

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก



นายนพรัตน์ คำพร

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

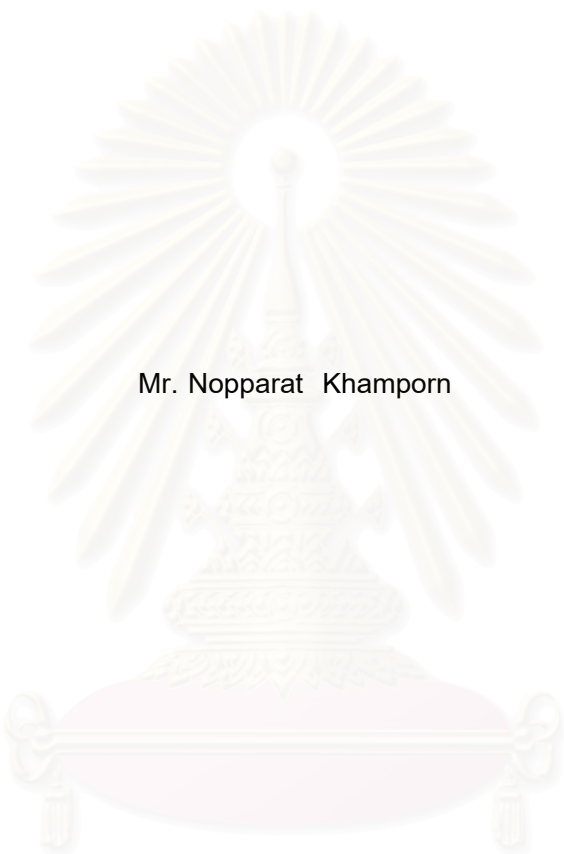
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1405-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF SOLAR HEAT GAIN THROUGH GLASS WINDOWS



Mr. Nopparat Khamporn

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1405-8

4170353221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: GLASS WINDOWS / HEAT TRANSFER / THERMAL COMFORT

NOPPARAT KHAMORN : A STUDY OF SOLAR HEAT GAIN THROUGH GLASS WINDOWS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMSAK CHAIYAPINUNT, Ph.D. 170 pp. ISBN 974-03-1405-8.

The objective of this thesis is to analyse the characteristic of glass windows that commonly used for buildings in Thailand. Four types of window were studied in aspect of heat transfer and thermal comfort. They are clear windows, tinted glass windows, reflective glass windows and double glass windows. WINDOW 4.1 and self developed computer program were used for the analysis using inside and outside Bangkok weather data for the inside and outside condition. Two types of design weather data for Bangkok, dry bulb temperature of 0.4% annual cumulative frequency of occurrence and global solar radiation of 0.4% annual cumulative frequency of occurrence, were investigated. By considering heat gain through window in four directions, the data related to global solar radiation of 0.4% annual cumulative frequency of occurrence were selected to use for design weather data in this thesis.

The analysis showed that the glass windows which having high value of transmittance will cause discomfort to an occupant sitting near the glass window. This effect caused by the direct solar impinged on the of human skin surface although the inside temperature was kept in quite comfortable level. And the glass window that having the worst effect on the thermal comfort was the clear glass window while the tint glass and reflective glass had a level of discomfort less than the clear glass window. But the level of discomfort due to glass surface temperature of the tinted glass and reflective glass were higher than the clear glass window. The double glass which consisted of the reflective glass in the outer pane and clear glass in the inside pane separated by six millimeters air gap gave the value of the Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) in the satisfaction range.

In the analysis, glass properties which having effect on heat transfer and thermal comfort calculation were developed. They were transmittance, reflectance, absorptance, Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) which varied with the angle of incidence, the overall heat transfer coefficient (U), inside glass surface temperature for using calculating the mean radiant temperature, Predicted Mean Vote (PMV), and PPD values. The rate change of PMV with the heat transmitted was also developed.

The final part of the thesis, showed the error in calculating heat gain through glass window when using the single property, Shading Coefficient (SC) which was not dependent on the angle of incidence, instead of using the properties of glass window which varied with the angle of incidence in calculation. And the error in the result was increasing when the calculation applied to the glass type which was not the clear glass.

Department Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. ดร. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ตลอดจนควบคุม การศึกษาค้นคว้าจนประสบความสำเร็จด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนส่วนหนึ่งจาก ทุนวิจัยของ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและ วัสดุแห่งชาติ ผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ในที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายบริการข้อมูล กรมอุตุนิยมวิทยา รวมทั้งฝ่ายการตลาดของ บริษัท กระจกไทย-อาซาฮี จำกัด (มหาชน) และเพื่อนนิสิตปริญญาโทของภาควิชาวิศวกรรมเครื่อง กกล ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุน และคอยให้กำลังใจแก่ผู้ วิจัยเสมอมา

นพรัตน์ คำพร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	4
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก	6
2.2 การคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก	7
2.3 การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวเอียง	8
2.4 การคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)	9
3 ทฤษฎี	12
3.1 วิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก	12

	หน้า
3.2 วิธีการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก	19
3.3 วิธีการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิกระจกตามวิธี Window 4.1	26
3.4 การหาค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)	35
3.5 การคำนวณค่าปริมาณรังสีแสงอาทิตย์	41
4 ข้อมูลภูมิอากาศ	43
4.1 ข้อมูลภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา	43
4.2 การหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ	43
4.3 การจัดทำข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่ใช้กับโปรแกรม Window 4.1	57
5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์	59
5.1 ลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น	59
5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	60
5.3 ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	63
5.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์	64
6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	67
6.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	67
6.2 ข้อมูลชุดหน้าต่างกระจก	71
6.3 กำหนดสภาวะอากาศภายนอกและภายใน	71
6.4 กำหนดลักษณะห้อง	73
6.5 กำหนดพารามิเตอร์และข้อสมมุติฐาน	74
6.6 การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	80

7 ผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	81
7.1 ข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ	81
7.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่มีผลต่อความสบาย	82
7.3 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก.....	89
7.4 คุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ.....	100
7.5 การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกโดยวิธีการ กำหนดค่า SC และ SHGC	100
7.6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง	106
ภาคผนวก	108
ภาคผนวก ก. ตารางแสดงคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าของผู้ผลิตกระจก	109
ภาคผนวก ข. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วน ระหว่างค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ ASHRAE (K_A) และค่าอัตราส่วน ระหว่างค่ารังสีกระจกแสงอาทิตย์กับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ (K_D)	120
ภาคผนวก ค. รายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น	122
ภาคผนวก ง. ตารางแสดงคุณสมบัติทาง optical ที่แปรตามมุมตกกระทบ	149
ภาคผนวก จ. รูปแสดงลักษณะโครงสร้างของหน้าต่างกระจกที่ใช้ในงานวิจัย.....	169
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	170

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบอาคารของสภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ	10
ตารางที่ 2.2 แสดงช่วงของค่า PPD และค่า PMV ของสภาวะสิ่งแวดล้อม 3 รูปแบบ	10
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของ Edge of glass U-factor	17
ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พหุนามจากสมการที่ 3.28 และ 3.29	23
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกในช่วงคลื่นแสงต่างๆ	26
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและผิวกระจกที่แปรตาม การเอียงตัวของกระจก	31
ตารางที่ 4.1 แสดงวันที่ที่มีค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% ภายในเดือนต่างๆของแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 รวม 12 ปี	45
ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนวันที่มีค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 %ภายในเดือนต่างๆของแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 รวม 12 ปี	46
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันของปีต่างๆ ตั้งแต่ปี 2531-2542 รวม 12 ปี.....	47
ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้งของวันที่เป็นตัวแทนทั้ง 20 วัน ,อุณหภูมิกระเปาะแห้งเฉลี่ยรายชั่วโมง, เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายชั่วโมง และอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งรายชั่วโมง	48
ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ ที่หามาได้จากอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 % และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง	52

ตารางที่ 4.6	แสดงค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในวันที่เป็นตัวแทนของวันที่มีค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 % และค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์เฉลี่ยซึ่งนำไปใช้กับวันออกแบบ	54
ตารางที่ 4.7	แสดงข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้รังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 % และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง	55
ตารางที่ 4.8	แสดงผลการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกใสมাত্রฐาน 3 มม. ทั้ง 4 ทิศ.....	58
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 6 มม. โดยโปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)	65
ตารางที่ 5.2	เปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดต่างๆ โดยโปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)	66
ตารางที่ 5.3	แสดงเปรียบเทียบการคำนวณ PMV ระหว่าง โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น SUBROUTINE CAL_COMFORT และ โปรแกรม Thermal comfort ของ ASHRAE ที่สภาวะเดียวกัน	66
ตารางที่ 7.1	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น	91
ตารางที่ 7.2	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น	92
ตารางที่ 7.3	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น	93
ตารางที่ 7.4	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ช่องอากาศ 6 มม.....	96
ตารางที่ 7.5-	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ช่องอากาศ 12 มม.	97
ตารางที่ 7.6	แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้น ช่องอากาศ 6 มม.	98

ตารางที่ 7.7 แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ช่องอากาศ 12 มม.	99
ตารางที่ ก.1 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกใส 1 ชั้น	110
ตารางที่ ก.2 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น	111
ตารางที่ ก.3 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น	112
ตารางที่ ก.4 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกใส เป็นกระจกด้านใน	116
ตารางที่ ก.5 แสดงคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกสะท้อน แสงเป็นกระจกด้านนอกและกระจกเป็นกระจกใสด้านใน	118
ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 1 ชั้น	149
ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น	151
ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น	153
ตารางที่ ง.4 คุณสมบัติทาง optical ของกระจก 2 ชั้น	161
ตารางที่ ง.5 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 6 มม.	163
ตารางที่ ง.6 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 12 มม.....	166

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดงการสมมูลความร้อนของหน้าต่างกระจกจำนวน N ชั้น	27
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของจุดต่อต่างๆ ของอุณหภูมิและค่า heat flux ซึ่งใช้หาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก	28
รูปที่ 3.3 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมตั้งฉาก	38
รูปที่ 3.4 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน	38
รูปที่ 3.5 แสดงค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำนั่ง	40
รูปที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 %	51
รูปที่ 4.2 แสดงรังสีแสงอาทิตย์ในทั้ง 3 องค์ประกอบ ที่สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 %	51
รูปที่ 4.3 แสดงรังสีแสงอาทิตย์ในทั้ง 3 องค์ประกอบ ของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีรังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 %	56
รูปที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งเฉลี่ยที่สอดคล้องกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีรังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4 %	56
รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของห้องและตำแหน่งผู้อยู่อาศัยที่ใช้สำหรับการคำนวณ	74
รูปที่ 6.2 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังตั้งฉาก	76
รูปที่ 6.3 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน .	76
รูปที่ 6.4 แสดงค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำนั่ง	77

รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Mean radiant temperature และ ค่า PMV สำหรับค่าด้านทานเสื้อผ้าเท่ากับ 0.5 clo และค่าการทำกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met ที่ความเร็วลมต่างๆ	79
รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV และค่า mean radiant temperature สำหรับค่าความต้านทานเสื้อผ้าต่างๆ และทำการทำกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met	80
รูปที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกใสที่มีความหนาต่างกัน (CLR_XX; CLR = กระจกใส XX = ความหนาเป็นมิลลิเมตร)	83
รูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบที่ความหนากระจกต่างกัน (YYYY_XX ; YYYY = ชื่อชนิดกระจกชนิดเคลือบที่เป็นชื่อทางการค้า XX = ความหนาเป็นมิลลิเมตร)	84
รูปที่ 7.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดสะท้อนแสงขนาด 6 มม. (YY_ZZZZZ_6 : YY_ZZZZZ = ชื่อทางการค้าของกระจกสะท้อนแสง ; 6 = ความหนากระจก 6 มม.)	86
รูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ระหว่างกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้น ชนิดช่องว่างอากาศเท่ากับ 6 มม. ของกระจกชนิดต่างๆ	88
รูปที่ 7.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น สำหรับช่องว่างอากาศ 6 มม. และ 12 มม.)	88
รูปที่ 7.6 แสดงลำดับค่า PPD ของหน้าต่างกระจก ชนิดต่างๆ โดยเรียงลำดับจากกระจกที่มีค่า SHGC มากไปหาน้อย	90
รูปที่ 7.7 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงของหน้าต่างกระจกด้านทิศใต้โดยใช้ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ของวันที่ 21 เมษายน ความเร็วลมเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที ด้วยวิธี SC และ SHGC	101
รูปที่ 7.8 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงของหน้าต่างกระจกแบบสะท้อนแสง และแบบกระจกสองชั้นที่หันหน้าไปด้านทิศตะวันตกโดยใช้ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ของวันที่ 21 เมษายน ความเร็วลมเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที ด้วยวิธี SC และ SHGC	102

รูปที่ 7.9 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแบบสะท้อนแสงและกระจก 2 ชั้น ที่หันหน้าไปด้านทิศตะวันตกโดยใช้ภูมิอากาศของกรุงเทพมหานคร ของ วันที่ 21 เมษายน ความเร็วลม 0 เมตรต่อวินาที 103



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	ค่าดูดกลืนรังสีของกระจก	
a_k	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผิวหนึ่งคน	
d	ค่าความหนาของกระจก	m
f_{cl}	ค่าสัมประสิทธิ์เครื่องนุ่งห่ม	
f_p	ค่าสัมประสิทธิ์พื้นที่ภาพฉาย	
F_{p-N}	ค่า Angle factor ระหว่างคนและผิว N	
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก	m/s^2
Gr	ค่า Grashoff number	
h_c	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวคน และอากาศ	$W/m^2 \cdot K$
h_{in}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายใน	$W/m^2 \cdot K$
h_{out}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอก	$W/m^2 \cdot K$
hc_{in}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านใน	$W/m^2 \cdot K$
hc_{out}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวด้านนอก	$W/m^2 \cdot K$
hr_{in}	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ผิวภายใน	$W/m^2 \cdot K$
hr_{out}	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนที่ผิวภายนอก	$W/m^2 \cdot K$
hs_{gap}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างช่องว่าง อากาศของกระจก	$W/m^2 \cdot K$
l_{cl}	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานเชิงความร้อน ของเสื้อผ้า	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
I_{diffh}	ค่ารังสีแสงกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิว ในแนวนอน	W/m^2
I_{diffv}	ค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบผิวตั้งฉาก	W/m^2
I_{Dirh}	ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวนอน	W/m^2
I_{Dirv}	ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวตั้งฉาก	W/m^2
I_{toth}	ค่ารังสีรวมที่ตกกระทบในแนวระดับ	W/m^2
k	ค่าการนำความร้อน	$W/m \cdot K$
L	จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก	ชั้น
met	ค่าการทำกิจกรรมของคน	$kcal/hr m^2$
M_{ij}	ค่าเมตริกซ์ M ขนาด $i \times j$	
N	ค่า Inward flowing fraction	
P	ค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจก	
Pa	ค่า Partial Pressure	$mm Hg$
P_{α}	ค่าคุณสมบัติในทิศทางครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัม	
PMV	ค่า Predicted Mean Vote	
PPD	ค่า Predicted Percentage of Dissatisfied	%
Pr	ค่า Prandtl number	
$Psat$	ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว	kPa
q	ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก	W/m^2
Q^c	ค่าการพาความร้อนต่อพื้นที่	W/m^2
Q^k	ค่าการนำความร้อนต่อพื้นที่	W/m^2
Q^r	ค่าการแผ่รังสีต่อพื้นที่	W/m^2

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q_{room}	ค่าการแผ่รังสีคลื่นยาวจากผิวห้องภายใน	W/m^2
Q_{sky}	ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ	W/m^2
Q'_{sky}	ค่าการแผ่รังสีคลื่นยาวจากท้องฟ้า	W/m^2
R	ค่าการสะท้อนรังสีของกระจก	
Ra	ค่า Rayleigh number	
RH_a	ค่าความชื้นสัมพัทธ์	%
Rh_1	ค่าความต้านทานการพาความร้อนของฟิล์มอากาศ ผิวนอก	$m^2 \cdot KW$
Rh_N	ค่าความต้านทานการพาความร้อนของฟิล์มอากาศผิวใน	$m^2 \cdot KW$
Rk_1	ค่าความต้านทานการนำความร้อนของกระจกชั้นนอก	$m^2 \cdot KW$
Rk_N	ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกด้านใน	$m^2 \cdot KW$
S'	ค่าพลังงานความร้อนที่เปล่งรังสีคลื่นยาวจากผิวกระจก	W/m^2
$SHGC$	ค่า Solar Heat Gain Coefficient	
$SHGC(\theta)_D$	ค่า Direct Solar Heat Gain Coefficient	
$\langle SHGC \rangle_d$	ค่า Diffuse Solar Heat Gain Coefficient	
T	ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก	
t_g	ค่าอุณหภูมิกระจก	°C
t_{in}	ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน	°C
t_{oui}	ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอก	°C
T_a	ค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง	°C
T_{cl}	ค่าอุณหภูมิเสื้อผ้า	°C

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_{mrt}	ค่า Mean radiant temperature	°C
T_{room}	ค่าอุณหภูมิภายในห้อง	°C
T_{umrt}	ค่า Unirradiant mean radiant temperature	°C
Δt	ค่าอุณหภูมิผิวกระจกแตกต่างระหว่างชั้นกระจก	°C
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot K$
V	ค่าความเร็วลม	m/s



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อักษรกรีก	ความหมาย	หน่วย
τ	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสี	
$\bar{\tau}$	ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเฉลี่ย	
$\bar{\rho}$	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเฉลี่ย	
ρ_s	ค่าความหนาแน่นของอากาศ	kg/m^3
ρ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี	
ρ_g	ค่าการสะท้อนรังสีของพื้นดิน	
Φ	ค่า Weighting Function	
ϕ	ค่ามุมการหักเหของรังสี	<i>Degree</i>
φ	ค่ามุมเอียงของกระจก	<i>Degree</i>
Γ	ค่า Auxiliary Function	
Δ	ค่า residual	
Y_i	ค่าเมตริกซ์ Y ขนาด i	
β_g	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก๊ส	$1/K$
θ	ค่ามุมตกกระทบ	<i>Degree</i>
θ_v	ค่ามุมตกกระทบผิวตั้งฉาก	<i>Degree</i>
θ_z	ค่ามุม zenith	<i>Degree</i>
σ	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
ω	ค่าความกว้างของช่องอากาศ	m
ε	ค่าการเปล่งรังสี	
ε_{gi}	ค่าการเปล่งรังสีของผิวกระจกด้านใน	
ε_p	ค่าการเปล่งรังสีของผิวผนังคน	

อักษรกรีก	ความหมาย	หน่วย
λ	ค่าความยาวคลื่น	nm
α	ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี	



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

สภาพภูมิอากาศของประเทศไทยโดยส่วนใหญ่ จะมีลักษณะอากาศร้อนอบอ้าวเกือบตลอดทั้งปี อาคารขนาดใหญ่ไม่ว่าจะเป็นอาคารสำนักงาน อาคารพาณิชย์ อาคารที่อยู่อาศัย ต่างต้องใช้เครื่องปรับอากาศในการให้ความเย็นเพื่อรักษาสภาพที่อยู่อาศัยให้มีอุณหภูมิภายในที่เหมาะสมและยังต้องให้ผู้อยู่อาศัยเกิดความสบาย (Thermal comfort) ในขณะที่เดียวกันอาคารส่วนใหญ่ มักมีกระจกปริมาณมากเป็นกรอบอาคาร โดยสถาปนิกผู้ออกแบบมักนิยมใช้กระจกผืนใหญ่ๆ เป็นกรอบอาคาร เพื่อให้ผู้อยู่อาศัยสามารถเห็นทิวทัศน์ภายนอกอย่างชัดเจน และยังทำให้ตัวอาคารให้มีความสวยและสง่างาม แต่นอกเหนือจากผลดีในแง่ของความรู้สึกเกี่ยวกับเรื่องของทิวทัศน์และความสวยงามแล้ว กระจกก็ยังทำหน้าที่รับแสงอาทิตย์เข้าสู่อาคารโดยตรง แสงอาทิตย์ดังกล่าวจะให้ทั้งแสงธรรมชาติ และความร้อนแก่ภายในอาคาร สำหรับประเทศในเขตร้อน โดยเฉพาะประเทศไทย ซึ่งไม่ต้องการความอบอุ่นจากแสงแดดเหมือนประเทศในเขตหนาวนั้น สิ่งที่เป็นประโยชน์จากแสงแดดที่ผ่านกระจกในแง่ของการประหยัดพลังงานคือ แสงธรรมชาติ (daylight) แต่สิ่งที่ไม่เป็นประโยชน์ในแง่ประหยัดพลังงานก็คือ ความร้อนจำนวนมากที่เข้าสู่อาคาร ดังนั้นกระจกสมัยใหม่ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับประเทศในเขตร้อนจึงควรมีลักษณะที่ยอมให้ความร้อนผ่านกระจกมีค่าต่ำแต่ให้ปริมาณของแสงสว่างมาก

ในอดีตการเลือกกระจกโดยทั่วไปมักอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อน (U) ค่า solar heat gain factor (SHGF) ซึ่งค่า SHGF นี้ จะใช้ได้แม่นยำสำหรับกระจกชั้นเดียวและสำหรับกระจกที่มีค่าคุณลักษณะทางคลื่นแสงและความร้อนที่ค่อนข้างคงที่ และจะไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง และมุมตกกระทบ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนากระจกชนิดใหม่ๆ โดยได้มีการออกแบบกระจกเป็นแบบหลายชั้นโดยมีอากาศหรือก๊าซที่เหมาะสมอยู่ระหว่างกระจกเพื่อลดการส่งผ่านความร้อน และยังมีการเคลือบสารพิเศษบนผิวของกระจกในด้านที่กำหนดเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางความร้อนของกระจก นอกจากนี้คุณลักษณะของกระจกยังแปรตามความยาวคลื่นแสง และมุมตกกระทบ ซึ่งจะทำให้การคำนวณค่าความร้อนผ่านกระจกจากแสงอาทิตย์มีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติตัวใหม่ของกระจกที่ใช้กำหนดคุณลักษณะทางความร้อนของกระจกคือ ค่า solar heat gain coefficient (SHGC) มาใช้แทนค่า solar heat

gain factor ซึ่งจะให้ค่าคุณสมบัติของกระจกหน้าต่างได้แม่นยำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากค่า SHGC เป็นค่าที่แปรตามมุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปกระจกที่ผลิตขึ้นมาจะบอกคุณลักษณะและสมรรถนะของตัวกระจกเปล่าด้วยค่าการส่งผ่าน การดูดกลืน และการสะท้อนของแสงและความร้อนที่ตำแหน่งตั้งฉาก และบอกค่าการส่งผ่านพลังงานในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) และค่า shading coefficient (SC) แต่ค่าที่กำหนดจะเป็นเงื่อนไขที่สภาวะแวดล้อมมาตรฐานเพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับกระจกชนิดหนึ่งกับกระจกอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่ได้พิจารณาที่สภาพการติดตั้งจริง การติดตั้งจริงจะประกอบด้วยลักษณะการวางตัวของกระจก มุมเอียงของการติดตั้ง และสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง จะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงแตกต่างจากค่าที่ทางผู้ผลิตกระจกให้มา โดยเฉพาะค่า solar heat gain coefficient นั้นเป็นค่าที่แปรตามมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์

ในปัจจุบันนี้ได้มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้คำนวณหาคุณลักษณะทางความร้อนของกระจกสมัยใหม่ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ โปรแกรม WINDOW 4.1 โดยโปรแกรมนี้สามารถใช้หาค่าคุณสมบัติทางคลื่นแสงของกระจก (ค่าการส่งผ่าน ค่าการสะท้อนและค่าการดูดกลืนรังสี) ค่า SHGC ที่มุมตกกระทบต่างๆ ค่าอุณหภูมิผิวกระจก และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) นอกจากนี้ยังสามารถใช้หาค่าคุณสมบัติดังกล่าวของส่วนกรอบหน้าต่างได้อีกด้วย ซึ่งค่าที่หาได้นั้นจะต้องหาจากค่าของสภาวะออกแบบที่ตำแหน่งตั้งฉากกับกระจก

นอกเหนือจากการพิจารณาในเรื่องการประหยัดพลังงานแล้ว ความรู้สึกของผู้อยู่อาศัยมักเป็นประเด็นสำคัญมากพอสมควร โดยจะพบว่าผู้อยู่อาศัยที่อยู่ในตำแหน่งใกล้กับผนังกระจกในตอนกลางวันจะรู้สึกร้อนทั้งนี้เนื่องมาจากการแผ่รังสีเข้ามาโดยตรงสำหรับกรณีที่เป็นกระจกใสหรือกระจกสีอ่อน และจะรู้สึกร้อนเนื่องจากการเปล่งรังสีจากกระจกสำหรับกรณีที่เป็นกระจกติดฟิล์มหรือกระจกชนิดเคลือบ (coated glass) ซึ่งจะมีผลทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สบาย ผลก็คือจะทำให้เพิ่มปริมาณของการทำความเย็นเพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นด้วย

ในปัจจุบันได้มีพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 และกฎกระทรวงที่ออกตามพระราชบัญญัตินี้ ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานหลักเกณฑ์ และวิธีการอนุรักษ์พลังงานในอาคารควบคุมโดยมีผลบังคับใช้ต่ออาคารเก่าและอาคารใหม่ โดยกำหนดให้มีความค่า OTTV (Overall Thermal Transfer Value) ไม่เกิน 55 W/m^2 สำหรับอาคารเก่า และมีค่า OTTV ไม่เกิน 45 W/m^2 สำหรับอาคารใหม่ และอาคารพาณิชย์ส่วนใหญ่ที่สร้างมาก่อนเกือบทั้งหมดมักมีกระจกเป็นกรอบอาคาร ซึ่งมีผลทำให้ความร้อนจำนวนมากเข้าสู่ตัวอาคาร ดังนั้น เจ้า

ของอาคารจึงจำเป็นต้องทำการแก้ไขเพื่อลดการส่งผ่านพลังงานความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารลงให้อยู่ในค่าที่กำหนด ดังนั้นความเข้าใจในเรื่องการส่งผ่านความร้อนผ่านกระจกอย่างถ่องแท้จะช่วยให้การปฏิบัติตามพระราชบัญญัติอนุรักษ์พลังงานสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิทยานิพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะหาคุณสมบัติทางความร้อน ของกระจกที่ใช้กับภูมิอากาศมาตรฐานของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีผลกระทบต่อความสบายของผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร โดยใช้โปรแกรม WINDOW 4.1 หาคุณสมบัติต่างๆของหน้าต่างกระจกที่มุมตกกระทบต่างๆ และใช้ข้อมูลภูมิอากาศมาตรฐาน ได้แก่ ค่ารังสีรวมในแนวระดับ ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และค่าความเร็วลมภายนอกอาคาร สำหรับการออกแบบของกรุงเทพมหานครซึ่งคัดเลือกมาจากข้อมูลภูมิอากาศ 12 ปีของกรมอุตุนิยมวิทยา และนำค่ารังสีรวมที่ได้มาหาค่ารังสีตรงที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก เพื่อเป็นข้อมูลขาเข้าของโปรแกรม WINDOW 4.1 ซึ่งจะได้ค่าอุณหภูมิผิวกระจกชนิดต่างๆ ของวันออกแบบเพื่อที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่า mean radiant temperature เพื่อใช้วิเคราะห์หาค่าความสบายของผู้อยู่อาศัย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบหน้าต่างกระจก 4 ชนิด (กระจกใส กระจกชนิดเคลือบ กระจกสะท้อนแสง และกระจกสองชั้น) ในแง่ของการถ่ายเทและส่งผ่านความร้อนและจัดหารูปแบบการเลือกระบบหน้าต่างกระจกในแง่สมรรถนะเชิงความร้อนและความสบายสำหรับสภาวะอากาศมาตรฐานกรุงเทพมหานคร
2. จัดทำข้อมูลภูมิอากาศสำหรับการออกแบบของกรุงเทพมหานคร 2 แบบ ซึ่งได้แก่แบบอุณหภูมิออกแบบภายนอกกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% รวมทั้งค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ และค่าความเร็วลมอากาศภายนอกที่สอดคล้อง และแบบรังสีรวมแสงอาทิตย์ออกแบบที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% รวมทั้งค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งและค่าความเร็วลมอากาศภายนอกที่สอดคล้อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติ แบบสภาวะคงตัว และขั้นตอนการคำนวณ ตามวิธีการคำนวณที่ใช้ในโปรแกรม WINDOW 4.1 รวมทั้งวิธีการใช้งานของโปรแกรม WINDOW 4.1

2. ศึกษาวิธีการใช้งานของโปรแกรมประมาณค่าพลังงานของอาคาร DOE 2.1E และจัดรูปแบบของแฟ้มข้อมูลขาเข้าของโปรแกรมให้เหมาะสม รวมทั้งขั้นตอนและวิธีการในการใช้งานร่วมกันระหว่างโปรแกรม DOE 2.1E และโปรแกรม WINDOW 4.1
3. กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นของระบบชุดหน้าต่างที่เป็นกระจกทั้ง 4 ชนิด (กระจกใส กระจกชนิดเคลือบ กระจกสะท้อนแสง และกระจกสองชั้น) ซึ่งต้องใช้ในการวิเคราะห์หาสมรรถนะของกระจกในแง่ของการส่งผ่านความร้อน การใช้พลังงาน และความสบาย และกำหนดค่าสภาพแวดล้อมที่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ และกำหนดค่าข้อมูลที่จำเป็น และข้อมูลคลื่นแสงของกระจกที่ต้องการในการวิเคราะห์ จากนั้นทำการเลือกชนิดกระจกที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและที่เป็นที่นิยมเพื่อนำมากำหนดจำนวนข้อมูลที่จะต้องวิเคราะห์
4. ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ WINDOW 4.1 ที่พัฒนาโดย Windows and Daylighting Groups ที่ Lawrence Berkeley Laboratory เพื่อกำหนดค่าคุณลักษณะในเชิงความร้อนและเชิงความสว่างจากแสงอาทิตย์ ของระบบหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ ตามพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ 3. ซึ่งรวมทั้งการคำนวณค่าความร้อนที่อาคารได้รับผ่านกระจกในรูปของดัชนีวัดการส่งผ่านความร้อน เช่น ค่า SHGC , SC , U และ อุณหภูมิผิวของระบบหน้าต่างกระจก
5. จากผลการวิเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการในข้อที่ 4. ทำการหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของระบบหน้าต่างชนิดต่างๆ กับค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ ค่าอุณหภูมิผิวของระบบหน้าต่าง และดัชนีชี้ความสบาย(PPD และ PMV)
6. จัดทำผลลัพธ์ที่ได้ในข้อ 5. ให้อยู่ในรูปตารางหรือกราฟที่สามารถนำไปใช้ได้สะดวก เพื่อสามารถนำไปประกอบในการประเมินสมรรถนะของหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถทราบถึงวิธีการวิเคราะห์คุณลักษณะทางความร้อนของหน้าต่างกระจกทั้ง 4 ชนิด ได้โดยใช้โปรแกรม WINDOW 4.1

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก คุณสมบัติทางคลื่นแสงที่แปรตามมุมตกกระทบของหน้าต่างกระจก และวิธีการการคำนวณหาค่าความสบาย
3. ได้ข้อมูลอากาศของกรุงเทพมหานคร ที่มีความเหมาะสมในการประมาณค่าปริมาณของพลังงานที่ถ่ายเทผ่านหน้าต่างกระจกทั้ง 4 ชนิด
4. มีเครื่องมือที่จะตรวจสอบสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจก ที่สะท้อนถึงผลของการติดตั้งใช้งานจริง อาทิเช่น ทิศทางการจัดวางของกระจก ชนิดของกระจก โดยที่จะได้ค่าผลของสมรรถนะในรูปของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังกระจก อุณหภูมิผิวกระจก และดัชนีบ่งบอกความสบายที่สอดคล้องกับสภาวะการติดตั้งจริง
5. เครื่องมือดังกล่าวจะสามารถใช้ทั้งในแง่ของเจ้าของอาคาร สถาปนิกผู้ออกแบบและวิศวกร เพื่อประกอบการเลือกระบบหน้าต่างกระจกที่สอดคล้องกับการติดตั้งจริงในภูมิอากาศประเทศไทย
6. มีคู่มือสำหรับการแสดงถึงสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกที่ใช้งานได้ โดยจะสามารถแสดงผลของสมรรถนะของระบบหน้าต่างกระจกที่แปรตามพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะของระบบหน้าต่างกระจกทั้ง 4 ชนิด ในแง่ของการถ่ายเทและส่งผ่านความร้อนและจัดหารูปแบบการเลือกระบบหน้าต่างกระจกในแง่สมรรถนะเชิงความร้อนและความสบาย สำหรับสภาวะอากาศมาตรฐานกรุงเทพมหานคร

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องซึ่งใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

การคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก

การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวเอียง

การคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)

2.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

งานวิจัยของ Rubin M.

ในปี พ.ศ. 2525 Rubin [3] ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติ แบบสภาวะคงตัว ด้วยวิธีการสมดุลพลังงานความร้อนในแต่ละชั้นของกระจก โดยกำหนดสภาวะแวดล้อมอันได้แก่ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ค่าความเร็วลม อุณหภูมิอากาศภายนอก และอุณหภูมิอากาศภายในให้มีค่าคงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งวิธีดังกล่าวนอกจากจะสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแล้ว ยังสามารถหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิผิวกระจกในแต่ละชั้นต่างๆ ของหน้าต่างกระจกโดยใช้ลักษณะของการคำนวณซ้ำหลายครั้งจนคำตอบนั้นลู่เข้า รวมทั้งยังสามารถหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของกระจกอันได้แก่ ค่า U ค่า SC และค่า $SHGC$ ตามสภาวะแวดล้อมที่กำหนด ซึ่งสมการสมดุลความร้อนสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.43 ส่วนรายละเอียดจะถูกรวบรวมเพิ่มในหัวข้อที่ 3.3

งานวิจัยของ D. Arasteh, S. Reilly, and M. Rubin

ในปี พ.ศ. 2529 Arasteh และคณะ [4] ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงและเพิ่มเติมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกของ Rubin[3] โดยได้เปลี่ยนแบบจำลองการคำนวณหาความสัมพันธ์การพาความร้อนภายในห้อง และยังได้เพิ่มเติมแบบจำลองการคำนวณการผสมกันระหว่างก๊าซที่อยู่ระหว่างชั้นกระจกสำหรับหน้าต่างกระจกหลายชั้น รวมทั้งยังได้เพิ่มเติมการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนขอบและกรอบของหน้าต่างกระจก และยังสามารถคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ถูกจัดวางในลักษณะเอียงตัว ในมุมต่างๆ ซึ่งวิธีการดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นวิธีการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในโปรแกรม WINDOW 4.1

2.2 การคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก

งานวิจัยของ R.A. Fuller

ในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกนั้นจำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกซึ่งขึ้นกับความยาวคลื่นแสงและมุมตกกระทบ ในปี พ.ศ. 2534 Fuller [5] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ได้แก่ ค่าการส่งผ่าน (Transmittance) ค่าการสะท้อน (Reflectance) และค่าการดูดกลืน (Absorbance) ของหน้าต่างกระจกชนิดไม่เคลือบ (Uncoated glass) ซึ่งค่าคุณสมบัติดังกล่าวจะขึ้นกับความยาวคลื่นแสงและมุมตกกระทบ การคำนวณนั้นจะใช้ค่าคุณสมบัติทาง optical ที่ตำแหน่งตั้งฉากซึ่งได้จากการตรวจวัดและความหนาของกระจกสำหรับเป็นข้อมูลในการคำนวณ สำหรับการคำนวณจะแบ่งช่วงของความยาวคลื่นที่พิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงรังสีความร้อนแสงอาทิตย์ (solar range) และช่วงการมองเห็น (Visible range) โดยในช่วงของรังสีความร้อนแสงอาทิตย์จะใช้ความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยเป็น 898 นาโนเมตร และช่วงของการมองเห็นจะใช้ความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยเป็น 575 นาโนเมตร นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการตรวจวัดคุณสมบัติทาง optical ที่มุมตกกระทบต่างๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นวิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้คำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกชนิดไม่เคลือบได้โดยไม่ต้องทำการตรวจวัด

งานวิจัยของ E. Finlayson, D. Arasteh, C. Huizenga, M. Rubin, S. Reilly

ในปี พ.ศ. 2536 Finlayson และคณะ [6] ได้นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบ (coated glass) โดยใช้วิธีประมาณค่า ซึ่งผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทำสมการเส้นถดถอยออกเป็นสองแบบจำลองด้วยกันคือ แบบจำลองของกระจกใส (clear glass) และแบบจำลองของกระจกชนิดเคลือบ (coated glass) โดยมีเงื่อนไขการพิจารณาว่า ถ้าคุณสมบัติการส่องผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta=0^\circ$) มีค่ามากกว่า 0.645 การคำนวณคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกนั้นก็จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกใส แต่ถ้าคุณสมบัติการส่องผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉากมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645 การคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกนั้นก็จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระจกชนิดเคลือบคำนวณ นอกจากนี้คณะผู้วิจัยยังได้หาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบในทิศทางครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัม (hemispherical properties) เพื่อที่จะนำคุณสมบัติดังกล่าวไปคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเนื่องจากรังสีกระจายแสงอาทิตย์

2.3 การคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวเอียง

โดยทั่วไปแล้วลักษณะการใช้งานของหน้าต่างกระจกนั้นจะถูกจัดวางในลักษณะตั้งฉาก ดังนั้นการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จำเป็นต้องทราบค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับกระจกที่ถูกจัดวางในลักษณะตั้งฉากที่ตำแหน่งมุมตกกระทบต่างๆ แต่ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดรังสีแสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะเป็นค่ารังสีที่กระทบผิวในแนวนอน

ในปี พ.ศ. 2525 J. I. Jimenez and Y. Castro [7] ได้นำเสนอการคำนวณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวเอียงจากข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากการตรวจวัดในแนวนอน โดยคณะผู้วิจัยได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างรังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวในแนวนอน และรังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวเอียงตามสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$\frac{I_{dirv}}{I_{dirh}} = \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_z} \quad (2.1)$$

โดยที่

$$I_{dirv} = \text{ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบผิวเอียง, W/m}^2$$

$$I_{dirh} = \text{ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบกับผิวในแนวนอน, W/m}^2$$

θ_v = มุมตกกระทบของรังสีตรงบนผิวเอียง, Degree
 θ_z = มุม Zenith, Degree

2.4 การคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort)

ในปี พ.ศ. 2513 Fanger [2] ได้นำเสนอการคำนวณค่าความสบายของคนภายในห้อง ซึ่งขึ้นกับตัวแปร 6 ตัวแปรด้วยกันคือ ค่าความเร็วลมอากาศ ค่าความชื้นอากาศ ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า (thermal resistance of clothing, clo) ค่าการทำกิจกรรม (metabolic rate, met) และค่า mean radiant temperature โดยตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปรนี้ ถูกนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นค่าดัชนีที่ใช้อบกระดั้บความสบายของคน คือค่า Predicted Mean Vote (PMV) และค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) โดยค่า PMV จะใช้กำหนดว่าคนจะหนาวหรือร้อน ซึ่งค่า PMV จะถูกแบ่งออกเป็น 7 ระดับ โดยใช้ค่าตัวเลขจาก -3 ถึง +3 โดยที่ -3 หมายถึงหนาวมากและเมื่อมีค่าลบน้อยลงจะหมายถึงร้อนขึ้น จนถึงร้อนมากที่สุดที่ค่า +3 ที่ยอมรับได้ และค่า PMV = 0 จะหมายถึงค่าที่ทำให้คนรู้สึกสบาย การกำหนดสภาวะความสบายด้วยค่า PMV ส่วนใหญ่มักจะอยู่ในช่วง -2 ถึง +2 แต่ถ้าค่า PMV อยู่นอกช่วงดังกล่าว จะทำให้คนรู้สึกไม่สบายอย่างมาก ซึ่งมักจะกำหนดสภาวะที่นอกช่วงดังกล่าวด้วย ค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) จะเป็นค่าที่บอกถึงระดับเปอร์เซ็นต์ที่คนรู้สึกไม่สบาย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์

งานวิจัยของ Bjarne W. and W. Olesen

ในปี พ.ศ. 2544 Bjarne W. and Olesen [8] ได้ทำการวิจัยเพื่อแนะนำการเลือกและกำหนดเงื่อนไขสภาวะภายในอาคารให้เหมาะสมกับสภาวะความสบายของคนที่อาศัยภายในอาคารรูปแบบต่างๆ ได้แก่ อาคารสำนักงาน ภัตตาคาร และห้างสรรพสินค้า โดยได้แบ่งรูปแบบของสภาวะแวดล้อมออกเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน โดยได้กำหนดค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า และค่าการทำกิจกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ส่วนตารางที่ 2.2 จะแสดงถึงรูปแบบของสภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.1 โดยที่มีเงื่อนไขของค่า PPD และ PMV กำหนดไว้

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบอาคารของสภาวะสิ่งแวดล้อม 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 แสดงช่วงของค่า PPD และค่า 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

งานวิจัยของ J.F. Bush

ในปี พ.ศ. 2533 Bush [9] ได้ทำการศึกษาสภาวะความสบายของคนทำงานในสำนักงานที่มีระบบการปรับอากาศ และไม่มีระบบการปรับอากาศในกรุงเทพมหานครโดยการตรวจวัด ซึ่งใช้กลุ่มตัวอย่างประมาณ 1,100 คน โดยพบว่าสภาวะที่คนรู้สึกสบายในสำนักงานที่มีระบบปรับอากาศ และในสำนักงานที่ไม่มีระบบปรับอากาศในช่วงฤดูร้อนจะอยู่ที่ ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 clo ค่าอุณหภูมิอากาศภายในเฉลี่ยเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส และค่าความเร็วลมภายในห้องเท่ากับ 0.13 เมตรต่อวินาที และ 0.33 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

งานวิจัยของ Athienitis

ในปี พ.ศ. 2535 Athienitis [10] ได้ทำการวิจัยศึกษาหาผลกระทบของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่มีต่อสภาวะภายในห้อง โดยจะอธิบายผลกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายให้อยู่ในรูป ของค่า mean radiant temperature จากผลจากวิจัยพบว่าค่า mean radiant temperature ที่ได้จากการตรวจวัด และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่รังสีตรงแสงอาทิตย์ มีค่าเท่ากับ 430 W/m^2 จะทำให้ค่า mean radiant temperature ที่ได้จากการตรวจวัดและจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศภายในห้องเท่ากับ 4.3 องศาเซลเซียส และ 5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และผลของรังสีกระจายจะทำให้ค่า mean radiant temperature ที่ได้จากการตรวจวัดและจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิอากาศ ภายในห้องเท่ากับ 3.4 องศาเซลเซียส และ 4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

งานวิจัยของ Peter Lyons and Dariush Arasteh

ในปี พ.ศ. 2544 Lyons and Arasteh [11] ได้ทำการวิจัยศึกษาหาผลกระทบของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกที่มีผลต่อสภาวะความสบายของคนที่นั่งใกล้บริเวณหน้าต่างกระจก โดยได้แยกการวิเคราะห์ผลกระทบของหน้าต่างกระจกต่อความสบายอันเนื่องมาจากรังสีคลื่นยาว รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ และผลกระทบของความเร็วอากาศภายในห้อง โดยใช้แบบจำลองความสบายของ ASHRAE (two node model) ซึ่งคณะผู้วิจัยได้พบว่าผลกระทบจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามามีผลกระทบต่อความสบายของคน จะทำให้ค่า mean radiant temperature มีค่าสูงเกินช่วงที่จะสามารถใช้หรือคำนวณค่าความสบายของ Fanger [2] ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ใช้วิธีการ linearized เพื่อศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าการส่งผ่านความร้อน ผ่านหน้าต่างกระจก โดยสมการที่ใช้คือ

$$\frac{dPMV}{dq} = \frac{\partial PMV}{\partial MRT} \cdot \frac{\partial MRT}{\partial(\alpha f_p q)} \cdot \frac{\partial(\alpha f_p q)}{\partial q} \quad (2.3)$$

เมื่อ α = ค่าการดูดกลืนรังสีที่ผิวคน

f_p = ค่า project area factor (หาได้จากรูปที่ 3.5 ในบทที่ 3)

q = ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกและผ่านเข้ามากระทบที่ผิวคน
 W/m^2

บทที่ 3

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดและความรู้พื้นฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

วิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

วิธีการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามความยาวคลื่นแสง และมุมตกกระทบ

วิธีการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกตามวิธี ของโปรแกรม Window 4.1

วิธีการคำนวณค่าสภาวะความสบาย (Thermal comfort) ตามวิธีของ Fanger [2]

วิธีการคำนวณค่าปริมาณรังสีแสงอาทิตย์

3.1 วิธีการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก

ความร้อนที่ถูกส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในอาคารสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ซึ่งการถ่ายเทความร้อน 3 ลักษณะดังกล่าวนี้จะแบ่งเป็น การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยในสองลักษณะแรกจะเกิดเนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกและอุณหภูมิอากาศภายใน ส่วนลักษณะที่สาม จะเป็นการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวของหน้าต่างกระจกและสิ่งแวดล้อมที่อยู่โดยรอบ และเกิดจากการแผ่รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับหน้าต่างกระจกโดยตรง รวมทั้งเกิดจากการสะท้อนรังสีจากพื้นดินและสิ่งก่อสร้างหรืออาคารที่อยู่ใกล้เคียง โดยสมการพื้นฐานที่ใช้สำหรับคำนวณความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหัวข้อนี้อ้างอิงมาจาก บทที่ 29 ใน ASHRAE Handbook Fundamental 1997 [1] สำหรับสมการการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกต่อพื้นที่ชั่วขณะใดขณะหนึ่ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.1

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

เมื่อ q = อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกต่อหน่วยพื้นที่, W/m^2

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวม, $W/m^2 \cdot K$

t_{in} = อุณหภูมิอากาศภายในห้อง, $^{\circ}C$

t_{out} = อุณหภูมิอากาศภายนอก, $^{\circ}C$

$SHGC$ = Solar heat gain coefficient

I_t = รังสีรวมแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, W/m^2

โดยสมการที่ 3.1 สามารถเขียนแยกการคำนวณเป็นส่วนของรังสีตรงและรังสีกระจายแสงอาทิตย์ได้เป็นตามสมการที่ 3.2

$$q = SHGC_D(\theta) \cdot I_{Dir} + \langle SHGC \rangle_d \cdot I_{diff} + U \cdot (t_{out} - t_{in}) \quad (3.2)$$

เมื่อ $SHGC_D(\theta)$ = Direct Solar heat gain coefficient

$\langle SHGC \rangle_d$ = Diffuse Solar heat gain coefficient

I_{Dir} = รังสีตรงที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, W/m^2

I_{diff} = รังสีกระจายที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, W/m^2

θ = มุมตกกระทบ, Degree

จากสมการที่ 3.2 จะพบว่าสองเทอมแรกที่อยู่ทางด้านขวามือของสมการ เป็นความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกอันเนื่องมาจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และเทอมสุดท้ายเป็นความร้อนอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคาร

3.1.1 การคำนวณหาค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC)

เมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์ได้ตกกระทบกับหน้าต่างกระจก จะมีรังสีแสงอาทิตย์บางส่วนที่ตกกระทบและส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาโดยตรง และจะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจกและจะถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลังโดยอาศัยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาว ส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับออกไปข้างนอก ซึ่งขนาดของรังสีที่ถูกกักเก็บไว้ในเนื้อของหน้าต่างกระจกแล้วถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลังเรียกว่า ค่า Inward flowing fraction, N ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสภาวะของอากาศที่อยู่ล้อมรอบระหว่างด้านทั้งสองของ

หน้าต่างกระจก ดังนั้นค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ก็คือสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงส่วนของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกแล้วผ่านเข้ามาเข้ามาภายในห้องกลายเป็นความร้อนที่ได้รับ โดยเป็นส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามาโดยตรง และส่วนที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจกแล้วถ่ายเทความร้อนออกมาภายหลัง ดังนั้นค่า SHGC จึงเป็นคุณสมบัติใช้บอกลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแต่ละชนิด

ค่า SHGC ยังสามารถแบ่งออกเป็นค่า SHGC ในส่วนของค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์ โดยเขียนเป็น $SHGC_D(\theta)$ และค่า SHGC สำหรับค่ารังสีกระจาย โดยเขียนเป็น $\langle SHGC \rangle_d$ สำหรับค่า $SHGC_D(\theta)$ ในสมการที่ 3.2 เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ ซึ่งจะขึ้นกับมุมตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์นั้น สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.3

$$SHGC_D(\theta) = T_{1,L}(\theta) + \sum_{i=1,L} N_i A_i(\theta) \quad (3.3)$$

เมื่อ $T_{1,L}(\theta)$ = ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกจากชั้นที่ 1 ถึง L

A_i = ค่าการดูดกลืนรังสีของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i

N_i = ค่า Inward flowing fraction ของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i

L = จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก

สำหรับค่า $\langle SHGC \rangle_d$ เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากรังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.4

$$\langle SHGC \rangle_d = \int_0^{\pi/2} SHGC_D(\theta) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (3.4)$$

โดยทั่วไปแล้ว การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จะรวมส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านเข้าไปไม่ได้ (opaque element) คือ ส่วนกรอบกระจก (frame) และส่วนของลูกฟูกั้นกระจก (divider) เข้าไปด้วย แล้วใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของส่วนต่างๆของหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.5

$$SHGC = \frac{SHGC_g A_g + SHGC_f A_f + \sum_{i=1}^M A_i SHGC_i}{A_g + A_f + \sum_{i=1}^M A_i} \quad (3.5)$$

เมื่อ $SHGC_f$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนกรอบหน้าต่างกระจก (frame)

$SHGC_g$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนที่เป็นกระจก

$SHGC_i$ = ค่า solar heat gain coefficient ของส่วนของ divider

โดยค่า SHGC ในส่วนของกรอบกระจกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.6

$$SHGC_f = \alpha_f^s \left(\frac{U_f}{h_f} \right) \left(\frac{A_f}{A_{surf}} \right) \quad (3.6)$$

เมื่อ α_f^s = ค่าการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวภายนอกของกรอบกระจก

U_f = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมของกรอบกระจก

h_f = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม (การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน) ระหว่างกรอบกระจกและสิ่งแวดล้อม

$\frac{A_f}{A_{surf}}$ = ค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ฉายภาพ (projected area) ต่อพื้นที่ผิวของกรอบ
จริง

และ $SHGC_i$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.7

$$SHGC_i = \alpha_i^s \left(\frac{U_i}{h_i} \right) \left(\frac{A_i}{A_{surf,i}} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่ $h_f = h_{conv} + 4\sigma\epsilon_f t_o^3$

เมื่อ h_f = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวของกรอบกระจก หรือ divider กับ
สิ่งแวดล้อมภายนอก, W/m^2

ϵ_f = ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของกรอบกระจก หรือ divider ที่ผิวด้านนอก

t_o = อุณหภูมิภายนอก, $^{\circ}C$

$$\sigma = \text{ค่าคงที่ Stefan-Boltzman } 5.67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

3.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, U

การหาค่าความร้อนที่ผ่านหน้าต่างกระจกทุกส่วน สามารถคำนวณได้โดยแยกการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนออกเป็นในแต่ละส่วนได้แก่ ส่วนกลางกระจก (center of glass) ส่วนขอบกระจก (edge of glass) และส่วนกรอบกระจก (frame) โดยนำค่าของทุกส่วนมารวมกันแล้วใช้วิธีถ่วงน้ำหนักด้วยพื้นที่ของแต่ละส่วน ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.8

$$U = \frac{U_{cg} A_{cg} + U_{eg} A_{eg} + U_f A_f}{A_{pf}} \quad (3.8)$$

โดยที่ c_g หมายถึง ส่วนของตรงกลางกระจก

e_g หมายถึง ส่วนขอบกระจก

f หมายถึง ส่วนของกรอบหน้าต่าง

3.1.3 แฟคเตอร์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวมของส่วนกลางกระจก (Center-of-Glass U factor)

สำหรับการคำนวณค่า U ของกลางกระจก สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.9

$$U_{cg} = \frac{1}{1/h_o + \sum_{i=1}^{M-1} (1/h_s)_i + \sum_{i=1}^{M-1} (d_i/k_i) + 1/h_i} \quad (3.9)$$

เมื่อ h_o, h_i = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอกและผิวภายใน, W/m^2

h_s = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมของก๊าซที่อยู่ระหว่างชั้นของกระจก, W/m^2

d = ความหนาของกระจก, m

k = ค่า Thermal Conductivity, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$

3.1.4 แฟคเตอร์สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยรวมของส่วนขอบกระจก (Edge of glass U factor)

สำหรับหน้าต่างที่มีกระจกหลายชั้นจะมี Spacer เป็นตัวแยกระหว่างชั้นของกระจก โดยส่วนมากจะทำมาจากอลูมิเนียมที่มีค่าการนำความร้อนสูง ซึ่งจะช่วยให้มีการนำความร้อนไปที่

บริเวณขอบของกระจกด้วย จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณดังกล่าวเป็นแบบ 2 มิติ ซึ่งสมการสำหรับคำนวณหาค่า U-factor ที่บริเวณขอบกระจกสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.10

$$U_{eg} = A + BU_{cg} + CU_{cg}^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ A , B และ C เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พหุนามของ Edge of glass U-factor

ชนิดของวัสดุ	A	B	C
โลหะ	0.223	0.842	-0.153
ฉนวน	0.120	0.682	0.244
กระจก	0.158	0.774	0.057
โลหะ+ฉนวน	0.135	0.706	0.187

3.1.5 ค่าแฟคเตอร์สัมประสิทธิ์ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยรวมของกรอบกระจก (Frame U-factor)

ส่วนประกอบของกรอบหน้าต่างจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลายส่วนด้วยกัน ซึ่งในแต่ละส่วนประกอบนั้นจะมีลักษณะของรูปร่างที่ซับซ้อนและชนิดของวัสดุที่หลากหลายและลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 2 มิติจึงทำให้ยากต่อการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการหาค่า U-factor ของส่วนที่เป็นกรอบกระจกสามารถคำนวณหาได้โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ THERM 2.0

3.1.6 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอกและผิวภายใน

สำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวภายนอก (h_o) และที่ผิวภายใน (h_i) จะเกิดจากผลของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปแล้วสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม ที่ผิวภายนอกจะขึ้นอยู่กับความเร็วลมและตำแหน่งของอาคาร และสำหรับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายในจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในและอุณหภูมิที่ผิวกระจก รวมทั้งค่าการเปล่งรังสีที่ผิวชั้นในของกระจก สำหรับสมการที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่ผิวหน้าต่างกระจกภายนอกและภายในสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ

$$h_o = 5.7 + 3.8 \cdot V \quad (3.11)$$

$$h_i = 1.77(t_{gi} - t_i)^{0.25} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (t_{gi}^4 - t_i^4) / (t_{gi} - t_i) \quad (3.12)$$

เมื่อ t_{gi} = อุณหภูมิผิวกระจกด้านใน °C

t_i = อุณหภูมิอากาศด้านใน °C

ε = ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวกระจกด้านใน

σ = ค่าคงที่ Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

V = ค่าความเร็วลมภายนอก ,m/s

3.1.7 การหาค่า Inward Flowing Fraction (N)

สำหรับส่วนของรังสีแสงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจก ซึ่งประกอบด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ต รังสีที่มองเห็นได้ และรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะมีผลทำให้กระจกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และความร้อนที่สะสมไว้นั้น บางส่วนจะถูกกระจายออกไปข้างนอกอาคารโดยกระบวนการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน และส่วนที่เหลือจะถูกส่งผ่านเข้ามายังภายในอาคารและกลายเป็นความร้อน ซึ่งปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้ามานั้นเรียกว่า ค่า Inward flowing fraction, N ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของอากาศที่ผิวทั้งสองด้านของกระจก รวมทั้งก๊าซที่บรรจุอยู่ระหว่างชั้นของกระจกในกรณีของหน้าต่างกระจกหลายชั้น สำหรับสมการที่ใช้หาค่าของ Inward Flowing Fraction สามารถหาได้ตามสมการที่ 3.13 ถึง 3.18

สำหรับกระจก 1 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_i}} \quad (3.13)$$

สำหรับกระจก 2 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.14)$$

$$N_2 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_2/2}{k_2}\right)}{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1}{k_1}\right) + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.15)$$

สำหรับกระจก 3 ชั้น

$$N_1 = \frac{\frac{1}{h_o} + \left(\frac{d_1/2}{k_1}\right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.16)$$

$$N_2 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_2/2}{k_2}\right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.17)$$

$$N_3 = \frac{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \left(\frac{d_3/2}{k_3}\right)}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{1}{h_s} + \frac{d_3}{k_3} + \frac{1}{h_i}} \quad (3.18)$$

3.2 การคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก

3.2.1 กระจกชนิดไม่เคลือบ (uncoated glass)

การหาคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดไม่เคลือบ ได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก (Transmittance) ค่าการสะท้อนรังสีของกระจก (Refectance) และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก (Absorbance) ที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง และมุมตกกระทบ จำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉากกับกระจก ($\theta = 0^\circ$) โดยทั่วไปแล้วค่าดังกล่าวจะทราบได้โดยข้อมูลจากการตรวจวัดของผู้ผลิตกระจก สำหรับกระจกชนิดไม่เคลือบ โดยทั่วไปจะมีลักษณะของเนื้อกระจกเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous glass) ซึ่งจะมีคุณสมบัติทางคลื่นแสงที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังกระจกเท่ากัน ได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก ($T^f = T^b$) ค่า

การสะท้อนรังสีของกระจก ($R^f = R^b$) และ ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก ($A^f = A^b$) สำหรับสมการที่ใช้หาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดไม่เคลือบอ้างอิงจาก Fuller [5] โดยสามารถคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดนี้ที่แปรตามมุมตกกระทบได้ตามสมการที่ 3.19 และ 3.20

$$T_\lambda(\theta) = \frac{\tau_\lambda(\theta)^2 e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}}{1 - \rho_\lambda(\theta)^2 e^{-2\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}} \quad (3.19)$$

$$R_\lambda(\theta) = \rho_\lambda(\theta) \cdot (1 + T_\lambda(\theta) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot d / \cos \phi}) \quad (3.20)$$

เมื่อ T = ค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก

R = ค่าการสะท้อนของกระจก

τ = ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmittivity)

ρ = ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflectivity)

θ = มุมตกกระทบ , Degree

ϕ = มุมหักเหของแสง, Degree

λ = ความยาวคลื่น , nm

α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Absorbion coefficient)

d = ความหนาของกระจก , mm

ในการหาค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก และค่าการสะท้อนรังสีของกระจก ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.19 และ 3.20 นั้น จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงและมุมตกกระทบโดยหาได้จากสมการที่ 3.21

$$\rho(\theta, \lambda) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_\lambda \cos \theta - \cos \phi}{n_\lambda \cos \theta + \cos \phi} \right)^2 + \left(\frac{n_\lambda \cos \phi - \cos \theta}{n_\lambda \cos \phi + \cos \theta} \right)^2 \right] \quad (3.21)$$

เมื่อ n_λ = ดัชนีการหักเหของแสง (Index of refraction)

และความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมของการหักเหของรังสีสามารถหาได้โดยสมการที่ 3.22

$$\sin \theta = n_\lambda \cdot \sin \phi \quad (3.22)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากสมการที่ 3.21 โดยสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.23

$$\tau_\lambda(\theta) = 1 - \rho_\lambda(\theta) \quad (3.23)$$

ในการคำนวณค่าการส่งผ่านรังสีของกระจก และการสะท้อนรังสีของกระจก ในสมการที่ 3.19 และ 3.20 นั้น จำเป็นต้องทราบค่า n_λ และ α_λ ซึ่งสามารถหาค่าดัชนีของการหักเหของแสงได้โดยแทนค่ามุมตกกระทบที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) ในสมการที่ 3.21 แล้วแก้สมการจะได้เป็นสมการที่ 3.24

$$n_\lambda = \frac{1 + \sqrt{\rho_\lambda(0)}}{1 - \sqrt{\rho_\lambda(0)}} \quad (3.24)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α_λ) สามารถคำนวณได้จากการแก้สมการที่ 3.19 , 3.20 และ 3.21 โดยแทนค่ามุมตกกระทบที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) จะได้ตามสมการที่ 3.25

$$\alpha_\lambda = -\frac{1}{d} \ln \left(\frac{R_\lambda(0) - \rho_\lambda(0)}{\rho_\lambda(0) \cdot T_\lambda(0)} \right) \quad (3.25)$$

และเพื่อที่จะสามารถแก้สมการที่ 3.24 และ 3.25 ได้ จำเป็นต้องหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) โดยการใช้สมการที่ 3.19 และ 3.20 จะได้เป็นสมการที่ 3.26

$$\rho_\lambda(0) = \frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2 - R_\lambda(0)) \cdot R_\lambda(0)}}{2(2 - R_\lambda(0))} \quad (3.26)$$

เมื่อ

$$\beta = T_\lambda(0)^2 - R_\lambda(0)^2 + 2R_\lambda(0) + 1 \quad (3.27)$$

โดยที่ค่า $T_\lambda(0)$ และ $R_\lambda(0)$ เป็นข้อมูลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่งตั้งฉากของผู้ผลิตกระจก แต่ในกรณีที่ไม่มีความยาวคลื่นแสง จะใช้ค่าความยาวคลื่น

แสงเฉลี่ยในแต่ละช่วง โดยในช่วงของ Solar spectrum จะใช้ $\lambda = 898$ นาโนเมตร และในช่วงของ Visible spectrum จะใช้ $\lambda = 575$ นาโนเมตร

3.2.2 กระจกชนิดเคลือบ (coated glass)

การหาคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบจะมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของสารที่เคลือบผิวจะทำให้ลักษณะของการสะท้อนรังสีภายในเนื้อกระจกเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาหลายครั้ง ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้ข้อมูลของการตรวจวัดเพิ่มเติมจากข้อมูลที่ได้ในตำแหน่งตั้งฉากเพียงอย่างเดียว แต่เครื่องมือและขั้นตอนของการตรวจวัดยังไม่ได้จัดทำเป็นรูปแบบมาตรฐาน ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าแบบสมการเส้นถดถอยพหุนามกำลังสี่ของ Finlayson [6] ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยจะใช้ข้อมูลการตรวจวัดของค่าการส่งผ่านรังสีที่ตำแหน่งตั้งฉากในการพิจารณา โดยเงื่อนไขของ Finlayson จะกำหนดไว้ว่า ถ้าค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($T(0)$) มีค่ามากกว่า 0.645 กระจกชนิดนั้นจะใช้แบบจำลองของกระจกใสสำหรับการคำนวณ แต่ถ้ากระจกมีค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.645 กระจกชนิดนั้นจะใช้แบบจำลองของกระจก Bronze glass คำนวณ ซึ่งแบบจำลองการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ($\tau(\theta)$) และสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($\rho(\theta)$) ที่แปรตามมุมตกกระทบสำหรับกระจกใสและกระจก Bronze glass สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.28 และสมการที่ 3.29

$$\bar{\tau}(\theta) = \bar{\tau}_0 + \bar{\tau}_1 \cos(\theta) + \bar{\tau}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\tau}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\tau}_4 \cos^4(\theta) \quad (3.28)$$

$$\bar{\rho}(\theta) = \bar{\rho}_0 + \bar{\rho}_1 \cos(\theta) + \bar{\rho}_2 \cos^2(\theta) + \bar{\rho}_3 \cos^3(\theta) + \bar{\rho}_4 \cos^4(\theta) - \bar{\tau}(\theta) \quad (3.29)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์พหุนาม (polynomial coefficient) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่อยู่ทางด้านขวามือในสมการที่ 3.28 และ 3.29 ที่ได้จากการวิจัยของ Finlayson[6] นั้น สามารถแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์พหุนามจากสมการที่ 3.28 และ 3.29

คุณสมบัติ	ตัวห้อย 0	ตัวห้อย 1	ตัวห้อย 2	ตัวห้อย 3	ตัวห้อย 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
$\bar{\tau}_{brn}^{**}$	-0.002	2.813	-2.341	-0.05725	0.599
$\bar{\rho}_{brn}$	0.997	-1.868	6.513	-7.862	3.225

* สัมประสิทธิ์ตัวห้อย clr หมายถึงคุณสมบัติที่ใช้แบบจำลองของกระจกชนิด clear glass

** สัมประสิทธิ์ตัวห้อย brn หมายถึงคุณสมบัติที่ใช้แบบจำลองของกระจกชนิด bronze glass

ดังนั้น ค่าการส่งผ่านรังสี และค่าการสะท้อนรังสีของกระจกเคลือบสีที่แปรตามมุมตกกระทบต่างๆสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.30 ถึง 3.33

สำหรับกรณี $T(0) > 0.645$

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{clr}(\theta) \quad (3.30)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{clr}(\theta)) + \bar{\rho}_{clr}(\theta) \quad (3.31)$$

สำหรับกรณี $T(0) \leq 0.645$

$$T(\theta) = T(0) \times \bar{\tau}_{brn}(\theta) \quad (3.32)$$

$$R(\theta) = R(0) \times (1 - \bar{\rho}_{brn}(\theta)) + \bar{\rho}_{brn}(\theta) \quad (3.33)$$

3.2.3 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงครึ่งทรงกลม (hemispherical Values, P_{Ω})

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกในช่วงครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัมซึ่งเป็นค่าอัตราคุณสมบัติทางเชิงแสงในทุกทิศทางต่อความยาวคลื่นหนึ่งหน่วย ก็เพื่อที่จะนำค่าดัง

กล่าวไปใช้สำหรับการคำนวณค่าในส่วนของรังสีกระจายที่ผ่านหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.34

$$P_{\perp} = 2 \int_0^{90^{\circ}} P(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (3.34)$$

เมื่อ P = คุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจก

θ = มุมตกกระทบของรังสีที่วัดจากระนาบแนวนอน ($\theta = 0$ องศา) จนถึงระนาบแนวตั้ง ($\theta = 90$ องศา)

3.2.4 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกหลายชั้น

การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกหลายชั้นที่แปรตามความยาวคลื่นแสงและมุมตกกระทบ สามารถคำนวณได้ โดยใช้การคำนวณตามวิธีการของ Rubin [12] ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ 3.35 ถึง 3.37

$$T_{i,j}(\lambda) = \frac{T_{i,j-1}(\lambda) \Gamma_{j,j}(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.35)$$

$$R_{i,j}^f(\lambda) = R_{i,j-1}^f(\lambda) + \frac{T_{i,j-1}^2(\lambda) \cdot R_{j,j}^f(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.36)$$

$$R_{j,i}^b(\lambda) = R_{i,j-1}^b(\lambda) + \frac{T_{i,j-1}^2(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)}{1 - R_{j,j}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,i}^b(\lambda)} \quad (3.37)$$

เมื่อ $T_{i,j}$ = ค่าการส่งผ่านรังสีจากกระจกชั้นที่ i ถึงกระจกชั้นที่ j

$R_{i,j}$ = ค่าการสะท้อนรังสีจากกระจกชั้นที่ i ถึงกระจกชั้นที่ j

และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก (A_j) แต่ละชั้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.38 ถึง 3.40

$$A_j(\lambda) = \frac{T_{1,j-1}(\lambda) \cdot A_j^f(\lambda)}{1 - R_{j,N}^f(\lambda) \cdot R_{j-1,1}^b(\lambda)} + \frac{T_{1,j}(\lambda) \cdot R_{j+1,N}^f(\lambda) \cdot A_j^b(\lambda)}{1 - R_{j,1}^b(\lambda) \cdot R_{j+1,N}^f(\lambda)} \quad (3.38)$$

$$A_j^f(\lambda) = 1 - T_{j,j}(\lambda) - R_{j,j}^f(\lambda) \quad (3.39)$$

$$A_j^b(\lambda) = 1 - T_{j,j}(\lambda) - R_{j,j}^b(\lambda) \quad (3.40)$$

เมื่อ $i, j =$ กระจกชั้นที่ i หรือ ชั้นที่ j

$f =$ คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหน้าของกระจก

$b =$ คุณสมบัติที่ตำแหน่งผิวด้านหลังของกระจก

$N =$ จำนวนชั้นของกระจก

3.2.4 การคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical รวม

การหาคุณสมบัติทาง optical รวม (Total) ของกระจก ในแต่ละช่วงคลื่นแสง เป็นการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ในแต่ละช่วงคลื่นแสงเฉลี่ยด้วย spectral weighting function ของแต่ละความยาวของช่วงคลื่นนั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.41

$$P_x = \frac{\int_a^b P(\lambda) \cdot \Phi_x(\lambda) \cdot \Gamma_x(\lambda) d\lambda}{\int_a^b \Phi_x(\lambda) \cdot \Gamma_x(\lambda) d\lambda} \quad (3.41)$$

เมื่อ $P =$ คุณสมบัติทาง optical รวมที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงในแต่ละช่วงคลื่น

$\Phi =$ Spectral weighting function

$\Gamma =$ Auxiliary function

$a =$ เขตจำกัดล่างของการอินทิเกรตในแต่ละช่วงคลื่น

$b =$ เขตจำกัดบนของการอินทิเกรตในแต่ละช่วงคลื่น

x ใช้แสดงช่วงของการเฉลี่ยว่าอยู่ในช่วง visible, solar หรือ infrared

สำหรับค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณในแต่ละช่วงคลื่นสามารถหาได้จากตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกในช่วงคลื่นแสงต่างๆ

X	P	a	b	Φ_x	Γ_x
ช่วงการอินทิเกรต	คุณสมบัติ	เขตจำกัดล่าง ของช่วงคลื่น (ไมครอน)	เขตจำกัดบน ของช่วงคลื่น (ไมครอน)	Weighting Function	Auxiliary Function
Solar	T,R,A	0.32	2.5	[ISO 9845 ASTM 891] ¹	1.0
Visible	T,R	0.32	0.78	[ISO 9845 ASTM 891]	[ISO/CIE 10527] ²
Thermal	T,R	5.0	50.0	Planck's Function**	1.0

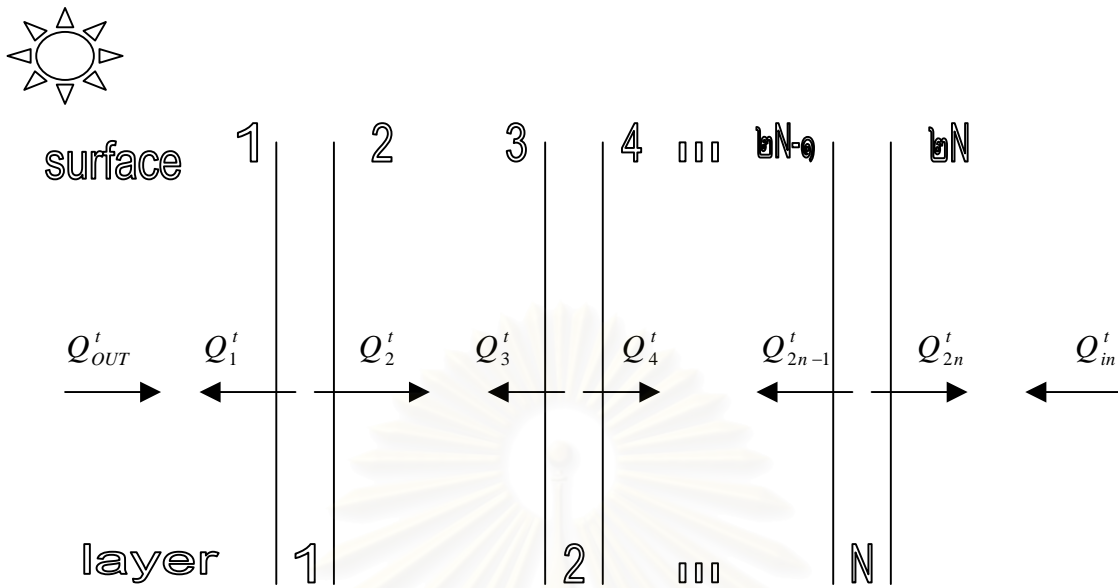
1. ค่า Solar weighting function จากมาตรฐาน ASTM E-891 ปี ค.ศ.1987 [13] ,ตารางที่ 1 โดยใช้ค่ามวลอากาศเท่ากับ 1.5
2. ค่า Auxiliary function จากมาตรฐาน CIE ปี ค.ศ. 1990 [14] ,ตารางที่ 1

** Planck's Function : $E(\lambda) = 2\pi c_1 \lambda^{-5} (\exp(c_2 / \lambda\theta) - 1)^{-1}$

เมื่อ $c_1 = 0.59544 \times 10^8 W\mu m^4 / m^2$, $c_2 = 14388 \mu m \cdot K$ และ $\theta = 300 K$

3.3 วิธีการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกตามวิธี Window 4.1

การหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของหน้าต่างกระจกสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธีการสมดุลความร้อนในแต่ละชั้นของกระจก ใน 1 มิติ ของ Finlayson [6] โดยจะกำหนดสถานะแวดล้อมให้มีค่าคงที่ในช่วงเวลาที่พิจารณา และกำหนดให้เป็นสถานะคงตัว (steady state) ซึ่งจะแบ่งชั้นกระจกเป็นจุดต่อเชื่อมกัน โดยในแต่ละชั้นของกระจกจะประกอบไปด้วย 3 จุดต่อ คือที่ผิวแต่ละด้านและบริเวณจุดตรงกลางของกระจก ซึ่งแสดงลักษณะการสมดุลความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกที่จุดต่อต่างๆ ไว้ในรูปแบบที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 แสดงการสมดุลความร้อนของหน้าต่างกระจกจำนวน N ชั้น

เมื่อ Q' เป็นค่าการถ่ายเทความร้อนรวม (การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อน) ที่แต่ละผิวของกระจก ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.42

$$Q' = Q^c + Q^r + Q^k \quad (3.42)$$

เมื่อ Q^c = ค่าการพาความร้อนต่อพื้นที่, W/m^2

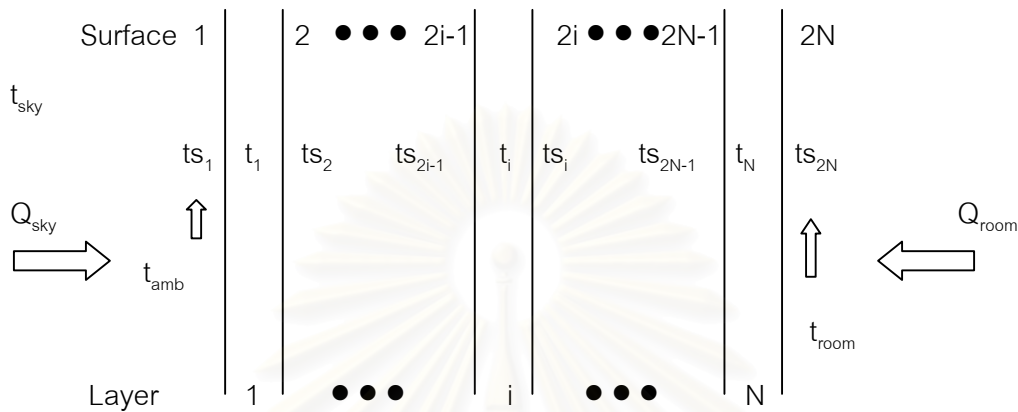
Q^r = ค่าการแผ่รังสีความร้อนต่อพื้นที่, W/m^2

Q^k = ค่าการนำความร้อนต่อพื้นที่, W/m^2

จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนสมการการสมดุลความร้อนในแต่ละชั้นของกระจกได้ โดยกำหนดให้ความร้อนที่ไหลออกมีค่าเป็นบวก และความร้อนที่ไหลเข้ามีค่าเป็นลบ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.43

$$0 = Q_{2n-1}^r + Q_{2n}^r - Q_{2n-2}^r - Q_{2n+1}^r + Q_{2n-1}^c + Q_{2n}^c - Q_{2n-2}^c - Q_{2n+1}^c + Q_{2n-1}^k + Q_n^k - Q_{n+1}^k - A_n \cdot Q_{sky} \quad (3.43)$$

โดยสัญลักษณ์ด้วย r, c, k ใช้แทน การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อน และการนำความร้อนตามลำดับ และ n ใช้แทนจำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก A ใช้แทนค่าการดูดกลืนรังสีของกระจก และ Q_{sky} เป็นรังสีที่ตกกระทบผนังกระจก



รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของจุดต่อต่างๆ ของอุณหภูมิต่างๆ และค่า heat flux ซึ่งใช้หาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของกระจก

จากรูปที่ 3.2 ที่บริเวณด้านนอกของกระจกจะมีฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนมาจากด้านนอกคือ Q_{sky} ซึ่งเป็นค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบและมีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวด้านในคือ Q_{room} โดยที่บริเวณผิวด้านนอกของกระจก จะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยบังคับและส่วนที่บริเวณผิวด้านในของกระจกจะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ และสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จะกำหนดให้สถานะของสิ่งแวดล้อมมีค่าคงที่ และเป็นสถานะสม่ำเสมอ (steady state) ซึ่งจะทำให้ผลรวมของความร้อนที่จุดต่อใดๆ มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ 3.43 ในอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิได้ตามสมการที่ 3.44

$$Q_i = \frac{(t_i - t_{i-1})}{R_i} + \frac{(t_i - t_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs_i} = 0 \quad (3.43)$$

เมื่อ

t_i = อุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของชั้นกระจกที่ i

R_i = thermal resistance ระหว่างจุดกึ่งกลางทั้งสอง โดยรวมผลของการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

โดยที่ $Q_{abs_i} = A_i^{sol} Q_{sky}$
 Q_{abs_i} = ปริมาณของฟลักซ์ความร้อนที่ตกกระทบและถูกดูดกลืนโดยชั้นของกระจก
 ,W/m²

A_i^{sol} = ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ของกระจกชั้นที่ i

สำหรับขั้นตอนแรกในการแก้สมการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจก จำเป็นต้องสมมุติค่าเริ่มของอุณหภูมิที่กึ่งกลางและที่ผิวของกระจกทั้งสองด้าน โดยให้ค่าการกระจายของอุณหภูมิกระจกมีลักษณะเชิงเส้นโดยเริ่มต้นจากจุดอุณหภูมิด้านนอกจนถึงอุณหภูมิด้านใน หลังจากนั้นทำการสมดุลความร้อนในส่วนของการแผ่รังสีความร้อน (Q_i^r) ระหว่างผิวของหน้าต่างกระจกในแต่ละชั้น ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.45 และ 3.46

$$Q_{2n}^r = S_{2n}^r + R_{2n} Q_{2n+1}^r + T_n Q_{2n-2}^r \quad (3.45)$$

$$Q_{2n-1}^r = S_{2n-1}^r + R_{2n-1} Q_{2n-2}^r + T_n Q_{2n+1}^r \quad (3.46)$$

โดยที่ S^r = พลังงานความร้อนที่เปล่งรังสีคลื่นยาวจากผิวกระจก

$$= \sigma \cdot \varepsilon \cdot t_s^4$$

R = ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนของผิวหน้าต่างกระจกที่ i

T = ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนของหน้าต่างกระจกชั้นที่ i

จากสมการ ที่ 3.45 และ 3.46 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ทาง matrix ขนาด 2N×2N ได้ตามสมการที่ 3.47

$$M_{ij} Q_i^r = Y_j \quad (3.47)$$

เมื่อ

$$M_{ij} = 1$$

$$M_{2i-1,2i-2} = -R_{i,i}^f$$

$$M_{2i-1,2i+1} = M_{2i,2i-2} = -T_{i,i}$$

$$M_{2i,2i+1} = -R_{i,i}^b \quad (3.48)$$

และ

$$Y_1 = \sigma \varepsilon_1 t_{s1}^4 + R_{1,1}^f Q_{sky}^r$$

$$Y_2 = \sigma \varepsilon_1 t_{s2}^4 + T_{1,1} Q_{sky}^r$$

$$\begin{aligned}
Y_{2i-1} &= \sigma \varepsilon_{2i-1} t_{s\ 2i-1}^4 \\
Y_{2i} &= \sigma \varepsilon_{2i} t_{s\ 2i}^4 \\
Y_{2N-1} &= \sigma \varepsilon_{2N-1} t_{s\ 2N-1}^4 + T_{N,N} Q_{room}^r \\
Y_{2N} &= \sigma \varepsilon_{2N} t_{s\ 2N}^4 + R_{N,N}^b Q_{room}^r
\end{aligned} \tag{3.49}$$

โดยที่

$$Q_{sky}^r = \sigma \varepsilon_{sky} t_{sky}^4 \tag{3.50}$$

$$Q_{room}^r = \sigma t_{room}^4 \tag{3.51}$$

ดังนั้นสามารถหาคำตอบของ Q_i^r ได้โดยนำค่า $M_{i,i}^{-1}$ คูณสมการที่ 3.47 จะได้ตามสมการที่ 3.52

$$Q_i^r = (M_{ij})^{-1} Y_j \tag{3.52}$$

3.3.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

เมื่อแก้สมการที่ (3.52) แล้วก็จะได้ค่าความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีของผิวกระจก Q_i^r ที่คำนวณได้ไปคำนวณหาค่าของสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ผิวภายนอกและภายใน รวมทั้งที่บริเวณ gaps โดยนำค่าแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิผิวกระจกและค่าอุณหภูมิอากาศไปหาร ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.53 ถึง 3.55

$$hr_{out} = (Q_{sky}^r - Q_1^r) / (t_{sky} - t_{s1}) \tag{3.53}$$

$$hr_{in} = (Q_{2N}^r - Q_{room}^r) / (t_{s\ 2N} - t_{room}) \tag{3.54}$$

$$hr_{gap_i} = (Q_{2i}^r - Q_{2i+1}^r) / (t_{s\ 2i} - t_{s\ 2i+1}) \tag{3.55}$$

3.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายใน (h_{in})

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายในจะเป็นลักษณะของการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวของผนังภายในและอุณหภูมิของอากาศในห้อง รวมทั้งลักษณะการเอียงตัวของกระจก ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Arasteh [4] ตามสมการที่ 3.56

$$h_{in} = 1.77 \cdot (t_{s\ 2N} - t_{room})^{0.25} \tag{3.56}$$

สำหรับค่า h_{in} ที่มุมเอียงใด 90° 45° และ 0° สามารถหาได้จากตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและผิวกระจกที่แปรตามการเอียงตัวของกระจก

ϕ	$h_{in} (W / m^2 K)$
90	3.0415502
45	2.2477496
0	0.943649

3.3.3 การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายนอก (h_{out})

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวภายนอกจะขึ้นกับความเร็วมวลและทิศทางของลมเมื่อเทียบกับการวางตัวของหน้าต่างกระจก ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Arasteh [4] ตามสมการที่ 3.57 ถึง 3.59

สำหรับด้านหน้าของอาคาร ($|\phi < \pi / 2|$)

$$\text{เมื่อ } v > 2 \text{ m/s} \quad h_{out} = 8.07v^{0.605} \quad (3.57)$$

$$\text{เมื่อ } v < 2 \text{ m/s} \quad h_{out} = 12.27 \quad (3.58)$$

เมื่อ $V =$ ความเร็วมวลภายนอก, m/s

สำหรับด้านหลังอาคาร ($|\phi \geq \pi / 2|$)

$$h_{out} = 18.64(0.3 + 0.05v)^{0.605} \quad (3.59)$$

3.3.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ช่องว่างอากาศระหว่างชั้นหน้าต่างกระจก (gaps)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ gaps จะรวมผลของการนำและการพาความร้อน ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.60

$$h_s = k \cdot Nu / \omega \quad (3.60)$$

เมื่อ

$k =$ ค่า thermal conductivity ของก๊าซที่อยู่ภายใน gap , W/m·K

$\omega =$ ความกว้างของ gap, m

$Nu =$ ค่า Nusselt number

โดยที่

$$Nu = \left[1 + (0.0303 Ra^{0.402})^{11} \right]^{0.091} \quad \text{สำหรับ } Ra < 2 \times 10^5 \quad (3.61)$$

Ra = ค่า Rayleigh number ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.62

เป็นผลคูณระหว่าง ค่า และ

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (3.62)$$

เมื่อ

Pr = ค่า Prandtl number

Gr = ค่า Grashoff number

$$\text{โดยที่ } Gr = \frac{g\beta\rho^2\omega^3\Delta t}{\mu^2} \quad (3.63)$$

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก 9.81 m/s^2

μ = ค่าสัมประสิทธิ์หนืดจลน์ของก๊าซ, $\text{kg}\cdot\text{m/s}$

β = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของก๊าซเชิงความร้อน, $1/\text{K}$

ρ = ค่าความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

Δt = ค่าอุณหภูมิผิวกระจกแตกต่างกันระหว่างชั้นกระจก, K

สำหรับค่าของ Nusselt number ที่มุมเอียงใดๆ หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Elsherbiny [15] ตามสมการที่ 3.64

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \phi} \right] \cdot \left(1 - \frac{(\sin 1.8\phi)^{1.6} 1708}{Ra \cos \phi} \right) + \left[\left(\frac{Ra \cos \phi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (3.64)$$

เมื่อ ϕ = มุมการเอียงตัวของหน้าต่างกระจก, Degree

3.3.5 การคำนวณหาความต้านทานความร้อนที่ผิวภายนอกภายใน และที่ช่องอากาศระหว่างชั้นกระจก

ความต้านทานความร้อนที่ผิวจะประกอบด้วย 3 ลักษณะด้วยกันคือ ความต้านทานที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอก ความต้านทานความร้อนที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายใน และความต้านทานความร้อนที่สัมผัสกับก๊าซที่อยู่ภายใน gap

สำหรับผิวที่ 1 ของกระจกชั้นที่ 1 ซึ่งสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายนอก สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ตามสมการที่ 3.65 ถึง 3.67

$$Rh_1 = 1 / (hc_{out} + hr_{out}) \quad (3.65)$$

$$Rk_1 = 0.5w_1 / k_1 \quad (3.66)$$

$$R_1 = Rh_{out} + Rk_{out} \quad (3.67)$$

เมื่อ hc_{out} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอก, $W/m^2 \cdot K$

hr_{out} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนภายนอก, $W/m^2 \cdot K$

Rh_1 = สัมประสิทธิ์การต้านทานการพาความร้อนรวมภายนอก, $m^2 \cdot K/W$

Rk_1 = สัมประสิทธิ์การต้านทานการนำความร้อนรวมภายนอก, $m^2 \cdot K/W$

สำหรับผิวที่ 2N ของกระจกชั้นที่ N ซึ่งสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมภายใน สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ตามสมการที่ 3.68 ถึง 3.70

$$Rh_N = 1 / (hc_{in} + hr_{in}) \quad (3.68)$$

$$Rk_N = 0.5w_{in} / k_{in} \quad (3.69)$$

$$R_N = Rh_{in} + Rk_{in} \quad (3.70)$$

เมื่อ hc_{in} = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายใน, $W/m^2 \cdot K$

hr_{in} = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนภายใน, $W/m^2 \cdot K$

Rh_N = สัมประสิทธิ์การต้านทานการพาความร้อนรวมภายใน, $m^2 \cdot K/W$

Rk_N = สัมประสิทธิ์การต้านทานการนำความร้อนรวมภายใน, $m^2 \cdot K/W$

สำหรับสภาวะแวดล้อมภายใน gap สามารถหาความต้านทานความร้อนได้ใช้สมการที่ 3.71 ถึง 3.73

$$Rh_i = 1 / (hc_{gap_i} + hr_{gap_i}) \quad (3.71)$$

$$Rk_i = 0.5w_i / k_i + w_{i+1} / k_{i+1} \quad (3.72)$$

$$R_i = Rh_{gap_i} + Rk_{gap_i} \quad (3.73)$$

เมื่อทำการหาค่าความต้านทานความร้อนระหว่างจุดของกึ่งกลางกระจกทั้งหมดได้แล้ว นำค่าดังกล่าวและค่าอุณหภูมิเริ่มต้น รวมทั้งค่า Q_{abs_i} ในแต่ละชั้นของกระจกไปแทนลงในสมการที่ 3.43 ก็จะได้ค่า Δ_i ซึ่งเรียกว่า residual ซึ่งได้จากสมการที่ 3.74

$$\Delta_i = \frac{(t_i - t_{i-1})}{R_i} + \frac{(t_i - t_{i+1})}{R_{i+1}} - Q_{abs_i} \quad (3.74)$$

โดยค่า Δ_i ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละชั้นของกระจกมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์ จะถือว่าเป็นจุดที่มีการสมดุลความร้อนเกิดขึ้น แต่ถ้ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าศูนย์ก็จะถือว่ายังไม่มี การสมดุลความร้อน

3.3.6 การคำนวณอุณหภูมิผิวกระจก (t_s)

อุณหภูมิของผิวกระจกตามการคำนวณของโปรแกรม WINDOW 4.1 [6] สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.75 ถึง 3.78

สำหรับผิวชั้นนอก

$$t_{s1} = (t_1 / R_{k_1} - t_{out} / R_{h_1}) / (1 / R_{k_1} + 1 / R_{h_1}) \quad (3.75)$$

สำหรับผิวกระจกชั้นใน

$$t_{sN} = (t_N / R_{k_N} - t_{room} / R_{h_N}) / (1 / R_{k_N} + 1 / R_{h_N}) \quad (3.76)$$

สำหรับผิวที่เหลือของชั้นกระจกที่ i สามารถหาได้โดย

$$t_{s2i-1} = (t_i / R_{k_i} - t_{s2i} / R_{h_{i+1}}) / (1 / R_{k_i} + 1 / R_{h_{i+1}}) \quad (3.77)$$

$$t_{s2i} = (t_{i+1} / R_{k_{i+1}} - t_{s2i-1} / R_{h_{i+1}}) / (1 / R_{k_{i+1}} + 1 / R_{h_{i+1}}) \quad (3.78)$$

เมื่อ

$$t_i = \text{ค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกของชั้นกระจกที่ } i, K$$

$$t_s = \text{ค่าอุณหภูมิผิวกระจก, K}$$

หลังจากที่คำนวณหาค่าของอุณหภูมิผิวกระจกใหม่ได้แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าของเก่า ถ้าค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองอุณหภูมิมีค่าเกิน 0.01 จะต้องทำการคำนวณซ้ำ โดยใช้ค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่คำนวณได้ใหม่นี้ เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการคำนวณ และย้อนทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวใหม่จนกว่าคำตอบจะลู่เข้า

เมื่อคำตอบยังไม่ลู่อเข้าจำเป็นต้องเริ่มทำการคำนวณใหม่ ซึ่งในส่วนค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกใหม่ โดยนำค่าอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกเก่ามาบวกกับค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจก ซึ่งจะหาได้จากการหาอนุพันธ์ของค่า Δ_j ที่ได้จากสมการที่ 3.74 เทียบกับอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ 3.79 และ 3.80

$$t_k = t_k^0 + \delta t_k \quad (3.79)$$

เมื่อ

t_k^0 = ค่าของอุณหภูมิที่กึ่งกลางกระจกที่ได้จากการประมาณครั้งก่อน, K

และ

$$\delta t_k = -[\partial \Delta_k / \partial t_j]^{-1} \times \Delta_j \quad (3.80)$$

ถ้าค่าของ δt_k มีค่ามากกว่าค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนสูงสุดจากการประมาณในครั้งก่อน จะแทนค่า δt_k ด้วย $0.5 \delta t_k$ ลงในสมการที่ (3.79) ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการแกว่งของคำตอบ

3.4 การหาค่าสภาวะความสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort)

วัตถุประสงค์ของระบบการทำความเย็น การระบายอากาศ และระบบการปรับอากาศ ต่างก็เพื่อให้คนภายในสภาวะนั้นเกิดความสบาย ดังนั้นค่าสบายเชิงความร้อน (Thermal Comfort) จึงเป็นสภาวะที่เกี่ยวกับอารมณ์หรือจิตใจที่ทำให้เกิดความพอใจกับลักษณะทางความร้อนของสภาวะนั้น ความรู้สึกที่ใช้อธิบายว่ารู้สึกสบายและรู้สึกไม่สบายนั้นจะเกี่ยวกับอุณหภูมิและความชื้นของผิวหนังและอุณหภูมิในร่างกาย โดยทั่วไปแล้วความรู้สึกสบายจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิร่างกายถูกกำหนดไว้ให้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบๆ และความชื้นที่ผิวหนังมีค่าต่ำ นอกจากนี้ความรู้สึกสบายนั้นยังเกี่ยวข้องกับระดับของการทำกิจกรรมและลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่รวมทั้งลักษณะท่าทางและรูปแบบของสถานที่

ในปี พ.ศ. 2515 Fanger [2] ได้สร้างสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความสบายของคนโดยใช้ตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร คือ ค่าอุณหภูมิอากาศ ค่าความเร็วลม ค่าความชื้น mean radiant temperature ค่าการผลิตพลังงานในร่างกาย และลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่ โดย Fanger จะแปลงสมการหาค่าความสบายไปสู่ดัชนีที่ใช้กำหนดความสบายคือ Predicted Mean Vote (PMV) ซึ่งได้จากผลการลงความเห็นของคนกลุ่มใหญ่โดยได้แบ่งเป็น 7 ระดับของความพอใจ ซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่าง -3 (หนาวมาก) ถึง +3 (ร้อนมาก) และ 0 หมายถึงลักษณะปานกลาง (รู้สึกพอดี)

นอกจากนี้ค่าของ PMV ยังมีความสัมพันธ์กับค่า PDD (Predicted Percentage of Dissatisfied) ค่า PDD เป็นตัวกำหนดเปอร์เซ็นต์ของคนที่รู้สึกร้อนหรือหนาวซึ่งจะใช้กำหนดสภาวะความสบายได้เหมือนกัน ถึงแม้ว่า PMV มีค่าเป็น 0 ซึ่งหมายถึงสภาวะที่สบายซึ่งไม่ต้องการการทำความเย็นหรือการทำความร้อน แต่ค่าของ PDD จะเป็น 5% ซึ่งจะแสดงว่ามีคน บางคน (ประมาณ 5%) จะรู้สึกไม่สบายที่สภาวะนี้ และสมการสำหรับคำนวณหาค่า PMV และค่า PDD สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.81 และ 3.82

$$PMV = (0.352e^{-0.042 \cdot met} + 0.032) \cdot [met - 0.35 \cdot (43 - 0.061 \cdot met - P_a) - 0.42 \cdot (met - 50) - 0.0023 \cdot met \cdot (44 - P_a) - 0.0014 \cdot met \cdot (34 - T_a) - 3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \cdot ((T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4) - f_{cl} \cdot h_c (T_{cl} - T_a)] \quad (3.81)$$

และ

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)} \quad (3.82)$$

เมื่อ met = อัตราการผลิตพลังงานภายในร่างกายเนื่องจากการทำกิจกรรม, kcal/ hr m²

P_a = Patial Pressure ของไอน้ำ, mm Hg

f_{cl} = อัตราส่วนพื้นที่ของเสื้อผ้าที่สวมใส่ต่อพื้นที่ผิวร่างกายทั้งหมด

T_{mrt} = ค่า Mean radiant temperature, °C

T_a = อุณหภูมิอากาศภายใน, °C

T_{cl} = อุณหภูมิเสื้อผ้าที่สวมใส่, °C

h_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างอากาศและเสื้อผ้า, W/m²

โดยที่ ค่า Patial Pressure ของไอน้ำ (mm Hg) หาได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกสมการที่ 3.83

$$P_a = \frac{7.52 \cdot P_{sat} \cdot RH_a}{100} \quad (3.83)$$

เมื่อ

P_{sat} = ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_a kPa

RH_a = ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง, %

สำหรับอุณหภูมิผิวเสื้อผ้าที่สวมใส่หาได้โดยใช้วิธีการคำนวณซ้ำ โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.84

$$T_{cl} = 35.7 - 0.032 \cdot met - 0.18 \cdot I_{cl} [3.4 \times 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4) + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a)] \quad (3.84)$$

และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 3.85

$$h_c = [2.05 \cdot (T_{cl} - T_a)^{0.25}, 10.4 \sqrt{V_a}]_{MAX} \quad (3.85)$$

เมื่อ V_a = ค่าความเร็วของอากาศภายใน, m/s

ค่า Clothing area factor, f_{cl} ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างค่าพื้นที่ผิวของเสื้อผ้าต่อพื้นที่ผิวของร่างกายคนที่ไม่ได้สวมใส่เสื้อผ้า (nude) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.86

$$\begin{aligned} f_{cl} &= 1.0 + 0.2I_{cl} && \text{เมื่อ } I_{cl} < 0.5CLO \\ &= 1.05 + 0.1I_{cl} && \text{เมื่อ } I_{cl} > 0.5CLO \end{aligned} \quad (3.86)$$

3.4.1 ค่า Mean radiant temperature

Mean radiant temperature เป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาค่าทางความร้อนของร่างกายคน ซึ่งเป็นคุณสมบัติสมมูลของผิวสมมุติภายในที่ให้การแผ่รังสีความร้อนจากร่างกายคนเท่ากับความร้อนที่แผ่ออกจากสภาวะจริง ค่า Mean radiant temperature ที่ไม่ได้รวมผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งเรียกว่า Unirradiant mean radiant temperature สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.87

$$\sigma(T_{umrt} + 273)^4 = B_1 \cdot F_{p-1} + B_2 \cdot F_{p-2} + K + B_n \cdot F_{p-n} \quad (3.87)$$

เมื่อ

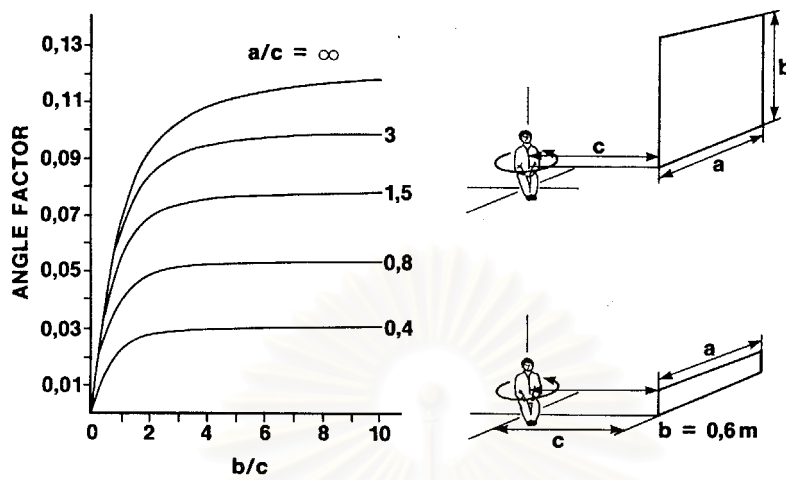
T_{umrt} = ค่า Unirradiant mean Radiant Temperature, °C

B_n = ค่า Radiosity ของพื้นผิว, W/m²

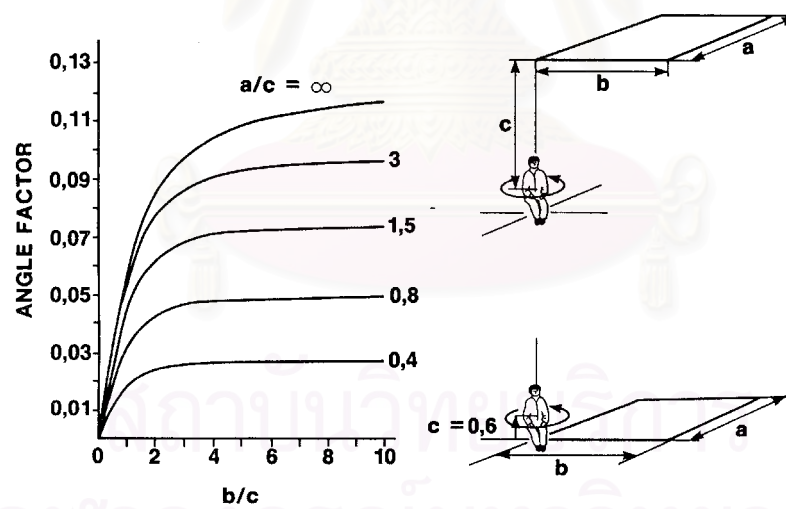
F_{p-n} = ค่า Angle Factor ระหว่างคนกับพื้นผิวที่ n ซึ่งหาได้จากรูปที่ 3.3 ถึง 3.4

$$\sum F_{p-n} = 1$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมตั้งฉาก



รูปที่ 3.4 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน

แต่สำหรับพื้นผิวของผนังส่วนใหญ่จะมีค่าการเปล่งรังสี (ϵ), ค่อนข้างสูง จึงสามารถตัดค่าของการสะท้อนทิ้งไปได้ และถ้าผิวภายในห้องเป็นผิวสีดำ ค่าของ unirradian mean radiant temperature ก็สามารถหาได้จากสมการที่ 3.88

$$T_{umrt} = \left[(t_1 + 273)^4 \cdot F_{p-1} + (t_2 + 273)^4 \cdot F_{p-2} + \Lambda + (t_n + 273)^4 \cdot F_{p-n} \right]^{0.25} - 273 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.88)$$

แต่ผลรวมของค่า Angle Factor จะต้องเป็นหนึ่ง ดังนั้นค่าของยกกำลังสี่ของค่า unirradiant mean radiant temperature จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิผิวของสิ่งแวดล้อมยกกำลังสี่ แล้วถ่วงด้วยน้ำหนักของค่า Angle Factor

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าความสบายภายใต้สิ่งแวดล้อมภายในอาคารนั้น เกิดจากผลกระทบหลายตัวแปรด้วยกัน โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากผลกระทบจากค่าของ อุณหภูมิอากาศ ความชื้น และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาภายในอาคาร โดยเฉพาะผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาภายในอาคารจะมีผลกระทบอย่างมากต่อผู้อยู่อาศัย โดยเฉพาะกรณีที่ผู้อยู่อาศัยอยู่ใกล้กับหน้าต่างกระจก โดยการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่มีผลกระทบทันทีได้แก่ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ และค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร และส่วนที่ถูกดูดกลืนไว้ที่ผนังของกระจกและผนังภายในของอาคารซึ่งภายหลังจะแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาวออกมา

ซึ่งปริมาณของค่าการแผ่รังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยผิวหนังของผู้อยู่อาศัยจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ คุณสมบัติของหน้าต่างกระจก ตำแหน่งของผู้อยู่อาศัยในอาคาร และค่าการดูดกลืนของผิวหนังคน และส่วนการแผ่รังสีคลื่นยาวจะเกิดจากผลกระทบของค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่ร้อนขึ้นอันเนื่องมาจากการสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ในเนื้อของผนังกระจก และจะเปล่งรังสีความร้อนคลื่นยาวออกมาภายหลัง

สำหรับค่า Mean radiant Temperature ที่ใช้คำนวณในสมการหาค่าดัชนีที่ความสบายนั้น จึงต้องแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่า Mean radiant temperature ในกรณีที่ยังไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งเรียกว่า ค่า unirradiated mean radiant temperature, T_{umrt} และส่วนที่สองคือ ค่า Mean radiant temperature ในกรณีที่รวมผลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์และการแผ่รังสีคลื่นยาวของผนังภายในอาคารซึ่งเรียกว่า Mean radiant temperature, T_{mrt} โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.89

$$T_{mrt} = \left[T_{umrt}^4 + f_p \cdot a_k \cdot \frac{I}{(\epsilon_p \cdot \sigma)} \right]^{0.25} \quad (3.89)$$

a_k = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐาน = 0.6)

ϵ_p = ค่าการเปล่งรังสีของร่างกายคน (ค่ามาตรฐาน = 0.97)

f_p = ค่า Project area factor ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ภาพฉายผิวคนต่อพื้นที่รับแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างคนและดวงอาทิตย์ สามารถหาได้จากรูปที่ 3.5

I = ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวผนังคน (W / m^2)

$$I = I_{dirv} \times T(\theta) + I_{diffv} \times T_{her}$$

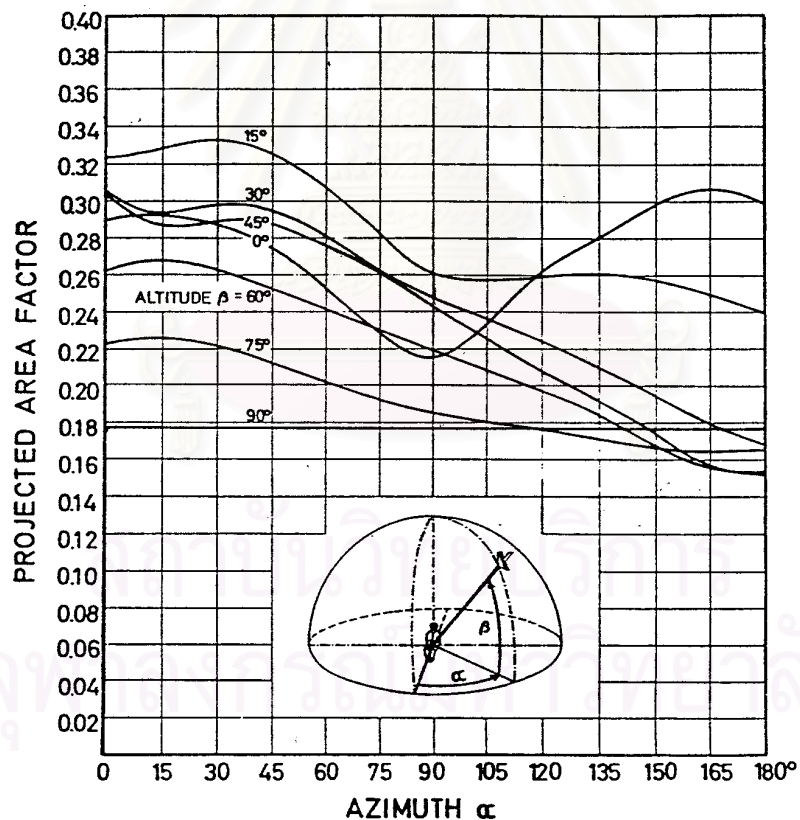
เมื่อ

I_{dirv} = ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก (W/m^2)

I_{diffv} = ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก (W/m^2)

$T(\theta)$ = ค่าการส่งผ่านรังสีของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ

T_{her} = ค่าการส่งผ่านรังสีเชิงครึ่งทรงกลมเชิงสเปคตรัม



รูปที่ 3.5 แสดงค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะทำนอง

3.4.2 การหาค่า PMV ในกรณีคิดผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก

สำหรับค่า PMV ที่แสดงในสมการที่ 3.81 นั้น เป็นค่า PMV ที่ได้จากผลการทดลองของ Fanger [2] แล้วนำมาสร้างแบบเป็นจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะใช้ได้กับกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์เข้ามากระทบผิวหนัง ดังนั้นการนำค่า mean radiant temperature กรณีที่คิดผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ได้จากสมการที่ 3.89 มาคำนวณค่า PMV ในสมการที่ 3.81 จะทำให้ค่า PMV มีค่าเกินช่วงที่ Fanger [2] กำหนด ดังนั้นสำหรับการคำนวณค่า PMV กรณีที่คิดผลกระทบของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์จะสามารถคำนวณได้จากการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า PMV ต่อค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่เข้ามากระทบผิวหนัง โดยใช้วิธีการของ Lyons [11] ตามสมการที่ 3.90

$$\frac{dPMV}{dq} = \frac{\partial PMV}{\partial MRT} \cdot \frac{\partial MRT}{\partial (\alpha f_p q)} \cdot \frac{\partial (\alpha f_p q)}{\partial q} \quad (3.90)$$

เมื่อ α = ค่าการดูดกลืนรังสีที่ผิวหนัง

f_p = ค่า project area factor (หาได้จากรูปที่ 3.5)

q = ค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบหน้าต่างกระจกและผ่านเข้ามากระทบที่ผิวหนัง W/m^2

ดังนั้น ค่า PMV ในกรณีที่คิดผลของแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านจะหาได้โดยสมการที่ 3.91

$$PMV = PMV_{no\ solar} + \frac{dPMV}{dq} \cdot q \quad (3.91)$$

3.5 การคำนวณค่าปริมาณรังสีแสงอาทิตย์

ปริมาณแสงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ Direct Solar Radiation ที่เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และ อีกประเภทคือ Diffuse Solar Radiation ที่เกิดจากการกระจัดกระจายของแสงเนื่องจากรังสีจากดวงอาทิตย์กระทบกับไอน้ำหรือก้อนเมฆ ในชั้นบรรยากาศ และผลรวมของ Direct Solar Radiation และ Diffuse Solar Radiation ที่ตกกระทบบนพื้นผิวในแนวระนาบเรียกว่า Global Solar Radiation ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.92

$$I_{toth} = I_{DN} \cdot \cos \theta_z + I_{diff} \quad (3.92)$$

เมื่อ I_{toth} = ค่ารังสีรวมที่ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับรังสีของดวงอาทิตย์, W/m^2
 I_{DN} = ค่ารังสีตรงตั้งฉากที่ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับรังสีของดวงอาทิตย์, W/m^2
 I_{diffh} = ค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับรังสีของดวงอาทิตย์, W/m^2
 θ_Z = ค่ามุม zenith ซึ่งเป็นมุมระหว่างรังสีจากดวงอาทิตย์กับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิว,
Degree

ในการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก จำเป็นต้องทราบค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวของหน้าต่างกระจก ซึ่งลักษณะการติดตั้งของหน้าต่างกระจกโดยส่วนใหญ่จะติดตั้งในลักษณะตั้งฉาก แต่ข้อมูลรังสีที่ได้จากการตรวจวัดส่วนใหญ่มักเป็นข้อมูลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวในแนวนอน ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวในแนวนอนไปเป็นค่ารังสีที่ตกกระทบผิวในแนวตั้งฉาก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 และการคำนวณหาค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผิวตั้งฉาก ได้แก่ รังสีตรง และรังสีกระจายสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.91

$$I_{totv} = I_{dirh} \cdot \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_z} + I_{diffh} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{toth} \cdot \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.91)$$

เมื่อ I_{totv} = ค่ารังสีรวมที่ตกกระทบผิวเอียง, W/m^2
 I_{dirh} = ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบผิวเอียง, W/m^2
 I_{diffh} = ค่ารังสีกระจายที่ตกกระทบผิวเอียง, W/m^2
 θ_v = มุมตกกระทบกับผนังตั้งฉาก ซึ่งเป็นมุมระหว่างแสงที่ตกกระทบและระนาบที่ตั้งฉากกับผิวเอียง, Degree
 β = มุมเอียงของผิว, Degree
 ρ_g = ค่าการสะท้อนรังสีของผิวดิน

บทที่ 4

ข้อมูลภูมิอากาศ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียด การคัดเลือกข้อมูลภูมิอากาศที่ตรวจวัดที่สถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัย โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

ข้อมูลภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา

การหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ

การจัดทำข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่ใช้กับโปรแกรม WINDOW 4.1

4.1 ข้อมูลภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา

ข้อมูลภูมิอากาศจากกรมอุตุนิยมวิทยาที่ได้รับมาประกอบด้วยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจำนวน 11 ชนิด คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวในแนวระดับ (Global radiation) อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) ความเร็วลม (Wind velocity) ทิศทางลม (Wind direction) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ปริมาณเมฆบนท้องฟ้า (Cloud cover) เป็นต้น ข้อมูลดังกล่าวจะถูกบันทึกด้วยเครื่อง Data logger ซึ่งจะทำหน้าที่ในการคำนวณค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงโดยอัตโนมัติ

ข้อมูลภูมิอากาศที่ได้รับมาจากกรมอุตุนิยมวิทยาที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้มีการจัดเก็บในรูปแบบของค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงที่ถูกบันทึกที่ระหว่างปี พ.ศ. 2531-2542 เป็นระยะเวลา 12 ปี

4.2 การหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ

สำหรับการหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบใน ASHRAE Fundamentals Handbook 1993 จะกำหนดการหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ โดยใช้อุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็นพารามิเตอร์หลัก โดยจะเลือกอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 1% 2.5% และ 5% ของช่วงฤดูร้อน ตั้งแต่เดือนมิถุนายน ถึงเดือนกันยายน รวม 4 เดือน และเลือกอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ 99% และ 97.5% ของช่วงฤดูหนาว ตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์รวม 3 เดือน ต่อมาการหาข้อ

มูลฐานอากาศออกแบบใน ASHRAE Fundamentals Handbook 1997 [1] ได้กำหนดการหาข้อมูลภูมิอากาศออกแบบซึ่งใช้อุณหภูมิกระเปาะแห้งเป็นพารามิเตอร์หลัก โดยจะเลือกอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% 1.0% และ 2% ของข้อมูลทั้งปี แทนอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 1% 2.5% และ 5% ของช่วงฤดูร้อนตามลำดับ และเลือกอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ 99.6% และ 99% ของข้อมูลทั้งปีแทนอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ 99% และ 97.5% ของช่วงฤดูหนาวตามลำดับ ส่วนข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ออกแบบ ทาง ASHRAE [1] ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับท้องฟ้าโปร่งในช่วงฤดูร้อนมาใช้ในการพิจารณา

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการคัดเลือกข้อมูลภูมิอากาศออกแบบโดยคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกมากที่สุด โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญสองตัวคือค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และรังสีรวมแสงอาทิตย์ โดยสำหรับอุณหภูมิกระเปาะแห้งนั้นจะทำการคัดเลือกโดยอ้างอิงจากวิธีการในบทที่ 26 ของ ASHRAE Fundamentals Handbook 1997 [1] ซึ่งจะได้ข้อมูลอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้อง สำหรับในส่วนของรังสีรวมแสงอาทิตย์นั้นเนื่องจากต้องการเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่ได้จากอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งดังนั้นจึงได้ทำการคัดเลือกโดยวิธีการเดียวกันซึ่งจะได้ข้อมูลรังสีรวมแสงอาทิตย์ออกแบบที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้อง

4.2.1 ข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ

1. อุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้อง

อุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% หมายถึงอุณหภูมิกระเปาะแห้งสูงสุดตลอดทั้งปีที่มีโอกาสเป็นไปได้เท่ากับหรือมากกว่า 0.4% โดยเมื่อเรียงลำดับค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งตลอดทั้งปีซึ่งมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 8760 ชั่วโมง (24 ชั่วโมงใน 1 วัน และ 365 วันใน 1 ปี) จากมากไปน้อยแล้วค่าอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งนี้จะอยู่ในลำดับที่ 35 ($8760 \times 0.4/100$) ส่วนค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้องอย่างเช่น รังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับความเร็วลม นั้นคิดจากค่าที่อ่านได้ในชั่วโมงต่างๆ ของวันที่มีค่าอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งนี้อยู่แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย สำหรับขั้นตอนในการหามิฉะนั้น

1) เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการจัดเรียงค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งจากมากไปน้อยของแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 เพื่อหาค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่อยู่ในลำดับที่ 35 พร้อมทั้งระบุวันและเดือนที่มีค่านั้น ส่วนผลที่ได้จากการหาโดยโปรแกรมนั้นได้นำมาสรุปและแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงวันที่ที่มีค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% ภายในเดือนต่างๆ ของแต่ละปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 รวม 12 ปี

ปี (พ.ศ.)	อุณหภูมิออกแบบ กระเปาะแห้ง 0.4% (°C)	เดือน					
		กุมภาพันธ์ (วันที่)	มีนาคม (วันที่)	เมษายน (วันที่)	พฤษภาคม (วันที่)	มิถุนายน (วันที่)	กรกฎาคม (วันที่)
2531	35.0	7,23	29	2,5,7,22	25	22,28	8
2532	36.0			4,8,18,19, 23,29	4		
2533	36.0			16,23,26	3		
2534	35.8	26		3,11	8		
2535	37.0			8,11,13,14, 23,25	3,4,9,30	2	
2536	36.0			4,30	1,2,4,8,10,12	4,22	
2537	36.0		16	9,13	2,4,5,6		
2538	36.0		3,20,21,25	19,21,22, 24, 25	1,2,21,22,23, 25,26		
2539	36.0		31	10,15,19	6		
2540	36.0		24	24	4,6,7,8,11, 12,13,14,15, 23,28	13	
2541	36.4	19			1,8,11,24		19,20
2542	36.0		11,27				

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนวันที่มีค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% ภายในเดือนต่างๆ ของแต่ละปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 รวม 12 ปี

ปี (พ.ศ.)	อุณหภูมิออกแบบ กระเปาะแห้ง 0.4% ($^{\circ}\text{C}$)	เดือน					
		กุมภาพันธ์ (จำนวนวัน)	มีนาคม (จำนวนวัน)	เมษายน (จำนวนวัน)	พฤษภาคม (จำนวนวัน)	มิถุนายน (จำนวนวัน)	กรกฎาคม (จำนวนวัน)
2531	35.0	2	1	4	1	2	1
2532	36.0			6	1		
2533	36.0			3	1		
2534	35.8	1		2	1		
2535	37.0			6	4	1	
2536	36.0			2	6	2	
2537	36.0		1	2	4		
2538	36.0		4	5	7		
2539	36.0		1	3	1		
2540	36.0		1	1	11	1	
2541	36.4	1			4		2
2542	36.0		2				
รวม	เฉลี่ย = 36.0	4	10	34	41	6	3

2) จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเนื่องจากในเดือนเมษายนและเดือนพฤษภาคมของแต่ละปีมีวันที่มีค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% อยู่เป็นจำนวนมากที่สุดคือจำนวน 34 วัน และ 41 วันตามลำดับดังนั้นจึงเลือกวันที่นำมาหาค่าอุณหภูมิออกแบบจากวันเหล่านี้

3) นำค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งในแต่ละชั่วโมงของวันทั้ง 75 วันมาเขียนกราฟเพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดทั้งวัน และคัดเลือกเฉพาะวันที่มีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอมาเป็นวันที่เป็นตัวแทนเพื่อหาค่าของอุณหภูมิในวันออกแบบ โดยจากการคัดเลือกจะได้วันตัวแทนทั้งหมด 20 วัน

4) นำค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของวันที่เป็นตัวแทนทั้ง 20 วัน มาหาค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง และนำค่าที่ได้ไปหา เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวัน (percentage of daily range) ของแต่

ละชั่วโมงซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของชั่วโมงนั้นๆ ต่อค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของชั่วโมงที่มีค่าสูงสุด

5) หาค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวัน (mean daily range) โดยหาได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงสุดรายวันกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิต่ำสุดรายวันจากเดือนที่ร้อนที่สุดของปี (เดือนที่มีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิสูงที่สุด) ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวัน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันของปีต่างๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 รวม 12 ปี

ปี (พ.ศ.)	2531	2532	2533	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	เฉลี่ย
การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิราย วัน (°C)	6.9	7.8	8.3	7.4	8.4	7.5	8.0	7.7	7.7	7.1	6.7	8.4	7.7

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันคือ 7.7°C และอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งคือ 36.0 °C แล้ว จะนำมาหาค่าอุณหภูมิออกแบบภายนอกกระเปาะแห้งในแต่ละชั่วโมงได้จากสมการ

$$T_o = T_d - DR(x) \quad (4.1)$$

เมื่อ

T_o = อุณหภูมิออกแบบภายนอกกระเปาะแห้งในแต่ละชั่วโมง, °C

T_d = อุณหภูมิออกแบบภายนอกกระเปาะแห้งคือ 36.0 °C

DR = ค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวันคือ 7.7 °C

x = เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายวัน, %

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้งของวันที่เป็นตัวแทนทั้ง 20 วัน, อุณหภูมิกระเปาะแห้งเฉลี่ยรายชั่วโมง, เปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรายชั่วโมง และอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งรายชั่วโมง

วัน/เดือน/ปี	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
04/02/31	29.1	29.0	29.0	28.9	28.8	28.7	28.8	30.2	31.8	33.0	34.1	34.8	34.6	35.0	34.8	34.7	34.2	33.0	30.8	30.0	29.8	29.7	29.7	29.6
04/05/31	29.3	29.3	29.3	29.3	29.2	29.1	29.1	29.8	31.5	32.5	32.9	34.0	34.0	34.5	35.0	34.0	33.3	31.7	30.5	30.0	29.8	29.7	29.8	29.6
04/07/31	29.5	29.4	29.2	29.3	29.0	29.1	29.2	30.1	31.8	32.5	33.5	33.8	34.2	34.6	35.2	35.0	34.0	32.5	31.0	30.5	30.2	30.2	30.0	29.8
04/22/31	29.4	29.3	29.1	29.0	28.8	28.7	28.6	30.3	31.2	32.5	34.0	34.8	35.5	35.2	35.0	35.2	34.7	33.0	31.7	31.0	30.5	30.4	30.2	30.0
04/19/32	29.2	29.0	28.9	28.8	28.7	28.8	29.0	30.4	32.5	32.0	33.8	33.7	34.8	34.6	35.4	36.0	34.5	32.6	30.8	30.0	29.7	29.5	29.4	29.3
05/04/32	30.0	29.8	29.6	29.5	29.4	29.3	29.4	31.0	32.3	33.9	34.9	35.6	35.4	36.4	36.1	36.4	36.0	34.5	32.0	31.0	30.7	30.5	30.5	30.2
05/03/33	29.4	29.1	29.0	28.9	28.8	29.0	29.4	31.1	32.4	33.6	34.5	35.0	35.4	36.0	35.1	34.7	33.8	32.0	30.7	30.1	30.0	29.9	29.7	29.6
05/08/34	29.6	29.5	29.4	29.2	29.0	28.8	29.4	30.1	32.1	34.0	34.4	35.1	36.1	35.8	36.0	35.7	34.9	33.0	31.4	30.7	30.5	30.2	30.0	29.8
05/03/35	29.6	29.6	29.5	29.4	29.2	29.0	29.0	31.2	32.0	33.4	34.6	37.0	37.0	37.8	38.0	37.0	34.8	33.0	31.7	31.0	30.9	30.8	30.2	30.0
05/02/36	29.5	29.4	29.2	29.0	28.9	29.0	29.2	31.1	32.6	34.0	35.6	36.8	36.1	37.0	36.8	36.0	35.2	33.2	31.8	31.0	30.7	30.1	29.9	29.7
05/02/37	29.9	29.8	29.8	29.7	29.6	29.5	30.0	31.5	32.3	33.2	34.5	35.0	35.5	36.0	35.9	35.3	34.8	33.1	31.2	31.0	31.0	30.8	30.6	30.5
05/04/37	28.0	27.7	27.4	27.1	27.1	26.8	28.0	30.0	32.0	33.8	34.6	36.0	36.1	37.0	36.0	35.4	34.8	32.6	31.2	31.0	30.3	30.0	29.8	29.8
04/21/38	29.6	29.4	29.2	29.0	28.9	28.4	29.0	31.0	33.1	34.0	35.2	35.1	36.0	35.8	36.0	36.0	35.3	34.0	31.7	30.8	30.2	30.0	29.8	29.6
04/22/38	29.5	29.2	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	31.5	33.2	33.9	35.0	35.8	36.0	36.0	36.2	36.2	35.7	33.5	31.2	30.8	30.2	30.0	30.0	29.9
04/19/39	29.6	29.5	29.4	29.3	29.3	29.2	29.0	30.5	31.5	32.0	34.1	35.5	36.5	36.1	36.0	35.9	35.2	34.0	32.2	31.5	31.0	30.6	30.4	30.2
05/04/40	30.0	30.0	30.0	30.0	29.8	29.5	29.5	30.7	32.0	33.5	34.9	35.4	36.1	36.1	36.0	36.0	35.5	33.5	32.4	31.5	31.1	30.9	30.7	30.5
05/06/40	30.4	30.3	30.2	30.0	29.6	29.1	29.3	30.9	31.7	32.7	33.5	34.9	36.0	36.5	36.8	36.5	35.8	35.2	33.8	32.8	31.9	31.5	31.0	30.7
05/08/40	30.2	30.2	30.1	30.0	30.1	30.0	30.3	31.1	32.4	33.0	34.6	35.4	35.5	35.5	36.0	35.5	34.5	32.9	31.9	31.3	31.0	30.7	30.5	30.5
05/11/41	30.5	30.5	30.4	30.4	30.4	30.2	30.4	31.8	33.4	33.8	35.1	36.0	36.4	36.1	35.7	35.5	34.9	33.7	32.6	31.9	31.6	31.5	31.4	31.2
05/24/41	30.7	30.5	30.1	30.0	29.5	29.0	29.6	32.5	33.5	34.9	34.7	35.4	35.5	36.1	36.4	35.9	34.6	33.3	32.0	31.3	30.5	30.5	30.5	30.6
Avg temp	29.7	29.5	29.4	29.3	29.2	29.0	29.3	30.8	32.3	33.3	34.4	35.3	35.6	35.9	35.9	35.6	34.8	33.2	31.6	31.0	30.6	30.4	30.2	30.1
% daily range	91	92	94	96	98	100	96	73	53	38	21	9	4	0	0	4	16	39	62	72	77	80	83	85
T(design)	29.0	28.9	28.7	28.6	28.5	28.3	28.6	30.4	31.9	33.1	34.4	35.3	35.7	36.0	36.0	35.7	34.8	33.0	31.2	30.5	30.1	29.8	29.6	29.5

6) หาค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆ ที่สอดคล้องได้แก่ รังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับ ความเร็วลม โดยใช้ข้อมูลของวันที่เป็นตัวแทนในการหาค่าอุณหภูมิออกแบบภายนอกกระเปาะแห้ง ทั้ง 20 วันเพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ยโดยในวันที่ไม่มีการบันทึกข้อมูลไว้จะไม่นำมาคิด สำหรับรังสีกระจายแสงอาทิตย์นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวคือ ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ ASHRAE [1] (K_A) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์กับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ (K_D) ซึ่งนำมาจาก รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ของ สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์และสุรสิทธิ์ ทองจันทร์พัย [17] โดยสมการแสดงความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 4.2 และ 4.3

$$K_A = \frac{I_{toth}}{I_{toth,ASHRAE}} \quad (4.2)$$

เมื่อ

$$I_{toth} = \text{ค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับจากการตรวจวัด, } W / m^2$$

$$I_{toth,ASHRAE} = \text{ค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในวันท้องฟ้าโปร่ง, } W / m^2$$

นำค่า K_A ที่ได้ไปหาค่า K_D ตามช่วงเวลาต่างๆในแต่ละวัน ซึ่งวิธีการเลือกค่า K_D จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข. และเมื่อได้ค่า K_D แล้วจึงทำการคำนวณหาค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ตามสมการที่ 4.3

$$I_{diff} = K_D \cdot I_{toth} \quad (4.3)$$

ดังนั้นค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้โดยนำค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับลบด้วยค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ในแนวระดับ ซึ่งแสดงได้ตามสมการที่ 4.4

$$I_{dirh} = I_{toth} - I_{diff} \quad (4.4)$$

แต่เนื่องจากค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้ป้อนเข้าโปรแกรม WINDOW 4.1 นั้นเป็นค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกับผนังตั้งฉาก แต่ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ได้จากสมการที่ 4.4 เป็นค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ในแนวระดับ ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนค่ารังสีตรงในแนวระดับให้เป็นรังสีตรงที่ตกกระทบผิวตั้งฉาก โดยใช้สมการที่ 4.5 [7]

$$I_{dirv} = I_{dirh} \cdot \frac{\cos \theta_v}{\cos \theta_z} \quad (4.5)$$

และค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวตั้งฉากจะประกอบไปด้วยสองส่วนด้วยกันคือ ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์จากท้องฟ้าและการสะท้อนจากพื้นดิน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

$$I_{diffv,sky} = I_{diffh} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (4.6)$$

และ

$$I_{diffv,ground} = I_{toth} \cdot \rho_g \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (4.7)$$

โดยที่

$$I_{diffv,sky} = \text{รังสีกระจายแสงอาทิตย์จากท้องฟ้าที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, } W / m^2$$

$$I_{diffv,ground} = \text{รังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากพื้นดินที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก, } W / m^2$$

$$\beta = \text{มุมการเอียงตัวของผนัง, Degree}$$

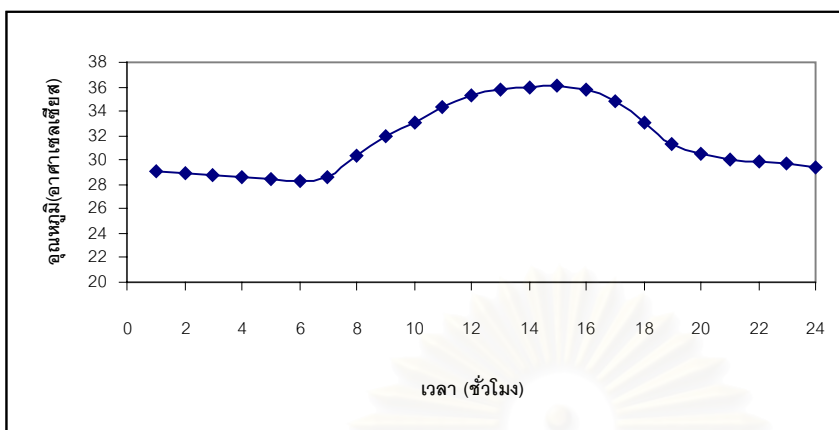
ดังนั้นรังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวตั้งฉากสามารถหาได้จากการบวกกันระหว่างสมการที่ 4.6 และ 4.7 จะได้ตามสมการที่ 4.8

$$I_{diffv} = I_{diffv,sky} + I_{diffv,ground} \quad (4.8)$$

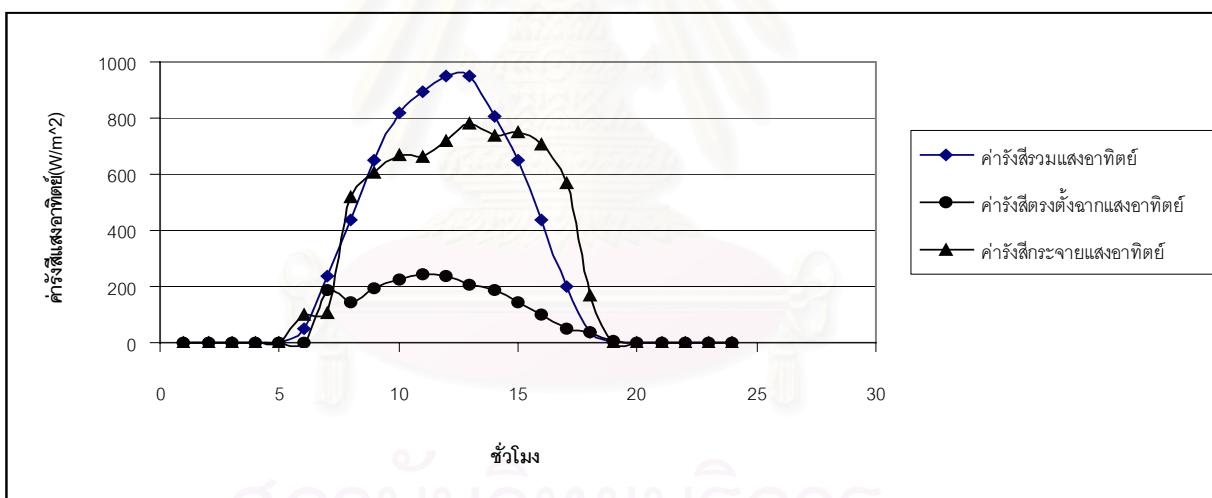
สำหรับรูปที่ 4.1 จะแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% ส่วนรูปที่ 4.2 จะแสดงถึงรังสีแสงอาทิตย์ทั้ง 3 องค์ประกอบที่สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4%

สำหรับตารางที่ 4.5 จะแสดงข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4%



รูปที่ 4.2 แสดงรังสีแสงอาทิตย์ในทั้ง 3 องค์ประกอบที่สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีอุณหภูมิกระเปาะแห้งที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4%

ตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ ที่หามาได้จากอุณหภูมิออกแบบกระเปาะแห้งที่มีค่าสูง
สุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง

ชั่วโมง ที่	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง (°C)	รังสีรวม แสงอาทิตย์ (W/m ²)	รังสีกระจาย แสงอาทิตย์ (W/m ²)	รังสีตรงตั้งฉาก แสงอาทิตย์ (W/m ²)	ความเร็ว ลม (m/s)
1	29.0	0.0	0.0	0.0	1.8
2	28.9	0.0	0.0	0.0	0.9
3	28.7	0.0	0.0	0.0	0.9
4	28.6	0.0	0.0	0.0	0.7
5	28.5	0.0	0.0	0.0	0.9
6	28.3	52.8	0.0	97.5	0.4
7	28.6	235.8	187.8	105.0	0.7
8	30.4	437.5	141.1	517.1	1.1
9	31.9	651.5	191.0	606.2	1.2
10	33.1	820.1	222.1	665.9	1.8
11	34.4	892.9	243.6	663.4	2.0
12	35.3	950.8	234.7	719.0	2.4
13	35.7	947.8	205.9	781.6	3.0
14	36.0	808.2	187.6	737.4	3.2
15	36.0	651.1	143.0	747.0	2.5
16	35.7	439.7	98.7	709.1	3.5
17	34.8	199.8	50.7	571.9	3.0
18	33.0	38.3	36.5	168.5	2.4
19	31.2	4.6	4.3	0.0	2.3
20	30.5	0.0	0.0	0.0	1.8
21	30.1	0.0	0.0	0.0	2.3
22	29.8	0.0	0.0	0.0	2.4
23	29.6	0.0	0.0	0.0	2.3
24	29.5	0.0	0.0	0.0	2.6

2. รังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้อง

ค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% หมายถึงรังสีรวมแสงอาทิตย์สูงสุดตลอดทั้งปีที่มีโอกาสเป็นไปได้เท่ากับหรือมากกว่า 0.4% โดยเมื่อเรียงลำดับค่าของรังสีรวมแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปีซึ่งมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 5475 ชั่วโมง (โดยจะคิดเฉพาะชั่วโมงที่มีค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งในแต่ละวันจะมีชั่วโมงที่มีค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ไม่เท่ากับศูนย์อยู่ 15 ชั่วโมง คือตั้งแต่ชั่วโมงที่ 5 ถึงชั่วโมงที่ 19 ของแต่ละวัน รวม 365 วัน) จากมากไปน้อยแล้วค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์นี้จะอยู่ในลำดับที่ 22 ($5475 \times 0.4/100$) ส่วนค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้องอย่างเช่น อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และความเร็วลมนั้น คิดจากค่าที่อ่านได้ในชั่วโมงต่างๆ ของวันที่มีค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์นี้อยู่แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยสำหรับขั้นตอนในการหาหาค่าเฉลี่ย

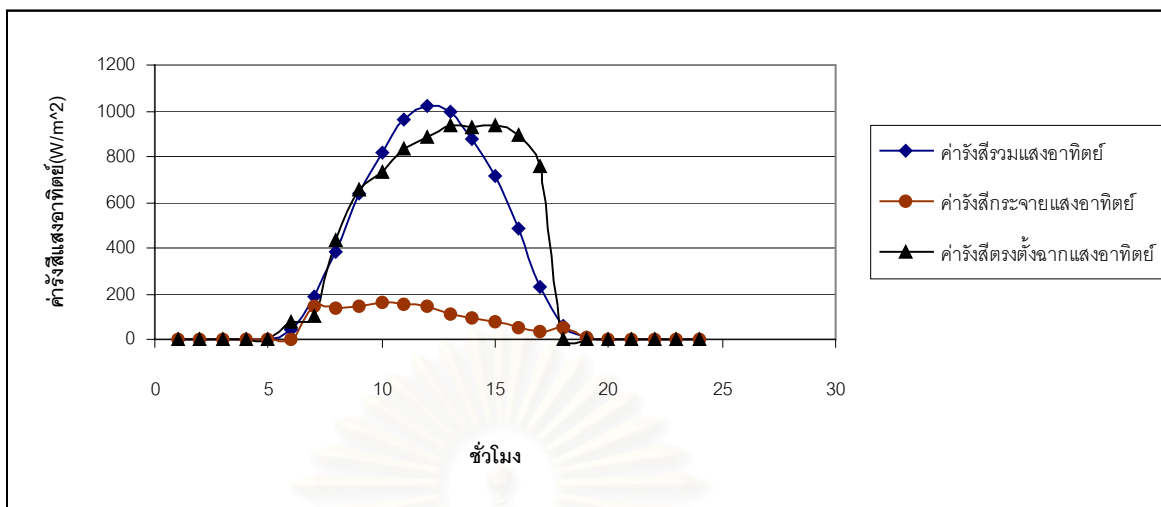
1) เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการจัดเรียงค่าของรังสีรวมแสงอาทิตย์จากมากไปน้อยของแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531-2542 เพื่อหาค่าของอุณหภูมิกระเปาะแห้งในตำแหน่งที่อยู่ในลำดับที่ 22 พร้อมทั้งระบุวันและเดือนที่มีค่านั้นอยู่ แต่เนื่องจากว่าในปี พ.ศ. 2535 และปี พ.ศ. 2540 มีจำนวนวันที่มีการบันทึกข้อมูลอยู่เพียง 80 วัน และ 121 วันตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2539 ค่าของรังสีรวมแสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าสูงผิดปกติดังนั้นจึงไม่นำปีเหล่านี้มาคิด

2) นำค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแต่ละชั่วโมงของวันที่มีค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% มาเขียนกราฟเพื่อดูลักษณะการกระจายตัว แล้วคัดเลือกวันที่มีลักษณะการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมาเป็นวันตัวแทนซึ่งผลที่ได้จะแสดงอยู่ในตารางที่ 4.6 จากนั้นคำนวณหารังสีกระจายแสงอาทิตย์ และ รังสีตรงตั้งฉากแสงอาทิตย์โดยใช้ความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัวคือ ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ ASHRAE [1] (K_A) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์กับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ (K_D) จากสมการที่ 4.2 และ 4.3 โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นเพื่อใช้หารังสีกระจายแสงอาทิตย์ และ รังสีตรงตั้งฉากแสงอาทิตย์นั้นจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ข.

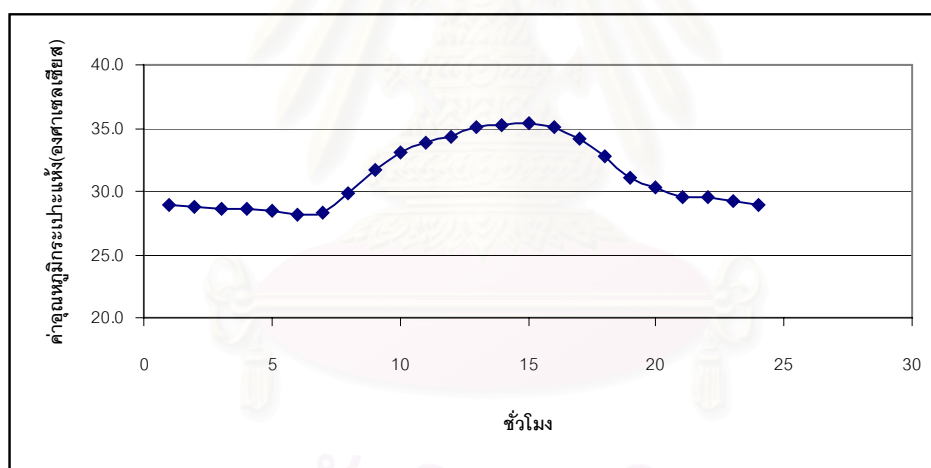
หาค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นๆที่สอดคล้องได้แก่ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ความเร็วลม โดยใช้ข้อมูลของวันที่เป็นตัวแทนในการหาค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลภูมิอากาศนอกแบบที่นำมาได้รังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4% และค่าเฉลี่ยของข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง

ชั่วโมง ที่	อุณหภูมิ กระเปาะแห้ง (° C)	รังสีรวม แสงอาทิตย์ (W/m ²)	รังสีกระจาย แสงอาทิตย์ (W/m ²)	รังสีตรงตั้งฉาก แสงอาทิตย์ (W/m ²)	ความเร็ว ลม (m/s)
1	29.0	0.0	0.0	0.0	1.9
2	28.8	0.0	0.0	0.0	1.2
3	28.7	0.0	0.0	0.0	1.4
4	28.6	0.0	0.0	0.0	1.6
5	28.4	0.0	0.0	0.0	1.2
6	28.1	42.9	0.0	72.5	1.2
7	28.3	183.3	148.1	103.6	0.6
8	29.9	382.1	137.8	433.1	2.1
9	31.7	637.3	142.5	658.6	3.0
10	33.1	813.9	161.4	733.1	3.1
11	33.8	965.5	154.2	833.5	3.2
12	34.3	1023.0	143.1	886.2	3.7
13	35.0	992.9	109.2	932.0	4.2
14	35.2	878.6	96.7	929.3	3.7
15	35.0	717.1	78.8	938.8	3.8
16	35.1	488.5	55.0	893.5	4.2
17	34.2	227.8	31.7	754.9	3.4
18	32.7	56.0	51.7	0.0	1.2
19	31.1	7.5	6.9	0.0	2.2
20	30.3	0.0	0.0	0.0	1.8
21	29.6	0.0	0.0	0.0	2.3
22	29.5	0.0	0.0	0.0	1.8
23	29.3	0.0	0.0	0.0	1.8
24	28.9	0.0	0.0	0.0	1.3



รูปที่ 4.3 แสดงรังสีแสงอาทิตย์ทั้ง 3 องค์ประกอบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีรังสีแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4%



รูปที่ 4.4 แสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งเฉลี่ยที่สอดคล้องกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ออกแบบของชุดภูมิอากาศออกแบบที่หามาได้จากวิธีรังสีรวมแสงอาทิตย์ที่มีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ 0.4%

4.3 การจัดทำข้อมูลภูมิอากาศออกแบบที่ใช้กับโปรแกรม WINDOW 4.1

หลังจากที่ได้ข้อมูลภูมิอากาศ 2 ชุด ที่ได้ทำการคัดเลือกจากการพิจารณาค่าอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง และค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการคัดเลือกว่าข้อมูลภูมิอากาศชุด ไหนจะเหมาะกับการใช้หาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในงานวิจัยนี้ โดยการพัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกใสมাত্রฐานของ ASHRAE ขนาด 3 มม. ที่ถูกติดตั้งทั้ง 4 ทิศ ได้แก่ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก โดยใช้สมการ ที่ 3.2 และใช้ค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกใสมাত্রฐานจาก ASHRAE Handbook Fundamental 1997[1] สำหรับใช้คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกทั้ง 4 ทิศ ซึ่งชุด ข้อมูลภูมิอากาศที่จะนำไปใช้จะต้องเป็นชุดที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด

สำหรับข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก ทั้ง 4 ทิศนั้นเป็นค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์และรังสีกระจายที่ตกกระทบกับผิวที่ตั้งฉาก แต่ข้อมูลรังสีแสง อาทิตย์ที่ได้ทั้ง 2 ชุด เป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบในแนวระดับ ดังนั้นจึงต้องใช้สมการที่ 4.5 4.6 และ 4.7 เปลี่ยนค่าของรังสีแสงอาทิตย์ในแนวระดับให้เป็นค่ารังสีที่ตกกระทบกับผิวตั้งฉาก ซึ่งผลการ คำนวณค่าความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกทั้ง 4 ทิศสามารถแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะพบว่าค่าการถ่ายเท ความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเฉลี่ยของชุดข้อมูลภูมิอากาศทั้ง 2 ชุด จะมีค่ามากที่สุดสำหรับทิศตะวัน ตก และชุดที่ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยผ่านหน้าต่างกระจกมากที่สุดคือ ชุดค่ารังสีแสงอาทิตย์ 0.4% โดยจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกมากที่สุด ในเวลา 15:00 น. ในทิศตะวัน ตกคือ $1,073 \text{ W/m}^2$ และมีค่าข้อมูลภูมิอากาศที่สอดคล้องคือ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิว ตั้งฉากเป็น 658 W/m^2 และค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$ และค่าความเร็วลม 3.8 m/s ตาม ลำดับ

ดังนั้นข้อมูลภูมิอากาศที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ชุดข้อมูลของค่ารังสีแสงอาทิตย์ 0.4 % โดย ใช้ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวตั้งฉาก ที่เวลา 15:00 น. คือ 658 W/m^2 และค่าอุณหภูมิ กระเปาะแห้ง $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$ และความเร็วลม 3.8 m/s ตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกใสมาตรฐาน 3 มม. ทั้ง

4 ทิศ

ชั่วโมง ที่	ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก (W/m ²)							
	รังสีแสงอาทิตย์ออกแบ 0.4%				อุณหภูมิออกแบ 0.4%			
	เหนือ	ตะวันออก	ใต้	ตะวันตก	เหนือ	ตะวันออก	ใต้	ตะวันตก
1	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
2	17.5	17.5	17.5	17.5	22.9	22.9	22.9	22.9
3	17.5	17.5	17.5	17.5	22.0	22.0	22.0	22.0
4	17.5	17.5	17.5	17.5	21.1	21.1	21.1	21.1
5	17.5	17.5	17.5	17.5	20.2	20.2	20.2	20.2
6	62.3	177.3	50.3	47.3	48.3	150.3	42.3	39.3
7	208.1	496.1	188.1	169.1	201.1	415.1	190.1	168.1
8	268.5	974.5	261.5	230.5	263.5	729.5	266.5	230.5
9	302.5	518.5	311.5	269.5	299.5	871.5	324.5	270.5
10	325.2	684.2	352.2	296.2	322.2	667.2	367.2	297.2
11	340.9	493.9	385.9	314.9	337.9	456.9	394.9	315.9
12	348.3	376.3	396.3	354.3	345.3	375.3	411.3	357.3
13	345.5	319.5	386.5	605.5	343.5	321.5	407.5	587.5
14	343.4	302.4	336.4	856.3	334.4	309.4	376.4	811.3
15	332.4	278.4	305.4	1073.3	316.4	285.4	333.4	920.3
16	305.5	240.5	258.5	887.5	281.5	247.5	279.5	877.5
17	251.1	170.1	178.1	864.1	208.1	176.1	193.1	566.1
18	41.0	41.0	41.0	41.0	46.8	46.8	46.8	46.8
19	35.1	35.1	35.1	35.1	36.4	36.4	36.4	36.4
20	29.3	29.3	29.3	29.3	31.9	31.9	31.9	31.9
21	23.4	23.4	23.4	23.4	29.7	29.7	29.7	29.7
22	23.4	23.4	23.4	23.4	28.3	28.3	28.3	28.3
23	23.4	23.4	23.4	23.4	27.0	27.0	27.0	27.0
24	17.5	17.5	17.5	17.5	26.1	26.1	26.1	26.1
เฉลี่ย	155.0	221.6	154.1	260.6	151.6	222.6	163.4	240.7

บทที่ 5

โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในบทนี้กล่าวถึงโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน ผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงไว้ในบทที่ 3 เนื่องจากโปรแกรม WINDOW 4.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้คำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกเพียงอย่างเดียว และข้อมูลขาออกของโปรแกรมที่เป็นคุณสมบัติทาง optical ไม่เพียงพอ รวมทั้งยังต้องใช้เวลามากในการป้อนข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 4.1 เพื่อที่จะไปคำนวณต่อในส่วนของการคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน เนื่องจากกระจกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของหน้าต่างกระจกตามวิธีการในโปรแกรม WINDOW 4.1 และการคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อนรวมไว้ในโปรแกรมเดียวกัน ตัวโปรแกรมถูกเขียนขึ้นเพื่อทำงานบนโปรแกรม Fortran 90 เหตุผลในการเลือกพัฒนาโปรแกรมบน Fortran 90 เนื่องจากโปรแกรม Fortran เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยงานวิจัยสำหรับสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และสาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และมีลักษณะของการประมวลผลที่รวดเร็วโดยเฉพาะการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลจำนวนมาก นอกจากนี้ชุดคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Fortran 90 ง่ายต่อการเข้าใจ ดังนั้นโปรแกรม Fortran 90 จึงสามารถตรวจจับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำงานได้ง่ายเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ข้อหัวต่อไปนี้เป็น

ลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1 ลักษณะของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนการแก้ปัญหาของโปรแกรม มีลักษณะขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

1. โปรแกรมเริ่มทำงานโดยการอ่านข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ สภาพอากาศภายนอกและสภาพอากาศภายในห้องที่กำหนด ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสบาย จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความหนาของหน้าต่างกระจก คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกเชิง

ความร้อนและคุณสมบัติทาง optical แต่ละชั้น ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ ทั้งหมดจะถูกบรรจุไว้ในแฟ้มข้อมูล [optic.dat , comfort.dat และ weather.dat]

2. ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE SUR_TEMP]
3. ทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE CAL_OPTIC]
4. ทำการคำนวณหาค่าดัชนีบ่งบอกความสบายเชิงความร้อนของคนที่มีผลจากการส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจก และผลของอุณหภูมิผิวกระจก ด้วยโปรแกรมย่อย [SUBROUTINE CAL_COMFORT]
5. ทำการพิมพ์ผลลัพธ์ ซึ่งได้แก่ ค่าคุณสมบัติทาง optical ที่แปรตามมุมตกกระทบ ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน ค่า mean radiant temperature ค่า PMV ค่า PPD ลงในแฟ้มข้อมูล
6. ทำการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจก โดยใช้สมการที่ 3.2 ที่แสดงไว้ในบทที่ 3 ด้วยโปรแกรมหลัก [WINDOW_COMFORT.F90] โดยคำนึงถึงสภาวะแวดล้อมภายนอกและภายในที่กำหนด

5.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาจะขึ้นสามารถแก้ปัญหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติที่มีผลต่อความสบายเชิงความร้อนของคนที่อยู่ภายในห้องได้ ลักษณะการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะทำงานเป็นขั้นตอนต่อเนื่องกันไม่สามารถข้ามขั้นตอนได้ จนกระทั่งได้ผลลัพธ์สุดท้าย ส่วนการเชื่อมโยงของข้อมูลระหว่างโปรแกรมหลักและโปรแกรมย่อยหรือการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างโปรแกรมย่อยด้วยกันเองจะเชื่อมโยงโดยการส่งค่าผ่านตัวแปรโดยตรง

ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค. และเพื่อให้สามารถเข้าใจถึงการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะขออธิบายหน้าที่และรายละเอียดของโปรแกรมต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นดังต่อไปนี้

โปรแกรมหลัก WINDOW_COMFORT.F90

โปรแกรม [WINDOW_COMFORT.F90] เป็นโปรแกรมที่บรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆเพื่อใช้เชื่อมโยงข้อมูลสำหรับการคำนวณระหว่างโปรแกรมย่อยและโปรแกรมหลัก และยังใช้อ่านค่าข้อมูลเบื้องต้นจากเพิ่มข้อมูลเพื่อใช้ในการคำนวณซึ่งได้แก่ ได้แก่ ค่าสภาวะอากาศภายนอกและสภาวะอากาศภายในห้องที่กำหนด ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าความสบาย จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความหนาของหน้าต่างกระจก คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกเชิงความร้อนและคุณสมบัติทาง optical แต่ละชั้นของหน้าต่างกระจก

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE SUR_TEMP

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวกระจก ตามวิธีของ WINDOW 4.1 และยังบรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆที่ใช้ประกอบการคำนวณในส่วนนี้ โดยจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยดังกล่าวโดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมย่อยต่างๆจะแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE CAL_OPTIC

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ตามวิธีของ WINDOW 4.1 และยังบรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆที่ใช้ประกอบการคำนวณในส่วนนี้ โดยจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยดังกล่าวโดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมย่อยต่างๆจะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค.

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE CAL_COMFORT

มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อน ตามวิธีในหัวข้อที่ 3.4 ที่แสดงไว้ในบทที่ 3 และยังบรรจุโปรแกรมย่อยต่างๆที่ใช้ประกอบการคำนวณในส่วนนี้ โดยจะทำการเชื่อมโยงกับโปรแกรมย่อยดังกล่าวโดยการส่งผ่านค่าตัวแปรโดยตรง ส่วนรายละเอียดของโปรแกรมย่อยต่างๆจะแสดงไว้ใน ภาคผนวก ค.

เพิ่มข้อมูล weather.dat

เพิ่มบรรจุข้อมูลสภาวะอากาศออกแบบภายนอกและภายใน ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวที่ตั้งฉาก (W/m^2) ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวที่ตั้งฉาก (W/m^2) อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งด้านนอก ($^{\circ}C$) อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้งด้านใน ($^{\circ}C$) ความเร็วลมภายนอก (m/s) ทิศทางลม (องศา) มุมเอียงของหน้าต่างกระจก (องศา) เรียงตามลำดับ โดยมีตัวอย่างเพิ่มข้อมูลที่เรียงตามลำดับต่อไปนี้

658.00 111.00 35.00 25.00 3.80 .00 90.00

เพิ่มข้อมูล optic.dat

เพิ่มบรรจุข้อมูลคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้ สำหรับบรรทัดแรก ชื่อของกระจก จำนวนชั้นของหน้าต่างกระจก ความกว้างของช่องอากาศกรณีเป็นกระจกสองชั้น (mm) บรรทัดที่สอง ความหนากระจก (mm) ค่า Thermal conductivity, k (W/m·K) ค่าการเปล่งรังสีของกระจกที่ผิวด้านหน้า ค่าเปล่งรังสีของกระจกที่ผิวด้านหลัง ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการสะท้อนรังสีของผิวกระจกด้านหน้าที่มุมตกกระทบที่กำหนด ค่าการสะท้อนรังสีของผิวกระจกด้านหลังที่มุมตกกระทบที่กำหนด เรียงตามลำดับ โดยมีตัวอย่างของแฟ้มข้อมูลดังต่อไปนี้

CLEAR	2	12.00					
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	
COOLGRAY	2	12.00					
6.00	.90	.84	.84	.430	.060	.060	
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	
DARKCOOLGRAY	2	12.00					
6.00	.90	.84	.84	.340	.050	.050	
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	
SKYBLUE	2	12.00					
6.00	.90	.84	.84	.450	.060	.060	
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	
OCEAN_GREEN	2	12.00					
6.00	.90	.84	.84	.350	.070	.070	
6.00	.90	.84	.84	.800	.070	.070	

เพิ่มข้อมูล comfort.dat

เพิ่มบรรจุข้อมูลสำหรับคำนวณค่าความสบายเชิงความร้อน ซึ่งข้อมูลที่บรรจุอยู่ในแฟ้มมีดังต่อไปนี้ ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า (clo) ค่าลักษณะการทำกิจกรรมของคน (met) ค่าความเร็วลมภายใน (m/s) ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน (°C) ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

ค่าการดูดกลืนรังสีที่ผิวคน ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวคน ค่าแฟคเตอร์ภาพฉาย (Project area factor) เรียงตามลำดับ โดยมีตัวอย่างของแฟ้มข้อมูลดังต่อไปนี้

.50 1.20 .15 25.00 50.00 .60 .97 .25

5.3 ผลลัพธ์ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์ของโปรแกรมจะมีทั้งหมด 2 ส่วนด้วยกัน คือ ค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกตามวิธี ASHRAE [1] กับค่าอุณหภูมิผิวกระจก และค่า mean radiant temperature รวมทั้งค่าดัชนีชี้ความสบาย (ค่า PMV และ ค่า PPD) ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยมีตัวอย่างแฟ้มข้อมูลดังนี้

```

CLR_6      1 Plane Air gap = .00
Angle  0   10   20   30   40   50   60   70   80   90   Hemis
Tsol   .775 .774 .771 .765 .754 .731 .683 .577 .345 .000 .696
Abs1   .154 .155 .158 .162 .168 .175 .182 .184 .173 .000 .170
Abs2   .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000
AbsT   .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000 .000
Rfsol  .071 .071 .071 .073 .078 .094 .135 .239 .482 1.000 .134
Rbsol  .071 .071 .071 .073 .078 .094 .135 .239 .482 1.000 .134
SHGC   .826 .825 .823 .819 .809 .789 .743 .637 .402 .000 .752
Inw1   .329
Inw2   .000
SC :   .95
  
```

Name	Layer	Thick1	Thick2	Air gap	U	Sur_temp	MRT	PMV	PPD
Reference_clr	1	3.00	.00	.00	6.14	33.51	42.10	2.25	86.72
CLR_3	1	3.00	.00	.00	6.17	34.08	41.80	2.21	85.35
CLR_6	1	6.00	.00	.00	6.25	35.33	40.95	2.10	81.06
CLR_12	1	12.00	.00	.00	6.39	37.86	39.32	1.88	71.26
BRONZE_3	1	3.00	.00	.00	6.40	38.19	39.25	1.87	70.81
BRONZE_6	1	6.00	.00	.00	6.56	41.54	37.13	1.59	55.96
BRONZE_10	1	10.00	.00	.00	6.70	44.77	35.22	1.34	42.12
GREEN_3	1	3.00	.00	.00	6.41	38.37	39.11	1.86	69.92
GREEN_6	1	6.00	.00	.00	6.56	41.40	37.20	1.60	56.44
GRAY_3	1	3.00	.00	.00	6.42	38.58	38.99	1.84	69.13
GRAY_6	1	6.00	.00	.00	6.59	42.09	36.79	1.55	53.48
BLUE_6	1	6.00	.00	.00	6.57	41.66	37.10	1.59	55.74
REF_CLEAR_LO	1	6.00	.00	.00	5.09	46.01	31.57	.83	19.64
REF_CLEAR_MI	1	6.00	.00	.00	5.38	46.25	32.40	.95	23.98
REF_CLEAR_HI	1	6.00	.00	.00	5.76	45.79	33.12	1.05	28.15
REF_TINT_LO	1	6.00	.00	.00	5.29	50.47	32.35	.95	23.99
REF_TINT_MI	1	6.00	.00	.00	5.52	50.20	32.62	.99	25.51

5.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นทำได้โดยเปรียบเทียบผลเฉลยของโปรแกรมในส่วนของการคำนวณเกี่ยวกับคุณสมบัติหน้าต่างกระจกกับผลเฉลยที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 4.1 และทำการเปรียบเทียบผลเฉลยของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในส่วนของการคำนวณหาค่าความสบายเชิงความร้อนกับโปรแกรม Thermal Comfort ของ ASHRAE โดยใช้ข้อมูลขาเข้าชุดเดียวกัน

ตารางที่ 5.1 แสดงถึงผลของค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกใสขนาด 6 มม. ที่เป็นค่าการส่งผ่านรังสี (Transmittance) การสะท้อนรังสี (Reflectance) การดูดกลืนรังสี (Absorbance) และค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ที่แปรตามมุมตกกระทบที่คำนวณได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป WINDOW 4.1 และจากโปรแกรม WINDOW_COMFORT.F90 ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งจากรายการที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองชุดมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ตาราง ที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 6 มม. โดย

โปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)

คุณสมบัติทาง เชิงแสง	โปรแกรม คอมพิวเตอร์	มุมตกกระทบ									
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Tranmittance	Window 4.1	0.775	0.774	0.771	0.765	0.754	0.731	0.683	0.577	0.345	0.0
	Win_comfort	0.775	0.774	0.771	0.765	0.754	0.731	0.683	0.577	0.345	0.0
Reflectance	Window 4.1	0.071	0.071	0.071	0.073	0.078	0.094	0.135	0.239	0.482	1.0
	Win_comfort	0.071	0.071	0.071	0.073	0.078	0.094	0.135	0.239	0.482	1.0
Absorbance	Window 4.1	0.154	0.155	0.158	0.162	0.168	0.175	0.182	0.184	0.173	0.0
	Win_comfort	0.154	0.155	0.158	0.162	0.168	0.175	0.182	0.184	0.173	0.0
SHGC	Window 4.1	0.814	0.813	0.811	0.806	0.797	0.776	0.730	0.624	0.389	0.0
	Win_comfort	0.817	0.816	0.814	0.810	0.800	0.779	0.733	0.627	0.392	0.0

สำหรับตารางที่ 5.2 แสดงถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทาง optical ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ค่า Shading Coefficient (SC) และค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่คำนวณได้จากโปรแกรมทั้งสองชนิด จะเห็นว่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกันมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณคุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดต่างๆโดยโปรแกรม WINDOW 4.1 (ตัวบาง) และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น WINDOW_COMFORT.F90 (ตัวหนา)

ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC		ค่าอุณหภูมิผิวกระจก (°C)	
	Win_comf	Window4.1	Win_comf	Window4.1	Win_comf	Window4.1
CLR_3	6.17	6.05	0.99	1.00	34.08	34.10
CLR_6	6.25	6.00	0.94	0.95	35.33	35.30
CLR_12	6.39	5.88	0.84	0.84	37.86	37.90
BRONZE_3	6.40	6.27	0.83	0.84	38.19	38.20
BRONZE_6	6.56	6.29	0.71	0.70	41.54	41.60
BRONZE_10	6.70	6.23	0.59	0.57	44.77	44.80
GREEN_3	6.41	6.28	0.83	0.83	38.37	38.40
GREEN_6	6.56	6.28	0.71	0.71	41.40	41.40
GRAY_3	6.42	6.29	0.82	0.82	38.58	38.60
GRAY_6	6.59	6.31	0.68	0.68	42.09	42.10

ตารางที่ 5.3 นั้น จะแสดงถึงการคำนวณค่า Predicted Mean Vote (PMV) และ Mean radiant temperature จากเงื่อนไขค่าสภาวะแวดล้อมที่เท่ากัน จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองกับโปรแกรมสำเร็จรูป Thermal comfort ซึ่งจะเห็นว่าผลใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณ ค่า PMV ระหว่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น SUBROUTINE CAL_COMFORT และ โปรแกรม Thermal comfort ของ ASHRAE ที่สภาวะเดียวกัน

Mean radiant temperature (°C)	ค่า PMV	
	โปรแกรม CAL_COMFORT	โปรแกรม Thermal comfort
25	-0.60	-0.59
26	-0.43	-0.42
27	-0.26	-0.25

28	-0.09	-0.07
29	0.09	0.10
30	0.26	0.25



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขั้นตอนการเตรียมข้อมูลต่างๆ โดยได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลชุดหน้าต่างกระจก

กำหนดสภาวะอากาศภายนอกและภายใน

กำหนดลักษณะห้อง

กำหนดพารามิเตอร์และข้อสมมุติฐาน

การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

6.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

6.1.1 โปรแกรม WINDOW 4.1

โปรแกรม WINDOW 4.1 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Windows and Daylight Group at Lawrence Berkeley Laboratory มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซึ่งใช้สำหรับคำนวณ ค่าดัชนีป้องกันคุณลักษณะของหน้าต่าง (ส่วนกรอบและส่วนกระจก) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U) ค่า solar heat gain coefficients ค่า shading coefficients และค่าคุณสมบัติทาง optical ได้แก่ค่าการส่งผ่านรังสี (Transmittance) การสะท้อนรังสี (Reflectance) และค่าการดูดกลืนรังสี (Absorbance) ในช่วงของรังสีแสงอาทิตย์ (solar range) และในช่วงของการมองเห็น (visible range) และค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิในระบบหน้าต่างกระจก เป็นต้น

ความสามารถของโปรแกรม

1. ใช้สำหรับคำนวณหาค่า U ในส่วนของตัวกระจก และส่วนกรอบกระจก
2. มีความสามารถที่วิเคราะห์คุณสมบัติของหน้าต่างกระจกหลายชั้นที่ประกอบไปด้วยชั้นของกระจก ชั้นของก๊าซที่อยู่ระหว่างกระจก กรอบกระจกและ spacers ภายใต้สภาวะแวดล้อมและมุมเอียงต่างๆ
3. สามารถใช้ข้อมูลส่วนประกอบของหน้าต่างแต่ละส่วนและเงื่อนไขสภาพแวดล้อมได้โดยตรงจากเพิ่มข้อมูล
4. สามารถเลือกการปฏิบัติงานเป็นแบบหน่วยอังกฤษและหน่วย SI
5. สามารถพิมพ์รายละเอียดของผลการคำนวณในแต่ละส่วนของหน้าต่างได้
6. สามารถกำหนดขนาดและคุณสมบัติทางความร้อนของแต่ละส่วนของกรอบหน้าต่าง
7. สามารถทำงานเชื่อมโยงกับโปรแกรม FRAME 3 ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณในส่วนของกรอบกระจกได้
8. สามารถใช้หลักการของการคำนวณคุณสมบัติของกระจกที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง
9. สามารถทำงานเชื่อมโยงกับโปรแกรมวิเคราะห์พลังงาน DOE-2.1E

การทำงานของโปรแกรม

เมื่อโปรแกรมเริ่มทำงานผู้ใช้สามารถออกแบบหน้าต่างที่ต้องการได้โดยการป้อนข้อมูลลงบนหน้าจอหลักซึ่งข้อมูลที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรมมีดังนี้

1. ต้องกำหนดสภาวะการออกแบบ สำหรับโปรแกรม WINDOW 4.1 จะมีสภาวะการออกแบบไว้ 3 เงื่อนไข คือ 1.) สภาวะอากาศมาตรฐานแบบ NFRC/ASHRAE 2.) สภาวะมาตรฐานแบบ ASHRAE สำหรับฤดูร้อน 3.) สภาวะอากาศมาตรฐานแบบ ASHRAE สำหรับฤดูหนาว แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้ก็สามารถกำหนดสภาวะอากาศมาตรฐานได้โดยผู้ใช้เอง โดยเลือกจากสภาวะอากาศสำหรับการออกแบบในแต่ละท้องถิ่นนั้น ซึ่งค่าสภาวะอากาศมาตรฐานที่ต้องป้อนให้กับโปรแกรม WINDOW 4.1 นั้น จะประกอบด้วย 1.) ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบผนังตั้งฉาก 2.) ค่าอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายใน 3.) ค่าความเร็วลมภายนอก 4.) อุณหภูมิท้องฟ้า แต่โดยทั่วไปแล้วในการคำนวณคุณสมบัติทางความร้อนของหน้าต่างจะทำภายใต้เงื่อนไขที่มีเมฆปกคลุมซึ่งจะทำให้ค่าการเปล่งรังสีของท้องฟ้ามีค่าเป็น 1

2. ผู้ใช้ต้องกำหนดชนิดหรือลักษณะของหน้าต่างที่ต้องการของหน้าต่างกระจกที่ต้องการคำนวณโดยอาจเลือกจากเพิ่มข้อมูลของหน้าต่างกระจกที่ได้กำหนดข้อมูลมาแล้วหน้า แล้ว หรืออาจกำหนดลักษณะและขนาดจากผู้ใช้เองได้
3. ผู้ใช้ต้องกำหนดลักษณะการวางตัวของหน้าต่างกระจกโดยการกำหนดเป็นลักษณะของมุมเอียงของหน้าต่างกระจกเมื่อมุมเอียงมีค่าเป็น 90 องศา จะหมายถึงหน้าต่างอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากและมุมเอียงมีค่าเป็น 0 องศา จะหมายถึงหน้าต่างอยู่ในตำแหน่งแนวนอน
4. ผู้ใช้อาจเลือกชนิดของกระจกจากเพิ่มข้อมูลของกระจกซึ่งมีข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทาง optical รวมทั้งความหนาและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน โดยมีข้อมูลของกระจกมากถึง 9999 ชนิด หรือผู้ใช้อาจกำหนดคุณสมบัติทาง optical ของกระจกได้เอง โดยอาจนำเข้าข้อมูลทาง optical ที่ตำแหน่งตั้งฉาก มาจากผู้ผลิตกระจก แล้วใช้โปรแกรม WINDOW 4.1 คำนวณหาค่าคุณสมบัติทาง optical ที่มุมตกกระทบอื่นๆได้
5. ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของกรอบหน้าต่างได้จากเพิ่มข้อมูลของกรอบหน้าต่างซึ่งมีอยู่ในโปรแกรมหรือผู้ใช้จะกำหนดได้เอง
6. ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของก๊าซที่บรรจุอยู่ระหว่างชั้นของกระจก (สำหรับหน้าต่างที่มีกระจกมากกว่า 1 ชั้น) หรืออาจกำหนดได้เอง

ผลที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 4.1

เมื่อผู้ใช้กำหนดลักษณะของหน้าต่างกระจกและสถานะแวดล้อมโปรแกรม WINDOW 4.1 จะทำการคำนวณและให้ค่าผลลัพธ์ดังนี้

1. ค่า U, ค่า shading coefficient , ค่า Solar Heat Gain Coefficient ที่มุมตกกระทบต่างๆ (0 ถึง 90 องศา) สำหรับหน้าต่างกระจก
2. ค่า U ของส่วนที่เป็นกรอบกระจกและส่วนที่เป็นโครงสร้างรวมทั้งค่า U ของส่วนที่เป็นขอบกระจก
3. ให้ค่า solar transmittance และค่า visible transmittance รวมทั้งค่า solar reflectance ค่า visible reflectance และค่า solar absorptance ที่ขึ้นกับมุมตกกระทบของส่วนที่เป็นกระจก

4. ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในและภายนอกซึ่งจะเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวของกระจกภายในและภายนอก
5. ให้ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในส่วนตรงกลางกระจก (center-of-glass)

6.1.2 โปรแกรม DOE-2.1E

เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาสำหรับช่วยในการออกแบบระบบปรับอากาศ ประมาณพลังงานที่ต้องใช้ในการดำเนินงานของอาคาร รวมทั้งยังสามารถคำนวณความคุ้มทุนในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้อีกด้วย โปรแกรมนี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานอย่างมากเนื่องจากตัวโปรแกรมมีภาษาเป็นของตัวเองและมีระบบอุปกรณ์ รวมทั้งตัวแปรต่างๆให้เลือกมากมาย แต่อาจไม่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มศึกษา โปรแกรมการประมาณค่าพลังงานในอาคาร เนื่องจากขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรมในแต่ละขั้นตอนมีความซับซ้อน การกรอกข้อมูลในบางขั้นตอนมีความยุ่งยากพอสมควร รวมทั้งฐานข้อมูลของสภาพอากาศก็จะต้องมีความละเอียดและครบถ้วน เนื่องจากโปรแกรมต้องการข้อมูลภูมิอากาศเป็นรายชั่วโมงตลอดปี (8,760 ชั่วโมง) นอกจากนี้โปรแกรม DOE-2.1E ยังสามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม WINDOW 4.1 สำหรับการคำนวณในส่วนของหน้าต่างกระจก

ตัวโปรแกรมจะประกอบไปด้วย 5 โปรแกรมหลักด้วยกันคือ โปรแกรมแรกใช้สำหรับแปลงข้อมูลของ บริเวณห้องที่สนใจ ให้อยู่ในรูปแบบที่โปรแกรมย่อยอื่นๆ สามารถเข้าใจได้ คือ โปรแกรม BDL Processor (เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อให้ข้อมูลที่ป้อนเข้ามามีความครบถ้วน อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องตามข้อกำหนดของโปรแกรม) ในกรณีที่ข้อมูลที่กรอกเข้ามามีความบกพร่อง ในบางกรณีโปรแกรมจะกำหนดค่าข้อมูลเหล่านั้นโดยอัตโนมัติ (default value) และโปรแกรมที่เหลืออีก 4 โปรแกรม ใช้สำหรับการคำนวณเฉพาะด้าน คือโปรแกรม LOADS, SYSTEMS, PLANT และ ECONOMICS โดยโปรแกรมเหล่านี้จะทำการคำนวณต่อเนื่องกันเป็นลำดับ โปรแกรม LOADS จะทำการคำนวณค่าความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัสผิสรายชั่วโมงทั้งหมดที่จำเป็นต้องนำออกจาก บริเวณห้องที่สนใจ เพื่อรักษาระดับความสบายในห้องหรืออาคารให้อยู่ในระดับที่น่าพอใจ โดยภาวะความร้อนของ บริเวณห้องที่สนใจ ในแต่ละชั่วโมงจะขึ้นอยู่กับ สภาพอากาศภายนอก รังสีจากดวงอาทิตย์ ตารางการทำงานของผู้อยู่อาศัย ไฟแสงสว่าง อุปกรณ์ต่างๆ และอัตราการระบายอากาศ เป็นต้น โปรแกรม SYSTEMS จะคำนวณปริมาณความร้อนที่ระบบปรับอากาศสามารถนำออกไปทิ้งได้จริงโดยจะนำตัวแปรต่างๆ ของระบบปรับอากาศมาพิจารณาประกอบด้วย เช่นชนิดของเครื่องปรับอากาศ และวิธีการควบคุมระบบ เป็นต้น โปรแกรม PLANT จะคำนวณพลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของระบบ

ปรับอากาศในบริเวณห้องที่สนใจเช่น turbines, chillers และ cooling towers เป็นต้น โดยจะพิจารณาทั้งช่วง full loads และ part loads ส่วนโปรแกรม ECONOMICS จะคำนวณค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของ บริเวณห้องที่สนใจ ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้

6.2 ข้อมูลชุดหน้าต่างกระจก

สำหรับข้อมูลของชุดหน้าต่างกระจกที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเลือกตามชนิดของหน้าต่างกระจกที่มีขายในท้องตลาดและชนิดที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่ หน้าต่างกระจกที่มีขายในท้องตลาดมีหลายชนิดด้วยกัน โดยชนิดที่นิยมใช้งานส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 4 ชนิดด้วยกันคือ กระจกใส กระจกชนิดเคลือบ (coated glass) กระจกสะท้อนแสง (reflective glass) และกระจกสองชั้น (Double glazing) ซึ่งรูปแสดงรายละเอียดของหน้าต่างกระจกจะแสดงอยู่ใน ภาคผนวก จ. สำหรับข้อมูลที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลของหน้าต่างกระจกพื้นฐานจากเพิ่มข้อมูลของโปรแกรม WINDOW 4.1 และข้อมูลจากการสนับสนุนจาก บริษัทกระจกไทย-อาซาฮี จำกัด (มหาชน) โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลของคุณสมบัติทาง optical ของกระจกตัวเปล่าที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ$) ซึ่งได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน (Normal transmittance, T) ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนที่ผิวหน้ากระจก (Normal front reflectance, Rf) ค่าการสะท้อนรังสีความร้อนที่ผิวด้านหลังกระจก (Normal back reflectance, Rb) ค่าการเปล่งรังสีที่ผิวหน้ากระจก (front emissivity, \mathcal{E}_f) และค่าการเปล่งรังสีที่ผิวด้านหลังกระจก (back emissivity, \mathcal{E}_b) ความหนากระจก (มม.) ค่า U ค่า SC ซึ่งแสดงค่าต่างๆ ในตาราง ในภาคผนวก ก.

สำหรับข้อมูลทาง optical ของหน้าต่างกระจก 2 ชั้นหาได้โดยการนำข้อมูลทาง optical ของหน้าต่างกระจกแต่ละชั้นที่ได้จากตารางกระจก 1 ชั้น มาคำนวณหาคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก 2 ชั้นได้โดยใช้โปรแกรม WINDOW 4.1 แสดงได้ในตารางหน้าต่างกระจก 2 ชั้นใน ภาคผนวก ก.

6.3 กำหนดสภาวะอากาศภายนอกและภายใน

6.3.1 สภาวะอากาศภายนอก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิอากาศภายนอกในบทที่ 4 จะใช้ข้อมูลภูมิอากาศภายนอกสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้าต่างกระจกตั้งฉากเท่ากับ 658 W/m^2 ที่ตำแหน่งมุมตกกระทบเท่ากับ 43 องศา ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้าต่างกระจกตั้ง

ฉากเท่ากับ 111 W/m^2 ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งภายนอกเท่ากับ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ และค่าความเร็วลมภายนอกเท่ากับ 3.8 m/s

6.3.2 สภาวะอากาศภายใน

การหาข้อมูลสภาวะอากาศออกแบบที่ใช้ภายในห้องหรืออาคารนั้น จะเกี่ยวข้องกับความสะดวกสบายของผู้อยู่อาศัยภายในอาคาร สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดสภาวะความสะดวกสบายของผู้อยู่อาศัยจะขึ้นอยู่กับ ค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งอากาศภายใน ค่าความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมภายใน ลักษณะของเสื้อผ้าที่สวมใส่ และลักษณะการทำกิจกรรมภายในห้อง จากมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-1981 [16] ได้กำหนดค่าความเร็วลมภายในห้องสำหรับสภาวะออกแบบในฤดูร้อนของประเทศสหรัฐอเมริกาไว้ไม่ให้เกิน 2.25 m/s ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และจากงานวิจัยของ Bjarne [8] ได้นำเสนอค่าพารามิเตอร์ที่จะทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในอาคารสำนักงานเกิดความสบายคือ ค่าความต้านทานเสื้อผ้าเท่ากับ 0.5 clo และค่าการทำกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met ค่าอุณหภูมิอากาศภายในมีค่าประมาณ $25 \text{ }^\circ\text{C}$ นอกจากนี้งานวิจัยของ Bush [9] ได้ใช้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้าเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 clo และค่าความเร็วลมเฉลี่ยเท่ากับ 0.13 m/s สำหรับอาคารสำนักงานที่มีระบบปรับอากาศในประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะภายในห้องโดยการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ [SUBROUTINE CAL_COMFORT] โดยใช้วิธีการคำนวณของ Fanger [2] ที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4 เพื่อที่จะคำนวณหาสภาวะที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยภายในห้องมีความสบาย ($PMV = 0$) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์หลักที่เหมาะสมกับสภาวะภายในสำนักงานในประเทศไทยคือ ค่าความต้านทานเสื้อผ้าเท่ากับ 0.5 clo และค่าการทำกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met (ลักษณะทำงานบนโต๊ะ) หลังจากนั้นคำนวณค่า PMV จากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าความเร็วลมภายในและอุณหภูมิอากาศ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นจะได้ค่าสภาวะภายในห้องที่เหมาะสมที่ทำให้ค่า PMV มีค่าใกล้เคียง 0 มากที่สุด (สำหรับงานวิจัยนี้ได้ ค่า $PMV = -0.0745$) สำหรับในกรณีที่ไม่มีคิดผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์ โดยมีสภาวะดังนี้

$$\text{ค่าอุณหภูมิอากาศภายใน} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{ค่าความต้านทานเสื้อผ้าเชิงความร้อน} = 0.5 \text{ clo}$$

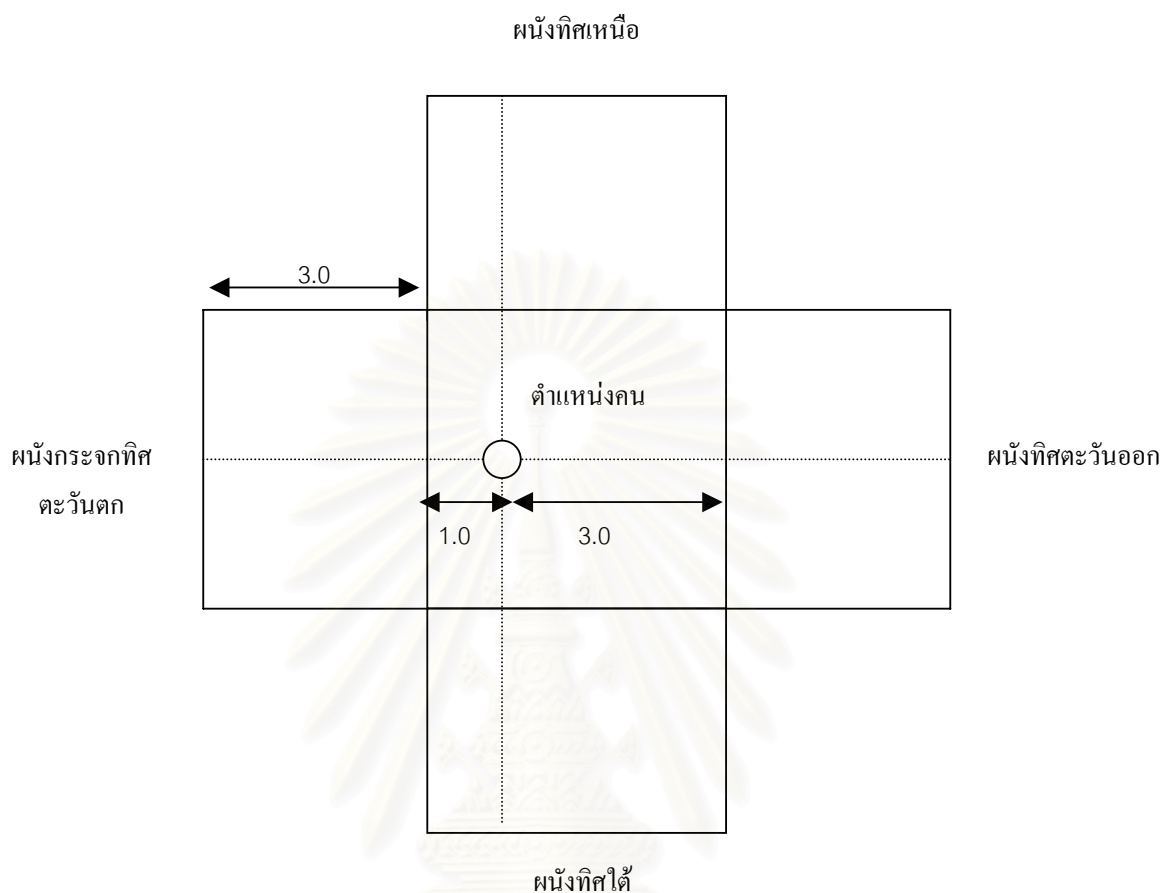
$$\text{ค่าความชื้นสัมพัทธ์} = 50 \%$$

ค่าการทำกิจกรรม	= 1.2 met
ค่าความเร็วลมภายใน	= 1.5 m/s

6.4 กำหนดลักษณะห้อง

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์หาผลกระทบจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผู้อยู่อาศัยภายในอาคารที่มีผลต่อค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) ซึ่งโดยทั่วไปรังสีแสงอาทิตย์จะมีผลกระทบต่อผู้อยู่อาศัยภายในอาคารที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับผนังหน้าต่างกระจก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณดังกล่าวรังสีแสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวผู้อยู่อาศัยได้โดยตรงซึ่งจะทำให้เกิดความรู้สึกไม่สบาย

สำหรับห้องที่จะกำหนดให้ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นห้องที่มีขนาดที่พบเห็นได้ทั่วไปในอาคารสำนักงานซึ่งจะเป็นห้องขนาด 4×4×3 ลูกบาศก์เมตร โดยมีหน้าต่างกระจกเป็นผนังด้านหนึ่งโดยหันหน้าไปทางทิศตะวันตกตามค่ารังสีตรงซึ่งได้จากการคัดเลือก และตำแหน่งของผู้อยู่อาศัยจะอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางห่างจากผนังกระจกด้านทิศตะวันตก 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงลักษณะของห้องและตำแหน่งผู้อยู่อาศัยที่ใช้สำหรับการคำนวณ

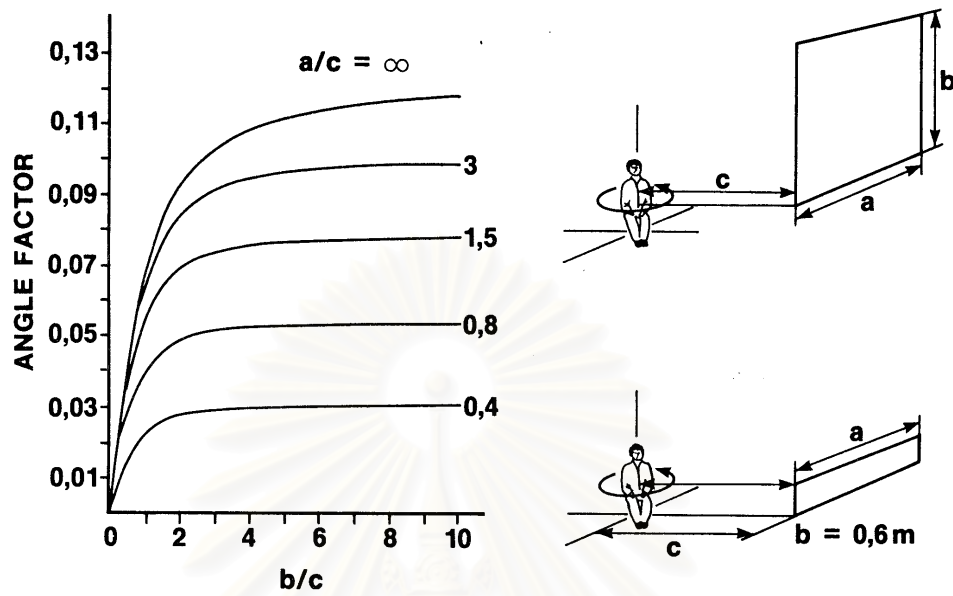
6.5 กำหนดพารามิเตอร์และข้อสมมุติฐาน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะนำมาใช้วิเคราะห์หาสมรรถนะของหน้าต่างกระจกในแง่การถ่ายเทความร้อนได้แก่ ค่า SC , U , ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกและคุณสมบัติทางเชิงแสงของหน้าต่างกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบซึ่งประกอบด้วย ค่าการส่งผ่านรังสีความร้อน ค่าการสะท้อนรังสีความร้อน ค่าการดูดกลืนรังสีความร้อน และค่า SHGC ที่สภาวะแวดล้อมภายนอกและภายในที่กำหนด และสำหรับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะความสบายได้แก่ ค่า mean radiant temperature ค่า PMV ค่า PPD และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV เทียบกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมากกระทบผิวคน, $\frac{dPMV}{dq}$

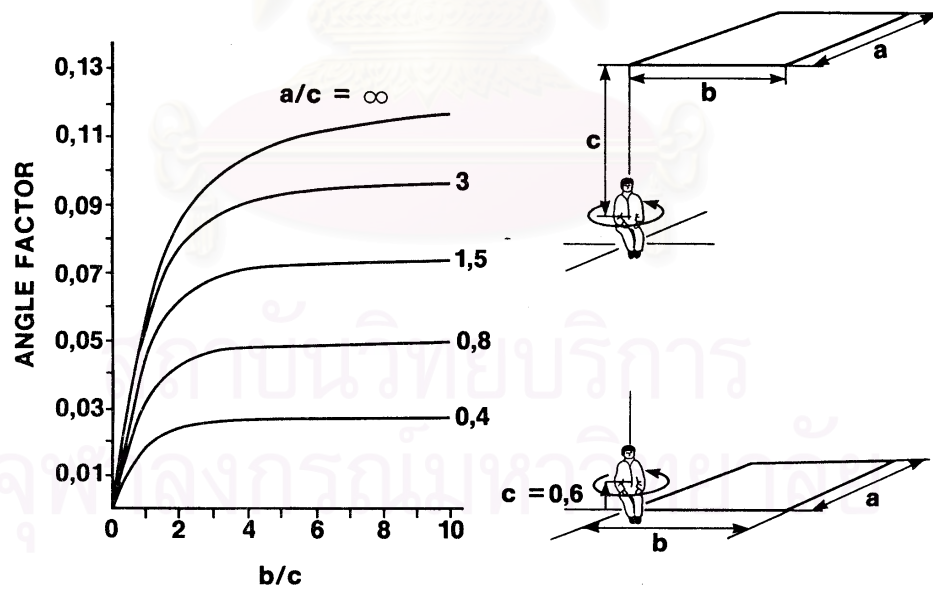
ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้จากการคำนวณของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น [WINDOW_COMFORT.F90] ซึ่งขั้นตอนรายละเอียดของโปรแกรมจะกล่าวไว้ในบทที่ 5 และภาคผนวก ค.

สำหรับข้อมูลค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่ได้จากผู้ผลิตนั้นเป็นค่าที่ตำแหน่งมุมตกกระทบ 0 องศา(ตำแหน่งตั้งฉาก) แต่คุณสมบัติที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่างกระจกจะต้องเป็นคุณสมบัติที่ตำแหน่งตกกระทบเดียวกันกับค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้าต่างกระจก กล่าวคือ ค่ารังสีตรงที่ตกกระทบผิวกระจกตั้งฉากที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นค่าที่มุมตกกระทบ 43 องศา ซึ่งเป็นค่ามุมของดวงอาทิตย์ในทิศตะวันตก ดังนั้นค่าคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่จะนำมาใช้ในการคำนวณจะต้องเป็นค่าที่มุมตกกระทบ 43 องศา ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้น [WINDOW_COMFORT.F90]

การหาค่า mean radiant temperature เพื่อที่จะนำมาใช้คำนวณค่า PMV นั้น จะเป็นค่าที่คิดผลกระทบของแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวคน (T_{mrr}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.89 แต่ก่อนอื่นจำเป็นต้องทราบค่า mean radiant temperature ในกรณีที่ nichtคิดผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ (T_{umrr}) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.88 โดยในการหาค่า T_{umrr} นั้นจำเป็นต้องทราบค่า Angle factor ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 ซึ่งค่า Angle factor ที่ตำแหน่งของคนในลักษณะทำนองจะหาได้จากรูปที่ 6.2 และ 6.3 โดยค่า Angle factor ระหว่างผนังกระจกและคนที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับ 0.238 และค่า Angle factor สำหรับผนังด้านอื่นซึ่งสมมุติให้มีอุณหภูมิผนังเท่ากับ อุณหภูมิอากาศภายในห้อง (25 °C) จะมีค่าเท่ากับ 0.762

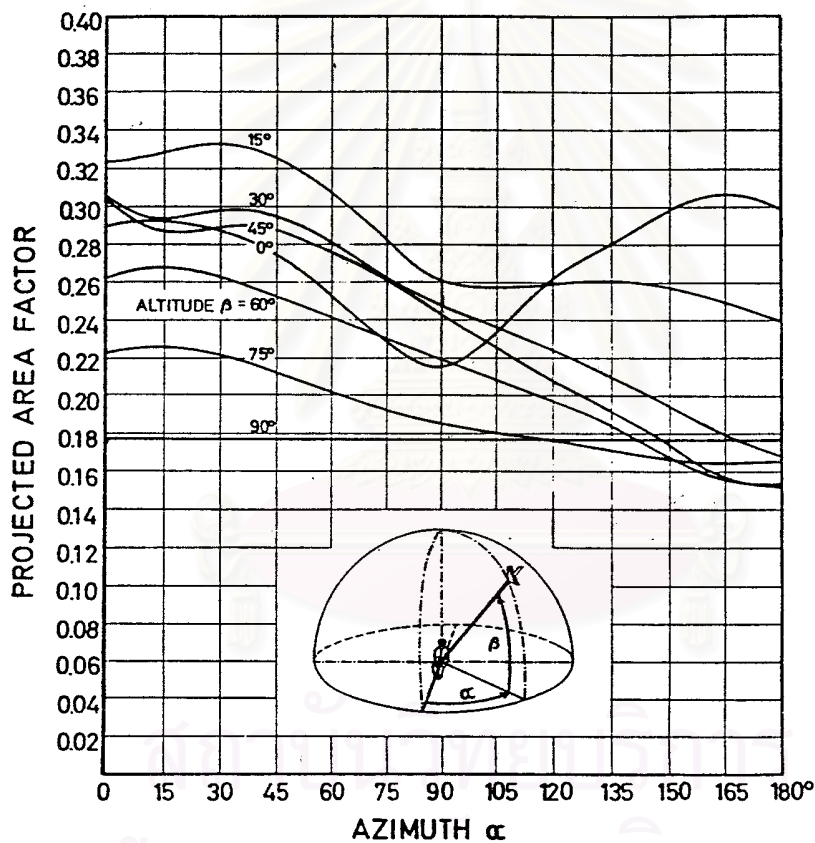


รูปที่ 6.2 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังตั้งฉาก



รูปที่ 6.3 แสดงค่า Angle factor เฉลี่ยระหว่างคนในลักษณะทำนั่งและผนังสี่เหลี่ยมในแนวนอน

สำหรับการหาค่า mean radiant temperature ที่คิดผลของรังสีแสงอาทิตย์ในสมการที่ 3.89 จำเป็นต้องทราบค่า projected area factor, (f_p) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ที่ฉายและพื้นที่ผิวทั้งหมดของผิวคน ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ขึ้นกับมุมตกกระทบของแสง (β) และมุมการเอียงตัวของคน (α) ซึ่งจะได้จากรูปที่ 6.4 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าที่ตำแหน่ง $\beta = 45$ องศา และ $\alpha = 90$ องศา ซึ่งจะได้ค่า f_p เท่ากับ 0.25 และนอกจากนี้ยังต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีคลื่นสั้นสำหรับผิวคนเพื่อที่จะนำไปคำนวณค่า T_{mrt} โดยค่าที่ Fanger แนะนำให้ใช้จะมีค่าเท่ากับ 0.6

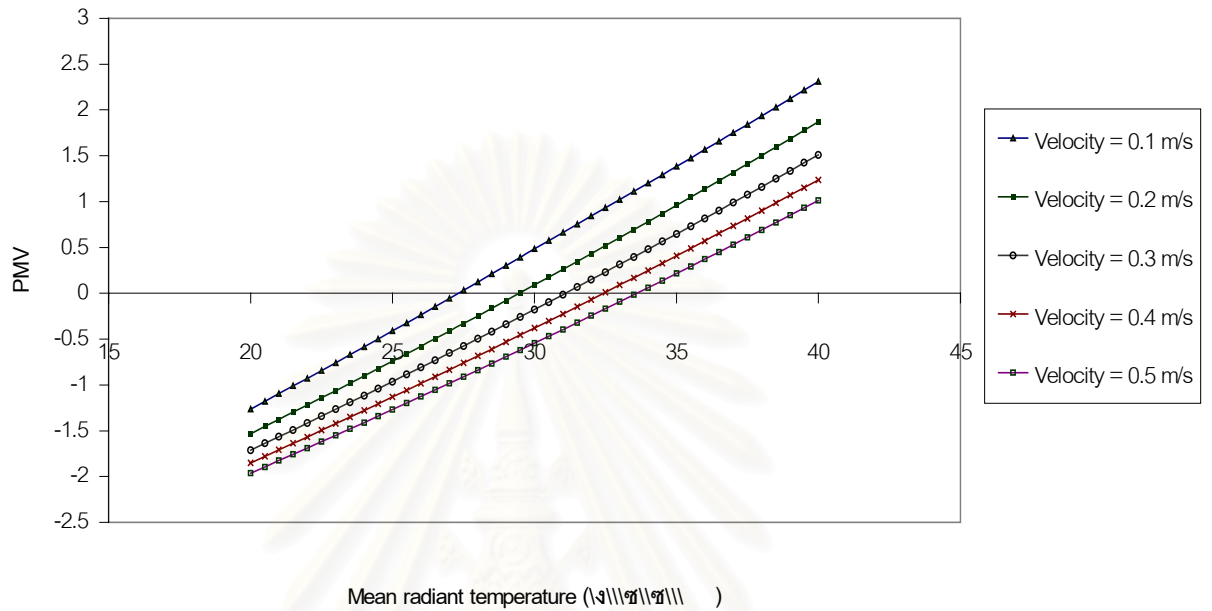


รูปที่ 6.4 แสดงค่า Project area factor สำหรับคนในลักษณะท่านั่ง

สำหรับการคำนวณค่า PMV ที่คิดผลกระทบจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ผ่านหน้าต่าง กระจกเข้ามากระทบผู้อยู่อาศัยในอาคารนั้น จำเป็นต้องใช้ค่า mean radiant temperature ที่รวมผลของค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่แสดงในสมการที่ 3.89 แต่เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณค่า PMV ของ Fanger เป็นแบบจำลองที่ได้จากผลการทดลองที่ไม่มีผลของการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำค่า mean radiant temperature ดังกล่าวมาใช้คำนวณค่า PMV ในสมการที่ 3.81 ได้โดยตรง ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีการ linearized ของ Lyons [11] โดยจะทำการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า PMV ต่อ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า mean radiant temperature และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV ต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผิวคน โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 3.90 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

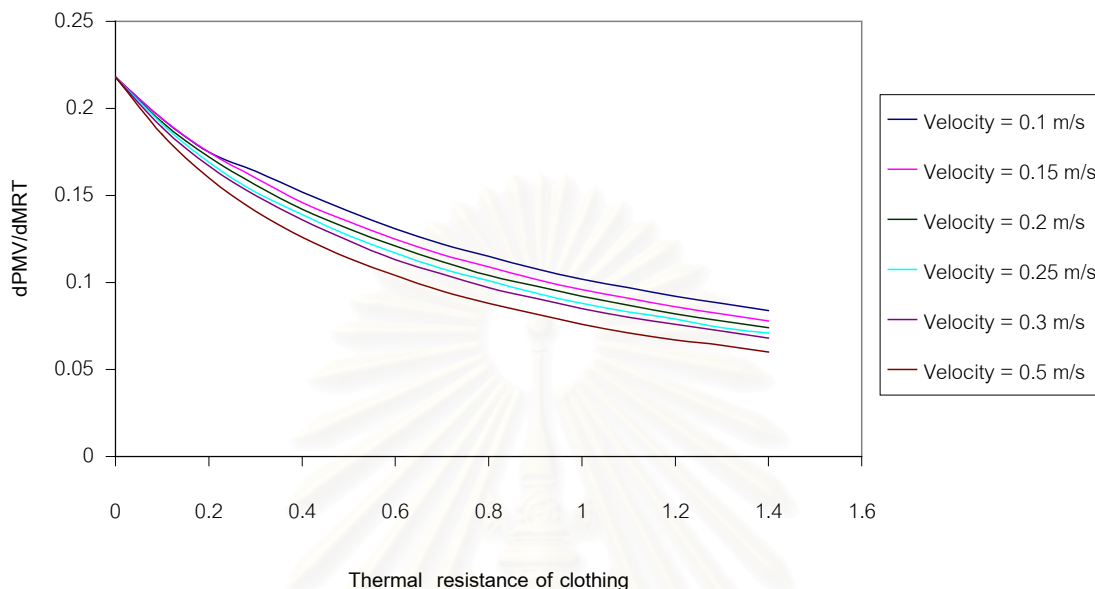
ในการศึกษานี้จึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความสบาย PMV กับค่าตัวแปรอื่น ได้แก่ ค่าความเร็วลม ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า ภายใต้เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมภายนอกที่ถูกกำหนดขึ้นสำหรับประเทศไทย ผลการวิเคราะห์ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 และ รูปที่ 6.6

ในรูปที่ 6.5 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า PMV และค่า mean radiant temperature ซึ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อกำหนดให้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้าและค่าการทำกิจกรรมมีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่างค่า PMV และค่า mean radiant temperature จะมีค่าคงที่ สำหรับการหาค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV ต่อค่า mean radiant temperature (MRT) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าลักษณะของค่าความต้านทานเสื้อผ้าต่างๆสามารถแสดงดังในรูปที่ 6.6 ซึ่งจะเห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV ต่อค่า MRT นั้นจะแปรเป็นเส้นโค้งเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้า ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะลดลงเมื่อความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Mean radiant temperature และค่า PMV สำหรับค่าความต้านทานเชิงความร้อนของเสื้อผ้าเท่ากับ 0.5 clo และค่าการทำกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met ที่ความเร็วลมต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า PMV และค่า mean radiant temperature สำหรับค่าความต้านเชิงความร้อนของเสื้อผ้าค่าต่างๆ และค่าการทำการกิจกรรมเท่ากับ 1.2 met

6.6 การคำนวณโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมื่อกำหนดสถานะและเงื่อนไขต่างๆของการคำนวณแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะใช้วิเคราะห์หาสมรรถนะของหน้าต่างกระจกในแง่ของการส่งผ่านความร้อนและในแง่ของความสบาย ซึ่งขั้นตอนของการทำงานโปรแกรมและรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 และภาคผนวก ค. นอกจากนี้ยังใช้โปรแกรม WINDOW 4.1 สำหรับคำนวณค่าคุณสมบัติทาง optical ของชุดหน้าต่างกระจกที่วิจัย และนำข้อมูลขาออกจากโปรแกรม WINDOW 4.1 ในรูปแบบที่จะนำไปใช้ในโปรแกรม DOE2.1 E เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกโดยวิธีการกำหนดด้วยค่า SC และวิธีการกำหนดด้วยค่า SHGC ซึ่งจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน

บทที่ 7

ผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกในหนึ่งมิติ ในแง่ของการถ่ายเทความร้อนและความสบายของผู้อยู่อาศัย โดยแบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

ข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่มีผลต่อความสบาย

ตารางเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก

คุณสมบัติทางเชิงแสงของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ

การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกโดยวิธีการกำหนดค่า SC และ SHGC

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 ข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ

จากการวิเคราะห์หาข้อมูลภูมิอากาศเพื่อใช้เป็นข้อมูลภูมิอากาศอ้างอิง (หรือข้อมูลภูมิอากาศออกแบบ) ในบทที่ 4 ซึ่งได้เลือกข้อมูลภูมิอากาศโดยการพิจารณาจากข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ 0.4% และข้อมูลภูมิอากาศอื่นที่สอดคล้อง ได้กำหนดสภาวะภูมิอากาศภายในห้องและสภาวะการแต่งตัว และกิจกรรมที่ผู้อยู่อาศัยแล้วนั้น ในหัวข้อนี้จะทำการสรุปว่าข้อมูลภูมิอากาศออกแบบสำหรับสภาวะภายนอกและภายในห้องที่ใช้คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนและหาค่าดัชนีความสบายในงานวิจัยเป็นดังต่อไปนี้

สภาวะอากาศภายนอก

ค่ารังสีตรงแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้าต่างกระจกตั้งฉาก	= 658 W/m ²
ค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวหน้าต่างกระจกตั้งฉาก	= 111 W/m ²
ค่าอุณหภูมิอากาศระเปาะแห้งภายนอก	= 35 °C
ค่าความเร็วลมภายนอก	= 3.8 m/s

สภาวะออกแบบภายใน

สำหรับสภาวะออกแบบภายในเป็นสภาวะที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยเกิดความสบาย โดยสภาวะที่เลือกเป็นสภาวะที่มีค่า PMV = -0.0745 (รู้สึกสบาย) โดยมีค่าต่างๆดังนี้

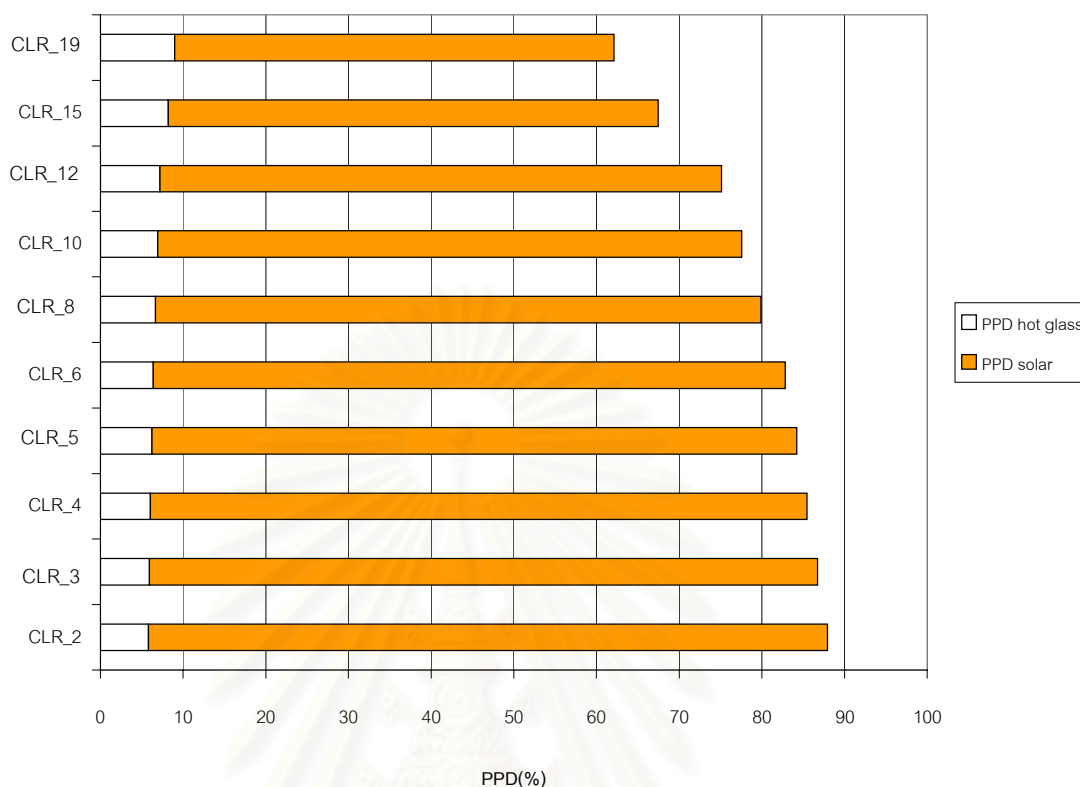
ค่าอุณหภูมิอากาศระเปาะแห้งภายใน	= 25 °C
ค่าความเร็วลมภายใน	= 0.15 m/s
ค่าความชื้นสัมพัทธ์	= 50 %
ค่าความต้านทานเสื้อผ้าเชิงความร้อน	= 0.5 CLO
ค่าการทำกิจกรรม	= 1.2 Met

7.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่มีผลต่อความสบาย

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์ห้ชุดหน้าต่างกระจกชนิดต่างๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของชุดหน้าต่างกระจกที่ใช้ในงานวิจัย (คุณสมบัติของกระจกที่ผู้ผลิตกำหนดให้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก.) ในแง่ของความสบายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยจะทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกซึ่งประกอบด้วยความหนากระจก คุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจก และลักษณะความห่างของช่องอากาศในกรณีของกระจกสองชั้น ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความสบายนี้คือ Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

7.2.1 การเปรียบเทียบผลของความหนาของกระจกใสที่มีต่อค่าดัชนีความสบาย

ค่า PPD ที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบของหน้าต่างกระจกใสที่มีความหนาต่างๆ กันตั้งแต่ 2 มม. ถึง 19 มม. จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกใสที่มีความหนาต่างกัน
(CLR_XX ; CLR = กระจกใส XX=ความหนาเป็น มิลลิเมตร)

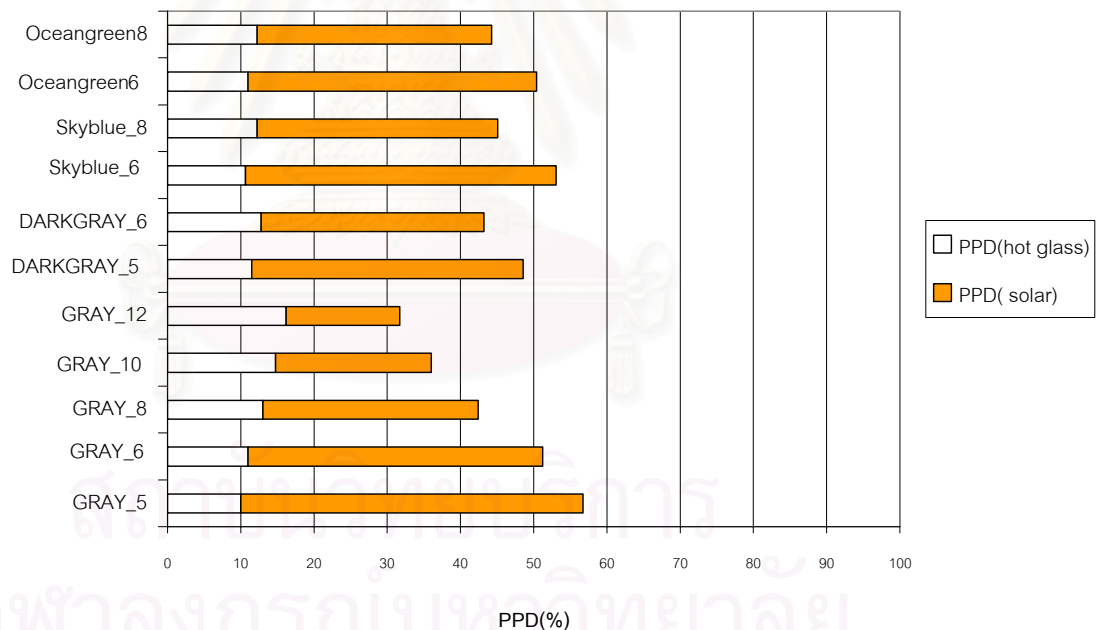
ค่าดัชนีความสบาย PPD ของผู้อยู่อาศัยในห้องที่มีชุดหน้าต่างกระจก ในตำแหน่งที่กำหนดภายใต้สภาวะออกแบบที่กำหนดจะสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือค่าความไม่สบายที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนอุณหภูมิจากกระจกด้านใน และค่าความไม่สบายที่เกิดจากการที่ผู้อยู่อาศัยได้รับการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ผ่านกระจกเข้ามากระทบตัว

จากกราฟรูปที่ 7.1 เป็นกราฟแสดงค่า PPD ของหน้าต่างกระจกใสที่มีความหนาต่างกันได้จากการวิเคราะห์ โดยกราฟจะแยกผลของความไม่สบายเนื่องจากผลของอุณหภูมิจากกระจกด้านใน (PPD(hot glass)) และผลของความไม่สบายเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง (PPD(solar)) โดยจะพบว่าเมื่อหน้าต่างกระจกมีความหนาเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า PPD รวมทั้งหมด มีค่าลดลงตามลำดับ แต่ในขณะเดียวกัน ค่า PPD(hot glass) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความหนาของหน้าต่างกระจก แต่มีค่าเพิ่มขึ้นไม่มาก ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกใสนั้นมีส่วนของค่าการส่งผ่านรังสีความร้อนมากกว่าการดูดกลืนรังสีความร้อน จึงส่งผลทำให้ ค่า PPD ส่วนใหญ่ จะเกิดเนื่องมาจากผลของ

การส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์เข้ามากระทบผิวของผู้อยู่อาศัยจึงทำให้เกิดความไม่สบายเพิ่มมากขึ้น และสำหรับชุดของหน้าต่างกระจกใสที่ใช้ในงานวิจัยจะมีค่า PPD อยู่ระหว่าง 60% ถึงประมาณ 90% นั้นหมายถึงกระจกชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นผนังกรอบอาคารเพราะจะทำให้คนที่อยู่ใกล้เคียงกับผนังของหน้าต่างกระจกใสจะเกิดความไม่สบาย เนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน ถึงแม้ว่าจะควบคุมอุณหภูมิภายในไว้ที่ค่าค่อนข้างสบาย (25 °C)

7.2.2 การเปรียบเทียบผลของคุณสมบัติทาง optical ของกระจกที่มีต่อค่าดัชนีความสบาย

ในหัวข้อนี้จะทำการวิเคราะห์ดัชนีด้านความสบายของชุดหน้าต่างกระจกที่มีคุณสมบัติทาง optical ต่างกันอันได้แก่ ชุดหน้าต่างกระจกที่เคลือบสีแบบต่างๆกัน และมีความหนาต่างกัน โดยชุดหน้าต่างกระจกที่เลือกจะใช้ชุดหน้าต่างกระจกที่ได้จากแคตตาล็อกของบริษัท กระจกไทย-อาซาฮี จำกัด (มหาชน) (แสดงไว้ในภาคผนวก ก.) ผลของการวิเคราะห์ที่แสดงออกมาในรูปแบบของ PPD ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.2

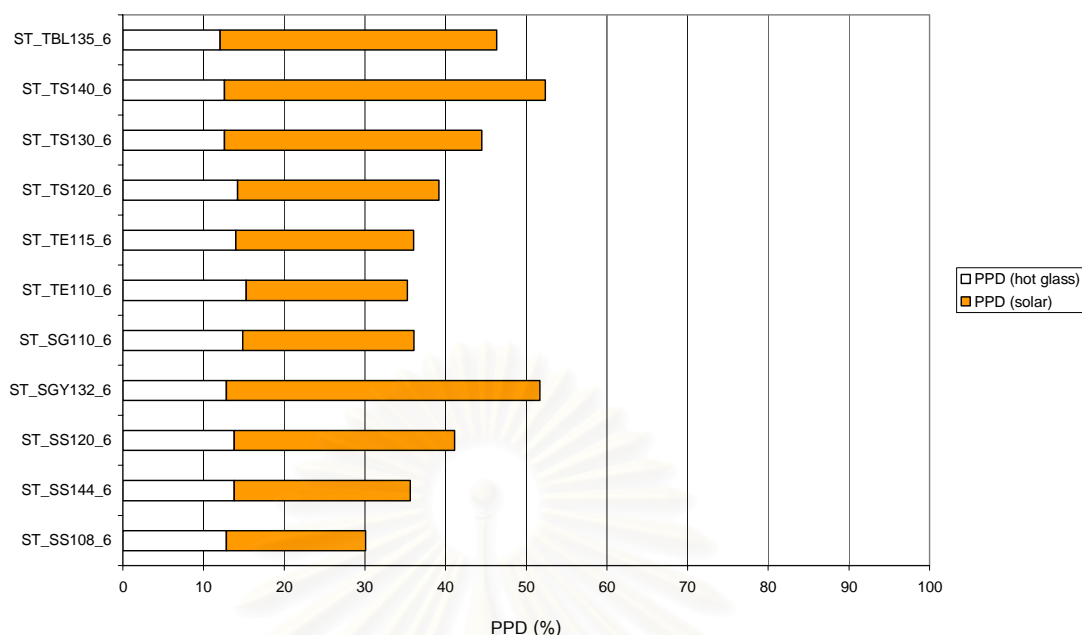


รูปที่ 7.2 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบที่ความหนากระจกต่างกัน (YYYY_XX ; YYYY = ชื่อชนิดกระจกชนิดเคลือบที่เป็นชื่อทางการค้า XX = ความหนาเป็น มิลลิเมตร)

จากกราฟรูปที่ 7.2 เป็นกราฟแสดงค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบที่มีความหนาต่างกัน โดยกราฟจะแยกผลของความไม่สบายเนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน (PPD(hot glass)) และผลของความไม่สบายเนื่องจากรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากกระทบผู้อยู่อาศัยโดยตรง (PPD(solar)) โดยจะพบว่าเมื่อหน้าต่างกระจกมีความหนาเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่า PPD รวมทั้งหมดมีค่าลดลงตามลำดับซึ่งคล้ายกับหน้าต่างกระจกใส แต่ในขณะเดียวกัน ค่า PPD(hot glass) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความหนาของหน้าต่างกระจก โดยจะมีค่าเกิน 10% ซึ่งมากกว่ากรณีของกระจกใส(น้อยกว่า 10%) ดังนั้นกระจกชนิดนี้จึงส่งผลกระทบต่อความสบายของผู้อยู่อาศัยเนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกและความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบต่อความไม่สบายของคนเนื่องจากกระจกชนิดนี้ยังมีสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง และสำหรับชุดของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยจะมีค่า PPD อยู่ระหว่าง 30% ถึงประมาณ 60% ซึ่งมีช่วงต่ำกว่ากรณีของกระจกใส แต่ช่วงของค่า PPD ยังมีค่าที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สบาย กระจกชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นผนังกรอบอาคารเพราะจะทำให้คนที่อยู่ใกล้เคียงกับผนังของหน้าต่างกระจกใสจะเกิดความไม่สบาย เนื่องจากผลของความร้อนที่ผิวของกระจกและรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน

การวิเคราะห์ดำเนินการต่อกับกระจกชนิดสะท้อนแสงแบบต่างๆที่ได้จากผู้ผลิตกระจก โดยกำหนดค่าความหนาของกระจกคงที่ผลการวิเคราะห์ของกระจกชนิดสะท้อนแสงในแง่ความสบาย ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดสะท้อนแสงขนาด 6 มม.

(YY_ZZZZZ_6 ; YY_ZZZZZ = ชื่อทางค้าของกระจกสะท้อนแสง ; 6 = ความหนากระจก 6 มม.)

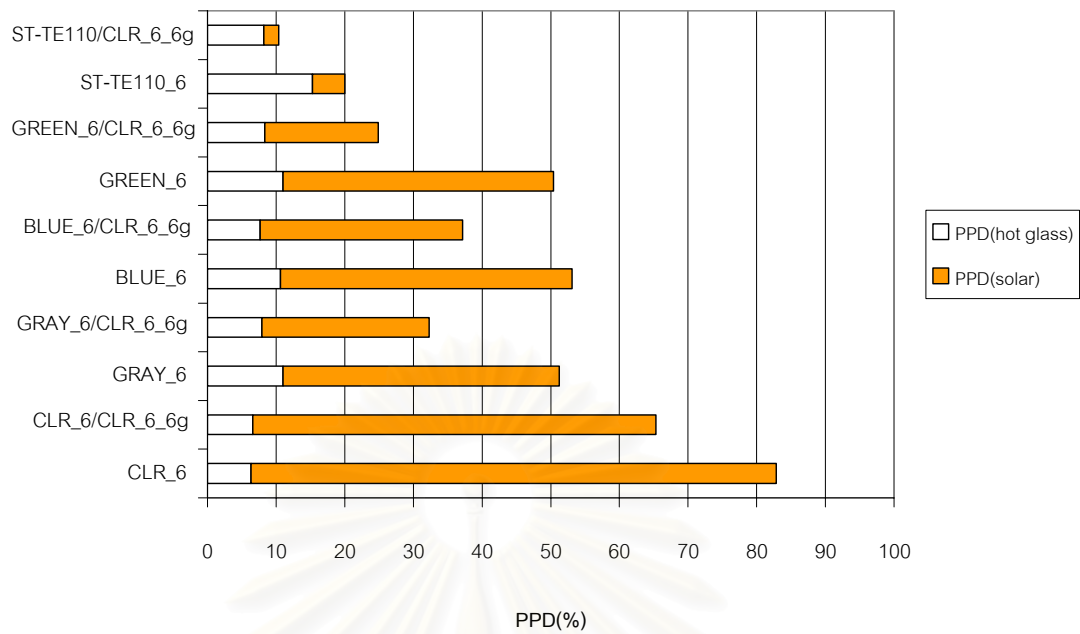
จากกราฟรูปที่ 7.3 เป็นกราฟแสดงค่า PPD ของหน้าต่างกระจกชนิดสะท้อนแสงขนาด 6 มม. ซึ่งผลของกราฟจะมีลักษณะคล้ายกับกราฟของกระจกชนิดเคลือบแต่จะมีค่า PPD ต่ำกว่า แต่ในขณะเดียวกัน ค่า PPD (hot glass) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีค่าเกิน 10% ซึ่งมากกว่ากรณีของกระจกใสและกระจกชนิดเคลือบ ดังนั้นกระจกชนิดนี้ จะส่งผลกระทบต่อความไม่สบายของผู้อยู่อาศัยเนื่องจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่าน โดยผลกระทบต่อความไม่สบายของคนเนื่องจากกระจกชนิดนี้เป็นสาเหตุจากผลกระทบทั้งอุณหภูมิผิวกระจกด้านในและผลของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์พอกัน ซึ่งแตกต่างจากกระจกชนิดอื่น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกชนิดสะท้อนแสงนั้นมีส่วนของค่าการดูดกลืนรังสีความร้อนมากกว่าการส่งผ่านรังสีความร้อน และสำหรับชุดของหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบที่ใช้ในงานวิจัยจะมีค่า PPD อยู่ระหว่าง 20% ถึงประมาณ 40% ซึ่งมีช่วงต่ำกว่ากรณีของกระจกใสและกระจกชนิดเคลือบ แต่ช่วงของค่า PPD ยังมีค่าที่ทำให้ผู้อยู่อาศัยรู้สึกไม่สบายอยู่

7.2.3 การเปรียบเทียบผลของช่องว่างระหว่างกระจกที่มีต่อค่าดัชนีความสบาย

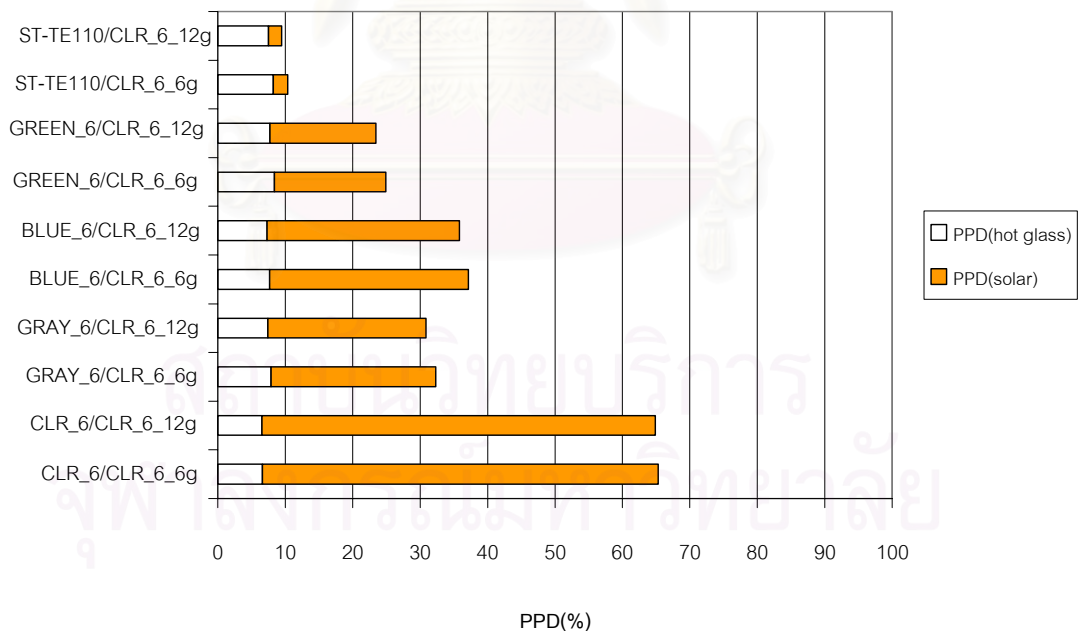
ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาดังผลกระทบในแง่ความสบายของกระจกหนึ่งชั้นและกระจกสองชั้น โดยที่กระจกสองชั้นนั้นจะมีความหนาที่แตกต่างกันไป ผลของการวิเคราะห์กระจกหนึ่งชั้นและสองชั้นที่มีกระจกชั้นในเหมือนกัน และมีช่องอากาศขนาด 6 มม. ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.4

จากรูปที่ 7.4 เป็นกราฟแสดงค่า PPD ของหน้าต่างกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้น ชนิดต่างๆ ขนาด 6 มม. โดยมีกระจกใสขนาด 6 มม. เป็นกระจกชั้นใน ซึ่งผลเมื่อพิจารณากราฟที่ละเอียด (ที่มีกระจกชั้นนอกเหมือนกัน) จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มชั้นอากาศเข้าไประหว่างกระจกทั้งสอง (กระจก 2 ชั้น) จะทำให้ค่า PPD มีค่าลดลง ทั้งในส่วนของค่า PPD(hot glass) และค่า PPD(solar) ยกเว้นของชุดกระจกใสที่มีค่า PPD(hot glass) เท่ากันและจะพบว่าเมื่อกระจกชนิดสะท้อนแสง (ST-TE110_6) ที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน จะทำให้ค่า PPD รวม มีค่าอยู่ในช่วงที่ทำให้คนรู้สึกสบาย (PPD น้อยกว่า 10%) ดังนั้นหน้าต่างกระจกชนิดนี้จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นผนังของกรอบอาคารซึ่งจะทำให้ผู้อยู่อาศัยในบริเวณใกล้กับผนังหน้าต่างกระจกรู้สึกสบาย

ต่อจากนั้นได้ทำการศึกษาผลของความกว้างของช่องว่างซึ่งมีอากาศอยู่ระหว่างกระจกสองชั้นที่มีต่อดัชนีความสบาย PPD ผลของการศึกษาถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.4 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ระหว่างกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้นชนิดช่องว่างอากาศเท่ากับ 6 มม. ของกระจกชนิดต่างๆ



รูปที่ 7.5 แสดงการเปรียบเทียบค่า PPD ของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น สำหรับช่องว่างอากาศ 6 มม. และ 12 มม.

จากกราฟรูปที่ 7.5 พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของช่องอากาศจาก 6 มม. เป็น 12 มม. สำหรับกระจกสองชั้นที่มีกระจกใสขนาด 6 มม. เป็นกระจกชั้นในพบว่า ค่า PPD มีค่าลดลง แต่มีค่าลดลงไม่มาก ดังนั้นความหนาของช่องอากาศที่เพิ่มขึ้นจึงไม่มีผลต่อค่า PPD มากนัก

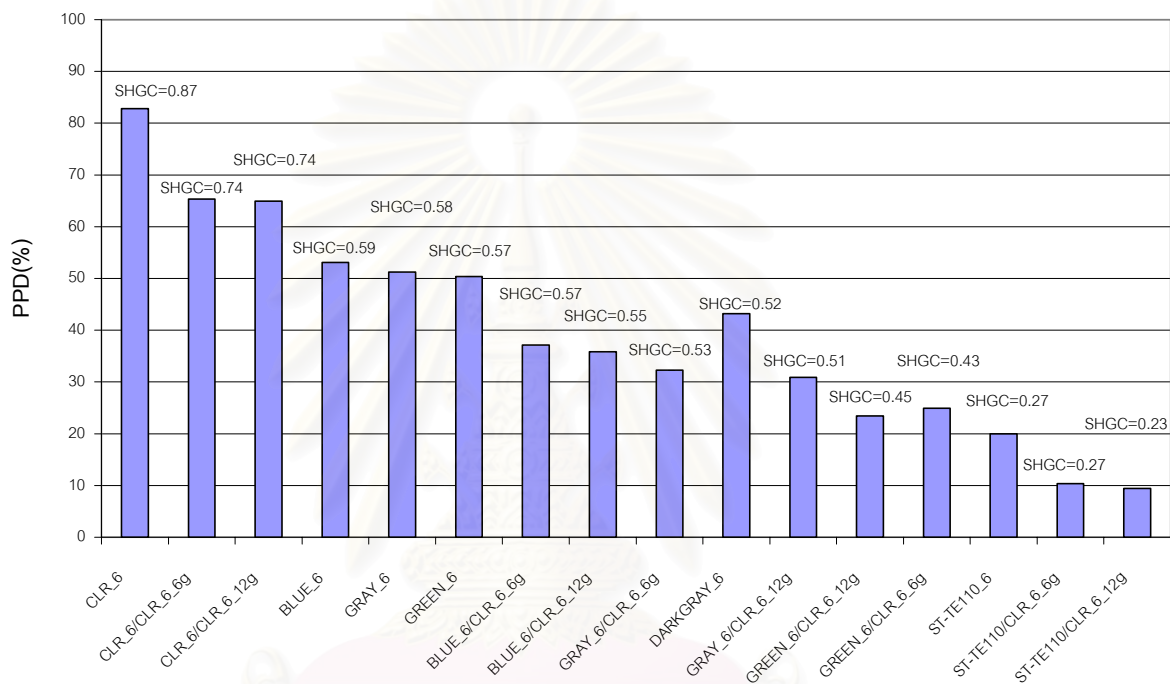
7.3 ตารางเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก

นอกเหนือจากคุณสมบัติของกระจกในเชิงความสบาย ในงานวิจัยนี้ยังทำการหาค่าคุณสมบัติของกระจกในด้านอื่นภายใต้เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมที่เป็นสภาวะออกแบบของกรุงเทพมหานคร โดยได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมใหม่ ค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ของกระจกที่มุมตกกระทบ 0 องศา และค่า Shading Coefficient (SC) ภายใต้เงื่อนไขออกแบบ นอกจากนี้ยังได้ทำการหาค่าคุณสมบัติอื่นที่ไปใช้หาค่าดัชนีความสบาย อาทิเช่น ค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน ค่า Mean radiant temperature ค่าดัชนี PMV, PPD และการเปลี่ยนแปลงของค่า PMV ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าดังกล่าวของกระจกต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยถูกแสดงไว้ในตารางที่ 7.1 ถึงตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.1 ถึงตารางที่ 7.7 เป็นตารางที่แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกและคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงค่าความสบาย ซึ่งจากตารางจะพบว่าสำหรับกระจกใส และกระจกชนิดเคลือบที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะมีค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านในเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์จะสะสมในเนื้อกระจกมากขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิกระจกเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกันจะทำให้ค่า mean radiant temperature และค่า SHGC มีค่าต่ำลงซึ่งจะส่งผลทำให้ค่า PMV มีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าคุณสมบัติของการส่งผ่านของหน้าต่างกระจกใสมีค่ามากกว่าคุณสมบัติของการดูดกลืนรังสีความร้อน ดังนั้นเมื่อกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการส่งผ่านมีค่าลดลงจึงทำให้ค่า mean radiant temperature มีค่าต่ำลง

สำหรับกระจกชนิดสะท้อนแสงเมื่อกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิผิวของกระจกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์สะสมในเนื้อกระจกเพิ่มมากขึ้นและจะทำให้ค่า mean radiant temperature และค่า SHGC มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าคุณสมบัติในการส่งผ่านของหน้าต่างกระจกชนิดนี้มีค่าต่ำกว่า คุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีความร้อนเมื่อกระจกมีความหนาเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ปริมาณของรังสีที่ดูดกลืนไว้มีค่าสูงซึ่งส่งผลให้ค่า mean radiant temperature มีค่าสูงขึ้น

และจากตารางจะพบว่าค่า SHGC ที่ตำแหน่งตั้งฉากและค่า PPD มีค่าแปรผันตามกัน กล่าวคือเมื่อค่ามีค่า SHGC เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่า PPD มีค่าสูงขึ้นด้วย (รู้สึกไม่สบายมากขึ้น) และเมื่อค่า SHGC มีค่าต่ำลงค่า PPD ก็จะมีค่าต่ำลงด้วย ดังนั้นจึงแสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SHGC และค่า PPD โดยได้เรียงลำดับกระจกที่มีค่า SHGC(0) จากมากไปหาน้อย โดยเริ่มจากกระจกชนิด CLR_6 ไปถึงกระจกชนิด ST-TE110/CLR_6_6g ได้ดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 แสดงลำดับค่า PPD ของกระจกชนิดต่างๆโดยเรียงจากกระจกที่มีค่า SHGC มากไปหาน้อย

นอกจากนั้นในตารางที่ 7.1 ถึง ตารางที่ 7.7 จะพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า PMV เมื่อเทียบกับค่าความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจก (q) จะมีอัตราเพิ่มขึ้นตามความหนาของหน้าต่างกระจกที่เพิ่มขึ้นสำหรับกระจกทุกชนิด ซึ่งหมายถึงว่าถ้ากระจกมีความหนาที่เพิ่มขึ้น ความร้อนที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามาก็จะส่งผลเร็วขึ้น โดยจากตารางจะพบว่า ค่า $\frac{dPMV}{dq}$ สำหรับกระจกใสจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น โดยมีค่าประมาณ $0.003 \frac{m^2}{W}$

และจะมีค่าประมาณ $0.005 \frac{m^2}{W}$, $0.01 \frac{m^2}{W}$ สำหรับกระจกชนิดเคลือบและกระจกสะท้อนแสงตามลำดับ ส่วนกระจก 2 ชั้นจะมีค่าอยู่หลายช่วงดังแสดงในตารางสำหรับกระจก 2 ชั้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกใส 1 ชั้น

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	CLR_2mm	6.11	0.89	1.04	33.2	42.4	2.29	88	0.0036
2	CLR_3mm	6.14	0.876	1.02	33.5	42.1	2.25	87	0.0036
3	CLR_4mm	6.16	0.861	1.00	33.9	41.8	2.21	85	0.0037
4	CLR_5mm	6.20	0.85	0.99	34.5	41.6	2.18	84	0.0037
5	CLR_6mm	6.22	0.835	0.97	34.8	41.3	2.14	83	0.0038
6	CLR_8mm	6.27	0.807	0.94	35.6	40.7	2.07	80	0.0038
7	CLR_10mm	6.30	0.786	0.91	36.2	40.3	2.02	78	0.0039
8	CLR_12mm	6.32	0.765	0.89	36.8	39.9	1.96	75	0.0040
9	CLR_15mm	6.42	0.704	0.82	38.6	38.8	1.81	67	0.0043
10	CLR_19mm	6.48	0.664	0.77	39.8	38.0	1.71	62	0.0046

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกเคลือบสี 1 ชั้น

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	GRAY_5mm	6.55	0.617	0.72	41.0	37.0	1.61	57	0.0049
2	GRAY_6mm	6.60	0.576	0.67	43.0	37.0	1.51	51	0.0053
3	GRAY_8mm	6.69	0.511	0.59	45.0	35.0	1.34	42	0.0065
4	GRAY_10mm	6.76	0.458	0.53	46.0	34.0	1.22	36	0.0080
5	GRAY_12mm	6.81	0.419	0.49	47.0	34.0	1.13	32	0.0101
6	DARKGRAY_5mm	6.63	0.554	0.64	43.0	36.0	1.46	49	0.0056
7	DARKGRAY_6mm	6.69	0.516	0.60	44.0	35.0	1.36	43	0.0063
8	Skyblue_6mm	6.59	0.59	0.69	42.0	37.0	1.54	53	0.0052
9	Skyblue_8mm	6.66	0.529	0.62	44.0	36.0	1.39	45	0.0060
10	Oceangreen6mm	6.60	0.566	0.66	43.0	36.0	1.49	50	0.0054
11	Oceangreen8mm	6.66	0.519	0.60	44.0	36.0	1.38	44	0.0061

ตารางที่ 7.3 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	ST_SS108_6mm	6.69	0.236	0.28	44.4	31.1	0.76	17	0.0183
2	ST_SS108_8mm	6.71	0.247	0.29	45.0	31.2	0.79	18	0.0191
3	ST_SS108_10mm	6.73	0.255	0.30	45.4	31.3	0.80	18	0.0196
4	ST_SS108_12mm	6.75	0.264	0.31	45.9	31.4	0.81	19	0.0202
5	ST_SS144_6mm	6.73	0.291	0.34	45.4	32.0	0.89	22	0.0132
6	ST_SS144_8mm	6.74	0.3	0.35	45.8	32.1	0.91	22	0.0136
7	ST_SS144_10mm	6.75	0.305	0.35	46.0	32.2	0.91	23	0.0138
8	ST_SS144_12mm	6.77	0.313	0.36	46.5	32.2	0.93	23	0.0141
9	ST_SS120_6mm	6.73	0.351	0.41	45.4	33.0	1.03	27	0.0096
10	ST_SS120_8mm	6.73	0.357	0.42	45.6	33.0	1.03	28	0.0098
11	ST_SS120_10mm	6.74	0.362	0.42	45.8	33.1	1.04	28	0.0099
12	ST_SS120_12mm	6.75	0.367	0.43	46.1	33.1	1.05	28	0.0100
13	ST_SGY132_6mm	6.69	0.466	0.54	44.4	34.8	1.27	39	0.0067
14	ST_SGY132_8mm	6.69	0.471	0.55	44.6	34.8	1.28	39	0.0068
15	ST_SGY132_10mm	6.70	0.473	0.55	44.7	34.8	1.28	39	0.0068
16	ST_SGY132_12mm	6.70	0.475	0.55	44.7	34.8	1.28	39	0.0068

ตารางที่ 7.3 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น (ต่อ)

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
17	ST_SG110_6mm	6.76	0.287	0.33	46.3	31.9	0.88	21	0.0167
18	ST_SG110_8mm	6.78	0.295	0.34	46.8	32	0.89	22	0.0172
19	ST_SG110_10mm	6.79	0.301	0.35	47.0	32	0.9	22	0.0174
20	ST_SG110_12mm	6.80	0.306	0.36	47.3	32.10	0.91	22	0.0177
21	ST_TE110_6mm	6.78	0.273	0.32	46.7	31.60	0.84	20	0.0216
22	ST_TE110_8mm	6.80	0.282	0.33	47.1	31.70	0.86	21	0.0223
23	ST_TE110_10mm	6.81	0.287	0.33	47.4	31.80	0.87	21	0.0227
24	ST_TE110_12mm	6.81	0.29	0.34	47.6	31.80	0.87	21	0.0231
25	ST_TE115_6mm	6.73	0.295	0.34	45.6	32.00	0.90	22	0.0134
26	ST_TE115_8mm	6.75	0.303	0.35	46.0	32.10	0.91	23	0.0137
27	ST_TE115_10mm	6.76	0.308	0.36	46.2	32.20	0.92	23	0.0139
28	ST_TE115_12mm	6.77	0.313	0.36	46.5	32.20	0.93	23	0.0141
29	ST_TS120_6mm	6.74	0.328	0.38	45.8	32.60	0.97	25	0.0113
30	ST_TS120_8mm	6.75	0.333	0.39	46.0	32.60	0.98	25	0.0114
31	ST_TS120_10mm	6.77	0.341	0.40	46.4	32.70	0.99	26	0.0117
32	ST_TS120_12mm	6.78	0.346	0.40	46.7	32.80	1.00	26	0.0119

ตารางที่ 7.3 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น (ต่อ)

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
33	ST_TS130_6mm	6.68	0.393	0.46	44.2	33.70	1.13	32	0.0076
34	ST_TS130_8mm	6.69	0.398	0.46	44.4	33.80	1.14	32	0.0077
35	ST_TS130_10mm	6.70	0.403	0.47	44.7	33.80	1.14	32	0.0077
36	ST_TS130_12mm	6.71	0.408	0.47	44.9	33.80	1.15	33	0.0078
37	ST_TS140_6mm	6.68	0.473	0.55	44.2	34.90	1.29	40	0.0065
38	ST_TS140_8mm	6.69	0.478	0.56	44.4	34.90	1.29	40	0.0066
39	ST_TS140_10mm	6.69	0.48	0.56	44.5	34.90	1.29	40	0.0066
40	ST_TS140_12mm	6.69	0.482	0.56	44.5	34.90	1.29	40	0.0066
41	ST_TBL135_6mm	6.65	0.414	0.48	43.6	34.10	1.18	34	0.0069
42	ST_TBL135_8mm	6.66	0.419	0.49	43.8	34.10	1.19	35	0.0070
43	ST_TBL135_10mm	6.67	0.424	0.49	44.1	34.20	1.19	35	0.0071
44	ST_TBL135_12mm	6.68	0.428	0.50	44.3	34.20	1.20	35	0.0071

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ช่องอากาศ 6 มม.

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	CLR_6CLR_6	3.76	0.742	0.86	35.5	38.50	1.77	65	0.0040
2	CLR_8CLR_8	3.80	0.706	0.82	37.0	37.70	1.67	60	0.0043
3	GRAY_6CLR_6	3.87	0.531	0.62	38.1	33.90	1.14	32	0.0053
4	GRAY_8CLR_8	3.91	0.47	0.55	39.4	32.50	0.96	24	0.0064
5	BLUE_6CLR_6	3.85	0.565	0.66	37.7	34.60	1.24	37	0.0049
6	BLUE_8CLR_8	3.88	0.523	0.61	38.8	33.70	1.12	32	0.0055
7	GREEN_6CLR_6	3.90	0.475	0.55	38.9	32.60	0.97	25	0.0061
8	GREEN_8CLR_8	3.93	0.425	0.49	39.8	31.60	0.83	20	0.0077

ตารางที่ 7.5 แสดงค่าค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจก 2 ชั้น ช่องอากาศ 12 มม.

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	CLR_6CLR_6	3.33	0.74	0.86	35.3	38.5	1.76	65	0.0040
2	CLR_8CLR_8	3.37	0.703	0.82	36.8	37.7	1.66	60	0.0042
3	GRAY_6CLR_6	3.43	0.507	0.59	37.3	33.7	1.11	31	0.0051
4	GRAY_8CLR_8	3.48	0.441	0.51	38.4	32.3	0.92	23	0.0062
5	BLUE_6CLR_6	3.42	0.545	0.63	37.0	34.4	1.21	36	0.0048
6	BLUE_8CLR_8	3.45	0.501	0.58	38.0	33.5	1.09	30	0.0054
7	GREEN_6CLR_6	3.46	0.446	0.52	37.9	32.4	0.93	23	0.0059
8	GREEN_8CLR_8	3.49	0.391	0.46	38.7	31.3	0.79	18	0.0073

ตารางที่ 7.6 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้น ช่องอากาศ 6 มม.

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	ST-SS108_6mm	3.42	0.202	0.24	36.1	28.7	0.42	9	0.0138
2	ST-SS114_6mm	3.45	0.251	0.29	36.9	29.4	0.53	11	0.0104
3	ST-SS120_6mm	3.45	0.305	0.36	37.3	30.3	0.65	14	0.0080
4	ST-SGY132_6mm	3.45	0.408	0.48	37.5	32.0	0.88	21	0.0061
5	ST-SG110_6mm	3.47	0.233	0.27	37.4	28.9	0.46	9	0.0161
6	ST-TE110_6mm	3.47	0.233	0.27	37.4	28.9	0.46	9	0.0161
7	ST-TE115_6mm	3.45	0.254	0.30	37.0	29.4	0.53	11	0.0105
8	ST-TS120_6mm	3.46	0.283	0.33	37.3	29.9	0.59	12	0.0091
9	ST-TS130_6mm	3.44	0.344	0.40	37.0	31.1	0.75	17	0.0066
10	ST-TS140_6mm	3.45	0.415	0.48	37.5	32.1	0.89	22	0.0060
11	ST-TBL135_6mm	3.44	0.363	0.42	36.8	31.4	0.80	19	0.0062

ตารางที่ 7.7 แสดงค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้น ช่องอากาศ 12 มม.

ลำดับที่	ชนิดกระจก	ค่า U (W/m ²)	ค่า SHGC(0)	SC	อุณหภูมิผิวกระจก (°C)	MRT (°C)	PMV	PPD (%)	dPMV/dq
1	ST-SS108_6mm	3.42	0.202	0.24	36.1	28.7	0.42	9	0.0138
2	ST-SS114_6mm	3.45	0.251	0.29	36.9	29.4	0.53	11	0.0104
3	ST-SS120_6mm	3.45	0.305	0.36	37.3	30.3	0.65	14	0.008
4	ST-SGY132_6mm	3.45	0.408	0.48	37.5	32	0.88	21	0.0061
5	ST-SG110_6mm	3.47	0.233	0.27	37.4	28.9	0.46	9	0.0161
6	ST-TE110_6mm	3.47	0.233	0.27	37.4	28.9	0.46	9	0.0161
7	ST-TE115_6mm	3.45	0.254	0.3	37	29.4	0.53	11	0.0105
8	ST-TS120_6mm	3.46	0.283	0.33	37.3	29.9	0.59	12	0.0091
9	ST-TS130_6mm	3.44	0.344	0.4	37	31.1	0.75	17	0.0066
10	ST-TS140_6mm	3.45	0.415	0.48	37.5	32.1	0.89	22	0.006
11	ST-TBL135_6mm	3.44	0.363	0.42	36.8	31.4	0.8	19	0.0062

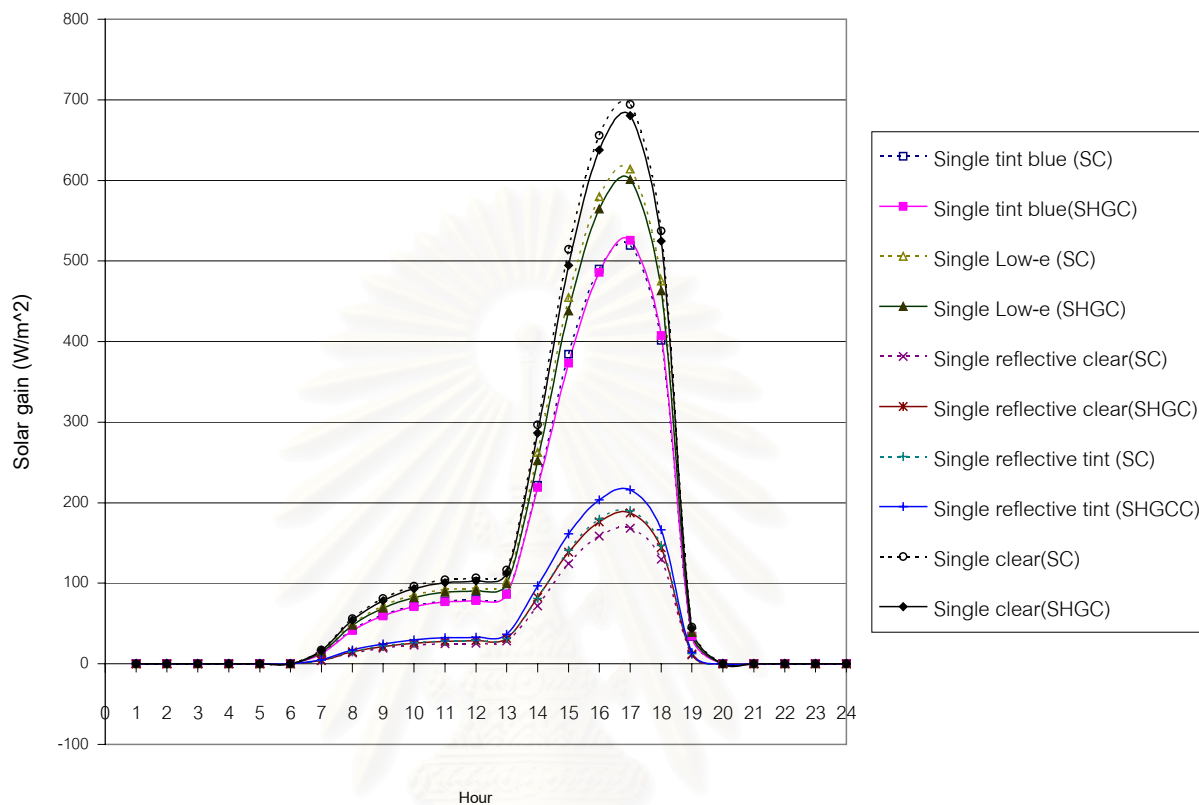
7.4 คุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ

สำหรับการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทาง optical ที่ขึ้นกับมุมตกกระทบและคุณสมบัติเชิงครึ่งทรงกลม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับมุมตกกระทบจากคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่ตำแหน่งตั้งฉากซึ่งได้จากข้อมูลผู้ผลิตกระจกโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ซึ่งใช้วิธีการคำนวณตามโปรแกรม WINDOW 4.1 ตัวโปรแกรมจะทำการคำนวณค่า SHGC ที่มุมตกกระทบที่ 0 องศา ค่า SHGC ที่มุมตกกระทบที่เพิ่มขึ้นทีละ 10 องศา และค่าสำหรับครึ่งทรงกลม hemisphere และในโปรแกรมยังทำการคำนวณ ค่าการส่งผ่านรังสี (Transmittance, T) ค่าการดูดกลืนรังสี (Absorbance, A) และค่าการสะท้อนรังสี (Reflectance, R) ที่แปรตามมุมตกกระทบ ค่าดังกล่าวซึ่งถือเป็นค่าคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกแบบต่างๆ ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ง.1 ถึง ง.6 ในภาคผนวก ง. ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีความสำคัญอย่างมากที่จำเป็นต้องรู้ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่จะให้ผลที่แม่นยำ

7.5 การเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกโดยวิธีการกำหนดค่า SC และ SHGC

ในหัวนี้จะเป็นการแสดงผลของการเปรียบเทียบของการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกจากผลของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนกระจกจากการคำนวณสองวิธีเพื่อยืนยันถึงความสำคัญของการที่จะต้องรู้คุณสมบัติของกระจกในรูปของ Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ซึ่งแปรตามมุมตกกระทบ โดยเฉพาะสำหรับกระจกชนิดใหม่ๆ ที่มีความซับซ้อนในคุณสมบัติทาง optical

การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกสามารถคำนวณได้ 2 วิธีการด้วยกัน คือ การกำหนดค่า SC ซึ่งจะนำไปคูณด้วยค่า SHGF ซึ่งเป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งผ่านหน้าต่างกระจกมาตรฐานขนาด 3 มม. ตามตำแหน่งพิกัดของอาคารและช่วงเวลาในแต่ละวัน และอีกวิธีการหนึ่งคือวิธีการคำนวณโดยกำหนดค่า SHGC ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นกับมุมตกกระทบ โดยวิธีการคำนวณจะอธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยการเปรียบเทียบนี้จะใช้โปรแกรม DOE2.1 E และโปรแกรม WINDOW 4.1 ผลของการคำนวณจะแสดงไว้ในรูปที่ 7.7 ซึ่งเป็นค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกเนื่องจากแสงอาทิตย์ สำหรับหน้าต่างกระจกทึบสีได้ ของวันที่ 21 เมษายน ที่กรุงเทพมหานคร โดยใช้แบบจำลองท้องฟ้าโปร่งใส และความเร็วลมเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที

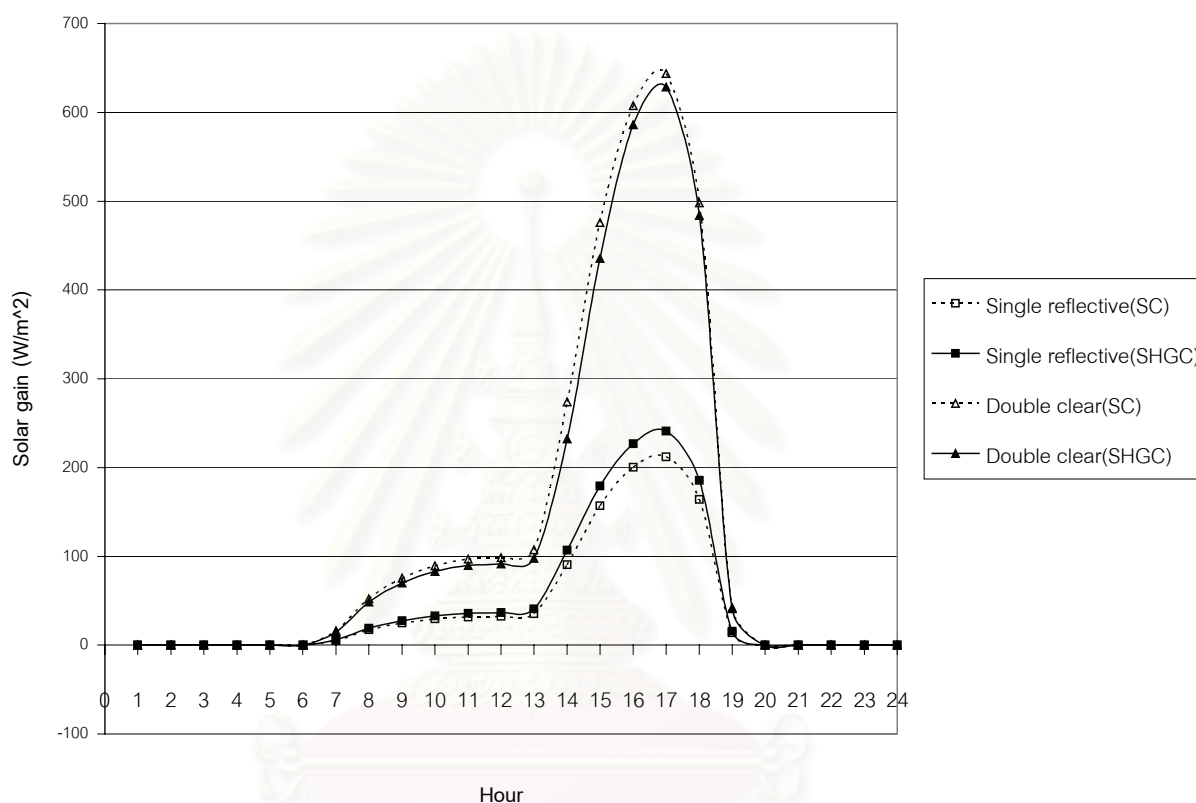


รูปที่ 7.7 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงของหน้าต่างกระจกด้านทิศใต้โดยใช้ภูมิอากาศของ กรุงเทพมหานคร ของวันที่ 21 เมษายน มีความเร็วลมเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที ด้วยวิธี SC และ SHGC

จากรูปที่ 7.7 จะพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกสำหรับการกำหนดแบบ ค่า SC และค่า SHGC จะมีค่าต่างกันสำหรับหน้าต่างกระจกชนิดเคลือบและชนิดสะท้อนแสง ทั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติทาง optical ของหน้าต่างกระจกดังกล่าวมีค่าแตกต่างจากกระจกอ้างอิง เพราะเนื่องจากคุณสมบัติของกระจกอ้างอิงมีส่วนของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์สูง แต่มีค่าการดูดกลืนต่ำ แต่กระจกเคลือบสี และกระจกสะท้อนแสงจะมีคุณสมบัติตรงกันข้าม

ผลของความเร็วมืดที่มีต่อความแม่นยำในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยใช้วิธี SC และ SHGC ถูกศึกษาโดยใช้กระจกสะท้อนแสงและกระจกสองชั้นชนิดกระจกใสเป็นตัวอย่งการเปรียบเทียบ รูปที่ 7.8 แสดงถึงผลของการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของกระจกสองชนิดด้วยวิธีคำนวณสองแบบที่มีความเร็วลมเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะเห็นว่าค่าการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงของ

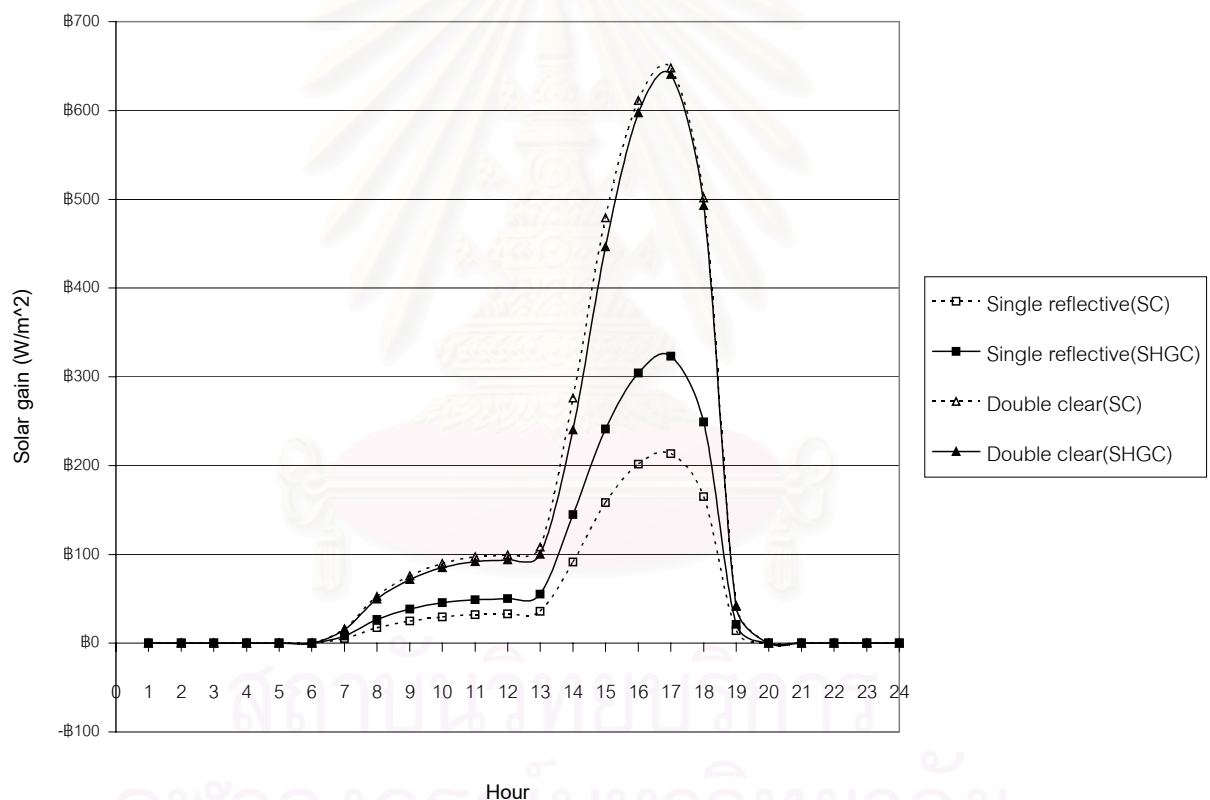
กระจกใส 2 ชั้นที่คำนวณโดยวิธีการกำหนดค่า SC จะมีค่าสูงกว่าวิธีการกำหนดด้วยค่า SHGC ซึ่งสูงที่สุดถึง 18% ที่เวลา 14:00น. และสำหรับกระจกแบบสะท้อนแสงจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณโดยวิธีการกำหนดค่า SC ต่ำกว่าวิธีการกำหนดด้วยค่า SHGC ถึง 16% ที่เวลา 14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มุมตกกระทบบมีค่าสูง



รูปที่ 7.8 แสดงการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงผ่านหน้าต่างกระจกแบบสะท้อนแสงและแบบกระจกสองชั้นที่หันหน้าด้านทิศตะวันตกโดยใช้ภูมิอากาศของกรุงเทพฯของวันที่ 21 เมษายน ความเร็วลม 3.4 เมตรต่อวินาที ด้วยวิธี SC และ SHGC

สำหรับรูปที่ 7.9 จะแสดงถึงผลของการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมงของกระจกสองชนิดด้วยวิธีการแบบเดียวกับในที่แสดงไว้ในรูปที่ 7.8 ยกเว้นแต่เปลี่ยนค่าความเร็วลมจาก 3.4 เมตรต่อวินาที มาเป็น 0 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 7.9 จะเห็นว่าเมื่อสภาวะภายนอกแตกต่างจากค่ามาตรฐานอ้างอิง (ซึ่งในกรณีนี้คือ เปลี่ยนสภาวะของความเร็วลมจาก 3.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมมาตรฐานที่ใช้ในการนิยาม ค่าในการคำนวณด้วยวิธี SC มาเป็น 0 เมตรต่อวินาที) จะเห็นว่าค่าการถ่ายเทความร้อนรายชั่วโมง ของกระจกใส 2 ชั้นที่คำนวณโดยวิธีการกำหนดค่า SC จะมีค่าสูงกว่าวิธีการกำหนดด้วยค่า SHGC ซึ่ง สูงสุดถึง 15% ที่เวลา 14:00น. และสำหรับกระจกแบบสะท้อนแสงจะมีค่าการถ่ายเทความร้อนที่ คำนวณโดยวิธีการกำหนดค่า SC ต่ำกว่าวิธีการกำหนดด้วยค่า SHGC ถึง 37% ที่เวลา 14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มมตกกระทบมีค่าสูง



รูปที่ 7.9 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกแบบสะท้อนแสงและกระจก 2 ชั้น ที่หันหน้าไปด้านทิศตะวันตกโดยใช้ภูมิอากาศของกรุงเทพฯ ในวันที่ 21 เมษายนความเร็วลม 0 เมตรต่อวินาที

จากผลของการเปรียบเทียบดังกล่าวอาจสามารถกล่าวได้ว่าการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการที่แม่นยำขึ้น โดยการนำเอาคุณสมบัติที่มุมตกกระทบต่างๆ นำมาใช้ โดยเฉพาะการนำวิธี Solar Heat gain Coefficient (SHGC) มาใช้ ย่อมให้ผลลัพธ์แม่นยำกว่า โดยเฉพาะกระจกชนิดเคลือบ กระจกสะท้อนแสง และกระจกสองชั้น ผลการวิเคราะห์ที่เป็นกระจกชนิดเคลือบหรือกระจกสะท้อนแสงต่างๆ ซึ่งจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นชัดว่าการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ค่าคุณสมบัติของกระจกเพียงค่าเดียว (ดังที่แสดงไว้ในแคตตาล็อกของผู้ผลิตส่วนใหญ่) คือ ค่า SC นั้นไม่เหมาะสมสำหรับกระจกดังกล่าว และพบว่าการใช้ค่าคุณสมบัติของกระจกเพียงค่าเดียวไปครอบคลุมคุณสมบัติของกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบต่างๆ นั้นยังมีค่าแม่นยำเฉพาะกระจกใสเท่านั้น

7.6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยที่ได้กำหนดค่าข้อมูลภูมิอากาศออกแบบเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อพิจารณาผลของคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกในแง่ของความสบายและได้ทำการจัดหาคุณสมบัติอื่นๆ ด้วย

จากการวิเคราะห์จะสรุปได้ว่ากระจกที่ได้รับแสงอาทิตย์โดยตรงจะก่อให้เกิดความไม่สบายอย่างมากแม้ว่ามีการรักษาอุณหภูมิภายในห้องให้อยู่ในสภาวะที่สบาย (25 °C) ชนิดของกระจกที่มีผลต่อการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ที่มากกระทบต่อผู้อยู่อาศัยในตำแหน่งที่กำหนด จากการวิเคราะห์พบว่ากระจกใสจะมีความไม่สบายสูงสุด ในขณะที่กระจกชนิดเคลือบและกระจกสะท้อนแสงจะมีความไม่สบายน้อยกว่ากระจกใสแต่จะมีค่าความไม่สบายเนื่องจากอุณหภูมิผิวกระจกมากกว่ากระจกใส และสำหรับกระจก 2 ชั้น ที่ใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกแผ่นนอกและมีช่องอากาศ 6 มม. และกระจกใสด้านในจะมีดัชนีความสบาย PPD อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

นอกจากนั้นในการวิเคราะห์นี้ยังได้พัฒนาค่าตัวพารามิเตอร์ที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของชุดกระจกที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนและหาค่าความสบายอีกหลายตัวโดยอ้างอิงกับภูมิอากาศออกแบบของกรุงเทพฯ ค่าดังกล่าวได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ค่า Solar Heat gain Coefficient (SHGC) ที่แปรตามมุมตกกระทบ ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการดูดกลืนรังสี และค่าการสะท้อนรังสีของกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ Shading Coefficient (SC) ค่าอุณหภูมิผิวกระจกที่นำไปใช้ในการคำนวณค่าความสบาย ค่า Mean radiant temperature ค่าดัชนี PMV ค่

ค่าดัชนี PPD และยังคงคำนวณค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของดัชนี PMV ต่อความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะสามารถนำไปคำนวณค่า PMV ในกรณีที่มีความร้อนผ่านกระจกเปลี่ยนแปลงไป

นอกจากนั้นในท้ายสุดยังได้มีการแสดงถึงผลการคลาดเคลื่อนของค่าการถ่ายเทความร้อน ผ่านหน้าต่างกระจกหากใช้ค่าคุณสมบัติตัวเดียว SC ในการคำนวณ แทนที่จะใช้ค่าคุณสมบัติที่แปรตามมุมตกกระทบมาคำนวณ โดยเฉพาะกระจกที่พิจารณาไม่ใช่กระจกใส

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่ายังมีอีกหลายสิ่งที่จะต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- 1) ข้อมูลภูมิอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากข้อมูลภูมิอากาศที่เก็บบันทึกไว้เป็นจำนวน 12 ปี คือ ช่วงระหว่าง พ.ศ. 2531 ถึง พ.ศ. 2542 ดังนั้นถ้าต้องการภูมิอากาศออกแบบที่มีความแม่นยำสูง จะต้องเพิ่มจำนวนปีที่น่ามาคัดเลือก และควรจะครอบคลุมถึงปีล่าสุดด้วย
- 2) การศึกษาพฤติกรรมของคนซึ่งอาศัยภายในอาคารต่อผลกระทบจากการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่ส่ง ผ่านหน้าต่างกระจกเข้ามากระทบผู้อยู่อาศัยภายในอาคารว่า เมื่อมีแสงอาทิตย์ส่งผ่านหน้าต่าง กระจกจนกระทั่งรู้สึกไม่สบายแล้วผู้อยู่อาศัยจะมีพฤติกรรมอย่างไร เช่น ปิดผ้าม่าน หรือเดินไปที่อื่น
- 3) สามารถนำขั้นตอนการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไปประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกชายชั่วโมง เพื่อที่จะได้ทราบถึงค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกที่ขึ้นกับคุณสมบัติของกระจกตามมุมตกกระทบ และยังทราบค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิกระจกชายชั่วโมงเพื่อใช้สำหรับในการวิเคราะห์ค่าความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) ต่อไป
- 4) ตารางแสดงค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกที่ได้จากผู้ผลิตกระจกควรที่จะระบุค่าคุณสมบัติทาง optical ที่แปรตามมุมตกกระทบ เพื่อที่จะให้ผู้ที่เกี่ยวข้องนำค่าดังกล่าวไปวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกได้แม่นยำยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook of Fundamentals. USA ,1997.
2. Fanger, P.O. Thermal Comfort analysis and applications in environmental engineering. Kansas State University : McGraw-Hill, 1970.
3. Rubin, M. Calculating heat transfer through windows. Energy Research Vol. 6,(1982) : 341-349.
4. Arasteh, D.; Reilly, S.; and Rubin, M. A versatile procedure for calculating heat transfer through windows. ASHRAE Transactions Vol. 95, Part 2, (1989) : 755-765.
5. Fuller, R. A. Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses. ASHRAE Transactions Vol. 97, Part 2, (1991) : 1129-1137.
6. Finlayson, E.; Arasteh, D.; Huizenga, C.; Rubin, M.; Reilly, S. Window 4.0: Documentation of Calculation Procedures. Lawrence Berkeley Laboratory Report_ 33943.,August 1993.
7. Jimenez, J.I.; and Castro, Y. Solar radiation on sloping surfaces with different orientations in GRANADA,SPAIN. Solar Energy Vol. 28,(1982) : 257-262.
8. Bjarne, W.; Olesen, W. Guidelines for comfort. ASHRAE Journal (August 2000) : 41- 46.
9. Busch, J.F. Thermal responses to the Thai office environment. ASHRAE Transactions (1990) : 859-872.
10. Athienitis, A.K. A study of the effects of solar radiation on the indoor environment. ASHRAE Transaction (1990) : 257-261.
11. Lyons, Peter R. Window performance for human thermal comfort. ASHRAE Transactions (2000) : 594-602.
12. Rubin, M. Solar optical properties of windows. Energy Research Vol 6,(1982) : 123-133.
13. ASTM E891-87, Standard tables for terrestrial direct normal solar spectral irradiance for air mass 1.5., 1987.
14. ASTM E308-90, Standard test method for computing the colors of objects by using the CIE system., 1990.

15. Elsherbiny, S.M.;Raithby, G.D.; and Hollands, K.G.T. Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers. ASME Journal of heat transfer, Vol. 104 ,(1982) : 96-102.
16. ASHRAE-Standard ANSI/ASHRAE 55-1981. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.,1981.
17. สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ. ข้อมูลภูมิอากาศมาตรฐานสำหรับใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์
ในการทำนายการใช้พลังงานของอาคาร, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย,
 ธันวาคม 2542.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ตารางแสดงคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าของผู้ผลิตกระจก

ค่าคุณสมบัติของกระจกที่แสดงในตารางที่ ก.1 ถึงตารางที่ ก.5 เป็นค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าโดยมีสภาวะอากาศ 2 เงื่อนไขคือ เงื่อนไขในฤดูร้อน และเงื่อนไขในฤดูหนาวของ ASHRAE ที่ตำแหน่งตั้งฉาก ($\theta=0^\circ$)

เงื่อนไขฤดูหนาว

อุณหภูมิอากาศภายนอกเท่ากับ	-17.8 °C
อุณหภูมิอากาศภายในเท่ากับ	21.1 °C
ค่าความเร็วลมเท่ากับ	6.7 m/s
ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเท่ากับ	0 W/m ²

เงื่อนไขฤดูร้อน

อุณหภูมิอากาศภายนอกเท่ากับ	31.7 °C
อุณหภูมิอากาศภายในเท่ากับ	23.9 °C
ค่าความเร็วลมเท่ากับ	3.4 m/s
ค่ารังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเท่ากับ	783 W/m ²

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกใส 1 ชั้น

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
CLR_2	2	0.91	0.07	0.88	0.08	0.04	691	6.60	5.84	1.02
CLR_3	3	0.90	0.07	0.86	0.08	0.06	680	6.56	5.84	1.00
CLR_4	4	0.89	0.07	0.84	0.08	0.08	670	6.50	5.83	0.99
CLR_5	5	0.89	0.07	0.82	0.07	0.11	660	6.44	5.83	0.97
CLR_6	6	0.88	0.07	0.80	0.07	0.13	650	6.40	5.83	0.96
CLR_8	8	0.87	0.07	0.76	0.07	0.17	628	6.29	5.80	0.92
CLR_10	10	0.85	0.07	0.73	0.07	0.20	610	6.19	5.76	0.90
CLR_12	12	0.84	0.07	0.70	0.07	0.23	594	6.09	5.72	0.87
CLR_15	15	0.81	0.07	0.61	0.07	0.32	574	5.95	5.67	0.84
CLR_19	19	0.78	0.07	0.55	0.07	0.38	542	5.78	5.58	0.79

ตารางที่ ก.2 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
GRAY_5	5	0.44	0.06	0.49	0.06	0.45	483	6.44	6.26	0.69
GRAY_6	6	0.38	0.05	0.43	0.06	0.51	451	6.40	6.27	0.64
GRAY_8	8	0.28	0.05	0.33	0.05	0.62	421	6.29	6.26	0.57
GRAY_10	10	0.20	0.05	0.25	0.05	0.70	377	6.19	6.22	0.52
GRAY_12	12	0.15	0.05	0.19	0.05	0.76	313	6.09	6.19	0.57
DARKGRAY_5	5	0.20	0.05	0.40	0.06	0.54	467	6.44	6.28	0.66
DARKGRAY_6	6	0.15	0.04	0.34	0.05	0.61	449	6.40	6.28	0.63
BLUE_6	6	0.58	0.06	0.45	0.06	0.49	478	6.18	6.21	0.68
BLUE_8	8	0.50	0.06	0.36	0.06	0.58	430	6.09	6.21	0.61
GREEN_6	6	0.72	0.07	0.42	0.07	0.51	460	6.18	6.23	0.65
GREEN_8	8	0.67	0.07	0.35	0.07	0.58	423	6.09	6.21	0.59

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-SS108_6	6	0.08	0.38	0.06	0.33	0.61	166	4.70	4.51	0.21
ST-SS108_8	8	0.08	0.37	0.06	0.30	0.64	171	4.64	4.50	0.21
ST-SS108_10	10	0.08	0.37	0.06	0.28	0.66	172	4.58	4.48	0.22
ST-SS108_12	12	0.08	0.36	0.06	0.26	0.68	174	4.52	4.45	0.22
ST-SS144_6	6	0.14	0.29	0.10	0.24	0.66	217	5.12	5.03	0.28
ST-SS144_8	8	0.14	0.28	0.10	0.22	0.68	220	5.06	5.00	0.29
ST-SS144_10	10	0.14	0.28	0.10	0.21	0.69	221	4.99	4.97	0.29
ST-SS144_12	12	0.14	0.27	0.10	0.19	0.71	222	4.92	4.93	0.29
ST-SS120_6	6	0.20	0.23	0.16	0.18	0.66	267	5.30	5.23	0.36
ST-SS120_8	8	0.20	0.23	0.16	0.17	0.67	267	5.23	5.19	0.36
ST-SS120_10	10	0.20	0.22	0.16	0.16	0.68	267	5.15	5.14	0.36

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-SS120_12	12	0.20	0.22	0.16	0.15	0.69	267	5.09	5.09	0.36
ST-SGY132_6	6	0.32	0.12	0.29	0.10	0.61	365	5.77	5.69	0.51
ST-SGY132_8	8	0.32	0.12	0.29	0.09	0.62	365	5.67	5.63	0.51
ST-SGY132_10	10	0.32	0.12	0.29	0.09	0.62	364	5.59	5.57	0.51
ST-SGY132_12	12	0.32	0.12	0.29	0.09	0.62	362	5.51	5.50	0.51
ST-SG110_6	6	0.10	0.21	0.08	0.21	0.71	205	4.88	4.80	0.26
ST-SG110_8	8	0.10	0.20	0.08	0.19	0.73	207	4.81	4.78	0.27
ST-SG110_10	10	0.10	0.19	0.08	0.18	0.74	207	4.76	4.74	0.27
ST-SG110_12	12	0.10	0.19	0.08	0.17	0.75	207	4.70	4.71	0.27
ST-TE110_6	6	0.10	0.19	0.06	0.21	0.73	191	4.81	4.74	0.24
ST-TE110_8	8	0.10	0.19	0.06	0.19	0.75	193	4.76	4.72	0.25

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-TE110_10	10	0.10	0.18	0.06	0.18	0.76	194	4.70	4.70	0.25
ST-TE110_12	12	0.10	0.23	0.06	0.17	0.77	194	4.64	4.66	0.25
ST-TE115_6	6	0.15	0.23	0.10	0.23	0.67	217	5.06	4.98	0.28
ST-TE115_8	8	0.15	0.22	0.10	0.21	0.69	220	5.00	4.94	0.29
ST-TE115_10	10	0.15	0.22	0.10	0.20	0.70	221	4.93	4.91	0.29
ST-TE115_12	12	0.15	0.21	0.10	0.19	0.71	221	4.87	4.87	0.29
ST-TS120_6	6	0.20	0.20	0.13	0.19	0.68	244	5.15	5.08	0.32
ST-TS120_8	8	0.20	0.19	0.13	0.18	0.69	244	5.08	5.05	0.33
ST-TS120_10	10	0.20	0.19	0.13	0.16	0.71	247	5.01	5.01	0.33
ST-TS120_12	12	0.20	0.15	0.13	0.15	0.72	248	4.95	4.97	0.33
ST-TS130_6	6	0.30	0.15	0.22	0.18	0.60	308	5.62	5.52	0.42

ตารางที่ ก.3 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-TS130_8	8	0.30	0.15	0.22	0.17	0.61	309	5.53	5.48	0.42
ST-TS130_10	10	0.30	0.15	0.22	0.16	0.62	309	5.47	5.42	0.42
ST-TS130_12	12	0.30	0.14	0.22	0.15	0.63	309	5.38	5.37	0.42
ST-TS140_6	6	0.40	0.10	0.30	0.10	0.60	371	5.77	5.67	0.52
ST-TS140_8	8	0.40	0.10	0.30	0.09	0.61	371	5.67	5.62	0.52
ST-TS140_10	10	0.40	0.10	0.30	0.09	0.61	369	5.59	5.56	0.52
ST-TS140_12	12	0.40	0.10	0.30	0.09	0.61	367	5.51	5.49	0.51
ST-TBL135_6	6	0.35	0.21	0.25	0.18	0.57	324	5.62	5.50	0.45
ST-TBL135_8	8	0.35	0.21	0.25	0.17	0.58	324	5.53	5.45	0.45
ST-TBL135_10	10	0.35	0.20	0.25	0.16	0.59	324	5.47	5.40	0.45
ST-TBL135_12	12	0.35	0.20	0.25	0.15	0.60	326	5.38	5.35	0.45

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกใส เป็นกระจกด้านใน

ชนิดกระจก	ช่องว่างอากาศ (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
CLR_6 CLR_6	6	0.78	0.14	0.61	0.11	0.28	541	3.20	3.56	0.81
CLR_6 CLR_6	12	0.78	0.14	0.61	0.11	0.28	540	2.76	3.18	0.82
CLR_8 CLR_8	6	0.76	0.12	0.58	0.11	0.31	525	3.16	3.53	0.79
CLR_8 CLR_8	12	0.76	0.12	0.58	0.11	0.31	524	2.72	3.15	0.79
GRAY_6 CLR_6	6	0.34	0.06	0.34	0.07	0.59	364	3.20	3.67	0.53
GRAY_6 CLR_6	12	0.34	0.06	0.34	0.07	0.59	356	2.76	3.28	0.52
GRAY_8 CLR_8	6	0.24	0.06	0.25	0.06	0.69	310	3.16	3.65	0.45
GRAY_8 CLR_8	12	0.24	0.06	0.25	0.06	0.69	301	2.72	3.27	0.44
BLUE_6 CLR_6	6	0.13	0.04	0.27	0.06	0.67	319	3.20	3.70	0.46
BLUE_6 CLR_6	12	0.13	0.04	0.27	0.06	0.67	310	2.76	3.31	0.45
BLUE_8 CLR_8	6	0.51	0.09	0.35	0.07	0.58	374	3.20	3.66	0.55

ตารางที่ ก.4 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกใส เป็นกระจกด้านใน (ต่อ)

ชนิดกระจก	ช่องว่างอากาศ (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
BLUE_8 CLR_8	12	0.44	0.08	0.28	0.07	0.65	316	2.72	3.26	0.46
GREEN_6 CLR_6	6	0.64	0.06	0.33	0.08	0.59	358	3.20	3.66	0.52
GREEN_6 CLR_6	12	0.64	0.06	0.33	0.08	0.59	350	2.76	3.28	0.51
GREEN_8 CLR_8	6	0.59	0.08	0.27	0.08	0.65	318	3.16	3.63	0.46
GREEN_8 CLR_8	12	0.59	0.08	0.27	0.08	0.65	309	2.72	3.26	0.45

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกด้านนอกและกระจกเป็นกระจกใสด้านใน

ชนิดกระจก	ช่องว่าง อากาศ (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-SS108_6 CLR_6	6	0.07	0.38	0.05	0.33	0.62	129	2.87	3.23	0.16
ST-SS108_6 CLR_6	12	0.07	0.38	0.05	0.33	0.62	114	2.30	2.68	0.15
ST-SS144_6 CLR_6	6	0.13	0.29	0.08	0.24	0.68	164	2.96	3.38	0.22
ST-SS144_6 CLR_6	12	0.13	0.29	0.08	0.24	0.68	150	2.43	2.87	0.20
ST-SS120_6 CLR_6	6	0.18	0.23	0.13	0.18	0.69	205	3.00	3.44	0.28
ST-SS120_6 CLR_6	12	0.18	0.23	0.13	0.18	0.69	192	2.49	2.96	0.27
ST-SGY132_6 CLR_6	6	0.29	0.13	0.23	0.11	0.66	287	3.12	3.58	0.41
ST-SGY132_6 CLR_6	12	0.29	0.13	0.23	0.11	0.66	277	2.65	3.16	0.40
ST-SG110_6 CLR_6	6	0.09	0.21	0.06	0.21	0.73	154	2.91	3.32	0.20
ST-SG110_6 CLR_6	12	0.09	0.21	0.06	0.21	0.73	139	2.36	2.79	0.19
ST-TE110_6 CLR_6	6	0.09	0.19	0.05	0.21	0.74	143	2.88	3.29	0.19

ตารางที่ ก.5 แสดงค่าคุณสมบัติของกระจกตัวเปล่าชนิดกระจก 2 ชั้น แบบกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกด้านนอกและกระจกเป็นกระจกใสด้านใน
(ต่อ)

ชนิดกระจก	ช่องว่าง อากาศ (มม.)	Visible rays		Solar Energy			RHG W/m ²	ค่า U (W/m ²)		ค่า SC
		T	R	T	R	A		ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	
ST-TE110_6 CLR_6	12	0.09	0.19	0.05	0.21	0.74	126	2.32	2.74	0.17
ST-TE115_6 CLR_6	6	0.14	0.23	0.08	0.23	0.69	164	2.93	3.34	0.22
ST-TE115_6 CLR_6	12	0.14	0.23	0.08	0.23	0.69	150	2.39	2.83	0.20
ST-TS120_6 CLR_6	6	0.18	0.21	0.10	0.19	0.71	188	3.00	3.44	0.26
ST-TS120_6 CLR_6	12	0.18	0.21	0.10	0.19	0.71	174	2.49	2.96	0.24
ST-TS130_6 CLR_6	6	0.27	0.16	0.18	0.18	0.64	239	3.07	3.51	0.34
ST-TS130_6 CLR_6	12	0.27	0.16	0.18	0.18	0.64	228	2.58	3.05	0.32
ST-TS140_6 CLR_6	6	0.36	0.11	0.24	0.11	0.65	293	3.12	3.58	0.42
ST-TS140_6 CLR_6	12	0.36	0.11	0.24	0.11	0.65	283	2.65	3.16	0.41
ST-TBL135_6 CLR_6	6	0.32	0.25	0.20	0.18	0.62	255	3.08	3.52	0.36
ST-TBL135_6 CLR_6	12	0.32	0.25	0.20	0.18	0.62	245	2.60	3.07	0.35

ภาคผนวก ข.

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ในแนวระดับกับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ ASHRAE (K_A) และค่าอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีกระจายแสงอาทิตย์กับค่ารังสีรวมแสงอาทิตย์ (K_D)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละกลุ่มเดือน (จาก สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ[17]) สามารถสรุปได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เดือนเมษายน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงเวลาที่ 8:00 น. - 17:00 น. คือ

$$K_D = -0.4086 \cdot K_A^2 - 0.0195 \cdot K_A + 0.9233 \quad ; \quad K_A \leq 0.42$$

$$K_D = -0.0726 \cdot K_A^3 + 0.3783 \cdot K_A^2 - 1.8111 \cdot K_A + 1.5442 \quad ; \quad 0.42 < K_A \leq 0.9444 \quad (\text{ข.1})$$

$$K_D = 0.11 \quad ; \quad K_A > 0.9444$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงเวลาที่ 7:00 น. และ 19:00 น. คือ

$$K_D = -3.1755 \cdot K_A^4 + 9.4985 \cdot K_A^3 - 9.6401 \cdot K_A^2 + 3.6817 \cdot K_A + 0.446 \quad ; \quad 0.3228 \leq K_A \leq 1.116$$

$$K_D = 0.9150 \quad ; \quad K_A < 0.3228 \quad (\text{ข.2})$$

$$K_D = 0.8250 \quad ; \quad K_A > 1.116$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงเวลาที่ 18:00 น. คือ

$$K_D = 3.7812 \cdot K_A^4 - 5.1476 \cdot K_A^3 + 0.8101 \cdot K_A^2 + 0.2439 \cdot K_A + 0.8772 \quad ; \quad 0.2246 \leq K_A \leq 0.8781$$

$$K_D = 0.9241 \quad ; \quad K_A < 0.2246 \quad (\text{ข.3})$$

$$K_D = 0.4788 \quad ; \quad K_A > 0.8781$$

กลุ่มที่ 2 เดือนพฤษภาคม

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในชั่วโมงที่ 8:00 น. - 17:00 น. คือ

$$K_D = 2.9498 \cdot K_A^4 - 4.3341 \cdot K_A^3 + 0.8489 \cdot K_A^2 - 0.1531 \cdot K_A + 0.9385 \quad ; \quad K_A \leq 0.967$$

$$K_D = 0.2445 \quad ; \quad K_A > 0.967 \quad (ข.4)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในชั่วโมงที่ 7:00 น. และ 19:00 น. คือ

$$K_D = -0.0974 \cdot K_A + 0.9322 \quad ; \quad K_A \geq 0 \quad (ข.5)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในชั่วโมงที่ 18:00 น. คือ

$$K_D = 0.3798 \cdot K_A^5 - 2.3748 \cdot K_A^4 + 5.219 \cdot K_A^3 - 4.6575 \cdot K_A^2 + 1.3104 \cdot K_A + 0.8514$$

$$; \quad 0.2002 \leq K_A \leq 0.9549$$

$$K_D = 0.7271 \quad ; \quad K_A > 0.9549 \quad (ข.6)$$

$$K_D = 0.9653 \quad ; \quad K_A < 0.2002$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

โปรแกรมหลัก WINDOW_COMFORT.F90

```
Program Window_Comfort
USE BOOKLIB
IMPLICIT NONE
REAL :: direct,tilt,wndspd,wmdir,tout,tin ,diffuse
REAL :: diff_PMV,diff_total,PMV_net,PPD_net
REAL :: mrt_sol_ashrae,diff_sol_q,dabs
REAL_DIMENSION(5) :: d_mm,tran_theta,kglass,gap,absorb ,inw ,rs
REAL_DIMENSION(10) :: ref_f,ref_b,emiss_f,emiss_b
REAL_DIMENSION(10) :: thetas
REAL_DIMENSION(5,0:90) :: absorbtance
REAL_DIMENSION(0:90) ::transmittance,front_ref,back_ref,abs_total,SHGC ,SHGC_REF
REAL :: her_tran,her_ref_f,her_ref_b,u ,her_SHGC ,SC ,her_abs_total
REAL :: icl,met,vel,ta,rh,abs,emissp,fp
REAL :: dOTTV_dq ,dq,OTTVO ,ottv2 ,dPMV_dOTTV ,dOTTV ,PMV_no_sol,PPD_no_sol2
REAL :: heat_gain ,q_tran ,sol
REAL_DIMENSION(5) :: her_abs
CHARACTER(len=15) :: name_glass
INTEGER :: i,nlayer,nface,jj,number

number = 11

OPEN(UNIT=2,FILE='optic_12gap.dat',ACTION='READ',STATUS='UNKNOWN',POSITION='REWIND')
OPEN(UNIT=1,FILE='weather.dat',ACTION='READ',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=3,FILE='comfort.dat',ACTION='READ',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=5,FILE='report_6g_st1.out',ACTION='WRITE',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=11,FILE='report_6g_st2.out',ACTION='WRITE',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=6,FILE='optic_report_6g_st.out',ACTION='WRITE',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=8,FILE='SHGC_optic_w_2.out',ACTION='WRITE',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=9,FILE='SC_optic_w_2.out',ACTION='WRITE',STATUS='UNKNOWN')
OPEN(UNIT=10,FILE='REF_GLASS.dat',ACTION='READ',STATUS='UNKNOWN')

READ(10,8000) name_glass,(SHGC_REF(i),i=0,90,5)
WRITE(5,5001) 'Name','Layer','Thick1','Thick2','Air gap',' U ','Tdir','Tdiff','SHGC','SC',&
'Sur_temp','MRT','PMV','PPD_hotglass','PPD_solar','PPD' ,dPMV/dq'
WRITE(11,5005) 'Name',dPMV/dMRT',dPMV/dQ','dOTTV/dQ','Heat Gain','Q_tran',&
'dOTTV','PPD_hot_glass'
WRITE(8,8001) 'Angle', (i,i=0,90,5)
WRITE(9,8001) 'Angle', (i,i=0,90,5)
READ(3,3000) icl,met,vel,ta,rh,abs,emissp,fp
3000 FORMAT(1x,7(F6.2,2x),F7.3)
READ(1,1000) direct,diffuse,tout,tin,wndspd,wmdir,tilt
1000 FORMAT(1x,2(F7.2,2x),5(F6.2,2x))
! Change unit 1 met = 50 kcal/h.m^2
met = met*50.0

DO jj =1,number
READ(2,2001) name_glass,nlayer,(gap(i),i=1,nlayer-1)
nface = 2*nlayer
DO i=1,nlayer
```



```

READ(2,2000) d_mm(i),kglass(i),emiss_f(i),emiss_b(i),tran_theta(i),ref_f(i),ref_b(i)
END DO
2000 FORMAT(1x,4(F5.2,2x),3(F7.3,2x))
2001 FORMAT(1x,A15,1x,I2,1x,F5.2)

CALL sur_temp(nlayer,direct,tout,tin,wndspd,wndir,tilt,d_mm,kglass,emiss_f,emiss_b,&
tran_theta,ref_f,ref_b,gap,absorb,thetas,u,inw,rs)

CALL CAL_OPTIC(nlayer,d_mm,tran_theta,ref_f,ref_b,inw,transmittance,front_ref,back_ref,&
absorbance,abs_total,her_abs_total,her_tran,her_ref_f,her_ref_b,her_abs,SHGC,her_SHGC,SC)

CALL CAL_COMFORT(icl,met,vel,ta,rh,abs,emissp,fp,direct,diffuse,transmittance(43),her_tran,&
thetas(nface),mrt_sol_ashrae,sol,diff_PMV,diff_sol_q,dabs,diff_total,PMV_no_sol,PPD_no_sol2,
PMV_net,PPD_net)
! Heat gain calculation
heat_gain = (direct*SHGC(43) + diffuse*her_SHGC) + u*(Tout - Tin)
q_tran = direct*transmittance(43) + diffuse*her_tran

WRITE(5,5000) name_glass,nlayer,(d_mm(i),i=1,2),gap(1),u,transmittance(43) ,&
her_tran,SHGC(0),SC,thetas(nface),mrt_sol_ashrae,PMV_net,PPD_no_sol2,PPD_net-PPD_no_sol2,PPD_net ,diff_total
WRITE(11,5004) name_glass,diff_PMV,diff_total,dOTTV_dq,dPMV_dOTTV,heat_gain,ottv2,q_tran,dOTTV
WRITE(8,8000) name_glass,wndspd,(SHGC(i),i=0,90,5)
WRITE(9,8000) name_glass,wndspd,(SHGC(i)/SHGC_REF(i),i=0,80,5)
WRITE(6,6003) name_glass , nlayer , 'Plane','Air gap =' , (gap(i),i=1,nlayer)
WRITE(6,6000) 'Angle', (i,i=0,90,10),'Hemis'
WRITE(6,6004) name_glass,'SHGC ', (SHGC(i),i=0,90,10),her_SHGC
WRITE(6,6005) 'Tsol ', (transmittance(i),i=0,90,10),her_tran
WRITE(6,6005) 'Abs1 ', (absorbance(1,i),i=0,90,10),her_abs(1)
WRITE(6,6005) 'Abs2 ', (absorbance(2,i),i=0,90,10),her_abs(2)
WRITE(6,6005) 'AbsT ', (abs_total(i),i=0,90,10),her_abs_total
WRITE(6,6005) 'Rfsol', (front_ref(i),i=0,90,10),her_ref_f
WRITE(6,6005) 'Rbsol', (back_ref(i),i=0,90,10),her_ref_b
WRITE(6,6001) 'SHGC ', (SHGC(i),i=0,90,10),her_SHGC
WRITE(6,6001) 'Inw1 ', inw(1)
WRITE(6,6001) 'Inw2 ', inw(2)
WRITE(6,6002) 'SC ':,SC
8000 FORMAT(1x,A15,2x,F6.2,2x,21(F7.3,2x))
8001 FORMAT(1x,A15,6x,2x,A8,21(I2,7x))
6000 FORMAT(1x,A5,4x,10(I2,5x),A)
6004 FORMAT(1x,A15,2x,A5,10(F7.3),1x,F7.3)
6005 FORMAT(18x,A5,10(F7.3),1x,F7.3)
6001 FORMAT(1x,A5,10(F7.3),1x,F7.3)
6002 FORMAT(1x,A5,1x,F5.2)
6003 FORMAT(1x,A15,1x,I1,1x,A5,1x,A10,1x,2(F5.2,2x))
5001 FORMAT(1x,A,10x,2(A,2x),7(A,3x),2x,A,4x,6(A,3x))
5000 FORMAT(1x,A,1x,I1,4x,2(F5.2,3x),2(F7.2,1x),4(F5.3,2x),3x,F5.2,4x,F5.2,1(F6.2,1x),&
4x,F6.2,6x,F6.2,6x,6(F7.4,3x))
5004 FORMAT(1x,A,2x,4(F7.4,4x),3x,5(F6.2,4x),2x,F6.2)
5005 FORMAT(1x,A,13x,6(A,3x),2x,5(A,5x))
END DO
END

```

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE CAL_COMFORT

```

SUBROUTINE CAL_COMFORT(icl,met,vel,ta,rh,abs,emissp,fp,direct,diffuse,tran,tran_diff,sur_temp,&
mrt_sol_ashrae,sol,diff_PMV,diff_sol_q,dabs,diff_total,PMV_no_sol,PPD_no_sol2,PMV_net,PPD_net )

```

```

IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: icl,met,vel,ta,rh,abs,emissp,fp
REAL,INTENT(IN) :: direct,diffuse
REAL,INTENT(IN) :: tran,tran_diff,sur_temp
REAL :: PMV_with_sol,PPD_with_sol,PPD_no_sol
REAL,INTENT(OUT) :: diff_PMV,diff_total ,PMV_net,PPD_net,PMV_no_sol,PPD_no_sol2
REAL,INTENT(OUT) :: mrt_sol_ashrae ,dabs,diff_sol_q
REAL :: PMV_diff,mrt_diff_1,PMV_no_sol2
REAL :: diff_mrt,ddPMV
INTEGER :: i
REAL,DIMENSION(2) :: factor
REAL :: sigma = 5.67E-8
REAL :: PMV ,PMV_CAL ,PPD_CAL
REAL :: hc,eta
REAL :: pa,tcl,psat, delta
REAL :: fcl,tcl1,tcl2
REAL :: mrt_sum ,dmrt ,umrt
REAL,INTENT(OUT) :: sol
DATA (factor(i),i=1,2)/0.238,0.762/
!! The irradiated body surface for short-Wave radiation (standard value = 0.6).
!! The emission coefficient of human body (standard value = 0.97).
!! The projected area factor,fp at altitude = 0 Degree and azimuth = 0 Degree

eta = 0.0
PMV = 0.0
tcl1 = 5.0
tcl2 = 60.0
sol = tran*direct + tran_diff*diffuse

IF(icl < 0.5) THEN
fcl = 1.0 + 0.2*icl
ELSE
fcl = 1.05 + 0.1*icl
END IF

IF (ta == 23.9) THEN
! psat at 23.9 C
psat = (2.9852-2.8105)*(23.9-23.0) + 2.8105 ! at 23.9 C
ELSE
CALL vapour_press(ta,psat)
END IF
pa =7.521*psat*rh/100.0
dabs = fp*abs
!! Calculation unirradiated mean radiant temperature,Tumrt
umrt = (((sur_temp + 273.0)**4)*factor(1) + ((ta+273.0)**4)*factor(2))*0.25
! Calculation of Tmrt by Equation
CALL mrt_cal2(ta+273.0,umrt,fp,abs,emissp,sigma,sol,0.0,mrt_sol_ashrae,dmrt)
!mrt_sol_ashrae = mrt_cal2(umrt(i),fp,abs,emissp,sigma,sol(i),0.0)
mrt_sol_ashrae = mrt_sol_ashrae - 273.0
umrt = umrt - 273.0
mrt_sum = umrt + dmrt

! Calculation PMV for the case of Tmrt = Ta
CALL solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,ta,hc,tcll)
PMV_no_sol = PMV_CAL(met,eta,pa,fcl,hc,tcll,ta)
PPD_no_sol = PPD_CAL(PMV_no_sol)
! Calculation PMV for the case of Tmrt /= Ta

```

```

CALL solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,umrt,hc,tcll)
PMV_no_sol2 = PMV_CALC(met,eta,pa,fcl,hc,tcll,ta,umrt)
PPD_no_sol2 = PPD_CALC(PMV_no_sol2)
! Calculation PMV and PPD with solar by Equation
CALL solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,mrt_sol_ashrae,hc,tcll)

PMV_with_sol = PMV_CALC(met,eta,pa,fcl,hc,tcll,ta,mrt_sol_ashrae)
PPD_with_sol = PPD_CALC(PMV_with_sol)
! Calculation of dPMV/dMRT
CALL diff_PMV_mrt(ta,umrt,ta,vel,pa,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,delta)
diff_PMV = delta
! Calculation PMV = PMVO + (dPMV/dMRT)*(umrt - ta)
PMV_diff = PMV_no_sol + (diff_PMV*(umrt - ta))

! Calculation of dMRT/d(fp*abs*qir)
diff_mrt = dmrt
diff_sol_q = diff_mrt/(sol*abs*fp)

! Calculation of Tmrt = ta + [dMRT/dQ]*dQ
mrt_diff_1 = ta + (diff_sol_q*dabs*sol)

! Calculation of dPMV/dqir
diff_total = diff_PMV*diff_sol_q*dabs
ddPMV = diff_total*sol

! Calculation of PMV and PPD total
PMV_net = PMV_no_sol + ddPMV
PPD_net = PPD_CALC(PMV_net)

END      SUBROUTINE CAL_COMFORT

SUBROUTINE diff_PMV_mrt(mrt1,mrt2,ta,vel,pa,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,delta)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: mrt1,mrt2
REAL,INTENT(IN) :: ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,pa
REAL,INTENT(OUT) :: delta
REAL,DIMENSION(2) :: hcc,tcln
REAL :: tcl,hc,fx0,fx1,PMV_CALC

CALL solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,mrt1,hc,tcll)
hcc(1) = hc
tcln(1) = tcll
CALL solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,mrt2,hc,tcll)
hcc(2) = hc
tcln(2) = tcll

fx0 = PMV_CALC(met,eta,pa,fcl,hcc(1),tcln(1),ta,mrt1)
fx1 = PMV_CALC(met,eta,pa,fcl,hcc(2),tcln(2),ta,mrt2)
!diff = (-fx2 +4*fx1 - 3*fx0)/(2*1.0)
delta = ( fx1 - fx0)/(mrt2-mrt1)
!WRITE(8,1111) vel,icl,met,mrt2,mrt1 ,fx0,fx1,fx1-fx0,mrt2-mrt1,delta
!1111 FORMAT(2x,F8.2,2x,F9.4,2x,8(f9.4,2x))
END SUBROUTINE

SUBROUTINE mrt_cal_solar(umrt,qabs,sigma,emissp,mrt_sol)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(INOUT) :: umrt

```

```

REAL,INTENT(IN) :: qabs
REAL,INTENT(OUT) :: mrt_sol
REAL :: factor,sigma,emissp
factor = 1.0/(emissp*sigma)
umrt = umrt + 273.0
mrt_sol = ( umrt**4 + factor*qabs)**0.25
mrt_sol = mrt_sol -273.0
umrt = umrt -273.0
END SUBROUTINE

```

```

SUBROUTINE vapour_press(ta,psat)
REAL,INTENT(IN) :: ta
REAL,INTENT(OUT) :: psat

```

```

IF(ta == 20.0) THEN
psat = 2.3389
ELSE IF (ta == 21.0) THEN
psat = 2.4878
ELSE IF (ta == 22.0) THEN
psat = 2.6448
ELSE IF (ta == 23.0) THEN
psat = 2.8105
ELSE IF (ta == 24.0) THEN
psat = 2.9852
ELSE IF (ta == 25.0) THEN
psat = 3.1693
ELSE IF (ta == 26.0) THEN
psat = 3.3633
ELSE IF (ta == 27.0) THEN
psat = 3.5674
ELSE IF (ta == 28.0) THEN
psat = 3.7823
ELSE IF (ta == 29.0) THEN
psat = 4.0084
ELSE IF (ta == 30.0) THEN
psat = 4.2462
ELSE
PRINT*, 'Enter the vapour water pressure in kPa'
READ(*,*) psat
END IF
END SUBROUTINE

```

```

SUBROUTINE mrt_cal2(mrt1,mrt2,fp,abs,emissp,sigma,qir,qdiff,mrt_sol,dmrt)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: fp,abs,emissp,sigma,qir,qdiff
REAL,INTENT(IN) :: mrt1,mrt2
REAL,INTENT(OUT) :: mrt_sol,dmrt
REAL :: factor,factor2 ,dummy,mrt_call ,dummy2,dummy3,dummy4

```

```

factor = (fp*abs)/(emissp*sigma)
factor2 = (0.208E8)*fp*abs
mrt_sol = (mrt2**4 + factor*(qir+qdiff))**0.25
dummy = factor*(qir+qdiff)
dummy2 = 0.8606106*(qir+qdiff)*fp*abs
dummy3 = (mrt_sol - mrt1)
dummy4 = (factor*(qir+qdiff))**0.25
dmrt = dummy3

```

```

mrt_call = (mrt1**4 + dummy)**0.25
END SUBROUTINE

REAL FUNCTION PPD_CAL(PMV)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: PMV
PPD_CAL = 100. - 95.*EXP(-(0.03353*PMV**4 + 0.2179*PMV**2) )
END FUNCTION

SUBROUTINE solve_tcl(ta,vel,icl,fcl,eta,tcl1,tcl2,met,mrt,hc,tcln)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: vel,icl,fcl,eta,mrt,met,ta ,tcl1,tcl2
REAL,INTENT(OUT) :: hc,tcln
REAL :: FXL,FXR,hc1,hc2 ,AA,FXM,TOL
REAL :: hc_cal,func_tcl
REAL :: tclm,hcm,es,tcl1,tcl2
INTEGER :: ITER
es = 0.00001
tcl1 = tcl1
tcl2 = tcl2

hc1 = hc_cal(tcl1,ta,vel)
hc2 = hc_cal(tcl2,ta,vel)
FXL = func_tcl(hc1,mrt,ta,tcl1,met,icl,fcl,eta)
FXR = func_tcl(hc2,mrt,ta,tcl2,met,icl,fcl,eta)
AA = FXL*FXR

IF (AA >= 0.0) THEN
WRITE(*,10)
STOP
END IF
10 FORMAT(/,'ROOT IS NOT IN THE GIVEN RANGE')

DO ITER =1,500
tclm = (tcl1 +tcl2)/2.
hcm = hc_cal(tclm,ta,vel)
hc2 = hc_cal(tcl2,ta,vel)
FXM = func_tcl(hcm,mrt,ta,tclm,met,icl,fcl,eta)
FXR = func_tcl(hc2,mrt,ta,tcl2,met,icl,fcl,eta)
AA = FXM*FXR
IF (AA > 0.0) THEN
tcl2 = tclm
hc =hcm
ELSE
tcl1 = tclm
hc = hcm
END IF
tcln = (tcl1 + tcl2)/2.0
TOL = ABS((tcln-tclm)*100.0/tcln)
IF( TOL < ES ) GOTO 200
END DO
WRITE(*,110)
110 FORMAT(/,'ROOT CAN NOT BE REACHED FOR THE GIVEN CONDITIONS' )
GOTO 300
200 CONTINUE
hc = hc_cal(tcln,ta,vel)
300 CONTINUE
RETURN

```

```

END SUBROUTINE solve_tcl

REAL FUNCTION func_tcl(hc,mrt,ta,tcl,met,icl,fcl,eta)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: hc,mrt,ta,tcl
REAL,INTENT(IN) :: met,eta,fcl,icl

func_tcl = 35.7 - 0.032*met*(1-eta) - &
  0.18*icl*(3.4E-8*fcl*((tcl+273.0)**4 - (mrt+273.0)**4) + &
  fcl*hc*(tcl-ta)) - tcl

END FUNCTION

REAL FUNCTION hc_cal( tcl,ta,vel)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: vel,ta,tcl
real :: dum1,dum2
dum1 = 2.05*ABS(tcl-ta)**0.25
dum2 = 10.4*SQRT(vel)
IF (dum1 > dum2) THEN
hc_cal = dum1
ELSE IF (dum1 < dum2) THEN
hc_cal = dum2
ELSE
print*,"Error !!!"
END IF
END FUNCTION

REAL FUNCTION PMV_CAL(met,eta,pa,fcl,hc,tcl,ta,mrt)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: met,eta,pa,fcl,hc,tcl,ta,mrt
REAL :: A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8
A1 = 0.352*EXP(-0.042*met) + 0.032
A2 = met*(1-eta)
A3 = 43.0 -0.061*met*(1-eta) - pa
A4 = met*(1-eta) - 50.0
A5 = 0.0023*met*(44-pa)
A6 = 0.0014*met*(34-ta)
A7 = 3.4E-8*fcl*((tcl+273.0)**4 - (mrt+273.0)**4)
A8 = fcl*hc*(tcl-ta)

PMV_CAL = A1*(A2 - 0.35*A3 - 0.42*A4 - A5 - A6 - A7 - A8)

END FUNCTION

```

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE CAL_OPTIC

```

SUBROUTINE CAL_OPTIC(nlayer,d_mm,tran_th,ref_ff,ref_bb,inw,transmittance,front_ref,back_ref,&
absorbance,abs_total,her_abs_total,her_tran,her_ref_f,her_ref_b,her_abs,SHGC,her_SHGC,SC)
USE booklib
IMPLICIT NONE
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: d_mm,tran_th,inw
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: ref_ff,ref_bb
INTEGER :: npts=91,error,ii
INTEGER :: th_deg
REAL,DIMENSION(91) :: x ,yy ,y2 ,y3

```

```

REAL,DIMENSION(10,91) :: y
REAL,DIMENSION(10) :: area
REAL :: x1 = 0.0 ,x2 = 3.141592654/2.0 ,dx
REAL :: Rtot0,Ttot0,dmm,Rtot_th,Ttot_th,pi
REAL :: Rff,Rbb,Tran
REAL,DIMENSION(0:90) :: tt,rft,rbt
REAL :: Tran_coated,rf_coated,rb_coated
REAL,INTENT(OUT) :: her_SHGC ,her_abs_total
REAL :: frac
REAL,DIMENSION(5,5,0:90) :: tran_theta,abs_theta
REAL,DIMENSION(10,10,0:90) :: ref_f,ref_b
REAL,DIMENSION(5,0:90) :: aft
REAL,DIMENSION(5,0:90),INTENT(OUT) :: absorbtance
REAL,DIMENSION(0:90),INTENT(OUT) :: transmittance,front_ref,back_ref,abs_total,SHGC
REAL,INTENT(OUT) :: her_tran,her_ref_f,her_ref_b ,SC
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: her_abs
REAL :: wlnm = 897.7
INTEGER :: Type_g,i,j,nface

dx = (x2-x1)/REAL(npts- 1)
pi = 3.141592
nface = 2*nlayer

DO i=1,nlayer
tran_theta(i,i,0) = tran_th(i)
ref_f(i,i,0) = ref_ff(i)
ref_b(i,i,0) = ref_bb(i)
END DO

DO i = 1,nlayer
IF ( ref_b(i,i,0) == ref_f(i,i,0)) THEN
Type_g = 1
ELSE
Type_g = 2
! Coated glass is perform
END IF

IF (Type_g == 1) THEN
Rtot0 = ref_f(i,i,0)
Ttot0 = Tran_theta(i,i,0)
abs_theta(i,i,0) = 1.0 - tran_theta(i,i,0) - ref_f(i,i,0)
dmm = d_mm(i)
DO th_deg = 0,90,1
CALL RT_th_approx(Rtot0,Ttot0,dmm,th_deg,wlnm,Rtot_th,Ttot_th)
ref_f(i,i,th_deg) = Rtot_th
ref_b(i,i,th_deg) = Rtot_th
tran_theta(i,i,th_deg) = Ttot_th
abs_theta(i,i,th_deg) = 1.0 - tran_theta(i,i,th_deg) - ref_f(i,i,th_deg)
END DO ! th_deg uncoated
ELSE IF (Type_g == 2) THEN
Tran = tran_theta(i,i,0)
Rff = ref_f(i,i,0)
Rbb = ref_b(i,i,0)
DO th_deg =0,90,1
CALL OPTIC_COATED(th_deg,Tran,Rff,Rbb,Tran_coated,rf_coated,rb_coated)
ref_f(i,i,th_deg) = rf_coated
ref_b(i,i,th_deg) = rb_coated
tran_theta(i,i,th_deg) = Tran_coated

```



```

        abs_theta(i,i,th_deg) = 1.0 - tran_theta(i,i,th_deg) - ref_f(i,i,th_deg)
    END DO ! th_deg coated
END IF ! type glass
END DO ! nlayer

```

```

IF (nlayer >= 2) THEN
CALL optic(nlayer,tran_theta,ref_f,ref_b,tt,rft,rbt,aft)
END IF

```

```

!DO i=1,nlayer
!

```

```

!END DO

```

```

abs_total = 0.0

```

```

IF (nlayer == 1 ) THEN

```

```

    DO th_deg = 0,90

```

```

        j = th_deg + 1

```

```

        x(j) = dx*REAL(j-1)

```

```

        y(1,j) = tran_theta(1,1,th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        y(2,j) = ref_f(1,1,th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        y(3,j) = ref_b(1,1,th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        y(4,j) = abs_theta(1,1,th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

    END DO

```

```

DO ii = 1,nlayer+3

```

```

DO j = 1,91

```

```

yy(j) = y(ii,j)

```

```

END DO

```

```

CALL integ_d(x,yy,npts,x1,x2,area(ii),error)

```

```

END DO

```

```

her_tran = 2.0*area(1)

```

```

her_ref_f = 2.0*area(2)

```

```

her_ref_b = 2.0*area(3)

```

```

DO ii = 1,nlayer

```

```

her_abs(ii) = 2.0*area(3+ii)

```

```

END DO

```

```

ELSE

```

```

    DO th_deg = 0,90

```

```

        j = th_deg + 1

```

```

        x(j) = dx*REAL(j-1)

```

```

        y(1,j) = tt(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        y(2,j) = rft(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        y(3,j) = rbt(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

        DO ii = 1,nlayer

```

```

            y(ii+3,j) = aft(ii,th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

            abs_total(th_deg) = abs_total(th_deg) + aft(ii,th_deg)

```

```

        END DO

```

```

        y(nlayer+4,j) = abs_total(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))

```

```

    END DO

```

```

DO ii = 1,nlayer+4

```

```

DO j = 1,91

```

```

yy(j) = y(ii,j)

```

```

END DO

```

```

CALL integ_d(x,yy,npts,x1,x2,area(ii),error)

```

```

END DO

```

```

her_tran = 2.0*area(1)

```



ศูนย์บริการ
มหาวิทยาลัย

```

her_ref_f = 2.0*area(2)
her_ref_b = 2.0*area(3)
DO ii = 1, nlayer+1
her_abs(ii) = 2.0*area(3+ii)
END DO
END IF

abs_total = 0.0
IF (nlayer == 1) THEN
DO th_deg = 0, 90
transmittance(th_deg) = tran_theta(1, 1, th_deg)
front_ref(th_deg) = ref_f(1, 1, th_deg)
back_ref(th_deg) = ref_b(1, 1, th_deg)
absorbance(1, th_deg) = abs_theta(1, 1, th_deg)
abs_total(th_deg) = abs_total(th_deg) + absorbance(ii, th_deg)
SHGC(th_deg) = transmittance(th_deg) + inw(1)*absorbance(1, th_deg)
END DO

ELSE
DO th_deg = 0, 90
frac = 0.0
transmittance(th_deg) = tt(th_deg)
front_ref(th_deg) = rft(th_deg)
back_ref(th_deg) = rbt(th_deg)

DO ii = 1, nlayer
absorbance(ii, th_deg) = aft(ii, th_deg)
abs_total(th_deg) = abs_total(th_deg) + absorbance(ii, th_deg)
frac = frac + inw(ii)*absorbance(ii, th_deg)
END DO
SHGC(th_deg) = transmittance(th_deg) + frac
END DO
END IF

DO th_deg = 0, 90, 1
j = th_deg + 1
x(j) = dx*REAL(j-1)
y2(j) = SHGC(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))
y3(j) = abs_total(th_deg)*COS(x(j))*SIN(x(j))
END DO
CALL integ_d(x, y2, npts, x1, x2, her_SHGC, error)
her_SHGC = 2.0*her_SHGC
CALL integ_d(x, y3, npts, x1, x2, her_abs_total, error)
her_abs_total = 2.0*her_abs_total

SC = SHGC(0)/0.86
END SUBROUTINE CAL_OPTIC

SUBROUTINE OPTIC_COATED(th_deg, TT, RF, RB, T, RRF, RRB)
IMPLICIT NONE
REAL, INTENT(IN) :: TT, RF, RB
REAL, INTENT(OUT) :: T, RRF, RRB
REAL :: T_CLR, R_CLR, T_BRN, R_BRN
INTEGER, INTENT(IN) :: th_deg
REAL :: THETA
THETA = REAL(th_deg)

T_CLR = -0.0015 + 3.355*COSD(THETA) - 3.840*(COSD(THETA))**2 &

```

```

+ 1.460*(COSD(THETA))**3 + 0.0288*(COSD(THETA))**4
R_CLR = 0.999 - 0.563*COSD(THETA) + 2.043*(COSD(THETA))**2 &
- 2.532*(COSD(THETA))**3 + &
1.054*(COSD(THETA))**4 - T_CLR
T_BRN = -0.002 + 2.813*COSD(THETA) - 2.341*(COSD(THETA))**2 &
- 0.05725*(COSD(THETA))**3 + &
0.599*(COSD(THETA))**4
R_BRN = 0.997 - 1.868*COSD(THETA) + 6.513*(COSD(THETA))**2 &
- 7.862*(COSD(THETA))**3 + &
3.225*(COSD(THETA))**4 - T_BRN

```

```

!
IF (TT > 0.645) THEN
T = TT*T_CLR
RRF = RF*(1.0-R_CLR) + R_CLR
RRB = RB*(1.0-R_CLR) + R_CLR
if ( T < 0.0) T = 0.0
ELSE
T = TT*T_BRN
RRF = RF*(1.0-R_BRN) + R_BRN
RRB = RB*(1.0-R_BRN) + R_BRN
if ( T < 0.0) T = 0.0
END IF

```

```

IF (THETA == 0.0) THEN
T = TT
RRF = RF
RRB = RB
ELSE IF(THETA == 90.0) THEN
T = NINT(T)
RRF = NINT(RRF)
RRB = NINT(RRB)
END IF
END SUBROUTINE OPTIC_COATED

```

```

SUBROUTINE RT_th_approx(Rt0,Tt0,thickmm,theta_deg,wavelnm,Rt_th,Tt_th)

```

```

! INPUT
! total reflectance Rt0 at (angle of incidence) th=0
! total transmittance Tt0 at (angle of incidence) th=0
! thickness thickmm (mm)
! angle of incidence theta_deg (deg)
! wavelength wavelnm (nm)
!
! Rtot0 and ttot0 can correspond to one single wavelength or represent
! wavelength integrated reflectance and transmittance. In the latter case
! use adequate center-wavelength: 575.0 nm for VISIBLE
! 897.7 nm for SOLAR
! OUTPUT
! rtot_th total reflectance and Transmittance of a homogeneous
! ttot_th (uncoated) glass plate at angle th.
!
! DESCRIPTION OF CALCULATION
! 1. Calculation reflectivity r and transmissivity T at normal incidence
! 2. Determine refractive index(n,k) assuming weak absorption( k << n)
! 3. Calculate total reflectance rtot_th and total transmittance Ttot_th of
! a thick uncoated glass plate for both polarizations as a function of :
! - angle of incidence theta (th)
! - thickness (dmm) in mm
! - refractive index (n,k)

```

```

!           - wavelength (wlnm) in nm
!
! All reflectance and transmittance data must be in decimal form in every
! subroutine used!
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: thickmm,wavelnm,RtO,TtO
INTEGER,INTENT(IN) :: theta_deg
REAL,INTENT(OUT) :: Rt_th,Tt_th
REAL :: n,k
REAL :: theta
theta = REAL(theta_deg)
!SAVE n,k
!print*,thickmm=',thickmm
CALL NKfromRT(RtO,TtO,thickmm,wavelnm,n,k)
!
IF (k == 1000.0) THEN
PRINT*,TtotO=',TtO,' RtotO=',RtO
PRINT*,TtotO (maybe RtotO) give unreasonable results for k'
PRINT*,TtotO is probably to close to zero'
PRINT*,Enter better TtotO and RtotO'
RETURN
END IF
!
CALL RTapprox_th(theta,thickmm,wavelnm,n,k,Rt_th,Tt_th)
RETURN
END      SUBROUTINE      RT_th_approx

```

```

SUBROUTINE NKfromRT(RttO,TttO,thick_mm,wave_lnm,nn,kk)
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(INOUT) :: RttO,TttO
REAL,INTENT(IN) :: thick_mm,wave_lnm
REAL,INTENT(OUT) :: nn,kk
REAL :: RTmax,R,T,num1,num2,Rmin,Rplus,d,deno,a,alpha
REAL :: pi
pi = 2.0*ASIN(1.0)
d = thick_mm/1000.
!print*,d=',thick_mm
IF (TttO < 0.0 ) TttO = 0.0
!
IF ( (TttO + RttO) > 1.0 ) THEN
RTmax = amax1(TttO,RttO)
PRINT*,RtotO or TtotO have changed from :',RttO,TttO
IF ( RTmax == RttO ) RttO = 1-TttO
IF ( RTmax == TttO ) TttO = 1-RttO
PRINT*,'          to :',RttO,TttO
END IF
!
IF ( TttO > 0.0 ) THEN
num1 = TttO**2 - RttO**2 + 2*RttO + 1
num2 = SQRT(num1**2 - 4*(2 - RttO)*RttO)
deno = 2*(2-RttO)
Rmin = (num1-num2)/deno
Rplus = (num1+num2)/deno
! Rplus >= RtotO !! This is unphysical, therefore rplus is no solution.
ELSE
Rmin = RttO
END IF

```

```

!
IF (Rmin < 0.0 ) THEN
PRINT*, 'Unphysical result for Rtot0,Ttot0,wlnm=',Rtt0,Ttt0,wave_lnm
ELSE IF (Rmin <= Rtt0) THEN
R = Rmin
T = 1 - R
IF (Ttt0 /= 0.0) THEN
nn = (1+SQRT(R))/(1-SQRT(R))
a = (Rtt0 - R)/(R*Ttt0)
alpha = -LOG(a)/2.0/d
kk = alpha/(2.0*pi)*wave_lnm/1E9

END IF
IF ((Ttt0 == 0.0) .Or. (kk > 1E-2)) kk = 1000
END IF
!
IF (kk > 1E-4) PRINT*, 'Warning. Out of range of Approximation'
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE RTapprox_th(theta,ddmm,wvlnm,nnn,kkk,RRtot_th,TTtot_th)
! This program calculates the total reflectance Rtot_th and the total
! transmittance Ttot_th of a thick (no interference) homogeneous glass
! plate at the angle of incidence th_deg for unpolarized light.
!
! INPUT : th_deg,dmm,wlnm,n,k
! OUTPUT : Rtot_th,Tot_th
!
! thickness      dmm   in nm
! wavelength     wlnm  in nm
! angle of incidence th_deg in deg
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: dmm,wvlnm,nnn,kkk
REAL,INTENT(IN) :: theta
REAL,INTENT(OUT) :: RRtot_th,TTtot_th
REAL :: Rtotp_th,Ttotp_th,Rtots_th,Ttots_th ,Rp,Rs,Tp,Ts
REAL :: wl,th
REAL :: pi
pi = 2.0*ASIN(1.0)
wl = wvlnm/1E9
th = theta/180.0*pi
!
CALL Rtheta(nnn,th,Rp,Rs,Tp,Ts)
CALL RTtot_homog(Rp,Tp,nnn,kkk,th,ddmm/1000.0,wl,Rtotp_th,Ttotp_th)
CALL RTtot_homog(Rs,Ts,nnn,kkk,th,ddmm/1000.0,wl,Rtots_th,Ttots_th)
RRtot_th = (Rtots_th+Rtotp_th)/2
TTtot_th = (Ttots_th+Ttotp_th)/2
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE Rtheta(n4,th4,Rip,Ris,Tip,Tis)
! This subroutine calculates the reflectivity rip,ris and transmissivity
! Tis,Tip for both TE('s') and TM('p') polarization of a single
! air-glass-interface of a homogeneous glass for a given refractive
! index (n,k) in function of the angle of incidence th.
!
! INPUT : n,th
! OUTPUT : Rip,Ris,Tip,Tis

```

```

!
! thickness   dmm   in mm
! wavelength  wlnm  in nm
! angle of incidence th_deg in deg

REAL,INTENT(IN) :: n4,th4
REAL,INTENT(OUT) :: Rip,Ris,Tip,Tis
REAL :: ph
! Snell's law (for negligible absorptance resp. extinction index) :

ph = ASIN(1/n4*SIN(th4))
! reflectance- and Transmittance-Tintensities (->Fresnel's eq.) :
Ris = ((COS(th4) - n4*COS(ph))/(COS(th4)+ n4*COS(ph)))**2
Rip = ((n4*COS(th4) - COS(ph))/(n4*COS(th4)+COS(ph)))**2
Tis = 1-Ris
Tip = 1-Rip
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE RTtot_homog(R,T,n5,k5,th5,d5,wl5,Rtot5,Ttot5)
! This subroutine calculates the total reflectance rtot and Transmittance
! Ttot of a homogeneous glass pane in function of the angle of
! incidence th. No interference assumed.r and T are the reflectivity
! and transmissivity ,respectively, at this given angle of incidence th.
!
! INPUT : r,T,n,k,th,d,wl
! OUTPUT : rtot,Ttot
!
! thickness       d   in m
! wavelength      wl  in m
! angle of incidence th  in rad
REAL,INTENT(IN) :: n5,k5,th5,d5,wl5,R,T
REAL,INTENT(OUT) :: Rtot5,Ttot5
REAL :: pi
REAL :: alpha,ph,a
pi = 2.0*ASIN(1.0)
! Snell's law (for negligible absorptance resp. extinction index) :
ph = ASIN(1/n5*SIN(th5))
! Extenuation within the glass pane for a single path:
alpha = k5*2*pi/wl5
a = EXP(-2*alpha*d5/COS(ph))
!
! Total reflectance and Transmittance including multiple reflections:
Ttot5 = a*T**2/(1-a**2*R**2)
IF (Ttot5 <= 0.0) Ttot5 = 0.0
Rtot5 = (1+a*Ttot5)*R
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE optic(nnlayer,t,rf,rb,tt,rft,rbt,aft)
!
! purpose: to find overall optical properties
!         of a series of layers with known properties
INTEGER,INTENT(IN) :: nnlayer
REAL,DIMENSION(5,5,0:90),INTENT(INOUT) :: t
REAL,DIMENSION(10,10,0:90),INTENT(INOUT) :: rf,rb
!REAL,DIMENSION(5,5) :: t,rf,rb
REAL,DIMENSION(5,0:90),INTENT(OUT) :: aft

```

```

INTEGER :: i,j,th_deg
REAL,DIMENSION(0:90),INTENT(OUT) :: tt,rft,rbt
REAL :: denom,tijm1,tjj,t0,rb0,rf0,af,ab
!
! calculate perimeter elements of rt matrix
DO th_deg =0,90
tt(th_deg) = 0.0
END DO

DO th_deg =0,90
DO i=1,nnlayer-1
DO j=i+1,nnlayer
denom = 1. - rf(j,th_deg) * rb(j-1,i,th_deg)
t(i,j,th_deg) = t(i,j-1,th_deg)*t(j,th_deg) / denom
tijm1 = t(i,j-1,th_deg)
tjj = t(j,th_deg)
rf(i,j,th_deg) = rf(i,j-1,th_deg) + tijm1 * tijm1 * rf(j,th_deg) / denom
rb(j,i,th_deg) = rb(j,j,th_deg) + tjj * tjj * rb(j-1,i,th_deg) / denom

END DO
END DO
tt(th_deg) = t(1,nnlayer,th_deg)
rft(th_deg) = rf(1,nnlayer,th_deg)
rbt(th_deg) = rb(nnlayer,1,th_deg)

DO j =1,5
aft(j,th_deg) = 0.0
END DO
! calculate absorptance in each layer
DO j=1,nnlayer
IF (j == 1) THEN
t0 = 1.
rb0 = 0.
ELSE
t0 = t(1,j-1,th_deg)
rb0 = rb(j-1,1,th_deg)
END IF
IF (j == nnlayer) THEN
rf0 = 0.
ELSE
rf0 = rf(j+1,nnlayer,th_deg)
END IF
af = 1. - t(j,th_deg) - rf(j,th_deg)
ab = 1. - t(j,th_deg) - rb(j,th_deg)
aft(j,th_deg) = (t0 * af) / (1. - rf(j,nnlayer,th_deg)*rb0)+ (t(1,j,th_deg) * rf0 * ab) /&
(1. - rb(j,1,th_deg)*rf0)
END DO

END DO ! th_deg
RETURN
END SUBROUTINE optic

```

โปรแกรมย่อย SUBROUTINE SUR_TEMP

```

SUBROUTINE sur_temp(nlayer,solar,toutt,tinn,wndspd,wndir,tilt,thick,kglass,emiss_f,emiss_b,&
tran_theta,ref_f,ref_b,gapp,ab,thetas,u,inw,rs)

```



```

IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: tinn,toutt,solar,tilt,wndspd,wndir
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: thickk,tran_theta,kglass,gapp,ab
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: ref_f,ref_b,emiss_f,emiss_b
REAL,DIMENSION(10),INTENT(OUT) :: thetas
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: inw,rs
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,INTENT(OUT) :: u
REAL :: hcout,dflag
REAL,DIMENSION(10) :: thick,gap
INTEGER :: index ,error_flag ,ii
REAL,DIMENSION(10) :: rrir, emis,ref
REAL,DIMENSION(5) :: ttir,scon,theta,sol,tran
REAL,DIMENSION(10) :: q, hf
REAL,DIMENSION(10,5) :: der,dhf
REAL,DIMENSION(10,10) :: z,zi,ddeldt,dtddel
REAL,DIMENSION(5) :: sour,delta,hcgap,hrgap,rgap
REAL :: rtot,tin,tout
INTEGER :: k,nface
REAL :: sigma,nu,err,adelt,hcin,hrin,hrou
REAL :: tout2,tin2,outtir,rmir,dtmax,dtmo,flux
DATA sigma/5.6697E-8/
REAL,DIMENSION(5,2) :: gcon,gvis,gpr,gden
DATA gcon(1,1)/0.0241/,gcon(1,2)/7.6E-5/
DATA gvis(1,1)/1.73E-5/,gvis(1,2)/10.0E-8/
DATA gden(1,1)/1.29/,gden(1,2)/-0.0044/
DATA gpr(1,1)/0.72/,gpr(1,2)/0.0018/
DATA (ttir(ii),ii=1,5)/0.0,1.0,0.0,1.0,0.0/
err = 0.001
DO ii = 1,nlayer
emis(2*ii-1) = emiss_f(ii)
emis(2*ii) = emiss_b(ii)
ref(2*ii-1) = ref_f(ii)
ref(2*ii) = ref_b(ii)
tran(2*ii-1) = tran_theta(ii)
tran(2*ii) = 1.0
END DO
nface = 2*nlayer
tout = toutt + 273.15
tin = tinn + 273.15
tout2 = tout**2
tin2 = tin**2
outtir = sigma*(tout2*tout2)
rmir = sigma*(tin2*tin2)
!
index = 0
dtmax = 0.0
dflag = 0.0
!
DO k = 1,5
hf(k) = 0.0
q(k) = 0.0
END DO
CALL op(nlayer,tran,ref,ab)
DO ii = 1,nlayer
rrir(2*ii) = 1. - ttir(2*ii-1) - emis(2*ii)
rrir(2*ii-1) = 1. - ttir(2*ii-1) - emis(2*ii-1)
END DO

```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

DO ii = 1,nlayer
gap(ii) = gapp(ii)/1000.0
sol(ii) = ab(ii)*solar
thick(ii) = thickk(ii)/1000.0
scon(ii) = kglass(ii)/thick(ii)
END DO
! Set up ir transfer matrix
CALL irmat(ttir,rrir,nface,z)
! guess initial temp distribution
CALL guess(tout,tin,nlayer,theta,thetas)
! invert matrix
CALL matinv(z,zi,10,nface,error_flag)
500 CONTINUE
index = index + 1
! evaluate radiative component
CALL source(thetas,emis,nlayer,oufir,rmir,ttir,rrir,sour,der)
! evaluate convective/conductive components of gap
CALL heat(tout,tin,thetas,nlayer,tilt,gap,nu,hf,dhf,hcgap,&
gcon,gvis,gden,gpr,err)
! convective indoor film coeff
CALL filmi(tin,thetas(nface),tilt,hf(nface),dhf(nface,nlayer),&
hcin,adelt)
! convective outdoor film coeff
CALL filmo(tout,thetas(1),wndspd,wmdir,hf(1),dhf(1,1),hcout)
! ir heat fluxes from sources
CALL fluxes(sour,zi,thetas,tin,tout,rmir,oufir,nface,q,&
hrgap,hrin,hrout)
! evaluate residuals and derivatives
CALL nodes(theta,thetas,tin,tout,hcgap,hrgap, &
& hcin,hrin,hcout,hrout,scon,sol,nlayer,dflag,delta,rs,rgap,err)
IF (dflag == 1 .or. err == 0. ) GOTO 600
!
CALL dnode(rs,rgap,hrgap,hrin,hrout,der,dhf,ddeldt,nlayer,zi)
! U value calculation
CALL uval(rgap,nlayer,u,rtot)
! Inward flowing fraction calculation
CALL inward(rs,nlayer,inw)
! invert matrix
CALL matinv(ddeldt,dtddel,10,nlayer,error_flag)
! calculate new temperature distribution
CALL dtemp(index,dtddel,delta,theta,nlayer,dtmax,dtmo)
! test for convergence
IF (dtmax > err .AND. index < 30 ) THEN
GOTO 500
! Stop iterating if dtmax < err or max of 30 iteration reached
ELSE
dflag = 1
GOTO 500
END IF
600 CONTINUE
DO ii=1,2*nlayer
thetas(ii) = thetas(ii) - 273.15
END DO
flux = q(nface) + hf(nface) - rmir
END SUBROUTINE sur_temp

SUBROUTINE dtemp(idex,dtddell,deltaa,thetaa,nlayer,ddtmax,ddtmo)
IMPLICIT NONE

```

```

REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: deltaa
REAL,DIMENSION(10,10),INTENT(INOUT) :: dtddell
REAL,INTENT(INOUT) :: ddtmo
REAL,DIMENSION(5) :: thdum,told,dthetaa
REAL,DIMENSION(5),INTENT(INOUT) :: thetaa
REAL,INTENT(INOUT) :: ddtmax
INTEGER,INTENT(INOUT) :: idex
INTEGER,INTENT(IN) :: nnlayer
INTEGER :: i,j
REAL :: tdiff
! this subroutine computes the new temperature distribution
! ddtmax is the maximum absolute temperature change
  ddtmo = ddtmax
  ddtmax = 0.0
  DO i=1,nnlayer
    dthetaa(i) = 0.0
    DO j=1,nnlayer
      dthetaa(i)= dthetaa(i) - dtddell(i,j)*deltaa(j)
    END DO
    told(i) = thdum(i)
    thdum(i) = thetaa(i)
    ddtmax = AMAX1 (ddtmax,ABS(dthetaa(i)))
    IF (idex > 1 .AND. ddtmax > ddtmo) THEN
      dthetaa(i)=dthetaa(i)/2.
    END IF
    thetaa(i) = thetaa(i) + dthetaa(i)
  END DO
! new t-distribution is weighted with old to
! avoid oscillations in numerical solution
  IF (idex >= 3) THEN
    DO i = 1,nnlayer
      ddtmax = 0.0
      tdiff = told(i)-thdum(i)
      IF ((dthetaa(i) > 0.0 .AND. tdiff > 0.0) .OR. (dthetaa(i) < 0.0 &
        & .AND. tdiff < 0.0)) THEN
        thetaa(i) = (thetaa(i)+thdum(i))/2
      END IF
      ddtmax=AMAX1 (ddtmax,ABS(thetaa(i)-thdum(i)))
    END DO
  END IF
!
  RETURN
  END
=====
=====

```

```

SUBROUTINE dnode(rrs,rgapp,hrgapp,hhrin,hhrout,derr,dhfh,ddeldtt,nnlayer,mat)

```

```

! purpose - sets up matrix of the derrivative of residuals
!           wrt temps. residuals are functions of temperatures
!           through the sources.
! inputs -
! rrs - total resistance for each gap, and inside and outside surfaces
! rgapp - inverse of the sum (hrgapp(i) +hcgap(i))
! hrgapp - effective radiation coefficient for each gap
! hhrin,hhrout - effective radiation coeff. for the inside and outside
! derr - derrivatives of ir sources wrt surface temperature

```

```

! dhhf - derivatives of heat fluxes wrt surface temp
! nlayer - number of layers
! mat - inverse of ir transfer matrix
! outputs -
! ddeldtt - derivatives of residuals wrt temperatures
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: rrs,rgapp,hrgapp
REAL,DIMENSION(10,5),INTENT(IN) :: derr,dhhf
REAL,DIMENSION(10,10),INTENT(OUT) :: ddeldtt
REAL,DIMENSION(10,10),INTENT(IN) :: mat
REAL,DIMENSION(5) :: arhs
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,INTENT(IN) :: hhrin,hhrout
INTEGER :: ij,k,j1,i1,i2
REAL :: temp1
  outer: DO i=1,nlayer
    inner: DO j=1,nlayer
      ddeldtt(i,j) = 0.0
    END DO inner
  END DO outer
! set up coefficients for equations
  DO i=1,nlayer+1
    temp1 = 1/rrs(i)*rgapp(i)
    arhs(i)=temp1*temp1
  END DO
! if nlayer = 1 then things are simple
  IF (nlayer == 1) THEN
ddeldtt(1,1) = 1/rrs(1)+arhs(1)*(dhhf(1,1)+derr(1,1)-hhrout) &
  + 1/rrs(2)+arhs(2)*(dhhf(2,1)+derr(2,1)-hhrin)
  ELSE
    ! first and last layers
ddeldtt(1,1)=1/rrs(1)+arhs(1)*(dhhf(1,1)-hhrout) &
  + 1/rrs(2)+arhs(2)*(dhhf(2,1)-dhhf(3,1)-hrgapp(1))

ddeldtt(1,2)=-1/rrs(2)+arhs(2)*(dhhf(2,2)-dhhf(3,2)+hrgapp(1))

ddeldtt(nlayer,nlayer)=1/rrs(nlayer)+arhs(nlayer)*(dhhf(2*nlayer-1,nlayer) &
  -dhhf(2*nlayer-2,nlayer) &
  -hrgapp(nlayer-1))+1/rrs(nlayer+1) &
  +arhs(nlayer+1)*(dhhf(2*nlayer,nlayer)-hhrin)
ddeldtt(nlayer,nlayer-1)=-1/rrs(nlayer)+arhs(nlayer) &
  *(dhhf(2*nlayer-1,nlayer-1)-dhhf(2*nlayer-2,nlayer-1)+hrgapp(nlayer-1)) &
  +arhs(nlayer+1)*dhhf(2*nlayer,nlayer-1)
  DO k=1,2*nlayer
ddeldtt(1,1)=ddeldtt(1,1)+arhs(1)*mat(1,k)*derr(k,1) &
  +arhs(2)*(mat(2,k)-mat(3,k))*derr(k,1)
ddeldtt(1,2)=ddeldtt(1,2)+ arhs(2)*(mat(2,k)-mat(3,k))*derr(k,2) &
  +arhs(1)*mat(1,k)*derr(k,2)
ddeldtt(nlayer,nlayer)=ddeldtt(nlayer,nlayer)+arhs(nlayer) &
  *(mat(2*nlayer-1,k)-mat(2*nlayer-2,k))*derr(k,nlayer) &
  +arhs(nlayer+1)*mat(2*nlayer,k)*derr(k,nlayer)
ddeldtt(nlayer,nlayer-1)=ddeldtt(nlayer,nlayer-1) &
  +arhs(nlayer)*(mat(2*nlayer-1,k)-mat(2*nlayer-2,k)) &
  *derr(k,nlayer-1) &
  +arhs(nlayer+1)*mat(2*nlayer,k)*derr(k,nlayer-1)
  IF (nlayer == 2) GOTO 101
  END DO
  DO j=3,nlayer
    j1=j-2

```

```

      DO k=1,nnlayer
ddeldtt(1,j)=ddeldtt(1,3)+arhs(1)*(mat(1,k)*derr(k,j) &
      +arhs(2)*(mat(2,k)-mat(3,k))*derr(k,j)
ddeldtt(nnlayer,j1)=ddeldtt(nnlayer,j1)+arhs(nnlayer) &
      *(mat(2*nnlayer-1,k)-mat(2*nnlayer-2,k))*derr(k,j1) &
      +arhs(nnlayer+1)*mat(2*nnlayer,k)*derr(k,j1)
      END DO
    END DO
! intermediate layers
    DO i=2,nnlayer-1
      i1=i+1
      i2=2*i
      DO j=1,nnlayer
ddeldtt(i,j)=arhs(i)*(dhhf(i2-1,j)-dhhf(i2-2,j)) &
      +arhs(i+1)*(dhhf(i2,j)-dhhf(i2+1,j))
      DO k=1,2*nnlayer
ddeldtt(i,j)=ddeldtt(i,j)+arhs(i) &
      *(mat(i2-1,k)-mat(i2-2,k))*derr(k,j)+arhs(i1) &
      *(mat(i2,k)-mat(i2+1,k))*derr(k,j)
      END DO
    END DO
ddeldtt(i,i)=ddeldtt(i,i)+1/rrs(i)+1/rrs(i1) &
      -arhs(i)*hrgapp(i-1)-arhs(i1)*hrgapp(i)
ddeldtt(i,i1)=ddeldtt(i,i1)-1/rrs(i1) &
      +arhs(i1)*hrgapp(i)
ddeldtt(i,i-1)=ddeldtt(i,i-1)-1/rrs(i) &
      +arhs(i)*hrgapp(i-1)
    END DO
101 CONTINUE

    END IF

    RETURN
    END SUBROUTINE dnode

=====
=====

SUBROUTINE nodes(ttheta,surtemp,tair,tex,hcgapp,hrgapp,&
  hhcin,hhrin,hhcout,hhrout,sconn,soll,nnlayer,dflag,deltaa,rrs,rgap,err1)
! purpose - calculation of residuals
! inputs -
! hf - vector of c/c heat fluxes
! q - vector of ir heat fluxes
! sol - absorbed solar flux in each layer
! rmirr - ir flux from room
! outirr - ir flux from environment
! nnlayer - number of layers
! kglass - array of solid layer conductances
! outputs
! deltaa - residual at each layer
! rrs - array of layer + gap resistances
! rrgap - array of inverses of (hcgapp+hrgapp) for each gap
!
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: ttheta,hcgapp,hrgapp,soll
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: sconn
REAL,DIMENSION(10),INTENT(INOUT) :: surtemp
REAL,DIMENSION(5) :: ascon

```

```

REAL,INTENT(IN) :: tair,tex,hhcin,hhrin,hhcout,hhrout
REAL,INTENT(IN) :: err1,ddflag
INTEGER,INTENT(IN) :: nnlayer
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: deltaa,rrs,rgap
INTEGER :: i,i1,i2
REAL :: ts1,ts2,diff1,diff2
!
! calculate resistances and inverses of the total gap coefficient
!
DO i = 1,nnlayer
  ascon(i) = 0.5/sconn(i)
END DO
  rrgap(1) = 1/(hhcout+hhrout)
  rrs(1) = rrgap(1) + ascon(1)
DO i=2,nnlayer
  rrgap(i) = 1/(hcgapp(i-1) + hrgapp(i-1))
  rrs(i) = rrgap(i) + ascon(i-1) + ascon(i)
END DO
  rrgap(nnlayer+1) = 1/(hhcin+hhrin)
  rrs(nnlayer+1) = rrgap(nnlayer+1) + ascon(nnlayer)
!
IF (ddflag == 1 .OR. err1 == 0.0) GOTO 400
!
! calculate residuals
IF(nnlayer == 1) THEN
  deltaa(1)=(ttheta(1)-tex)/rrs(1)+(ttheta(1)-tair)/rrs(2)-soll(1)
ELSE
  deltaa(1)=(ttheta(1)-tex)/rrs(1)+(ttheta(1)-ttheta(2))/rrs(2) - soll(1)
  deltaa(nnlayer)=(ttheta(nnlayer)-ttheta(nnlayer-1))/rrs(nnlayer) &
    +(ttheta(nnlayer)-tair)/rrs(nnlayer+1) - soll(nnlayer)

  IF(nnlayer == 2) GOTO 200
  DO i = 2,nnlayer - 1
    deltaa(i)=(ttheta(i)-ttheta(i-1))/rrs(i) + (ttheta(i)-ttheta(i+1))/rrs(i+1) - soll(i)
  END DO
END IF
200 CONTINUE
!
! calculate surface temperatures
!
surtemp(1)=(ttheta(1)/ascon(1) + tex/rrgap(1))/(1/ascon(1)+1/rrgap(1))
surtemp(2*nnlayer)=(ttheta(nnlayer)/ascon(nnlayer) + tair/rrgap(nnlayer+1)) &
  /(1/ascon(nnlayer)+1/rrgap(nnlayer+1))

IF (nnlayer == 1) GOTO 400
!
DO i=2,2*nnlayer-1,2
  i1=i/2
  i2=(i+2)/2
  surtemp(i)=ttheta(i1)
  surtemp(i+1)=ttheta(i2)

  ts1=surtemp(i)
  ts2=surtemp(i+1)
250 CONTINUE
  surtemp(i)=(ttheta(i1)/ascon(i1) + surtemp(i+1)/rrgap(i1+1)) &
    /(1/ascon(i1)+1/rrgap(i1+1))
  surtemp(i+1)=(surtemp(i)/rrgap(i1+1) + ttheta(i2)/ascon(i2)) &
    /(1/rrgap(i1+1)+1/ascon(i2))

```

```

diff1=abs(surtemp(i)-ts1)
diff2=abs(surtemp(i+1)-ts2)

      IF (diff1 > 0.01 .OR. diff2 > 0.01) THEN
        ts1=surtemp(i)
        ts2=surtemp(i+1)
        GOTO 250
      END IF

END DO
400 CONTINUE

      RETURN
      END SUBROUTINE nodes
=====

SUBROUTINE fluxes(sourr,mat,tthetas,tair,tex,rmirr,outirr,nface,&
  qq,hrgap,hhrin,hhrout)
! purpose - to calculate ir heat fluxes
! inputs
! sour - ir source terms
! mat - inverse of ir transfer matrix
! thetas - array of surface temperatures
! nface - number of surfaces
! output
! q - ir heat fluxes
! hrgap - effective radiative gap coefficient
REAL_DIMENSION(10,10),INTENT(IN) :: mat
REAL_DIMENSION(10),INTENT(IN) :: sourr,tthetas
REAL_DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: hrgap
REAL_DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: qq
REAL,INTENT(OUT) :: hhrin,hhrout
REAL,INTENT(IN) :: tair,tex,rmirr,outirr
INTEGER,INTENT(IN) :: nface
REAL :: ngaps
INTEGER :: i,j

outer_loop : DO i=1,nface
  qq(i)= 0.0
  inner_loop : DO j=1,nface
    qq(i) = mat(i,j)*sourr(j) + qq(i)
  END DO inner_loop
END DO outer_loop
! do i =1,nface
! write(3,*) qq(i)
! end do
! write(3,*)''

hhrout = (outirr - qq(1))/(tex - tthetas(1))
hhrout = abs(hhrout)
!***
!   write(6,999) nface,mat(1,1),mat(1,2),sour(1),outirr,q(1),tout,
!   1 thetas(1),hhrout
! 999 format(1x,' FLUXES:nface,mat11,mat12,sour1,outirr,q1,tout,thetas1,h

```



```

! 1rout='i3,8f12.5/)
!***
!write(2,222) tair-273.0,tthetas(nnface)-273.0
!222 format(1x,2f8.2)

hhrrin = (qq(nnface) - rmirr)/(tthetas(nnface)-tair)
hhrrin = abs(hhrrin)
  ngaps = nnface/2.0 - 1.0
  IF (ngaps /= 0.0) THEN
    DO i = 1,ngaps
      j = 2*i
      hhrgap(i) = (qq(j) - qq(j+1))/(tthetas(j) - tthetas(j+1))
      hhrgap(i) = abs(hhrgap(i))
    END DO
  END IF

  RETURN
END SUBROUTINE fluxes

!=====

SUBROUTINE filmo(tex,tw,ws,wdir,h,dh,hhcout)
! purpose - to find outdoor film coeff
! inputs -
! tex - outdoor air temp [k]
! tw - outside surface temp
! ws - wind speed [m/s]
! wdir - wind direction [0 - windward; 1 - leeward]
! outputs
! h - heat flux [w m-2]
! hcout - convective film coeff [w/ m-2 k-1]
! dh - derivative of heat flux wrt. temp.
!
!
! data conv/5.6783/
!! determines hcout from ashrae algorithms for building heat transfer
!! algorithm "fo"
! determines hcout from window 4.1 algorithms for window heat transfer
IMPLICIT NONE
REAL,INTENT(IN) :: tex,tw,ws,wdir
REAL,INTENT(OUT) :: h,dh,hhcout

! windward
  IF (wdir == 0.0) THEN
    IF (ws > 2.0) THEN
      ! vc = 0.25 * ws
      hhcout = 8.07*ws**0.605
    ELSE
      ! vc = 0.5
      hhcout = 12.27
    endif
  ELSE
! leeward
    hhcout = 18.64*(0.3 + 0.05*ws)**0.605
  END IF
! convection component of film coefficient
! hcout = 3.28*((vc)**0.605)

```

```

! convert to metric
!   hcout=hcout*conv
!
!
!   h = hcout*(tw-tex)
!   dh = 0.0
!   RETURN
!   END SUBROUTINE filmo

!=====

SUBROUTINE filmi(troom,tsurfi,tilt,hff,dhff,hc,aadelt)
! purpose
!   evaluate heat flux at indoor surface of window
!   using expression from mcadams
! input
!   tsurfi - inside surface temperature
!   troom - room air temperature
! output
!   hc - heat transfer coeff
!   hf - heat flux
!   dhf - derivative of hf wrt t
REAL,INTENT(IN) :: troom,tilt,tsurfi
REAL,DIMENSION(5) :: hc1,hc2
REAL,INTENT(OUT) :: hc,aadelt,hff,dhff
REAL :: delt,hca
INTEGER :: i
DATA hc1/4.005,3.835,3.041,2.247,0.943/
DATA hc2/0.943,2.247,3.041,3.835,4.005/
!
!   delt = tsurfi - troom
!   aadelt = abs(delt)
!   hc = 1.77*(aadelt**.25)
!   IF(tilt > 89.0 .and. tilt < 91.0) GOTO 888

!   correction for non-vertical tilt
!   i = INT(tilt/45.) + 1
!   IF(tsurfi < troom) hca = hc1(i)+(hc1(i+1)-hc1(i))*(tilt-45.*(i-1))/45.
!   IF(tsurfi >= troom) hca = hc2(i)+(hc2(i+1)-hc2(i))*(tilt-45.*(i-1))/45.
!   hc = (hca/3.041)*hc
888 CONTINUE
!
!   hff=hc*delt
!
!   dhff=.25*hc
!
!   RETURN
!   END SUBROUTINE filmi

!=====

SUBROUTINE heat(ttout,ttin,surftemp, nlayer,tilt,gapp,nnu, hhf, dhff, hcgapp,&
                ggcon, ggvis, ggden, ggpr, eerr)
!
! purpose: to compute the convective/conductive heat fluxes
!         and their derivatives wrt temperatures
!         (includes flux conducted through solid layer)
! input:

```

```

! thetas - array of surface temperatures
! nlayer - number of nodes
! gap - gap width
! gcon - user input gas conductivity
! dgcon - user input derivative of gas conductivity
! gvis - user input gas kinematic viscosity
! dgvis - user input derivative of viscosity
! output:
! hf - heat flux at each surface
! dhf - derivatives of heat fluxes
! hcgap - gap film coefficients
!
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: surftemp
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: gapp
REAL,DIMENSION(10),INTENT(OUT) :: hhf
REAL,DIMENSION(10,5),INTENT(OUT) :: dhhf
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: hcgapp
REAL,DIMENSION(5,2),INTENT(INOUT) :: ggcon,ggvis,ggpr,ggden
REAL,INTENT(OUT) :: nnu
REAL,INTENT(INOUT) :: eerr
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL :: gr,dgrl,dgrr,con,dcon,pr
REAL :: dhcl,dhcr
INTEGER :: i,j,k

      out_loop : DO i=1,2*nlayer
      in_loop : DO j=1,nlayer
          dhhf(i,j) = 0.0
      END DO in_loop
      END DO out_loop
! grashof number, thermal conductivity and their derivatives
      IF (nlayer == 1) GOTO 300
      DO i=1,nlayer-1
          j=2*i
          k=j+1

      CALL gasses(surftemp(j),surftemp(k),i,gapp(i),ggcon, &
          & ggvis,ggden,ggpr,gr,dgrl,dgrr,con,dcon,pr,eerr)

! nussalt number and its derivative with respect to gr.
      CALL nussit (ttout,ttin,tilt,gr,pr,nnu,dnnu,eerr)
! convection/conduction coefficient and heat flux

      hcgapp(i) = con/gapp(i)*nnu

! conductive/convective source strengths
          hhf(j) = hcgapp(i)*surftemp(j)
          hhf(k) = hcgapp(i)*surftemp(k)
          IF (eerr == 0.0) EXIT
! derivatives of conductivity wrt boundary temperatures
          dhcl = 0.5*dcon*nnu/gapp(i) + con/gapp(i)*dnnu*dgrl
          dhcr = 0.5*dcon*nnu/gapp(i) + con/gapp(i)*dnnu*dgrr
! conv/cond contribution to the derivatives
          dhhf(j,i)= dhcl*surftemp(j)
          dhhf(k,i+1) = dhcr*surftemp(k)
          dhhf(j,i+1)= dhcr*surftemp(j)
          dhhf(k,i) = dhcl*surftemp(k)

```

```

!
END DO
300 CONTINUE
    RETURN
END SUBROUTINE heat

!=====

SUBROUTINE gasses(tleft,tright,ngp,gap,cond,visk,den,ppr,ggr,ddgrl,ddgrr, &
    & ccon,dcon,prand,erro)
! purpose - to find the coeff of convective/conductive heat transfer
!           in the gas filled space between isothermal solid layers
! inputs -
! tleft - temperature of surface nearest outside [k]
! tright - temperature of surface nearest inside [k]
! gap - gap width [m]
! ngp - gap number considered
! outputs -
! gr - grashof number
! prand-prandtl number
! dgrl - derivative of gr wrt tleft
! dgrr - derivative of gr wrt tright
! con - thermal conductivity [w m-1 k-1] @t=273 k
! dcon - derivative of con wrt mean gap temp [w m-1 k-2]
! other variables
! visk(1)=viscosity @t=273 [kg m-1 k-2]
! visk(2)=derivative of visk(i,1) wrt mean temperature
! den(1)=density @273 [kg m-3]
! den(2)=derivative of den(i,1) wrt mean temp
! pr(1)=prandtl number @t=273k
! pr(2)=prandtl number wrt temp
REAL,INTENT(IN) :: tleft,tright
INTEGER,INTENT(IN) :: ngp
REAL,DIMENSION(5,2),INTENT(INOUT) :: visk,cond,den,ppr
REAL,INTENT(IN) :: gap
REAL,INTENT(OUT) :: ggr,ddgrl,ddgrr,prand
REAL,INTENT(OUT) :: ccon,dcon
REAL :: t,adelt
REAL :: visc,dvisk,dens,dden
REAL :: gap3
REAL :: term1,tlmr2,term2,term3
REAL :: viscl,viscr,densl,densr,densl2,densr2
REAL,INTENT(IN) :: erro          ! Convergence-Tolerance

!
! calculate gap temperature
!
    t = 0.5*(tleft + tright)
!
! for user input
! ngp denotes the gap number considered
!
!
! calculate viscosity, density
    visc = visk(ngp,1) + visk(ngp,2)*(t-273)
    dvisk = visk(ngp,2)
    dens = den(ngp,1) + den(ngp,2)*(t-273)

```

```

      dden = den(ngp,2)
!
! calculate grashoff number
!
      adelt = ABS(tleft - tright)
!
      gap3 = gap*gap*gap
      ggr = (9.81*gap3*adelt*dens*dens)/(t*visc*visc)
!
! calculate dgrl, dgrr
!
      IF (erro /= 0.0) THEN
term1 = (39.24 * gap3) / ((tleft+tright)*(tleft+tright))   ! 4*g = 39.24
tlmr2 = ABS(tleft*tleft - tright*tright)
term2 = tlmr2 * dden
term3 = tlmr2 * dvisk
!
viscl = visk(ngp,1) + visk(ngp,2)*(tleft - 273.15)
viscr = visk(ngp,1) + visk(ngp,2)*(tright - 273.15)
densl = den(ngp,1) + den(ngp,2)*(tleft - 273.15)
densr = den(ngp,1) + den(ngp,2)*(tright - 273.15)
!
densl2 = densl*densl
densr2 = densr*densr
ddgrl = (term1/(viscl*viscl))*(tright*densl2 + term2*densl - term3*densl2/viscl)
ddgrr = (term1/(viscr*viscr))*(-tleft*densr2 + term2*densr - term3*densr2/viscr)
      END IF
!
! calculate the thermal conductivity and its derivative
      ccon = cond(ngp,1) + cond(ngp,2)*(t-273.15)
      dcon = cond(ngp,2)
! calculate the prandl number
      prand = ppr(ngp,1) + ppr(ngp,2)*(t-273.15)
!
      RETURN
      END SUBROUTINE gasses

=====

SUBROUTINE nusslt (tso,tsi,tilt,grr,pr,nuu,dnuu,err)
! purpose
! calculate nussalt modulus for air gaps
! input
! tso - outside surface temp
! tsi - inside surface temp
! gr - grashof number based on gap width
! gap - gap width
! tilt - window tilt from horizontal
! phi - tilt converted to radians
! output
! nu - nussalt number
! dnu - derivative of nu wrt t or gr=c*dt
!
REAL,INTENT(IN) :: tso,tsi,tilt,grr,pr,err
REAL,INTENT(OUT) :: nuu,dnuu
REAL :: nu90,nu60,nu601,nu601a,nu602,nua,nub
REAL :: phi,ra,r11,dnu1,dnu2,dnu90
REAL :: g,onepg2,cra,a,b,ang

```

```

!
phi = tilt*.01745329
ra = grr*pr

IF(ra > 2.0E6) THEN
  write(*,*)'ERROR : Convection correlation no'
  write(*,*)' longer holds- use results'
  write(*,*)' with caution.'
END IF

!
! according to elsherbiny using 1/x=40;
! similar point to 80 and 110, but valid for a higher ra.
! according to elsherbiny ASME trans. Feb,1982
!
      r11 = (0.0303*(ra**0.402))**11
!   r11 = 1.9764E-17*(ra**4.422)
nu90 = (1 + r11)**.09091

IF(errr > 0.0) THEN
  dnu1 = nu90/(1 + r11)
  dnu2 = r11/(0.0303*(ra**0.402))
  dnu90 = dnu1*dnu2*.402*0.0303*pr*ra**(-0.598)
END IF

!
! windows heated from above
!
  IF (tso > tsi) THEN
    nuu = 1.0 + (nu90-1.0)*SIN(phi)
    dnuu = dnu90
  ELSE
!
! windows heated from below
!
    IF (tilt >= 60.0) THEN
      g = 0.5*(1.0+(ra/3160.0)**20.6)**(-0.1)
      onepg2 = (1.+g)*(1.+g)
!     nu601a = 1.0 + (6.2941E-8*ra**2.198)/(onepg2*onepg2*onepg2*(1.+ g))
      nu601a = 1.0 + (0.0936*ra**0.318)/(onepg2*onepg2*onepg2*(1.+ g))
      nu601 = nu601a**0.142857
! for A=40
!     nu602 = ( 0.014 + 0.175/A )*ra**0.283
      nu602 = 0.108375*ra**0.283
      IF (nu601 > nu602) THEN
        nu60 = nu601
      ELSE
        nu60 = nu602
      END IF
      nuu = ((90.0 - tilt)*nu60 + (tilt - 60.0)*nu90)/30.0
      dnuu = 1.0E-06
    END IF

!
! according to Hollands et al, J.of Heat Transfer, May 76
!
    IF (tilt < 60.0) THEN
      cra = ra*COS(phi)
      a = 1.0 - 1708.0/cra
      b = (cra/5830.0)**0.33333-1.0
      nua = (ABS(a) + a)/2.0

```

```

nub = (ABS(b) + b)/2.0
ang = 1708.0*(SIN(1.8*phi))**1.6
nuu = 1.0 + 1.44*nua*(1.0 - ang/cra) + nub
dnuu = 1.0E-06
END IF
END IF
!
! the derivative of nu is set here to a typical value for
! the case of a 90 degrees dbl. pane window which allows
! for the program to converge.
! Note that calculating the derivative of nu wrt to temp
! is not straightforward ... the assumption that
! gr = c*dt makes no sense here.
!
RETURN
END SUBROUTINE nussit

=====

SUBROUTINE irmat(tir,rir,nface,m)
! purpose - to set up transfer matrix for ir radiation balance
! inputs
! tir - array of ir transmittances for each layer
! rir - array of ir reflectances for each surface
! nface - number of surfaces (=2x nlayer)
! output
! m - nface x nface ir transfer matrix
!
INTEGER,INTENT(IN) :: nface
REAL,DIMENSION(10,10),INTENT(OUT) :: m
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: tir
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: rir
INTEGER :: ij
outer: DO i=1,nface
inner: DO j=1,nface
IF (i == j) THEN
m(i,j)= 1.0
ELSE
m(i,j) = 0.0
END IF
END DO inner
END DO outer
IF (nface == 2) GOTO 400 ! for 1 pane glass ,nface = 2
!
! set up the first and last two rows
m(1,3) = -tir(1)*tir(2)
m(2,3) = -rir(2)*tir(2)
m(nface-1,nface-2) = -rir(nface-1)*tir(nface-2)
m(nface,nface-2) = -tir(nface-1)*tir(nface-2)
!
! set up the interior of the matrix ( for pane of glass > 2 panes )
DO i = 2,nface/2 - 1
i2=i*2
m(i2-1,i2-2) = -rir(i2-1)*tir(i2-2)
m(i2-1,i2+1) = -tir(i2)*tir(i2-1)
m(i2,i2+1) = -rir(i2)*tir(i2)
m(i2,i2-2) = -tir(i2-1)*tir(i2-2)
END DO

```



```

400 CONTINUE
      RETURN
      END SUBROUTINE

```

```

=====

SUBROUTINE guess(ttout,ttin,nlayer,ttheta,tthetas)
! purpose - initializes temperature distribution assuming
! a constant temperature gradient across the window
! input
! ttout - outdoor air temperature (k)
! ttin - indoor air temperature (k)
! nlayer - number of solid layers in window
! output
! ttheta - array of nodal temps starting from outdoor layer (k)
! tthetas - array of surface temperatures
REAL,INTENT(INOUT) :: ttin,ttout
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: ttheta
REAL,DIMENSION(10),INTENT(OUT) :: tthetas
REAL :: delta
INTEGER :: i,j
      delta = (ttin-ttout)/(nlayer+1)
      DO i=1,nlayer
        j = 2*i-1
        ttheta(i) = ttout + i*delta
        tthetas(j) = ttheta(i)
        tthetas(j+1) = ttheta(i)
      END DO
      RETURN
      END SUBROUTINE

```

```

=====

SUBROUTINE matinv( a, b, ndim, n, error )
!
! Purpose:
! Subroutine to n x n matrix using Gaussian elimination
! and the maximum pivot technique.
!
IMPLICIT NONE

! Declare local parameters
INTEGER, PARAMETER :: kind = SELECTED_REAL_KIND(p=6) ! Precision
REAL(KIND=kind), PARAMETER :: eps = 10. * EPSILON(0.0_kind)
      ! A "small" number for comparison
      ! when determining singular eqns

! Declare calling arguments:
INTEGER, INTENT(IN) :: ndim      ! Dimension of arrays a and b
REAL(KIND=kind),INTENT(IN),DIMENSION(ndim,ndim) :: a
      ! Input matrix (N x N). This
      ! array is of size ndim x
      ! ndim, but only N x N of the
      ! coefficients are being used.
      ! The declared dimension ndim
      ! must be passed to the sub, or
      ! it won't be able to interpret
      ! subscripts correctly.

```

```

REAL(KIND=kind),INTENT(OUT),DIMENSION(ndim,ndim) :: b
    ! Inverse of matrix a. This
    ! array is of size ndim x
    ! ndim, but only N x N of the
    ! coefficients are being used.
    ! The declared dimension ndim
    ! must be passed to the sub, or
    ! it won't be able to interpret
    ! subscripts correctly.
INTEGER, INTENT(IN) :: n          ! Number of equations to solve.
INTEGER, INTENT(OUT) :: error    ! Error flag:
    ! 0 -- No error
    ! 1 -- Singular equations

! Declare local variables:
REAL(KIND=kind),DIMENSION(n,n) :: a1 ! Copy of a to destroy while
    ! building the inverse. Only
    ! actual elements in use are
    ! duplicated.
REAL(KIND=kind),DIMENSION(n,n) :: b1 ! Array in which to build
    ! inverse. Only actual elements
    ! in use are duplicated.
REAL(KIND=kind) :: factor         ! Factor to multiply eqn irow by
    ! before adding to eqn jrow
INTEGER :: irow                  ! Number of the equation currently
    ! currently being processed
INTEGER :: ipeak                 ! Pointer to equation containing
    ! maximum pivot value
INTEGER :: jrow                  ! Number of the equation compared
    ! to the current equation
REAL(KIND=kind),DIMENSION(n) :: temp ! Scratch array

! Make a copy of the input array.
a1 = a(1:n,1:n)

! Initialize the inverse array.
b1 = 0.
DO irow = 1, n
    b1(irow,irow) = 1.
END DO

! Process n times to get all equations...
mainloop: DO irow = 1, n

    ! Find peak pivot for column irow in rows irow to n
    ipeak = irow
    max_pivot: DO jrow = irow+1, n
        IF (ABS(a1(jrow,irow)) > ABS(a1(ipeak,irow))) THEN
            ipeak = jrow
        END IF
    END DO max_pivot

    ! Check for singular equations.
    singular: IF ( ABS(a1(ipeak,irow)) < eps ) THEN
        error = 1
        RETURN
    END IF singular

```

```

! Otherwise, if ipeak /= irow, swap equations irow & ipeak
swap_eqn: IF ( ipeak /= irow ) THEN
  temp = a1(ipeak,:)
  a1(ipeak,:) = a1(irow,:)  ! Swap rows in a1
  a1(irow,:) = temp
  temp = b1(ipeak,:)
  b1(ipeak,:) = b1(irow,:)  ! Swap rows in b1
  b1(irow,:) = temp
END IF swap_eqn

! Multiply equation irow by -a1(jrow,irow)/a1(irow,irow), and
! add it to Eqn jrow (for all eqns except irow itself).
eliminate: DO jrow = 1, n
  IF ( jrow /= irow ) THEN
    factor = -a1(jrow,irow)/a1(irow,irow)
    a1(jrow,:) = a1(irow,:)*factor + a1(jrow,:)
    b1(jrow,:) = b1(irow,:)*factor + b1(jrow,:)
  END IF
END DO eliminate
END DO mainloop

! End of main loop over all equations. All off-diagonal
! terms are now zero. To get the final answer, we must
! divide each equation by the coefficient of its on-diagonal
! term.
divide: DO irow = 1, n
  b1(irow,:) = b1(irow,:) / a1(irow,irow)
  a1(irow,irow) = 1.
END DO divide

! Copy the answer to the output, set error flag
! to 0 and return.
b = 0.
b(1:n,1:n) = b1
error = 0

END SUBROUTINE matinv

=====
=====
SUBROUTINE source(tthetas, emiss, nlayer, outirr, rmirr,tir, rir, sourr, derr)
! purpose: evaluate radiative sources and derivatives
! input:
!  thetas - array of surface temps
!  emis - emissivity of each surface
!  nlayer - no. of layers
!  outirr - ir flux from outside
!  rmirr - ir flux from room
! output:
!  sourr - array of ir fluxes from each surface
!  derr - array of derivatives of sources wrt temperatures
!
IMPLICIT NONE
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: tthetas
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: emiss
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: sourr
REAL,DIMENSION(10,5),INTENT(OUT) :: derr
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: tir

```

```

REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: rir
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,INTENT(IN) :: outirr,rmirr
REAL :: sigmaa
INTEGER :: ij
REAL :: tmp1
DATA sigmaa/5.6697E-8/
! initialize the array der
out_loop : DO i=1,2*nlayer
in_loop : DO j=1,nlayer
    derr(i,j) = 0.0
    END DO in_loop
END DO out_loop
! calculate the radiative sources and derivatives
DO i=1,nlayer
    j=2*i-1
    tmp1 = tthetas(j)*tthetas(j)
    sourr(j)= emiss(j)*sigmaa*tmp1*tmp1
    tmp1 = tthetas(j+1)*tthetas(j+1)
    sourr(j+1)= emiss(j+1)*sigmaa*tmp1*tmp1
    derr(j,i)= 8.0*sourr(j)/tthetas(j)      !#
    derr(j+1,i)= 8.0*sourr(j+1)/tthetas(j+1)  !#
END DO

! IF(nlayer ==1) THEN
! sourr(1) = sourr(1) + outirr*rir(1)
! sourr(2) = sourr(2) + tir(2)*rmirr
! ELSE
sourr(1) = sourr(1) + outirr*rir(1)
!***
! write(3,999) emiss(1),tthetas(1)-273.,outirr,rir(1),sourr(1)
! 999 format(1x,'SOURCE:emis 1,thetas 1,outirr,rir 1,sour 1=',5f10.3/)
!***
sourr(2) = sourr(2) + tir(1)*outirr
sourr(2*nlayer) = rmirr*rir(2*nlayer) + sourr(2*nlayer)
sourr(2*nlayer-1) = sourr(2*nlayer-1) + tir(2*nlayer-1)*rmirr
! END IF
RETURN
END SUBROUTINE source

=====
SUBROUTINE op(nlayer,tir,rir,aft)
!
! purpose: to find overall optical properties
! of a series of layers with known properties
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: tir
REAL,DIMENSION(10),INTENT(IN) :: rir
REAL,DIMENSION(5,5) :: t,rf,rb
REAL,DIMENSION(5),INTENT(INOUT) :: aft
INTEGER :: ij
REAL :: denom,tijm1,tjj,tt,rft,rbt,t0,rb0,rf0,af,ab
!
! calculate perimeter elements of rt matrix
DO i =1,nlayer
    rf(i,i) = rir(2*i-1)
    rb(i,i) = rir(i*2)
    t(i,i) = tir(2*i-1)

```

```

END DO

DO i=1,nnlayer-1
DO j=i+1,nnlayer
denom = 1. - rf(j,i) * rb(j-1,i)
t(i,j) = t(i,j-1)*t(j,i) / denom
tjm1 = t(i,j-1)
tjj = t(j,i)
rf(i,j) = rf(i,j-1) + tjm1 * tjm1 * rf(j,i) / denom
rb(j,i) = rb(j,i) + tjj * tjj * rb(j-1,i) / denom
END DO
END DO
tt = t(1,nnlayer)
rft = rf(1,nnlayer)
rbt = rb(nnlayer,1)
DO j =1,5
aft(j) = 0.0
END DO
! calculate absorptance in each layer
DO j=1,nnlayer
IF (j == 1) THEN
t0 = 1.
rb0 = 0.
ELSE
t0 = t(1,j-1)
rb0 = rb(j-1,1)
END IF
IF (j == nnlayer) THEN
rf0 = 0.
ELSE
rf0 = rf(j+1,nnlayer)
END IF
af = 1. - t(j,j) - rf(j,j)
ab = 1. - t(j,j) - rb(j,j)
aft(j) = (t0 * af) / (1. - rf(j,nnlayer)*rb0) + (t(1,j) * rf0 * ab) / (1. - rb(j,1)*rf0)
END DO
RETURN
END SUBROUTINE op

```

!=====

```

SUBROUTINE uval(rs,nlayer,u,rtot)

```

```

! This SUBROUTINE calculates the u-value of a window by combining

```

```

! the thermal resistances which are evaluated based on the steady

```

```

! state temperature distribution obtained from the subprogram THERM.

```

```

!

```

```

! inputs:

```

```

! rs - array of effective resistances

```

```

! nlayer - number of glazing layers

```

```

!

```

```

! outputs:

```

```

! u - uvalue of window(w/m2-K)

```

```

! rtot - total thermal resistance of window

```

```

REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: rs

```

```

INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer

```

```

REAL,INTENT(OUT) :: rtot,u

```

```

INTEGER :: j

```

```

!
! total resistance
!
    rtot = 0.0
    DO j = 1,nlayer+1
        rtot = rtot+rs(j)
    END DO
!
! u-value
    u = 1/rtot
    RETURN
    END SUBROUTINE

!=====
SUBROUTINE inward(rs,nlayer,inw)
REAL,DIMENSION(5),INTENT(IN) :: rs
INTEGER,INTENT(IN) :: nlayer
REAL,DIMENSION(5),INTENT(OUT) :: inw
REAL,DIMENSION(0:5) :: n1,n2
n1(0) = 0.0
n2(0) = 0.0

DO i = 1,nlayer
    n1(i) = n1(i-1) + rs(i)
END DO

DO i=1,nlayer+1
    n2(i) = n2(i-1) + rs(i)
END DO

DO i=1,nlayer
    inw(i) = n1(i)/n2(i+1)
END DO

END SUBROUTINE  inward

!=====

```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ตารางแสดงคุณสมบัติทางเชิงแสงของกระจกที่แปรตามมุมตกกระทบ

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 1 ชั้น

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
1	CLR_2	SHGC	0.89	0.89	0.89	0.89	0.88	0.86	0.81	0.70	0.44	0.00	0.82
		T	0.88	0.88	0.88	0.88	0.87	0.85	0.80	0.68	0.42	0.00	0.81
		A	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.05
		R	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.15	0.27	0.53	1.00	0.15
2	CLR_3	SHGC	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.84	0.80	0.68	0.43	0.00	0.80
		T	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.83	0.78	0.66	0.41	0.00	0.79
		A	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.00	0.07
		R	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.15	0.26	0.52	1.00	0.15
3	CLR_4	SHGC	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.83	0.78	0.67	0.42	0.00	0.79
		T	0.84	0.84	0.84	0.83	0.83	0.80	0.76	0.64	0.39	0.00	0.76
		A	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.00	0.09
		R	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.11	0.15	0.26	0.51	1.00	0.15
4	CLR_5	SHGC	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83	0.81	0.77	0.66	0.41	0.00	0.78
		T	0.82	0.82	0.82	0.81	0.80	0.78	0.73	0.62	0.38	0.00	0.74
		A	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.13	0.00	0.12
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.14	0.25	0.49	1.00	0.14
5	CLR_6	SHGC	0.84	0.84	0.83	0.83	0.82	0.80	0.75	0.64	0.40	0.00	0.76
		T	0.80	0.80	0.80	0.79	0.78	0.76	0.71	0.60	0.36	0.00	0.72
		A	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.16	0.15	0.00	0.15
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.14	0.24	0.49	1.00	0.13
6	CLR_8	SHGC	0.81	0.81	0.80	0.80	0.79	0.77	0.72	0.62	0.39	0.00	0.73
		T	0.76	0.76	0.76	0.75	0.74	0.72	0.67	0.56	0.34	0.00	0.68
		A	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.19	0.20	0.20	0.19	0.00	0.19
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.24	0.48	1.00	0.13

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกใส 1 ชั้น (ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
7	CLR_10	SHGC	0.79	0.79	0.78	0.78	0.77	0.75	0.70	0.60	0.38	0.00	0.71
		T	0.73	0.73	0.73	0.72	0.71	0.68	0.64	0.53	0.32	0.00	0.65
		A	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.00	0.22
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.23	0.47	1.00	0.13
8	CLR_12	SHGC	0.77	0.77	0.76	0.76	0.75	0.72	0.68	0.58	0.37	0.00	0.69
		T	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.65	0.61	0.51	0.30	0.00	0.62
		A	0.23	0.23	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.27	0.24	0.00	0.25
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.23	0.46	1.00	0.13
9	CLR_15	SHGC	0.70	0.70	0.70	0.69	0.68	0.66	0.62	0.53	0.34	0.00	0.63
		T	0.61	0.61	0.60	0.60	0.58	0.56	0.51	0.43	0.25	0.00	0.53
		A	0.32	0.32	0.33	0.33	0.34	0.35	0.36	0.35	0.31	0.00	0.34
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.22	0.45	1.00	0.13
10	CLR_19	SHGC	0.66	0.66	0.66	0.65	0.64	0.62	0.58	0.50	0.32	0.00	0.60
		T	0.55	0.55	0.54	0.53	0.52	0.50	0.46	0.38	0.22	0.00	0.48
		A	0.38	0.38	0.39	0.40	0.41	0.42	0.42	0.41	0.35	0.00	0.40
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.22	0.44	1.00	0.13

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
1	GRAY_5	SHGC	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59	0.57	0.53	0.46	0.29	0.00	0.55
		T	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46	0.43	0.39	0.32	0.18	0.00	0.42
		A	0.45	0.45	0.46	0.47	0.48	0.49	0.49	0.48	0.40	0.00	0.47
		R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.20	0.42	1.00	0.11
2	GRAY_6	SHGC	0.58	0.57	0.57	0.56	0.55	0.53	0.50	0.43	0.28	0.00	0.51
		T	0.43	0.43	0.42	0.41	0.40	0.37	0.34	0.27	0.15	0.00	0.36
		A	0.51	0.51	0.52	0.53	0.54	0.55	0.55	0.53	0.43	0.00	0.53
		R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.20	0.42	1.00	0.11
3	GRAY_8	SHGC	0.51	0.51	0.51	0.50	0.48	0.47	0.43	0.37	0.25	0.00	0.45
		T	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27	0.24	0.19	0.11	0.00	0.27
		A	0.62	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.66	0.62	0.49	0.00	0.63
		R	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.19	0.40	1.00	0.10
4	GRAY_10	SHGC	0.46	0.46	0.45	0.45	0.43	0.42	0.39	0.34	0.23	0.00	0.40
		T	0.25	0.25	0.24	0.23	0.22	0.20	0.17	0.14	0.07	0.00	0.20
		A	0.70	0.70	0.71	0.72	0.73	0.73	0.73	0.68	0.53	0.00	0.70
		R	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.18	0.40	1.00	0.10
5	GRAY_12	SHGC	0.42	0.42	0.41	0.41	0.40	0.38	0.36	0.31	0.22	0.00	0.37
		T	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.13	0.10	0.05	0.00	0.15
		A	0.76	0.76	0.77	0.78	0.78	0.79	0.77	0.72	0.55	0.00	0.75
		R	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.18	0.40	1.00	0.10
6	DARKGRAY_5	SHGC	0.55	0.55	0.55	0.54	0.53	0.51	0.48	0.41	0.27	0.00	0.49
		T	0.40	0.40	0.39	0.38	0.37	0.34	0.31	0.25	0.14	0.00	0.33
		A	0.54	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.58	0.55	0.45	0.00	0.55
		R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.20	0.42	1.00	0.11

ตารางที่ ง.2 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกชนิดเคลือบ 1 ชั้น (ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
7	DARKGRAY_6	SHGC	0.52	0.52	0.51	0.50	0.49	0.47	0.44	0.38	0.25	0.00	0.46
		T	0.34	0.34	0.33	0.32	0.30	0.28	0.25	0.20	0.11	0.00	0.28
		A	0.61	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.65	0.62	0.49	0.00	0.62
		R	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.10	0.19	0.40	1.00	0.10
8	Skyblue_6	SHGC	0.59	0.59	0.58	0.58	0.56	0.54	0.51	0.44	0.28	0.00	0.52
		T	0.45	0.45	0.44	0.43	0.42	0.39	0.36	0.29	0.16	0.00	0.38
		A	0.49	0.49	0.50	0.51	0.52	0.53	0.53	0.51	0.42	0.00	0.51
		R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.20	0.42	1.00	0.11
9	Skyblue_8	SHGC	0.53	0.53	0.52	0.52	0.50	0.49	0.45	0.39	0.26	0.00	0.47
		T	0.36	0.36	0.35	0.34	0.33	0.31	0.27	0.22	0.12	0.00	0.30
		A	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.61	0.58	0.46	0.00	0.59
		R	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.11	0.20	0.41	1.00	0.11
10	Oceangreen_6	SHGC	0.57	0.57	0.56	0.55	0.54	0.52	0.49	0.42	0.27	0.00	0.50
		T	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39	0.37	0.33	0.27	0.15	0.00	0.35
		A	0.51	0.51	0.52	0.53	0.54	0.54	0.54	0.52	0.42	0.00	0.52
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.12	0.21	0.43	1.00	0.12
11	Oceangreen_8	SHGC	0.52	0.52	0.51	0.51	0.50	0.48	0.45	0.39	0.26	0.00	0.46
		T	0.35	0.35	0.34	0.33	0.32	0.30	0.27	0.22	0.12	0.00	0.29
		A	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.61	0.61	0.57	0.46	0.00	0.59
		R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.12	0.21	0.42	1.00	0.12

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
1	ST_SS108_6mm	SHGC	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.21	0.00	0.23
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06	0.00	0.06
		A	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.59	0.51	0.00	0.60
		R	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.35	0.43	1.00	0.34
2	ST_SS108_8mm	SHGC	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.20	0.00	0.24
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.00	0.06
		A	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.61	0.52	0.00	0.62
		R	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.31	0.33	0.43	1.00	0.32
3	ST_SS108_6mm	SHGC	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.20	0.00	0.25
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.00	0.06
		A	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.62	0.52	0.00	0.64
		R	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.32	0.43	1.00	0.30
4	ST_SS108_6mm	SHGC	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.24	0.20	0.00	0.25
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04	0.00	0.06
		A	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.66	0.63	0.52	0.00	0.66
		R	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.28	0.31	0.43	1.00	0.28
5	ST_SS144_6mm	SHGC	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27	0.21	0.00	0.28
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.07	0.00	0.09
		A	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.64	0.61	0.50	0.00	0.64
		R	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.30	0.44	1.00	0.27
6	ST_SS144_8mm	SHGC	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.27	0.21	0.00	0.28
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.06	0.00	0.09
		A	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.66	0.62	0.50	0.00	0.66
		R	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.25	0.29	0.44	1.00	0.25

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
7	ST_SS144_10mm	SHGC	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.27	0.21	0.00	0.29
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.06	0.00	0.09
		A	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.51	0.00	0.67
		R	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24
8	ST_SS144_12mm	SHGC	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.29	0.27	0.21	0.00	0.29
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.05	0.00	0.09
		A	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.64	0.51	0.00	0.69
		R	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.23	0.28	0.44	1.00	0.23
9	ST_SS120_6mm	SHGC	0.35	0.35	0.35	0.35	0.34	0.34	0.33	0.30	0.22	0.00	0.33
		T	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.13	0.08	0.00	0.14
		A	0.66	0.66	0.66	0.66	0.67	0.66	0.65	0.60	0.48	0.00	0.64
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.27	0.44	1.00	0.22
10	ST_SS120_8mm	SHGC	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33	0.30	0.22	0.00	0.33
		T	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.14	0.12	0.08	0.00	0.14
		A	0.67	0.67	0.67	0.68	0.68	0.67	0.66	0.61	0.48	0.00	0.65
		R	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.21	0.27	0.44	1.00	0.21
11	ST_SS120_10mm	SHGC	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35	0.33	0.30	0.22	0.00	0.34
		T	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.08	0.00	0.14
		A	0.68	0.68	0.68	0.69	0.69	0.68	0.67	0.62	0.49	0.00	0.66
		R	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.20	0.26	0.44	1.00	0.20
12	ST_SS120_12mm	SHGC	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34	0.30	0.22	0.00	0.34
		T	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.13	0.12	0.07	0.00	0.14
		A	0.69	0.69	0.69	0.70	0.70	0.69	0.68	0.63	0.49	0.00	0.67
		R	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.26	0.44	1.00	0.19

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
13	ST_SGY132_6mm	SHGC	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.41	0.36	0.24	0.00	0.42
		T	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27	0.25	0.23	0.19	0.11	0.00	0.25
		A	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.62	0.58	0.46	0.00	0.60
		R	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.15	0.23	0.43	1.00	0.15
14	ST_SGY132_8mm	SHGC	0.47	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.41	0.36	0.24	0.00	0.42
		T	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.25	0.23	0.19	0.11	0.00	0.24
		A	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.59	0.47	0.00	0.62
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
15	ST_SGY132_10mm	SHGC	0.47	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.41	0.36	0.25	0.00	0.42
		T	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.25	0.23	0.19	0.11	0.00	0.24
		A	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.59	0.47	0.00	0.62
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
16	ST_SGY132_12mm	SHGC	0.48	0.47	0.47	0.47	0.46	0.44	0.42	0.36	0.25	0.00	0.43
		T	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.25	0.23	0.19	0.11	0.00	0.24
		A	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.63	0.59	0.47	0.00	0.62
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
17	ST_SG110_6mm	SHGC	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.25	0.20	0.00	0.27
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.00	0.07
		A	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.65	0.52	0.00	0.69
		R	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.43	1.00	0.24
18	ST_SG110_8mm	SHGC	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.26	0.20	0.00	0.28
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.00	0.07
		A	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.66	0.52	0.00	0.70
		R	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.23	0.28	0.43	1.00	0.23

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
19	ST_SG110_10mm	SHGC	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.20	0.00	0.28
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.00	0.07
		A	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.72	0.67	0.53	0.00	0.71
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.22	0.27	0.43	1.00	0.22
20	ST_SG110_12mm	SHGC	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.20	0.00	0.29
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.00	0.07
		A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.73	0.67	0.53	0.00	0.72
		R	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.21	0.27	0.43	1.00	0.21
21	ST_TE110_6mm	SHGC	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.24	0.19	0.00	0.26
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.00	0.05
		A	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.72	0.71	0.66	0.53	0.00	0.70
		R	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.43	1.00	0.24
22	ST_TE110_8mm	SHGC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.26	0.25	0.19	0.00	0.27
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.00	0.05
		A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.74	0.73	0.68	0.54	0.00	0.72
		R	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.23	0.28	0.43	1.00	0.23
23	ST_TE110_10mm	SHGC	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.25	0.19	0.00	0.27
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.00	0.05
		A	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75	0.73	0.68	0.54	0.00	0.73
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.22	0.28	0.43	1.00	0.22
24	ST_TE110_12mm	SHGC	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27	0.25	0.19	0.00	0.27
		T	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.00	0.05
		A	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.76	0.74	0.69	0.54	0.00	0.74
		R	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.19	0.21	0.27	0.43	1.00	0.21

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
25	ST_TE115_6mm	SHGC	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.28	0.27	0.21	0.00	0.28
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.06	0.00	0.09
		A	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.65	0.61	0.50	0.00	0.65
		R	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.30	0.44	1.00	0.26
26	ST_TE115_8mm	SHGC	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29	0.27	0.21	0.00	0.29
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.06	0.00	0.09
		A	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.51	0.00	0.67
		R	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24
27	ST_TE115_10mm	SHGC	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.27	0.21	0.00	0.29
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.06	0.00	0.09
		A	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.68	0.64	0.51	0.00	0.68
		R	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.23	0.28	0.44	1.00	0.24
28	ST_TE115_12mm	SHGC	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.30	0.29	0.27	0.21	0.00	0.29
		T	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.05	0.00	0.09
		A	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.64	0.51	0.00	0.69
		R	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.23	0.28	0.44	1.00	0.23
29	ST_TS120_6mm	SHGC	0.33	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32	0.31	0.28	0.21	0.00	0.31
		T	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.07	0.00	0.12
		A	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.66	0.62	0.49	0.00	0.66
		R	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.22	0.28	0.44	1.00	0.23
30	ST_TS120_8mm	SHGC	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.31	0.28	0.21	0.00	0.31
		T	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.07	0.00	0.12
		A	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.50	0.00	0.67
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.27	0.44	1.00	0.22

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
31	ST_TS120_10mm	SHGC	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.31	0.29	0.21	0.00	0.32
		T	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.06	0.00	0.11
		A	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69	0.64	0.50	0.00	0.69
		R	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.20	0.26	0.44	1.00	0.20
32	ST_TS120_12mm	SHGC	0.35	0.35	0.34	0.34	0.34	0.33	0.32	0.29	0.21	0.00	0.32
		T	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.09	0.06	0.00	0.11
		A	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.72	0.70	0.65	0.51	0.00	0.70
		R	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.26	0.43	1.00	0.19
33	ST_TS130_6mm	SHGC	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.38	0.37	0.33	0.24	0.00	0.37
		T	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17	0.12	0.00	0.20
		A	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61	0.60	0.59	0.55	0.44	0.00	0.58
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.27	0.44	1.00	0.22
34	ST_TS130_8mm	SHGC	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.33	0.24	0.00	0.37
		T	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17	0.11	0.00	0.20
		A	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.60	0.56	0.45	0.00	0.59
		R	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.21	0.27	0.44	1.00	0.21
35	ST_TS130_10mm	SHGC	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39	0.39	0.37	0.33	0.24	0.00	0.37
		T	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.17	0.11	0.00	0.19
		A	0.62	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.61	0.57	0.46	0.00	0.60
		R	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.20	0.26	0.44	1.00	0.20
36	ST_TS130_12mm	SHGC	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.37	0.34	0.24	0.00	0.38
		T	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20	0.19	0.16	0.10	0.00	0.19
		A	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.62	0.58	0.46	0.00	0.61
		R	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.26	0.44	1.00	0.19

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
37	ST_TS140_6mm	SHGC	0.47	0.47	0.47	0.46	0.46	0.44	0.42	0.36	0.25	0.00	0.43
		T	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.26	0.24	0.20	0.12	0.00	0.25
		A	0.60	0.60	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.57	0.45	0.00	0.60
		R	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.15	0.23	0.43	1.00	0.15
38	ST_TS140_8mm	SHGC	0.48	0.48	0.47	0.47	0.46	0.44	0.42	0.37	0.25	0.00	0.43
		T	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28	0.26	0.24	0.19	0.11	0.00	0.25
		A	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.62	0.58	0.46	0.00	0.61
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
39	ST_TS140_10mm	SHGC	0.48	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.42	0.37	0.25	0.00	0.43
		T	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28	0.26	0.24	0.19	0.11	0.00	0.25
		A	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.62	0.58	0.46	0.00	0.61
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
40	ST_TS140_12mm	SHGC	0.48	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.42	0.37	0.25	0.00	0.43
		T	0.30	0.30	0.29	0.29	0.28	0.26	0.24	0.19	0.11	0.00	0.25
		A	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.62	0.58	0.46	0.00	0.61
		R	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.22	0.43	1.00	0.14
41	ST_TBL135_6mm	SHGC	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.38	0.35	0.26	0.00	0.39
		T	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.13	0.00	0.23
		A	0.57	0.57	0.57	0.58	0.58	0.58	0.56	0.53	0.43	0.00	0.56
		R	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.22	0.27	0.44	1.00	0.22
42	ST_TBL135_8mm	SHGC	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.40	0.39	0.35	0.25	0.00	0.39
		T	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.19	0.13	0.00	0.22
		A	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.57	0.54	0.43	0.00	0.57
		R	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.21	0.27	0.44	1.00	0.21

ตารางที่ ง.3 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 1 ชั้น(ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
43	ST_TBL135_10mm	SHGC	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.39	0.35	0.25	0.00	0.39
		T	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.22	0.19	0.12	0.00	0.22
		A	0.59	0.59	0.59	0.60	0.60	0.60	0.58	0.55	0.44	0.00	0.58
		R	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.20	0.26	0.44	1.00	0.20
44	ST_TBL135_12mm	SHGC	0.43	0.43	0.43	0.42	0.42	0.41	0.39	0.35	0.25	0.00	0.39
		T	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.21	0.19	0.12	0.00	0.22
		A	0.60	0.60	0.60	0.61	0.61	0.61	0.60	0.56	0.44	0.00	0.59
		R	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.17	0.19	0.26	0.44	1.00	0.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.4 คุณสมบัติทาง optical ของกระจก 2 ชั้น

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
1	CLR_6CLR_6	SHGC	0.74	0.74	0.74	0.73	0.72	0.69	0.63	0.49	0.27	0.00	0.65	
		T	0.64	0.64	0.64	0.63	0.61	0.58	0.51	0.38	0.17	0.00	0.54	
		A1	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.00	0.16	
		A2	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.07	0.00	0.11
		Rf	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.15	0.21	0.33	0.57	1.00	0.19	
		Rb	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.15	0.21	0.33	0.57	1.00	0.19	
2	CLR_8CLR_8	SHGC	0.71	0.71	0.70	0.70	0.68	0.65	0.59	0.47	0.26	0.00	0.62	
		T	0.58	0.58	0.57	0.57	0.55	0.52	0.45	0.34	0.15	0.00	0.49	
		A1	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	0.23	0.00	0.20	
		A2	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.12	0.08	0.00	0.13	
		Rf	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.19	0.32	0.55	1.00	0.18	
		Rb	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.19	0.32	0.55	1.00	0.18	
3	GRAY_6CLR_6	SHGC	0.53	0.53	0.53	0.52	0.51	0.48	0.44	0.36	0.22	0.00	0.46	
		T	0.35	0.34	0.34	0.33	0.31	0.29	0.24	0.17	0.07	0.00	0.27	
		A1	0.53	0.53	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.56	0.47	0.00	0.55	
		A2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.03	0.00	0.05	
		Rf	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.22	0.43	1.00	0.13	
		Rb	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.19	0.32	0.56	1.00	0.18	
4	GRAY_8CLR_8	SHGC	0.47	0.47	0.46	0.46	0.45	0.43	0.39	0.33	0.21	0.00	0.41	
		T	0.25	0.25	0.24	0.23	0.22	0.20	0.16	0.11	0.04	0.00	0.19	
		A1	0.63	0.64	0.64	0.65	0.67	0.68	0.68	0.65	0.52	0.00	0.65	
		A2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.00	0.05	
		Rf	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.11	0.19	0.41	1.00	0.11	
		Rb	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.18	0.30	0.53	1.00	0.17	

ตารางที่ ง.4 คุณสมบัติทาง optical ของกระจก 2 ชั้น (ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
5	BLUE_6CLR_6	SHGC	0.57	0.56	0.56	0.55	0.54	0.52	0.47	0.38	0.23	0.00	0.49
		T	0.39	0.39	0.39	0.38	0.36	0.33	0.28	0.20	0.08	0.00	0.31
		A1	0.47	0.47	0.47	0.48	0.50	0.51	0.52	0.52	0.44	0.00	0.49
		A2	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.03	0.00	0.06
		Rf	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.13	0.23	0.44	1.00	0.13
		Rb	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.19	0.32	0.56	1.00	0.18
6	BLUE_8CLR_8	SHGC	0.52	0.52	0.52	0.51	0.50	0.48	0.44	0.36	0.22	0.00	0.46
		T	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27	0.23	0.16	0.06	0.00	0.26
		A1	0.53	0.53	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58	0.56	0.47	0.00	0.55
		A2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.04	0.00	0.07
		Rf	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.09	0.13	0.22	0.43	1.00	0.13
		Rb	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.18	0.30	0.54	1.00	0.18
7	GREEN_6CLR_6	SHGC	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.43	0.40	0.33	0.21	0.00	0.41
		T	0.27	0.26	0.26	0.25	0.23	0.21	0.17	0.12	0.05	0.00	0.20
		A1	0.63	0.64	0.64	0.65	0.67	0.68	0.68	0.65	0.52	0.00	0.65
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04
		Rf	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.11	0.19	0.41	1.00	0.11
		Rb	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.19	0.31	0.55	1.00	0.18
8	GREEN_8CLR_8	SHGC	0.43	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39	0.36	0.30	0.20	0.00	0.37
		T	0.19	0.19	0.18	0.17	0.16	0.14	0.12	0.08	0.03	0.00	0.14
		A1	0.71	0.71	0.72	0.73	0.74	0.75	0.74	0.70	0.55	0.00	0.72
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04
		Rf	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.11	0.19	0.40	1.00	0.11
		Rb	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.18	0.30	0.53	1.00	0.17

ตารางที่ ง.5 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 6 มม.

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
1	ST-SS108_6mm	SHGC	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.19	0.00	0.23	
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.00	0.05	
		A1	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.53	0.00	0.60	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.35	0.43	1.00	0.34	
		Rb	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.29	0.31	0.38	0.56	1.00	0.32	
2	ST-SS114_6mm	SHGC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.25	0.19	0.00	0.27	
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.03	0.00	0.07	
		A1	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.65	0.62	0.52	0.00	0.65	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	
		Rf	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.31	0.44	1.00	0.27	
		Rb	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.27	0.36	0.56	1.00	0.27	
3	ST-SS120_6mm	SHGC	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.27	0.20	0.00	0.31	
		T	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.08	0.04	0.00	0.11	
		A1	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.62	0.51	0.00	0.65	
		A2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.28	0.44	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	
4	ST-GY132_6mm	SHGC	0.44	0.44	0.43	0.43	0.42	0.40	0.38	0.32	0.21	0.00	0.39	
		T	0.23	0.23	0.23	0.22	0.21	0.19	0.17	0.12	0.05	0.00	0.19	
		A1	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.61	0.49	0.00	0.62	
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		Rf	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.16	0.24	0.44	1.00	0.16	
		Rb	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.21	0.33	0.56	1.00	0.20	

ตารางที่ ง.4 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 6 มม. (ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
5	ST-SG110_6mm	SHGC	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.23	0.18	0.00	0.25	
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		A1	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.67	0.54	0.00	0.71	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24	
		Rb	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.26	0.35	0.56	1.00	0.26	
6	ST-TE110_6mm	SHGC	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.23	0.18	0.00	0.25	
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		A1	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.67	0.54	0.00	0.71	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24	
		Rb	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.26	0.35	0.56	1.00	0.26	
7	ST-TE115_6mm	SHGC	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.25	0.19	0.00	0.27	
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.03	0.00	0.07	
		A1	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.63	0.52	0.00	0.66	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	
		Rf	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.30	0.44	1.00	0.26	
		Rb	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.27	0.36	0.56	1.00	0.27	
8	ST-TS120_6mm	SHGC	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.26	0.19	0.00	0.29	
		T	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.03	0.00	0.09	
		A1	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.52	0.00	0.67	
		A2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	
		Rf	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.23	0.28	0.44	1.00	0.23	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.25	

ตารางที่ ง.5 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 6 มม. (ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
9	ST-TS130_6mm	SHGC	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.30	0.21	0.00	0.34	
		T	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.14	0.11	0.05	0.00	0.15	
		A1	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.61	0.58	0.48	0.00	0.60	
		A2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.00	0.03
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.28	0.45	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	
10	ST-TS140_6mm	SHGC	0.44	0.44	0.44	0.43	0.43	0.41	0.38	0.32	0.21	0.00	0.39	
		T	0.24	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.17	0.13	0.05	0.00	0.19	
		A1	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.60	0.48	0.00	0.61	
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		Rf	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.16	0.24	0.44	1.00	0.16	
		Rb	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.21	0.33	0.56	1.00	0.20	
11	ST-TBL135_6mm	SHGC	0.39	0.39	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.31	0.21	0.00	0.36	
		T	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.16	0.13	0.06	0.00	0.17	
		A1	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.58	0.55	0.46	0.00	0.57	
		A2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.00	0.03	
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.22	0.28	0.45	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	

ตารางที่ ง.6 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 12 มม.

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
1	ST-SS108_6mm	SHGC	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.16	0.00	0.20
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.00	0.05
		A1	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.60	0.53	0.00	0.60
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.35	0.43	1.00	0.34
		Rb	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.29	0.31	0.38	0.56	1.00	0.32	
2	ST-SS114_6mm	SHGC	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24	0.22	0.17	0.00	0.24	
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.03	0.00	0.07	
		A1	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.65	0.62	0.52	0.00	0.65	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	
		Rf	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.31	0.44	1.00	0.27	
		Rb	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.27	0.36	0.56	1.00	0.27	
3	ST-SS120_6mm	SHGC	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.28	0.24	0.17	0.00	0.28	
		T	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.08	0.04	0.00	0.11	
		A1	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.62	0.51	0.00	0.65	
		A2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.28	0.44	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	
4	ST-SGY132_6mm	SHGC	0.41	0.41	0.40	0.40	0.39	0.37	0.35	0.29	0.18	0.00	0.36	
		T	0.23	0.23	0.23	0.22	0.21	0.19	0.17	0.12	0.05	0.00	0.19	
		A1	0.62	0.62	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.61	0.49	0.00	0.62	
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		Rf	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.16	0.24	0.44	1.00	0.16	
		Rb	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.21	0.33	0.56	1.00	0.20	

ตารางที่ ง.6 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 12 มม.(
ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
5	ST-SG110_6mm	SHGC	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.20	0.15	0.00	0.22	
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		A1	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.67	0.54	0.00	0.71	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24	
		Rb	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.26	0.35	0.56	1.00	0.26	
6	ST-TE110_6mm	SHGC	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.20	0.15	0.00	0.22	
		T	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		A1	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.71	0.67	0.54	0.00	0.71	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
		Rf	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.24	0.29	0.44	1.00	0.24	
		Rb	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.22	0.26	0.35	0.56	1.00	0.26	
7	ST-TE115_6mm	SHGC	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.22	0.16	0.00	0.24	
		T	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.03	0.00	0.07	
		A1	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.67	0.66	0.63	0.52	0.00	0.66	
		A2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	
		Rf	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.26	0.30	0.44	1.00	0.26	
		Rb	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	0.27	0.36	0.56	1.00	0.27	
8	ST-TS120_6mm	SHGC	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.27	0.26	0.23	0.17	0.00	0.26	
		T	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.03	0.00	0.09	
		A1	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.67	0.63	0.52	0.00	0.67	
		A2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.02	
		Rf	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.20	0.23	0.28	0.44	1.00	0.23	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.25	

ตารางที่ ง.6 คุณสมบัติทาง optical ของกระจกสะท้อนแสง 2 ชั้นช่องอากาศขนาด 12 มม.(
ต่อ)

ID	Glass type	คุณสมบัติ	มุมตกกระทบ										Hemis	
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
9	ST-TS130_6mm	SHGC	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.31	0.27	0.18	0.00	0.31	
		T	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.14	0.11	0.05	0.00	0.15	
		A1	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.62	0.61	0.58	0.48	0.00	0.60	
		A2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.00	0.03
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20	0.22	0.28	0.45	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	
10	ST-TS140_6mm	SHGC	0.42	0.41	0.41	0.41	0.40	0.38	0.35	0.29	0.19	0.00	0.36	
		T	0.24	0.24	0.24	0.23	0.22	0.20	0.17	0.13	0.05	0.00	0.19	
		A1	0.61	0.61	0.62	0.62	0.63	0.63	0.63	0.60	0.48	0.00	0.61	
		A2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.00	0.04	
		Rf	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.16	0.24	0.44	1.00	0.16	
		Rb	0.13	0.13	0.13	0.14	0.14	0.16	0.21	0.33	0.56	1.00	0.20	
11	ST-BL135_6mm	SHGC	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.34	0.33	0.28	0.19	0.00	0.33	
		T	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.16	0.13	0.06	0.00	0.17	
		A1	0.58	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59	0.58	0.55	0.46	0.00	0.57	
		A2	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.00	0.03	
		Rf	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.20	0.22	0.28	0.45	1.00	0.22	
		Rb	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.21	0.25	0.35	0.56	1.00	0.24	

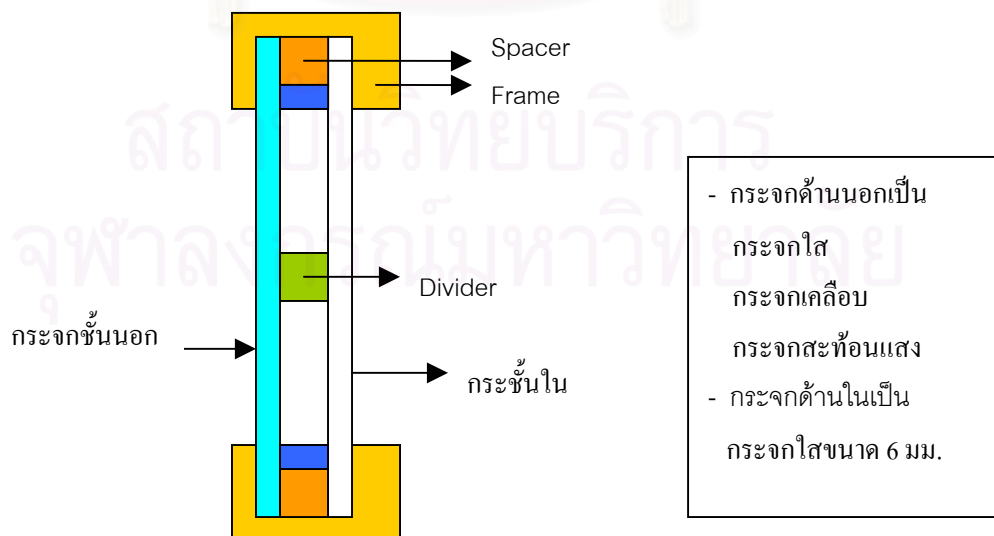
ภาคผนวก จ.

รูปแสดงลักษณะโครงสร้างของหน้ากระจกที่ใช้ในงานวิจัย

กระจก 1 ชั้น



กระจก 2 ชั้น



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพรัตน์ คำพร เกิดเมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2517 ที่ จังหวัดปทุมธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย