสูงประมาณ 6 เมตร และชั้น 2 ถึงชั้น 4 มีความสูงชันละ 4.5 เมตร บริเวณที่ติดตั้งจะมีลมแรงเป็นช่วงๆ โดยเฉพาะช่วงที่มีฝนตก และอุปกรณ์การวัดส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างบอบบางไม่สะดวกในการติดตั้งถาวรไว้ภายนอกห้องทดลอง ดังนั้นอุปกรณ์การวัดส่วนใหญ่จะถูกยึดติดบนขาตั้งที่เคลื่อนย้ายได้ และต้องเก็บชิ้นเวลาไม่ได้ทำการทดลองหรือเวลาไม่มีคนเฝ้าอยู่ เพราะเกรงจะเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์การวัด ทำให้ระยะเวลาจำกัดด้วยเวลาของผู้ทำการทดลอง (ด้วยไม่สามารถหิ้วเครื่องมือวัดให้วัดอย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีคนเฝ้าได้)

หน้าต่างกระจก และมู่ลี่ที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะ และค่าคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้
กระจกใส 6 มม.

กระจกใสที่ใช้จะเป็นกระจกใสหนา 6 มม. และมีค่าคุณสมบัติเชิง optic พื้นฐานดังนี้

ค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉาก 0.80

ค่าการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ตั้งฉากด้านหน้า และด้านหลัง 0.08

ค่าการดูดกลืนรังสี 0.12

ค่าการเปล่งรังสีด้านหน้า และด้านหลัง 0.84

สำหรับมู่ลี่ที่ใช้ติดตั้งกับหน้าต่างกระจกเป็นมู่ลี่ขนาดใบ 1 นิ้ว สีครีม มีการปรับมุมเอียงของใบมู่ลี่เป็น 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

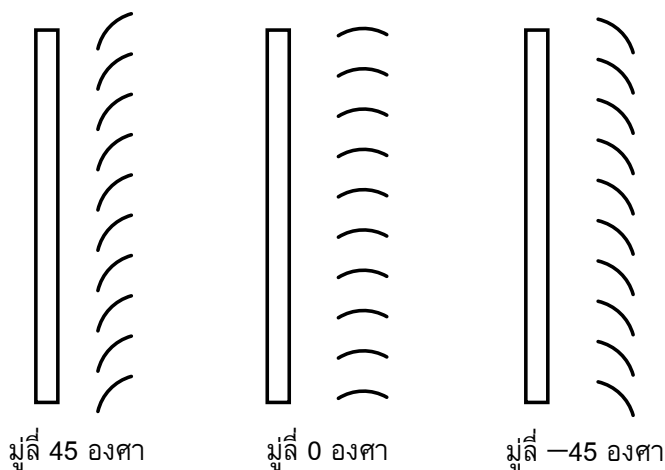
ความกว้างของใบมู่ลี่ วัดตามผิวโค้ง 25.2 มม.

ระยะห่างของใบมู่ลี่ 2 ใบ 20.0 มม.

ค่ารัศมีความโค้งของใบมู่ลี่ 74 มม.

ค่าการสะท้อนรังสี (คลื่นสั้น) 0.71

ค่าการเปล่งรังสี 0.83



รูปที่ 4.16 ลักษณะการปรับมุมใบของมู่ลี่ ที่มุมต่างๆ

การวัดกระทำโดยวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมภายนอกห้อง วัดค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายนอกห้อง วัดอุณหภูมิอากาศนอกห้อง วัดค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมในห้อง วัดค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง วัดค่าความเร็วอากาศภายในห้อง วัดค่าความชื้นของอากาศภายในห้อง วัดค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและด้านนอก วัดค่าอุณหภูมิใบมู่ลี่ (ในกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่) วัดค่าอุณหภูมิผิวที่จุดต่างๆ บนผนังด้านในทั้ง 6 ด้านของห้องทดลองเพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิผิวของห้องทดลอง และทำการวัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดทั้งหมดจะถูกประมวล และนำไปใช้เป็นส่วนข้อมูลขาเข้าของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ในการศึกษานี้จะแบ่งการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ ความคลาดเคลื่อนจากความละเอียดของเครื่องมือวัด และความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเครื่องมือวัด

4.3.1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากความละเอียดของเครื่องมือวัด

ในการทดลองของการศึกษานี้ ค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเกิดมาจากค่าความผิดพลาดของเครื่องมือ และจากค่าความผิดพลาดจากการติดตั้งของอุปกรณ์ตรวจวัด ความไม่แน่นอนรวมของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดสามารถหาได้จากวิธีการหารากที่สองของค่าความไม่แน่นอนของแต่ละส่วนยกกำลังสอง โดยค่าความผิดพลาดในการทดลองนี้จะเกิดมาจากความผิดพลาดจากการวัดค่าความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ และค่าความผิดพลาดจากการวัดค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย สำหรับค่าความผิดพลาดจาก

การวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่เกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือจะสามารถหาได้จากค่ารากที่สองของความผิดพลาดในแต่ละส่วนยกกำลังสอง ซึ่งประกอบไปด้วย ความไม่เป็นเชิงเส้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว ค่าความลาดเอียง ค่าความผิดพลาดจากทิศทาง และค่าไหลเลื่อนที่ศูนย์ของเครื่องตรวจวัดรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลของค่าความผิดพลาดต่างๆ เหล่านี้ของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์จะได้จากผู้ผลิต ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 แล้วนำมาหาค่าความไม่แน่นอนรวม ซึ่งค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องมือวัดแสงอาทิตย์รุ่น CM6B สามารถประมาณได้ประมาณ $\pm 8.23\%$ ของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ ค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องมือวัดแสงอาทิตย์รุ่น CMP6 สามารถประมาณได้ประมาณ $\pm 8.9\%$ ของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ (รายละเอียดของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก)

สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างที่มีการติดตั้งมู่ลี่จากการทำนายผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นค่าที่ได้จากความสัมพันธ์

$$I_{tran} = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot I_{direct} + T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} \cdot I_{diff,grnd} \quad (4.1)$$

และจากความสัมพันธ์ของ

$$I_{global} = I_{direct} + I_{diff,sky} + I_{diff,grnd} \quad (4.2)$$

ดังนั้น

$$I_{tran} = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot (I_{global} - I_{diff,sky} - I_{diff,grnd}) + T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} \cdot I_{diff,grnd} \quad (4.3)$$

จะเห็นได้ชัดว่าค่า I_{tran} ที่ทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเป็นฟังก์ชันของ I_{global} , $I_{diff,sky}$ และ $I_{diff,grnd}$ ดังนั้นในการหาค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกจึงสามารถเขียนได้เป็นความสัมพันธ์

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{glob}} u_{I_{glob}}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff}} u_{I_{diff}}\right)^2} \quad (4.4)$$

เมื่อ

$u_{I_{tran}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

$u_{I_{glob}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

- $u_{I_{diff}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2
- I_{tran} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่าน ที่ได้จากการคำนวณ, W/m^2
- I_{glob} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2
- I_{diff} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

สำหรับการตรวจวัดค่ารังสีแบบกระจาย เครื่องตรวจวัดจะถูกติดตั้งเพื่อรับค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับกระจก ดังนั้นค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบ (I_{diff}) จะเป็นผลรวมของค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้า และค่ารังสีกระจายจากพื้นดิน ดังนั้นค่ารังสีตรงที่ตกกระทบ (I_{direct}) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่ารังสีแบบรวมที่ตกกระทบ กับค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนรวม จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(T_{\{1,M\}}^{FH} \cdot u_{I_{glob}}\right)^2 + \left(\left[T_{\{1,M\}}^{FH} - \frac{\left(T_{\{1,M\},diff,sky}^{FH} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{FH}\right)}{2}\right] \cdot u_{I_{diff}}\right)^2} \quad (4.5)$$

ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีที่ส่งผ่านที่ได้จากการประมาณสามารถเขียนได้เป็น

$$u_{I_{tran},\%} = \frac{u_{I_{tran}}}{I_{tran}} \times 100\% \quad (4.6)$$

ค่าความไม่แน่นอนรวมสูงสุดของค่ารังสีที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมีค่าประมาณ $\pm 8.4\%$ ของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมุมลิปรับมุมใบเป็น 0 องศา มีค่าประมาณ $\pm 7.77\%$ ของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน สำหรับค่าความไม่แน่นอนรวมสูงสุดของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก ที่มีการติดตั้งมุมลิปรับมุมใบเป็น 45 มีค่าประมาณ $\pm 6.20\%$ และ -45 องศา มีค่าประมาณ $\pm 9.5\%$ และของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน (ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกได้แสดงไว้ในภาคผนวก)

สำหรับค่าความผิดพลาดจากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย พารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดนั้น จะเป็นค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ทำการตรวจวัดจากค่าที่วัดได้จากหัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ อุณหภูมิอากาศ และความเร็วอากาศ ดังแสดงในสมการที่ 3.214 ส่วนค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นค่าที่ได้จากอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่จากผลของ

อุณหภูมิผิวของผนังด้านในทั้งหมด(รวมทั้งกระจก และมู่ลี่) รวมกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดขึ้น
เกิดมาจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายใน ที่ประมวลได้จาก
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ 3.205 ซึ่งจากค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจะสามารถ
นำไปคำนวณต่อเพื่อหาค่าเป็น ค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน (PPD) โดยจะเห็นว่าสมการที่แสดง
ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากบทที่ 3 ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถ
เขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_{umrt} + 273)^4 + \frac{a_p}{(\varepsilon_p \cdot \sigma)} \left(\sum_{i=1}^N F_{p-i} I_d + f_p (\alpha, \beta) \cdot I_b \right) \right]^{0.25} - 273 \quad (3.206)$$

โดยที่รังสีกระจายจากท้องฟ้า และพื้นดิน ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่สามารถคำนวณได้
โดย

$$I_d = T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} \cdot I_{diff,grnd} \quad (3.207)$$

และ รังสีตรงที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ สามารถคำนวณได้โดย

$$I_b = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot I_{direct} \quad (3.208)$$

เมื่อ

a_p	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน
ε_p	คือ ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน
f_p	คือ ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ภาพฉายผิวคน ต่อพื้นที่รับแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์
I_d	คือ ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวคน (W / m^2)
I_b	คือ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามากระทบผิวคน (W / m^2)
$T_{\{1,M\}}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีตรงด้านหน้าของระบบหน้าต่างกระจกแบบ directional hemispherical
$T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีกระจายจากท้องฟ้าที่ด้านหน้าของระบบหน้าต่าง กระจกแบบ directional-hemispherical
$T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH}$	คือ ค่าการส่งผ่านรังสีกระจายจากพื้นดินที่ด้านหน้าของระบบหน้าต่าง กระจกแบบ directional-hemispherical

และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดสามารถเขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (3.215)$$

เมื่อ

$$h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} \\ 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25} \end{cases} \quad (3.213)$$

เมื่อ T_o คือ อุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ, $^\circ\text{C}$

T_a คือ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, $^\circ\text{C}$

ε_g คือ ค่าการเปล่งรังสีของโอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน = 0.95)

h_{cg} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศ และ โอเปอร์เรทีฟเทอร์โมมิเตอร์,
W/m²- $^\circ\text{C}$

σ คือ ค่า Stefan Boltzmann constant, W/m²-K⁴

v_a คือ ค่าความเร็วอากาศ, m/s

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนจึงสามารถกระทำโดยใช้ความสัมพันธ์

$$u_{T_{mrt}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} u_{T_o} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} u_{T_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v_a} u_{v_a} \right)^2} \quad (4.7)$$

เมื่อ $u_{T_{mrt}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย, $^\circ\text{C}$

u_{T_o} คือ ค่าความไม่แน่นอนของห้ววัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ, $^\circ\text{C}$

u_{T_a} คือ ค่าความไม่แน่นอนของห้ววัดค่าอุณหภูมิอากาศ, $^\circ\text{C}$

u_{v_a} คือ ค่าความไม่แน่นอนของห้ววัดค่าความเร็วลม, $^\circ\text{C}$

จากคุณสมบัติของเครื่องมือวัด พบว่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดอุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับ $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัดความเร็วลมมีค่าเท่ากับ $\pm 0.05 v_a + 0.05$ (v_a คือค่าความเร็วลม, m/s) ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของหน้าต่างกระจกใสสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $\pm 1.72 \text{ }^\circ\text{C}$ (± 3.94 เปอร์เซ็นต์) หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $\pm 1.313 \text{ }^\circ\text{C}$ (± 3.602 เปอร์เซ็นต์) หน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $\pm 1.184 \text{ }^\circ\text{C}$ (± 3.39 เปอร์เซ็นต์) และหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $\pm 1.516 \text{ }^\circ\text{C}$ (± 3.895 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะเห็นว่ามิต้าน้อยมาก สาเหตุส่วนหนึ่งมาจาก

เครื่องมือวัดที่มีค่าค่อนข้างดี (ตัวอย่างของการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยได้แสดงไว้ในภาคผนวก)

4.3.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเครื่องมือวัด

ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการวัดในส่วนที่สองมาจากการติดตั้ง จะเห็นได้ว่าการคลาดเคลื่อนในส่วนนี้จะประกอบด้วยความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิผิวของผนังห้องทดลอง ผิวกระจก และผิวมู่ลี่ ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดรังสีแสงอาทิตย์เทียบกับระนาบของหน้าต่างกระจกซึ่งมีทั้งในส่วนหัววัดด้านนอกและด้านใน การบังเงาของแถบบังเงาหัววัดรังสีแบบกระจาย การติดตั้งและการเอียงท่ามุมของหัววัดโอเปอร์เรทีฟ ตำแหน่งหัววัดความเร็วอากาศ เป็นต้น ในบรรดาความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ที่กล่าวมานั้น ในการศึกษานี้จะคิดเฉพาะในส่วนของความคลาดเคลื่อนของการติดตั้งหัววัดรังสีแสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบของหน้าต่างกระจกเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของสถานที่ทำให้ไม่สามารถติดตั้งหัววัดในแนวเดียวกับหน้าต่างกระจกได้ (เนื่องจากหัววัดถูกติดตั้งอยู่บนขาตั้งแบบ 3 ขา ทำให้หัววัดอยู่ด้านหน้าของหน้าต่างกระจก) ดังนั้นการปรับระนาบของหัววัดซึ่งมีทั้งระนาบในแนวตั้ง และระนาบในแนวขวาง เพื่อให้อยู่ในระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกต้องทำการประมาณเอา ผลการที่ระนาบหัววัดไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจกจะส่งผลให้อ่านค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแตกต่างกับค่าที่ควรเป็น ซึ่งผลของการเอียงมุมจะมีผลต่อการคิดค่ารังสีตั้งฉากที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก ความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณการจากความละเอียดเครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ $\pm 4^\circ$ เมื่อนำเอาความคลาดเคลื่อนของการติดตั้งไปคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์จากการวัด จะทำให้ค่าความไม่แน่นอนมีค่าสูงขึ้น ค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีค่าแปรตามมุมตกกระทบซึ่งจะมีค่าประมาณ 1% ถึง 10% หากนำค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวที่ 4% นำไปคิดรวมกับค่าความไม่แน่นอนจากเครื่องมือจะทำให้ค่าความไม่แน่นอนรวมจะมีค่าประมาณ $\pm 9.15\%$ (สำหรับเครื่องมือวัดรุ่น CM6B) และมีค่าความไม่แน่นอนรวมจะมีค่าประมาณ $\pm 9.76\%$ (สำหรับเครื่องมือวัดรุ่น CMP6) ของค่ารังสีที่ตกกระทบที่วัดได้ สำหรับการวัดค่ารังสีแบบกระจาย จะมีค่าความไม่แน่นอนจากวงแหวนบังเงา(shading ring) เพิ่มเติมเข้าไป ซึ่งส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแบบกระจาย(เครื่องมือวัดรุ่น CM6B) ประมาณ $\pm 9.20\%$ ของการวัดค่ารังสีแบบกระจาย และค่าความไม่แน่นอนจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านมีค่าประมาณ $\pm 9.34\%$ ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวจะแปรตามมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ด้วย (ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์จากการตรวจวัดได้แสดงไว้ในภาคผนวก)

4.3.3 ค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทที่ 5 จะนำค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดและค่าที่ประมวลผลมาจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนนั้นสามารถแบ่งเป็น ส่วนของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า และ ส่วนของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

ในส่วนของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ค่ารังสีที่ถูกส่งผ่านเข้ามาในห้องทดลอง (คำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกคูณกับการส่งผ่านรังสี (คลื่นสั้น) ของหน้าต่างกระจก) ค่าอุณหภูมิผิวกระจก (คำนวณจากทฤษฎีที่แสดงไว้ในบทที่ 3) ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยรวม และค่าอุณหภูมิการแผ่รังสีที่เกิดจากอุณหภูมิผิว (คำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งเข้ามาในห้องทดลอง (จากการวัด) และอุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจกและผนังห้องทั้งหมด ในห้องทดลอง) ค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD (ที่ได้จากการนำค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยและค่ารังสีแสงอาทิตย์ไปคำนวณตามสมการที่แสดงไว้ในบทที่ 3)

ในส่วนของหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่นั้น ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยรวม และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากอุณหภูมิผิว (คำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านเข้ามาในห้องทดลอง (จากการวัด) และค่าอุณหภูมิผิวของหน้าต่างกระจก ค่าอุณหภูมิมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิของผนังห้องทั้งหมดในห้องทดลอง) ค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD (ที่ได้จากการนำค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย และค่ารังสีแสงอาทิตย์ไปคำนวณตามสมการที่แสดงไว้ในบทที่ 3)

4.4 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ทั้งในแง่ของความสบายเชิงความร้อน และการส่งผ่านความร้อน

4.4.1 โปรแกรม BLIND_COMFORT

ในการศึกษานี้ ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ ที่มีต่อความสบายเชิงความร้อน โดยมีชื่อว่า BLIND_COMFORT ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 โดยโปรแกรม BLIND_COMFORT ถูกเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา FORTRAN 90 โดยโปรแกรมนี้จะประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ สำหรับประมวลผลค่าจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แยกกันไป ทั้งนี้เพื่อสะดวกต่อการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โปรแกรม BLIND_COMFORT

จะอ่านข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดทั้งหมดที่ถูกจัดเตรียมไว้ในแฟ้มข้อมูล data_measure.dat ของแต่ละกรณีของกระจก และมุมที่ เกิดขึ้นตามช่วงเวลาที่มีการบันทึกข้อมูลทุก 30 วินาที และนำข้อมูลที่อ่านได้ส่งไปที่โปรแกรมย่อยต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยโปรแกรมจะประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยต่างๆ ดังนี้

4.4.2 โปรแกรมย่อย BLIND_OPTIC

โปรแกรมย่อยนี้จะมีหน้าที่หลักในการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกตัวเปล่า และกระจกติดตั้งมุมเป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน จากการป้อนค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่า และคุณสมบัติของมุมเข้าไป ในโปรแกรมนี้ก็จะคำนวณค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าให้แปรตามมุมตกกระทบ และค่าคุณสมบัติของมุม ให้เป็นคุณสมบัติแบบ bi-directional จากนั้นใช้วิธีการ Matrix Layer ขนาด 84 x 84 (มุมตกกระทบ 7 (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 86.25°) มุม และมุม Azimuth 13 มุม (0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, 330°)) เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิง optic รวมของระบบหน้าต่างกระจก และมุม โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อยนี้จะประกอบไปด้วยค่าการส่งผ่านรังสีของระบบ ค่าการสะท้อนรังสีของระบบ และค่าการดูดกลืนรังสีของแต่ละชั้นของระบบหน้าต่างกระจก

โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มต้นจากผู้ใช้งานกำหนดจำนวนชั้นกระจกที่ต้องการทำการวิเคราะห์ จากนั้นโปรแกรมจะอ่านค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจก และมุม จากแฟ้มข้อมูล glass_blind_optic.dat และกำหนดระยะห่างของแต่ละชั้นกระจก และระยะห่างของกระจกชั้นในกับมุม และจากข้อมูลที่กำหนดโปรแกรมจะทำการคำนวณ และแสดงผลที่ออกมาในรูปแบบของค่าคุณสมบัติทาง optic ให้เป็นคุณสมบัติแบบ bi-directional

4.4.3 โปรแกรมย่อย BLIND_OPTIC_FIT

โปรแกรมย่อยนี้จะมีหน้าที่หลักในการนำค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกตัวเปล่า และระบบกระจกติดตั้งมุมเป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน ที่ได้จากโปรแกรม BLIND_OPTIC ไปทำการหาความสัมพันธ์ด้วยวิธีการ curve fitting ให้ได้ความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการแบบพหุนาม เพื่อที่จะใช้ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามมุมตกกระทบ และมุม solar profile ไปคำนวณค่าต่างๆ ในโปรแกรมย่อย อื่นต่อไป โดยคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าจะได้รับความสัมพันธ์อยู่ในรูปของ

$$P(\theta) = c_0 + c_1 \cos \theta + c_2 \cos^2 \theta + c_3 \cos^3 \theta + c_4 \cos^4 \theta + c_5 \cos^5 \theta + c_6 \cos^6 \theta \quad (4.5)$$

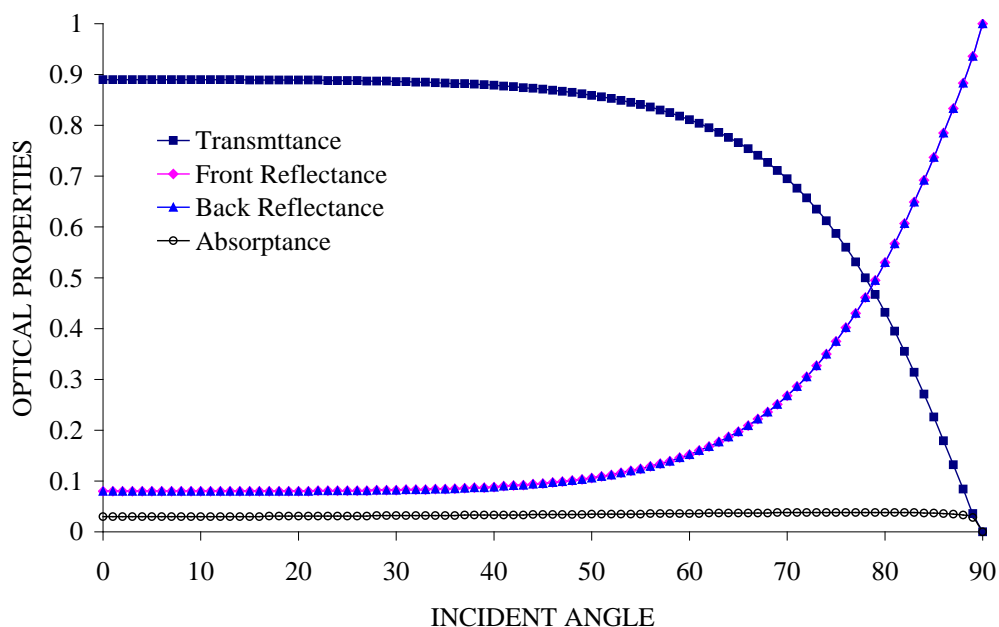
เมื่อ $P(\theta)$ คือ ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ θ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จาก curve fitting สามารถสรุปในตารางที่ 4.2 ได้เป็น

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ที่ได้จาก curve fitting

คุณสมบัติเชิง optic	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
ค่าการส่งผ่านรังสี, T	-0.04536	2.91731	-3.23332	0.16704	1.72807	-0.54410	-0.19105
ค่าการสะท้อนรังสี, R	0.99021	-3.87233	6.75213	-5.40426	0.39702	2.39031	-1.17390
ค่าการดูดกลืนรังสี, A	0.05528	0.94750	-3.44281	4.92166	-1.51044	2.40581	1.55693

จากค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในตารางที่ 4.2 นำมาพล็อตค่าคุณสมบัติเชิง optic ได้เป็นดังในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ที่แปรตามมุมตกกระทบ

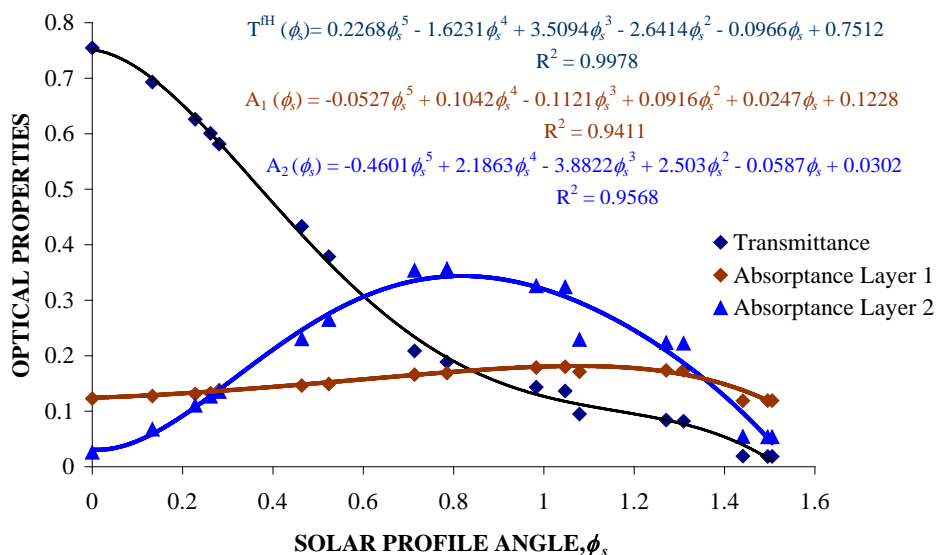
สำหรับคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกชนิดนี้ จะได้ความสัมพันธ์อยู่ในรูปของ

$$P(\phi) = c_0 + c_1\phi_s + c_2\phi_s^2 + c_3\phi_s^3 + c_4\phi_s^4 + c_5\phi_s^5 \tag{4.6}$$

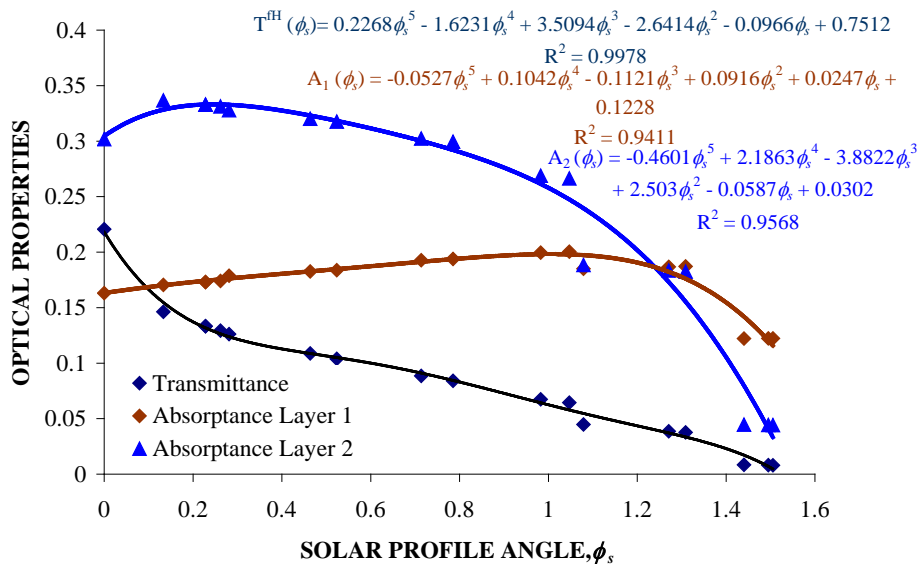
เมื่อ

$P(\phi_s)$ คือ ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่ขึ้นกับมุม solar profile ϕ_s (rad)

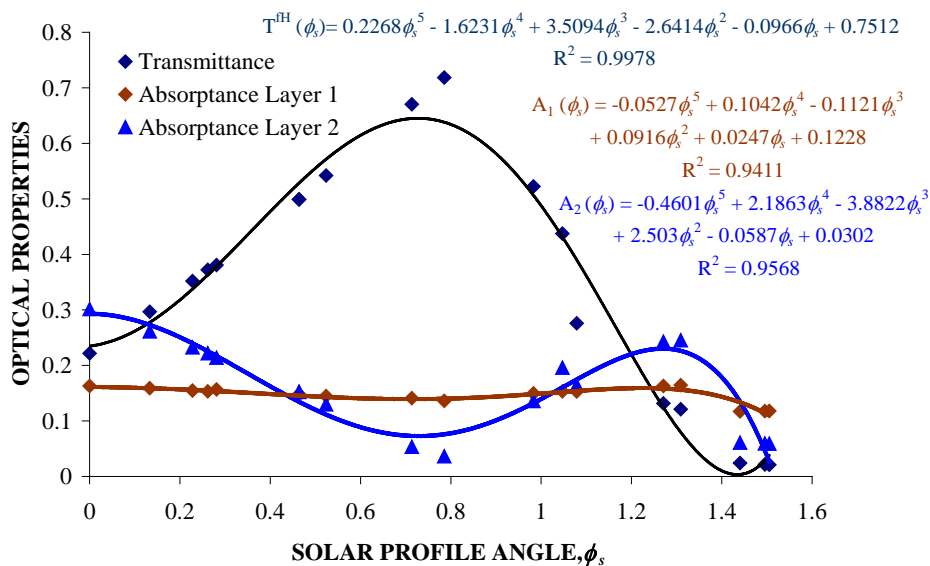
จากการทำ curve fitting ของหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา 45 องศา แล -45 องศา จะได้ค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของค่าคุณสมบัติเชิง optic แสดงในรูปแบบที่ 4.18 รูปแบบที่ 4.19 และรูปแบบที่ 4.20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุม 0 องศา ที่แปรตามมุม solar profile



รูปที่ 4.19 ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา ที่แปรตามมุม solar profile



รูปที่ 4.20 ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา ที่แปรตามมุม solar profile

4.4.4 โปรแกรมย่อย SOLAR_BLIND_CAL

โปรแกรมย่อยนี้จะมีหน้าที่คำนวณค่ามุมของรังสีแสงอาทิตย์ ได้แก่ ค่ามุมตกกระทบ มุม Azimuth และมุม solar profile ที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งที่ตั้งของห้องทดลอง และตามการหันทิศทางของผนังที่ติดตั้งกระจกและมู่ลี่ ให้สอดคล้องกับช่วงเวลาเดียวกันกับการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ จากนั้นทำการคำนวณค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ และขึ้นกับมุม solar profile ได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ที่ส่งผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง และยังคำนวณค่า projected area factor สำหรับคนในตึก ที่ผ่านหน้าต่างกระจก ติดมู่ลี่ปรับมุมเอียงของใบที่มุมต่างๆ และนำค่าที่ได้เขียนลงในไฟล์ Solar_blind.out เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นไฟล์อินพุตให้กับ โปรแกรมย่อยอื่นๆ ต่อไป

4.4.5 โปรแกรมย่อย SURFACE_TEMP

โปรแกรมย่อยนี้จะมีหน้าที่หลักในการคำนวณสมดุลความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นกระจกและมู่ลี่ แบบสถานะคงตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อยนี้จะประกอบไปด้วย ค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก และอุณหภูมิผิวของกระจกและมู่ลี่ ค่า inward-flowing fraction ค่า SHGC และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม (U-value)

โดยขั้นตอนการทำงานจะเริ่มต้นจากโปรแกรมจะอ่านค่าคุณสมบัติเชิง optic ของระบบกระจกและมู่ลี่ที่แปรตามเวลาที่ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรม SOLAR_BLIND_CAL จากแฟ้มข้อมูล solar_blind.out ที่เวลาเดียวกันกับค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าคุณสมบัติแบบครึ่งวงกลมของระบบหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ และสภาวะอากาศภายนอก สภาวะอากาศภายในที่ได้จากการตรวจวัด

4.4.6 โปรแกรมย่อย CAL_BLIND_COMFORT

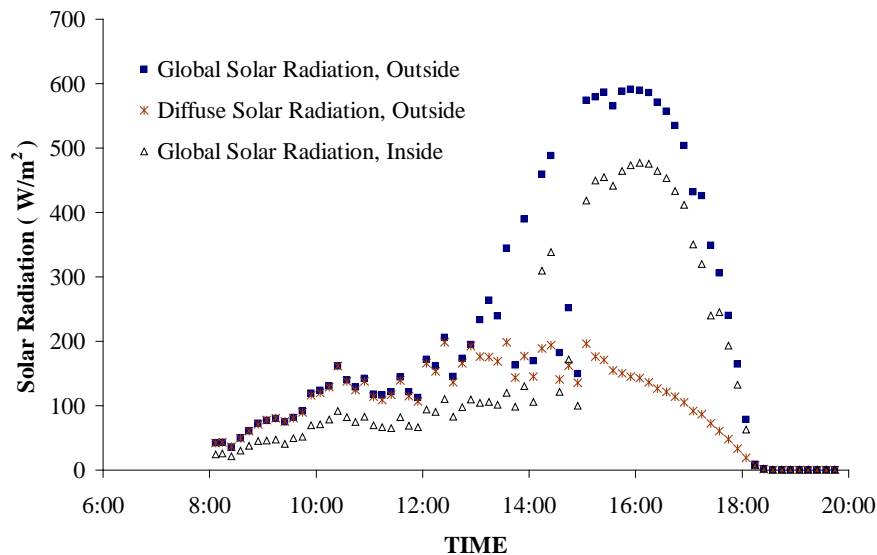
โปรแกรมย่อยนี้จะมีหน้าที่หลักในการคำนวณสภาวะความสบายของผู้อยู่อาศัยออกมาเป็นค่า PPD รวมทั้งค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ที่ประมวลได้จากการที่ใช้ค่าข้อมูลจากการตรวจวัด และประมวลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในแต่ละกรณีของกระจก และมู่ลี่ ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมย่อยนี้จะประกอบไปด้วย ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีที่รวมผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ค่า PPD เนื่องจากอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว และค่า PPD ที่รวมผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของหน้าต่างกระจกใส และหน้าต่างกระจกใสที่มีการติดตั้งมู่ลี่เข้าไป ในแง่การส่งผ่านความร้อนและในแง่ความสบายเชิงความร้อน โดยจะแสดงผลที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.1 สมรรถนะของกระจกตัวเปล่า

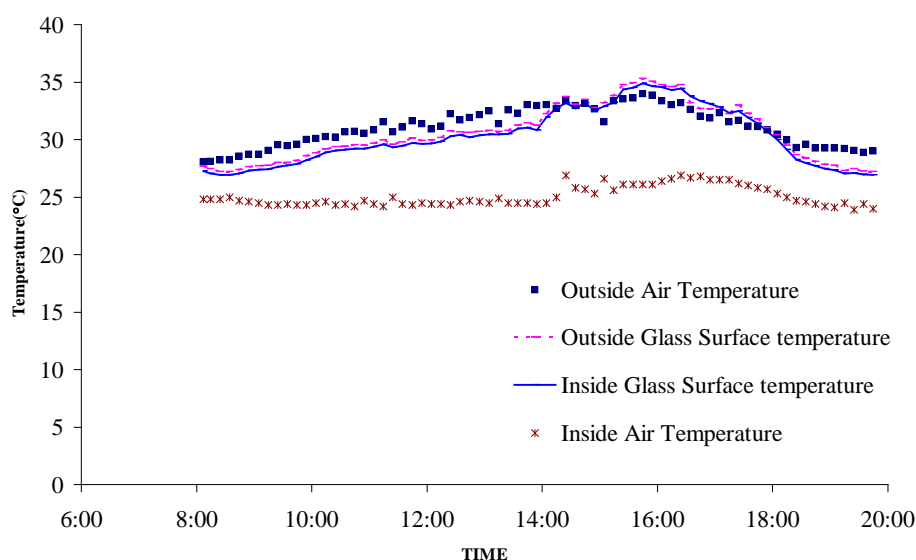
ในการศึกษานี้ การทดลองกระทำกับหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น ขนาดกว้าง 0.9 เมตร สูง 1.1 เมตร และใช้มู่ลี่ใบขนาด 1 นิ้ว สีครีม รายละเอียดคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ถูกแสดงไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 5.1 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

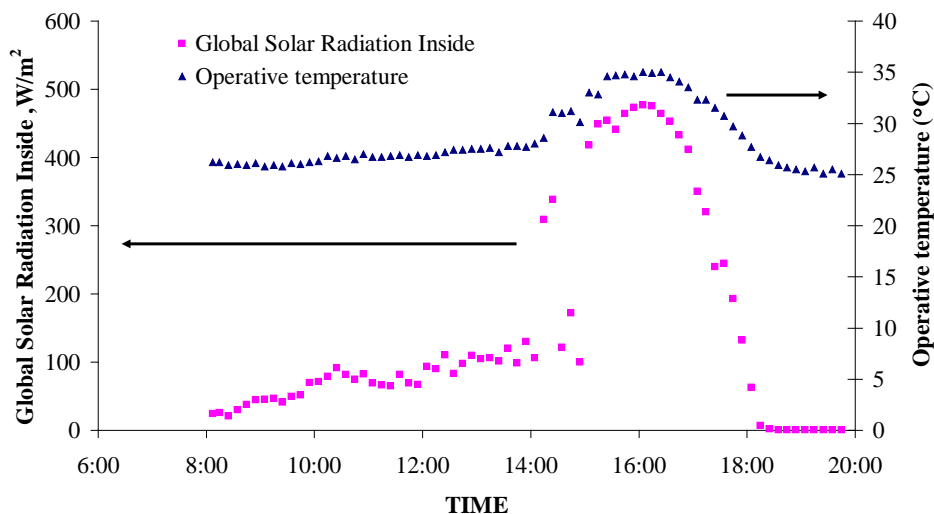
รูปที่ 5.1 ถึง 5.3 เป็นผลที่ได้จากการตรวจวัดและผลการประมวลผล ของกระจกใส ซึ่งกระทำในวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกนำมาแสดงและข้อมูลบางส่วนจะถูกนำไปประมวลผลทั้งจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รูปที่ 5.1 แสดงถึงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้าสู่ภายในห้องทดลอง จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียง

กันในช่วงเช้า เนื่องจากหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ดังนั้นในช่วงเช้าจะมีแต่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายกระทบหัววัด ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากการวัดจึงมีค่าเท่ากัน และจากการบังของขอบอาคารทำให้หน้าต่างกระจกเริ่มรับแดดในช่วงประมาณ 12:30 น. ซึ่งจะเห็นได้ว่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมมีค่าสูงขึ้น และจะเห็นได้ว่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจกจะมีค่าตามหลังค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบอยู่ประมาณ 2 ชั่วโมง โดยจะมีค่าเริ่มสูงขึ้นเวลาประมาณ 14:00 น. เหตุผลก็คือตำแหน่งการติดตั้งของเครื่องรับรังสีแสงอาทิตย์ที่อยู่ภายนอกห้องนั้นจะรับแสงอาทิตย์ก่อนที่หน้าต่างกระจกจะได้รับเนื่องจากการบังของขอบอาคาร (เนื่องจากเครื่องวัดติดตั้งบนขาตั้งที่มีฐานกระจายจำนวน 3 ขา เมื่อตั้งอยู่ใกล้กระจกหน้าต่างทดลองทำให้ตำแหน่งของหัววัดห่างจากระนาบกระจกประมาณ 0.8 เมตร)



รูปที่ 5.2 ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

รูปที่ 5.2 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก และด้านใน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และด้านใน มีค่าใกล้เคียงกันและลักษณะการกระจายตัวเทียบกับเวลามีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบที่ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.1 แต่จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกเพียงเล็กน้อยในช่วงที่แสงอาทิตย์มาตกกระทบกับหน้าต่างกระจก ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของกระจกใสมีค่าต่ำจึงทำให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่สะสมในเนื้อกระจกมีค่าต่ำตามไปด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่าอุณหภูมิผิวกระจก

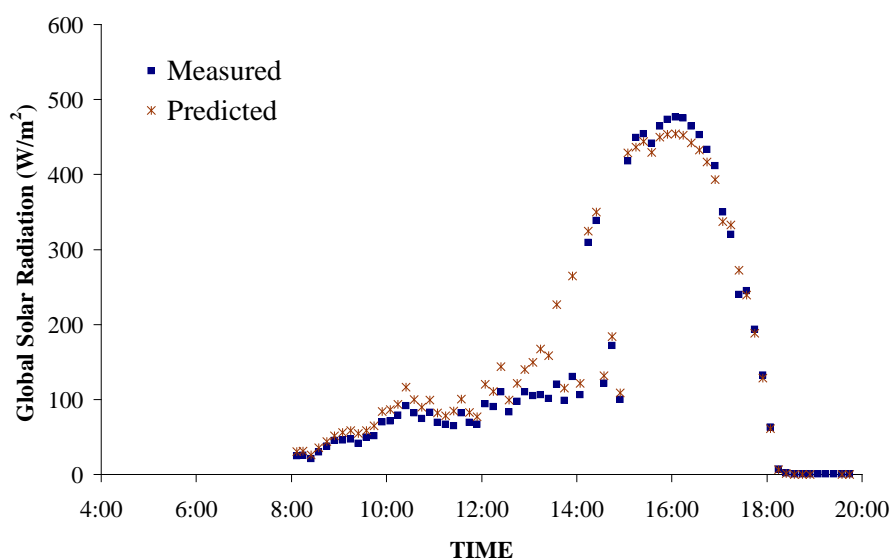


รูปที่ 5.3 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจก และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

รูปที่ 5.3 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจก และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นโค้งของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ มีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเส้นโค้งของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจก โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่สูงขึ้น และจะมีค่าลดลงตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ลดลง จากกราฟจะพบว่าสำหรับกรณีของกระจกใส ในการทดลองครั้งนี้ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีค่าสูงสุดประมาณ 35 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 480 W/m² จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ มีความสอดคล้องตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในห้องทดลอง

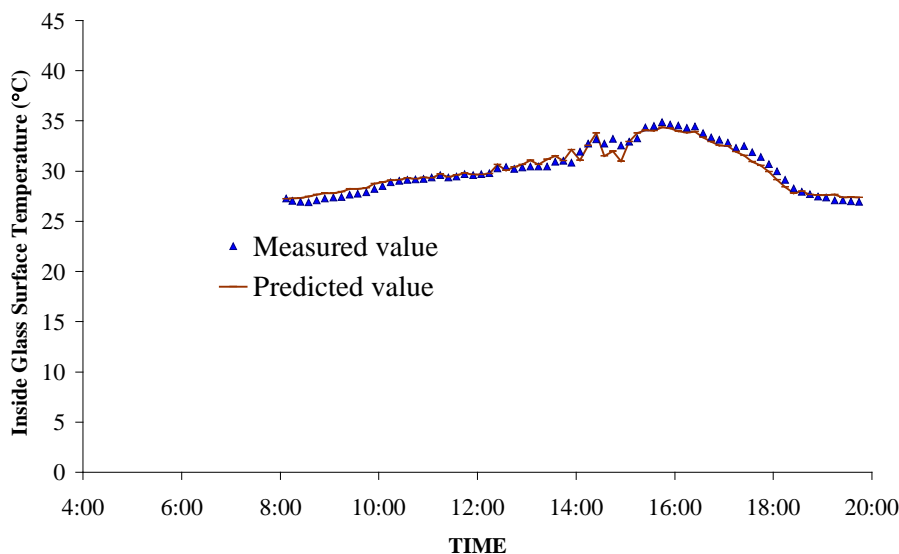
รูปที่ 5.4 ถึง 5.7 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งจากการประมวลผลของการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงให้แม่นยำขึ้น ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 5.4 เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้จากหัววัดในห้องทดลองกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจกที่มุมตกกระทบต่างๆ กันของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายภายนอกห้องทดลองที่วัดได้ จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความใกล้เคียงสอดคล้องกันดียกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสี

แสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก จนเมื่อเวลา 14:00 น. ไปแล้วค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดวัดได้จึงเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจกจริง จึงจะเห็นได้ว่าหลัง 14:00 น. ไปแล้วค่าทั้งสองมีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 5.4 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

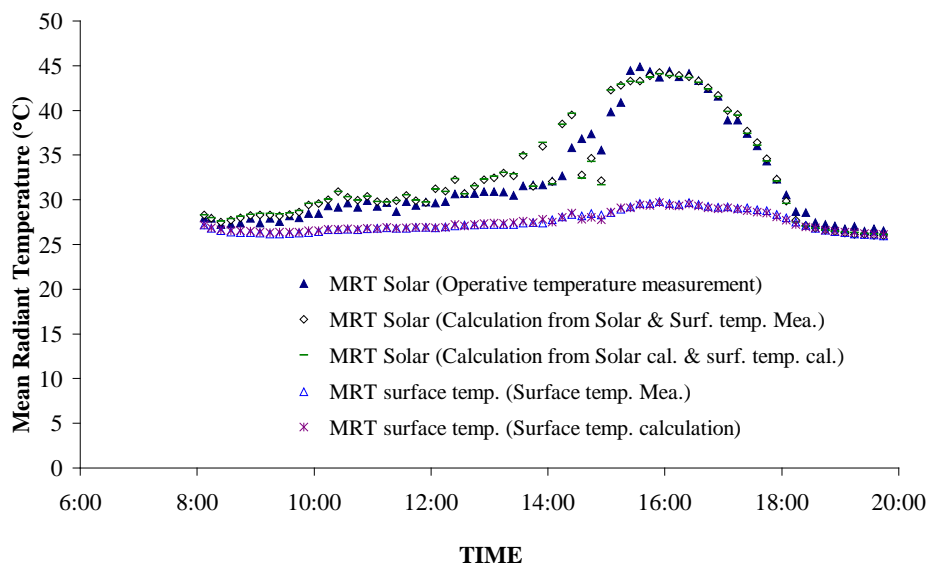
รูปที่ 5.5 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากผลเฉลยมีความสอดคล้องกันดี แต่ค่าที่ได้จากผลการคำนวณมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดเพียงเล็กน้อย ลักษณะแนวโน้มของกราฟทั้งที่ได้จากการตรวจวัด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงตามค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จากรูปที่ 5.5 ค่าอุณหภูมิผิวของกระจกมีค่าสูงที่สุดประมาณ 33°C เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกโดยพิจารณาจากรูปที่ 5.2 จะพบว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่าสูงที่สุดประมาณ 32°C ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของหน้าต่างกระจกใสมีค่าต่ำ จึงทำให้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ถูกสะสมในตัวกระจกมีค่าต่ำไปด้วย



รูปที่ 5.5 ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดและที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

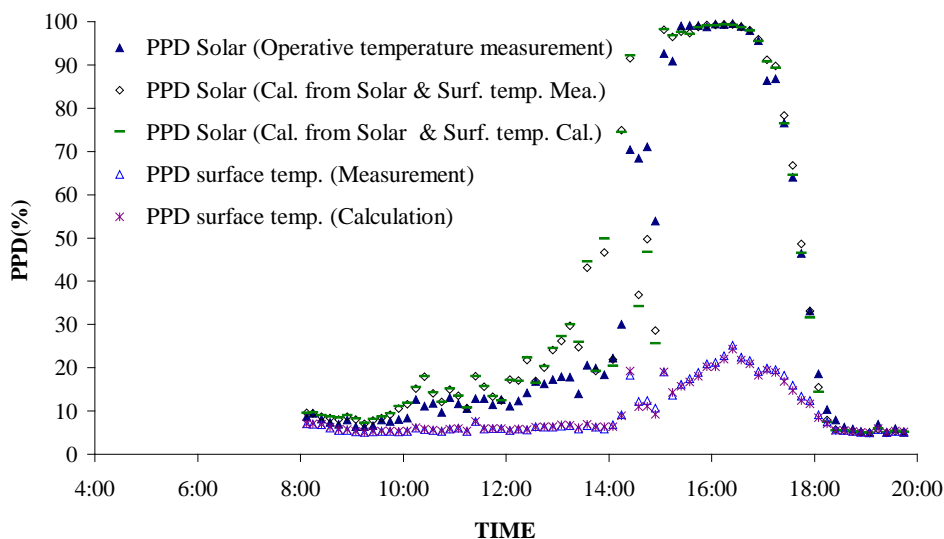
รูปที่ 5.6 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวกระจก และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของรังสีแสงอาทิตย์ที่รวมผลรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วยที่ได้จากการคำนวณ (สมการที่ 3.206 ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ ในบทที่ 3) ในรูปที่ 5.6 ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อน จากข้อมูลค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากหัววัดเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงเวลาประมาณ 13:00 น. ถึง 15:00 น. ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะสูงกว่าค่าที่ได้จากข้อมูลการวัด เหตุผลคือ ค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นหาค่าจากการใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่ตกกระทบบนหัววัดมาคำนวณ ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวรังสีแสงอาทิตย์ยังไม่ตกกระทบบนตัวหัววัดที่อยู่ภายในห้องทดลอง เนื่องจากการบังเงาของขอบอาคาร ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น แต่เมื่อรังสีแสงอาทิตย์ส่งผ่านหน้าต่างกระจก และมาตกกระทบหัววัดที่อยู่ภายในแล้วค่าจะเริ่มกลับมาสอดคล้องกันดี และจะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกับเวลา จะมีลักษณะสอดคล้องกับการแปรเปลี่ยนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก ในขณะที่ในรูปที่ 5.6 นั้นยังแสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวที่ได้จากการคำนวณก็จะพบว่าในช่วงเวลาที่ยังไม่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกระจกนั้น ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากการคำนวณ และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่า

อุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 K ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของกระจกใสที่มีค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ที่ค่อนข้างต่ำจึงทำให้อุณหภูมิผิวกระจกมีค่าสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการแผ่รังสีคลื่นยาวต่อผู้อยู่อาศัยภายในมากนัก



รูปที่ 5.6 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

รูปที่ 5.7 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากการประมวลผลจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนกับ ค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณ จะเห็นว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มของความสัมพันธ์สอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วง ช่วงเวลา 13:00 น. ถึง 15:00 น. ซึ่งความคลาดเคลื่อนมาจากค่าที่ได้จากการวัดกับค่าที่ตกกระทบกระจกจริงไม่ตรงกันเนื่องจากการบังเงาของขอบอาคารดังที่ได้อธิบายไว้ในเรื่องของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยในรูปที่ 5.6 และในรูปยังแสดงถึงค่า PPD รวม และยังพบว่าค่า PPD ที่ได้มีการแปรตามกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.6 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าถึงแม้อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำ (25 °C) แต่คนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกจะรู้สึกไม่สบายมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องผ่านหน้าต่างกระจกมากระทบตัวคนเป็นไปตามค่า PPD รวม ซึ่งมีค่าสูงถึง 100% (ในกรณีที่นั่งห่างจากกระจก 0.2 เมตร) สำหรับกระจกใสจะให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อน เนื่องจากผลของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์มาตกกระทบตัวคนมีค่ามากกว่าผลจากอุณหภูมิผิวกระจกที่สูงขึ้น



รูปที่ 5.7 ค่าอุณหภูมิแผรังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผรังสีเฉลี่ยที่ได้จากผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553

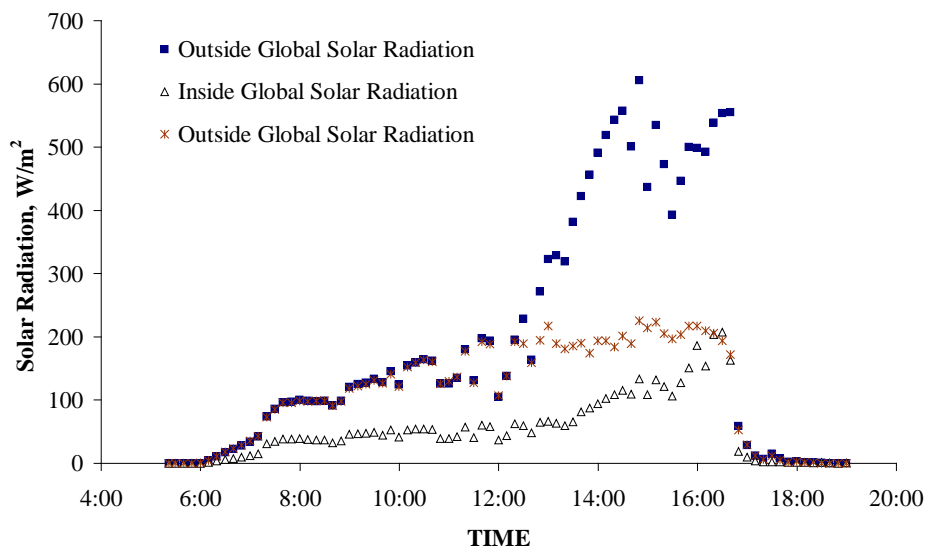
5.2 สมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่

ในหัวข้อต่อไปนี้จะเป็นการวิเคราะห์ค่าสมรรถนะของหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ด้านหลังกระจก เนื่องจากมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายในที่มีความซับซ้อน คุณสมบัติเชิง optic ของมู่ลี่เมื่อถูกพิจารณาเป็นชั้นเสมือนจะแปรไปตามพารามิเตอร์หลายตัว เช่นคุณสมบัติเชิง optic ของใบมู่ลี่ ลักษณะทางเรขาคณิตของใบมู่ลี่ ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ ความกว้างของใบมู่ลี่ ความโค้ง และความหนาของใบมู่ลี่ ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่กับกระจกเป็นต้น ในการศึกษานี้จะทำการพิจารณาเฉพาะผลจากการแปรมุมบิดของใบมู่ลี่ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นเป็นค่าคงที่ ในการศึกษานี้จะทำการทดลองกับหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ด้านหลังหน้าต่างกระจกที่มุมบิด 0 45 และ -45 องศา

5.2.1 ผลการวิเคราะห์หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ซึ่งปรับมุมเป็น 0 องศา

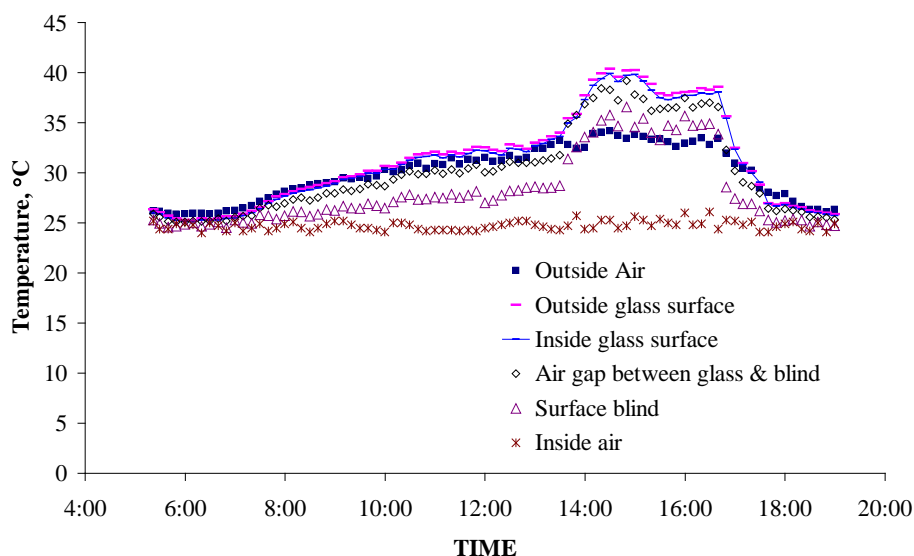
การทดลองถูกกระทำในเงื่อนไขที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่มีการปรับมุมปิดเป็น 0 องศา (เปิดมู่ลี่ให้ใบมู่ลี่ตั้งฉากกับระนาบของหน้าต่าง ช่องเปิดระหว่างมู่ลี่จะถูกเปิดเต็ม) โดยมีระยะการติดตั้งของมู่ลี่ห่างจากผิวด้านในของกระจกถึงผิวด้านในของกระจกเท่ากับ 40 มม. และตำแหน่งผิวด้านในของกระจกห่างจากตำแหน่งของเครื่องตรวจวัดความสบายเท่ากับ 200 มม.

รูปที่ 5.8 ถึง 5.10 เป็นผลที่ได้จากการตรวจวัด และการคำนวณของกระจกใส 1 ชั้น ที่ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ซึ่งกระทำการวัดในวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 รูปที่ 5.8 แสดงถึงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาสู่ภายในห้องทดลอง จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันในช่วงเช้า เนื่องจากหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ในช่วงเช้าจะมีแต่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายกระทบหัววัด ดังนั้นค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากการวัดจึงมีค่าเท่ากัน และยังมีผลการบังของขอบอาคารเหมือนในกรณีของกระจกใส 1 ชั้นให้เห็นในช่วง 12:00 น. ถึง 14:00 น. สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาสู่ภายในห้องนั้น เนื่องจากหัววัดรังสีแสงอาทิตย์ด้านในถูกติดตั้งอยู่หลังมู่ลี่ ผลของการบังของอาคารและการบังของใบมู่ลี่จะทำให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านกระจก และมู่ลี่เข้ามาสู่หัววัดรังสีแสงอาทิตย์ที่อยู่ภายใน ในช่วงเช้าและช่วงก่อนเวลา 15:30 น. นั้น เป็นส่วนของรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายและรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ตกกระทบบนใบมู่ลี่ และสะท้อนเข้าสู่ในห้องจนกระทั่งเวลาประมาณ 15:30 น. รังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านเข้ามาในห้องซึ่งมีค่าสูงขึ้นอย่างเด่นชัด เหตุผลคือมู่ลี่เมื่อปรับมุมเปิดเป็น 0 องศาจะช่วยทำให้รังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก ถูกใบของมู่ลี่บังจนกระทั่งตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่ทำมุมกับเส้นตั้งฉากกับหน้าต่างกระจกมีค่าลดลงที่เวลาประมาณ 15:30 น. แสงอาทิตย์จึงสามารถลอดผ่านช่องระหว่างใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบหัววัดรังสีแสงอาทิตย์ที่อยู่ภายในได้ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าช่วงเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้ามาในห้องจะเป็นช่วงที่เวลาที่รังสีแสงอาทิตย์เริ่มมีค่าลดลง ดังนั้นการติดตั้งมู่ลี่จึงเปรียบเสมือนเป็นการเลื่อนเวลาการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาสู่ภายในห้อง และทำให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านนั้นมีค่าลดลง



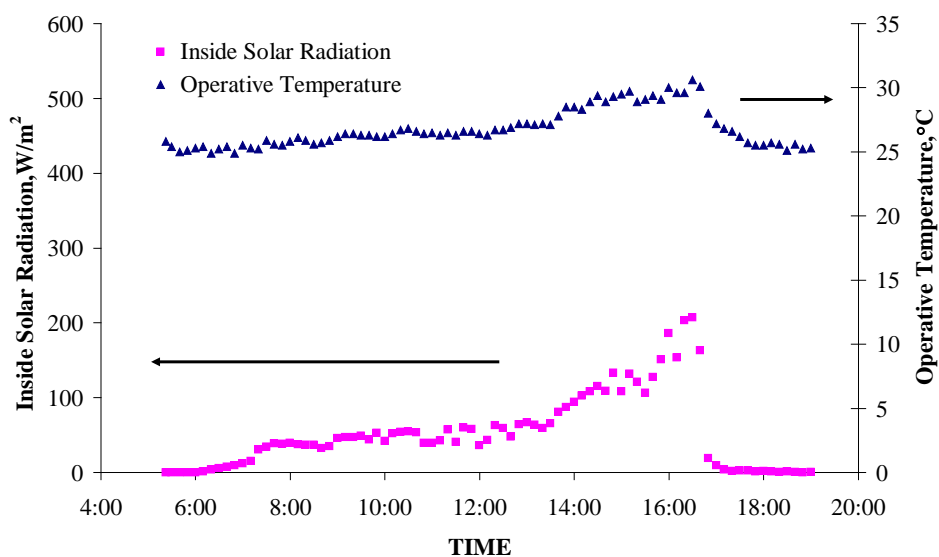
รูปที่ 5.8 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 0 องศา ที่ ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.9 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก และด้านใน อุณหภูมิอากาศของช่องว่างผิวกระจกด้านในและใบมู่ลี่ อุณหภูมิใบมู่ลี่ จะเห็นว่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และด้านใน มีค่าใกล้เคียงกันและลักษณะการกระจายตัวเทียบกับเวลามีแนวโน้มคล้ายกับค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ แต่จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกค่อนข้างมาก(ประมาณ 7 K) ในช่วงที่แสงอาทิตย์มาตกกระทบกับหน้าต่างกระจก ทั้งนี้เนื่องจากผลของการบังของใบมู่ลี่ทำให้การกระจายตัวของอากาศโดยส่วนใหญ่หมุนเวียนอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างกระจกและใบมู่ลี่ ซึ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างนี้มีค่าสูงตามไปด้วย จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอากาศของช่องว่างนี้มีค่า และลักษณะใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศด้านใน(ประมาณ 13K) ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะกราฟของอุณหภูมิใบมู่ลี่มีลักษณะคล้ายกับกราฟของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และกราฟอุณหภูมิผิวของกระจกแต่จะมีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิผิวกระจก(ประมาณ 5K) ซึ่งจะส่งผลทำให้การแผ่รังสีคลื่นยาวจากผิวกระจก และใบมู่ลี่มีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.9 ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

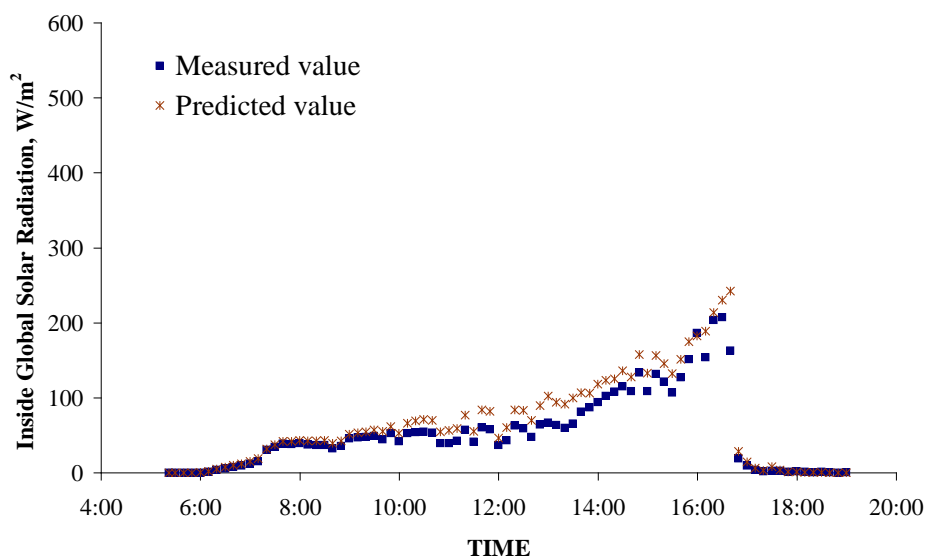
รูปที่ 5.10 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ 0 องศา และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นโค้งของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเส้น โค้งของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่สูงขึ้น และจะมีค่าลดลงตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ลดลง จากกราฟจะพบว่าสำหรับกรณีของกระจกใสติดมู่ลี่ปรับมุม 0 องศา ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีค่าสูงสุดประมาณ 30 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 250 W/m² จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีการตอบสนองตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของกระจกใส จะพบว่าเมื่อติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา จะทำให้ค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ มีค่าลดลง



รูปที่ 5.10 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

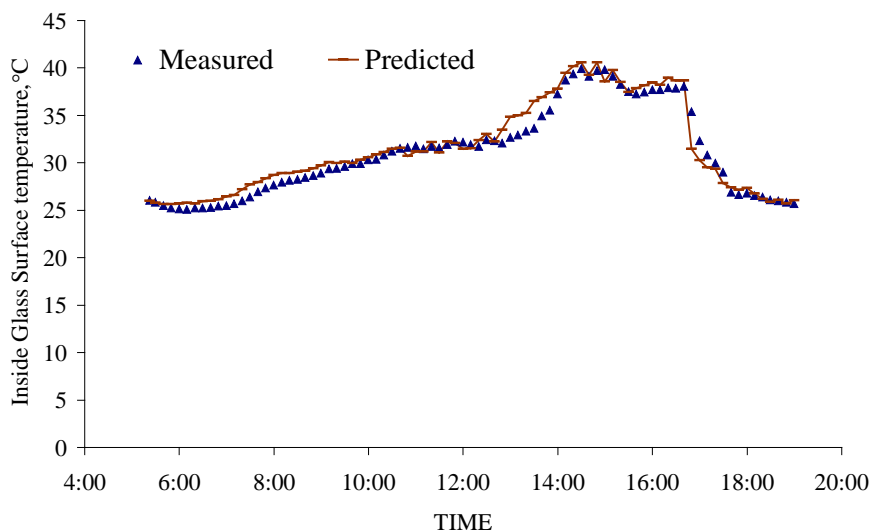
รูปที่ 5.11 ถึง 5.19 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งจากการประมวลผลของการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงให้แม่นยำขึ้น ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 5.11 เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้จากหัววัดในห้องทดลองกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามมุม solar profile ต่างๆ กัน ของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายภายนอกห้องทดลองที่วัดได้ จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความใกล้เคียงสอดคล้องกันดียกเว้นช่วงระหว่างเวลา 10:00 ถึง 15:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก จนเมื่อเวลา 15:00 น. ไปแล้วค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดวัดได้จึงเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจกจริง ประกอบกับช่วงเวลาหลัง 15:00 น. เป็นตำแหน่งที่รังสีแสงอาทิตย์สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดภายในโดยไม่เกิดการบังจากใบมู่ลี่ จึงทำให้ผลของความคลาดเคลื่อนจากการปรับมุมเอียงของใบมู่ลี่ไม่มีผล และจะเห็นได้ว่าหลัง 15:00 น. ไปแล้วค่าทั้งสองมีความสอดคล้องกันดี นอกจากนี้ค่าที่ได้จากการคำนวณในช่วงเวลา 10:00 น. ถึง 15:00 น. มีค่าสูงกว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัด อาจมาจาก

สาเหตุของความคลาดเคลื่อนในการปรับมุมใบของมู่ลี่ไม่ได้ที่ตำแหน่ง 0 องศาพอดี (ถ้ามุมใบของมู่ลี่มีการเอียงตัว จะทำให้เกิดการบังของรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดจริงเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้มีค่าลดลง)



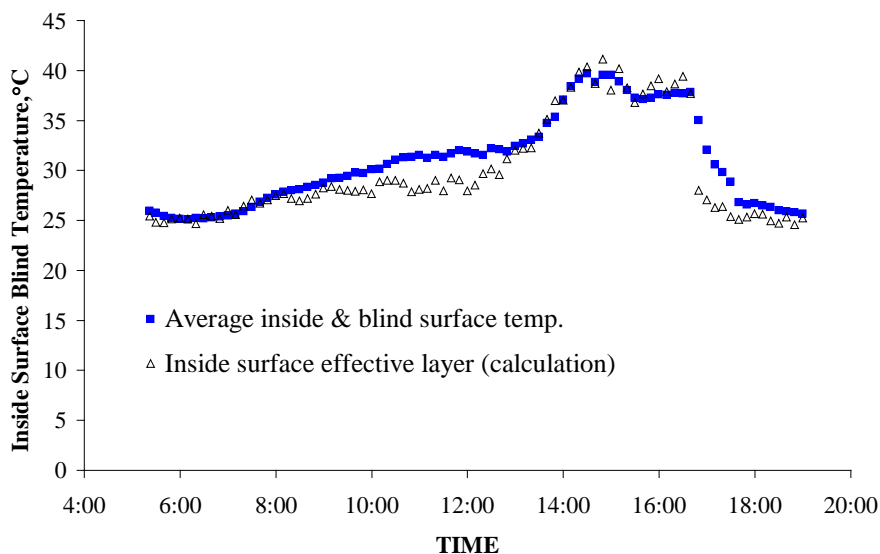
รูปที่ 5.11 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกไอโซขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.12 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากผลเฉลยมีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมง แต่เมื่อเลยเวลา 14:00 น. ค่าของอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัด และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 5.12 ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

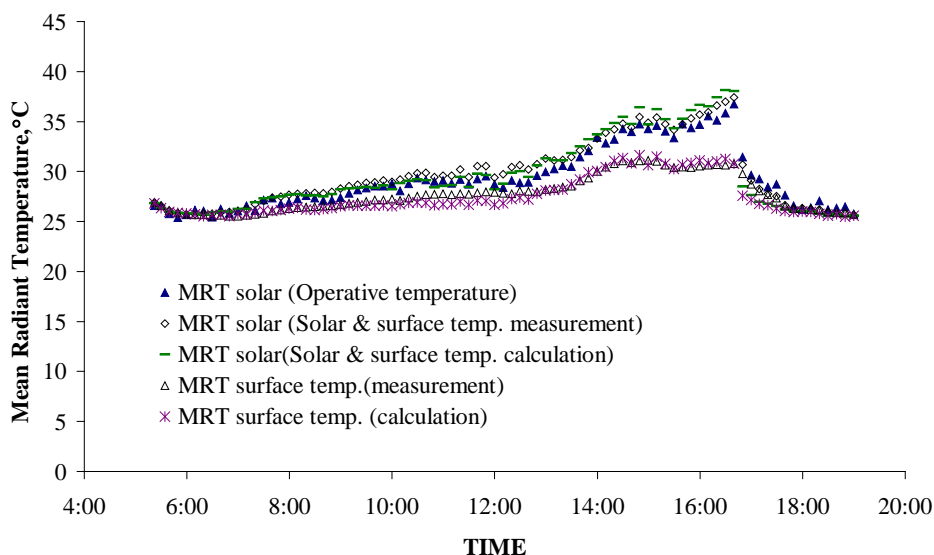
รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าที่ได้จากการนำค่าอุณหภูมิผิวของกระจกด้านใน และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ ที่ได้จากการตรวจวัดมาเฉลี่ยโดยอาศัยหลักการพื้นที่ฉายตามสัดส่วนพื้นที่ฉายของผิวของกระจก และมู่ลี่ ตามสมการที่ 3.202 และค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าของมู่ลี่ชั้น ในสุดที่ถูกพิจารณาให้เป็นชั้นเสมือน ที่คำนวณได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกันดี โดยเฉพาะในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มาตกกระทบกับหัววัดภายใน ยกเว้นเฉพาะช่วงเวลา 8:00 ถึง 12:30 น. และช่วงเวลา 17:00 ถึง 18:00 น. ค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้อาจมาจากข้อสมมุติฐานที่แตกต่างกันระหว่างการตรวจวัดและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์(ค่าที่ได้จากการตรวจวัดเป็นการเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวกระจกและอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ที่วัดได้จริง แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นค่าของอุณหภูมิผิวของผิวเสมือนด้านในที่ได้จากการสมดุลความร้อนระหว่างชั้นของหน้าต่างกระจก และชั้นเสมือน) แต่อย่างไรก็ตาม ผลของความแม่นยำระหว่างค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าที่ได้จากการตรวจวัด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถูกนำไปใช้สำหรับหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย และสุดท้ายก็จะถูกนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด



รูปที่ 5.13 ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดิมมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

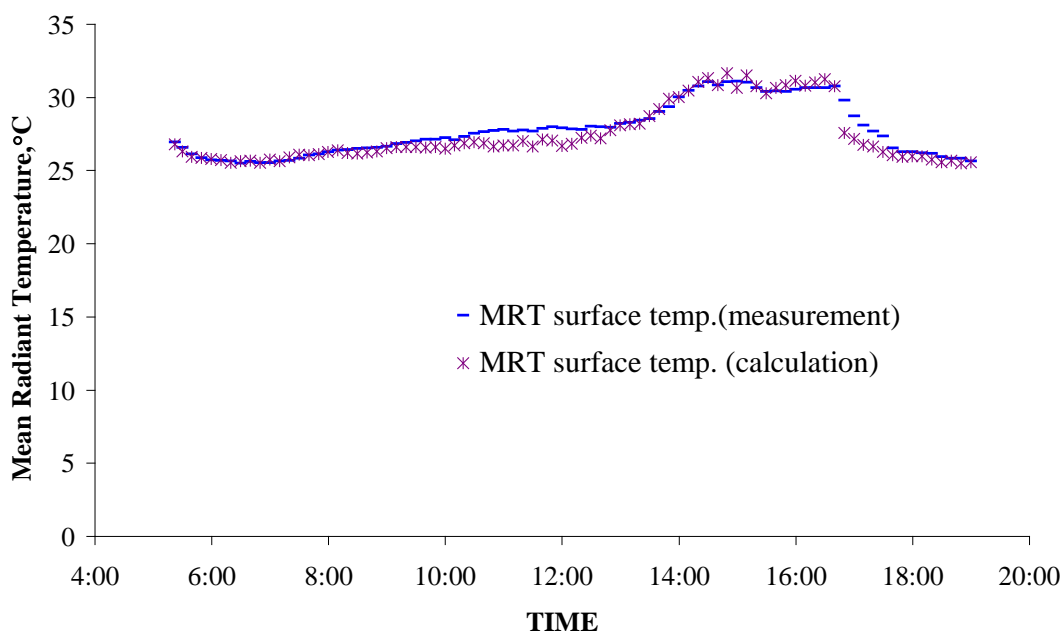
รูปที่ 5.14 ถึง 5.16 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม 0 องศา ที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 กรณี ตามสมการที่ 3.206 กรณีที่ 1 คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมผลของรังสีแสงอาทิตย์ โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการตรวจวัดทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และแบบกระจาย และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่โดยเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (T_{eff}) โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ฉายของแต่ละพื้นผิว ตามสมการที่ 3.202 และกรณีที่ 2 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวม โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.207 และสมการที่ 3.208 และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด และใช้ค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสมดุลความร้อนของระบบหน้าต่างกระจก นอกจากนี้ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูลค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากหัววัด จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลผลค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณทั้ง 2 กรณี มีความสอดคล้องกันดี และจะเห็นได้ว่า

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกับเวลา จะมีลักษณะสอดคล้องกับการแปรเปลี่ยนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก และมีค่ามากกว่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดมาจากอุณหภูมิผิว



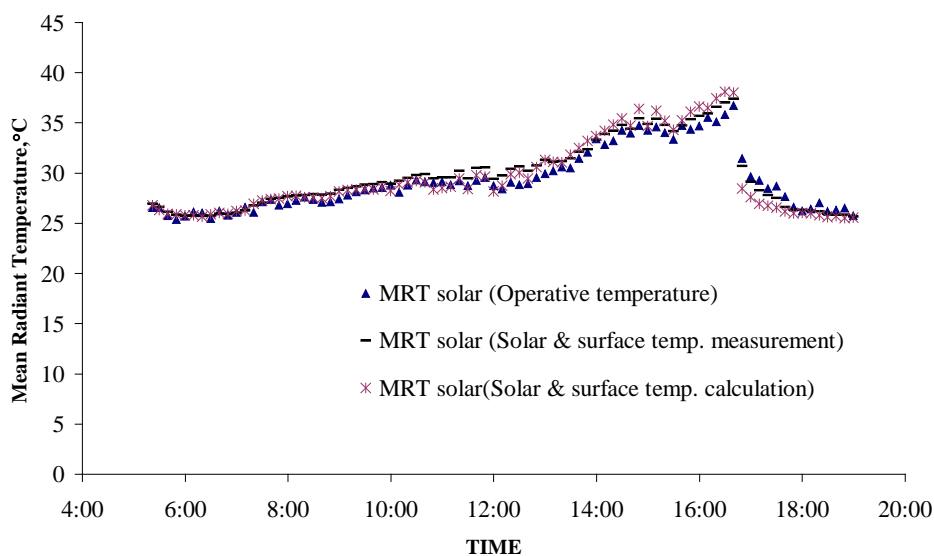
รูปที่ 5.14 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.15 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวที่ได้จากการคำนวณจากการวัดค่าอุณหภูมิผิวกระจก และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เฉลี่ย กับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.13 จากรูปที่ 5.15 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เหตุผลเนื่องมาจากการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย จำเป็นต้องใช้ค่าอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ เข้ามาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของค่าอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ มีความแม่นยำ จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีความถูกต้องมากขึ้น และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย(ประมาณ 3 K)



รูปที่ 5.15 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

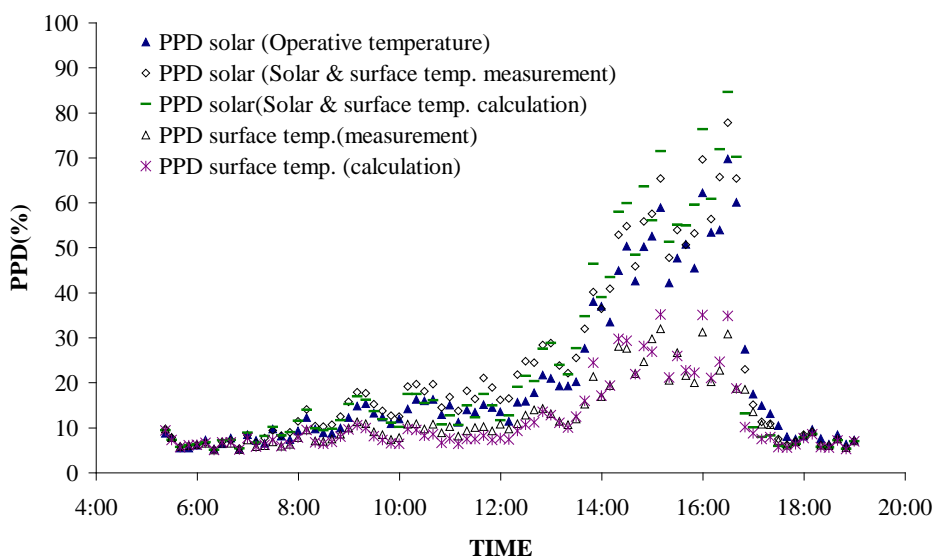
รูปที่ 5.16 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยทั้งที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของผิวกระจก และมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เทียบเท่า และค่ารังสีแสงอาทิตย์จากการคำนวณ จากรูปที่ 5.16 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เหตุผลเนื่องมาจากการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ เข้ามาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มีความแม่นยำ จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีความถูกต้องและแม่นยำ และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6 K โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 32 °C



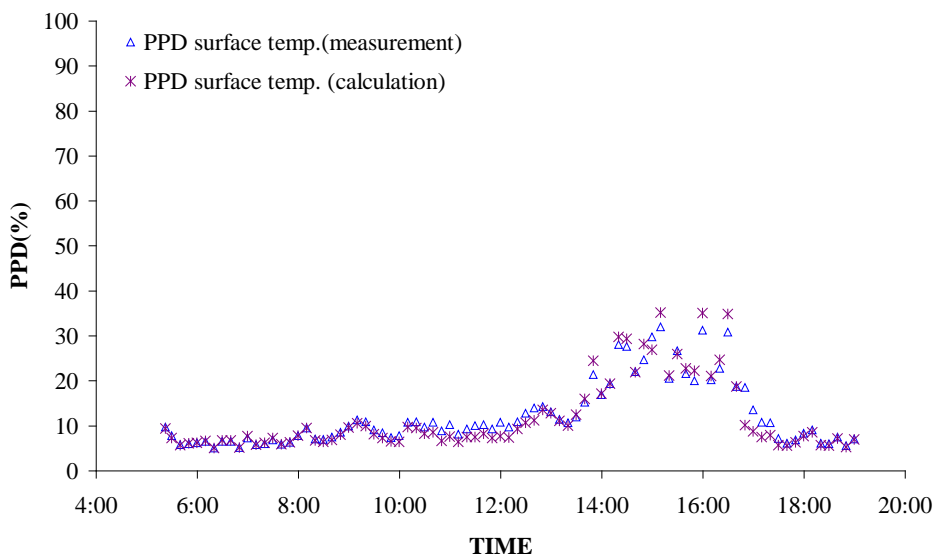
รูปที่ 5.16 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.17 ถึง 5.19 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากการประมวลผลจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนกับ ค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณ โดยรูปที่ 5.18 แสดงค่า PPD ที่จากผลของอุณหภูมิผิวกระจกกับมู่ลี่ และรูปที่ 5.19 แสดงค่า PPD ที่รวมผลรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วยที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ และค่าของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ และค่า PPD ที่คำนวณได้จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เทียบเท่า และค่ารังสีแสงอาทิตย์ (จากสมการที่ 3.202 และ 3.206) จะเห็นว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มของความสัมพันธ์สอดคล้องกันดี และในรูป 5.18 แสดงให้เห็นถึงค่า PPD ที่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว จะพบว่า ค่า PPD ยังอยู่ในระดับที่ทำให้รู้สึกเกิดความไม่สบาย ซึ่งมีค่าสูงสุดในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบโดยมีค่า PPD เท่ากับ 35% และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.19 แสดงถึงค่า PPD รวม ก็พบว่ายังมีค่าของ PPD อยู่ในเกณฑ์ที่ให้ความรู้สึกไม่สบายอย่างมาก โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 80% ในช่วงเวลาที่มีรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ เข้ามาตกกระทบกับหัววัด แต่เมื่อเทียบกับค่า PPD กรณีของกระจกใสจะมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PPD ที่ได้มีการแปรตามกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.14 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าถึงแม้อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำ (25 °C) แต่คนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับใบ 0 องศา จะรู้สึกไม่สบายมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีแสงอาทิตย์ส่องผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มากระทบตัวคนเป็นไปตาม

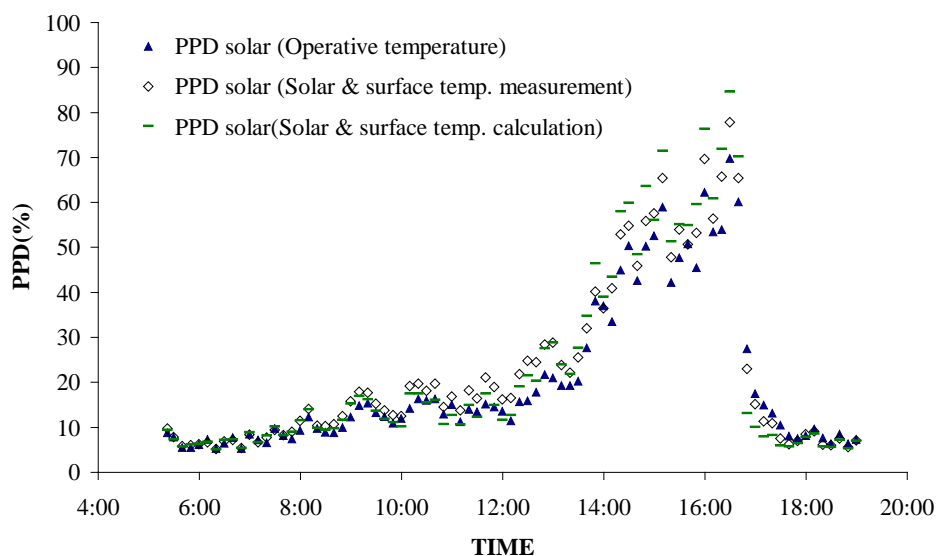
ค่า PPD รวม ซึ่งมีค่าสูงถึง 80% สำหรับกระจกใสที่มีการติดมู่ลี่ที่มีมุมบิดของใบเท่ากับ 0 องศา จะให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อน เนื่องจากผลของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์ มาตกระทบตัวคนมากกว่า ผลจากอุณหภูมิผิวกระจกที่สูงขึ้น



รูปที่ 5.17 ค่า PPD ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.18 ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

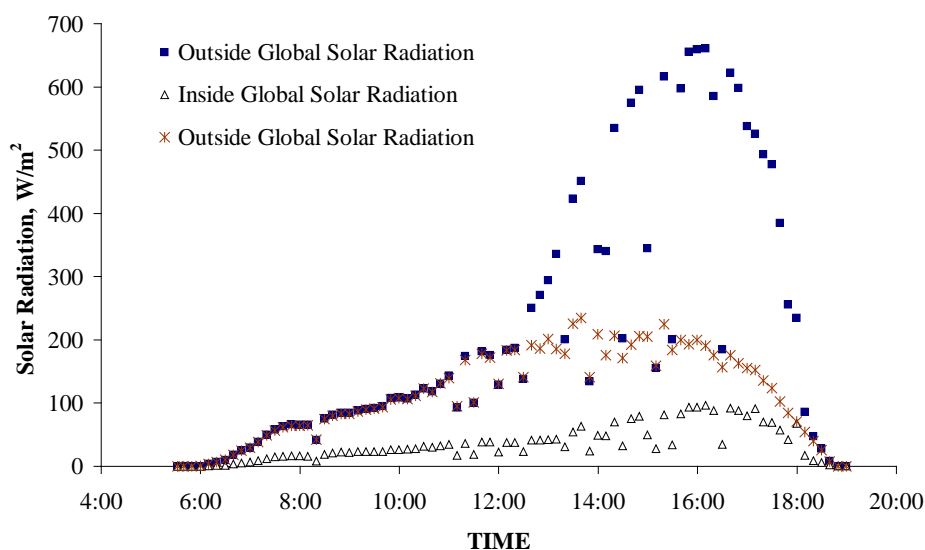


รูปที่ 5.19 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

5.2.2 ผลการวิเคราะห์กระจกติดมู่ลี่ปรับมุมเป็น 45 องศา

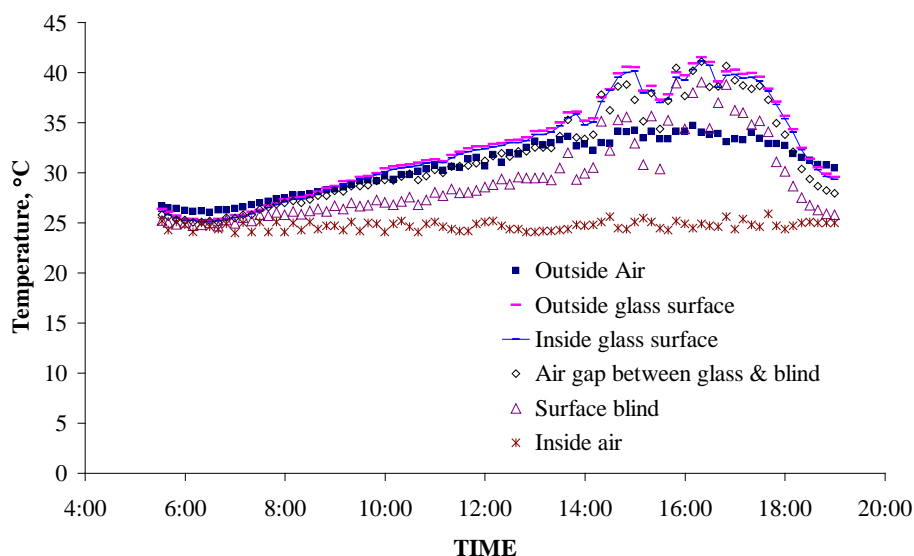
การทดลองถูกกระทำในเงื่อนไขที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่มีการปรับมุมบิดเป็น 45 องศา (เปิดมู่ลี่ให้ใบมู่ลี่เอียงทำมุม 45 องศา กับระนาบของหน้าต่าง โดยให้ด้านโค้งของใบมู่ลี่หันเข้ากับผิวกระจก) โดยมีระยะการติดตั้งมู่ลี่จากผิวด้านในของกระจก ถึงตำแหน่งกึ่งกลางมู่ลี่เท่ากับ 40 มม. และตำแหน่งกึ่งกลางของมู่ลี่ห่างจากตำแหน่งของเครื่องตรวจวัดความสบายเท่ากับ 200 มม.

รูปที่ 5.20 ถึง 5.22 เป็นผลที่ได้จากการตรวจวัด และการคำนวณของกระจกใส 1 ชั้น ที่ติดมู่ลี่ปรับมุมบิดของใบเท่ากับ 45 องศา ซึ่งกระทำการวัดในวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 รูปที่ 5.20 แสดงถึงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาสู่ภายในห้องทดลอง จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันในช่วงเช้า เนื่องจากหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ในช่วงเช้าจะมีแต่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายกระทบหัววัด ดังนั้นค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากการวัดจึงมีค่าเท่ากัน



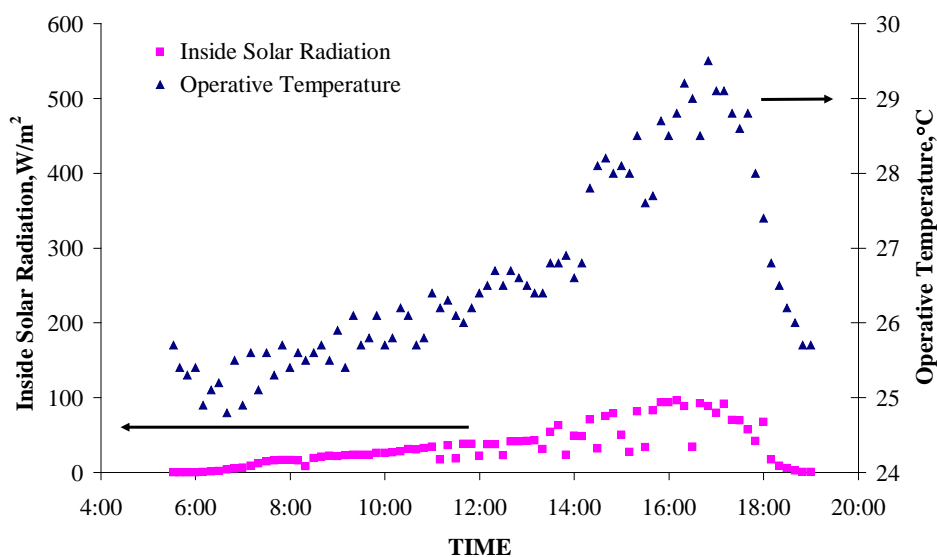
รูปที่ 5.20 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีการปรับมุมใบ 45 องศา เข้ามาสู่ภายในห้องนั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีการปรับมุมใบเป็น 0 องศา ทั้งนี้เนื่องจากผลของการบังของใบมู่ลี่ที่มีมากขึ้น จึงทำให้ไม่มีรังสีจากแสงอาทิตย์แบบตรงลอดผ่านใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดภายในได้ แต่ในช่วงระหว่างเวลา 14:00 ถึง 18:00 น. จะสังเกตเห็นว่ามีค่ารังสีแสงอาทิตย์สามารถผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาในห้องซึ่งมีค่าสูงที่สุดประมาณ 100 W/m^2 โดยรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่ผ่านเข้ามานั้น จะเป็นรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับใบมู่ลี่และเกิดการสะท้อนระหว่างใบของมู่ลี่สุดท้ายกลายเป็นรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายเข้ามาตกกระทบหัววัดจึงทำให้มีค่ารังสีแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าช่วงเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์ส่งผ่านเข้ามาในห้องจะเป็นช่วงที่เวลาที่รังสีแสงอาทิตย์เริ่มมีค่าลดลง การติดมู่ลี่ที่มีการปรับมุม 45 องศา สามารถทำให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหัววัดภายนอกซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 700 W/m^2 เมื่อผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่แล้ว มีค่าลดลงอย่างมากโดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 100 W/m^2



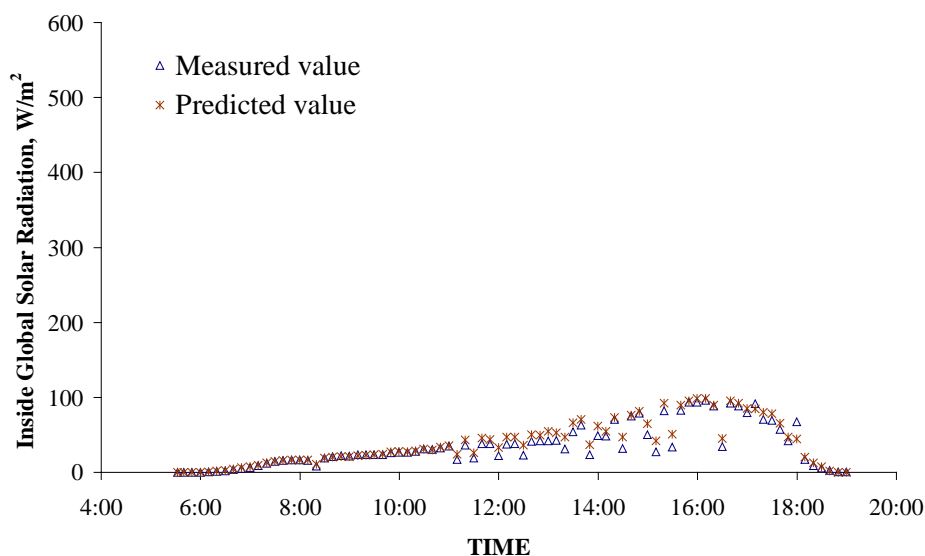
รูปที่ 5.21 ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.21 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก และด้านใน อุณหภูมิอากาศของช่องว่างผิวกระจกด้านในและใบมู่ลี่ อุณหภูมิใบมู่ลี่ กรณีปรับมุมใบ 45 องศา จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และด้านใน มีค่าใกล้เคียงกันและลักษณะการกระจายตัวเทียบกับเวลามีแนวโน้มคล้ายกับค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ แต่จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกค่อนข้างมาก(ประมาณ 8 K) ในช่วงที่แสงอาทิตย์มาตกกระทบกับหน้าต่างกระจก ทั้งนี้เนื่องจากผลของการบังของใบมู่ลี่เหมือนกับกรณีของการปรับมุมใบ 0 องศา แต่ผลของการบังจะมีมากกว่า ทำให้การกระจายตัวของอากาศโดยส่วนใหญ่หมุนเวียนอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างกระจกและใบมู่ลี่ ซึ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างนี้มีค่าสูงตามไปด้วย จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอากาศของช่องว่างนี้มีค่า และลักษณะใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศด้านใน(ประมาณ 13K) ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะกราฟของอุณหภูมิใบมู่ลี่มีลักษณะคล้ายกับกราฟของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และกราฟอุณหภูมิผิวกระจกแต่จะมีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิผิวกระจก(ประมาณ 5K) ซึ่งจะส่งผลทำให้การแผ่รังสีคลื่นยาวจากผิวกระจก และใบมู่ลี่มีค่าไม่เท่ากันเหมือนกับกรณีของมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ 0 องศา



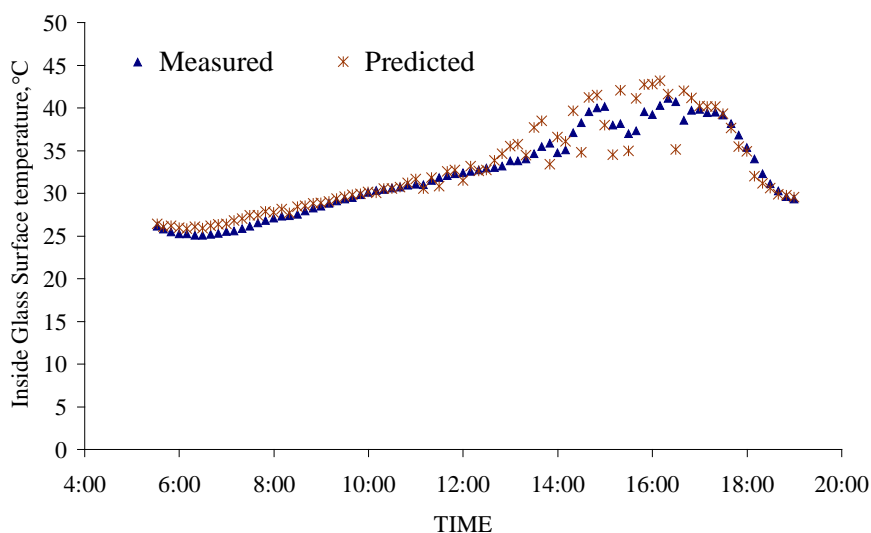
รูปที่ 5.22 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.22 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ 45 องศา และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นโค้งของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเส้นโค้งของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่สูงขึ้น และจะมีค่าลดลงตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ลดลง จากกราฟจะพบว่าสำหรับกรณีของกระจกใสติดมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีค่าสูงสุดประมาณ 28 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 90 W/m² จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีการตอบสนองตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของกระจกใส และกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา จะพบว่าเมื่อติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา จะทำให้ค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ มีค่าลดลงไปอย่างมาก



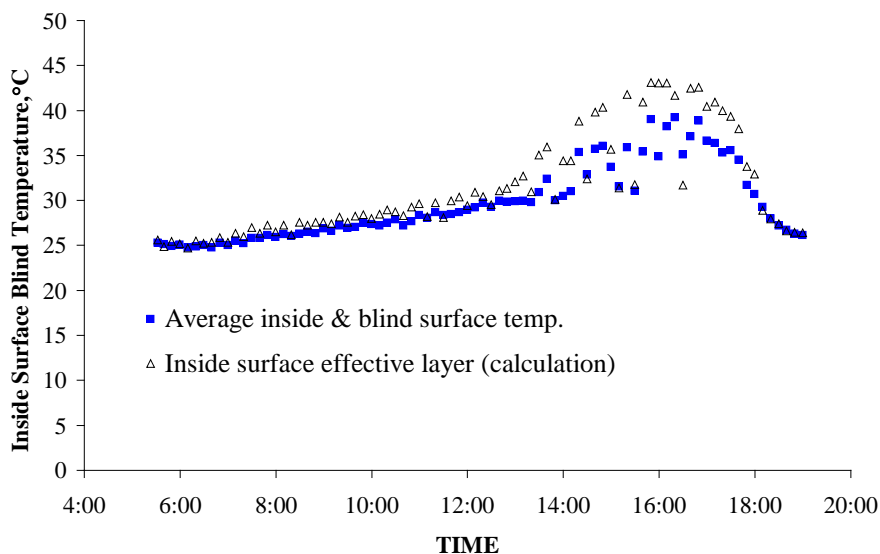
รูปที่ 5.23 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.24 ถึง 5.31 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งจากการประมวลผลของการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงให้แม่นยำขึ้น (สมการที่ 3.205) รูปที่ 5.23 เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้จากหัววัดในห้องทดลองกับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามมุม solar profile ต่างๆ กัน ของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและแบบกระจายภายนอกห้องทดลองที่วัดได้ จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความใกล้เคียงสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรกจนเมื่อเลยเวลา 14:00 น. ไปแล้วค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดวัดได้จึงเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจกจริง จึงจะเห็นได้ว่าหลัง 14:00 น. ไปแล้วค่าทั้งสองมีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 5.24 ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.24 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากผลเฉลยมีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก แต่เมื่อเลยเวลา 14:00 น. ค่าของอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัด และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี จากกราฟจะพบว่าค่าอุณหภูมิผิวกระจกมีค่าสูงสุดประมาณ 40 °C ในระหว่างช่วงเวลาประมาณ 14:00 น. ถึง 17:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก แต่รังสีแสงอาทิตย์ยังไม่ผ่านมู่ลี่ (พิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.32) จึงเป็นผลทำให้รังสีแสงอาทิตย์เกิดการสะท้อนจากใบมู่ลี่กลับเข้ามาที่กระจก จึงส่งผลให้รังสีแสงอาทิตย์ถูกดูดกลืนไว้ในตัวเนื้อกระจกมากขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิผิวกระจกมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงเวลาประมาณ 17:00 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์เริ่มมีค่าลดลง จึงส่งผลทำให้อุณหภูมิผิวกระจกเริ่มมีค่าลดลงตามไปด้วย

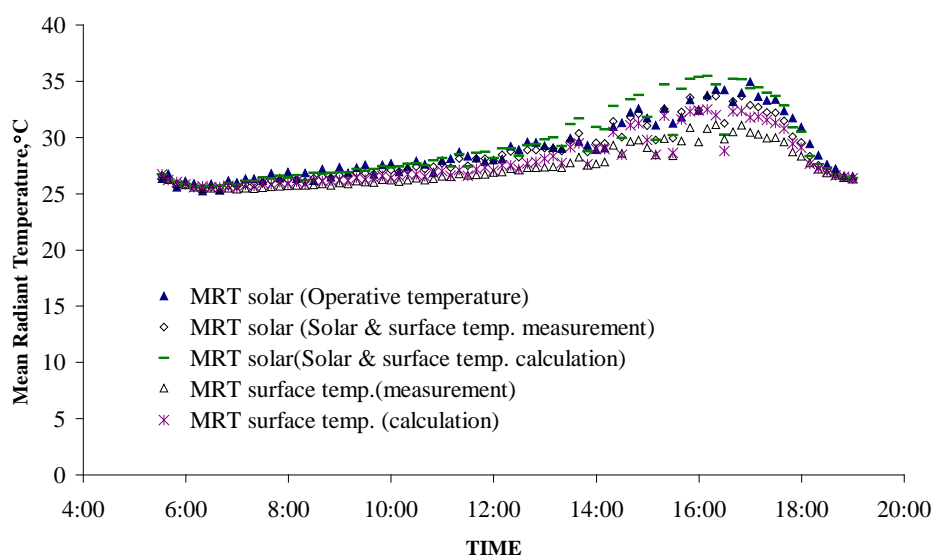


รูปที่ 5.25 ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.25 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิผิวด้านในเฉลี่ยระหว่างกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิผิวของกระจกภายใน และค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ มาเฉลี่ยโดยอาศัยหลักการพื้นที่ฉายตามสัดส่วนพื้นที่ฉายของผิวของกระจก และมู่ลี่ ตามสมการที่ 3.202 รูปที่ 5.25 ยังแสดงถึงค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ชั้นในสุดที่ถูกพิจารณาให้เป็นชั้นเสมือน ที่คำนวณได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกันดี แต่ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับมู่ลี่ ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ที่ได้จากการตรวจวัดอยู่เล็กน้อย ซึ่งผลของความถูกต้องของค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ชั้นใน จะถูกเปรียบเทียบจากการนำค่าอุณหภูมิผิวที่ได้นี้ ไปคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย และเปรียบเทียบ กับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด

รูปที่ 5.26 ถึง 5.28 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา ทั้งที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกกับมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่รวมผลรังสีแสงอาทิตย์ เข้าไปด้วยที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของผิวกระจก และมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เทียบเท่า และค่ารังสีแสงอาทิตย์ (สมการที่ 3.206 ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่

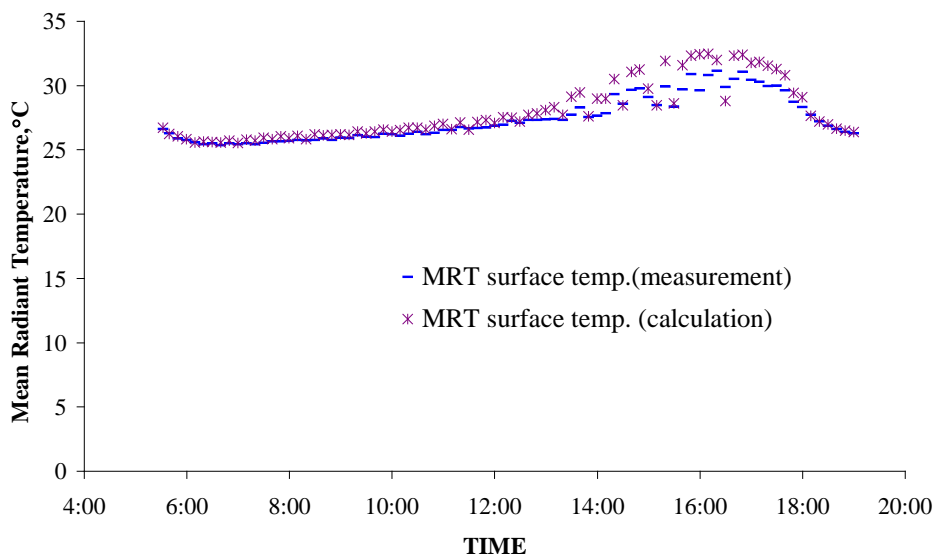
ได้รับการปรับปรุงใหม่ ในบทที่ 3) ในรูปที่ 5.14 ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูลค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากหัววัด จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกันดี และจะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกับเวลา จะมีลักษณะสอดคล้องกับการแปรเปลี่ยนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มีค่ามากกว่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดมาจากอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่



รูปที่ 5.26 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใสที่มีการติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการคำนวณ และการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.27 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวที่ได้จากการคำนวณจากการวัดค่าอุณหภูมิผิวกระจก และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เฉลี่ยตามสมการที่ 3.202 กับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.25 จากรูปที่ 5.27 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด เหตุผลเนื่องมาจากการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจำเป็นต้องใช้ค่าอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ เข้ามาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิผิวและมู่ลี่ จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จาก

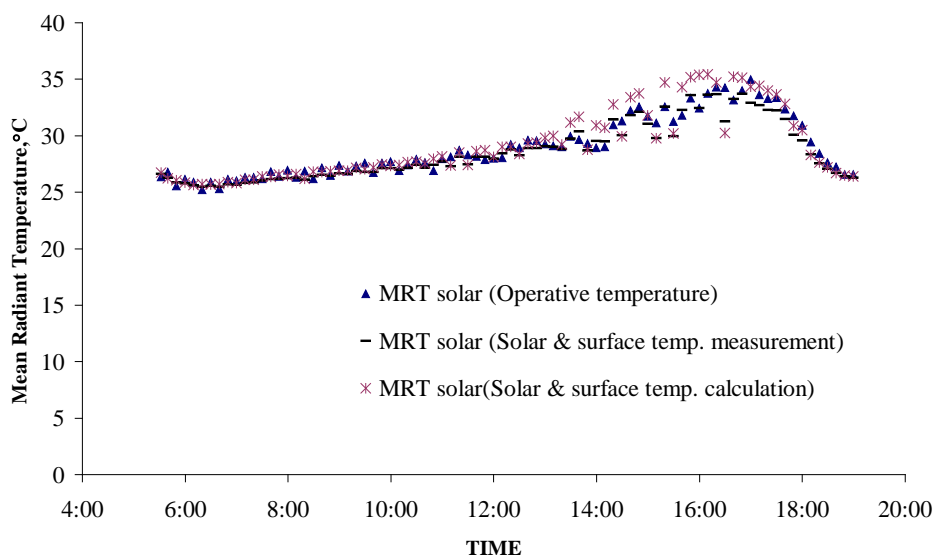
แบบจำลองมีค่าสูงกว่า และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย(ประมาณ 3 K)



รูปที่ 5.27 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.28 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา ที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 กรณี ตามสมการที่ 3.206 กรณีที่ 1 คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมผลของรังสีแสงอาทิตย์ โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการตรวจวัดทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และแบบกระจาย และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่โดยเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (T_{eff}) โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ฉายของแต่ละพื้นผิว ตามสมการที่ 3.202 และกรณีที่ 2 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวม โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.207 และสมการที่ 3.208 และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด และใช้ค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการสมดุลความร้อน นอกจากนี้ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูลค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากหัววัด จากรูปที่ 5.28 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่

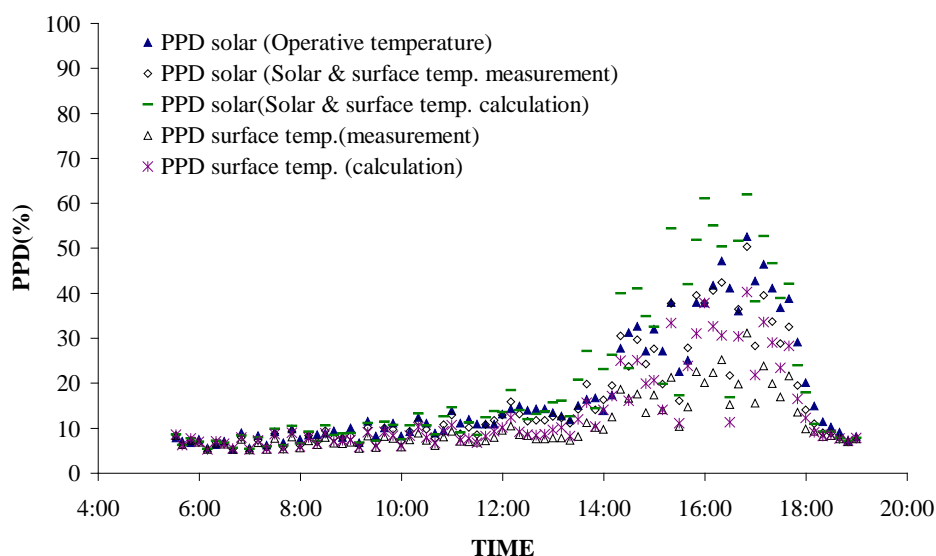
คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่า เป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเนื่องจากอุณหภูมิผิวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.27 มีค่าสูงกว่า จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยรวมมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการตรวจวัด และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 10 K โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 36 °C



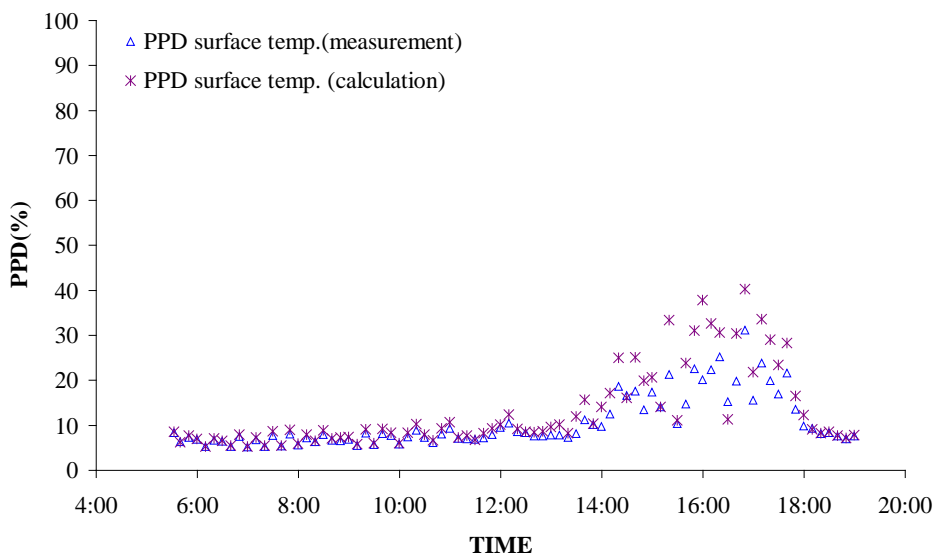
รูปที่ 5.28 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.29 ถึง 5.31 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากการประมวลผลจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนกับ ค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณ จากรูปที่ 5.29 จะพบว่าค่า PPD เนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว และผลที่เกิดจากอุณหภูมิผิว และผลที่รวมค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าสูงสุด ประมาณ 50% นั้นหมายถึงว่าผลของความไม่สบายกรณีปรับมุมใบมู่ลี่ 45 องศา จะเกิดผลมาจากผลของอุณหภูมิผิวที่เพิ่มขึ้นเป็นส่วนใหญ่ โดยรูปที่ 5.30 แสดงค่า PPD ที่จากผลของอุณหภูมิผิวกระจกกับมู่ลี่ และรูปที่ 5.31 แสดงค่า PPD ที่รวมผลรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วยที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ และค่าของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ และค่า PPD ที่คำนวณได้จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เทียบเท่า และค่ารังสีแสงอาทิตย์ (จากสมการที่ 3.202) จะเห็นว่าค่าทั้งสองมีแนวโน้มของ

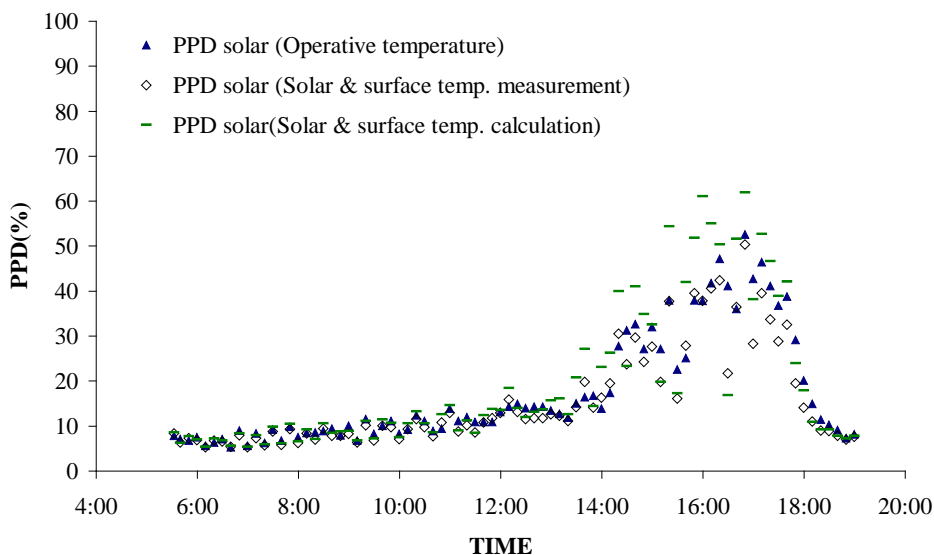
ความสัมพันธ์สอดคล้องกันดี และในรูปที่ 5.30 แสดงให้เห็นถึงค่า PPD ที่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว จะพบว่า ค่า PPD ยังอยู่ในระดับที่ทำให้รู้สึกเกิดความไม่สบาย ซึ่งมีค่าสูงสุดในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ โดยมีค่า PPD เท่ากับ 30% และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.29 แสดงถึงค่า PPD รวม ก็จะพบว่ายังมีค่าของ PPD อยู่ในเกณฑ์ที่ทำให้คนรู้สึกไม่สบาย โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 50% ในช่วงเวลาที่มีรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ เข้ามาตกกระทบกับหัววัด แต่เมื่อเทียบกับค่า PPD กรณีของกระจกใสจะมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PPD ที่ได้มีการแปรตามกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.26 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าถึงแม้อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำ (25 °C) แต่คนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับใบเป็นมุม 45 องศา ยังจะรู้สึกไม่สบายอยู่ โดยเฉพาะเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบกับมู่ลี่ทำให้อุณหภูมิผิวของใบมู่ลี่มีค่าสูงขึ้น สำหรับหน้าต่างกระจกใสติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา จะให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อนเนื่องมาจากผลจากอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ที่สูงขึ้น มากกว่าผลของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์มาตกกระทบตัวคน



รูปที่ 5.29 ค่า PPD ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554



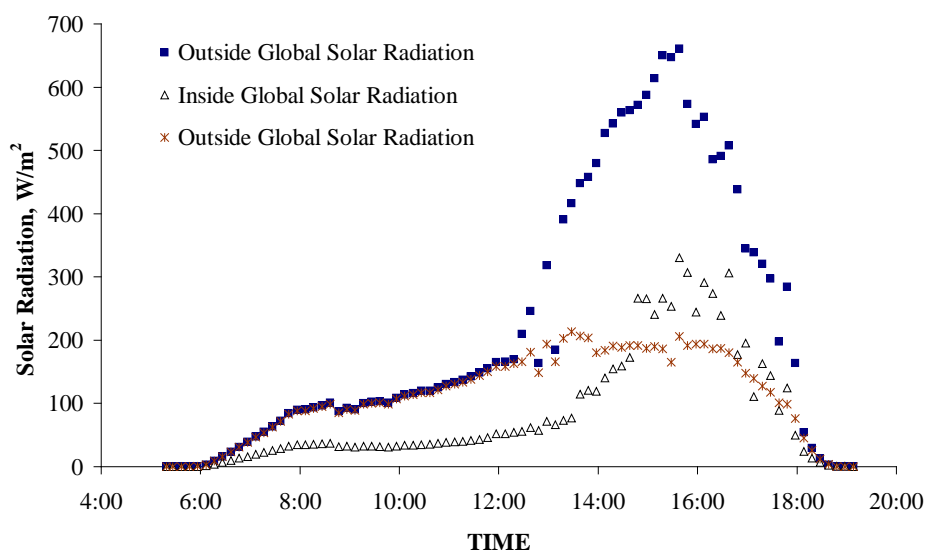
รูปที่ 5.30 ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ตัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.31 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ตัดมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

5.2.3 ผลการวิเคราะห์กระจกติดมู่ลี่ปรับมุมเป็น -45 องศา

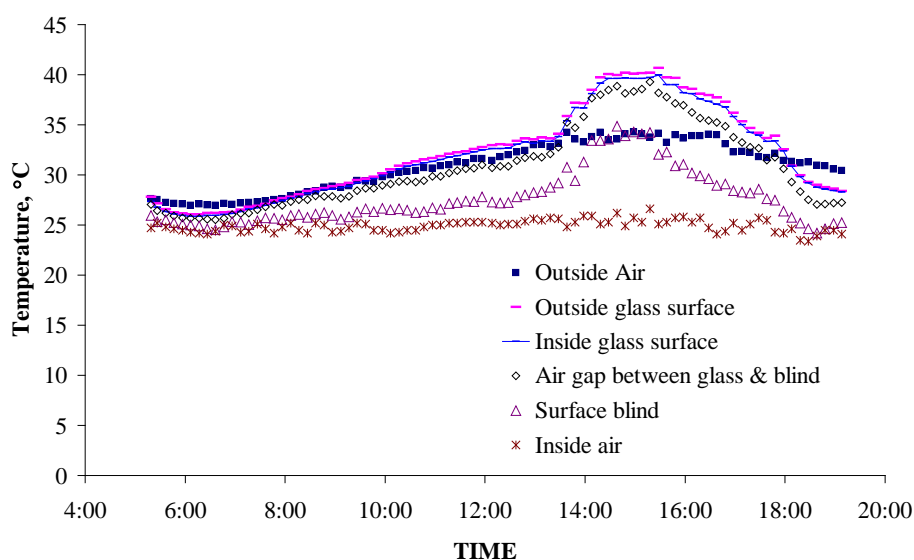
การทดลองถูกกระทำในเงื่อนไขที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่มีการปรับมุมบิดเป็น -45 องศา (เปิดมู่ลี่ให้ใบมู่ลี่เอียงทำมุม 45 องศา กับระนาบของหน้าต่าง โดยให้ด้านโค้งของใบมู่ลี่หันเข้าหาภายในห้อง) โดยมีระยะการติดตั้งมู่ลี่ ที่ตำแหน่งผิวด้านในของกระจกห่างจากกระจกด้านในเท่ากับ 40 มม. และตำแหน่งกึ่งกลางของมู่ลี่ห่างจากตำแหน่งของเครื่องตรวจวัดความสบายเท่ากับ 200 มม.



รูปที่ 5.32 ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.32 ถึง 5.34 เป็นผลที่ได้จากการตรวจวัด และการคำนวณของกระจกใส 1 ชั้น ที่ติดมู่ลี่ปรับมุมบิดของใบเท่ากับ -45 องศา ซึ่งกระทำการวัดในวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554 รูปที่ 5.32 แสดงถึงค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจาย และค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาสู่ภายในห้องทดลอง จะเห็นได้ว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายมีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกันในช่วงเช้า เนื่องจากหน้าต่างกระจกถูกติดตั้งหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ในช่วงเช้าจะมีแต่รังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายกระทบหัววัด ดังนั้นค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายจากการวัดจึงมีค่าเท่ากัน สำหรับค่ารังสีที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ที่มีการปรับมุมใบ -45 องศา เข้ามาสู่ภายในห้องนั้น จะเห็นได้ว่ารังสีสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างใบของมู่ลี่เข้ามาตกระทบหัววัด จนทำให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลา 15:00 ถึง 16:30 น. ซึ่งมีค่าสูงที่สุดประมาณ 350 W/m²

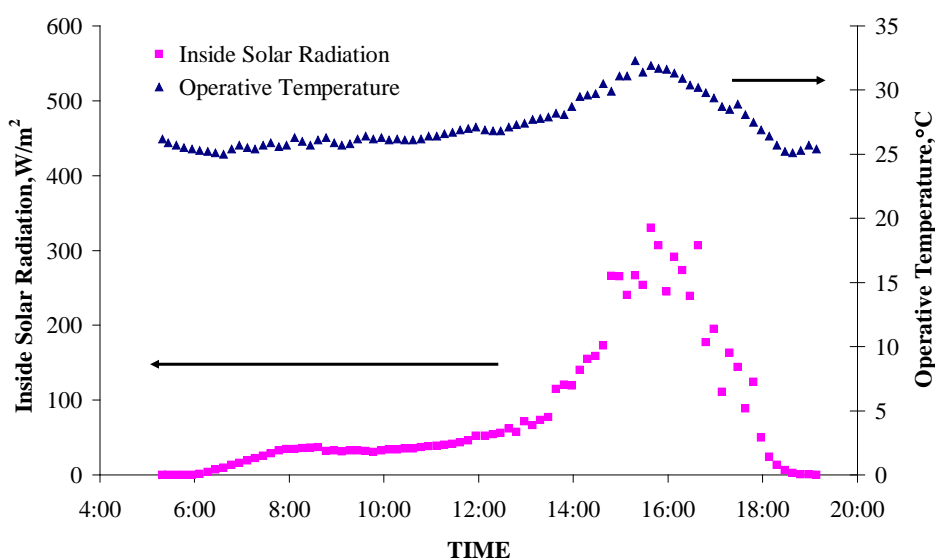
และสังเกตลักษณะของเส้นกราฟในช่วงนี้จะมีลักษณะแกว่งขึ้นลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเงาของใบมู่ลี่ที่บังหัววัดสลับกับรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถลอดผ่านใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบหัววัดตามลักษณะการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่ต่ำลง และจะพบว่ามู่ลี่ที่ปรับมุมใบ -45 องศา สามารถทำให้รังสีแสงอาทิตย์เข้ามาสู่ภายในห้องทดลองในช่วงเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบยังมีค่าสูงอยู่จึงส่งผลทำให้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจกและมู่ลี่เข้ามาในห้องมีค่าที่สูงตามไปด้วย และรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ 0 และ 45 องศา แต่ในช่วงระหว่างเวลา 16:30 ถึง 18:30 น. จะสังเกตได้ว่ามีค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่หน้าต่างกระจกและมู่ลี่เข้ามาในห้องเริ่มมีค่าลดลงเนื่องมาจากผลการบังของใบมู่ลี่ ประกอบกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบมีค่าลดลง



รูปที่ 5.33 ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ที่มีการติดมู่ลี่ซึ่งทำการปรับมุมบิดของใบเป็น -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.33 แสดงถึงอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิอากาศภายใน อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก และด้านใน อุณหภูมิอากาศของช่องว่างผิวกระจกด้านในและใบมู่ลี่ อุณหภูมิใบมู่ลี่ กรณีปรับมุมใบ -45 องศา จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และด้านใน มีค่าใกล้เคียงกันและลักษณะการกระจายตัวเทียบกับเวลามีแนวโน้มคล้ายกับค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ แต่จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกค่อนข้างมาก(ประมาณ 10 K) ในช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับหน้าต่างกระจก ทั้งนี้เนื่องจากผลของการบังของใบมู่ลี่เหมือนกับกรณีของการปรับมุมใบ 0 และ 45 องศา แต่ผลของการบังคล้ายจะกับกรณีของมู่ลี่ปรับมุมใบ 45 องศา ทำให้การกระจาย

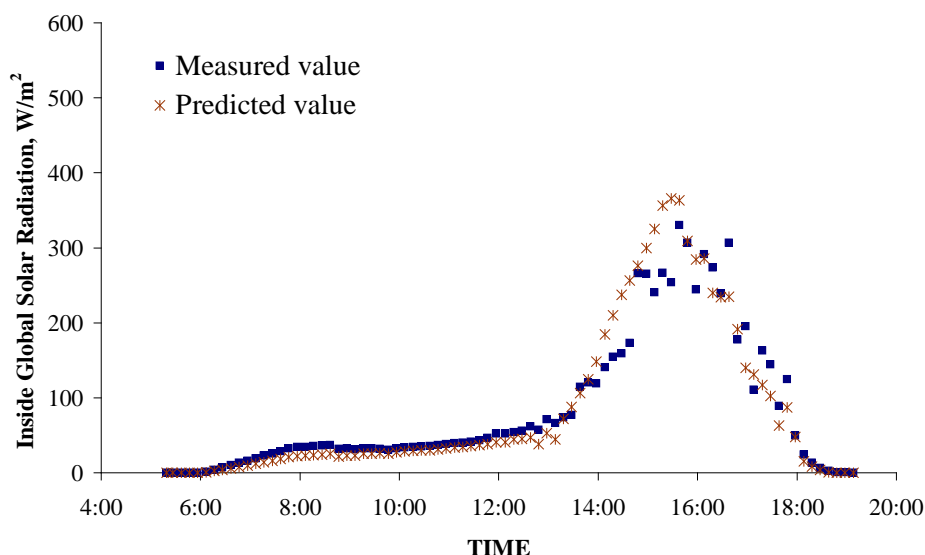
ตัวของอากาศโดยส่วนใหญ่หมุนเวียนอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างกระจกและใบมู่ลี่ ซึ่งส่งผลทำให้ อุณหภูมิของอากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างนี้มีค่าสูงตามไปด้วย แต่จะสังเกตได้ว่าทั้งค่าอุณหภูมิผิว กระจก อุณหภูมิช่องว่างอากาศ และอุณหภูมิของใบมู่ลี่ จะมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่เวลาประมาณ 14:00 น. และเริ่มมีค่าลดลง เมื่อรังสีแสงอาทิตย์สามารถลอดผ่านใบมู่ลี่เข้ามาตกกระทบหัววัด ภายในได้ที่เวลาประมาณ 15:00 น. จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของอากาศของช่องว่างนี้มีค่า และลักษณะใกล้เคียงกับอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิอากาศด้านใน(ประมาณ 17K) ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะกราฟของอุณหภูมิใบมู่ลี่มี ลักษณะคล้ายกับกราฟของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และเมื่อพิจารณาจากกราฟของอุณหภูมิผิว กระจก และกราฟของอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ จะพบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกัน แต่จะมีค่าต่ำกว่าค่า อุณหภูมิผิวกระจก(ประมาณ 7K) ซึ่งจะส่งผลทำให้การแผ่รังสีคลื่นยาวจากผิวกระจก และใบมู่ลี่มี ค่าไม่เท่ากันเหมือนกับกรณีของมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ 0 องศา



รูปที่ 5.34 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ ที่ได้จากการตรวจวัดของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัด ของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.34 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่าง กระจกติดมู่ลี่ที่ปรับมุมใบ -45 องศา และค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นโค้ง ของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับเส้นโค้งของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูก ส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่ โดยจะมีค่าสูงขึ้นตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ สูงขึ้น และจะมีค่าลดลงตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ลดลง จากกราฟจะพบว่า

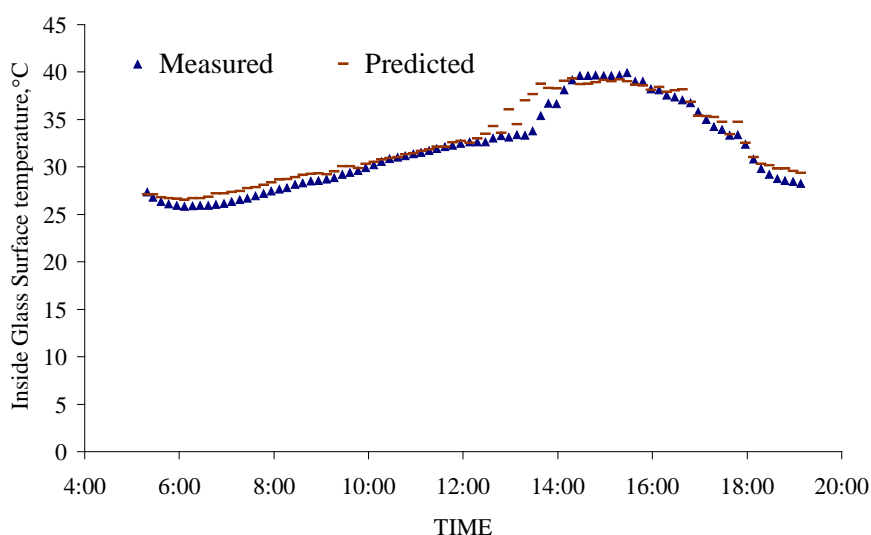
สำหรับกรณีของกระจกใสติดมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีค่าสูงสุดประมาณ $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 350 W/m^2 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟมีการตอบสนองตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ มีลักษณะกราฟเป็นรูปสามเหลี่ยมในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบ โดยในช่วงเวลา 14:00 น. ถึง 15:00 น. เป็นช่วงที่รังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งรังสีแสงอาทิตย์ที่วัดได้ในส่วนนี้จะเป็นรังสีแสงอาทิตย์ตกกระทบใบมู่ลี่ และสะท้อนเข้าสู่ด้านใน และเมื่อรังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่เวลา 15:00 น. รังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านกระจก และมู่ลี่ เข้ามาจะเป็นรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่ลอดผ่านช่องว่างของมู่ลี่ และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของกระจกใส และกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา จะพบว่าเมื่อติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกมีค่าสูงกว่ากรณีของหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุมใบ 0 องศา และมุมใบ 45 องศา ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ



รูปที่ 5.35 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่านที่ได้จากการตรวจวัดและค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.35 ถึง 5.39 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งจากการประมวลผลของการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับการปรับปรุงให้แม่นยำขึ้น (สมการ 3.206) ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 5.35 เป็นรูปที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่วัดได้จากหัววัดในห้องทดลองกับค่ารังสี

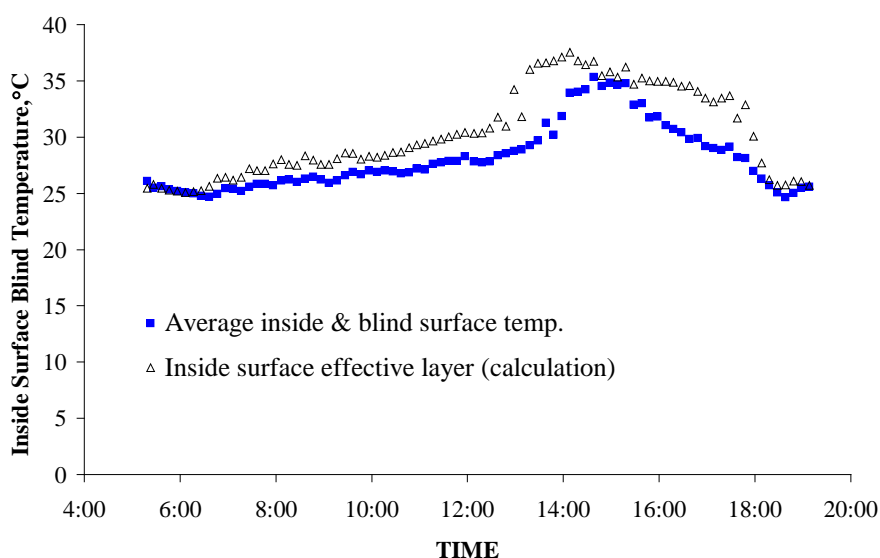
แสงอาทิตย์แบบรวมที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามมุม solar profile ต่างๆ กันของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมและรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายภายนอกห้องทดลองที่วัดได้ จะเห็นได้ว่าค่าที่แสดงมีความใกล้เคียงและสอดคล้องกันดียกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก จนเมื่อเลยเวลา 14:00 น. ไปแล้วค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดวัดได้จึงเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจกจริง จึงจะเห็นได้ว่าหลัง 14:00 น. ไปแล้วค่าทั้งสองมีความสอดคล้องกันดี



รูปที่ 5.36 ค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวกระจกภายในที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.36 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากผลเฉลยมีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่หัววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก แต่เมื่อเลยเวลา 14:00 น. ค่าของอุณหภูมิ

ผิวกระจกภายในที่ได้จากการตรวจวัด และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี จากกราฟจะพบว่าค่าอุณหภูมิผิวกระจกมีค่าสูงสุดประมาณ 40 °C ที่เวลาประมาณ 14:00 น. ซึ่งเป็นเวลาที่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก แต่รังสีแสงอาทิตย์ยังไม่ผ่านมู่ลี่ (พิจารณาจากกราฟรูปที่ 5.32) จึงเป็นผลทำให้รังสีแสงอาทิตย์เกิดการสะท้อนจากใบมู่ลี่กลับเข้ามาที่กระจก จึงส่งผลให้รังสีแสงอาทิตย์ถูกดูดกลืนไว้ในตัวเนื้อกระจกมากขึ้น มีผลทำให้อุณหภูมิผิวกระจกมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงเวลาประมาณ 15:00 น. ค่ารังสีแสงอาทิตย์สามารถผ่านใบมู่ลี่เข้าไปตกกระทบหัววัดรังสีแสงอาทิตย์ภายในได้ จึงทำให้ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนระหว่างใบมู่ลี่ และกระจกมีค่าลดลงจึงส่งผลทำให้อุณหภูมิผิวกระจกเริ่มมีค่าลดลงตามไปด้วย และหลังจากนั้นค่าของอุณหภูมิผิวของกระจกก็จะลดลงตามค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหัววัดภายนอก

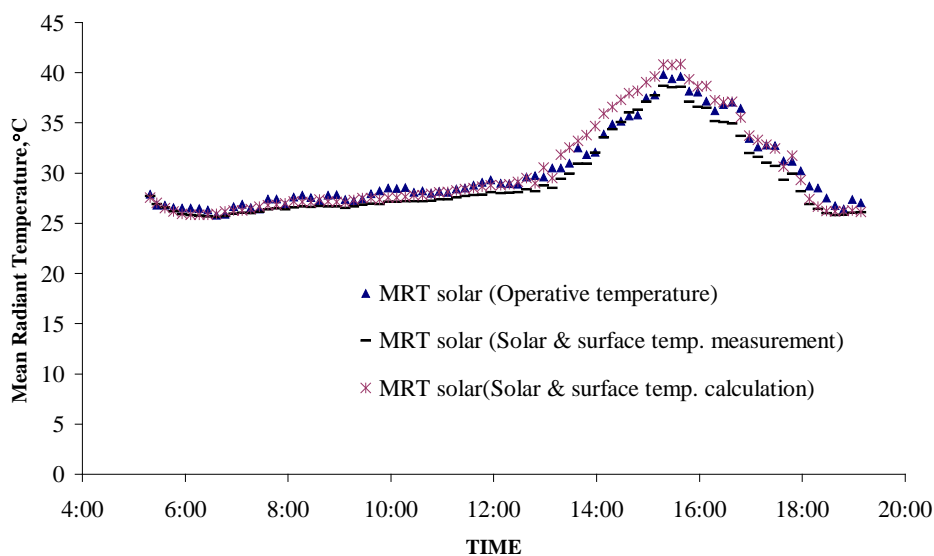


รูปที่ 5.37 ค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่าอุณหภูมิผิวด้านในของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ดิมมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.37 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิผิวด้านในเฉลี่ยระหว่างกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิผิวของกระจกภายใน และค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ มาเฉลี่ยโดยอาศัยหลักการพื้นที่ผิวด้านตามสัดส่วนพื้นที่ผิวด้านของผิวของกระจก และมู่ลี่ ตามสมการที่ 3.202 รูปที่ 5.37 ยังแสดงถึงค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ชั้นในสุดที่ถูกพิจารณาให้เป็นชั้นเสมือนที่คำนวณได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยส่วนใหญ่มีความสอดคล้องกันดี ยกเว้นช่วงระหว่างเวลา 12:00 ถึง 14:00 น. ซึ่ง

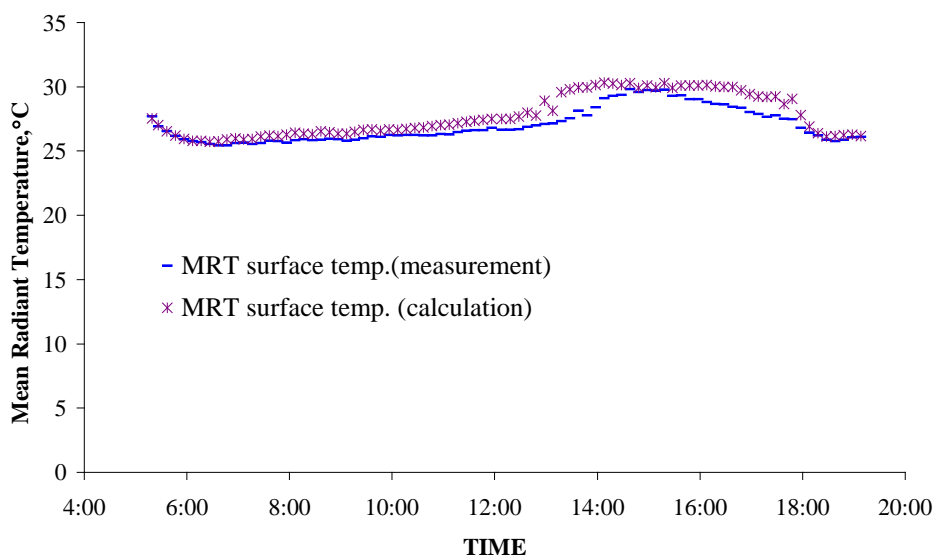
สามารถอธิบายได้ว่า ค่าที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นคำนวณจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ภายนอกที่ห้ววัดที่ติดตั้งอยู่ภายนอกหน้าต่างกระจกวัดได้ซึ่งจะเป็นค่าที่แตกต่างจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกจริงประมาณ 2 ชั่วโมงในช่วงแรก และเมื่อเวลาประมาณ 15:00 น. ค่าของอุณหภูมิผิวเทียบเท่าที่ได้จากการวัด และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าลดลง เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างใบมู่ลี่เข้าไปภายในห้องทดลองได้ จึงส่งผลทำให้ความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับหน้าต่างกระจก และมู่ลี่มีค่าลดลง ค่าของอุณหภูมิผิวเฉลี่ยของกระจก และมู่ลี่ จึงมีค่าลดลงตามไปด้วย และในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับมู่ลี่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีค่าสูงกว่า ค่าที่ได้จากการเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ที่ได้จากการวัดอยู่เล็กน้อย ซึ่งความถูกต้องของค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าที่ได้จากการตรวจวัด และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะถูกนำไปคำนวณและเปรียบเทียบในรูปของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

รูปที่ 5.38 ถึง 5.40 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม -45 องศาที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 กรณี ตามสมการที่ 3.206 กรณีที่ 1 คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมผลของรังสีแสงอาทิตย์ โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการตรวจวัดทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และแบบกระจาย และค่าอุณหภูมิผิวผนังภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งค่าอุณหภูมิผนังด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่โดยเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (T_{eff}) โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ฉายของแต่ละพื้นผิว ตามสมการที่ 3.202 และกรณีที่ 2 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวม โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.207 และสมการที่ 3.208 และค่าอุณหภูมิผิวผนังภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด และใช้ค่าอุณหภูมิผนังด้านที่เป็นกระจก และมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสมดุลความร้อน นอกจากนี้ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูล ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากห้ววัด จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการประมวลค่าของอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการคำนวณสอดคล้องกันดี และจะเห็นได้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกับเวลา จะมีลักษณะสอดคล้องกับการแปรเปลี่ยนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก ซึ่งมีลักษณะของกราฟเป็นรูปสามเหลี่ยมเหมือนกัน นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มีค่ามากกว่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดมาจากอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่เพียงอย่างเดียว



รูปที่ 5.38 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใสที่มีการติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการคำนวณ และการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

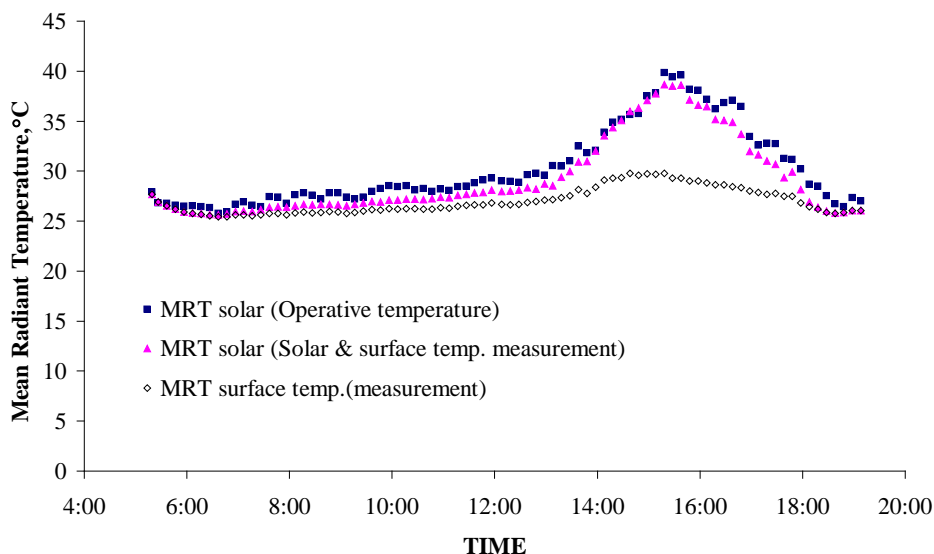
รูปที่ 5.39 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากผลของอุณหภูมิผิวที่ได้จากการคำนวณจากการวัดค่าอุณหภูมิผิวกระจก และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เฉลี่ย กับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ที่ได้แสดงในรูปที่ 5.37) รูปที่ 5.39 เป็นรูปที่ถูกแยกออกจากรูปที่ 5.38 เพื่อนำมาพิจารณาอย่างละเอียดอีกครั้ง จากรูปที่ 5.39 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด เหตุผลเนื่องมาจากการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย จำเป็นต้องใช้ค่าอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ เข้ามาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากผลการการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของค่าอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิผิวและมู่ลี่ จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่า และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย(ประมาณ 3 K)



รูปที่ 5.39 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.40 แสดงถึงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยกรณีที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา ที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 กรณี ตามสมการที่ 3.206 กรณีที่ 1 คือ ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมผลของรังสีแสงอาทิตย์ โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกที่ได้จากการตรวจวัดทั้งค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบตรง และแบบกระจาย และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัดรวมทั้งค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่โดยเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ให้เป็นค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (T_{eff}) โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ฉายของแต่ละพื้นผิว ตามสมการที่ 3.202 และกรณีที่ 2 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวม โดยใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.207 และสมการที่ 3.208 และค่าอุณหภูมิผิวนั่งภายในห้องที่ได้จากการตรวจวัด และใช้ค่าอุณหภูมิผิวนั่งด้านที่เป็นกระจกและมู่ลี่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสมดุลความร้อน นอกจากนี้ยังแสดงค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยแบบรวมที่หาได้จากการประมวลผลด้วยเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนจากข้อมูล ค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟที่วัดได้จากหัววัด รูปที่ 5.40 เป็นรูปที่ถูกแยกออกจากรูปที่ 5.38 เพื่อนำมาพิจารณาอย่างละเอียดอีกครั้ง จากรูปที่ 5.40 ก็จะพบว่า ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คำนวณได้จากการตรวจวัด จะมีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมทั้ง

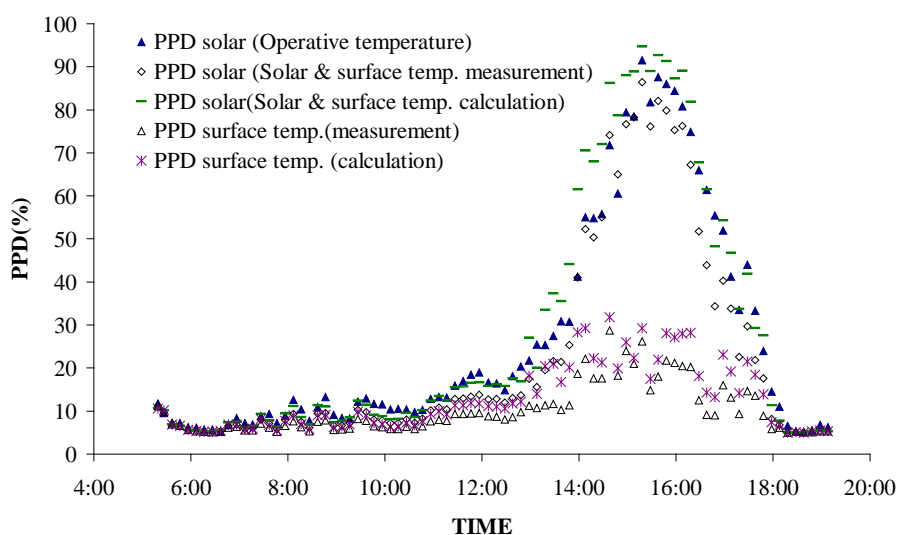
สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ แต่ค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเนื่องจากอุณหภูมิผิวของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้จากรูป 5.39 มีค่าสูงกว่า จึงส่งผลทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยรวมมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการตรวจวัด และพบว่าในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบกับกระจกจะทำให้ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 14 K โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 40 °C



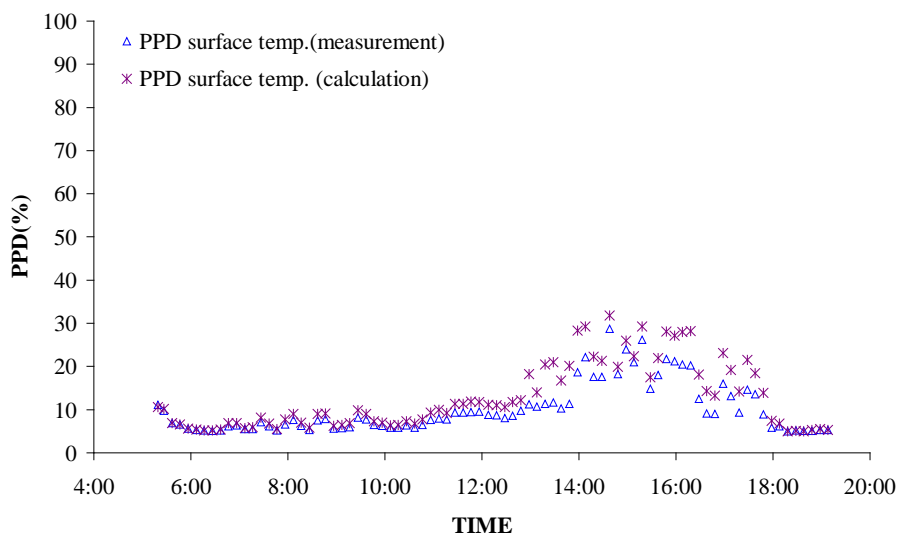
รูปที่ 5.40 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รูปที่ 5.41 ถึง 5.43 แสดงถึงค่า PPD ที่ได้จากการประมวลผลจากเครื่องประมวลผลความสบายเชิงความร้อนกับ ค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณ จากรูปที่ 5.41 จะพบว่าค่า PPD เนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว มีค่าต่ำกว่าค่า PPD เนื่องจากผลที่เกิดจากอุณหภูมิผิว และผลที่รวมค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย โดยมีค่าสูงสุด ประมาณ 20% และ 90% ตามลำดับ นั้นหมายความว่าผลของความไม่สบายกรณีปรับมุมใบมู่ลี่ -45 องศา จะเกิดผลมาจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านมู่ลี่ปรับมุม -45 องศาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งระดับของความรู้สึกไม่สบายมีค่าสูงใกล้เคียงกับกรณีของหน้าต่างกระจกใสในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ แต่จะต่างกันตรงที่ช่วงเวลาความไม่สบายจะไม่เกิดขึ้นโดยทันที แต่จะค่อยเพิ่มระดับขึ้นไปเรื่อยๆ และช่วงเวลาของความไม่สบายก็จะสั้นกว่า จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่า PPD อย่างละเอียดโดยการนำรูปที่ 5.42 และ รูปที่ 5.43 แยกออกมาจากรูปที่ 5.41 โดยรูปที่ 5.42 แสดงค่า PPD ที่จากผลของอุณหภูมิผิว

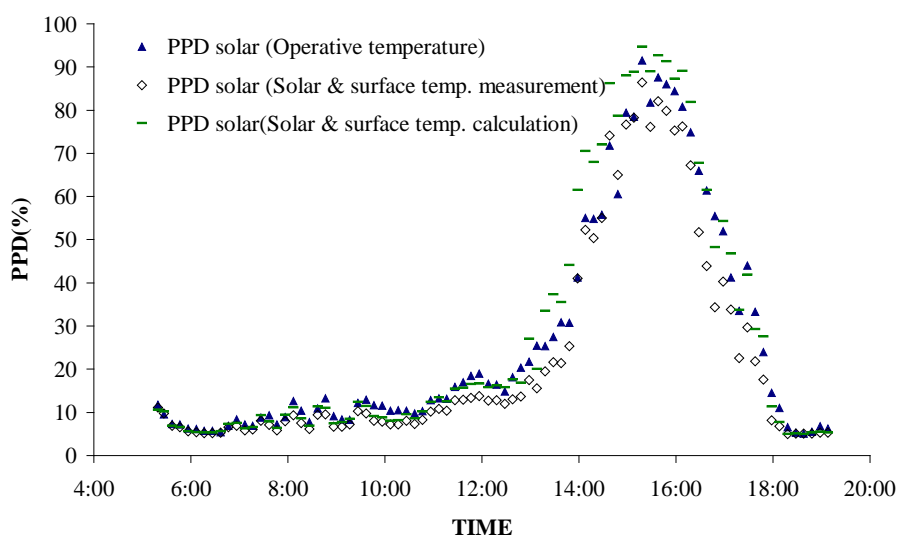
กระจกกับมู่ลี่เพียงอย่างเดียว และรูปที่ 5.43 แสดงค่า PPD ที่รวมผลรังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วยที่ได้จากการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ และค่าของอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ และค่า PPD ที่คำนวณได้จากผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เทียบเท่า ที่รวมผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย (จากสมการที่ 3.206) อีกทั้งแสดงค่า PPD ที่ได้จากห้ววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทั้งสอง กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีแนวโน้มของความสัมพันธ์สอดคล้องกันดี และในรูปที่ 5.42 แสดงให้เห็นถึงค่า PPD ที่คำนึงถึงผลของอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว จะพบว่า ค่า PPD มีค่าอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งมีค่าสูงสุดในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบโดยมีค่า PPD เท่ากับ 20% และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.42 แสดงถึงค่า PPD รวม ก็พบว่ายังมีค่าของ PPD อยู่ในเกณฑ์ที่ให้ความรู้สึกไม่สบาย โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 90% ในช่วงเวลาที่มีรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่เข้ามาตกกระทบกับห้ววัด ซึ่งให้ระดับของความรู้สึกไม่สบายได้คล้ายกับกรณีของกระจกใส นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PPD ที่ได้มีการแปรตามกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.38 นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าถึงแม้อุณหภูมิอากาศภายในห้องจะมีค่าต่ำ (25°C) แต่คนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับใบ -45 องศา จะรู้สึกไม่สบายมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบกับมู่ลี่ทำให้อุณหภูมิผิวของใบมู่ลี่มีค่าสูงขึ้น สำหรับกระจกใส ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา จะให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อน เนื่องมาจากผลของการส่งผ่านความร้อนจากแสงอาทิตย์มาตกกระทบตัวคน จะมีมากกว่าผลจากอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ที่สูงขึ้น



รูปที่ 5.41 ค่า PPD ที่ได้จากการคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

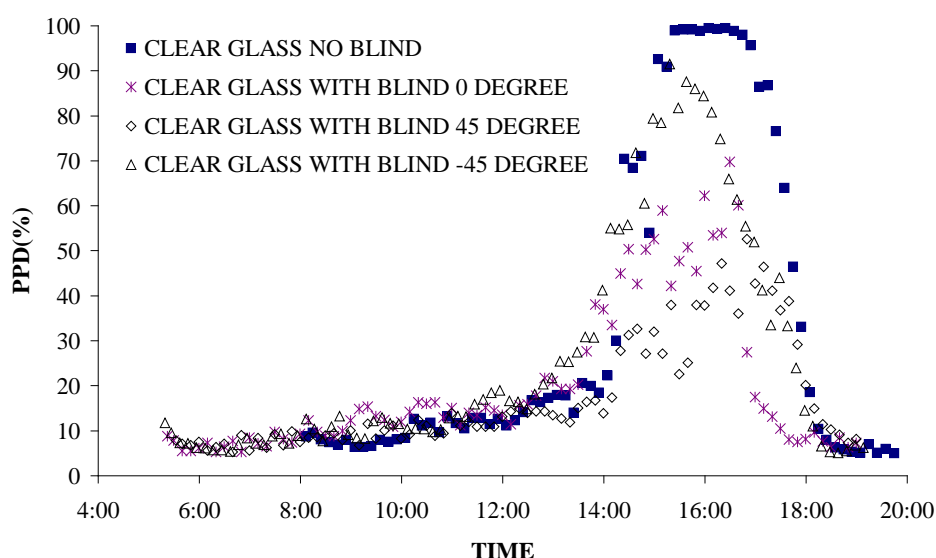


รูปที่ 5.42 ค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและค่า PPD ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส ขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554



รูปที่ 5.43 ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่เกิดจากการรวมผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ กับค่ารังสีแสงอาทิตย์เข้าไปด้วย ที่ได้จากคำนวณจากการตรวจวัดและที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใสขนาดความหนา 6 มม. ติดมู่ลี่ปรับมุมใบ -45 องศา ที่ได้จากการตรวจวัดของวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2554

จากรูปที่ 5.44 แสดงค่า PPD รวมของหน้าต่างกระจกใสตัวเปล่า และหน้าต่างกระจกใสที่มีการติดตั้งมู่ลี่ซึ่งปรับมุมใบมู่ลี่เป็น 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา ตามลำดับ จากรูปที่ 5.44 จะเห็นได้ว่าในช่วงเช้าตั้งแต่เวลา 6:00 น. ถึง 12:00 น. ค่า PPD ทั้ง 4 กรณี จะมีค่าต่ำกว่า 20% ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากอุณหภูมิผิวกระจก และมู่ลี่ และผลกระทบรังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ส่งผ่านเข้ามาสู่ผู้อาศัย ทั้งนี้เนื่องจากห้องทดลองหันหน้าไปทางทิศตะวันตก ในช่วงเช้าจึงมีค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผลของอุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่ ในช่วงที่ยังไม่มีรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงเข้ามาตกกระทบกับผู้อาศัย จะไม่ส่งผลกระทบต่อความรู้สึกไม่สบายของคนที่อยู่ภายในมากนัก โดยผู้อาศัยภายในยังคงรู้สึกพอใจกับสภาวะในขณะนั้น แต่เริ่มมีรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาตกกระทบความรู้สึกไม่สบายจะเริ่มมีมากขึ้น โดยเฉพาะกระจกใส ที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ ซึ่งจะก่อให้เกิดความรู้สึกไม่สบายจนทนไม่ได้ โดยพิจารณาจากค่า PPD ซึ่งมีค่าสูงสุดประมาณ 100%



รูปที่ 5.44 การเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกใสที่ไม่มีการติดตั้งมู่ลี่ และค่า PPD ของหน้าต่างกระจกใสที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่ทำการปรับมุมใบของใบเท่ากับ 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา

สำหรับหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่มีการปรับมุมใบของใบเท่ากับ 0 องศา ก็สามารถลดความรู้สึกไม่สบายเชิงความร้อนลดลงมาได้พอสมควร โดยพิจารณาจากค่า PPD ที่มีค่าสูงสุดประมาณ 60% แต่คนก็ยังมีความรู้สึกไม่สบาย โดยเฉพาะช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาตกกระทบ สำหรับกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่ปรับมุมใบเป็น 45 องศา จะสามารถลดค่า PPD ลงไปได้มากที่สุด ซึ่งมีค่า PPD สูงสุดประมาณ 50% โดยผลของความไม่สบายจะเกิดมาจากผลของอุณหภูมิผิวของ

กระจก และมู่ลี่เป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกแต่ไม่สามารถที่จะผ่านมู่ลี่เข้าไปได้ ก็จะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างกระจก และมู่ลี่ จึงส่งผลให้กระจก และมู่ลี่มีการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้อุณหภูมิผิวมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การปรับมุมใบมู่ลี่เป็น 45 องศา ก็ยังส่งผลทำให้แสงสว่างเข้ามาได้น้อยลง และยังทำให้ผู้อยู่อาศัย ภายในไม่สามารถเห็นทิวทัศน์ภายนอกได้ สำหรับหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบเป็น -45 องศา มีผลทำให้ค่า PPD มีค่าสูงถึง 90% ในช่วงที่มีรังสีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ ซึ่งทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สบายอย่างมาก โดยกรณีของมู่ลี่ปรับมุมใบเป็น -45 องศา ค่า PPD จะมีค่าแปรตามกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ และเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟของค่า PPD กับเส้นกราฟของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย จะพบว่าลักษณะของกราฟมีแนวโน้มคล้ายกัน นั่นหมายถึงความรู้สึกไม่สบายของคนที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจกทั้งที่มีการติดตั้งมู่ลี่ จะมีผลมาค่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย และค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยนี้เกิดจากผลกระทบ 2 ส่วนด้วยกัน คือ ผลกระทบที่เกิดจากค่าอุณหภูมิผิวกระจกและมู่ลี่ กับค่ารังสีที่ส่งผ่านเข้ามากระทบตัวคน โดยเฉพาะกรณีของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่เข้ามาภายในห้องสามารถควบคุมได้โดยการปรับมุมใบของมู่ลี่ ดังนั้น การที่จะคำนึงถึงความรู้สึกไม่สบายของคนที่นั่งใกล้หน้าต่างกระจก ติดมู่ลี่จะต้องคำนึงถึงตัวแปรต่างๆเหล่านี้ด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้มีจุดประสงค์หลักคือการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสมรรถนะทางความร้อน และสมรรถนะทางความสบายเชิงความร้อนของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ และทำการศึกษสมรรถนะทางความร้อนและสมรรถนะความสบายเชิงความร้อนระบบหน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ โดยได้ทำการตรวจวัด กับสภาวะอากาศในกรุงเทพมหานคร ทำการตรวจวัดค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ศึกษาสมรรถนะของหน้าต่างกระจกกระจกใส 1 ชั้น รวมทั้งยังได้ทำการตรวจวัดสมรรถนะของกระจกทั้งหมดโดยทำการติดตั้งมู่ลี่ ที่มีการปรับมุม 0 45 และ -45 จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงผลของความสบายเชิงความร้อนของกระจกตัวเปล่า และกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ดังที่แสดง และวิเคราะห์ไว้ในบทที่ 5 จากการวิเคราะห์ต่างๆ ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

1. สำหรับการวิเคราะห์หน้าต่างกระจกตัวเปล่า พบว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดกับข้อมูลที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ซึ่งได้มีการปรับปรุงในส่วนของค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3) นั้น ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกันดี เมื่อพิจารณาประกอบกับผลจากการบังเงาของขอบอาคาร ตำแหน่งการติดตั้งหัววัด และความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเครื่องมือและจากเครื่องมือวัด (อธิบายไว้ในบทที่ 4) จะพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหน้าต่างกระจกในการทำนายการส่งผ่านความร้อน (จากรังสีคลื่นสั้น) และค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนมีความแม่นยำในขอบเขตที่ยอมรับได้

2. นอกเหนือจากความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นแล้ว การศึกษานี้ยังเรียนรู้ถึงสมรรถนะของหน้าต่างกระจกตัวเปล่า จะพบว่าคุณสมบัติเชิง optic ของหน้าต่างกระจกมีผลต่อค่าสมรรถนะเชิงความร้อนโดยตรง หน้าต่างกระจกที่มีค่าการส่งผ่านรังสี (คลื่นสั้น) สูง จะยอมให้รังสีแสงอาทิตย์ส่องผ่านหน้าต่างกระจกได้มาก อุณหภูมิผิวกระจกมักมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศภายนอก ในแง่ความสบายเชิงความร้อนต่อผู้อยู่อาศัยใกล้หน้าต่างกระจก จะพบว่าค่าความไม่สบายเชิงความร้อนจะเกิดจากผลกระทบจากผลของอุณหภูมิผิวกระจก และผลของรังสีที่ผ่านมาตกกระทบผู้อยู่อาศัยภายในอาคารโดยตรง ซึ่งผลกระทบทั้ง 2 นี้จะมีสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของกระจกเป็นหลัก โดยกระจกใส 1 ชั้นที่มีค่าการส่งผ่านรังสีสูง จะทำให้มีความรู้สึกไม่สบายเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่มากตกกระทบมากกว่าความไม่สบายเนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวกระจก

3. สำหรับหน้าต่างกระจกที่มีการติดมู่ลี่นั้น ในการศึกษาเน้นไปที่ความสบายเชิงความร้อนเนื่องจากสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในส่วนที่สามารถใช้ข้อมูลในการวัด (อุณหภูมิผิวของกระจก และค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านเข้ามาในห้อง) เป็นตัวป้อนเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การทำนายค่าสมรรถนะเชิงความร้อนในส่วนของการส่งผ่านความร้อนได้มีการตรวจสอบความแม่นยำด้วยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิผิวกระจกและการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์จากการตรวจวัดกับผลเฉลยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น พบว่าค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดีกับผลของการทดลอง สำหรับในการทำนายค่าความสบายเชิงความร้อน ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับปรุง(สมการที่ 3.206) และใช้ได้ผลดีในกรณีของหน้าต่างกระจกตัวเปล่าและหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ ซึ่งความแม่นยำนี้จะเกิดมาจากความแม่นยำการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวเทียบเท่าจากแบบจำลองที่แม่นยำ และการคำนวณค่ารังสีแสงอาทิตย์จากแบบจำลองที่แม่นยำ ในกรณีของมุมบิดใบมู่ลี่ที่ 0 และ -45 องศา จะเห็นว่าในภาพรวมผลการวัดกับผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสอดคล้องกันดี แต่สำหรับกรณีของมู่ลี่ที่ปรับมุมใบเป็น 45 องศา ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด ทั้งนี้เนื่องมาจากผลการคำนวณค่าอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าสูงกว่า อุณหภูมิผิวที่ได้จากการตรวจวัด

4. สำหรับค่าสมรรถนะของหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้นที่ติดมู่ลี่ปรับมุมใบเป็น 0 องศา นั้น จะพบว่าสามารถช่วยลดความไม่สบายเชิงความร้อนลงได้มาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในกรณีที่ไม่ได้มีการติดตั้งมู่ลี่ ความร้อนจะส่งผ่านเข้ามาตกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร ในช่วงเวลาประมาณ 14:00 น. ซึ่งในช่วงเวลานี้รังสีมีค่าค่อนข้างสูง แต่เมื่อทำการติดตั้งมู่ลี่ที่ปรับมุม 0 องศา จะทำให้แสงอาทิตย์ถูกใบของมู่ลี่ขวางกั้นไม่ให้ไปตกระทบต่อผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร ซึ่งเป็นสาเหตุหลักต่อความไม่สบายเชิงความร้อน และเมื่อถึงเวลาที่รังสีส่งผ่านเข้ามายังภายในห้องกระทบต่อผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร ที่เวลาประมาณ 15:30 น. ก็จะส่งผลต่อความไม่สบายเชิงความร้อนไม่มากเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกและมู่ลี่มาตกระทบนั้นจะถูกเงาของใบมู่ลี่บังไว้ จึงทำให้รังสีที่ตกระทบนั้นมีสัดส่วนไม่เต็มที่ ประกอบกับค่ารังสีแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าลดลง จนกระทั่งถึงเวลาประมาณ 16:00 น. รังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านกระจก และลอดผ่านใบมู่ลี่มาตกระทบผู้อยู่อาศัยได้อย่างเต็มที่ แต่เนื่องจากเวลาดังกล่าวนี้รังสีแสงอาทิตย์จะมีค่าค่อนข้างต่ำจึงส่งผลต่อความไม่สบายเชิงความร้อนต่อผู้อยู่อาศัยได้น้อยมาก นอกจากนี้การติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม 0 องศา ยังสามารถทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร ได้เห็นทิวทัศน์ภายนอกอาคารได้ และยังได้ประโยชน์จากแสงธรรมชาติที่สามารถส่งผ่านเข้ามาในห้อง

5. สำหรับกระจกใส 1 ชั้นที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม 45 องศา จะพบว่าสามารถลดปริมาณของแสงอาทิตย์ที่เข้ามาตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคารได้อย่างมาก จึงทำให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อนส่วนใหญ่ของกระจกที่ทำการทดสอบ จะเกิดมาจากผลของอุณหภูมิผิวของมู่ลี่เป็นหลัก เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์จะเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาระหว่างผิวกระจกด้านใน และผิวของมู่ลี่ จนทำให้อุณหภูมิผิวของกระจก และมู่ลี่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของความไม่สบายโดยพิจารณาจากค่า PPD ที่ได้ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดในการทดลองยังคงมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูงอยู่(50%) แต่การติดตั้งมู่ลี่โดยปรับมุมบิดของใบเป็น 45 องศา จะทำให้ผู้อยู่อาศัยสามารถรับแสงธรรมชาติจากภายนอกได้น้อยลง หรือสามารถเห็นทิวทัศน์ด้านนอกได้น้อยลง

6. สำหรับกระจกใส 1 ชั้นที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา จะพบว่าในช่วงเวลา 13:00 ถึง 15:00 น. ปริมาณของแสงอาทิตย์ที่เข้ามาตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคารมีค่าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าสูงสุดที่เวลา 15:00 น. และเริ่มมีค่าลดลงถึงแม้ว่าเริ่มมีรังสีมาตกกระทบกับหน้าต่างกระจก จึงทำให้ผลของความไม่สบายเชิงความร้อนส่วนใหญ่ของกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมบิดของใบเป็น -45 องศา จะเกิดมาจากผลของรังสีที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกเป็นหลัก เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างใบของมู่ลี่เข้ามาได้ ผลของความไม่สบายโดยพิจารณาจากค่า PPD ที่ได้ยังคงมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่สูงอยู่(90%)

7. สำหรับการประเมินค่าความสบายเชิงความร้อนด้วยการตรวจวัดนั้น ผลของค่า PPD จะแปรตามค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเป็นอย่างมาก การใช้หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ มาหาค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่มีผลกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ สามารถมีความถูกต้องแม่นยำอย่างมาก เมื่อเทียบกับผลการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิผิวภายใน และการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มาคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีความสอดคล้องกันดี และผลการคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีความถูกต้อง จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเนื่องจากอุณหภูมิผิวเพียงอย่างเดียว และการประมาณค่ารังสีที่ผ่านหน้าต่างกระจก และมู่ลี่เข้ามาภายในได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการหาอุณหภูมิผิวเฉลี่ยระหว่างกระจก และมู่ลี่ ด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนของพื้นที่ฉาย ซึ่งให้ผลของอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิแผ่รังสีจากการตรวจวัดเป็นอย่างมาก นั้นทำให้สรุปได้ว่าถ้าผิวของกระจก และมู่ลี่ มีค่าต่างกันมาก จะแผ่รังสีคลื่นยาวออกมาไม่เท่ากัน

8. สำหรับการคำนวณค่าอุณหภูมิเทียบเท่า (สมการที่ 3.202) ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการศึกษานี้ โดยได้จากเฉลี่ยค่าระหว่างอุณหภูมิผิวกระจก และอุณหภูมิผิวของมู่ลี่ โดยอาศัยหลักการแผ่รังสีความร้อน ตามสัดส่วนของพื้นที่ภาพฉายของกระจก และมู่ลี่ เพื่อเป็นตัวแทนของอุณหภูมิผิวของผนังด้านที่มีกระจก และมู่ลี่ เพื่อที่จะนำไปคำนวณค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่คิดผลของอุณหภูมิผนังเพียงอย่างเดียว พบว่ามีค่าสอดคล้องกันดีกับค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัด

9. สำหรับการศึกษานี้ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สำหรับทำนายผลความสบายเชิงความร้อนของคนที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจก ที่มีการปรับมุมใบมู่ลี่ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบนำเอาความรู้นี้ไปใช้ในการเลือกอุปกรณ์บังเงาที่เป็นมู่ลี่ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังได้ทราบวิธีการใช้งานของเครื่องมือตรวจวัด และวิธีการตรวจวัดเพื่อที่จะหาสภาวะความสบายเชิงความร้อน ของคนที่นั่งใกล้กับหน้าต่างกระจก ที่มีการติดตั้งมู่ลี่ไว้ภายใน

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองพบว่าผลกระทบของกระจกต่อค่าความสบายเชิงความร้อนที่ได้จากการคำนวณ และการตรวจวัดมีค่าสอดคล้องกันดี ทั้งกรณีของกระจกตัวเปล่า และกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของห้องทดลองมีชายคายื่นมากันแสงอาทิตย์ และตำแหน่งและวิธีติดตั้งหัววัดรังสีแสงอาทิตย์ที่ด้านนอกห้อง จึงทำให้ในบางช่วงเวลาค่าที่ได้จากการตรวจวัด และการคำนวณมีค่าคลาดเคลื่อน

2. ขนาดของกระจกที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็ก จึงทำให้เครื่องมือ ที่ติดตั้งภายในห้องต้องวางใกล้กันมากซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบังกันของเครื่องวัดที่อยู่ชิดกัน

3. ระยะห่างระหว่างหน้าต่างกระจก และมู่ลี่ มุมบิดของใบมู่ลี่ที่ค่าอื่นๆ มู่ลี่แบบอื่นๆ (มู่ลี่ขนาด 0.5 นิ้ว ขนาด 1.5 นิ้ว (ขนาดความกว้างใบ) ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ คุณสมบัติเชิง optic ของใบมู่ลี่(สีต่างกัน)) ต่างเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ที่ควรมีการศึกษาต่อไป เพื่อที่จะสามารถหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด (optimization) ในการใช้มู่ลี่เพื่อการประหยัดพลังงานและเพื่อการรักษาสภาวะความสบายเชิงความร้อนแก่ผู้อยู่อาศัยใกล้หน้าต่างกระจก

4. ควรมีการศึกษาลงในรายละเอียดเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะการพาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวกระจกด้านในกับใบมู่ลี่ที่มีมุมบิดในตำแหน่งต่างๆ ซึ่งมีความซับซ้อนมาก จำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เฉพาะ ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ(computational fluid dynamic, CFD) มาทำการวิเคราะห์ และยืนยันค่ากับผลการทดลอง

รายการอ้างอิง

- [1] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์ นพรัตน์ คำพร และบุญฤทธิ เพื่อค่องสุริยะ รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การวิเคราะห์ดัชนีของ หน้าต่างกระจกและหน้าต่างกระจกติดฟิล์มของอาคารภายใต้ภาวะภูมิอากาศของ ประเทศไทยในแง่ของความสบายและการส่งผ่านพลังงานความร้อน” ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยศูนย์ เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-B-44-CER-09-093-G, 2544.
- [2] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ นพรัตน์ คำพร และศุภกิจ วรศิลป์ชัย รายงานการวิจัย พัฒนาและ วิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจก และหน้าต่างกระจกติดฟิล์มของอาคารภายใต้ภาวะภูมิอากาศของประเทศไทยในแง่ของ ความสบายและการส่งผ่านความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุ แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-B- 47-CER-09-156-G, 2547.
- [3] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ นพรัตน์ คำพร และศุภกิจ วรศิลป์ชัย รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การวิเคราะห์อุปกรณ์บังเงาภายในที่ติดตั้งกับระบบหน้าต่างกระจกและ หน้าต่างกระจกติดฟิล์มของอาคารภายใต้ภาวะภูมิอากาศของประเทศไทยในแง่ของ ความสบายและการส่งผ่านความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุน การวิจัย สัญญาเลขที่ BRG4880014, 2551.
- [4] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และนพรัตน์ คำพร รายงานการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรม ฉบับสมบูรณ์ โครงการ “การศึกษาและวิเคราะห์เชิงการทดลองเพื่อหาค่าสมรรถนะของระบบ หน้าต่างกระจกที่ติดตั้งมู่ลี่ของอาคารภายใต้ภูมิอากาศของประเทศไทย” ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนับสนุนโดยศูนย์ เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-B-51-ENV-09-021-G, 2553.
- [5] ASHRAE. Standard 55 – Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2004.
- [6] ASHRAE. Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2009.

- [7] Athienitis, A.K. and Haghghat, F. A Study of the Effects of Solar Radiation on the Indoor Environment. ASHRAE Transactions. 98,1 (1992): 257-261.
- [8] Bessoudo, M.; Tzempelikos, A.; Athienitis, A.K. and Zmeureanu, R. Indoor thermal environment conditions near glazed facades with shading devices – Part I: Experiment and building thermal Model, Building and Environment. 45 (2010): 2506–2516.
- [9] Cannistraro G.; Franzitta G.; Giaconia C. and Rizzo G. Algorithms for the calculation of the view factors between human body and rectangular surfaces in parallelepiped environments. Energy and Buildings. 19 (1992): 51 – 60.
- [10] Chaiyapinunt, S., Phueakphongsuriya B., Mongkornsaksit K., and Khomporn, N., “Performance rating of glass windows and glass windows with films in aspect of thermal comfort and heat transmission”, Energy and Building. Vol. 37, No. 7, July 2005, pp. 725-738.
- [11] Chaiyapinunt, S and Worasinchai, S. Development of a mathematical model for a curved venetian blind with thickness. Solar Energy. 83 (July 2009): 1093-1113.
- [12] Chaiyapinunt, S and Worasinchai, S. Development of a model for calculating the longwave optical properties and surface temperature of a curved venetian blind. Solar Energy. 83 (June 2009): 817-831.
- [13] Collins, M.R.; Harrison, S.J; Naylor, D. and Oosthuizen, P.H. “Heat transfer from an isothermal vertical surface with adjacent heated horizontal louvers: numerical analysis. ASME Journal of Heat Transfer. 12 (2002): 1072-1077.
- [14] Collins, M. R.; Harrison, S.J.; Oosthuizen, P.H. and Naylor, D. Sensitivity analysis of heat transfer from an irradiated window and horizontal louvered blind assembly. ASHRAE Transaction. 108,1 (2002): 503-511.
- [15] Collins, M.R. and Wright, J.L. Calculating center-glass performance indices of windows with a diathermanous layer. ASHRAE Transaction. 112,2 (2006): 22- 29.
- [16] Duarte, N.; Naylor, D.; Oosthuizen, P.H. and Harrison, S.J. An interferometric study of free convection at a window glazing with a heated venetian blind. ASHRAE Transactions. 107,2 (2001): 390-405.
- [17] Fang X.D. A study of the U-factor of the window with a high-reflectivity venetian blind. Solar Energy. 68 (2000): 207 – 214.

- [18] Fanger, P.O. Thermal comfort analysis and application in environmental engineering. Kansas State university: McGraw-Hill, 1970.
- [19] Finlayson, E.U.; Arasteh, D.K.; Huizenga, C.; Rubin, M.D.; and Reilly, M.S. WINDOW 4.0: Documentation of calculation procedures. Publication LBL-33943/UC-350, Lawrence Berkeley Laboratory, Energy & Environment Division, Berkeley, CA, 1993.
- [20] Furler, R.A. Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses. ASHRAE Transactions. 97,2 (1991) : 1129 - 1137.
- [21] Klems, J.H. A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation. ASHRAE Transaction. 100,1 (1994): 1065-1072.
- [22] Klems, J.H. A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: Detailed Description of the Matrix Layer Calculation. ASHRAE Transaction 100,1 (1994): 1073-1086.
- [23] Klems, J.H., and Kelly, G.O. Calorimetric measurement of inward-flowing fraction for complex glazing and shading systems. ASHRAE Transactions. 102,1 (1996): 947-954.
- [24] Klems, J.H. and Warner, J.L. Measurement of Bi-directional Properties of Complex shading Devices. ASHRAE Transaction. 101,1 (1995): 791-801.
- [25] Klems, J.H. Solar heat gain through fenestration systems containing shading: Summary of procedures for estimating performance from minimal data. ASHRAE Transactions. 109,1 (2002): 512 - 524.
- [26] La Gennusa, M.; Nucara, A.; Rizzo, G. and Scaccianoce, G. The calculation of the mean radiant temperature of a subject exposed to the solar radiation—a generalised algorithm. Building and Environment. 40 (2005): 367 – 375.
- [27] La Gennusa, M.; Nucara, A.; Pietrafesa, M. and Rizzo, G. A model for managing and evaluating solar radiation for indoor thermal comfort. Solar Energy, 81 (2007): 594 - 606.
- [28] Laouadi, A., Thermal modeling of shading devices of windows. ASHRAE Transactions 115,2 (2009): 803 – 814.

- [29] Lyons, P.; Arasteh, D.; and Huizenga, C. Window performance for human thermal comfort. ASHRAE Transactions 106,1 (2000): 257-261.
- [30] Machin, A. D.; Naylor, D.; Oosthuizen, P. H. and Harrison, S. J. Experimental Study of Free Convection at an Indoor Glazing Surface with a Venetian Blind, Journal of HVAC&R Research, 4 (1998): 153–166.
- [31] McCluney, R. Suggested methodologies for determining the SHGC of complex fenestration system for NFRC rating. [Online]. 2003. Available from : <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-422-02.pdf> [2013, February 14]
- [32] Olesen, B. W. Guidelines for comfort. ASHRAE Journal. 42 (August 2000): 40-45.
- [33] Prommer, P.; Lomas, K.J. and Kupke, CHR. Solar radiation transport through slat-type blinds: A new model and its application for thermal simulation of buildings. Solar Energy. 57 (1996): 77 – 91.
- [34] Parmelee, G.V. and Aubele, W.W. The shading of sunlit glass: an analysis of the effect of uniformly spaced flat opaque slats. ASHVE Transaction. 59 (1952): 377-398.
- [35] Phillips, J.; Naylor, D.; Harrison, S. J. and Oosthuizen, P. H. Numerical study of convective and radiative heat transfer from a window glazing with a venetian blind, International Journal of HVAC&R Research. 7 (2001): 383–402.
- [36] Rizzo G.; Franzitta G. and Cannistraro G. Algorithms for the calculation of mean projected area factors of seated and standing persons. Energy and Buildings. 17 (1991): 221 – 230.
- [37] Shahid H. and Naylor, D. Energy performance assessment of a window with a horizontal venetian blind. Energy and Building. 37 (2005): 836-843.
- [38] Yahoda, D.S. and Wright, J.L. Methods for calculating the effective longwave radiative properties of a venetian blind layer. ASHRAE Transactions. 110,1 (2004): 463-473.
- [39] Yahoda, D.S. and Wright, J.L. Methods for calculating the effective solar optical properties of a venetian blind layer. ASHRAE Transactions. 111,1 (2005): 472-586.
- [40] Ye, P.; Harrison, S.J.; Oosthuizen, P.H. and Naylor, D. Convective heat transfer from a window with a venetian blind: detailed modeling. ASHRAE Transaction. 105,2 (1999): 1-7.

- [41] Siegel, R. and Howell, J.R. Thermal radiation heat transfer. 4nd ed. New York: Taylor & Francis, 2002.
- [42] EnergyPlus, EnergyPlus engineering reference: The reference to EnergyPlus calculation. April, 2005.
- [44] INNOVA. Thermal comfort. INNOVA Air Tech Instruments.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนจากการวัด

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงตัวอย่างของการคำนวณหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อของความไม่แน่นอนจากการทดลองของบทที่ 4 ตัวอย่างการคำนวณของความไม่แน่นอนจะแสดงการหาค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใส 1 ชั้น ที่ความหนา 6 มม. และแสดงตัวอย่างการคำนวณการหาค่าความไม่แน่นอนของการตรวจวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก และค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น และหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ปรับมุมใบเป็น 0 องศา 45 องศา และ -45 องศา

ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟสามารถเขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{h_{cg}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (1)$$

เมื่อ

$$h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 18 \times v_a^{0.55} \\ 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25} \end{cases} \quad (2)$$

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนจึงสามารถกระทำโดยใช้ความสัมพันธ์

$$u_{T_{mrt}} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} u_{T_o} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} u_{T_a} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v_a} u_{v_a} \right)^2} \quad (3)$$

สำหรับกรณี $h_{cg} = 18 \times v_a^{0.55}$

ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากสมการที่ (1) จะสามารถเขียนได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{18 \times v_a^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (4)$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเทียบกับค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ จากสมการที่ (4) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = 0.25 \left[(T_o + 273)^4 + \frac{18 v_a^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{-0.75} \cdot \left(4(T_o + 273)^3 + 18 v_a^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma) \right)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{0.25 \cdot \left[4(T_o + 273)^3 + 18v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma) \right]}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.75}}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{0.25 \cdot \left[4(T_o + 273)^3 + 18v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma) \right]}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{(0.25)(3)}}$$

$$\text{แต่ } (T_{mrt} + 273) = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{18 \times v_a^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{0.25 \cdot \left[4(T_o + 273)^3 + 18v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma) \right]}{(T_{mrt} + 273)^3} \quad (5)$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากสมการที่ (4) เทียบกับค่าอุณหภูมิอากาศจะสามารถหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} = 0.25 \left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{-0.75} \cdot (-18v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma))$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} = \frac{0.25 \cdot (-18v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma))}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.75}}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} = \frac{-(0.25) \cdot (18)v^{0.55} / (\varepsilon_g \sigma)}{(T_{mrt} + 273)^3} \quad (6)$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากสมการที่ (4) เทียบกับค่าความเร็วลมจะสามารถหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v} = 0.25 \left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{-0.75} \cdot \frac{(0.55)(18)(T_o - T_a) \cdot v^{-0.45}}{\varepsilon_g \sigma}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v} = \frac{(0.25) \cdot (0.55) \cdot (18) \cdot (T_o - T_a) \cdot v^{-0.45} / \varepsilon_g \sigma}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{18v^{0.55}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.75}}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v} = \frac{(0.25) \cdot (0.55) \cdot (18) \cdot (T_o - T_a) \cdot v^{-0.45} / \varepsilon_g \sigma}{(T_{mrt} + 273)^3}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v} = \frac{(2.475) \cdot (T_o - T_a) \cdot v^{-0.45}}{\varepsilon_g \sigma (T_{mrt} + 273)^3} \quad (7)$$

สำหรับกรณี $h_{cg} = 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25}$

ค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยจากสมการที่ (1) จะสามารถหาค่าได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} (T_o - T_a) \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C}$$

จัดรูปใหม่จะได้เป็น

$$T_{mrt} = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{0.25} - 273 \quad ^\circ\text{C} \quad (8)$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเทียบกับค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟจากสมการที่ (8) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = 0.25 \left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{-0.75} \cdot \left(4(T_o + 273)^3 + \frac{(3)(1.25)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{0.25 \cdot \left(4(T_o + 273)^3 + \frac{(3)(1.25)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right)}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{0.75}}$$

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{\left((T_o + 273)^3 + \frac{(0.9375)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right)}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{0.75}}$$

$$\text{แต่ } (T_{mrt} + 273) = \left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{0.25}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{\left((T_o + 273)^3 + \frac{(0.9375)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right)}{(T_{mrt} + 273)^3} \quad (9)$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเทียบกับค่าอุณหภูมิอากาศจากสมการที่ (8) จะสามารถหาค่าได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} &= 0.25 \left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{-0.75} \cdot \left(\frac{-(3)(1.25)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right) \\ \frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} &= \frac{0.25 \cdot \left(\frac{-(3)(1.25)(T_o - T_a)^{0.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right)}{\left[(T_o + 273)^4 + \frac{3 \times (T_o - T_a)^{1.25}}{\varepsilon_g \sigma} \right]^{-0.75}} \\ \frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} &= \frac{(-0.9375)(T_o - T_a)^{0.25} / (\varepsilon_g \sigma)}{(T_{mrt} + 273)^3} \quad (10) \end{aligned}$$

ค่าอนุพันธ์ย่อยของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยเทียบกับความเร็วลมจากสมการที่ (8) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v} = 0 \quad (11)$$

ตัวอย่างของการหาค่าความไม่แน่นอนของอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยของกระจกใส 1 ชั้น ความหนา 6 มม.

ค่าความไม่แน่นอนในแต่ละส่วนของเครื่องมือวัด ซึ่งประกอบด้วย ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ (u_{T_o}) ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิอากาศ (u_{T_a}) และ ค่าความไม่แน่นอนของค่าความเร็วลม (u_{v_a}) สามารถหาได้จากข้อมูลของผู้ผลิตเครื่องมือวัด โดยจะมีค่าดังต่อไปนี้

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

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

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

สำหรับ ข้อมูลการตรวจวัดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 ที่เวลา 15:21:30 น. จะได้ข้อมูลดังนี้

$$T_o = 34.4 \text{ } ^\circ\text{C}, T_a = 25.7 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ และ } v_a = 0.18 \text{ m/s}$$

$$u_{v_a} = 0.05(0.18) + 0.05 = 0.059 \text{ m/s}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่หัววัดอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟ h_{cg} สำหรับ 2 กรณี ซึ่งเขียนได้เป็น

กรณีที่ 1 $h_{cg} = 18 \times v_a^{0.55}$

แทนค่าจะได้ $h_{cg} = 18 \times (0.18)^{0.55} = 7.01 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

กรณีที่ 2 $h_{cg} = 3 \times (|T_o - T_a|)^{0.25}$

แทนค่าจะได้ $h_{cg} = 3 \times (|34.4 - 25.7|)^{0.25} = 5.1523 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

ดังนั้น $h_{cg} = \max \text{ of } \begin{cases} 7.01 \\ 5.1523 \end{cases} = 7.01 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

แทนค่าใน (1) จะได้

$$T_{mrt} = \left[(34.4 + 273)^4 + \frac{7.01}{(0.95)(5.67 \times 10^{-8})} (34.4 - 25.7) \right]^{0.25} - 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จะได้ $T_{mrt} = 43.713 \text{ } ^\circ\text{C}$

ค่า $\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o}$ จากสมการที่ (5) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_o} = \frac{0.25 \cdot [4(34.4 + 273)^3 + 18(0.18)^{0.55} / (0.95 \times 5.67 \times 10^{-8})]}{(43.713 + 273)^3} = 1.94$$

ค่า $\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a}$ จากสมการที่ (6) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} = \frac{-(0.25) \cdot (18)(0.18)^{0.55} / (0.95 \times 5.67 \times 10^{-8})}{(43.712 + 273)^3} = -1.024$$

ค่า $\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a}$ จากสมการที่ (6) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial T_a} = \frac{-(0.25) \cdot (18)(0.18)^{0.55} / (0.95 \times 5.67 \times 10^{-8})}{(43.712 + 273)^3} = -1.024$$

ค่า $\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v_a}$ จากสมการที่ (7) จะหาค่าได้เป็น

$$\frac{\partial T_{mrt}}{\partial v_a} = \frac{(2.475) \cdot (34.4 - 25.7) \cdot (0.18)^{-0.45}}{(0.95 \times 5.67 \times 10^{-8})(43.712 + 273)^3} = 27.22$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (3) จะได้

$$u_{T_{mrt}} = \sqrt{((1.94)(0.3))^2 + ((-1.024)(0.2))^2 + ((27.22)(0.059))^2}$$

$$u_{T_{mrt}} = \sqrt{0.33872 + 0.04194 + 2.58} = 1.7207$$

$$u_{T_{mrt}} (\%) = \frac{u_{T_{mrt}}}{T_{mrt}} \times 100\% = \frac{1.7207}{43.712} \times 100\% = 3.94\%$$

ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ยที่ได้จากการวัดค่าอุณหภูมิโอเปอร์เรทีฟของหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น ที่ความหนา 6 มม. ของการตรวจวัดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 เวลา 15:21:30 น. มีค่าเท่ากับ ± 1.7207 °C หรือ 3.94% ของค่าอุณหภูมิแผ่รังสีเฉลี่ย

ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก

ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์

ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ จะสามารถหาได้จากค่ารากที่สองของความผิดพลาดในแต่ละส่วนยกกำลังสอง ซึ่งประกอบไปด้วย ความไม่เชิงเส้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว ความผิดพลาดของทิศทาง ค่าความลาดเอียง ค่าความผิดพลาดจากทิศทาง ค่าไหลเลื่อนที่ศูนย์ และความไม่มีเสถียรภาพของเครื่องตรวจวัดรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลของค่าความผิดพลาดต่างๆ เหล่านี้ของเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์จะได้จากผู้ผลิต ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยสามารถคำนวณค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดได้เป็น

$$u_{Ins,total} = \sqrt{u_{nl}^2 + u_t^2 + u_d^2 + u_{il}^2 + u_z^2 + u_{ns}^2} \quad (12)$$

เมื่อ

$u_{Ins,total}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์

u_{nl} คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เชิงเส้น

u_t คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความไว

u_d คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดของทิศทาง

- u_{nl} คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความลาดเอียง
- u_z คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าไหลเลื่อนที่ศูนย์
- u_{ns} คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่มีเสถียรภาพ

สำหรับเครื่องมือวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B (ใช้วัดค่ารังสีแบบรวม และแบบกระจาย ภายนอกห้องทดลอง) มีค่าความผิดพลาดในแต่ละส่วน จากตารางที่ 4.1 ดังนี้

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

$$u_t = 2\%$$

$$u_d = 2\%$$

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

$$u_z = 7.5\%$$

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

สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมสูงสุดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 สำหรับการวัดของ กระจกใส มีค่าประมาณ 600 W/m^2 ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนแต่ละส่วนสามารถคำนวณได้เป็น

$$u_{nl} = \frac{1.2 \times 600}{100} = 7.2 \text{ W/m}^2$$

$$u_t = \frac{2 \times 600}{100} = 12 \text{ W/m}^2$$

$$u_d = \frac{2 \times 600}{100} = 12 \text{ W/m}^2$$

$$u_{nl} = \frac{1 \times 600}{100} = 6 \text{ W/m}^2$$

$$u_z = \frac{7.5 \times 600}{100} = 45 \text{ W/m}^2$$

$$u_{ns} = \frac{1 \times 600}{100} = 6 \text{ W/m}^2$$

นำค่าความไม่แน่นอนแต่ละส่วนที่คำนวณได้ แทนลงในสมการที่ (12) จะได้ความไม่แน่นอนรวม เป็น

$$u_{ms,total} = \sqrt{7.2^2 + 12^2 + 12^2 + 6^2 + 45^2 + 6^2} = 49.36 \text{ W/m}^2$$

ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความไม่แน่นอนรวมมีค่าเป็น

$$u_{ms,total}(\%) = \frac{u_{total}}{I_{total}} \times 100\% = \frac{49.36}{600} \times 100\% = 8.23\%$$

สำหรับเครื่องมือวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6 (ใช้วัดค่ารังสีแบบรวมภายในห้องทดลอง) มีค่าความผิดพลาดในแต่ละส่วน จากตารางที่ 4.1 ดังนี้

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

$$u_t = 4\%$$

$$u_d = 2\%$$

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

$$u_z = 7.5\%$$

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

ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่มีค่าสูงสุดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 สำหรับการวัดของกระจกใส 1 ชั้น ที่ความหนา 6 มม. มีค่าประมาณ 480 W/m^2 ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนแต่ละส่วนสามารถคำนวณได้เป็น

$$u_{nl} = \frac{1 \times 480}{100} = 4.8 \text{ W/m}^2$$

$$u_t = \frac{4 \times 480}{100} = 19.2 \text{ W/m}^2$$

$$u_d = \frac{2 \times 480}{100} = 9.6 \text{ W/m}^2$$

$$u_{tl} = \frac{1 \times 480}{100} = 4.8 \text{ W/m}^2$$

$$u_z = \frac{7.5 \times 480}{100} = 36 \text{ W/m}^2$$

$$u_{ns} = \frac{1 \times 480}{100} = 4.8 \text{ W/m}^2$$

นำค่าความไม่แน่นอนแต่ละส่วนที่คำนวณได้ แทนลงในสมการที่ (12) จะได้ค่าความไม่แน่นอนรวมเป็น

$$u_{ms,total} = \sqrt{4.8^2 + 19.2^2 + 9.6^2 + 4.8^2 + 36^2 + 4.8^2} = 42.73 \text{ W/m}^2$$

ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความไม่แน่นอนรวมมีค่าเป็น

$$u_{ms,total}(\%) = \frac{u_{total}}{I_{total}} \times 100\% = \frac{42.73}{480} \times 100\% = 8.9\%$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากการติดตั้งเครื่องวัดแสงอาทิตย์

สำหรับความไม่แน่นอนนี้เนื่องมาจากติดตั้งเครื่องวัดแสงอาทิตย์ จะเกิดจากความไม่แน่นอนจาก 2 สาเหตุด้วยกันคือ ความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดของการปรับมุมเอียงไม่ได้ระนาบเดียวกันกับหน้าต่างกระจก และความไม่แน่นอนเนื่องจากแหวนบังเงา

ความไม่แน่นอนเนื่องมาจากความผิดพลาดของการปรับมุมเอียงไม่ได้ระนาบเดียวกันกับหน้าต่างกระจก

เนื่องจากการติดตั้งเครื่องวัดแสงอาทิตย์ จะติดตั้งบนขาตั้งแบบ 3 ขา ซึ่งมีผลทำให้ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดรังสีแสงอาทิตย์เทียบกับระนาบของหน้าต่างกระจกผลการที่ระนาบหัววัดไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกับหน้าต่างกระจก ซึ่งจะส่งผลให้อ่านค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแตกต่างกับค่าที่ควรเป็น ซึ่งผลของการเอียงมุมจะมีผลต่อการคิดค่ารังสีตั้งฉากที่ตกกระทบหน้าต่างกระจก ความคลาดเคลื่อนสามารถประมาณการจากความละเอียดเครื่องมือวัดระนาบแบบลูกน้ำ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ $\pm 4^\circ$

สำหรับข้อมูลการตรวจวัดของวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวม และแบบกระจาย ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกที่เวลา 15:50 น. สำหรับการวัดของกระจกใส มีค่าประมาณ 600 W/m^2 และ 152 W/m^2 ตามลำดับ และมีค่ามุมตกกระทบเท่ากับ 46.34 องศา

ดังนั้นค่ารังสีแบบตรงตั้งฉากสามารถคำนวณได้เป็น

$$I_{dn} = I_{dir} \cos \theta \quad (13)$$

เมื่อ I_{dn} คือ รังสีแสงอาทิตย์แบบตรงตั้งฉาก, W/m^2

$$\text{และ } I_{dir} = I_{glo} - I_{diff} \quad (14)$$

โดยที่ $I_{glo} = 600 \text{ W/m}^2$ และ $I_{diff} = 152 \text{ W/m}^2$

$$\text{ดังนั้น } I_{dir} = 600 - 152 = 448 \text{ W/m}^2$$

$$\text{จากสมการ (13) จะได้ } I_{dn} = 448 / \cos(46.34) = 648.92 \text{ W/m}^2$$

ดังนั้น สำหรับเครื่องมือวัดระนาบที่มีคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ $\pm 4^\circ$ จึงทำให้มุมตกกระทบมีค่าอยู่ในช่วง $\theta = 46.34 \pm 4^\circ$ หรือ $\theta_1 = 42.34^\circ$ และ $\theta_2 = 48.34^\circ$ ซึ่งทำให้ค่ารังสีแบบตรงมีค่าอยู่ในช่วงของมุม $\theta_1 = 42.34^\circ$ และ $\theta_2 = 48.34^\circ$ เป็น

$$I_{dir,1} = I_{dn} \cos \theta_1 = 648.92 \cos(42.34) = 479.66 \text{ W / m}^2$$

และ $I_{dir,2} = I_{dn} \cos \theta_2 = 648.92 \cos(48.34) = 431.34 \text{ W / m}^2$

ดังนั้นค่ารังสีแบบรวมจะมีค่าอยู่ในช่วง

$$I_{glo,1} = I_{dir,1} + I_{diff} = 479.66 + 152 = 631.66 \text{ W / m}^2$$

และ $I_{glo,2} = I_{dir,2} + I_{diff} = 431.34 + 152 = 583.34 \text{ W / m}^2$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดของการปรับมุมเอียง ที่มีต่อค่ารังสีแบบรวมที่วัดได้สามารถประมาณได้เป็น

$$u_{I_{glo,1}} (\%) = \frac{|I_{glo} - I_{glo,1}|}{I_{glo}} \times 100\% = \frac{|600 - 631.66|}{600} \times 100\% = 5.27\%$$

$$u_{I_{glo,2}} (\%) = \frac{|I_{glo} - I_{glo,2}|}{I_{glo}} \times 100\% = \frac{|600 - 583.34|}{600} \times 100\% = 2.78\%$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความผิดพลาดจากการปรับมุมเอียงมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4% ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ซึ่งรวมผลกระทบจากการปรับมุมเอียงของเครื่องวัดไม่อยู่ในระนาบเดียวกันกับกระจก สามารถคำนวณได้เป็น

เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CM6B

$$u_{ms,total} (\%) = \sqrt{8.23^2 + 4^2} = 9.15\%$$

เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์รุ่น CMP6

$$u_{ms,total} (\%) = \sqrt{8.9^2 + 4^2} = 9.76\%$$

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแหวนบังเงา

สำหรับการวัดค่ารังสีแบบกระจายภายนอก จะสามารถวัดได้โดยนำอุปกรณ์บังเงาที่ได้จัดสร้างขึ้นมาติดตั้งเข้ากับเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบรวม ซึ่งจากการตรวจวัดพบว่าค่ารังสีแบบกระจายที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ควรจะเป็น(ค่ารังสีแบบกระจาย และค่ารังสีแบบรวมในช่วงเช้าควรเท่ากัน เนื่องจากผนังด้านทิศตะวันตกในช่วงเช้าจะมีเฉพาะรังสีกระจาย เหตุผลส่วนหนึ่ง คือการที่แหวนบังเงาได้บังบางส่วนของรังสีกระจายที่มาตกกระทบหัววัด) เนื่องจากแหวนบังเงาเป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเองและจะต้องมีการปรับตำแหน่งของแหวนบังเงาให้บังรังสีแสงอาทิตย์แบบตรงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในช่วงทุก 2 ถึง 3 วัน ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีการปรับค่าที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อชดเชยความผิดพลาด โดยเทียบค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายด้วยรังสีแสงอาทิตย์

แบบรวม ในช่วงเช้า เพื่อชดเชยความผิดพลาด และกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง
แหวนบังเงา (u_{shade}) เป็นประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ ของรังสีที่วัดได้

ดังนั้นความผิดพลาดจากการวัดค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบภายนอก สามารถประมาณ
ได้โดยนำค่าความไม่แน่นอนจากเครื่องมือมารวมกับค่าความไม่แน่นอนจากการติดตั้ง ซึ่งสามารถ
ประมาณ ได้เป็น

$$u_{total}(\%) = \sqrt{u_{Ins, total}^2 + u_{I_{glo}}^2} = \sqrt{9.15^2 + 1^2} = 9.20\%$$

ค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจก

สำหรับความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจก จะประกอบด้วย
ความผิดพลาดจากเครื่องมือ และการติดตั้ง ในส่วนของความผิดพลาดจากเครื่องมือได้แสดง
ตัวอย่างการคำนวณไว้ข้างต้น แต่สำหรับความไม่แน่นอนจากการติดตั้ง ที่เกิดจากความผิดพลาดใน
ส่วนของการปรับมุมเอียงของหัววัดแสงอาทิตย์ และความผิดพลาดจากแหวนบังเงา สำหรับการ
คำนวณหาความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกสามารถคำนวณได้
โดย

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{glob}} u_{I_{glob}}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff}} u_{I_{diff}}\right)^2} \quad (15)$$

กรณีหน้าต่างกระจกไม่คิดมุม

ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกที่ไม่คิดมุมสามารถคำนวณได้โดย

$$I_{tran} = T(\theta) \cdot I_{dir} + T_{diff} \cdot I_{diff} \quad (16)$$

เมื่อ $I_{dir} = I_{glo} - I_{diff}$

ดังนั้น $I_{tran} = T(\theta) \cdot (I_{glo} - I_{diff}) + T_{diff} \cdot I_{diff} \quad (17)$

จัดรูปสมการที่ (20) ใหม่จะได้

$$I_{tran} = T(\theta) \cdot I_{glo} + (T_{diff} - T(\theta)) \cdot I_{diff} \quad (18)$$

หาค่าอนุพันธ์ย่อยของค่า I_{tran} เทียบกับค่า I_{glo} และ I_{diff} ในสมการที่ (16) จะได้เป็น

$$\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{glo}} = T(\theta)$$

และ $\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff}} = T_{diff} - T(\theta)$

นำค่า $\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{glo}} = T(\theta)$ และ $\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff}} = T_{diff} - T(\theta)$ ไปแทนกลับในสมการที่ (15) จะได้ว่าความไม่

แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(T(\theta) \cdot u_{I_{glo}}\right)^2 + \left((T_{diff} - T(\theta)) \cdot u_{I_{diff}}\right)^2} \quad (19)$$

สำหรับข้อมูลการตรวจวัดวันที่ 8 กุมภาพันธ์ 2553 ที่เวลา 15:50 น. จะได้ข้อมูลการตรวจวัด และการคำนวณดังนี้

$$I_{glo} = 591.64 \text{ W / m}^2$$

$$I_{diff} = 158.452 \text{ W / m}^2$$

$$\theta = 46.45^\circ$$

$$T(\theta) = T(46.45^\circ) = 0.781$$

$$T_{diff} = 0.723$$

$$u_{I_{glo}} = \frac{8.23}{100} \times 591.64 = 48.69 \text{ W / m}^2$$

$$u_{I_{diff}} = \frac{8.29}{100} \times 158.452 = 13.14 \text{ W / m}^2$$

นำค่าที่ได้แทนในสมการที่ (18) จะได้ค่ารังสีที่ผ่านหน้าต่างกระจกเป็น

$$I_{tran} = (0.781) \cdot (591.64) + (0.723 - 0.781) \cdot (158.452) = 452.88 \text{ W / m}^2$$

ค่าความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก สามารถหาได้โดยแทนค่าลงในสมการที่ (19) จะได้ว่า

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left((0.781) \cdot (48.69)\right)^2 + \left((0.723 - 0.781) \cdot (13.14)\right)^2} = 38 \text{ W / m}^2$$

ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของความไม่แน่นอน จะได้ว่า

$$u_{I_{tran}} (\%) = \frac{u_{I_{tran}}}{I_{tran}} \times 100\% = \frac{38}{452.88} \times 100\% = 8.4\%$$

กรณีหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่

สำหรับค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างที่มีการติดตั้งมู่ลี่จากการทำนายผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นค่าที่ได้จากความสัมพันธ์

$$I_{tran} = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot I_{direct} + T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} \cdot I_{diff,grnd} \quad (20)$$

และจากความสัมพันธ์ของ

$$I_{global} = I_{direct} + I_{diff,sky} + I_{diff,grnd} \quad (21)$$

ดังนั้น

$$I_{tran} = T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot (I_{global} - I_{diff,sky} - I_{diff,grnd}) + T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} \cdot I_{diff,sky} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} \cdot I_{diff,grnd} \quad (22)$$

เมื่อ

$u_{I_{tran}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

$u_{I_{glob}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

$u_{I_{diff}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

I_{tran} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ส่งผ่าน ที่ได้จากการคำนวณ, W/m^2

I_{glob} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบรวมที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

I_{diff} คือ ค่ารังสีแสงอาทิตย์แบบกระจายที่ตกกระทบซึ่งได้จากการตรวจวัด, W/m^2

จากสมการที่ (20) สามารถหาค่าอนุพันธ์ของค่า I_{tran} เทียบกับค่า I_{glob} ได้เป็น

$$\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{global}} = T_{\{1,M\}}^{fH}$$

ค่าอนุพันธ์ของค่า I_{tran} เทียบกับค่า $I_{diff,sky}$ ได้เป็น

$$\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff,sky}} = (T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} - T_{\{1,M\}}^{fH})$$

และค่าอนุพันธ์ของค่า I_{tran} เทียบกับค่า $I_{diff,grnd}$ ได้เป็น

$$\frac{\partial I_{tran}}{\partial I_{diff,grnd}} = (T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} - T_{\{1,M\}}^{fH})$$

ดังนั้น นำค่าอนุพันธ์ย่อยที่ได้ ไปแทนในสมการที่ (15) จะได้ค่าความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านระบบหน้าต่างกระจกได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot u_{I_{glob}}\right)^2 + \left(\left(T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} - T_{\{1,M\}}^{fH}\right) \cdot u_{I_{diff,sky}}\right)^2 + \left(\left(T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} - T_{\{1,M\}}^{fH}\right) \cdot u_{I_{diff,grnd}}\right)^2} \quad (23)$$

สำหรับการตรวจวัดค่ารังสีแบบกระจาย เครื่องตรวจวัดจะถูกติดตั้งเพื่อรับค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบในแนวตั้งฉากกับกระจก ดังนั้นค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบ (I_{diff}) จะเป็นผลรวมของค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้า และค่ารังสีกระจายจากพื้นดิน ดังนั้นค่ารังสีตรงที่ตกกระทบ (I_{direct}) คือค่าความแตกต่างระหว่างค่ารังสีแบบรวมที่ตกกระทบ กับค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนรวม จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left(T_{\{1,M\}}^{fH} \cdot u_{I_{glob}}\right)^2 + \left[\left[T_{\{1,M\}}^{fH} - \frac{\left(T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} + T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH}\right)}{2}\right] \cdot u_{I_{diff}}\right)^2} \quad (24)$$

ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าความไม่แน่นอนรวมของค่ารังสีที่ส่งผ่านที่ได้จากการประมาณสามารถเขียนได้เป็น

$$u_{I_{tran,\%}} = \frac{u_{I_{tran}}}{I_{tran}} \times 100\% \quad (25)$$

สำหรับข้อมูลการตรวจวัดวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 ที่เวลา 16:37 น. จะได้ข้อมูลการตรวจวัดสำหรับหน้าต่างกระจกติดมุมสี่ปรับมุม 0 องศา และการคำนวณดังนี้

$$I_{glo} = 585 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$I_{diff} = 157.23 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$T_{\{1,M\}}^{fH} = 0.407$$

$$T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} = 0.501$$

$$T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} = 0.501$$

$$u_{I_{glo}} = \frac{8.23}{100} \times 585 = 48.15 \text{ W} / \text{m}^2$$

$$u_{I_{diff}} = \frac{8.29}{100} \times 157.23 = 13.03 \text{ W} / \text{m}^2$$

ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมุมสี่ปรับมุม 0 องศา ของวันที่ 19 พฤษภาคม 2554 สามารถคำนวณได้โดยแทนค่าที่ได้ ลงในสมการที่ (22) จะได้เป็น

$$I_{tran} = (0.407) \cdot (585 - 157.23) + (0.501) \cdot (157.23) = 252.87 \text{ W} / \text{m}^2$$

และค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (24) จะได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{((0.407) \cdot (48.15))^2 + \left(\left[(0.407) - \frac{(0.501+0.501)}{2} \right]^2 \cdot (13.03)^2 \right)} = 19.64 \text{ W / m}^2$$

ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกติดมุสลีปรับมุม 0 องศา จะได้เป็น

$$u_{tran} (\%) = \frac{u_{tran}}{I_{tran}} \times 100\% = \frac{19.64}{252.87} \times 100\% = 7.77\%$$

สำหรับข้อมูลการตรวจวัดวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 ที่เวลา 15:30 น. จะได้ข้อมูลการตรวจวัดสำหรับหน้าต่างกระจกติดมุสลีปรับมุม 45 องศา และการคำนวณดังนี้

$$I_{glo} = 657.92 \text{ W / m}^2$$

$$I_{diff} = 87.54 \text{ W / m}^2$$

$$T_{\{1,M\}}^{fH} = 0.081$$

$$T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} = 0.1443$$

$$T_{\{1,M\},diff,gmd}^{fH} = 0.4448$$

$$u_{I_{glo}} = \frac{8.23}{100} \times 657.92 = 54.15 \text{ W / m}^2$$

$$u_{I_{diff}} = \frac{8.29}{100} \times 87.54 = 7.26 \text{ W / m}^2$$

ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมุสลีปรับมุม 45 องศา ของวันที่ 20 พฤษภาคม 2554 สามารถคำนวณได้โดยแทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (22) จะได้เป็น

$$I_{tran} = (0.081) \cdot (657.92 - 87.54) + \left(\frac{0.1443}{2} \right) \cdot (87.54) + \left(\frac{0.4448}{2} \right) \cdot (87.54) = 72 \text{ W / m}^2$$

และค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าลงในสมการที่ (24) จะได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{((0.081) \cdot (54.15))^2 + \left(\left[(0.407) - \frac{(0.1443+0.4448)}{2} \right]^2 \cdot (7.26)^2 \right)} = 4.46 \text{ W / m}^2$$

ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่
ปรับมุม 45 องศา จะได้เป็น

$$u_{tran}(\%) = \frac{u_{tran}}{I_{tran}} \times 100\% = \frac{4.46}{72} \times 100\% = 6.20\%$$

สำหรับข้อมูลการตรวจวัดวันที่ 21 พฤษภาคม 2554 ที่เวลา 14:32 น. จะได้ข้อมูลการ
ตรวจวัดสำหรับหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา และการคำนวณดังนี้

$$I_{glo} = 566.2 \text{ W / m}^2$$

$$I_{diff} = 165.76 \text{ W / m}^2$$

$$T_{\{1,M\}}^{fH} = 0.497$$

$$T_{\{1,M\},diff,sky}^{fH} = 0.4448$$

$$T_{\{1,M\},diff,grnd}^{fH} = 0.1443$$

$$u_{I_{glo}} = \frac{8.23}{100} \times 566.2 = 46.60 \text{ W / m}^2$$

$$u_{I_{diff}} = \frac{8.29}{100} \times 165.76 = 13.74 \text{ W / m}^2$$

ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับมุม -45 องศา ของวันที่ 21 พฤษภาคม 2554
สามารถคำนวณได้โดยแทนค่าที่ได้ ลงในสมการที่ (22) จะได้เป็น

$$I_{tran} = (0.497) \cdot (566.2 - 165.76) + \left(\frac{0.4448}{2} \right) \cdot (165.76) + \left(\frac{0.1443}{2} \right) \cdot (165.76) = 245.84 \text{ W / m}^2$$

และค่าความไม่แน่นอนของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน สามารถคำนวณได้โดยการแทนค่าลงใน
สมการที่ (24) จะได้เป็น

$$u_{I_{tran}} = \sqrt{\left((0.497) \cdot (46.60) \right)^2 + \left[\left((0.497) - \frac{(0.4448 + 0.1443)}{2} \right) \cdot (13.74) \right]^2} = 23.33 \text{ W / m}^2$$

ดังนั้น ค่าเปอร์เซ็นต์ของความไม่แน่นอนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ปรับ
มุม -45 องศา จะได้เป็น

$$u_{tran}(\%) = \frac{u_{tran}}{I_{tran}} \times 100\% = \frac{23.33}{245.84} \times 100\% = 9.5\%$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพรัตน์ คำพร เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม พ.ศ. 2517 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยขอนแก่นเมื่อปี พ.ศ. 2539 จากนั้นได้ศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2545 และได้เข้าทำงานเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่มหาวิทยาลัยสยาม ตั้งแต่ พ.ศ. 2545 จนถึงปัจจุบัน และได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2551