

ประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ



นายเชษฐพรธรณ สิ้นเจิมศิริ

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY PERFORMANCE OF NATURALLY VENTILATED DOUBLE SKIN FACADE



Mr.Chettaphan Sinchirmsiri

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Architecture Program in Architecture

Department of Architecture

Faculty of Architecture

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การ  
ระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ

โดย

นายเชษฐพรณ สิ้นเจิมสิริ

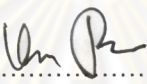
สาขาวิชา

สถาปัตยกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถน เศรษฐบุตร

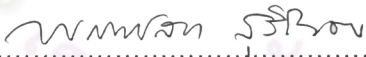
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บันทิต จุลาสัย)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ธนิต จินดาวณิก)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถน เศรษฐบุตร)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ พรรณชัชถ สุริโยธิน)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. โสภา วิศิษฏ์ศักดิ์)

เชษฐพรพรรณ สีนเจิมสิริ : ประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ. (ENERGY PERFORMANCE OF NATURALLY VENTILATED DOUBLE SKIN FACADE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร, 99 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ โดยใช้กล่องทดลองมีขนาด 1.3x2.5x3.0 ม. มีความกว้างของช่องลมเข้าและช่องลมออก 0.3 ม. และมีความกว้างของช่องอากาศ 0.3 ม. ทำการทดลองโดยใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 8 หลอด แทนแสงอาทิตย์จริง ทำการทดลองในห้องปิดที่ไม่มีอิทธิพลของรังสีอาทิตย์และแรงลมภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องกับ วัดอุณหภูมิและความเร็วลมในส่วนต่างๆ ของกล่องทดลอง ทำการทดลองกับกระจก 5 ชนิด โดยกระจกชั้นนอกจะใช้กระจก 3 ชนิดคือ กระจกใส กระจกสีตัดแสง และกระจกสะท้อนแสง ส่วนกระจกชั้นในจะใช้กระจกใสและกระจกอินซูลเทสเพื่อเป็นตัวแทนของกระจกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำตามลำดับ ซึ่งกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้สามารถนำมาจับคู่เพื่อทำการทดลองได้ทั้งหมด 6 รูปแบบคือ กระจกใสกับกระจกใส กระจกสีตัดแสงกับกระจกใส กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส กระจกใสกับกระจกอินซูลเทส กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลเทส และกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลเทส

หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิและความเร็วลมที่วัดได้มาคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) จากการคำนวณพบว่าความต่างของอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเร็วลมและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) ถ้ามีความต่างมากความเร็วลมและค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศก็จะมีค่ามากตาม ซึ่งค่า  $h_c$  จะมีผลต่อค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นอย่างมาก โดยค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลเทสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยที่สุดคือ 0.843 W/m<sup>2</sup>.K และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor มากที่สุดคือ 1.464 W/m<sup>2</sup>.K และเมื่อนำค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นมาเปรียบเทียบกับระบบผนังกระจกชั้นเดียว พบว่าค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นมีค่าต่ำกว่า 51-72% และสามารถลดภาระการทำความเย็นในช่วงเวลากลางวันได้ 8.81-55.22%

การใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกในระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้นแล้วจะมีค่า U-factor และค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC) ที่น้อยที่สุด การใช้กระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลเทสจะทำให้ลดความแตกต่างของค่า U-factor ที่เกิดขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกันลงได้ โดยในระบบผนังกระจกสองชั้นค่า SC จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกันความร้อนมากกว่าค่า U-factor เนื่องจากค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่ากระจกภายนอกจะต่างชนิดกัน

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต...  
 สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...  
 ปีการศึกษา 2552

## 5074114525 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS : DOUBLE SKIN FACADE / NATURAL VENTILATION / NUMERICAL MODEL

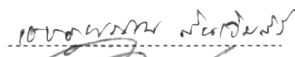
CHETTAPHAN SINCHIRMSIRI : ENERGY PERFORMANCE OF NATURALLY VENTILATED DOUBLE SKIN FACADE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA Ph.D., 99pp.

The objective of this research is to test the energy performance of naturally ventilated double skin facade using the test cell size of 1.3x2.5x3 meters with an air inlet and air outlet of 0.3 meters, and cavity width of 0.3m. The source of heat was derived from 8 units of halogen light 500w as a substitute for sunlight. The test was conducted in a closed environment without the solar radiation and wind, temperature and velocity were measured at through the different points in the test cell. The test was conducted using a total of 5 different types of glass. The outer glazing was made of clear glass, tinted glass and reflective glass while the inner glazing was made of clear glass and insulated clear glass to represent the glass with different heat transfer coefficients. These 5 different types of glass in 2 layers can be matched and generate 6 different types of tests which are clear glass with clear glass, tinted glass with clear glass, reflective glass with clear glass, clear glass with insulated clear glass, tinted class with insulated clear glass and reflective glass with insulated clear glass.

The temperature and velocity of the measurements were then calculated by numerical model to find the overall heat transfer coefficient (U-factor). The calculation shows that the different surface temperatures of outer glazing and temperature in air ventilation contributed to the velocity and convection heat transfer coefficient ( $h_c$ ). The greater difference results in a direct change to velocity and  $h_c$  in ventilation which  $h_c$  significantly contributed to U-factor of the double skin facade. According to the test, the lowest U-factor 0.843 W/m<sup>2</sup>.K was found in the test of reflective glass and insulated clear glass, outer glazing and inner glazing respectively. The greatest U-factor 1.464 W/m<sup>2</sup>.K was found in tinted glass and clear glass, outer glazing and inner glazing respectively. When comparing U-factor from a double skin facade with a single skin facade, the result shows that U-factor from the double skin facade is less than the single skin facade 51-72% and can reduce the cooling load in day time by 8.81-55.22%

Using reflective glass as an outer glazing in a double skin facade has the greatest efficiency in protecting against heat according to the result which shows that U-factor and shading coefficient is lowest. Using insulated clear glass as an inner glazing will minimize U-factor when the outer glazing is a different type of glass. More SC is contributed more to the heat-protection than U-factor in a double skin facade since the U-factor is much different in a double skin facade even using a different type of glass in the outer glazing.

Department : Architecture

Student's Signature 

Field of Study : Architecture

Advisor's Signature 

Academic Year : 2009

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากผู้เกี่ยวข้องมากมายโดยเฉพาะคณาจารย์ที่ถ่ายทอดความรู้ให้คำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร ที่ช่วยให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ รศ.ธนิศ จินดาวงนิค ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.พรรณชัชถ สุริโยธิน และ อ. ดร.วรภัทร์ อิงคโรจน์ ฤทธิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อ. ดร.โสภา วิศิษฎ์ศักดิ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ภายนอกที่สละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนทุนวิจัย ได้แก่ สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต เพื่อสร้างกล่องทดลองในการวิจัย

ขอขอบคุณคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทาลัยเกษตรศาสตร์ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณบริษัท ไทย-เยอรมัน สเปเชียลตี้ กلاس จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กระจก และข้อมูลกระจก และบริษัท จิตเกื้อกูล 2003 จำกัด ที่ช่วยจัดทำกล่องทดลองจนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่และน้องของข้าพเจ้า ที่ช่วยเป็นแรงกายและแรงใจในการฝ่าฟันอุปสรรคระหว่างทำวิทยานิพนธ์ให้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดี และสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุน ให้กำลังใจและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.6 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น.....	5
2.1.1 ประวัติของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	5
2.1.2 คำจำกัดความของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	7
2.1.3 การแยกประเภทของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	7
2.1.4 ส่วนประกอบของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	9
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น.....	11
2.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน.....	11
2.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางกายภาพ.....	12
2.3 แนวคิดและทฤษฎี.....	15
2.3.1 การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น.....	15
2.3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.....	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
2.3.4 การสร้างสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการทดลอง.....	34
2.4 บทสรุป.....	36
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 การดำเนินการวิจัย.....	39
3.2 ตัวแปรในการวิจัย.....	40
3.2.1 ตัวแปรต้น.....	40
3.2.2 ตัวแปรตาม.....	41
3.2.3 ตัวแปรควบคุม.....	42
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	43
3.3.1 ตำแหน่งเครื่องมือวัด.....	43
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ.....	46
3.3.4 วิธีการวัด.....	47
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b>	
4.1 คุณทงุมิ.....	49
4.2 ความเร็วลม.....	55
4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor).....	57
4.4 การคำนวณภาระการทำความเย็น.....	60
<b>บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
5.1 คุณทงุมิ.....	69
5.2 ความเร็วลม.....	69



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor).....	70
5.4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC).....	70
5.5 ความน่าเชื่อถือของค่า U-factor.....	71
5.6 ภาระการทำความเย็น.....	72
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
รายการอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. รายการสัญลักษณ์.....	81
ภาคผนวก ข. การตรวจสอบเครื่องมือวัดความเร็วลม.....	83
ภาคผนวก ค. การคำนวณค่าพารามิเตอร์ไร้มิติโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor).....	84
การคำนวณภาระการทำความเย็น (CLTD).....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

## สารบัญญัตราง

ตารางที่ 3-1	ค่ารังสีอาทิตย์ในประเทศไทย.....	40
ตารางที่ 3-2	ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นนอก.....	41
ตารางที่ 3-3	ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นใน.....	41
ตารางที่ 3-4	รูปแบบการปรับเปลี่ยนกระจกที่ใช้ในการทดลองทั้ง 6 รูปแบบ.....	47
ตารางที่ 4-1	ค่า Nu ที่ได้จากสมการของ Bar-Cohen and Rohsenow (1984).....	57
ตารางที่ 4-2	ค่า Nu ที่ได้จากสมการของ Churchill and Chu (1975).....	58
ตารางที่ 5-1	การเปรียบเทียบค่า U-factor ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง.....	71



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่ 2-1	การไหลของอากาศในรูปแบบต่างๆ โดยแสดงทิศทางการไหลจากจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดภายในระบบผนังกระจกสองชั้น.....	8
รูปที่ 2-2	การแบ่งส่วนในรูปแบบต่างๆ ของผนังกระจกสองชั้น.....	9
รูปที่ 2-3	ส่วนประกอบของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (a) และแบบระบายอากาศโดยใช้เครื่องกล (b).....	10
รูปที่ 2-4	การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น.....	15
รูปที่ 2-5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิวของวัตถุกับความเร็วมวลที่เกิดขึ้นกับวัสดุแต่ละประเภท (ASHRAE, 1994:24.1).....	18
รูปที่ 2-6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิวของวัตถุกับความเร็วมวลที่เกิดขึ้นกับวัสดุแต่ละประเภท.....	19
รูปที่ 2-7	แสดงการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้นในส่วนของกระจก..	21
รูปที่ 2-8	แสดงการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับสมดุลความร้อน (Heat balance).....	21
รูปที่ 2-9	ขั้นตอนการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับคำนวณหา ค่า $h_c$ ภายในช่องอากาศของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	25
รูปที่ 2-10	ลักษณะการไหลของอากาศรูปแบบต่าง ๆ (Lechner, 1991: 184).....	31
รูปที่ 2-11	การสะท้อนแบบเสมือนกระจกเงา.....	33
รูปที่ 2-12	ลักษณะการสะท้อนแสงแบบกระจายในรูปแบบต่างๆ.....	33
รูปที่ 2-13	ลักษณะของรังสีที่ตกกระทบและทะลุผ่านตัวกลางโปร่งใสและโปร่งแสง.....	34
รูปที่ 3-1	แผนการดำเนินงาน.....	39
รูปที่ 3-2	ด้านหน้ากล่องทดลอง.....	42
รูปที่ 3-3	ภายในกล่องทดลอง.....	42
รูปที่ 3-4	การปรับปรุงพื้นที่ทดลองเพื่อควบคุมตัวแปร.....	42
รูปที่ 3-5	สถานที่ทดลองและการวางเครื่องมือ.....	42
รูปที่ 3-6	ผังพื้นที่กล่องทดลองและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ.....	44
รูปที่ 3-7	รูปตัดกล่องทดลอง ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและตำแหน่งการวัดความเร็วมวล..	44
รูปที่ 3-8	เครื่องวัดอุณหภูมิ Testo 350-M/XL Control unit และ Testo 454 Logger....	45
รูปที่ 3-9	เครื่องวัดความเร็วมวล Testo 405-V1.....	46

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 3-10	เครื่องวัดความเข้มแสง LI-COR LI-200.....	46
รูปที่ 3-11	การเปลี่ยนตัวแปรชนิดกระจกทั้ง 5 ชนิด ทั้งกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นใน...	47
รูปที่ 4-1	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Clear-Clear).....	49
รูปที่ 4-2	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Tint-Clear).....	49
รูปที่ 4-3	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Clear).....	50
รูปที่ 4-4	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลเลทใส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Clear-Insulate).....	50
รูปที่ 4-5	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลเลทใส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Tint-Insulate).....	51
รูปที่ 4-6	คุณสมบัติตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลเลทใส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Insulate).....	51
รูปที่ 4-7	ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในภายในช่องอากาศของผนังแต่ละชนิด (T1-T3) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี.....	52
รูปที่ 4-8	ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในของผนังแต่ละชนิด (T1-T4) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี.....	53
รูปที่ 4-9	ลักษณะของอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ตั้งแต่ภายนอกจนถึงภายในห้องของกระจกชนิดต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 250 W/m <sup>2</sup>	54
รูปที่ 4-10	ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศเมื่อเพิ่มปริมาณรังสี.....	55

### สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4-11	ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศในช่วงปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย.....	55
รูปที่ 4-12	ความเร็วลมเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในช่องอากาศในช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย.....	56
รูปที่ 4-13	การเปรียบเทียบค่า $Q_{cd}$ กับค่า $Q_{cv}$ ในระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อหาความถูกต้องของค่า $Nu$ .....	58
รูปที่ 4-14	การเปรียบเทียบค่า $h_c$ กับค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	59
รูปที่ 4-15	การเปรียบเทียบค่า U-factor กับค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้น.....	60
รูปที่ 4-16	ผังพื้นอาคารพาณิชย์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	61
รูปที่ 4-17	รูปด้านหน้าและรูปตัดของอาคารพาณิชย์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	62
รูปที่ 4-18	รูปด้านหน้าและรูปตัดของทางเลือกที่ 1 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบชั้นเดียว	63
รูปที่ 4-19	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูร้อน.....	64
รูปที่ 4-20	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหนาว.....	64
รูปที่ 4-21	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหมุ่มีปกติ.....	65
รูปที่ 4-22	รูปด้านหน้าและรูปตัดของทางเลือกที่ 2 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบต่อเนื่องหลายชั้น.....	66
รูปที่ 4-23	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูร้อน.....	67
รูปที่ 4-24	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหนาว.....	67
รูปที่ 4-25	การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหมุ่มีปกติ.....	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ 5-1	ภาระการทำ ความความเย็นของผนังแต่ละรูปแบบทั้งทางเลือกที่ 1 และทางเลือกที่ 2 เปรียบเทียบกับอาคารเดิม.....	72
รูปที่ 6-1	การเปรียบเทียบค่า U-factor และค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นกับระบบผนังกระจกชั้นเดียวชนิดต่างๆ.....	74



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ผนังภายนอกอาคารเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นในอาคาร ดังนั้นการออกแบบผนังอาคารให้มีประสิทธิภาพในการลดความร้อนก่อนเข้าสู่ตัวอาคารได้มากเท่าไร ก็จะช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้มากขึ้นเท่านั้น

ประเทศไทยได้รับปริมาณความร้อนจากแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ดังนั้นในการระบายอากาศสามารถนำหลักการของความแตกต่างของอุณหภูมิ (Stack effect) มาประยุกต์ใช้กับระบบผนังอาคาร ทำให้เกิดการระบายอากาศแบบธรรมชาติ (Natural ventilation) โดยไม่จำเป็นต้องใช้พัดลมระบายอากาศ สามารถช่วยลดการใช้พลังงานได้ (จารุณี เข้มพิลา, 2550: 1) ซึ่งแนวความคิดนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับระบบผนังกระจกสองชั้น (Double skin facade) ข้อดีของระบบผนังกระจกสองชั้นคือประกอบด้วยผนังกระจกสองชั้นนอกและผนังกระจกชั้นใน ทำให้ลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและมีช่องอากาศ (Cavity) ระหว่างผนังกระจกทั้งสองทำหน้าที่พาความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบออกจากผนังอาคาร โดยระบายอากาศจากช่องลมเข้าด้านล่างสู่ช่องลมออกด้านบน แต่ก็มีข้อเสียคือค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาที่สูงกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียว

การศึกษาเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นไปอย่างกว้างขวางในยุโรป อเมริกาเหนือ และญี่ปุ่น ซึ่งเป็นประเทศที่สามารถใช้ประโยชน์จากผนังรูปแบบนี้ได้ทั้งฤดูร้อนและฤดูหนาว ในฤดูหนาวระบบผนังกระจกสองชั้นจะทำหน้าที่กักเก็บความร้อนไว้ในช่องอากาศ โดยปิดช่องลมเข้าและช่องลมออก ทำให้ช่องอากาศระหว่างผนังทำหน้าที่เป็นฉนวนกันอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคาร ในฤดูร้อนจะใช้ช่องอากาศนี้ระบายอากาศและกันความร้อนจากภายนอกอาคาร ส่วนประเทศไทยไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาวมากนัก ดังนั้นก่อนที่จะนำระบบผนังอาคารสองชั้นมาใช้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัด รวมไปถึงการปรับใช้ที่เหมาะสมกับสภาพอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย

การวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงการทำงานของระบบผนังกระจกสองชั้นและประสิทธิภาพในการกันความร้อน รวมถึงทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model) ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้อธิบายถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบผนังนี้ เพื่อหาข้อสรุปและแนวทางในการเลือกใช้กระจกซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของระบบผนังนี้อย่างเหมาะสม และเป็นการส่งเสริมงานวิจัยเกี่ยวกับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติและการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์และการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานของระบบผนังกระจกสองชั้น พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการนำผนังระบบนี้ไปใช้

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยนี้ทำการศึกษาาระบบผนังกระจกสองชั้นที่ระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติเท่านั้น
2. กล่องทดลอง (Test cell) ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีความสูงเท่ากับอาคารชั้นเดียวคือ 3 ม.
3. ช่องลมเข้าและช่องลมออกมีความกว้างคงที่คือ 30 ซม. และไม่มีบานเกล็ด
4. กล่องทดลองที่ใช้ในการวิจัยมีความกว้างของช่องอากาศคงที่คือ 30 ซม.
5. ภายในช่องอากาศของกล่องทดลองไม่มีการติดตั้งแผงกันแดด
6. กระจกที่ใช้ในการทดลองมี 5 ชนิด โดยแบ่งเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นใน กระจกชั้นนอกที่ใช้ในการทดลองมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ กระจกลามิเนตใส กระจกลามิเนตที่ตัดแสง และกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E ส่วนกระจกชั้นในมี 2 ชนิดคือ กระจกใส และกระจกอินซูลูเททใส low-E



#### 1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

1. งบประมาณในการทดลองมีจำกัดทำให้ไม่สามารถสร้างกล่องทดลองได้หลายกล่อง ทำให้ตัวแปรทางกายภาพถูกจำกัด เช่น ความสูงของกล่องทดลอง ความกว้างของช่องอากาศ ขนาดของช่องลมเข้าและออก จำนวนชนิดของกระจก และระบบปรับอากาศภายในกล่องทดลอง
2. เครื่องมือในการวัดความเร็วลมยังไม่มีความแม่นยำมากพอ จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การทดลองถูกจำกัดให้อยู่ในระบบปิด
3. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบผนังกระจกสองชั้น จำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของพลังงานได้ (Dynamic simulation software) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีค่าลิขสิทธิ์ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีการหาค่าความเย็นจากความต่างของอุณหภูมิ (Cooling load temperature differential)

#### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบผนังกระจกสองชั้น รวมถึงรูปแบบการทดลองที่ใช้ในการทดสอบระบบผนังกระจกสองชั้น
2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น
3. กำหนดตัวแปรในการทดลอง
4. กำหนดรูปแบบกล่องทดลอง วัสดุ และสถานที่ในการทดลอง
5. ดำเนินการก่อสร้างกล่องทดลองพร้อมทั้งจัดเตรียมพื้นที่ทดลองให้มีลักษณะเป็นห้องปิดไม่มีอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์และแรงลมภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง
6. ทำการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในส่วนต่างๆ ของกล่องทดลอง
7. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) ของผนังแต่ละรูปแบบ

8. นำค่า U-factor ของผนังแต่ละรูปแบบมาคำนวณภาระการทำความเย็นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงาน
9. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลอง
10. สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะแนวทางที่เหมาะสมในการใช้งานระบบผนังกระจกสองชั้นในประเทศไทย

### 1.6 สมมติฐานของการวิจัย

1. ผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและมีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในจะทำให้เกิดการพาความร้อนในช่องอากาศดีที่สุด เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิผิวที่กระจกมากที่สุด
2. ผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลेट low-E เป็นกระจกชั้นในจะมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนดีที่สุด
3. ระบบผนังกระจกสองชั้นมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดีกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียว

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นข้อมูลพื้นฐานในการใช้ระบบผนังกระจกสองชั้นในประเทศไทย ซึ่งสามารถใช้ได้กับการออกแบบผนังอาคารและการปรับปรุงผนังอาคารให้มีความสามารถในการประหยัดพลังงานได้มากขึ้น
2. เป็นข้อมูลในการเลือกใช้กระจกซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักในระบบผนังกระจกสองชั้น
3. สรุปการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบผนังกระจกสองชั้น
4. ส่งเสริมให้เกิดงานวิจัยในเรื่องระบบผนังกระจกสองชั้น และการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในประเทศไทยให้มากขึ้น

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น

##### 2.1.1 ประวัติของระบบผนังกระจกสองชั้น

ในปี 1849 Jean-Baptise Jobard ซึ่งเป็นผู้อำนวยการของพิพิธภัณฑสถานธรรมชาติวิทยาของกรุงบรัสเซลส์ ได้อธิบายถึงวิสัยทัศน์ใหม่ของกลไกการระบายอากาศในระบบผนังกระจกหลายชั้น (Multi-skin facade) โดยกล่าวถึงช่วงฤดูหนาวควรจะมีอากาศร้อนไหลเวียนอยู่ระหว่างกระจกสองชั้น ในขณะที่ช่วงฤดูร้อนให้อากาศเย็นไหลเวียนเข้ามา แนวคิดนี้ได้ปรากฏขึ้นอีกครั้งในอีก 65 ปีต่อมา ในปี 1914 Paul Scheerbaert เสนอแนวความคิดเดียวกันนี้ในหนังสือของเขาที่ชื่อ “Glasarchitectur”

ในช่วงนั้นสามารถพบการก่อสร้างระบบผนังกระจกสองชั้นแบบที่ไม่มีการระบายอากาศได้ในสถาปัตยกรรมพื้นถิ่นของภูมิภาคเซตหนาว โดยรูปแบบดังกล่าวจะเป็นหน้าต่างสองชั้นและผนังกระจกสองชั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการก่อสร้างผนังกระจกสองชั้นแบบที่ไม่มีการระบายอากาศนี้ หลังจากที่มีกรให้คำจำกัดความ ผนังเหล่านั้นไม่ถือว่าเป็นระบบผนังกระจกหลายชั้น อย่างไรก็ตาม Steiff Machine Hall ในจีเอนเจน/เบอร์น ประเทศเยอรมนีในปี 1903 ได้ใช้ประโยชน์จากการระบายอากาศภายในช่องอากาศและถือได้ว่าเป็นผลงานยุคแรกของการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในระบบผนังกระจกหลายชั้น

ในปี 1929 Le Corbusier ได้ออกแบบ La Cite' de Refuge มีแนวความคิดเกี่ยวกับการสูญเสียและได้รับการส่งผ่านความร้อน (Transmission loss and gain) จะหายไปโดยการไหลเวียนอากาศจากภายในออกไปสู่ช่องอากาศของผนัง ซึ่งไม่ประสบความสำเร็จนักในการทำให้อากาศไหลเวียนโดยใช้พลังงานทำความร้อนและทำความเย็น ในที่สุดแนวคิดนี้ได้หายไปเนื่องจากยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอและค่าก่อสร้างที่สูง

ครั้งแรกที่มีการศึกษาเกี่ยวกับระบบหน้าต่างที่มีอากาศไหลผ่าน (Airflow window) ได้ตีพิมพ์ใน 15 ประเทศในแถบสแกนดิเนเวีย โดยมีใจความเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพด้านพลังงานและสภาวะน่าสบาย (Thermal comfort) ในที่อยู่อาศัย ในปี 1957 มีการจดสิทธิบัตรครั้งแรกเกี่ยวกับระบบหน้าต่างที่มีอากาศไหลผ่านเกิดขึ้นในประเทศสวีเดน ในปี 1967 อาคารสำนักงานหลังแรกที่มีการติดตั้งระบบหน้าต่างที่มีอากาศไหลผ่านได้เกิดขึ้นในกรุงเฮลซิงกิประเทศฟินแลนด์

การพัฒนาเกิดขึ้นชัดเจนในช่วงวิกฤติการณ์ด้านพลังงานปี 1973 และปี 1979 ความคิดด้านประสิทธิภาพในการใช้พลังงานและสภาวะน่าสบายเป็นที่แพร่หลายในแถบยุโรปเหนือ ในช่วงปลายยุค 70 และช่วงต้นยุค 80 ระบบการระบายอากาศโดยใช้กลไก (Mechanically ventilated facade) ได้มีการนำมาใช้เป็นอย่างมากในทวีปยุโรป โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือการลดการส่งผ่านความร้อนในฤดูหนาวและลดการรับรังสีอาทิตย์ในช่วงฤดูร้อน ในขณะที่ประเทศสหรัฐอเมริกามีความสนใจเกี่ยวกับระบบผนังกระจกหลายชั้นมีน้อยมาก

ในขณะนั้นโรงงานที่ทำเกี่ยวกับวัสดุก่อสร้างมุ่งพัฒนาวัสดุให้มีความเป็นฉนวนมากขึ้น จุดที่น่าสนใจคือการพัฒนาที่เกิดขึ้นในโรงงานกระจก หน้าต่างกระจกชั้นเดียว (Single pane window) ที่มีค่า U-factor 5 ถึง 6  $W/(m^2 \cdot K)$  ได้มีการเพิ่มกระจกอีกชั้นในหน้าต่าง ซึ่งกล่องที่คล้ายกับหน้าต่างนี้ใช้กันโดยทั่วไปตามเมืองในยุโรป และมีค่า U-factor ในช่วง 2.5  $W/(m^2 \cdot K)$  ในช่วงปลายยุค 80 กระจกสองชั้นได้พัฒนา ค่า U-factor เพิ่มขึ้นเล็กน้อย มีค่าประมาณ 3  $W/(m^2 \cdot K)$  แต่มีการผลิตที่ง่ายขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ต่อมา มีการเพิ่มกระจกเป็นสามชั้นและสี่ชั้นแต่ไม่ได้รับความนิยม เพราะมีน้ำหนักและความหนาไม่สามารถติดตั้งในบานกรอบได้สะดวก ต่อมาได้มีการใช้สารที่มีการแผ่รังสีต่ำ (low-E) เคลือบลงบนกระจกและใส่ก๊าซเฉื่อยแทนอากาศแห้งลงในช่องว่าง อย่างเช่น อาร์กอน คริปทอน และซีนอน ด้านการควบคุมรังสีจากดวงอาทิตย์ การเคลือบสาร low-E มีประสิทธิภาพมากในการลดการส่งผ่านรังสีอาทิตย์โดยไม่ลดค่าการมองเห็น (Visible transmittance) อีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้โพลีเอสเตอร์ฟิล์มที่มีสาร low-E ติดตั้งในช่องอากาศ ข้อดีของวิธีนี้คือยับยั้งการพาความร้อนในช่องอากาศ การพัฒนาเทคโนโลยีกระจกยังมีอยู่อย่างต่อเนื่องและราคาค่าก่อสร้างที่สูงทำให้ระบบผนังกระจกหลายชั้นไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร

ในปัจจุบันจุดมุ่งหมายที่น่าสนใจคือการพัฒนาประสิทธิภาพด้านการใช้พลังงานควบคู่ไปกับความคุ้มค่าด้านการลงทุนทางเศรษฐศาสตร์ ผู้ออกแบบอาคารเป็นส่วนหนึ่งที่ต้องตระหนักถึงสภาวะแวดล้อม การเพิ่มขึ้นของโรค Sick Building Syndrome (SBS) ทำให้ความคิดในการใช้งานระบบผนังกระจกหลายชั้นกลับมา ในประเทศเยอรมันอาคาร The Commerzbank ในแฟรงก์

เพิร์ท กล่าวได้ว่าเป็นตัวอย่างอาคารที่ตระหนักถึงสภาวะดังกล่าวและได้สร้างขึ้นให้เป็นอาคารที่มีภาพลักษณ์ “green” (Saelens, 2002:7-8)

### 2.1.2 คำจำกัดความของระบบผนังกระจกสองชั้น

ระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นระบบที่ประกอบด้วยผนังกระจกสองแผ่นตั้งแยกออกจากกัน โดยมีช่องว่างให้อากาศไหลผ่านตรงกลาง การระบายอากาศในช่องนั้นสามารถเกิดขึ้นโดยวิธีธรรมชาติ พัดลมดูดอากาศหรือเครื่องกล จากลักษณะการไหลของอากาศแต่ละรูปแบบภายในช่องนั้น จุดเริ่มต้นและทิศทางของอากาศจะแตกต่างกัน โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ การใช้งาน สภาพที่ตั้ง ช่วงเวลาการใช้งานของอาคาร และการออกแบบระบบปรับอากาศ ผนังกระจกจะเป็นกระจกชั้นเดียวหรือสองชั้นก็ได้โดยที่ระยะห่างจะอยู่ระหว่าง 20 ซม. ถึง 2 ม. โดยส่วนมากจะใช้สำหรับการป้องกันการแพร่กระจายความร้อนในช่วงเวลาที่ทำคามเย็น อุปกรณ์บังแดดสามารถติดตั้งภายในช่องอากาศนี้ได้ (Poirasiz, 2004:175)

### 2.1.3 การแยกประเภทของระบบผนังกระจกสองชั้น

การแยกประเภทที่ปรับปรุงขึ้นมาใช้ใช้ลักษณะที่ชัดเจนและเกิดขึ้นจริงของแต่ละประเภท และมีจุดมุ่งหมายเพื่ออธิบายระบบผนังกระจกหลายชั้นให้มีความเข้าใจมากขึ้นถึงการใช้งานและลักษณะทางกายภาพ ตัวแปร 3 ตัวเพียงพอที่จะอธิบายถึงลักษณะการทำงานโดยสังเขป (Saelens, 2002:7-8)

- 1) จุดเริ่มต้นการไหลของอากาศ (The origin of the airflow)
- 2) แรงขับเคลื่อนของอากาศ (The driving force of the airflow)
- 3) การแบ่งส่วนของผนัง (The facade compartmentalization)

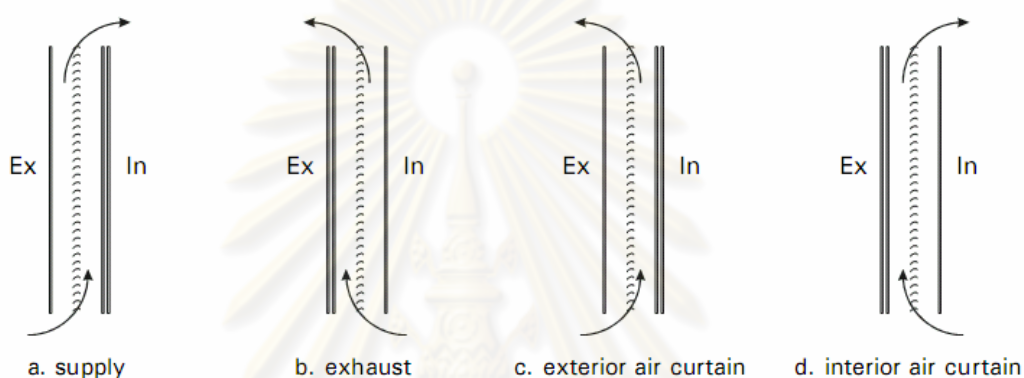
#### 1) จุดเริ่มต้นการไหลของอากาศ

จุดเริ่มต้นการไหลของอากาศเป็นลักษณะที่สำคัญเพราะเป็นอิทธิพลสำคัญต่ออุณหภูมิในช่องอากาศ แนวความคิดของการไหลมี 3 รูปแบบหลักดังนี้ (Terminology after Park et al., 1989)

- แบบรับอากาศ (Supply) คือ มีการรับเอาอากาศภายนอกผ่านช่องอากาศแล้วเข้าสู่ตัวอาคาร (รูปที่ 2-1 a)

- แบบระบายออก (Exhaust) คือ มีการไหลของอากาศภายในผ่านไปยังช่องอากาศไปสู่ภายนอกอาคาร (รูปที่ 2-1 b)

- แบบม่านอากาศ (Air curtain) คือ อากาศที่เข้าและออกช่องอากาศเป็นด้านเดียวกัน ไม่มีการแลกเปลี่ยนอากาศระหว่างภายนอกและภายในอาคาร ซึ่งจะแบ่งได้อีกสองรูปแบบคือ แบบม่านอากาศภายนอก เป็นรูปแบบของการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (รูปที่ 2-1 c) และแบบม่านอากาศภายใน โดยทั่วไปจะใช้พัดลมดูดอากาศทำงานร่วมกัน (รูปที่ 2-1 d)



รูปที่ 2-1 การไหลของอากาศในรูปแบบต่างๆ โดยแสดงทิศทางการไหลจากจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดภายในระบบผนังกระจกสองชั้น

## 2) แรงขับเคลื่อนของอากาศ

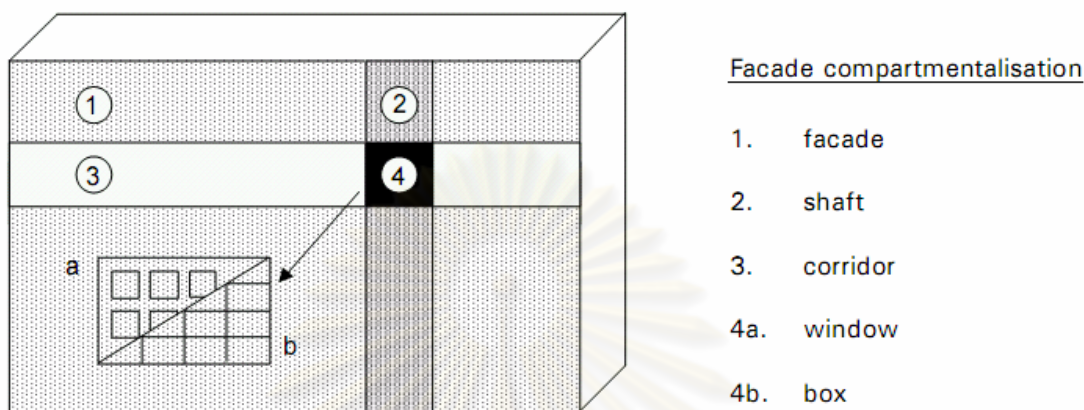
แรงขับเคลื่อนภายในช่องอากาศสามารถเกิดได้จากการระบายอากาศ โดยใช้เครื่องกล และ โดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งมีความสำคัญและเกี่ยวข้องกับการคำนวณการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องอากาศ

- การระบายอากาศโดยใช้เครื่องกล (Mechanical ventilation) เกิดขึ้นจากหมุนของพัดลมทำให้เกิดการไหลของอากาศ โดยส่วนใหญ่จะทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศภายในอาคาร ซึ่งสามารถควบคุมการไหลของอากาศจะทำได้ง่ายกว่าวิธีธรรมชาติ

- การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural ventilation) เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันทำให้เกิดแรงลอยตัว (Buoyancy) การระบายอากาศแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก โดยการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาตินี้สามารถทำงานร่วมกับหน้าต่างในอาคารสำหรับอาคารสำนักงานที่ต้องการระบายอากาศแบบธรรมชาติ และใช้การไหลของอากาศแบบม่านอากาศสำหรับอาคารสำนักงานที่ต้องการการปรับอากาศแบบเต็มรูปแบบ

### 3) การแบ่งส่วนของผนัง

การแบ่งส่วนของผนังสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้

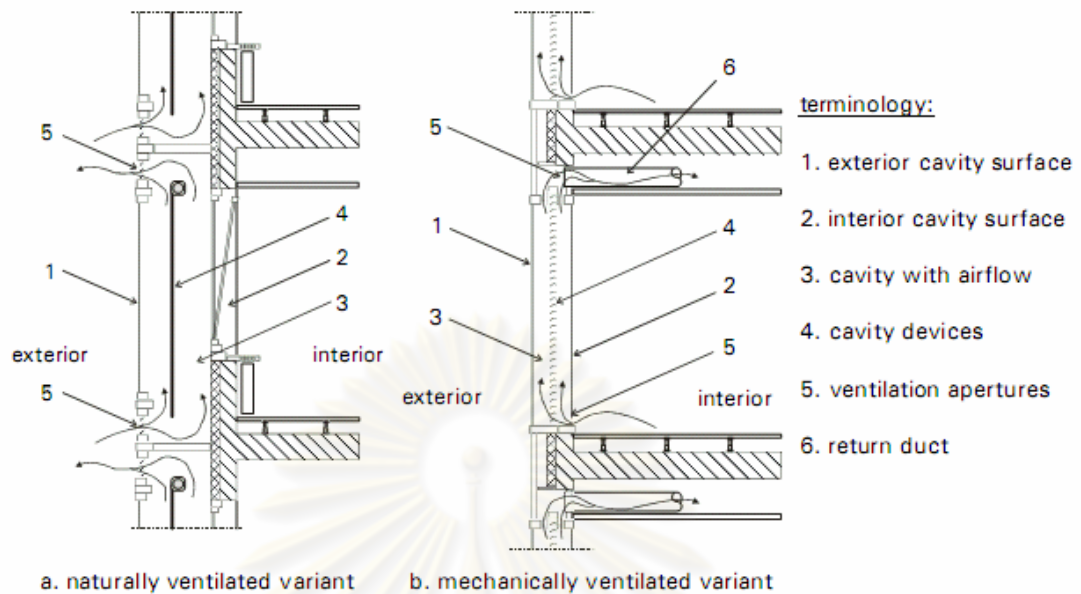


รูปที่ 2-2 การแบ่งส่วนในรูปแบบต่างๆ ของผนังกระจกสองชั้น

- แบบฟาซาด (Facade) ถ้าผนังกระจกสองชั้นถูกใช้งานทั่วทั้งผนัง โดยยาวต่อเนื่องตลอดทั้งแนวตั้งและแนวนอน (รูปที่ 2-2 1.)
- แบบชาฟท์ (Shaft) ถ้าผนังกระจกสองชั้นมีการแบ่งส่วนให้เล็กลง โดยมีการกั้นผนังย่อยในแนวนอนทำให้ผนังที่ถูกแบ่งนั้นมีความต่อเนื่องในแนวตั้ง (รูปที่ 2-2 2.)
- แบบคอรริดอร์ (Corridor) ถ้าผนังกระจกสองชั้นมีการแบ่งส่วนให้เล็กลง โดยมีการกั้นผนังย่อยในแนวตั้งทำให้ผนังที่ถูกแบ่งนั้นมีความต่อเนื่องในแนวนอน (รูปที่ 2-2 3.)
- แบบวินโดว์ หรือ บ็อกซ์ (Window or box) ถ้าผนังกระจกสองชั้นการแบ่งส่วนย่อยนั้นมีการแบ่งทั้งในแนวตั้งและแนวนอน โดยแบบวินโดว์จะมีระบบการทำงานของหน้าต่างเข้ามาเกี่ยวข้อง (รูปที่ 2-2 4a.) ส่วนแบบบ็อกซ์จะไม่มีหน้าต่างแต่จะเป็นผนังกระจกในส่วนนั้นแทน (รูปที่ 2-2 4b.)

#### 2.1.4 ส่วนประกอบของระบบผนังกระจกสองชั้น

ระบบผนังกระจกสองชั้นโดยทั่วไปจะมีส่วนประกอบหลักๆ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2-3 ส่วนประกอบของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (a) และแบบระบายอากาศโดยใช้เครื่องกล (b)

1. ผิวชั้นนอกของช่องอากาศ (Exterior cavity surface) หรือ กระจกชั้นนอก (Outer glazing) ส่วนใหญ่จะเป็นกระจกชั้นเดียวที่มีความแข็งแรง เช่น กระจกเทมเปอร์ หรือสามารถใช้กระจกลามิเนตทดแทนได้

2. ผิวชั้นในของช่องอากาศ (Interior cavity surface) หรือ กระจกชั้นใน (Inner glazing) ส่วนใหญ่จะเป็นกระจกอินซูลेट 2 หรือ 3 ชั้น โดยช่องระหว่างกระจกจะใส่อากาศอาร์กอน หรือคลิปตอน

3. ช่องอากาศ (Cavity) คือ ช่องระหว่างกระจกชั้นในและกระจกชั้นนอกทำหน้าที่เป็นช่องทางการไหลของอากาศจากล่างขึ้นบน ช่วยพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องนี้ออกจากระบบผนังกระจกสองชั้น

4. แผงกันแดด (Cavity devices) ภายในช่องอากาศสามารถติดตั้งแผงกันแดดเพื่อลดปริมาณรังสีอาทิตย์ก่อนเข้าสู่ตัวอาคาร

5. ช่องลม (Ventilation apertures) สำหรับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติจะแบ่งเป็นช่องลมเข้า (Inlet) อยู่ด้านล่าง และช่องลมออก (Outlet) อยู่ด้านบน

6. ท่อดูดอากาศ (Return duct) สำหรับการระบายอากาศโดยใช้เครื่องกล



## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น สามารถจำแนกงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน เพื่อให้ง่ายต่อการนำข้อมูลไปใช้ในการทดลองสามารถแบ่งได้ดังนี้

### 2.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน

### 2.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางกายภาพ

- 1) งานวิจัยเกี่ยวกับกระจก
- 2) งานวิจัยเกี่ยวกับแผงกันแดดในช่องอากาศ
- 3) งานวิจัยเกี่ยวกับความกว้างของช่องอากาศ

### 2.2.3 เอกสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

#### 2.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน

Wigginton and McCarthy (2000) จากการศึกษาพบว่าอาคารระบบผนังกระจกสองชั้นสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 65%, ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ 65% และลดการปล่อยก๊าซ CO<sub>2</sub> ได้ 50% ในประเทศภูมิอากาศหนาวอย่างประเทศอังกฤษ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบผนังกระจกชั้นเดียว

Lei and Toshio (2005) ได้ทดสอบระบบผนังอาคารสองชั้นในประเทศญี่ปุ่น พบว่าสามารถลดภาระการทำความเย็นได้ 10-15% ในฤดูร้อนด้วยการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และลดภาระการทำความร้อนได้ 20-30% ในฤดูหนาวด้วยกรีนเฮาส์เอฟเฟค

Koinakis and Sakellaris (2007) ได้ทำการทดสอบระบบผนังกระจกสองชั้นในอาคารสำนักงาน โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบผนังสองชั้นแบบคอรริดอร์ (Corridor DSF type) กับแบบต่อเนื่อง (Continuous DSF type) ซึ่งมีลักษณะการแบ่งส่วนที่ไม่เหมือนกัน แบบแรกจะมีลักษณะตามแนวนอน ส่วนแบบที่สองมีลักษณะตามแนวตั้ง ทำการทดลองด้วยโปรแกรม Suncode และ COMIS ใช้ข้อมูลอากาศของประเทศกรีซ จากการทดลองพบว่า ระบบผนังสองชั้นแบบคอรริดอร์สามารถลดการใช้พลังงานได้ 14.1% และแบบต่อเนื่องสามารถลดได้ 46.9%

## 2.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางกายภาพ

### 1) งานวิจัยเกี่ยวกับกระจก

Haase, Marques da silva and Amanto (2009) ทำการทดลองเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้นในประเทศฮ่องกง โดยใช้การวัดค่าจริงกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TRNSYS และ COMIS ทำการวัดค่าอุณหภูมิและค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจากอาคารสำนักงาน แล้วนำไปยืนยันความถูกต้อง (Validation) กับ Base case ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นได้เสนอทางเลือกในการปรับปรุงอาคารเปรียบเทียบผลระหว่างระบบผนังกระจกชั้นเดียวกับผนังกระจกสองชั้น โดยระบบผนังกระจกชั้นเดียวมีกระจกที่เป็นตัวแปรคือ กระจกใส กระจกสะท้อนแสง และกระจกสีตัดแสง ส่วนระบบผนังกระจกสองชั้นจะเป็นกระจกใสทั้งภายนอกและภายใน และได้กำหนดตัวแปรอีกตัวหนึ่งคือ อัตราส่วนช่องเปิดของอาคาร (WWR) 3 ค่าคือ 0.3, 0.6 และ 0.9 ผลที่ได้คือ ระบบผนังกระจกสองชั้นสามารถลดภาระการทำความเย็นในอาคารได้ดีกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียว ชนิดกระจกใส 24.5% ชนิดกระจกสะท้อนแสง 20.5% และชนิดกระจกสี 9% (WWR = 0.6) นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นอีก 3 ตัวคือสีของแผงบังแดด ทิศของอาคาร และความหนาแน่นของเมือง โดยที่ทิศของอาคารเมื่อติดตั้งระบบผนังอาคารสองชั้นแล้วได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก มีค่า 32% และน้อยที่สุดคือทิศเหนือ มีค่า 26%

Naveen (2008) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นกับระบบผนังกระจกชั้นเดียวในภูมิภาคเขตร้อนแห่งหนึ่งในการลดภาระการทำความเย็นในอาคารสำนักงาน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของพลังงาน (Dynamic simulation software) IESVE ใช้ข้อมูลอากาศของกรุงโคโรประเทศอียิปต์ มีตัวแปรคือ ชนิดของกระจก โดยที่ระบบผนังกระจกสองชั้นมีกระจก 3 ชนิดคือ กระจกใส กระจกสีตัดแสง และกระจกสะท้อนแสง ปรับเปลี่ยนที่ผนังชั้นนอก ส่วนระบบผนังกระจกชั้นเดียวมีกระจก 2 ชนิดคือ กระจกใสและกระจกสะท้อนแสง ผลปรากฏว่าระบบผนังกระจกสองชั้นชนิดใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกภายนอกสามารถลดภาระการทำความเย็นในอาคารสำนักงานได้ดีกว่าผนังกระจกชั้นเดียวชนิดสะท้อนแสงได้ประมาณ 30% และระบบผนังกระจกสองชั้นชนิดใสมีภาระการทำความเย็นมากกว่ากระจกสะท้อนแสง

### 2) งานวิจัยเกี่ยวกับแผงกันแดดในช่องอากาศ

Allan (2004) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับตำแหน่งการติดตั้งแผงกันแดดภายในช่องอากาศ 3 รูปแบบ คือ การติดตั้งแผงกันแดดชิดกระจกชั้นนอก การติดตั้งแผงกันแดดกึ่งกลางช่องอากาศ และการติดตั้งแผงกันแดดชิดกระจกชั้นใน ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ESP-r ได้ผลปรากฏว่า ในฤดูร้อนการติดตั้งแผงกันแดดชนิดกระจกชั้นนอกมีภาระการทำความเย็นน้อยที่สุด รองลงมาคือการติดตั้งแผงกันแดดกึ่งกลางช่องอากาศ และการติดตั้งแผงกันแดดชนิดกระจกชั้นในมีภาระการทำความเย็นมากที่สุดโดยมีค่ามากกว่าการติดตั้งแผงกันแดดชั้นนอกถึง 62.5% ส่วนในฤดูหนาวการติดตั้งแผงกันแดดกึ่งกลางช่องอากาศมีภาระการทำความร้อนน้อยที่สุด รองลงมาคือการติดตั้งแผงกันแดดชนิดกระจกชั้นใน และการติดตั้งแผงกันแดดชนิดกระจกชั้นนอกมีภาระการทำความร้อนมากที่สุด แต่ค่าความต่างของภาระการทำความร้อนของการติดตั้งแผงกันแดดทั้ง 3 รูปแบบมีน้อยมาก โดยความต่างมากที่สุดไม่เกิน 4.35%

Haase, Marques da silva and Amanto (2009) ได้ทดสอบสีของแผงกันแดดที่ติดตั้งภายในช่องอากาศ ผลปรากฏว่าแผงกันแดดสีดำทำให้อุณหภูมิภายในช่องอากาศเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แผงกันแดดสีขาวสามารถลดอุณหภูมิภายในช่องอากาศได้ 11K

### 3) งานวิจัยเกี่ยวกับช่องอากาศ

เทพพิทักษ์ วะสุรีย์ (2552) ได้ทำการทดสอบความกว้างของช่องอากาศภายในระบบผนังกระจกสองชั้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TAS โดยความกว้างของช่องอากาศมีขนาด 0.6 ม., 0.9, 1.2 และ 1.5 ม. ผลปรากฏว่า ความกว้างของช่องอากาศขนาด 1.2 ม. ของอาคารที่มีความสูง 3 ชั้นมีภาระในการทำความเย็นน้อยที่สุด

#### 2.2.3 เอกสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

##### 2.2.3.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Allan (2004) กล่าวถึงการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองประสิทธิภาพการใช้พลังงานของระบบผนังกระจกสองชั้นไว้ว่า ในการคาดคะเนการใช้พลังงานในอาคารได้อย่างแม่นยำ การจำลองประสิทธิภาพด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ถูกนำมาใช้ แต่การคำนวณในระบบผนังกระจกสองชั้นซึ่งมีการเคลื่อนที่ของแรงโดยธรรมชาติบนพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนผ่านมวลสาร (Heat and mass transfer) โปรแกรมที่จะนำมาใช้ต้องสามารถอธิบายและใช้ได้กับการเคลื่อนที่ของพลังงานที่ส่งผ่านมวลสารสำหรับมัลติโซน (Multizone) โปรแกรมเช่น ESP-r, EnergyPlus และ TRYNSYS เป็นโปรแกรมคำนวณหลักในกลุ่มมัลติโซน

##### 2.2.3.2 การวัดค่าการไหลของอากาศ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีเทคนิคมากมายที่สามารถนำมาใช้วัดอัตราการไหลของอากาศ การไหลของอากาศภายในท่อหรือช่องอากาศสามารถแบ่งได้ตามวิธีการวัดดังนี้ (ASHRAE, 1997)

### 1) การวัดค่าความต่างของความดันระหว่างช่องลมเข้าและช่องลมออก (Pressure difference measurement)

Onur et al. (1996) ได้ทำการวัดค่าความต่างของความดันระหว่างช่องลมเข้าในห้องที่ดูดอากาศเพื่อตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศในช่องอากาศที่ใช้เครื่องกระจายอากาศ วิธีการนี้ใช้ไม่ได้กับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติเพราะส่วนใหญ่แรงขับเคลื่อนอากาศจะน้อย

### 2) การใช้เครื่องวัดลม (Anemometer)

Park et al. (1989), Faist (1998) และ Jones et al. (2000) ได้คำนวณอัตราการไหลของอากาศจากการวัดความเร็วลมซึ่งสามารถพบเห็นได้ในงานวิจัยของพวกเขา แต่ดูเหมือนจะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นกับผลการวิจัย ความเร็วลมในการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาตินั้นมีลักษณะที่ไม่เป็นรูปแบบตามแนวตัด (Rodrigues et al., 2000) รายละเอียดเกี่ยวกับการวางตำแหน่งจุดที่จะวัดความเร็วลมอาจจะต้องมีความเป็นเอกเทศ เพราะว่าอาจจะมีผลต่อการก่อตัวของลมในช่องอากาศ ดังนั้นการวัดค่าอัตราการไหลของอากาศในการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติจากการวัดความเร็วลมนั้นไม่แนะนำให้ใช้วิธีการนี้ (Saelens, 2002)

### 3) การใช้เทรเซอร์แก๊ส (Tracergas techniques)

เป็นวิธีการพิเศษคือการใช้เทรเซอร์แก๊สในการวัด (Ziller, 1999 และ Buzzelen and Mattelaer, 2000) เทคนิคการใช้เทรเซอร์แก๊สมีความเป็นไปได้ที่จะวัดค่าอัตราการไหลของอากาศได้ทั้งการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติและการระบายอากาศโดยใช้เครื่องกลโดยปราศจากสิ่งรบกวนแรงขับอากาศ

การใช้เทรเซอร์แก๊สนั้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการตรวจวัดอัตราการไหลของอากาศแต่เป็นวิธีพิเศษเครื่องมือในการวัดมีราคาค่อนข้างสูงและยังไม่มีที่แพร่หลายในประเทศไทย จากการศึกษางานวิจัยทำให้สรุปได้ว่าการใช้เครื่องวัดลมเป็นวิธีการที่ได้ผลดีรองลงมาสำหรับการทดลองการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ อีกทั้งเป็นที่แพร่หลายและวิธีการตรวจวัดที่ไม่ยุ่งยาก การวางตำแหน่งของเครื่องวัดลมไม่ให้ขวางการไหลของอากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยลดความผิดพลาดกับผลการทดลอง

#### 2.2.3.3 การใช้กระจกตามกฎหมายพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร

ส่วนหนึ่งของกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของการใช้กระจกในการก่อสร้างอาคารจากราชกิจจานุเบกษา ตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540) ออกความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2552 เล่มที่ 114 ตอนที่ 52ก หน้า 37 มีรายละเอียดดังนี้คือ

ข้อ 27 วัสดุที่เป็นผิวของผนังภายนอกอาคารหรือใช้ตกแต่งผิวภายนอกอาคารจะต้องมีปริมาณการสะท้อนแสงได้ไม่เกินร้อยละสามสิบ

ข้อ 28 กระจกที่ใช้ทำผนังภายนอกอาคารที่เป็นอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ และอาคารขนาดใหญ่ต้องเป็นกระจกตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปประกบกันโดยมีวัสดุคั่นกลางระหว่างชั้นและยึดกระจกแต่ละชั้นให้ติดแน่นเป็นแผ่นเดียวกัน และกระจกแต่ละชั้นต้องมีคุณสมบัติในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการขาดของเศษของกระจกเมื่อกระจกแตก และวัสดุคั่นกลางต้องยึดเศษหรือชิ้นกระจกไม่ให้หลุดออกมาเมื่อกระจกแตกร่วงหรือราน

ให้ไว้ ณ วันที่ 29 กันยายน พ.ศ.2540

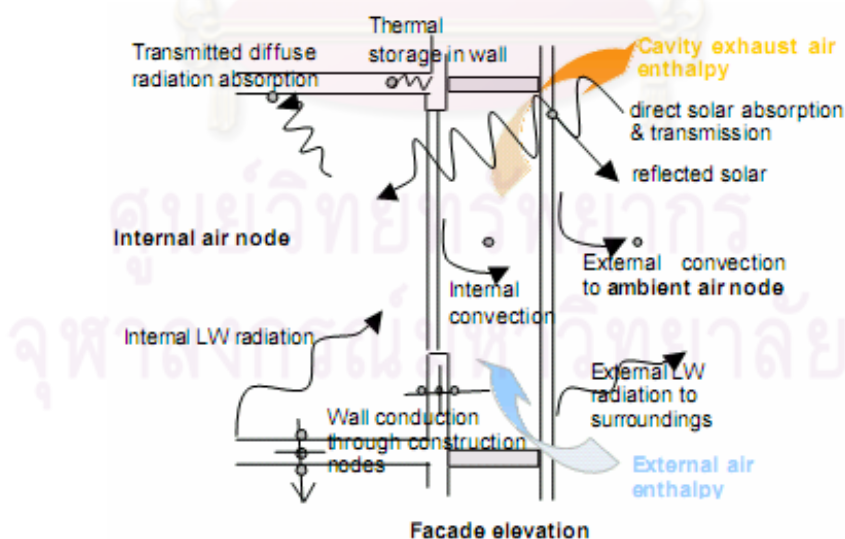
เสนาะ เทียนทอง

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงมหาดไทย

## 2.3 แนวคิดและทฤษฎี

### 2.3.1 การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น

การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้



รูปที่ 2-4 การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น

### 1) การถ่ายเทความร้อนที่กระจกชั้นนอก

การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นเริ่มต้นจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบผิวกระจกชั้นนอก รังสีบางส่วนสะท้อนกลับออกไป บางส่วนทะลุเข้าสู่ช่องอากาศ และบางส่วนถูกดูดซับเข้าไปในกระจกแล้วเปลี่ยนรูปของพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระจกชั้นนอกนี้บางส่วนถ่ายเทสู่ภายนอกจากการพาความร้อนที่ผิวกระจก ในขณะที่เดียวกันมีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างสภาพแวดล้อมกับกระจกชั้นนอกนี้

### 2) การถ่ายเทความร้อนในช่องอากาศ

จากรังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านกระจกชั้นนอกเข้าสู่ช่องอากาศ รังสีส่วนนี้จะตกกระทบกระจกชั้นในในลักษณะเดียวกับกระจกชั้นนอกเพียงแต่มีปริมาณที่ลดลง รังสีบางส่วนถูกสะท้อนอยู่ในช่องอากาศ บางส่วนทะลุผ่านเข้าสู่ภายในห้อง บางส่วนถูกดูดซับไว้ในกระจกเปลี่ยนเป็นความร้อนแล้วแผ่รังสีออกไปยังช่องอากาศและภายในห้อง ความร้อนที่อยู่ในช่องอากาศนี้จะทำให้อากาศภายในช่องอากาศขยายตัว ความหนาแน่นของอากาศจะน้อยกว่าอากาศภายนอก ทำให้เกิดแรงลอยตัวตามธรรมชาติไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางช่องลมออกด้านบน ในขณะที่เดียวกันอากาศภายนอกที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่อากาศในช่องอากาศ ทำให้เกิดการระบายความร้อนภายในช่องอากาศ ในขณะที่กระจกภายในและกระจกภายนอกจะมีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนซึ่งกันและกัน

### 3) การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในห้อง

หลังจากรังสีความร้อนทะลุผ่านกระจกชั้นนอกและชั้นในเข้าสู่ภายในห้อง รังสีอาทิตย์ที่เหลืออยู่จะถูกลดดูดซับโดยวัตถุภายในห้อง เช่น พื้น ผนัง ฝ้าเพดาน อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ แล้วเปลี่ยนเป็นความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระจกชั้นในด้วยการแผ่รังสีคลื่นยาว ในขณะที่เดียวกันก็มีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวกระจกชั้นใน

#### 2.3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการถ่ายเทความร้อนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีคือ วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ วิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา และวิธีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน วิธีการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 วิธีนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทางของการไหลของความร้อน (สมศรี จรุงเรือง, 2542:1-2)

## 1) การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นกลไกของการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งหรือจากส่วนหนึ่งของวัตถุไปยังส่วนอื่นๆ ของวัตถุ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานจะเกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกันหรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการนำนั้นความร้อนจะไหลจากโมเลกุลของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยวัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็ง ส่วนวัสดุที่เป็นของเหลวหรือแก๊สจะมีการนำความร้อนเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการพาความร้อน

กฎเบื้องต้นที่ใช้อธิบายถึงวิธีการนำความร้อนคือ กฎของ Fourier ซึ่งอธิบายไว้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ( $Q_{cd}$ ) ในทิศทางที่กำหนดผ่านพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $A$ ) จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง ( $T_1 - T_2 / L$ ) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_{cd} = k A \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (\text{W}) \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

$A$  คือ พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล ( $\text{m}^2$ )

$T_1 - T_2$  คือ ความต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดทั้งสอง ( $\text{K}$ )

$L$  คือ ระยะระหว่างจุดทั้งสอง ( $\text{m}$ )

ฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ( $q''$ ) คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำต่อหน่วยพื้นที่ที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

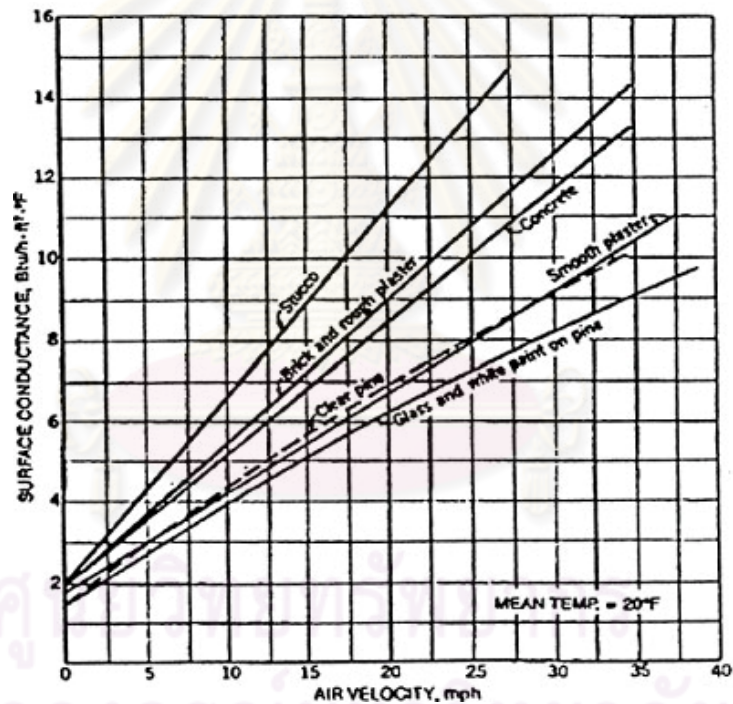
$$q'' = \frac{Q}{A} = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

## 2) การพาความร้อน

กระบวนการที่แท้จริงของการพาความร้อนคือ การถ่ายเทพลังงานจากโมเลกุลของของไหลหนึ่งไปยังโมเลกุลอื่นๆ ยังคงเป็นการนำความร้อน เพียงแต่เป็นถ่ายเทพลังงานผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติเป็นของไหลเช่น น้ำและอากาศ หากการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากเครื่องกล กระบวนการพาความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนโดยแรงขับ” (Force

convection) แต่ถ้การเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากความต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหล อันเนื่องมาจากความต่างระหว่างอุณหภูมิ กระบวนการการพาความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนแบบอิสระ” หรือ “การพาความร้อนโดยธรรมชาติ” (Free convection or natural convection)

กฎเบื้องต้นที่สามารถอธิบายการพาความร้อนระหว่างของไหลกับวัตถุนั้น ได้แก่ กฎการเย็นตัวของ Newton ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient, h) หรือค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์ม (Film coefficient) มีคุณลักษณะคล้ายค่าการนำความร้อน (k) ของสสารประเภทของแข็ง แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะไม่คงที่เหมือนค่าการนำความร้อน จากการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิว ความเร็วลม และทิศทางการส่งผ่านความร้อน ดังที่แสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิวของวัตถุกับความเร็วมวลที่เกิดขึ้นกับวัสดุแต่ละประเภท (ASHRAE, 1994:24.1)

ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในการพาความร้อน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (Allard, 1998: 49)

$$Q_{cv} = h A (T_s - T_\infty) \quad (W) \quad \text{(สมการที่ 2.3)}$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/(m².K))

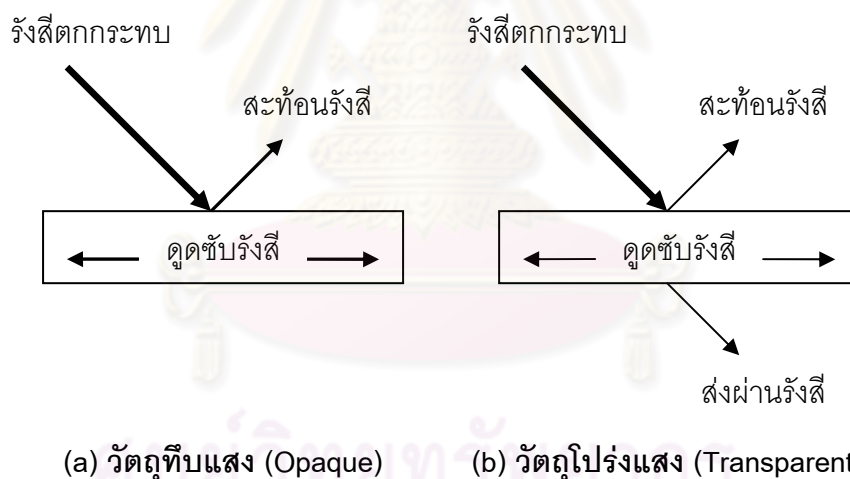


A คือ พื้นที่ผิววัตถุที่เกิดการพาความร้อน ( $m^2$ )

$T_s - T_\infty$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับอากาศ (K)

### 3) การแผ่รังสีความร้อน

การปล่อยพลังงานนี้สามารถเกิดขึ้นได้ในของไหลแต่ในที่นี้จะขอล่าวถึงการปล่อยพลังงานที่เกิดขึ้นจากพื้นผิววัตถุ วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะปล่อยพลังงาน (Energy emitted) ออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ พลังงานที่ปล่อยออกมานี้เรียกว่ารังสีความร้อน (Thermal radiation) พลังงานที่ปล่อยออกจากผิววัตถุไปสู่ภายนอกแท้ที่จริงเกิดจากอุณหภูมิภายในวัตถุ และพลังงานที่ตกลงบนผิววัตถุจะถูกดูดซับเข้าไปในวัตถุ โดยวัตถุทึบแสง (Opaque) เมื่อรับรังสีอาทิตย์จะดูดซับรังสีเข้าสู่วัตถุและสะท้อนรังสีบางส่วนออกไป ในขณะที่วัตถุโปร่งแสง (Transparent) จะมีการดูดซับรังสีเข้าสู่วัตถุ สะท้อนรังสีบางส่วน และส่งผ่านรังสีบางส่วนทะลุออกไป ดังรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พื้นผิวของวัตถุกับความเร็วลมที่เกิดขึ้นกับวัสดุแต่ละประเภท

รังสีความร้อนที่ผ่านไปยังตัวกลางจะมีค่าลดลงเนื่องจากถูกดูดซับรังสีไว้บางส่วน แต่รังสีที่ผ่านไปยังสุญญากาศจะไม่ถูกดูดซับ เพราะฉะนั้นในทางปฏิบัติจึงถือว่ารังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศจะไม่ถูกดูดซับรังสี เนื่องจากค่าการดูดซับรังสีมีค่าน้อยมาก

รังสีความร้อนอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากวัตถุ กลไกของการแผ่รังสีจึงแตกต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อน เนื่องจากไม่ต้องอาศัยตัวกลางใน

การถ่ายเทความร้อน โดยรังสีความร้อนสูงสุดที่วัตถุปล่อยออกมาเนื่องจากอุณหภูมิ ( $T_s$ ) สามารถอธิบายโดยกฎของ Stefan-Boltzmann ดังนี้

$$Q_b = \sigma A T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

โดยที่  $\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

$A$  คือ พื้นที่การแผ่รังสีความร้อน ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (K)

ตัวปล่อยรังสีอุดมคติ (Ideal radiator) คือวัตถุดำ (Black body) ซึ่งวัตถุดำนั้นสามารถปล่อยรังสีความร้อนได้สูงสุดตามสมการที่ 2.4 ซึ่งรังสีความร้อนที่ปล่อยออกมาจากวัตถุจริง (Real body) ที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์จะมีค่าน้อยกว่ารังสีความร้อนจากวัตถุดำเสมอ สามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

$$Q_r = \varepsilon Q_b = \varepsilon \sigma A T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ (Emissivity) ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับวัตถุจริง และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับวัตถุดำ

การหาอัตราส่วนการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างวัตถุ 2 วัตถุ สามารถอธิบายได้โดยกำหนดให้วัตถุที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวน้อย ( $A$ ) ถูกปกคลุมด้วยสภาพแวดล้อม (Surrounding) มีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนกัน โดยที่อุณหภูมิของวัตถุที่มีขนาดเล็ก ( $T_s$ ) ไม่เท่ากับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ( $T_{sur}$ ) อัตราส่วนการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุกับสภาพแวดล้อมต่อหน่วยพื้นที่ สามารถอธิบายได้ตามสมการดังนี้

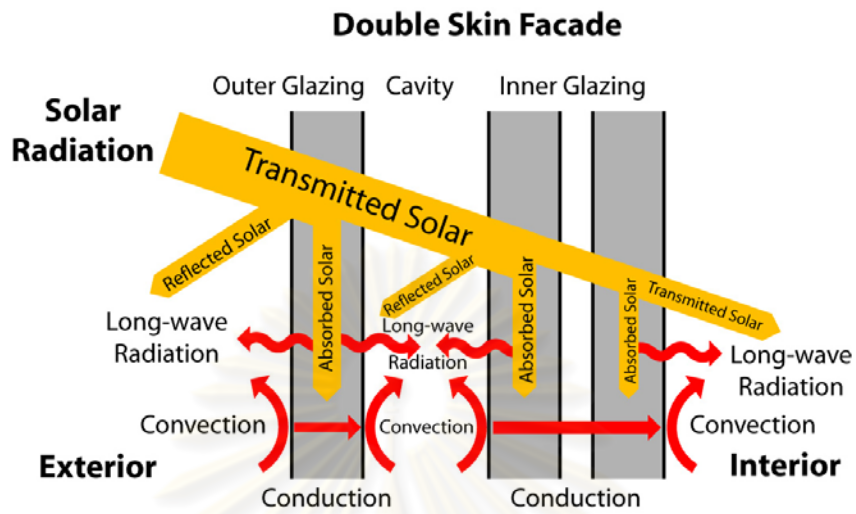
$$Q_r = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (\text{W}) \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

### 2.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

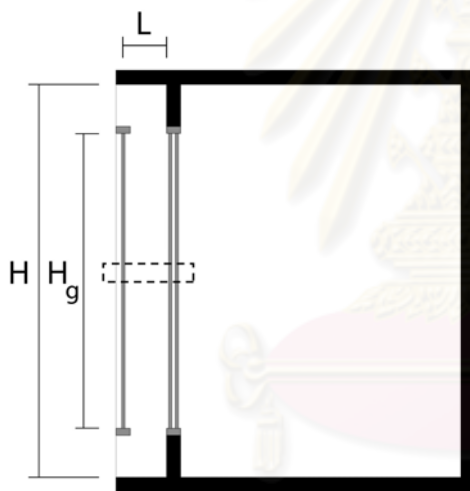
#### 2.3.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น

หลังจากที่ได้ศึกษาถึงรูปแบบการถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้น และทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถนำสมการเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนมา

ใช้อธิบายการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบผนังกระจกสองชั้น และสามารถประยุกต์  
 สมการเพื่อใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นได้



รูปที่ 2-7 แสดงการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้นในส่วนของกระจก



ลำดับชั้นของระบบผนังกระจกสองชั้น

G1 คือ ผนังกระจกชั้นนอก

C1 คือ ช่องอากาศระหว่างกระจกชั้นในและชั้นนอก

G2 คือ กระจกชั้นนอกของกระจกสองชั้น

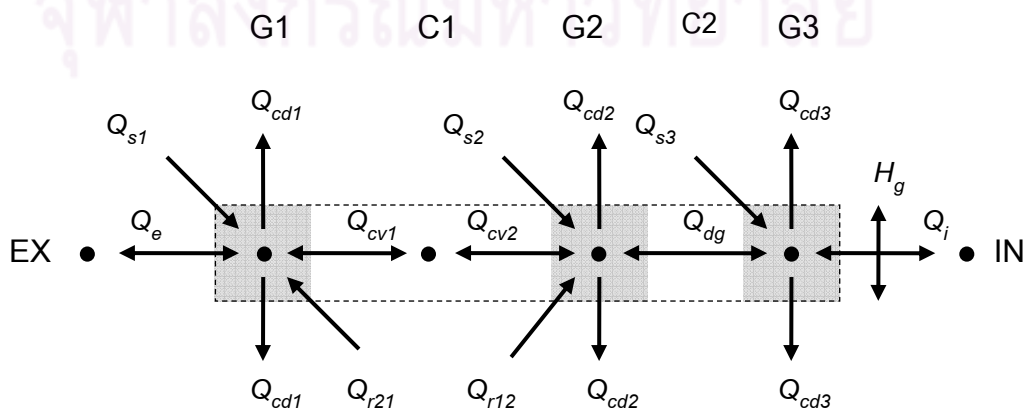
C2 คือ ช่องว่างระหว่างกระจกสองชั้น

G3 คือ กระจกชั้นในของกระจกสองชั้น

โดยที่

H และ L คือ ความสูงและความกว้างของช่องอากาศ (m)

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)



รูปที่ 2-8 แสดงการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการปรับสมดุลความร้อน (Heat balance)

พลั๊กซ์ความร้อน 7 ชนิดที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น (ประยุกต์จาก Saelens, 2002:95 โดยตัดตัวแปรบางตัวออกได้แก่ ค่าการไหลของเอนทัลปี)

1) การแลกเปลี่ยนความร้อนกับสภาพแวดล้อมภายนอก (Heat exchange with the exterior surroundings,  $Q_e$ )

2) การถ่ายเทความร้อนในชั้นวัสดุ (Heat transfer in the layers,  $Q_{cd}$ )

3) การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระจกสองชั้น (Heat transfer in the double glazing,  $Q_{dg}$ )

4) การดูดซับรังสีอาทิตย์ (Absorbed solar radiation,  $Q_s$ )

5) การพาความร้อน (Convective heat transfer,  $Q_{cv}$ )

6) การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation heat transfer,  $Q_{rx}$ )

การแผ่รังสีความร้อนจากผิววัสดุ y ไปยังผิววัสดุ x

7) การแลกเปลี่ยนความร้อนกับสภาพแวดล้อมภายใน (Heat exchange with interior surroundings,  $Q_i$ )

1) การแลกเปลี่ยนความร้อนกับสภาพแวดล้อมภายนอก (Heat exchange with the exterior surroundings,  $Q_e$ )

ที่พื้นผิวภายนอกความร้อนที่แลกเปลี่ยนกับสภาพแวดล้อมต่อหน่วยความกว้างของกระจก ( $Q_e$ ) คือการรวมกันระหว่างรังสีคลื่นยาวและการพาความร้อน

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลของความเร็วลม (Wind velocity) หรืออุณหภูมิท้องฟ้า (Sky temperature) การถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกสามารถอธิบายได้โดยการรวมกันของค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของพื้นผิว (Surface film coefficient) และอุณหภูมิโซล-แอร์ (Sol-air temperature) (ดูเพิ่มเติม 2.3.3.4) (Hens, 2000)

$$Q_e = H_g h_e (T_e - T_s) \quad (\text{W/m}) \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

โดยที่  $H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

$h_e$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก (ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของพื้นผิว) ( $W/m^2.K$ )

$T_e$  คือ อุณหภูมิไฮล-แอร์ ( $^{\circ}C$ ) (ดูสมการที่ 2.28)

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุ ( $K$ )

## 2) การถ่ายเทความร้อนในชั้นวัตถุ (Heat transfer in the layers, $Q_{cd}$ )

$Q_{cd}$  คือค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนในวัตถุแต่ละชั้น ค่าการนำความร้อนของวัตถุ ( $k$ ) ในแต่ละชั้นสมมติให้เป็นค่าคงที่ ค่าการจุกความร้อนของชั้นกระจกควรมีค่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความจุอุณหภูมิของช่องลมเข้าและออก วิธีการนี้แสดงถึงปฏิกิริยาชั่วขณะ (Transient effect) การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนที่จุด 1 กับจุด 2 ซึ่งสามารถประเมินเป็นสภาวะคงที่ (Steady state) ตามกฎการนำความร้อนของ Fourier

$$Q_{cd} = \frac{k H_g}{d} (T_1 - T_2) \quad (W/m) \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ ( $W/(m.K)$ )

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก ( $m$ )

$d$  คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้น ( $m$ )

$T_1 - T_2$  คือ ความต่างของอุณหภูมิตั้งสองจุด ( $K$ )

## 3) การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระจกสองชั้น (Heat transfer in the double glazing, $Q_{dg}$ )

$Q_{dg}$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างกระจกภายในกระจกสองชั้น สามารถคำนวณได้จากค่า  $U$  ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของกระจก

$$Q_{dg} = H_g \left( \frac{1}{U_{dg}} - \frac{1}{h_e} - \frac{1}{h_i} \right)^{-1} T_{dg} \quad (W/m) \quad (\text{สมการที่ 2.9})$$

โดยที่  $H_g$  คือ ความสูงของกระจก ( $m$ )

$h_e$  และ  $h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกและภายใน ( $W/(m^2.K)$ )

$U_{dg}$  คือ ค่า  $U$  ตำแหน่งกึ่งกลางของกระจก ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

$T_{dg}$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจก (K)

#### 4) การดูดซับรังสีอาทิตย์ (Absorbed solar radiation, $Q_s$ )

การดูดซับความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้นจะเริ่มจากประมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผนังกระจกชั้นนอก ( $I_t$ ) ดังนั้นสามารถหาอัตราการดูดซับรังสีอาทิตย์ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อน ( $\alpha$ ) ของผนังกระจกชั้นนอก สมการเป็นดังนี้

$$Q_s = \alpha I_t H_g \quad (W/m) \quad (\text{สมการที่ 2.10})$$

โดยที่  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อนของวัตถุ (-)

$I_t$  คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผิววัตถุ ( $W/m^2$ )

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

#### 5) การพาความร้อน (Convective heat transfer, $Q_{cv}$ )

$$Q_{cv} = H_g h_c (T_s - T_\infty) \quad (W/m) \quad (\text{สมการที่ 2.11})$$

โดยที่  $H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

$h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

$T_s - T_\infty$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับอากาศ (K)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) หาได้จากค่าตัวเลขนัมเบอร์ (Nu) (ดูสมการที่ 2.22) จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง มีวิธีการหาค่า Nu แตกต่างกัน 2 วิธีดังนี้

- **วิธีที่ 1 ค่า Nu ที่ได้จากสมการการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในช่องระหว่างแผ่นราบ 2 แผ่นวางขนานกัน (Free convection within parallel plate channels)**

Bar-Cohen and Rohsenow (1984) ได้พัฒนาสมการสหสัมพันธ์ (Correlation) ซึ่งสามารถใช้ได้กับอัตราส่วนช่องอากาศ ( $L/H$ ) ทุกช่วง สำหรับแผ่นราบที่มีอุณหภูมิเท่ากัน

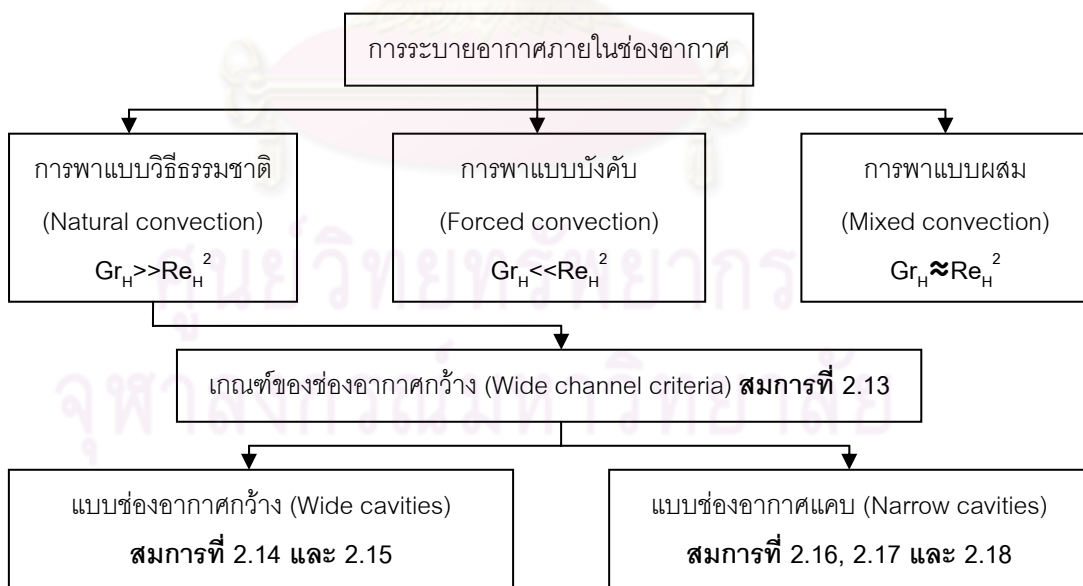
$$Nu_L = \left[ \frac{576}{(Ra_L L/H)^2} + \frac{2.87}{(Ra_L L/H)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (\text{สมการที่ 2.12})$$

โดยมีความสัมพันธ์กับค่าเรย์นัลดัมเบอร์ ( $Ra_L$ ) เมื่อพัฒนาเต็มรูปแบบ (Fully developed)  $Ra_L L/H \leq 10$  และเมื่อเป็นแผ่นโดดเดี่ยว (Isolated plate)  $Ra_L L/H \geq 100$

Allan (2004) ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบสมการ 3 สมการคือ สมการสหสัมพันธ์ของ Alamdari and Hammond (1983), สมการสหสัมพันธ์ของ Bar-Cohen and Rohsenow (1984) และสมการสหสัมพันธ์ของ Molina and Maestre (2002) สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SOLVENT ทำการทดสอบเพื่อหาสมการที่จะสามารถอธิบายถึงการพาความร้อนในช่องอากาศของระบบผนังกระจกสองชั้นโดยวิธีธรรมชาติได้ดีที่สุด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ESP-r ทดสอบผล ผลปรากฏว่าสมการสหสัมพันธ์ของ Bar-Cohen and Rosenow เป็นสมการที่สามารถคำนวณผลการพาความร้อนในกรณีนี้ได้ดีที่สุด

- วิธีที่ 2 ค่า  $Nu$  ที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังในแนวตั้ง (The wall averaged heat transfer rate from a vertical wall) และความสัมพัทธ์ของแผ่นราบวางขนานกัน (The flow between plates for parallel isothermal)

ในการคำนวณหาค่า  $Nu$  Saelens (2002) ได้รวบรวมการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศของระบบผนังกระจกสองชั้น สามารถนำมาปรับใช้กับการทดลองได้ดังนี้



รูปที่ 2-9 ขั้นตอนการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศของระบบผนังกระจกสองชั้น

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเกี่ยวกับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติโดยตรง สามารถตรวจสอบได้จาก ค่ากราชอฟน์เบอร์ (Gr) และเรโนลด์์นัมเบอร์ (Re) ถ้าค่า Gr มีค่ามากกว่าค่ากำลังสองของ Re มาก ก็ถือว่าเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ถ้าไม่ใช่กรณีนี้ต้องตรวจสอบความถูกต้องใหม่

หลังจากนั้นตรวจสอบรูปแบบของช่องอากาศว่าเป็นแบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities) หรือแบบช่องอากาศแคบ (Narrow cavities) ได้จากเกณฑ์ดังต่อไปนี้

Bejan (1993) ได้กำหนดขอบเขตของช่องอากาศกว้างไว้ดังนี้ ซึ่งถ้าไม่ตรงกับกรณีนี้ก็จะเป็ช่องอากาศแคบ

$$\frac{L}{H} > Ra_H^{-1/4} \text{ หรือ } \frac{L}{H} > Ra_L^{-1} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.13})$$

- แบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities) สมการสำหรับช่องอากาศกว้างสามารถหาได้จากสมการสหสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังในแนวตั้งของ Churchill and Chu (1975) มีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_H = 0.68 + 0.515Ra_H^{1/4} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.14})$$

สำหรับการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) ( $Gr_H < 10^9$ )

$$Nu_H = (0.825 + 0.325Ra_H^{1/6})^2 \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.15})$$

สำหรับการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (Laminar and turbulent) ( $10^{-1} < Ra_H < 10^{12}$ )

- แบบช่องอากาศ (Narrow cavities) Aung (1972) ได้แสดงความสัมพันธ์ของแผ่นราบวางขนานกันเมื่อพัฒนาเต็มรูปแบบ (Fully developed, fd) การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นราบทั้งสองไปยังของไหลสามารถหาได้ดังนี้

$$Nu_{L,fd} = \frac{4T^{*2} + 7T^* + 4}{90(1+T^*)^2} Ra_L \frac{L}{H} \approx \frac{1}{24} Ra_L \frac{L}{H} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

สำหรับค่า  $Ra_L L/H < 10$

โดยที่

$$T^* = \frac{T_{s1} - T_\infty}{T_{s2} - T_\infty} \text{ และ } 0 \leq T^* \leq 1 \quad (-)$$



ค่า  $Nu$  ขึ้นอยู่กับความต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวผนังกับอุณหภูมิของลมเข้า สำหรับค่า  $Ra$  ที่มีค่าสูง ( $Ra_L/H > 10^3$ ) รูปแบบของบาวดาเรียเลเยอร์ (Boundary-layer, bl) อย่างราบเรียบจะเกิดขึ้นในลักษณะดังต่อไปนี้

$$Nu_{L,bl} = c \left( Ra_L \frac{L}{H} \right)^4 \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.17})$$

สำหรับค่า  $Ra_L/H > 10^3$

จากการวิเคราะห์ของ Bodoia and Osterle (1962) และ Aung et al. (1972) แสดงค่าของ  $c \approx 0.68$

ค่าเหล่านี้ประมาณ 17% สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณแผ่นตั้งเมื่อพัฒนาเต็มรูปแบบ Rohsenow et al. (1985) จึงได้มีการรวมสมการทั้งสองนี้เข้าด้วยกันและได้สมการใหม่คือ

$$Nu_L = \left( (Nu_{L,fd})^{-1.9} + (Nu_{L,bl})^{-1.9} \right)^{1.9} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.18})$$

#### 6) การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation heat transfer, $Q_r$ )

จากสมการที่ใช้หาค่าการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (สมการที่ 2.6) สามารถนำความประยุกต์เพื่อหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนระหว่างกระจกภายในระบบผนังกระจกสองชั้นได้ดังนี้

$$Q_r = \varepsilon \sigma H_g (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{W/m}) \quad (\text{สมการที่ 2.19})$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ (Emissivity) (-)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

$T_1$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุที่มีค่าสูงกว่า (K)

$T_2$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุที่มีค่าต่ำกว่า (K)

#### 7) การแลกเปลี่ยนความร้อนกับสภาพแวดล้อมภายใน (Heat exchange with interior surroundings, $Q_i$ )

การถ่ายเทความร้อนภายในห้อง ( $Q_i$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของพื้นผิว ( $h_i$ ) และอุณหภูมิห้องข้างใน

$$Q_i = H_g h_i (T_{Ri} - T_s) \quad (\text{W/m}) \quad (\text{สมการที่ 2.20})$$

โดยที่

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

$h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (ค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มของพื้นผิว) ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_{Ri}$  คือ อุณหภูมิห้องอ้างอิง (K) (ดูสมการที่ 2.21)

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุ (K)

$$T_{Ri} = 0.44T_i + 0.56T_{ri} \quad (^\circ\text{C}) \quad (\text{สมการที่ 2.21})$$

โดยที่

$T_i$  คือ อุณหภูมิภายในห้อง ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{ri}$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยทุกผนังภายในห้อง ( $^\circ\text{C}$ )

### 2.3.3.2 พารามิเตอร์ไร้มิติ (Dimensionless parameters)

พารามิเตอร์ไร้มิติใช้เพื่อพิจารณาลักษณะของการพาความร้อน ในการศึกษาการพาความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นพารามิเตอร์ไร้มิติ 4 ค่าได้นำมาใช้ในการคำนวณสมการการพาความร้อนในช่องอากาศ โดยค่าของพารามิเตอร์ไร้มิติเหล่านี้จะไม่มีหน่วย

#### 1) นัสเซิลท์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu)

ค่า Nu เป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนโดยการพากับการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ประโยชน์ของค่า Nu คือสามารถใช้หาค่า  $h_c$  ได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu_\ell = \frac{h_c \ell}{k_f} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.22})$$

โดยที่

$h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )

$k_f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )

$\ell$  คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)

ความยาวที่ต้องการศึกษานั้นสามารถเลือกใช้ได้โดยไม่มีความกำกวมที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ต้องการจะศึกษา ยกตัวอย่างเช่น ในการศึกษาการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในช่องอากาศ ความยาวที่ต้องการศึกษาอาจจะเป็นได้ทั้ง ความกว้าง ความยาว หรือความสูงของช่องอากาศก็ได้

ถ้าค่า Nu เท่ากับ 1 แสดงว่าไม่มีการพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนอย่างเดียว แต่ถ้าค่า Nu มีค่ามากกว่า 1 มากเท่าไรแสดงว่าเกิดการพาความร้อนมากขึ้นเท่านั้น (สมศรี จรุงเรือง, 2542:220)

## 2) เรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re)

ค่า Re เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยกับแรงหนืด ประโยชน์ของค่า Re คือเป็นค่าที่บอกถึงลักษณะการไหลของของไหล (ดูเพิ่มเติม 2.2.2.3) ถ้าค่า Re มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤตของไหลจะไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าค่า Re มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตของไหลจะไหลแบบปั่นป่วน ความปั่นป่วนจะแปรผันตามค่า Re (สมศรี จรุงเรือง, 2542:221)

$$Re_l = \frac{U_\infty l}{\nu} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.23})$$

โดยที่  $U_\infty$  คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของของไหล (m/s)

$l$  คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)

$\nu$  คือ ค่าความหนืด ( $m^2/s$ )

## 3) กราซอพนัมเบอร์ (Grashof number, Gr)

ค่า Gr เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงลอยตัวกับความหนืดของของไหล สำหรับการพาแบบอิสระค่า Gr สามารถใช้แทนค่า Re ได้ด้วยสมการดังนี้

$$Gr_l = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.24})$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายอุณหภูมิของปริมาตร (The coefficient of volumetric thermal expansion) ( $K^{-1}$ )

$g$  คือ ค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

$l$  คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)

$\Delta T$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวกับของไหล (K)

$\nu$  คือ ค่าความหนืด ( $m^2/s$ )

#### 4) แรลลีนัมเบอร์ (Rayleigh number, Ra)

ค่า Ra เกิดจากผลผลิตของค่า Gr เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงลอยตัวกับความหนืดของของไหล ถ้าค่า Ra น้อยกว่าค่าวิกฤตการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนเป็นหลัก แต่ถ้าค่า Ra มากกว่าค่าวิกฤตการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการพาความร้อนเป็นหลัก (Wikipedia, 2010: online)

$$Ra_\ell = \frac{\beta g \ell^3 \Delta T}{\nu \alpha} \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.25})$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายอุณหภูมิของปริมาตร (The coefficient of volumetric thermal expansion) ( $K^{-1}$ )

$g$  คือ ค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

$\ell$  คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)

$\Delta T$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างพื้นผิวกับของไหล (K)

$\nu$  คือ ค่าความหนืด ( $m^2/s$ )

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิ (Thermal diffusivity) ( $m^2/s$ )

#### 2.3.3.3 ลักษณะการไหลของอากาศ

##### 1) การไหลของอากาศตามธรรมชาติ

การไหลของอากาศตามธรรมชาติเกิดจากคุณสมบัติของอากาศ 2 ประการคือ ความต่างของอุณหภูมิหรือความดันอากาศระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง โดยอากาศจะเคลื่อนที่จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่จุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า หรือจากจุดที่มีความดันอากาศสูงไปสู่จุดที่มีความดันอากาศต่ำกว่า (Lechner, 1991:182)

##### 2) ลักษณะการไหลของอากาศ

ลักษณะการไหลแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบดังนี้

- การไหลแบบราบเรียบและสม่ำเสมอ (Laminar)
- การไหลแบบราบเรียบแต่ไม่สม่ำเสมอ (Separated)
- การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

- การไหลแบบวน (Eddy)



รูปที่ 2-10 ลักษณะการไหลของอากาศรูปแบบต่าง ๆ (Lechner, 1991: 184)

### 2.3.3.4 การคำนวณอุณหภูมิโซล-แอร์ (Sol-air Temperature, $T_e$ )

อุณหภูมิโซล-แอร์ คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอกที่ไม่คิดถึงการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนใดๆ แต่ให้อัตราความร้อนเข้าสู่ผิวของผนังเช่นเดียวกับผลรวมจริงของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ การแลกเปลี่ยนความร้อนกับท้องฟ้าและสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่อยู่ภายนอก และการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน การสมดุลพลังงานความร้อนของผิวผนังอาคารที่ถูกแสงอาทิตย์ทำให้ความร้อนไหลเข้าสู่ภายในดังสมการดังนี้ (Ciolfi, 1996)

$$q'' = \alpha I_t + h_o(T_{sur} - T_o) - \varepsilon \Delta R \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{สมการที่ 2.26})$$

โดยที่

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์ (-)

$I_t$  คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผิววัตถุ ( $\text{W/m}^2$ )

$h_o$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากรังสีคลื่นยาว ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_{sur}$  คือ อุณหภูมิอากาศของสภาพแวดล้อม (K)

$T_o$  คือ อุณหภูมิผิววัตถุภายนอก (K)

$\varepsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ (-)

$\Delta R$  คือ ค่าความต่างระหว่างรังสีคลื่นยาวที่ตกกระทบบนผิววัตถุจากท้องฟ้าและสภาพแวดล้อมกับรังสีที่ปล่อยออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิอากาศภายนอก

สมมติว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายได้ในเทอมของอุณหภูมิไซล-  
แอร์ดังสมการต่อไปนี้

$$q'' = h_o(T_e - T_o) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{สมการที่ 2.27})$$

จากสมการที่ 2.26 และสมการที่ 2.27 สามารถหาอุณหภูมิไซล-แอร์ได้ดังนี้

$$T_e = T_o + \frac{\alpha I_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_o} \quad (\text{K}) \quad (\text{สมการที่ 2.28})$$

สำหรับผิววัตถุในแนวระดับจะรับรังสีคลื่นยาวจากท้องฟ้าเท่านั้น  $\Delta R$  จะมี  
ค่าประมาณ  $63 \text{ W/m}^2$  ดังนั้นถ้า  $\varepsilon = 1$  และ  $h_o = 17$  เทอมสุดท้ายจะมีค่าประมาณ  $-3.9 \text{ }^\circ\text{C}$

สำหรับผิววัตถุในแนวตั้งผิวจะรับรังสีคลื่นยาวจากพื้นและอาคารข้างเคียง  
เช่นเดียวกับท้องฟ้า ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะหาค่า  $\Delta R$  ที่ละเอียดและถูกต้องได้ เมื่อความเข้ม  
ของรังสีอาทิตย์มีค่าสูง ผิวของวัตถุบนโลกจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก ดังนั้นรังสี  
คลื่นยาวได้ชัดเจนบางส่วนสำหรับการแผ่รังสีที่ต่ำของท้องฟ้าด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ในทางปฏิบัติ  
จึงสมมติให้  $\Delta R = 0$  สำหรับผิววัตถุในแนวตั้ง (รัฐศักดิ์ พรหมมาศ, 2542:59)

### 2.3.3.5 พฤติกรรมของรังสีอาทิตย์

พฤติกรรมของรังสีอาทิตย์นั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางที่รังสีตกกระทบ โดย  
อาจจำแนกพฤติกรรมของรังสีอาทิตย์ได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

#### 1) การดูดซับรังสี (Absorption)

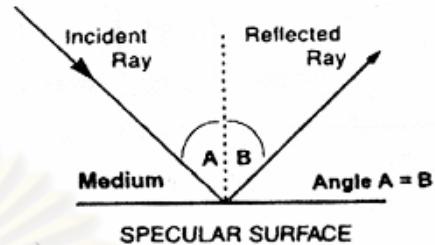
เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวกลาง (Medium) แล้ว  
ถูกวัตถุดูดซับรังสีไว้ภายใน ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์ (Absorptance,  $\alpha$ ) คือ อัตราส่วนระหว่าง  
ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่วัตถุดูดซับต่อปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนวัตถุ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1  
หรืออาจเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้

#### 2) การสะท้อนรังสี (Reflection)

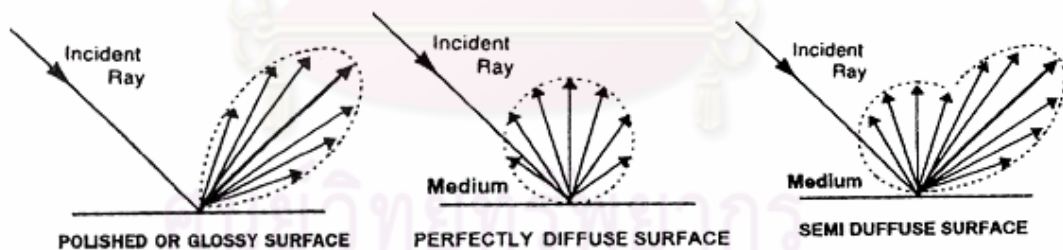
เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวกลางแล้วสะท้อนกลับ  
ออกไปโดยความถี่ของคลื่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งลักษณะของการสะท้อนอาจแบ่งได้เป็น 2  
รูปแบบดังนี้

- การสะท้อนแบบเสมือนกระจกเงา (Specular reflection) เกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิติตตกกระทบบนตัวกลางที่เป็นวัตถุทึบแสง (Opaque material) มีลักษณะเป็นผิวมัน (Polished surface) การสะท้อนจะมีมุมที่รังสีตกกระทบบน (Angle of incident) เท่ากับมุมที่รังสีสะท้อน (Angle of reflection) ออกไป



รูปที่ 2-11 การสะท้อนแบบเสมือนกระจกเงา

- การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse reflection) เกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิติตตกกระทบบนตัวกลางที่มีผิวหยาบ รังสีที่สะท้อนออกมาจะกระจายออกไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนมากมุมสะท้อนของรังสีที่กระจายออกป็นั้นจะไม่เท่ากับมุมที่รังสีตกกระทบบน หากผิววัสดุมีลักษณะหยาบอย่างสมบูรณ์ คือ หยาบเท่ากันทั้งพื้นผิว (Perfectly diffuse surface) รังสีที่สะท้อนจะมีลักษณะเป็นการกระจายรังสีแบบสมบูรณ์ (Perfectly diffuse reflection) เป็นการกระจายรังสีที่สม่ำเสมอทุกมุมสะท้อน แต่ถ้าหากผิววัตถุหยาบไม่สม่ำเสมอ (Semi diffuse reflection) รังสีที่สะท้อนได้จะมีลักษณะเป็นการกระจายแบบไม่สม่ำเสมอ (Semi diffuse reflection) การกระจายรังสีที่ออกมาจากวัตถุมักจะเป็นการผสมผสานกันระหว่างการสะท้อนแบบเสมือนกระจกเงาและการสะท้อนแบบกระจาย

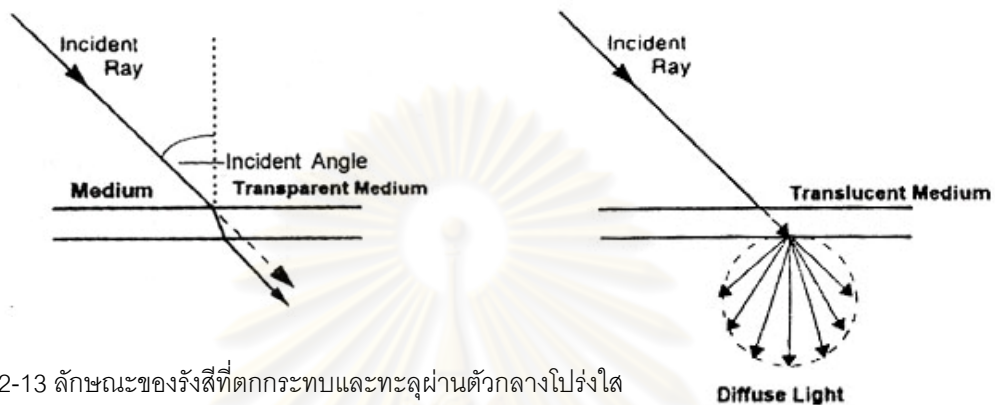


รูปที่ 2-12 ลักษณะการสะท้อนแสงแบบกระจายในรูปแบบต่าง ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิติต (Reflectance,  $\rho$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีอาทิติตที่วัตถุสะท้อนออกไปต่อปริมาณรังสีที่ตกกระทบบนวัตถุ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 หรืออาจเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้

### 3) การส่งผ่านรังสี (transmission)

เป็นพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบลงบนตัวกลาง แล้วทะลุผ่านไปยังอีกด้านหนึ่ง หากไม่พิจารณาคุณสมบัติหรือลักษณะของตัวกลาง มุมที่รังสีตกกระทบจะเท่ากับมุมที่รังสีทะลุผ่านและปริมาณของรังสีที่ทะลุผ่านออกมาจะมีค่าเท่าเดิม



รูปที่ 2-13 ลักษณะของรังสีที่ตกกระทบและทะลุผ่านตัวกลางโปร่งใส และโปร่งแสง

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (Transmittance,  $T$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีอาทิตย์ที่วัตถุส่งผ่านต่อปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนวัตถุ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 หรืออาจเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ก็ได้

โดยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสามรูปแบบนั้นสามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (-) \quad (\text{สมการที่ 2.29})$$

สำหรับวัตถุทึบแสง  $\tau = 0$  และ  $\alpha + \rho = 1$

สำหรับรังสีที่ตกกระทบลงบนวัตถุดำจะถูกดูดซับไว้ทั้งหมด ดังนั้น  $\rho = 0$ ,  $\tau = 0$

และ  $\alpha = 1$

#### 2.3.4 การสร้างสมการอย่างง่ายที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ทำให้สามารถสร้างสมการอย่างง่าย (Simplicity equation) เพื่อใช้คำนวณในการทดลองได้ดังนี้

จากสมการที่ 2.29 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณรังสีอาทิตย์รวม ( $I_t$ ) ได้ดังนี้



$$I_t = \alpha I_t + \tau I_t + \rho I_t \quad (\text{สมการที่ 2.30})$$

โดยที่  $I_t$  คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผิววัตถุ ( $\text{W/m}^2$ )

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์ (-)

$\tau$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (-)

$\rho$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ (-)

หากให้ระบบผนังกระจกสองชั้นเปรียบเสมือนผนังหนึ่งและมีค่า  $\rho$  ค่าหนึ่งสะท้อนรังสีอาทิตย์บางส่วนออกไป ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่กระทำต่อผนังนี้จะเท่ากับ

$$I_t - \rho I_t = \alpha I_t + \tau I_t \quad (\text{สมการที่ 2.31})$$

ในเทอมของการดูดซับรังสีอาทิตย์ในผนังนี้จะเท่ากับการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ( $Q_{dsf}$ ) และในเทอมของส่งผ่านรังสีอาทิตย์จะเท่ากับความร้อนที่ผ่านผนังกระจกภายนอกและภายใน

$$Q_s = Q_{dsf} + (SC_{g1})(SC_{g2})I_t \quad (\text{สมการที่ 2.32})$$

โดยที่  $Q_s$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ( $\text{W/m}^2$ )

$Q_{dsf}$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ( $\text{W/m}^2$ )

$SC_{g1}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นนอก (-)

$SC_{g2}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นใน (-)

กฎการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของ Fourier (ดูสมการที่ 2.2) สามารถเขียนสมการการนำความร้อนให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $U$ ) ได้ดังนี้

$$Q = U (T_1 - T_2) \quad (\text{สมการที่ 2.33})$$

เมื่อแทนค่า  $Q_{dsf}$  ให้อยู่ในรูปของค่า  $U$  จะได้สมการเป็นดังนี้

$$Q_s = U_{dsf} (T_1 - T_2) + (SC_{g1})(SC_{g2})I_t \quad (\text{สมการที่ 2.34})$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของการสมดุลความร้อน (Heat balance) จะได้สมการดังนี้

$$\alpha I_t = Q_{dsf} = Q_{cd1} = Q_{cv} = Q_{cd2} \quad (\text{สมการที่ 2.35})$$

ค่า  $U$  เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุ ( $k$ ) กับความหนาของวัสดุ และเป็นส่วนกลับกับค่าความต้านทานความร้อน ( $R$ ) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = \frac{k}{L} = \frac{1}{\Sigma R} \quad (\text{สมการที่ 2.36})$$

ค่า  $U$  ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นส่วนกลับของค่า  $R$  ในแต่ละชั้นของผนัง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U_{dsf} = \frac{1}{R_e + R_{g1} + R_{cv} + R_{g2} + R_i} \quad (\text{สมการที่ 2.37})$$

โดยที่

$R_e$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_{g1}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกชั้นนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_{cv}$  คือ ค่าความต้านทานภายในช่องอากาศเป็นส่วนกลับของค่า  $h_c$  ( $m^2.K/W$ )

$R_{g2}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกชั้นนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_i$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายใน ( $m^2.K/W$ )

## 2.4 บทสรุป

การใช้งานระบบผนังกระจกสองชั้นเริ่มขึ้นที่ยุโรปและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่การพัฒนาในยุคหลังเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของกระจกมากกว่าที่จะพัฒนาเทคนิคการก่อสร้างให้มีความสะดวกและลดต้นทุนการผลิต ทำให้ราคาค่าก่อสร้างของผนังระบบนี้สูงตามราคาค่ากระจก ผลที่ตามมาคือการใช้งานจึงยังคงอยู่ในวงจำกัด สำหรับประเทศไทยการที่จะนำระบบผนังกระจกสองชั้นมาใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพของผนังระบบนี้ในภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการลดภาระการทำความเย็นและความร้อนของอาคารในยุโรป ซึ่งแตกต่างจากประเทศไทยที่อาคารจะใช้พลังงานส่วนใหญ่ไปกับภาระการทำความเย็นเนื่องจากสภาพอากาศที่ต่างกัน

จากปัญหาราคาค่าก่อสร้างนี้ทำให้การศึกษามุ่งไปที่การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานจากเครื่องกลและมีการก่อสร้างที่ง่ายกว่า โดยไม่จำเป็นต้องทำงานสัมพันธ์กับระบบปรับอากาศ การศึกษาโดยใช้กล่องทดลอง (Test cell) หรือการวัดค่าจากอาคารจริง

(Field measurement) เป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลพบว่าอาคารในประเทศไทยยังไม่มีอาคารที่ใช้ผนังอาคารระบบนี้ จึงจำเป็นต้องเริ่มศึกษาโดยใช้กล่องทดลอง จากการศึกษาขององค์ประกอบทางกายภาพของระบบผนังกระจกสองชั้น ทำให้ทราบถึงขนาดและมิติของกล่องทดลองที่สามารถใช้ทดลองแล้วได้ผลเป็นที่น่าเชื่อถือ

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเกี่ยวกับแรงลอยตัวตามธรรมชาติซึ่งเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง ทำให้ตัดปัญหาเรื่องความกว้างของกล่องทดลองได้มิติหนึ่ง เพราะความกว้างไม่มีผลต่อการทดลองซึ่งดูได้จากสมการต่างๆ ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ค่าที่มีผลต่อการทดลองมากที่สุดคือความสูงของกล่องทดลอง โดยความสูงจะมีขนาดเท่ากับอาคารจริงชั้นเดียวคือ 3 ม. โดยมีความกว้างของช่องอากาศและช่องลมเข้าและออกคงที่ที่ 30 ซม. เป็นระยะที่สามารถนำเครื่องมือเข้าไปวัดค่าได้ ซึ่งเป็นระยะที่อ้างอิงจากงานวิจัยในลักษณะเดียวกัน สำหรับแผงกันแดดภายในช่องอากาศมีงานวิจัยที่ทำการศึกษถึงตำแหน่งและสีที่เหมาะสมของแผงกันแดดแล้ว (ดูเพิ่มเติม 2.2.3) และเมื่อใช้งานในอาคารจริงแผงกันแดดจำเป็นต้องมีการบังคับด้วยเครื่องกลทำให้มีค่าก่อสร้างของระบบแผงกันแดดเพิ่มขึ้น ประกอบกับการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีแผงกันแดดจะมีความยุ่งยากเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตัวแปรของแผงบังแดดมีหลายตัวแปร เช่น องศาการเปิดแผงบังแดด ขนาดความกว้าง งานวิจัยนี้จึงไม่ใช้แผงกันแดดในการทดลอง สถานที่ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นห้องปิด เพื่อตัดตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการทดลองคือ แรงลมภายนอก ซึ่งแรงลมภายนอกนี้จะมีผลต่อการไหลของอากาศภายในช่องอากาศมีผลทำให้เกิดการไหลกลับของอากาศ (Downward flow) ทำให้เกิดความยุ่งยากในการทดลองและการคำนวณการไหลของอากาศ (Saelens, 2002:90) ส่วนแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์นั้นจะใช้หลอดฮาโลเจนส่องไปยังกล่องทดลองแทนแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นจริง

กระจกที่ใช้เป็นกระจกชั้นนอกจำเป็นต้องเป็นกระจกลามิเนท เนื่องจากเป็นกระจกที่กฎหมายพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2552 กำหนดให้ใช้ กระจกชั้นนอกที่จะนำมาใช้ทดสอบความแตกต่างของกระจกแต่ละประเภทได้แก่ กระจกใส กระจกสีตัดแสง และกระจกสะท้อนแสงซึ่งกระจกทั้ง 3 ประเภทนี้จะถูกผลิตให้เป็นกระจกลามิเนททั้งสิ้น ส่วนกระจกชั้นในจะใช้กระจกใสและกระจกอินซูลเททใสเพื่อเป็นตัวแทนของกระจกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) สูงและต่ำตามลำดับ

การวัดความเร็วลมเลือกใช้วิธีการวัดด้วยเครื่องวัดความเร็วลมเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้วัดมีความเป็นสากลและมีวิธีการวัดที่ไม่ยุ่งยากเหมือนการใช้เทอร์เซอร์แก๊ส และเหมาะสมกับการวัดความเร็วลมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากมีความดันอากาศต่ำจึงไม่เหมาะในการใช้วิธีการวัด

ความดัน แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคืออาจจะมี ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ เนื่องจากเครื่องมือวัดจะไปขวางทางลม วิธีการแก้ไขคือใช้ระเบียบการจัดวางตำแหน่งเครื่องมือวัดให้มีต่อทิศทางลมในช่องอากาศให้น้อยที่สุด

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะใช้สมการการถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นและสมการอย่างง่ายในการวิเคราะห์ผลการทดลอง การหาค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศซึ่งหาได้จากค่า  $Nu$  จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบค่า  $Nu$  ที่มาจากสมการที่ต่างกันเพื่อสรุปหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการหาค่า U-factor ของผนัง

สำหรับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้จำลองประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นนั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่สามารถคำนวณการเคลื่อนที่ของแรงได้ ซึ่งมีค่าลิขสิทธิ์โปรแกรมค่อนข้างสูงในงานวิจัยนี้แก้ปัญหาโดยการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการคำนวณการเคลื่อนที่ของของไหลในช่องอากาศเพื่อให้ได้ค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้น ซึ่งค่าของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในสมการจะใช้ค่าวัดจริงจากกล่องทดลอง แล้วจึงนำค่า U-factor ของผนังแต่ละรูปแบบมาทำการคำนวณภาระการทำความเย็นจากความต่างของอุณหภูมิ (Cooling load temperature differential) โดยใช้ข้อมูลอากาศในประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็น

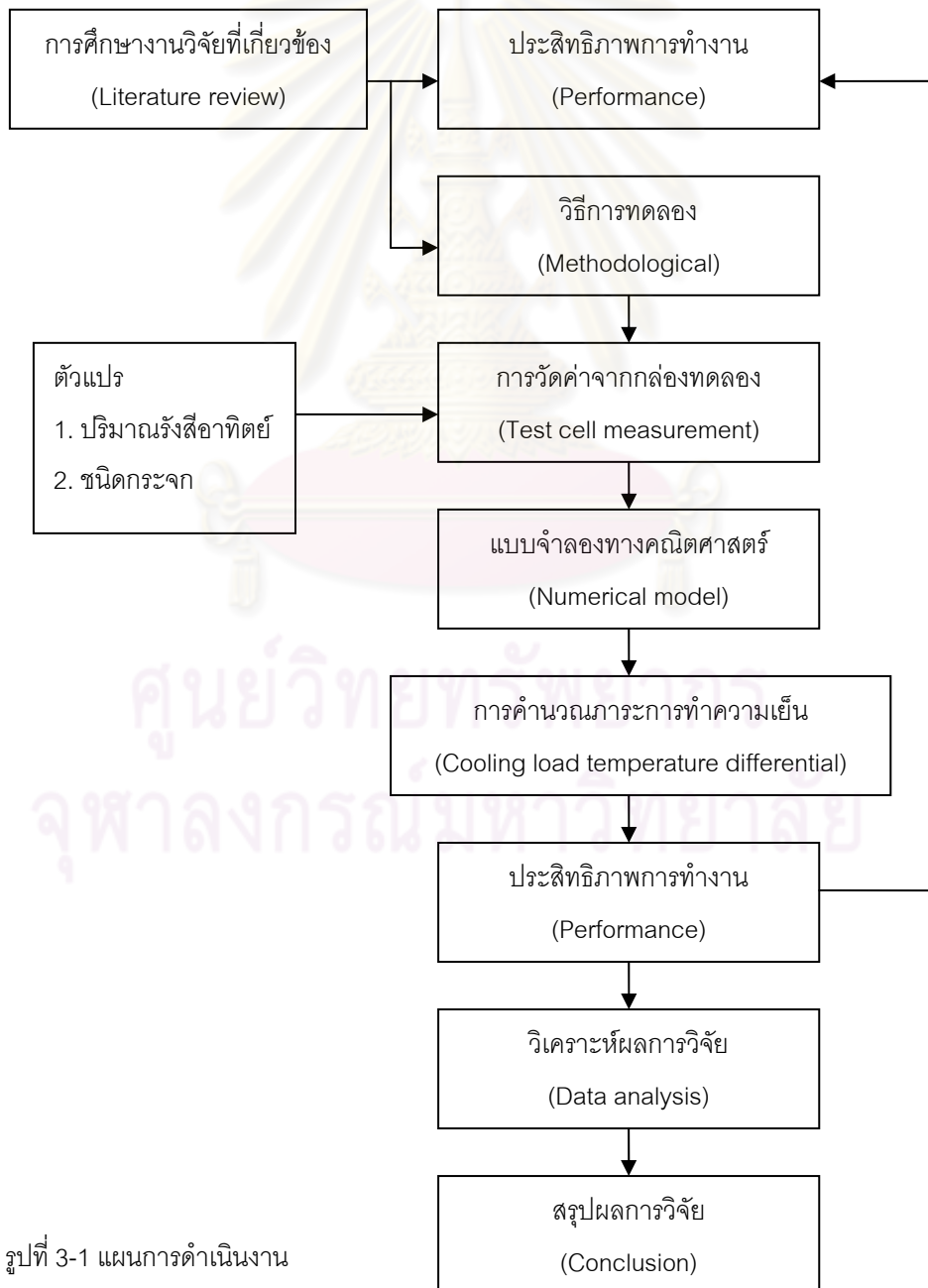
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การดำเนินการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดลองระบบผนังกระจกสองชั้น สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัยได้ดังนี้



รูปที่ 3-1 แผนการดำเนินงาน

## 3.2 ตัวแปรในการวิจัย

### 3.2.1 ตัวแปรต้น

#### 1) ปริมาณรังสีอาทิตย์

ในการคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังหรือค่า OTTV ของประเทศไทยนั้น ค่า ESR หรือค่ารังสีอาทิตย์ (Effective solar radiation) ได้ถูกนำมาใช้เป็นค่ามาตรฐานในการคำนวณ โดยค่ารังสีอาทิตย์คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบลงบนผนัง มีค่าขึ้นอยู่กับมุมเอียงและทิศทาง การวัดค่ามุมเอียงของผนังอาคารวัดจากมุมที่ผนังอาคารกระทำต่อพื้นโลก โดยผนังในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับ 90 องศา และผนังในแนวนอน (หลังคาคอนกรีต) จะมีค่าเท่ากับ 0 องศา

Effective solar radiation (ESR), W/m <sup>2</sup>								
Angle	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
0	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38	437.38
15	405.00	421.74	433.61	440.00	441.62	438.90	431.51	419.53
30	358.99	390.20	412.96	425.48	428.59	422.98	408.39	385.65
45	306.68	348.31	379.58	397.17	401.47	393.20	372.57	341.61
60	255.37	301.60	337.61	358.44	363.45	353.18	328.62	293.33
75	212.39	255.60	291.21	312.65	317.70	306.52	281.11	246.70
90	185.06	215.84	244.53	263.14	267.41	256.82	234.58	207.62

ตารางที่ 3-1 ค่ารังสีอาทิตย์ในประเทศไทย

จากตารางที่ 3-1 แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีปริมาณรังสีอาทิตย์เฉลี่ยที่กระทำต่อผนังในแนวตั้งอยู่ระหว่าง 185.06 W/m<sup>2</sup> ถึง 267.41 W/m<sup>2</sup> มีค่าเฉลี่ยของทั้ง 8 ทิศเท่ากับ 234.38 W/m<sup>2</sup> ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงของตัวแปรในการทดลอง กำหนดให้ปริมาณรังสีที่ใช้ในการทดลองคือ 200 W/m<sup>2</sup> 300 W/m<sup>2</sup> 400 W/m<sup>2</sup> และ 500 W/m<sup>2</sup> โดยค่า 200 W/m<sup>2</sup> และ 300 W/m<sup>2</sup> เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงรังสีอาทิตย์ปกติ ส่วน 400 W/m<sup>2</sup> และ 500 W/m<sup>2</sup> เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงรังสีอาทิตย์ที่มากกว่าปกติและเพื่อดูความต่อเนื่องของข้อมูล โดยใช้หลอดฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 8 หลอด แทนการใช้รังสีอาทิตย์จริง

#### 2) ชนิดของกระจก

มีการปรับเปลี่ยนการใช้กระจกเพื่อทดลองความแตกต่างของชนิดกระจกทั้งกระจกภายนอกและกระจกภายใน โดยกระจกภายนอกจะใช้กระจกที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 ชนิดคือ กระจกใส กระจกสีตัดแสง และกระจกสะท้อนแสง ซึ่งกระจกที่เป็นกระจกภายนอกนี้จำเป็นต้องเป็นกระจกลามิเนตตามกฎหมายพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (ดูเพิ่มเติม 2.2.3.3) มีค่าประสิทธิภาพของกระจกดังนี้

Glass type	Color	Thickness (mm)	Optical performance							Thermal performance	SC
			Visible light (%)			Solar energy (%)			UV (%)	U-value (W/m <sup>2</sup> .K)	
			T	R		T	R	A	T		
Laminated clear	Clear	(4+4) 8.38	88	8	8	75	7	18	<1	5.14	0.93
Laminated tint	Green	(5+4) 9.38	70	7	7	46	5	49	<1	5.11	0.71
Laminated reflective low-E	Green	(6+4) 10.38	48	16	27	23	8	69	7	3.01	0.43

ตารางที่ 3-2 ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นนอก

กระจกลามิเนตสะท้อนแสงในปัจจุบันเป็นกระจกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอาคารสำนักงานที่เป็นอาคารสูงและอาคารขนาดใหญ่ ในปัจจุบันการผลิตกระจกประเภทนี้จะมีการเคลือบสารที่มีการแผ่รังสีต่ำ (low-E) เป็นส่วนใหญ่ (โสติดา งามวิวัฒน์สว่าง, สัมภาษณ์, 9 กุมภาพันธ์ 2553) เพื่อให้การทดลองตรงกับความเป็นจริงจึงใช้กระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E แทนกระจกลามิเนตสะท้อนแสงธรรมดา

กระจกภายในมีด้วยกัน 2 ชนิดได้แก่ กระจกใส และกระจกอินซูลเททไส เป็นตัวแทนของกระจกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) สูงและต่ำตามลำดับ มีค่าประสิทธิภาพของกระจกดังนี้

Glass type	Color	Thickness (mm)	Optical performance							Thermal performance	SC
			Visible light (%)			Solar energy (%)			UV (%)	U-value (W/m <sup>2</sup> .K)	
			T	R		T	R	A	T		
Clear	Clear	6	90	8	8	78	7	15	68	5.25	0.95
Insulated clear low-E	Clear	(4+16A+4) 24	46	13	13	30	12	58	26	1.69	0.55

ตารางที่ 3-3 ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นใน

เพื่อให้ค่า U ของกระจกแตกต่างกันมากขึ้นประกอบกับการศึกษาวิธีการวิจัยในต่างประเทศ (Saelens, 2002) จึงใช้กระจกอินซูลเททไส low-E ที่มีการเคลือบสารที่มีการแผ่รังสีต่ำบนกระจกทั้งสองแผ่น เป็นการเคลือบแบบ Hard coat แทนกระจกอินซูลเททไสธรรมดา

### 3.2.2 ตัวแปรตาม

#### 1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในกล่องทดลองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต้นทั้ง 2 ตัว โดยอุณหภูมิภายในกล่องทดลองจะมีทั้งอุณหภูมิผิววัตถุและอุณหภูมิอากาศ

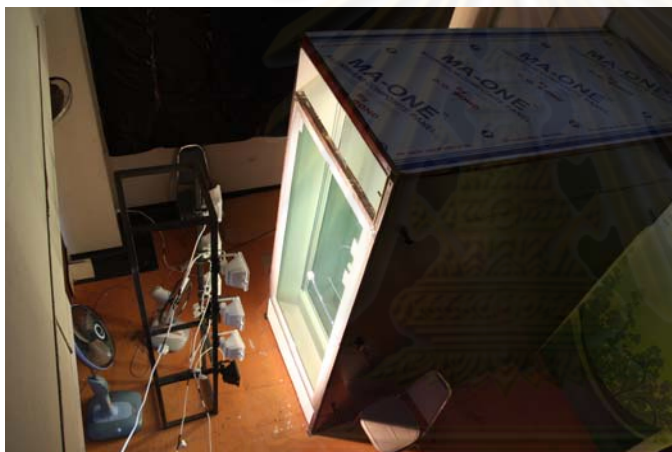
## 2) ความเร็วลมภายในช่องอากาศ

ความเร็วลมภายในช่องอากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต้นทั้ง 2 ตัว

### 3.2.3 ตัวแปรควบคุม

ตัวแปรควบคุมเป็นตัวแปรที่ทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของข้อมูล อันได้แก่

1) **ขนาดของกล่องทดลอง** ใช้กล่องทดลองกล่องเดียวในการวัดตัวแปรต่างๆ ทำให้ค่าต่างๆ ที่เกี่ยวกับกล่องทดลองมีค่าคงที่ ได้แก่ค่าความกว้าง ความยาว ความสูง ขนาดช่องลมเข้าและช่องลมออก ขนาดความกว้างของช่องอากาศ โดยกล่องทดลองมีขนาด 1.3x2.5x3.0 ม. มีความกว้างของช่องลมเข้าและช่องลมออก 0.3 ม. และมีความกว้างของช่องอากาศ 0.3 ม.



รูปที่ 3-2 ด้านหน้ากล่องทดลอง



รูปที่ 3-3 ภายในกล่องทดลอง



รูปที่ 3-4 การปรับปรุงพื้นที่ทดลองเพื่อควบคุมตัวแปร



รูปที่ 3-5 สถานที่ทดลองและการวางเครื่องมือ



ผนัง พื้น และฝ้าของกล่องทดลองภายในทำจากแผ่นยิปซัมบอร์ดหนา 10 มม. ทาสีขาวช่องว่างภายในติดตั้งฉนวนกันความร้อนทำจากโฟมอัดหนา 2" ภายนอกกรุด้วยแผ่นอลูมิเนียมเคลดดิ้งหนา 5 มม.

## 2) อุณหภูมิสถานที่ทดลอง

อุณหภูมิสถานที่ทดลองจะมีการเปลี่ยนแปลงไปแต่ละช่วงเวลา อุณหภูมิสถานที่ส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีความร้อนของกรอบอาคาร ดังนั้นการตั้งกล่องทดลองให้ห่างจากผนังอาคารจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่วัดได้ และการวัดค่าอุณหภูมิในสถานที่ทดลองทำให้รู้ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในแต่ละวัน ซึ่งสามารถนำไปอ้างอิงกับค่าอุณหภูมิในกล่องทดลองได้เมื่อข้อมูลมีการเบี่ยงเบนและไม่สามารถอธิบายได้

## 3) รังสีอาทิตย์จริง

รังสีอาทิตย์จริงเป็นอีกค่าหนึ่งที่ต้องควบคุม เนื่องจากการทดลองนี้ใช้รังสีที่เกิดขึ้นจากหลอดฮาโลเจนเป็นหลัก การปิดช่องเปิดในสถานที่ทดลองไม่ให้มีรังสีอาทิตย์ผ่านไปยังพื้นที่ทดลองเป็นการช่วยลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลอีกวิธีหนึ่ง

## 4) แรงแลมภายนอก

การเคลื่อนที่ของอากาศภายในช่องอากาศเพื่อนำความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นออกไปจากระบบเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งชี้ประสิทธิภาพของผนังกระจกระบบนี้ หากมีแรงลมภายนอกที่ไม่สามารถวัดค่าได้เข้ามากระทำจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลได้ง่าย เนื่องจากแรงลมตามธรรมชาติมีค่าน้อยมาก

## 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

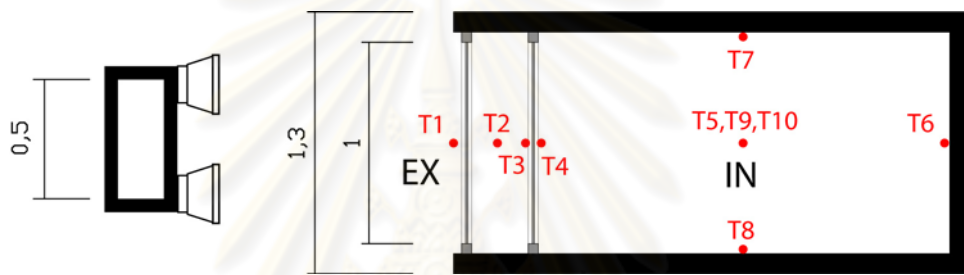
### 3.3.1 ตำแหน่งเครื่องมือวัด

ทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์ด้วยหลอดฮาโลเจน 500 W จำนวน 8 หลอดโดยแบ่งออกเป็นสองข้าง ข้างละ 4 หลอด แต่ละหลอดมีระยะห่างกัน 50 ซม. แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์นี้วางห่างจากกล่องทดลองเป็นระยะ 70 ซม. สำหรับการติดตั้งตำแหน่งการวางเครื่องมือวัดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

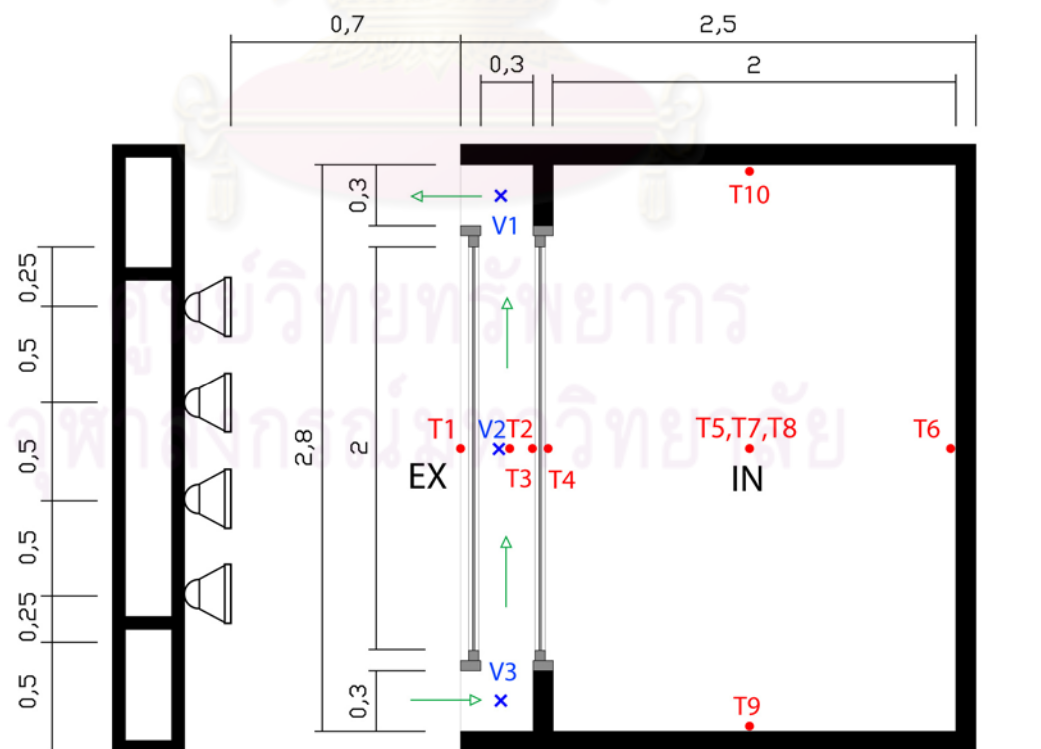
- ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ มีด้วยกัน 10 จุด โดยแบ่งเป็นการวัดอุณหภูมิผิว 8 จุด และอุณหภูมิอากาศ 2 จุดคือ ตำแหน่ง T2 และ T5 ตำแหน่งการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 3-6 และ 3-7

- ตำแหน่งการวัดความเร็วลม มีด้วยกัน 3 จุดคือ ช่องลมออก (V1) กึ่งกลางช่องอากาศ (V2) และช่องลมเข้า (V3) ตำแหน่งการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 3-7

- ตำแหน่งการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ทำการวัดความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบลงบนกระจกชั้นนอก โดยใช้ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดจุดที่รังสีตกกระทบโดยตรงกับจุดที่ได้รับรังสีจากกระจกระเบียง



รูปที่ 3-6 ผังพื้นที่กล่องทดลองและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 3-7 รูปตัดกล่องทดลอง ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิและตำแหน่งการวัดความเร็วลม

### 3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

#### 1) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

- *Testo 350-M/XL Control unit* เป็นเครื่องวัดแบบมัลติฟังก์ชันสามารถวัดและบันทึกค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลม CO, CO<sup>2</sup> มีหน่วยความจำ 250,000 หน่วยเป็นตัวควบคุมและแสดงผล สามารถเชื่อมต่อกับล็อกเกอร์เพื่อควบคุมการทำงานและอ่านค่าอุณหภูมิที่วัด

- *Testo 454 Logger* เป็นตัวเก็บข้อมูลและเชื่อมต่อสายวัด ล็อกเกอร์ 1 ตัวสามารถต่อสายวัดได้ 4 สายโดยสายวัดที่ใช้เป็นแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple), NiCr-Ni, วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -200 to +1000 °C มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัด  $\pm 5\%$  ใช้วัดอุณหภูมิผิวและอุณหภูมิอากาศภายในกล่องทดลอง



รูปที่ 3-8 เครื่องวัดอุณหภูมิ Testo 350-M/XL Control unit และ Testo 454 Logger

#### 2) เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

- *Testo 405-V1* เป็นเครื่องวัดความเร็วลมแบบปากกา (Measuring stick for velocity) วัดความเร็วลมด้วยหลักการในการคงที่ของอุณหภูมิที่หัวเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ขนาดเล็กที่ปลายแท่งทรงกระบอกที่สามารถหมุนเปิดและปิดได้ เมื่ออากาศพัดผ่านหัววัดจะทำให้อุณหภูมิลดลง เครื่องวัดจะให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มเพื่อรักษาอุณหภูมิของเซ็นเซอร์นั้น ทำให้สามารถคำนวณค่าความเร็วของลมที่พัดผ่านได้ ความละเอียดในการวัด 0.01 m/s และสามารถวัดอุณหภูมิของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านด้วยความละเอียด 0.1°C ช่วงความเร็วลมที่วัดได้ตั้งแต่ 0.00-10.00 m/s ที่อุณหภูมิ 0-50°C มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดไม่เกิน 5% of m.v. หรือ  $\pm 0.1$  m/s ที่อุณหภูมิ  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  ใช้วัดค่าความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในช่องอากาศ



รูปที่ 3-9 เครื่องวัดความเร็วลม Testo 405-V1

### 3) เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Pyranometer)

- *LI-COR LI-200* เป็นเครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์รวม (Solar radiation total) มีค่าการตอบสนอง  $90 \mu\text{A}$  ต่อ  $1000 \text{ W/m}^2$  มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัด  $\pm 5\%$  ใช้วัดค่าความเข้มแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจนที่ตกกระทบลงบนผนังกระจกชั้นนอก



รูปที่ 3-10 เครื่องวัดความเข้มแสง LI-COR LI-200

#### 3.3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือ

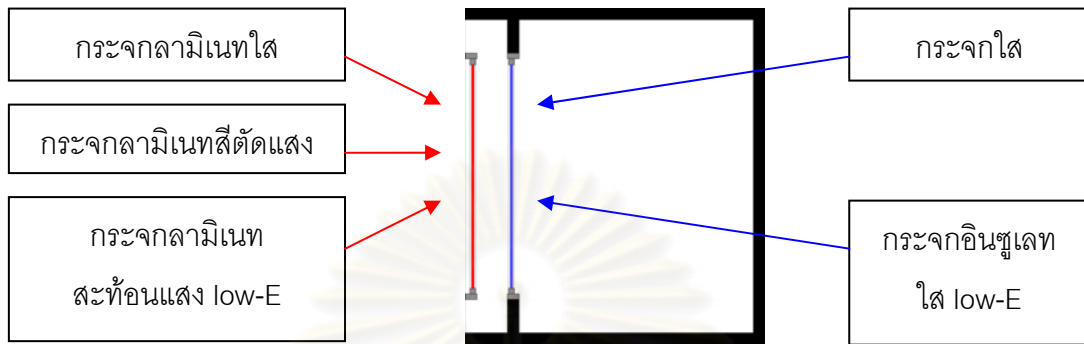
สำหรับเครื่องวัดอุณหภูมิมีการตรวจสอบความถูกต้องของสายวัดได้ในตัวเอง (Self calibrate) จึงไม่จำเป็นต้องทำการตรวจสอบ

เครื่องวัดลมที่ใช้ในการวัดมีจำนวน 3 เครื่อง ซึ่งการตรวจสอบนั้นใช้ค่าสถิติในการตรวจสอบความถูกต้อง (ดูเพิ่มเติม ภาคผนวก ข)

เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการวัดมีจำนวน 1 เครื่อง จึงไม่จำเป็นต้องทำการตรวจสอบ

### 3.3.4 วิธีการวัด

ในการวัดค่ากล่องทดลองมีลำดับวิธีการในการวัดค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้น ดังนี้



รูปที่ 3-11 การเปลี่ยนตัวแปรชนิดกระจกทั้ง 5 ชนิด ทั้งกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นใน

ตัวแปรหลักในการทดลองคือ ชนิดของกระจกทั้ง 5 ชนิด โดยแบ่งเป็นกระจกชั้นนอก 3 ชนิดคือ กระจกลามิเนทใส กระจกลามิเนทสีตัดแสง และกระจกลามิเนทสะท้อนแสง ซึ่งแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในเรื่องค่าการมองเห็น (Visible light) ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์ ( $\alpha$ ) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ ( $\rho$ ) และค่าการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ ( $\tau$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของกระจก ( $U$ ) ส่วนกระจกชั้นในจะใช้กระจก 2 ชนิดคือ กระจกใสและกระจกอินซูลेटใส low-E เพื่อเป็นตัวแทนของกระจกที่มีค่า  $U$  สูงและต่ำตามลำดับ

ชนิดกระจก		กระจกชั้นใน	
		กระจกใส	กระจกอินซูลेटใส low-E
กระจกชั้นนอก	กระจกลามิเนทใส	กระจกลามิเนทใส/กระจกใส	กระจกลามิเนทใส/กระจกอินซูลेटใส low-E
	กระจกลามิเนทสีตัดแสง	กระจกลามิเนทสีตัดแสง/กระจกใส	กระจกลามิเนทสีตัดแสง/กระจกอินซูลेटใส low-E
	กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E	กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E/กระจกใส	กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E/กระจกอินซูลेटใส low-E

ตารางที่ 3-4 รูปแบบการปรับเปลี่ยนกระจกที่ใช้ในการทดลองทั้ง 6 รูปแบบ

สามารถจับคู่ได้ 6 รูปแบบคือ กระจกลามิเนทใสกับกระจกใส กระจกลามิเนทสีตัดแสงกับกระจกใส กระจกลามิเนทสะท้อนแสงกับกระจกใส กระจกลามิเนทใสกับกระจกอินซูลेटใส low-E กระจกลามิเนทสีตัดแสงกับกระจกอินซูลेटใส low-E และกระจกลามิเนทสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลेटใส low-E

ในแต่ละรูปแบบจะมีการใส่ตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งคือ ปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนกระจก  
ชั้นนอก โดยมีค่าตั้งแต่  $200 \text{ W/m}^2$   $300 \text{ W/m}^2$   $400 \text{ W/m}^2$  จนถึง  $500 \text{ W/m}^2$  โดยใช้เครื่องวัดความ  
เข้มรังสีอาทิตย์วัดค่าให้ตรงกับปริมาณที่ต้องการ

ทำการวัดอุณหภูมิจุดต่างๆ ภายในกล่องทดลอง และค่าความเร็วลมภายในช่องอากาศ  
เป็นระยะเวลา 45 นาที โดยวัดค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที และค่าความเร็วลมทุกๆ 10 นาที ต่อ  
ปริมาณรังสีหนึ่งค่า และทำการทดลองกับรูปแบบทั้ง 6 รูปแบบของชนิดกระจก

หลังจากนั้นจะนำค่าอุณหภูมิและความเร็วลมที่ได้ไปคำนวณด้วยแบบจำลองทาง  
คณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) ทั้ง 6 รูปแบบ  
และทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

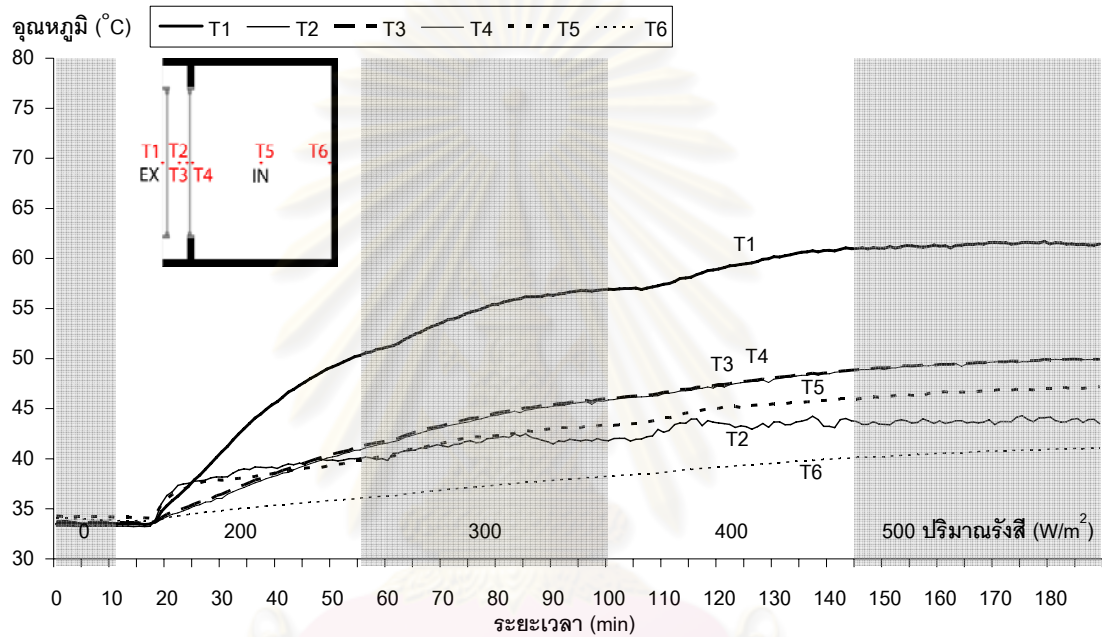


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

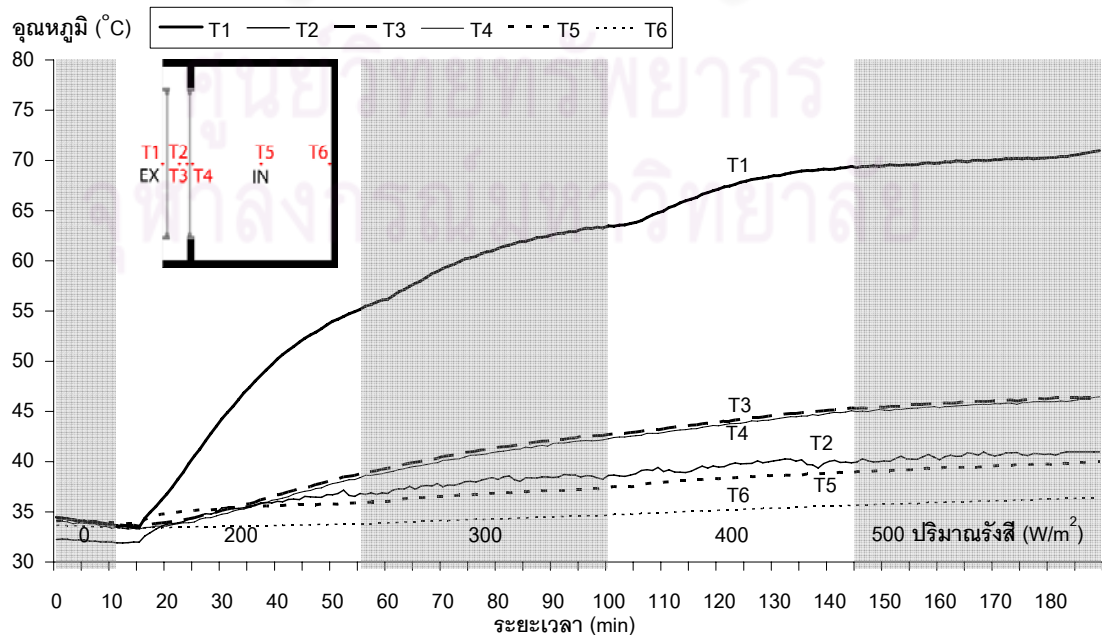
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

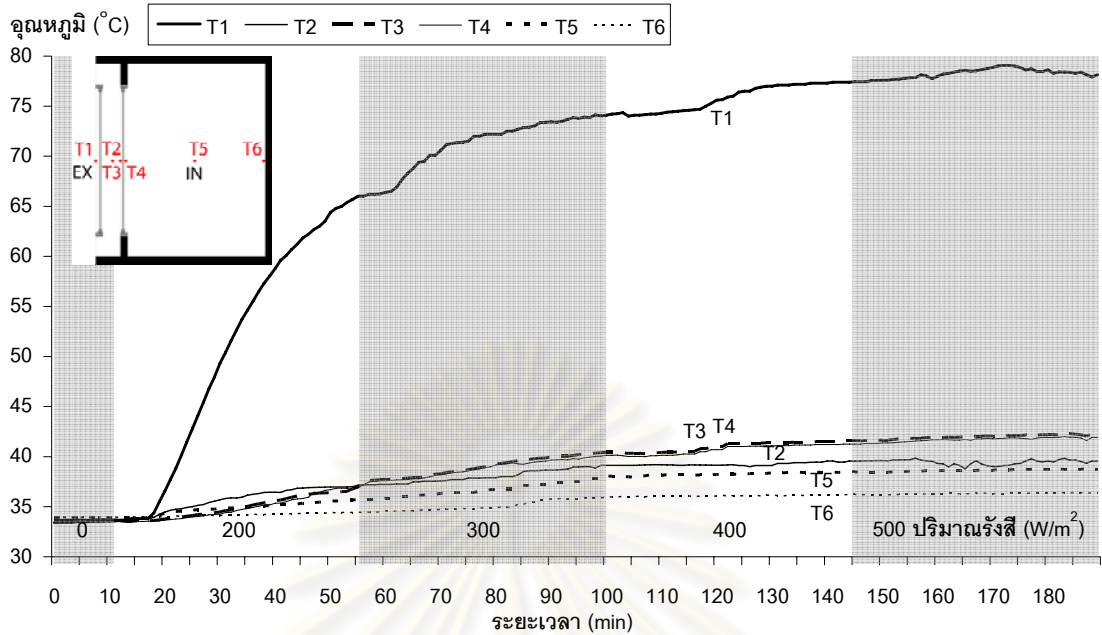
#### 4.1 อุณหภูมิ



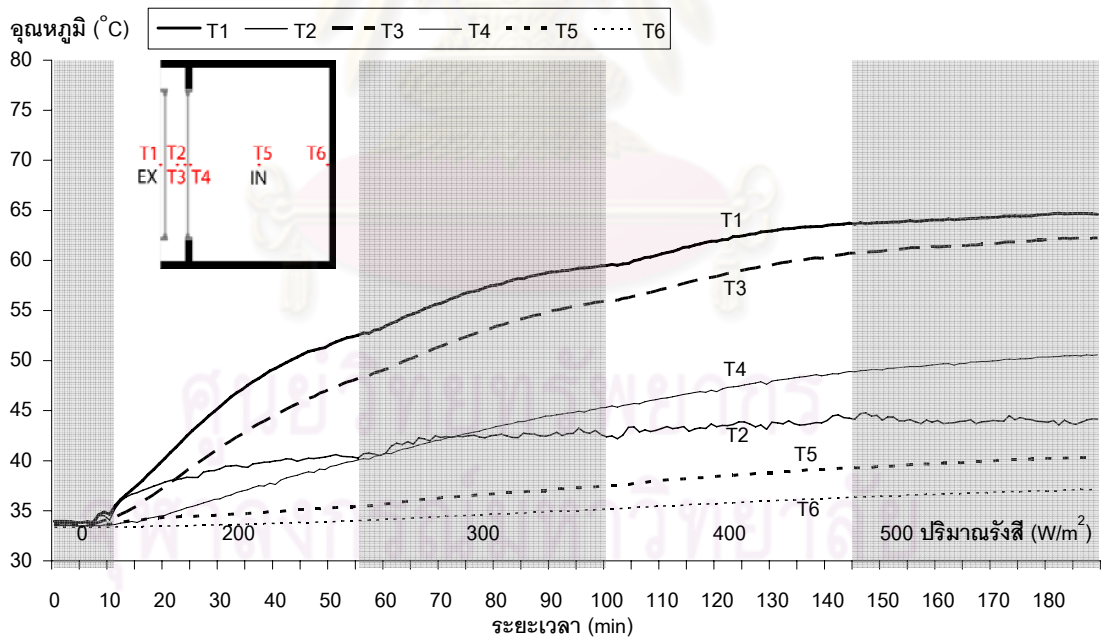
รูปที่ 4-1 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกلامิเน็ตใส เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Clear-Clear)



รูปที่ 4-2 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกلامิเน็ตสีตัด แสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Tint-Clear)

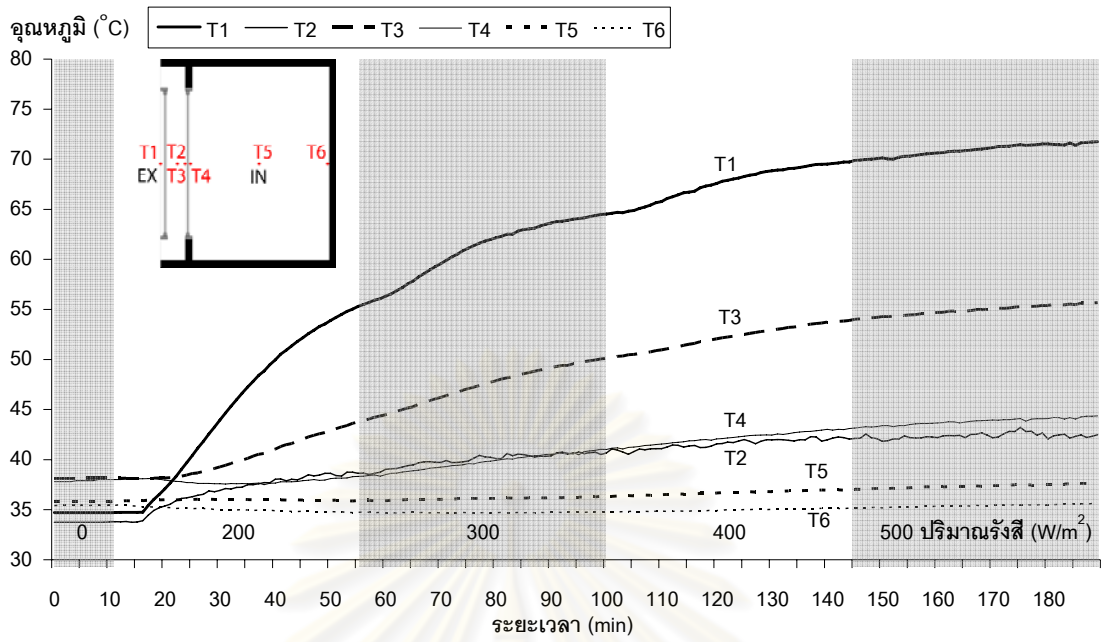


รูปที่ 4-3 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Clear)

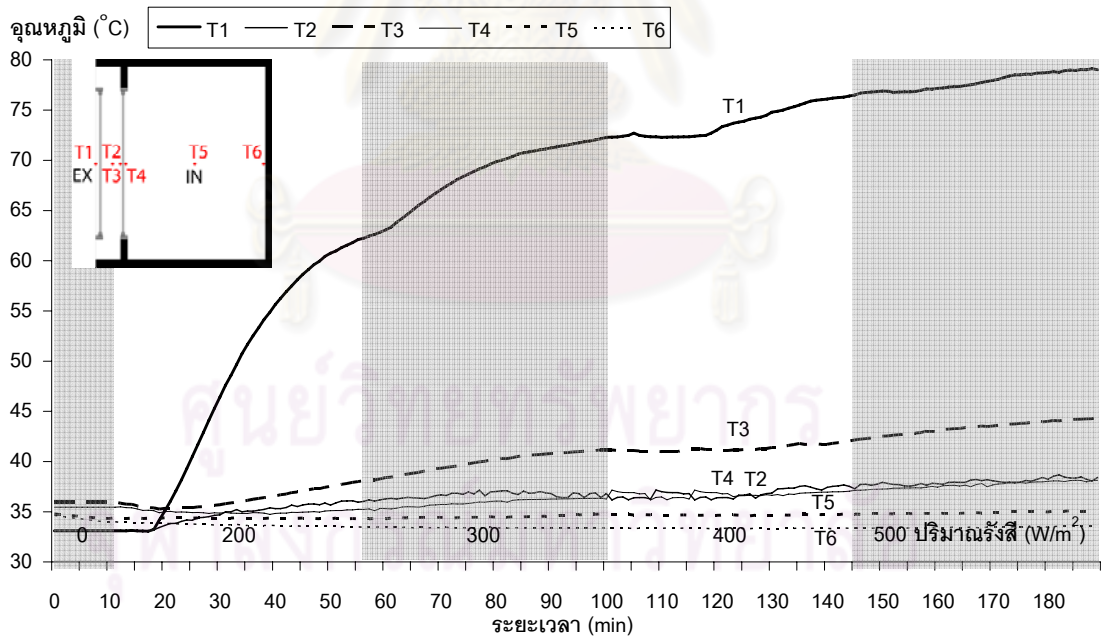


รูปที่ 4-4 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนทใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาติว low-E เป็นกระจกชั้นใน (Clear-Insulate)





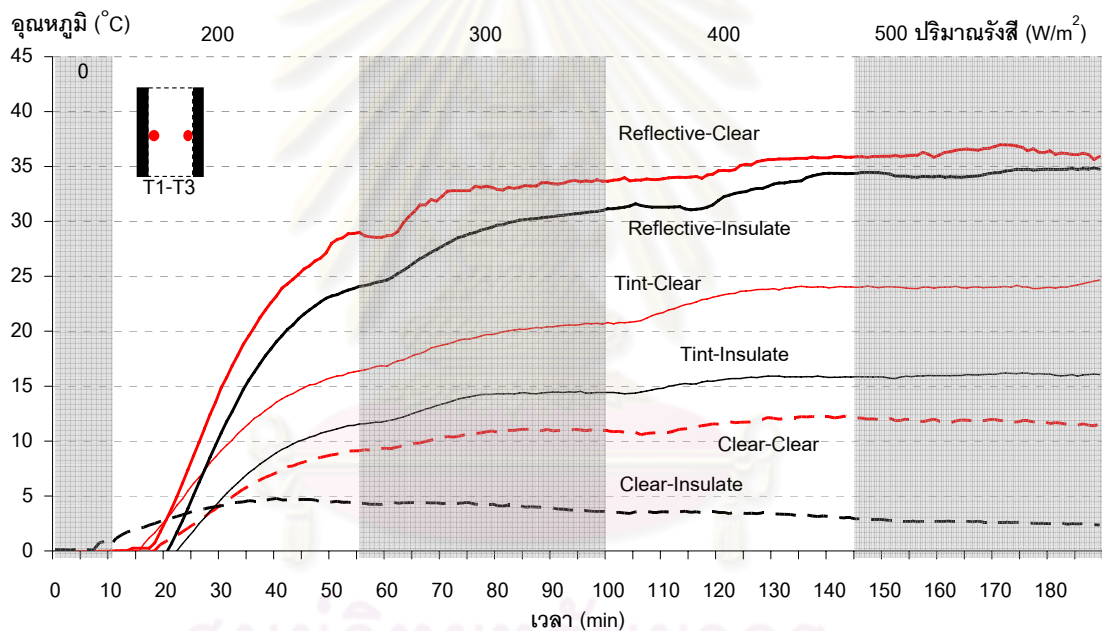
รูปที่ 4-5 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีบนผนังที่มีกระจกลามิเนตสีตัด แสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาไทด์ low-E เป็นกระจกชั้นใน (Tint-Insulate)



รูปที่ 4-6 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของบนผนังที่มีกระจกลามิเนต สะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาไทด์ low-E เป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Insulate)

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในกล่องทดลองที่มีชนิดกระจกแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ากระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E ที่ใช้เป็นกระจกชั้นนอกมีอุณหภูมิที่ผิวกระจกสูงที่สุดในกระจก 3 ชนิด เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อน ( $\alpha$ ) มากที่สุด รองลงมาคือกระจกสีตัดแสงและกระจกใสตามลำดับ

ผนังที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในจะ不会有ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกและภายใน ( $T_3=T_4$ ) อุณหภูมิในช่องอากาศ ( $T_2$ ) และอุณหภูมิภายในห้อง ( $T_5$ ) ของผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาเททใส low-E เป็นกระจกชั้นในมีค่าน้อยที่สุดและผนังที่มีกระจกลามิเนทใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่ามากที่สุด

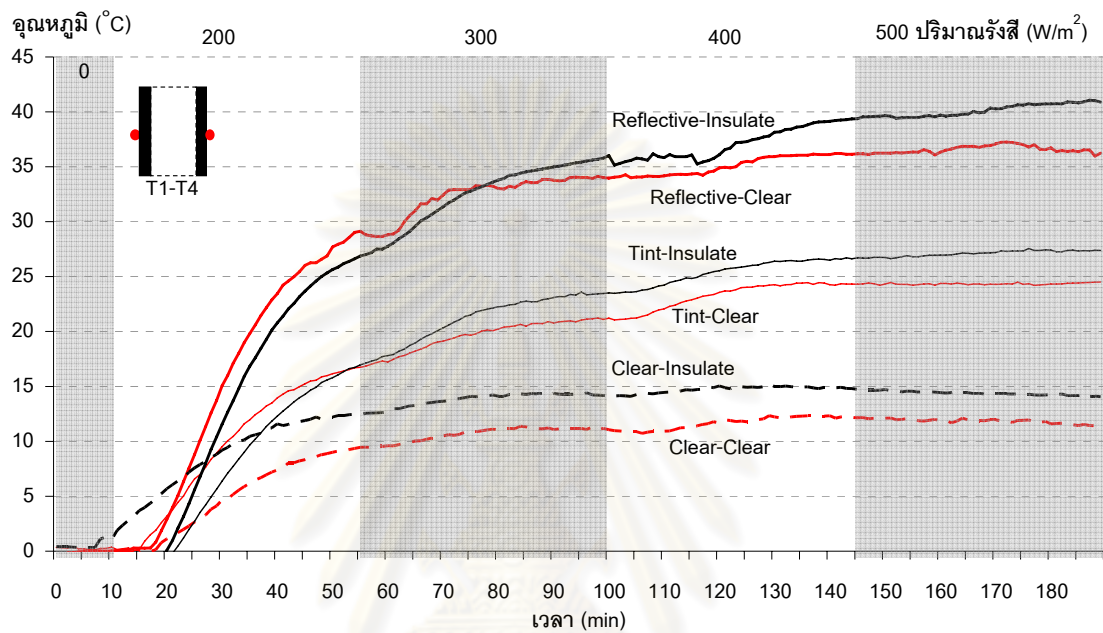


รูปที่ 4-7 ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในภายในช่องอากาศของผนังแต่ละชนิด (T1-T3) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี

เนื่องจากกระจกภายนอกเป็นกระจกชั้นเดียวอุณหภูมิผิวภายนอกและภายในของกระจกจึงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก จึงใช้ค่าอุณหภูมิที่จุด T1 แทนอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกภายในช่องอากาศ

จากรูปที่ 4-7 แสดงให้เห็นว่าผนังกระจกที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่าความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายในช่องอากาศมากกว่าผนังกระจกที่มีกระจกอินซูลาเททใส low-E เป็นกระจกชั้นใน

คู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกใสมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นในและชั้นนอกภายในช่องอากาศมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทใส low-E ถัดมาคือคู่ของกระจกสีกับกระจกใส, กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส low-E, กระจกใสกับกระจกใส และกระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส low-E ตามลำดับ

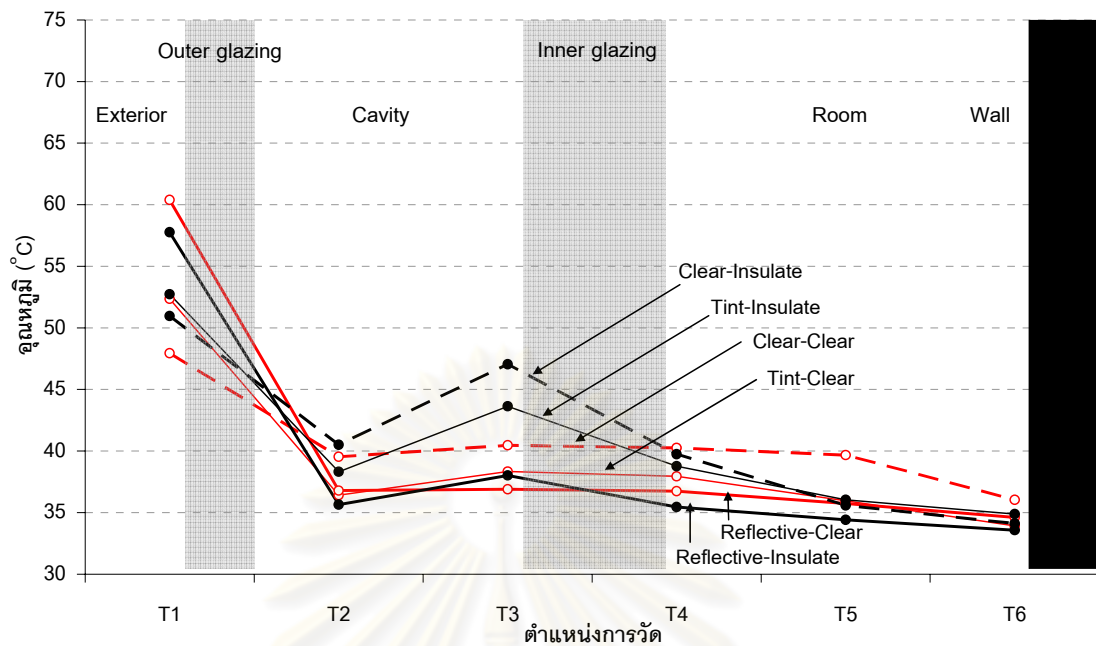


รูปที่ 4-8 ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในของผนังแต่ละชนิด (T1-T4) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี

จากรูปที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าผนังกระจกที่มีกระจกอินซูลาเทใส low-E ใสเป็นกระจกชั้นในมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในมากกว่าผนังกระจกที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน

คู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทใส low-E มีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นในและชั้นนอกมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกใส ถัดมาคือคู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส low-E, กระจกสีตัดแสงกับกระจกใส, กระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส low-E และกระจกใสกับกระจกใสตามลำดับ

คู่ของกระจกที่มีความต่างอุณหภูมิผิวของกระจกชั้นในและชั้นนอกอันดับ 1 กับอันดับ 2 มีความต่างกัน 1.97% อันดับ 3 กับอันดับ 4 มีความต่างกัน 4.08% และอันดับ 5 กับอันดับ 6 มีความต่างกัน 24.79%

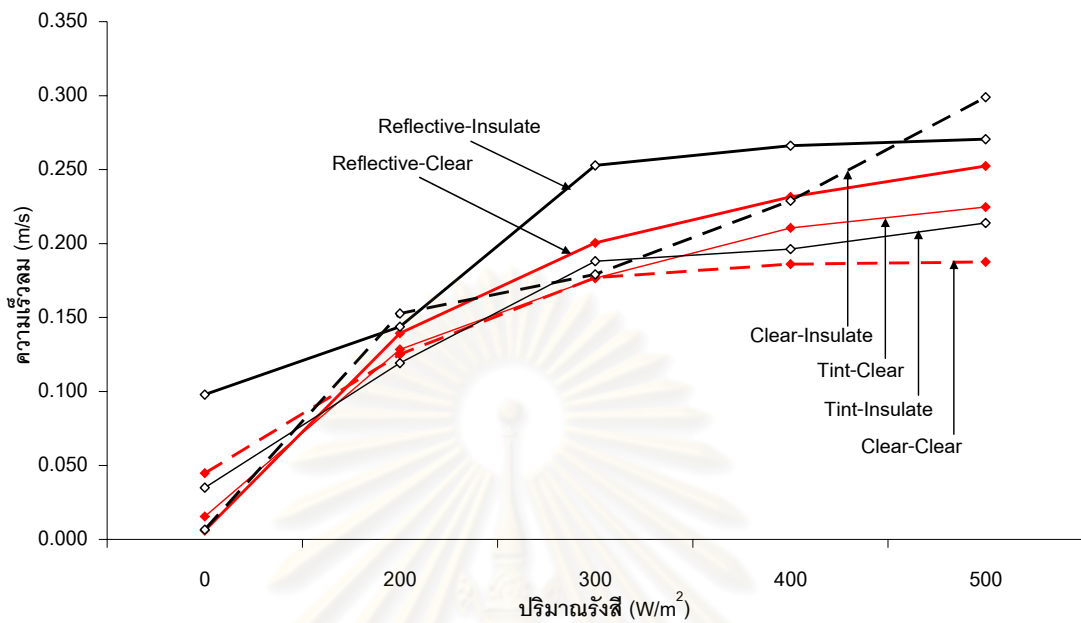


รูปที่ 4-9 ลักษณะของอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ตั้งแต่ภายนอกจนถึงภายในห้องของกระจกชนิดต่างๆ ที่ปริมาณรังสี  $250 \text{ W/m}^2$

จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนผ่านทางอุณหภูมิที่ผ่านกระจกแต่ละชั้นเข้าสู่ภายในห้องและถูกดูดซับภายในผนังห้อง โดยอุณหภูมิจะสูงที่สุดที่ผิวกระจกทุกชนิดกระจกและจะลดต่ำลงในช่องอากาศและจะสูงขึ้นอีกที่ผิวกระจกชั้นในภายในช่องอากาศในกรณีของกระจกอินซูลาเทส low-E และจะลดต่ำลงเมื่อผ่านกระจกชั้นในและลดต่ำลงเมื่อเข้าสู่ภายในห้องและผนังตามลำดับ ส่วนกรณีของกระจกชั้นในเป็นกระจกใสอุณหภูมิที่ผิวกระจกชั้นในจะมีค่าพอบกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ

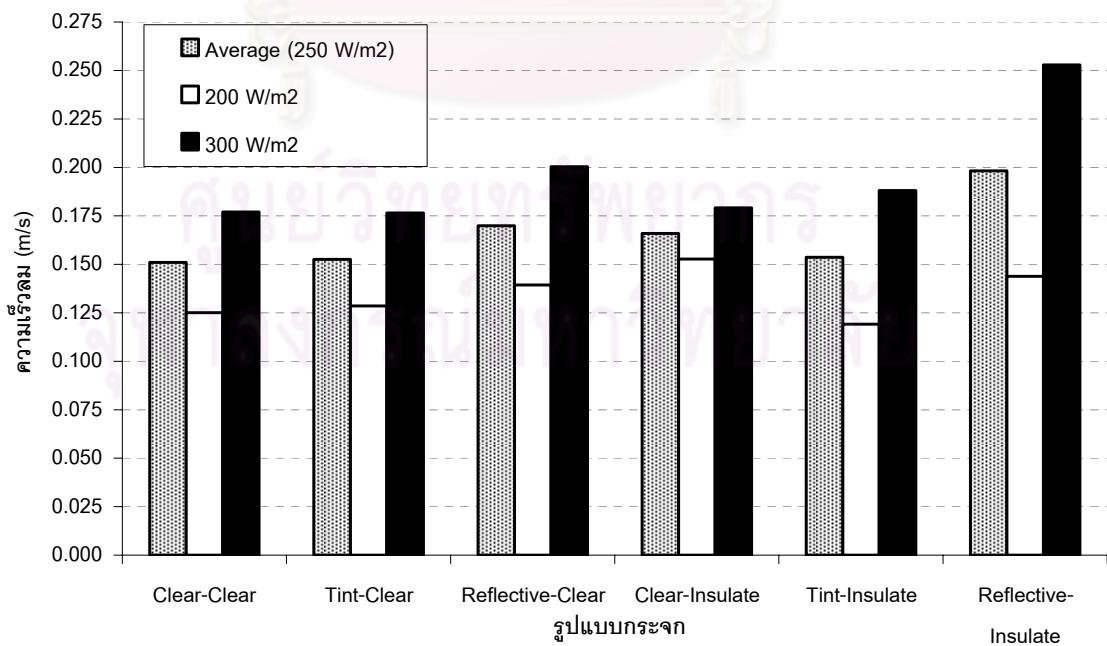
ที่อุณหภูมิภายในห้อง (T5) อุณหภูมิของคู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทส low-E มีค่าต่ำที่สุด คู่ของกระจกลามิเนทใสกับกระจกใสมีค่าสูงที่สุด ส่วนกระจกอีก 4 ชนิดมีค่าไม่ต่างกัน โดยกระจก 4 ชนิดนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่าคู่ของกระจกลามิเนทใสกับกระจกใสอยู่ 9.70% และอุณหภูมิของคู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทส low-E มีค่าต่ำกว่าคู่ของกระจกลามิเนทใสกับกระจกใสอยู่ 13.26% และต่ำกว่ากระจกอีก 4 ชนิดอยู่ 3.95%

### 4.2 ความเร็วลม



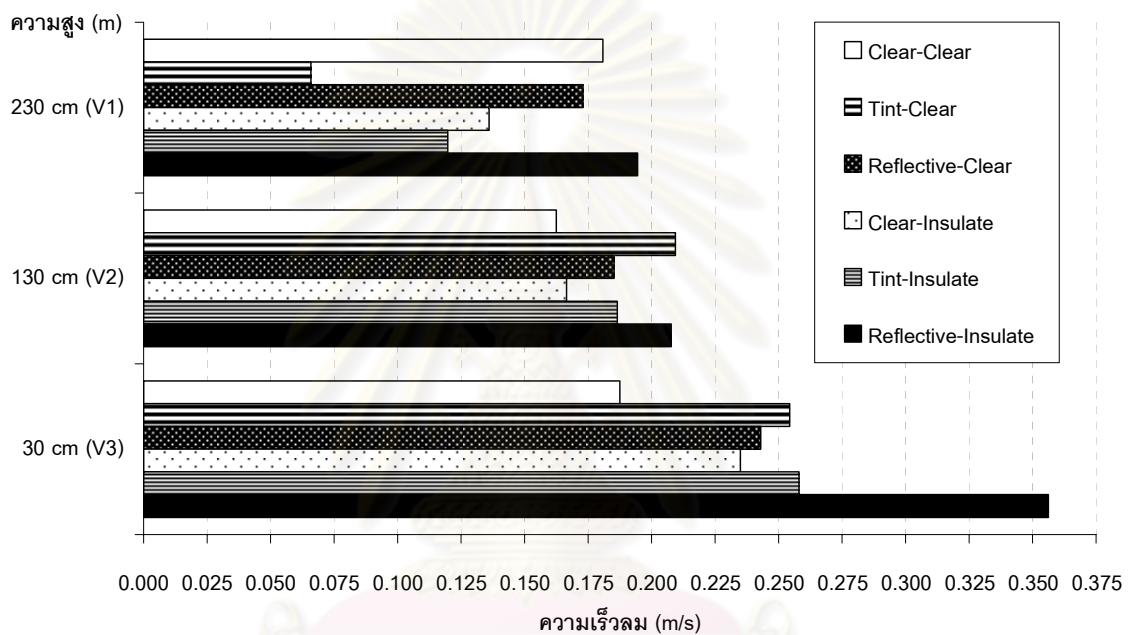
รูปที่ 4-10 ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศเมื่อเพิ่มปริมาณรังสี

จากรูปที่ 4-10 จะเห็นได้ว่าความเร็วลมมีค่าแปรผันตามกับปริมาณรังสี โดยที่คู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทส low-E มีความเร็วลมเฉลี่ยมากที่สุด กระจกชนิดอื่นๆ มีความเร็วลมเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-11 ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศในช่วงปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย

ความเร็วลมที่เกิดขึ้นในช่วงปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทยคือช่วงรังสี 200-300  $W/m^2$  ผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสงเป็นส่วนประกอบมีความเร็วลมมากกว่ากระจกชนิดอื่น เมื่อกระจกชั้นในเป็นกระจกชนิดเดียวกัน และจากค่าเฉลี่ยในช่วงปริมาณรังสีนี้ พบว่าความเร็วลมของคู่กระจกลามิเนตสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาไรด์ low-E มีความเร็วลมเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกใส และกระจกลามิเนตใสกับกระจกอินซูลาไรด์ low-E มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกระจกอีก 3 ชนิดที่เหลือมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4-12 ความเร็วลมเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในช่องอากาศในช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย

จากรูปที่ 4-12 แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมภายในช่องอากาศเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณช่องลมเข้าแล้วลดต่ำลงจนถึงช่องลมออก เกือบทุกคู่กระจกยกเว้นคู่ของกระจกลามิเนตใสกับกระจกใส

### 4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor)

ในการหาค่า  $h_c$  จำเป็นต้องหาค่านัสเซลท์นัมเบอร์ (Nu) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.22 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องขอพบการหาวิธีการหาค่า Nu 2 วิธี ในการหาค่า Nu นี้ จะใช้ค่าของอุณหภูมิและความเร็วลมในช่วงปริมาณรังสี 250 W/m<sup>2</sup> ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยปริมาณแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

- **วิธีที่ 1 ค่า Nu ที่ได้จากสมการการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในช่องระหว่างแผ่นราบ 2 แผ่นวางขนานกัน (Free convection within parallel plate channels) ของ Bar-Cohen and Rohsenow (1984)**

จากการสมการที่ 2.12 วิธีการนี้เป็นการหาค่า Nu จากความกว้างของช่องอากาศ (L) ซึ่งจากการตรวจสอบค่าเรลันัมเบอร์ ( $Ra_L$ ) พบว่าการไหลของอากาศเป็นแบบแผ่นโดดเดี่ยว (Isolate plate) ค่า Nu ที่ได้เป็นดังนี้

Nu <sub>L</sub> , Bar-Cohen	Nu <sub>L</sub>
Clear-Clear	20.194
Tint-Clear	23.834
Reflective-Clear	25.410
Clear-Insulate	23.193
Tint-Insulate	24.214
Reflective-Insulate	25.704

ตารางที่ 4-1 ค่า Nu ที่ได้จากสมการของ Bar-Cohen and Rohsenow (1984)

- **วิธีที่ 2 ค่า Nu ที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังในแนวตั้ง (The wall averaged heat transfer rate from a vertical wall) แบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities) ของ Churchill and Chu (1975)**

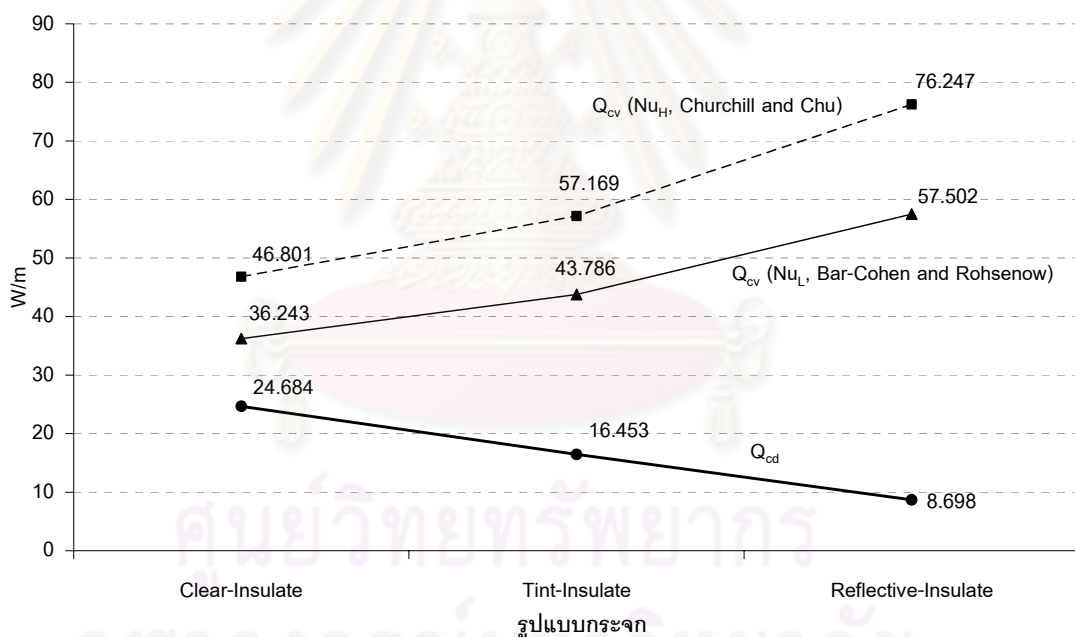
จากสมการที่ 2.15 วิธีการนี้เป็นการหาค่า Nu จากความสูงของช่องอากาศ (H) จากการตรวจสอบค่ากราชอฟนัมเบอร์ (Gr) และเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) พบว่าค่า Gr มีค่ามากกว่าค่ากำลังสองของค่า Re มาก ถือว่าเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จากนั้นได้ตรวจสอบรูปแบบของช่องอากาศว่าเป็นแบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities) หรือแบบช่องอากาศแคบ (Narrow cavities) พบว่าค่า  $L/H > Ra_H^{-1/4}$  และ  $L/H > Ra_L^{-1}$  จึงสรุปได้ว่าเป็นแบบช่องอากาศกว้าง

หลังจากนั้นได้ตรวจสอบลักษณะการไหลของอากาศพบว่าเป็นแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (Laminar and turbulent) เนื่องจากค่า  $10^{-1} < Ra_H < 10^{12}$  ค่า Nu ที่ได้เป็นดังนี้

$Nu_H$ , Churchill	$Nu_H$
Clear-Clear	167.888
Tint-Clear	206.622
Reflective-Clear	223.952
Clear-Insulate	199.661
Tint-Insulate	210.764
Reflective-Insulate	227.220

ตารางที่ 4-2 ค่า  $Nu$  ที่ได้จากสมการของ Churchill and Chu (1975)

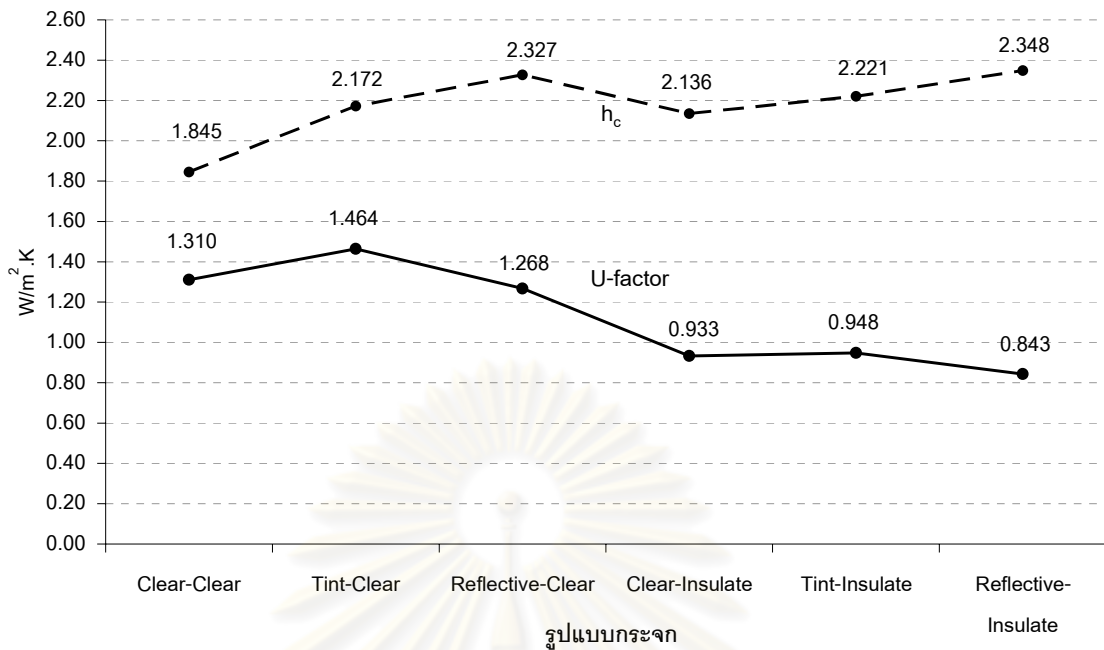
จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่า  $Nu$  ที่ได้โดยนำค่า  $Nu$  ที่ได้จากสมการทั้งสองไปหาค่าการพาความร้อน ( $Q_{cv}$ ) ในสมการที่ 2.11 และหาค่าการนำความร้อน ( $Q_{cd}$ ) ของผนังกระจกชั้นในที่ประกอบด้วยกระจกอินซูลาติส low-E เนื่องจากมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกมาก ทำให้สามารถเห็นผลของค่า  $Q_{cd}$  ที่ผ่านกระจกชั้นในได้ชัดเจน ซึ่งจากสมการสมดุลความร้อน (Heat balance) สมการที่ 2.35 ค่าของ  $Q_{cd}$  จะเท่ากับค่า  $Q_{cv}$



รูปที่ 4-13 การเปรียบเทียบค่า  $Q_{cd}$  กับค่า  $Q_{cv}$  ในระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อหาความถูกต้องของค่า  $Nu$

จากการเปรียบเทียบค่า  $Q_{cd}$  กับค่า  $Q_{cv}$  ในระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อหาความถูกต้องของค่า  $Nu$  พบว่าค่า  $Nu$  จากสมการของ Bar-Cohen and Rohsenow (1984) มีค่าใกล้เคียงค่าการนำความร้อนมากกว่าของ Churchill and Chu (1975) เพราะฉะนั้นจึงใช้วิธีการดังกล่าวในการหาค่า  $h_c$  เพื่อใช้หาค่าความต้านทานความร้อนในช่องอากาศ ( $R_{cv}$ ) ในสมการที่ 9 เพื่อหาค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นต่อไป





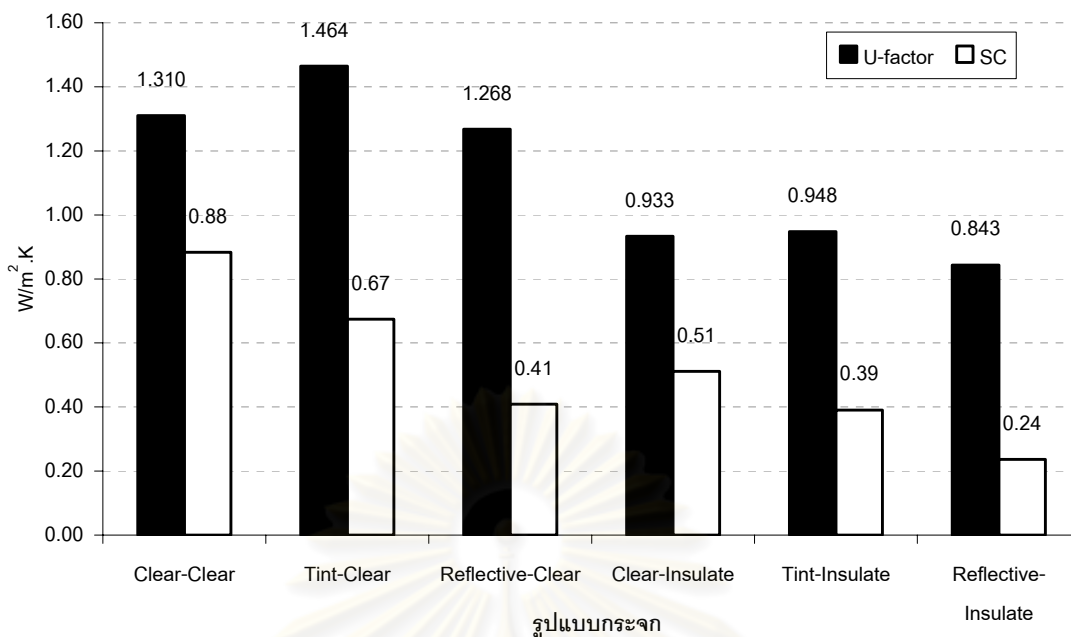
รูปที่ 4-14 การเปรียบเทียบค่า  $h_c$  กับค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้น

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่า  $h_c$  กับค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นแต่ละรูปแบบ พบว่าผนังที่ใช้กระจกลามิเนตใสเป็นกระจกชั้นนอกจะมีค่า  $h_c$  มากกว่ากระจกลามิเนตสีตัดแสงและกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E

ในขณะที่ผนังที่ใช้กระจกลามิเนตสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกจะมีค่า U-factor มากที่สุด รองลงมาเป็นกระจกลามิเนตใสและกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E มีค่า U-factor น้อยที่สุด

การใช้กระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลาต low-E จะทำให้ค่า U-factor ในระบบต่ำกว่าการใช้กระจกใส ในขณะที่ค่า  $h_c$  ในระบบจะสูงกว่าการใช้กระจกใสเป็นกระจกชั้นใน

หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่ได้กับค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC) ของกระจกแต่ละรูปแบบได้ผลเป็นดังนี้



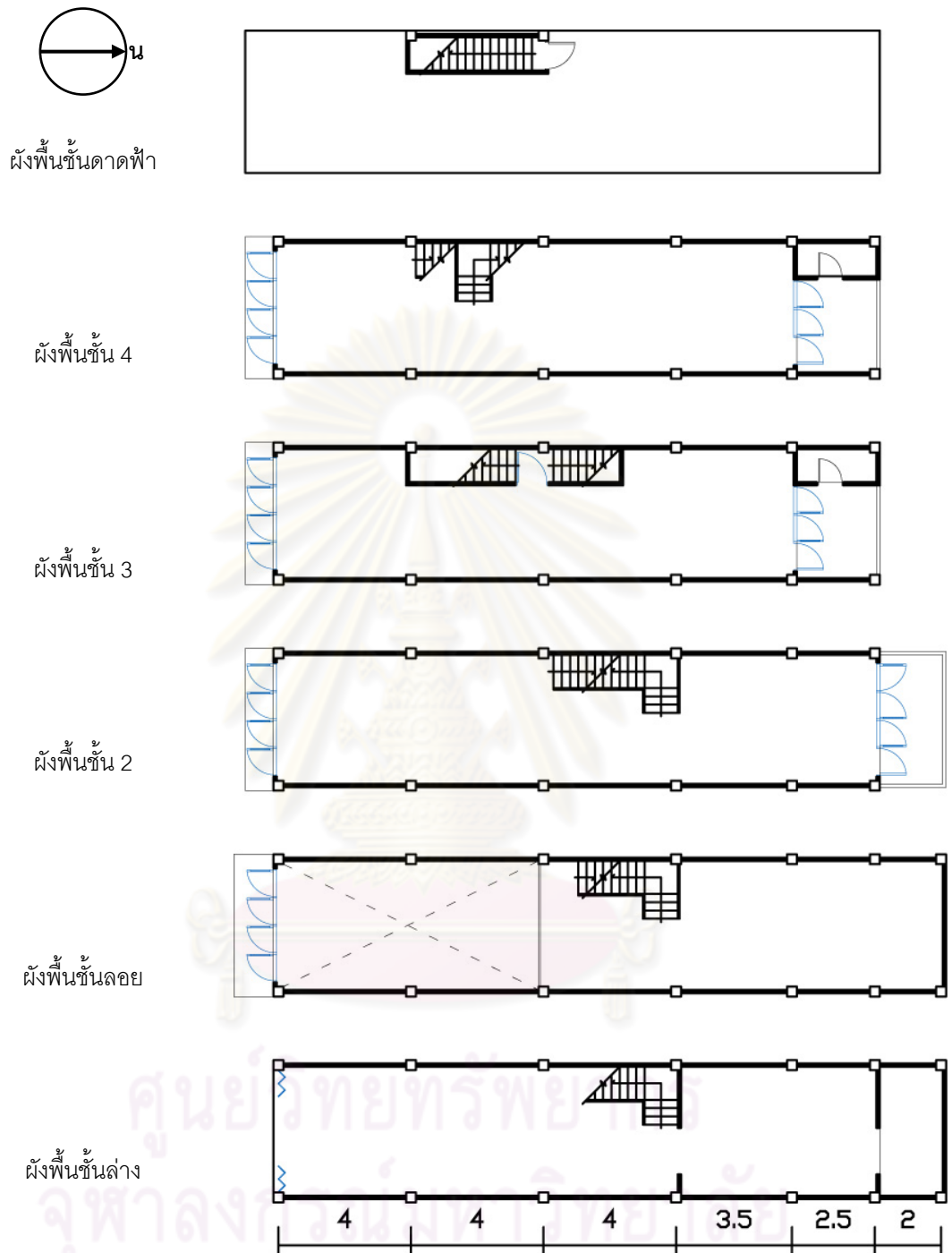
รูปที่ 4-15 การเปรียบเทียบค่า U-factor กับค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้น

จากรูปที่ 4-15 พบว่าค่า SC ของกระจกชั้นนอกที่เป็นกระจกลามิเนตใสจะมีค่าสูงกว่ากระจกลามิเนตสีตัดแสงและกระจกลามิเนตสะท้อนแสงตามลำดับ เมื่อกระจกชั้นในเป็นกระจกชนิดเดียวกัน และการใช้กระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลาต low-E จะทำให้ค่า SC ต่ำกว่าการใช้กระจกใส

#### 4.4 การคำนวณภาระการทำความเย็น

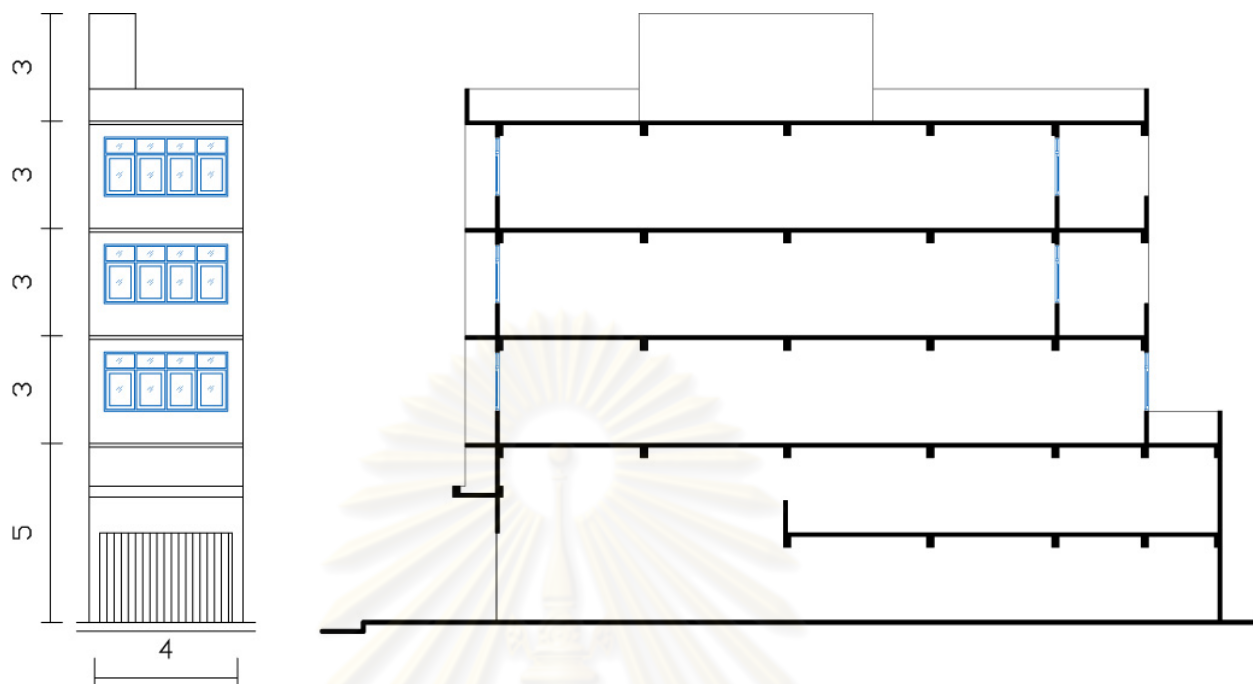
เมื่อได้ค่า U-factor ของผนังแต่ละรูปแบบแล้ว จึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณภาระการทำความเย็น โดยใช้วิธีการคำนวณความต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคาร (Cooling load temperature differential) หรือ CLTD โดยใช้อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนของประเทศไทยตั้งแต่ปีพ.ศ. 2538 จนถึงปีพ.ศ. 2547 มาใช้ในการคำนวณ

โดยใช้อาคารพาณิชย์ที่มีความกว้าง 4 ม. ความยาว 20 ม. สูง 4 ชั้น โดยชั้นล่างมีความสูง 5 ม. ชั้นที่ 2-4 มีความสูงชั้นละ 3 ม. มาใช้เป็นกรณีศึกษา รูปแบบของตึกแถวมีลักษณะเป็นดังนี้



รูปที่ 4-16 ผังพื้นที่อาคารพาณิชย์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

โดยกำหนดให้ผนังอาคารที่มีการปรับปรุงเป็นผนังด้านหน้าอาคารหันไปยังทิศใต้ เนื่องจากทิศใต้เป็นทิศที่ได้รับอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์มากที่สุด



รูปที่ 4-17 รูปด้านหน้าและรูปตัดของอาคารพาณิชย์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ผนังของอาคารเป็นผนังก่ออิฐฉาบปูนหนา 10 ซม. มีค่า  $U$  เท่ากับ  $3.39 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  และมีหน้าต่างขนาด  $1.5 \times 3.2$  ตร.ม. เป็นกระจกใสขนาด 6 มม. มีค่า  $U$  เท่ากับ  $5.25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  และมีค่า  $SC$  เท่ากับ 0.95

อุณหภูมิอากาศที่นำมาใช้คำนวณจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ

- 1) ช่วงฤดูร้อน
- 2) ช่วงฤดูหนาว
- 3) ช่วงอุณหภูมิปกติหรือช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย

ซึ่งแต่ละช่วงเวลานั้นจะใช้เวลากลางวันที่มีอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์กระทำต่อระบบผนังกระจกสองชั้นในการคำนวณภาระการทำความเย็น โดยใช้ช่วงเวลาตั้งแต่ 8.00 น. ถึง 17.00 น. เป็นเวลา 10 ชม.

#### 1) ช่วงฤดูร้อน

ช่วงฤดูร้อนจะใช้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเดือนเมษายนเป็นตัวแทน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $30.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

## 2) ช่วงฤดูหนาว

ช่วงฤดูหนาวจะใช้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเดือนธันวาคมเป็นตัวแทน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $27.22\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 3) ช่วงอุณหภูมิปกติหรือช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย

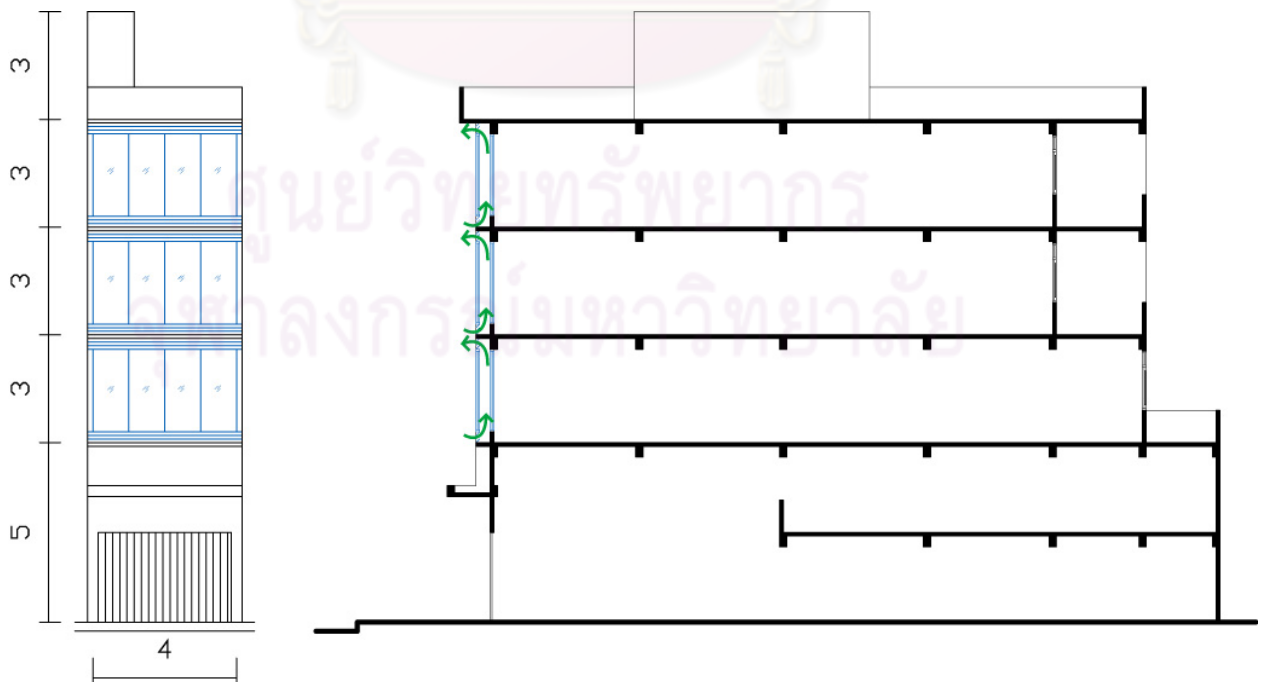
ช่วงอุณหภูมิปกติหรือช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยจะใช้อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในเดือนสิงหาคมเป็นตัวแทน เนื่องจากเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปี มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $28.70\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากนั้นได้เสนอทางเลือกในการปรับปรุงผนังอาคารเดิมให้เป็นระบบผนังกระจกสองชั้น โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ

- 1) แบบชั้นเดียว (Single-storey)
- 2) แบบต่อเนื่องหลายชั้น (Multi-storey)

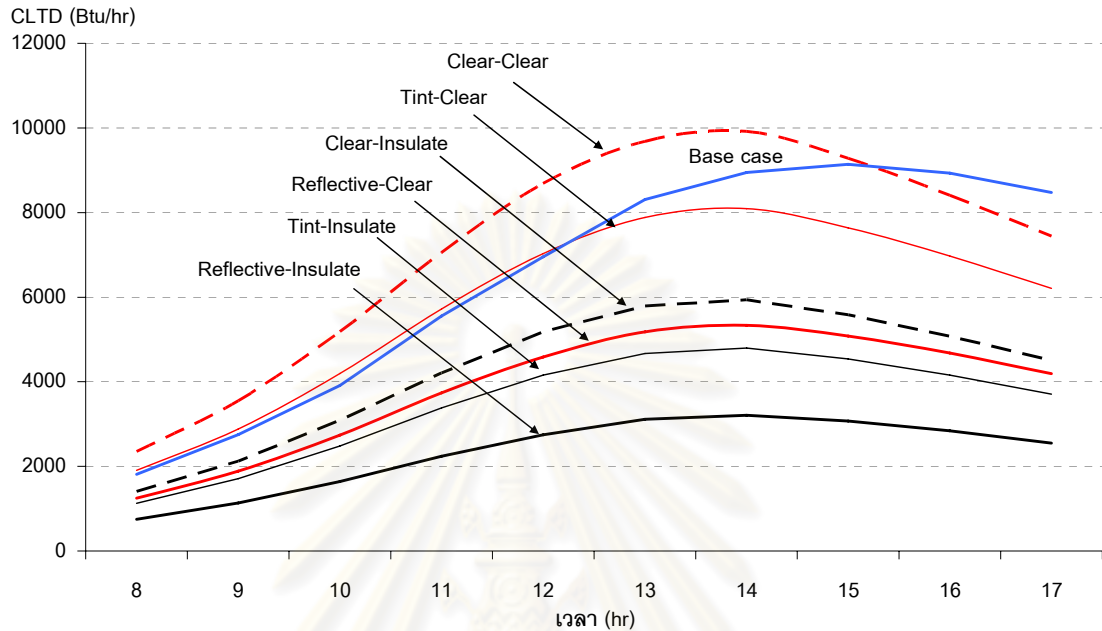
### 1) ทางเลือกที่ 1 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบชั้นเดียว

เป็นระบบผนังกระจกสองชั้นที่ความสูงเท่ากับอาคารชั้นเดียว ซึ่งอาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแบบบ็อกซ์ มีความสูง 3 ม. ความกว้างของช่องอากาศ 30 ซม. โดยผนังนี้จะใช้ค่า U-factor ที่ได้จากการทดลอง มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (L/H) เท่ากับ 0.15 มีลักษณะเป็นดังนี้

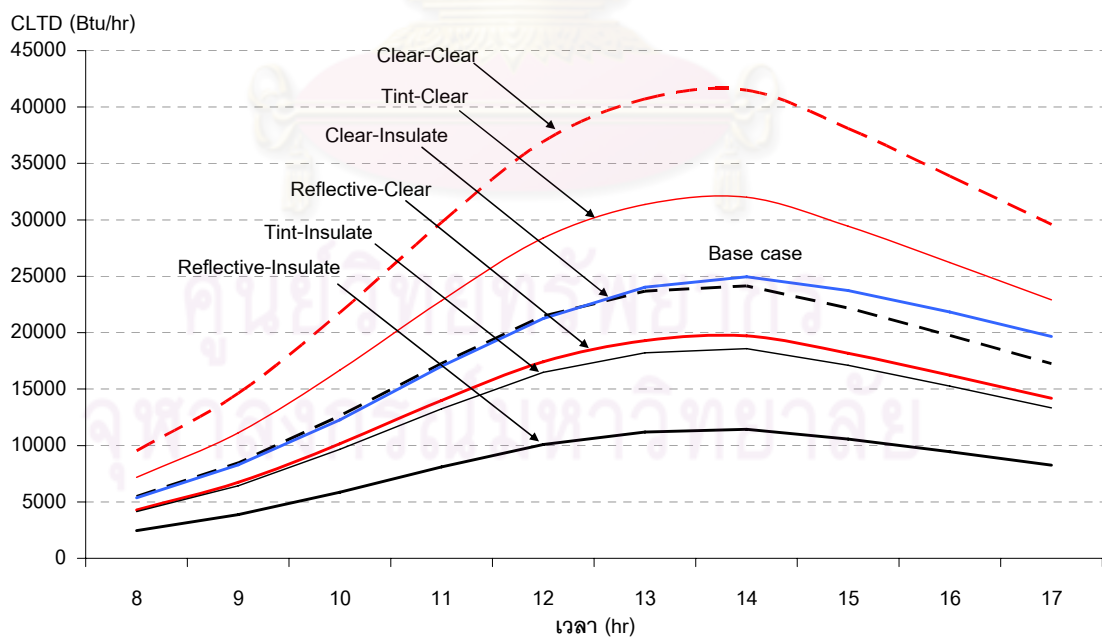


รูปที่ 4-18 รูปด้านหน้าและรูปตัดของทางเลือกที่ 1 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบชั้นเดียว

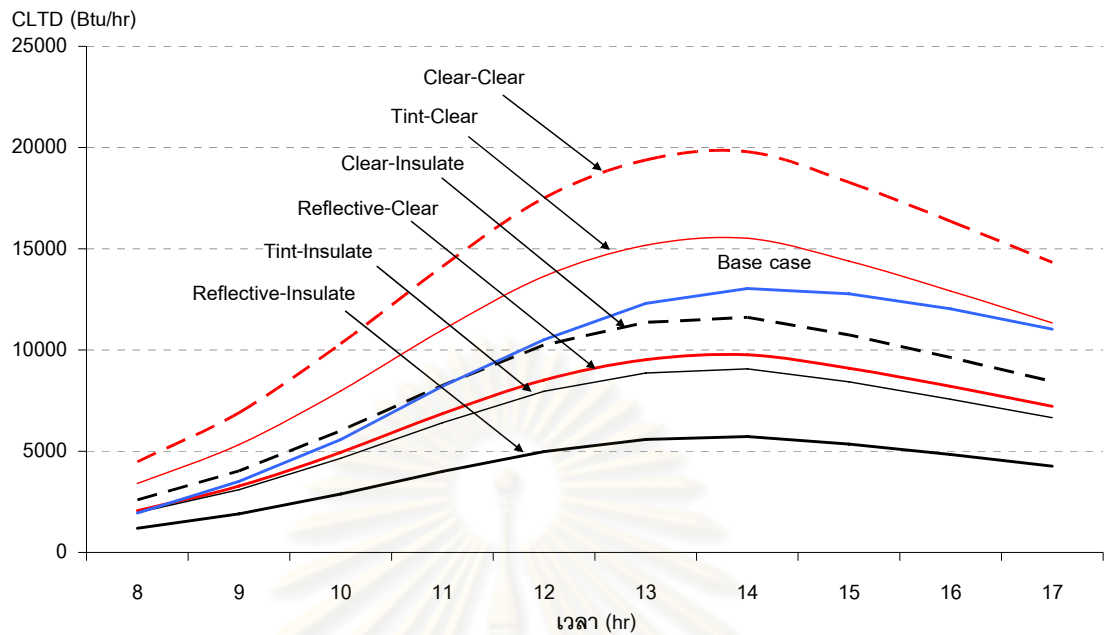
จากการคำนวณภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 เปรียบเทียบกับอาคารเดิมทั้ง 3 ช่วงเวลา มีผลเป็นดังนี้



รูปที่ 4-19 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูร้อน



รูปที่ 4-20 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหนาว



รูปที่ 4-21 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 1 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหมูปกติ

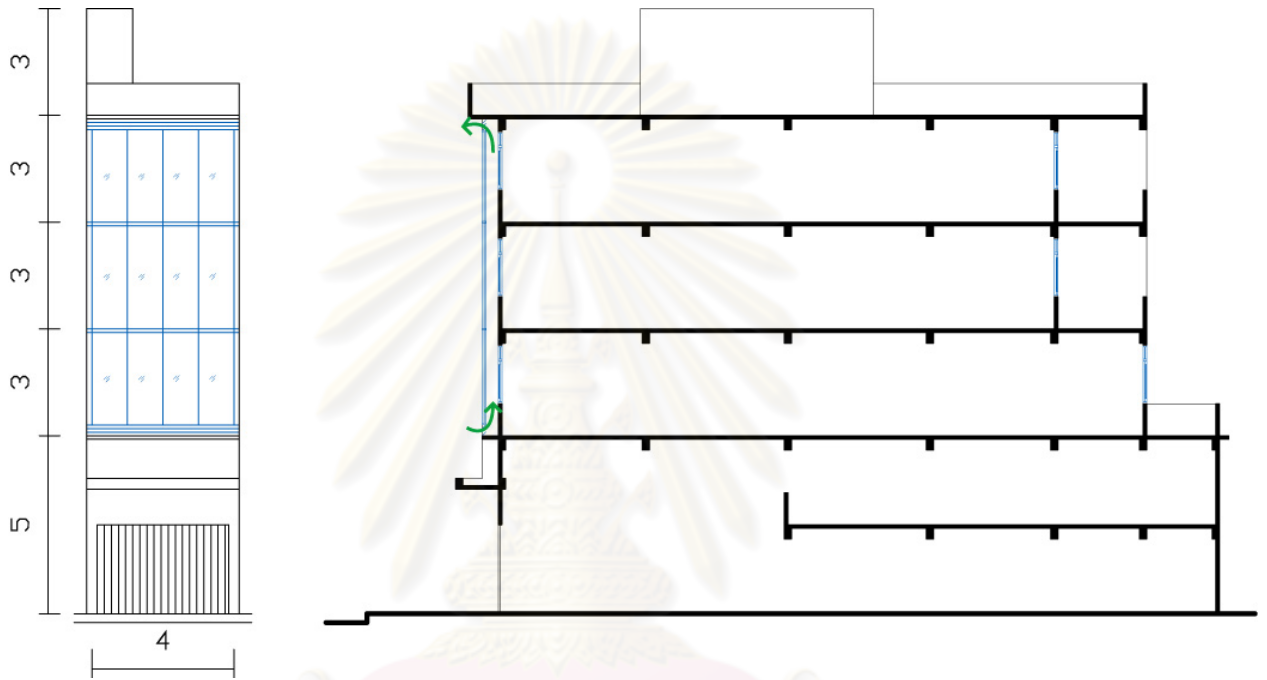
ในช่วงฤดูร้อนระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในมีภาระการทำความเย็นสูงสุด รองลงมาคือผนังอาคารเดิม ถัดมาคือคู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกใส, กระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส, กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส, กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส, และกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทใสตามลำดับ

ในช่วงฤดูหนาวภาระในการทำความเย็นจะเกิดขึ้นสูงกว่าในฤดูร้อน เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนเพราะอุณหภูมิภายนอกต่ำกว่าภายใน โดยที่ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในมีภาระการทำความเย็นสูงสุด รองลงมาคือคู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกใส ถัดมาคือผนังอาคารเดิม, กระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส, กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส, กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส, และกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทใสตามลำดับ

ในช่วงฤดูหมูปกติระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในมีภาระการทำความเย็นสูงสุด รองลงมาคือคู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกใส ถัดมาคือผนังอาคารเดิม, กระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส, กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส, กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส, และกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทใสตามลำดับ

## 2) ทางเลือกที่ 2 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบต่อเนื่องหลายชั้น

เป็นระบบผนังกระจกสองชั้นที่ความสูงเท่ากับอาคาร 3 ชั้น ซึ่งอาจจะเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแบบซาฟท์ มีความสูง 9 ม. ความกว้างของช่องอากาศ 30 ซม. โดยผนังนี้จะใช้ค่า U-factor ที่มีการคำนวณขึ้นมาใหม่ซึ่งมีการเปลี่ยนอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว มีอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (L/H) เท่ากับ 0.04 มีลักษณะเป็นดังนี้

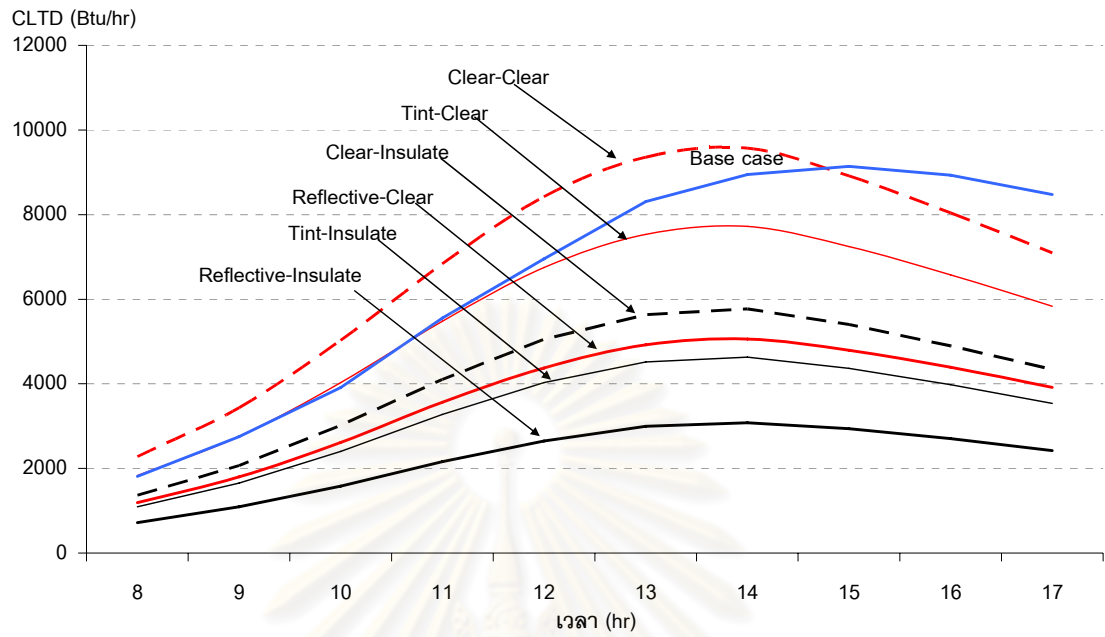


รูปที่ 4-22 รูปด้านหน้าและรูปตัดของทางเลือกที่ 2 ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบต่อเนื่องหลายชั้น

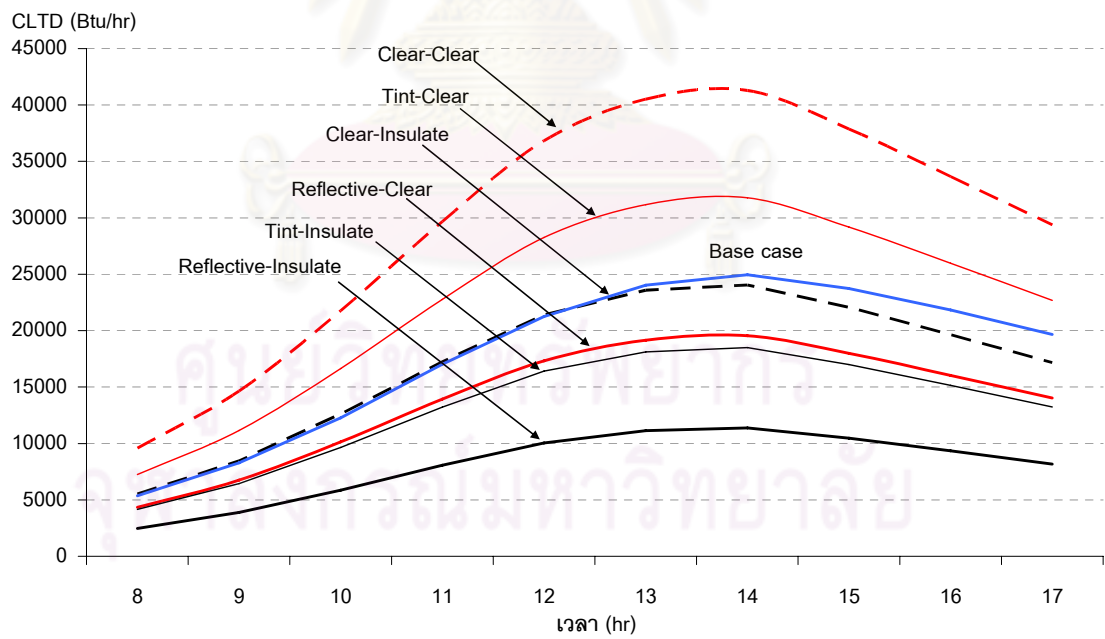
จากการคำนวณภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 เปรียบเทียบกับอาคารเดิมทั้ง 3 ช่วงเวลา มีผลเป็นดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

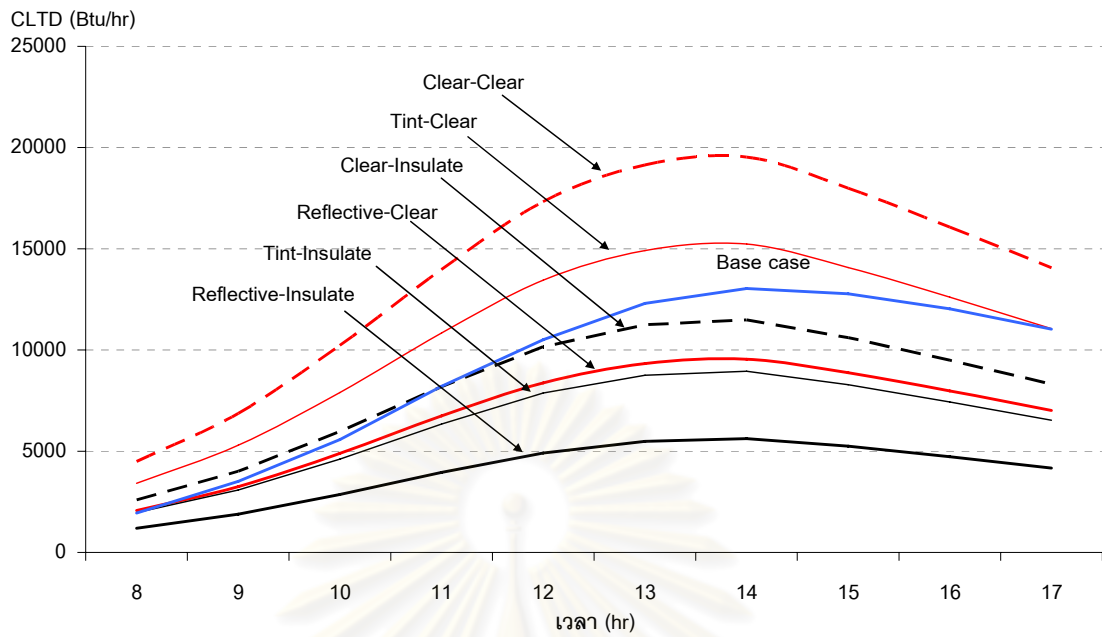




รูปที่ 4-23 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูร้อน



รูปที่ 4-24 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหนาว



รูปที่ 4-25 การเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมในช่วงฤดูหิมปกติ

จากการเปรียบเทียบภาระการทำความเย็นของทางเลือกที่ 2 กับอาคารเดิมทั้ง 3 ช่วงเวลา พบว่ามีค่าภาระการทำความเย็นมีลักษณะเหมือนกับทางเลือกที่ 1 เพียงแต่มีภาระการทำความเย็นที่ต่ำกว่าทางเลือกที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในช่องอากาศจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิผิวกระจกทั้งภายในและภายนอก โดยที่อุณหภูมิของผิวกระจกภายนอกที่เป็นกระจกสะท้อนแสงจะมีอุณหภูมิผิวกระจกสูงที่สุดและกระจกใสจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์ ( $\alpha$ ) ของกระจก แต่อุณหภูมิภายในช่องอากาศของกระจกสะท้อนแสงจะต่ำกว่ากระจกใสเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ ( $\tau$ ) ซึ่งความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศนี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเร็วลมและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) ซึ่งถ้ามีความต่างมากความเร็วลมและค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศก็จะมีค่ามากตาม

ส่วนกระจกชั้นในหากเป็นกระจกที่มีค่า  $\alpha$  สูงก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวกระจกสูง และความต่างอุณหภูมิก็นำผลกับความเร็วลมและค่า  $h_c$  เช่นกัน เพียงแต่มีผลน้อยกว่ากระจกภายนอกมาก เนื่องอิทธิพลจากรังสีที่ผ่านเข้ามาได้ถูกกรองโดยกระจกชั้นนอกจนมีปริมาณลดลง

ความต่างอุณหภูมิระหว่างกระจกชั้นในและชั้นนอก ( $T_1-T_4$ ) จะมีความสัมพันธ์กับค่า  $U$  และค่า  $SC$  ของกระจก ถ้าค่า  $U$  และค่า  $SC$  ของกระจกมีค่าน้อยความต่างของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นมาก

#### 5.2 ความเร็วลม

ความเร็วลมจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกสะท้อนแสง ส่วนกระจกใสและกระจกสีตัดแสงนั้นมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและอุณหภูมิพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความเร็วมคือความต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ ( $T_1-T_2$ ) ซึ่งถ้าความต่างอุณหภูมิมียิ่งมากความเร็วลมจะมากตาม

### 5.3 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h_c$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor)

จากรูปที่ 4-14 พบว่าค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศมีผลต่อค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นอย่างมาก สังเกตได้จากกระจกชั้นนอกที่เป็นกระจกใสซึ่งมี U สูงที่สุดในกระจกที่นำมาทดลอง แต่กลับมีค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นต่ำกว่ากระจกสีตัดแสงเนื่องจากค่า  $h_c$  ของกระจกใสที่มีค่าน้อยที่สุดในกระจกที่นำมาทดลอง เป็นผลให้ค่าความต้านทานความร้อนภายในช่องอากาศ ( $R_{cv}$ ) มีค่าสูงที่สุด จึงทำให้ค่า U-factor ของกระจกใสมีค่าน้อยกว่ากระจกสีตัดแสงเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้น

ซึ่งค่า  $h_c$  นั้นเกิดจากค่า Nu ซึ่งอาศัยความต่างของอุณหภูมิผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหล ถ้าความต่างของอุณหภูมิผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหลมีค่ามากค่า Nu จะมีค่าน้อยตามและส่งผลให้ค่า  $h_c$  มากไปด้วย

การป้องกันความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ภายในห้องด้วยการใช้กระจกอินซูลेटซึ่งมีค่า U ต่ำที่สุดเป็นกระจกชั้นใน จะทำให้ลดความแตกต่างของค่า U-factor ที่เกิดขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกันลงได้เป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการใช้กระจกใสธรรมดาเป็นกระจกชั้นในจะทำให้เกิดความแตกต่างของค่า U-factor มากขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกัน

### 5.4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC)

การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกนั้นจะประกอบด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสีประสิทธิภาพในการกันความร้อนของผนังกระจกจึงขึ้นอยู่กับค่า U-factor ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกันความร้อนจากการนำความร้อน และค่า SC ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกันรังสีอาทิตย์ โดยค่า U-factor เกิดขึ้นจากค่า U ของกระจกกับค่า  $h_c$  ภายในช่องอากาศ ส่วนค่า SC นั้นเกิดจากค่า SC ของกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นใน

ค่า U-factor กับค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นนั้นไม่ได้แปรผันตามกัน (รูปที่ 4-15) เนื่องจากค่า  $h_c$  มีผลต่อค่า U-factor

## 5.5 ความน่าเชื่อถือของค่า U-factor

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผนังกระจกสองชั้น งานวิจัยแต่ละงานจะมีรูปแบบของผนังที่แตกต่างกันออกไป เช่น ขนาดของช่องอากาศ ชนิดกระจก รูปแบบของการระบายอากาศภายในช่องอากาศ รวมไปถึงรูปแบบการทดลองที่แตกต่างกัน เหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้ผลการวิจัยแตกต่างกันออกไปทั้งสิ้น การนำค่า U-factor ที่ได้จากการวิจัยนี้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อตรวจสอบค่าที่ได้ว่ามีความใกล้เคียงและน่าเชื่อถือเพียงใด จึงเป็นวิธีหนึ่งที่จะทำให้เกิดความน่าเชื่อถือในงานวิจัยครั้งนี้

Researcher	Methodology	Location	DSF ventilation type	Cavity width (cm)	Outer glass	Inner glass	U-factor (W/m <sup>2</sup> .K)
<b>Blomsterberg A.</b>	Computer simulation	Nordic	Mechanically ventilated	80	Clear 8mm	Insulated low-E (4+12A+4)	0.910
This Research	Measurement	Thailand	Naturally ventilated	30	Laminated clear 8.38mm	Insulated low-E (4+16A+4)	0.933
<b>Blomsterberg A.</b>	Computer simulation	Nordic	Mechanically ventilated	80	Tinted 8mm	Insulated low-E (4+12A+4)	0.930
This Research	Measurement	Thailand	Naturally ventilated	30	Laminated tinted 9.38mm	Insulated low-E (4+16A+4)	0.948
<b>Yellamraju V.</b>	Computer simulation	India	Naturally ventilated	60	Tinted 6mm	Clear 6mm	1.243
This Research	Measurement	Thailand	Naturally ventilated	30	Laminated tinted 9.38mm	Clear 6mm	1.464

ตารางที่ 5-1 การเปรียบเทียบค่า U-factor ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

จากการเปรียบเทียบค่า U-factor ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องพบว่าค่า U-factor ที่ได้มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากปัจจัยหนึ่งที่มีความใกล้เคียงกันคือ ค่า U ของกระจกชั้นในและชั้นนอกซึ่งกระจกที่นำมาเปรียบเทียบกันเป็นกระจกชนิดเดียวกัน เพียงแต่มีความหนาต่างกันเล็กน้อย แต่สิ่งที่ต่างกันนั่นก็คือ ความกว้างของช่องอากาศซึ่งมีผลต่อค่า  $R_{cv}$  ซึ่งมีผลต่อค่า  $h_c$  ทำให้มีค่า U-factor มีค่าแตกต่างกันออกไป โดยเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วค่า U-factor ของงานวิจัยนี้มีความแตกต่างประมาณ 1.9-15.1% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Blomsterberg (2007) ที่มีความหนาและชนิดของกระจกใกล้เคียงกัน มีกระจกอินซูลเลทสี่เป็นกระจกชั้นในจะมีความแตกต่างเพียง 1.9-2.4% แม้ว่าวิธีการวิจัย ความกว้างช่องอากาศและภูมิภาคต่างกัน ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yellamraju (2004) ซึ่งมีความหนา

ของกระจกภายนอกต่างกันและกระจกภายในเป็นกระจกใสจะมีความแตกต่างกันมากกว่า แม้ว่าสภาพภูมิอากาศที่นำความวิเคราะห์นั้นมีความใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่าง 15.1%

จะเห็นได้ว่าค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกอินซูลเททหรือกระจกที่มีค่า U ต่ำจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่ากระจกใสหรือกระจกที่มีค่า U สูง

## 5.6 ภาวะการทำความเย็น

ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและมีกระจกอินซูลเททใสเป็นกระจกชั้นในมีภาวะการทำความเย็นน้อยที่สุด และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นนอกและชั้นในมีภาวะการทำความเย็นมากที่สุด โดยที่ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีภาวะการทำความเย็นต่ำกว่าอาคารเดิมมี 4 คู่คือ คู่ของกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลเททใส กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลเททใส กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส และกระจกใสกับกระจกอินซูลเททใส ส่วนคู่ของกระจกใสกับกระจกใส และกระจกสีตัดแสงกับกระจกใสมีภาวะการทำความเย็นที่สูงกว่าอาคารเดิม ยกเว้นช่วงฤดูร้อนจะมีภาวะการทำความเย็นใกล้เคียงกับอาคารเดิม



รูปที่ 5-1 ภาวะการทำความเย็นของผนังแต่ละรูปแบบทั้งทางเลือกที่ 1 และทางเลือกที่ 2 เปรียบเทียบกับอาคารเดิม ในช่วงฤดูหนาวมีปกติ

4. เมื่อเปรียบเทียบภาวะการทำความเย็นของผนังแต่ละรูปแบบทั้งทางเลือกที่ 1 คือระบบผนังกระจกสองชั้นแบบชั้นเดียว และทางเลือกที่ 2 คือระบบผนังกระจกสองชั้น

แบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับอาคารเดิมพบว่า ทั้งทางเลือกที่ 1 และทางเลือกที่ 2 มีประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นได้ไม่ต่างกันมาก โดยระบบผนังกระจกสองชั้นแบบต่อเนื่องมีภาระการทำความเย็นน้อยกว่าแบบชั้นเดียวอยู่ 1.03-2.01% ขึ้นอยู่กับชนิดกระจกที่นำมาประกอบ

ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและมีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในสามารถลดภาระการทำความเย็นได้ 23.61% เมื่อเทียบกับผนังอาคารเดิม คู่ของกระจกใสกับกระจกอินซูลเลทใสสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 8.81% คู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลเลทใสสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 28.89% และคู่ของกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลเลทใสสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 55.22%



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

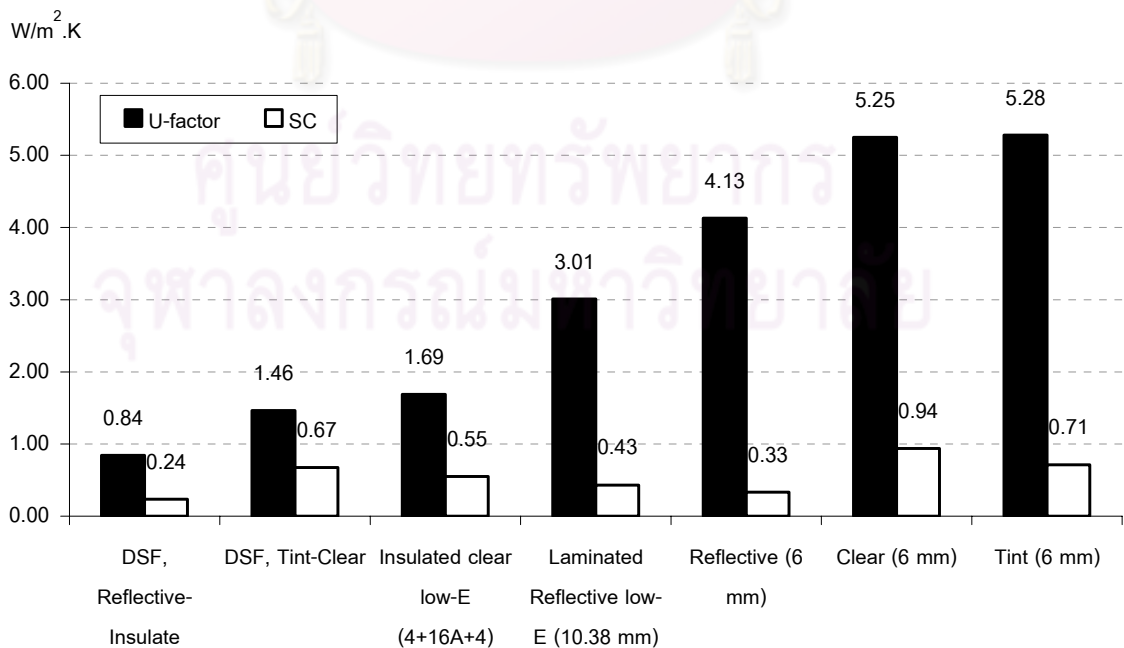
### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

1. ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกมีค่า U-factor น้อยที่สุด รองลงมาคือกระจกใส และกระจกสีตัดแสงมีค่า U-factor มากที่สุด

2. ค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาเททใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยที่สุดคือ  $0.843 \text{ W/m}^2.K$  และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor มากที่สุดคือ  $1.464 \text{ W/m}^2.K$

3. เมื่อเปรียบเทียบระบบผนังกระจกสองชั้นมีค่า U-factor มากที่สุดและน้อยที่สุดกับระบบผนังกระจกชั้นเดียว (Single skin facade) ที่มีค่า U-factor ประมาณ  $3 \text{ W/m}^2.K$  พบว่าระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาเททใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียวอยู่ 71.90% และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียวอยู่ 51.19%



รูปที่ 6-1 การเปรียบเทียบค่า U-factor และค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นกับระบบผนังกระจกชั้นเดียวชนิดต่างๆ



5. จากการเปรียบเทียบค่า U-factor และค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นกับระบบผนังกระจกชั้นเดียวชนิดต่างๆ พบว่าค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นมีค่าน้อยกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียวอยู่มาก แต่ค่า SC มีค่าไม่แตกต่างจากระบบผนังกระจกชั้นเดียวมากนัก เนื่องจากค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นขึ้นอยู่กับค่า SC ของกระจกที่นำมาประกอบเป็นผนัง

6. ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกชั้นนอกและชั้นในเป็นกระจกใสจะลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ภายนอกเข้าสู่ภายในห้องได้น้อยที่สุด เนื่องจากมีค่า U-factor และค่า SC มากที่สุด และผนังที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลेटเป็นกระจกชั้นในจะสามารถลดความร้อนเข้าสู่ภายในห้องได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า U-factor และค่า SC น้อยที่สุด

7. ในการปรับปรุงผนังอาคารพาณิชย์พบว่าระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและมีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในสามารถลดภาระการทำความเย็นได้ 23.61% เมื่อเทียบกับผนังอาคารเดิม คู่ของกระจกใสกับกระจกอินซูลेटสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 8.81% คู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลेटสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 28.89% และคู่ของกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลेटสามารถลดภาระในการทำความเย็นได้ 55.22%

8. ระบบผนังกระจกสองชั้นแบบชั้นเดียวกับแบบต่อเนื่องหลายชั้นมีประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นได้ไม่ต่างกันมาก โดยระบบผนังกระจกสองชั้นแบบต่อเนื่องมีภาระการทำความเย็นน้อยกว่าแบบชั้นเดียวอยู่ 1.03-2.01% ขึ้นอยู่กับชนิดกระจกที่นำมาประกอบ

9. ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของช่องอากาศ (L/H) มีค่าแปรผันตามกับค่า U-factor

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความเย็นมี 4 คู่คือ คู่ของกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลेट กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลेट กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส และกระจกใสกับกระจกอินซูลेट

2. การใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกในระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้นแล้วจะมีค่า U-factor และ ค่า SC ที่น้อยที่สุด

3. ในระบบผนังกระจกสองชั้นค่า SC จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกันความร้อนมากกว่าค่า U-factor เนื่องจากค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่ากระจกภายนอกจะต่างชนิดกัน

4. ค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่เกิดจากกระจกชั้นนอกต่างชนิดกันจะมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อค่า U ของกระจกชั้นในมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าหากกระจกชั้นในมีค่า U ที่ต่ำอยู่แล้วก็ควรเลือกกระจกชั้นนอกที่มีค่า SC ต่ำที่สุดมาประกอบเป็นผนังกระจกชั้นนอก แต่ถ้ากระจกชั้นในมีค่า U ที่สูงอย่างเช่นกระจกใส ก็ควรพิจารณาค่า U และค่า SC ของกระจกที่จะนำมาใช้เป็นกระจกชั้นนอกควบคู่กันไป

5. การนำค่า U-factor จากการทดลองนี้ไปใช้กับระบบผนังอาคารสองชั้นที่มีความสูงแตกต่างกันออกไป จำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณค่า  $h_c$  ใหม่เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ค่า  $h_c$  จากกล่องทดลองที่มีความสูงเท่ากับอาคารชั้นเดียว และค่า U และค่า SC ของกระจกที่ใช้ในการลองเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของโรงงานกระจก ซึ่งแต่ละโรงงานจะมีค่าประสิทธิภาพของกระจกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด

6. สำหรับงานวิจัยต่อเนื่องในอนาคตควรจะมีการนำค่า U-factor และ SC ที่ได้ไปจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานกับผนังรูปแบบอื่นๆ พร้อมทั้งหากการใช้ไฟฟ้ารายปีเพื่อคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป และการศึกษาเกี่ยวกับแผงกันแดดภายในช่องอากาศเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปี แผงกันแดดจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการลดความร้อนที่จะเข้าสู่ตัวอาคาร

7. การคำนวณประสิทธิภาพในการลดภาระการทำความร้อนของระบบผนังกระจกสองชั้นในงานวิจัยนี้ ทำการคำนวณเฉพาะในช่วงเวลากลางวันที่มีอิทธิพลของรังสีอาทิตย์กระทำต่อผนัง ซึ่งไม่ครอบคลุมในช่วงเวลากลางคืนเนื่องจากยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการคำนวณหาค่า U-factor ที่เหมาะสมที่จะใช้ในช่วงเวลากลางคืนได้

8. การทดลองนี้เป็นการทดลองในห้องปิดซึ่งมีการควบคุมตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วลมที่เกิดขึ้นในช่องอากาศเพื่อศึกษาความเร็วลมซึ่งเกิดขึ้นจากแรงลอยตัวตามธรรมชาติ แต่ในการใช้งานจริงเมื่อติดตั้งระบบผนังนี้กับอาคารอิทธิพลของแรงลมภายนอกเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นหากมีการวิจัยต่อเนื่องในอนาคตควรจะมีการศึกษาถึงแรงลมภายนอกที่กระทำต่อผนังระบบนี้ต่อไป

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

จารุณี เข้มพิลา. การจำลองการไหลของอากาศภายในอาคารผนังสองชั้น. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.

จิฐิพร วงศ์วัชรไพบูลย์. ประสิทธิภาพการระบายอากาศของปล่องแสงอาทิตย์. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

ตริงใจ บุรณสมภพ. การออกแบบสถาปัตยกรรมเมืองร้อนในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: นำอักษรการพิมพ์, 2521.

ตริงใจ บุรณสมภพ. การออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน. จำนวน 10,000 เล่ม. กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง, 2539.

เทพพิทักษ์ วะสุรีย์. คุณสมบัติและการประยุกต์ใช้ของระบบผนังกระจกสองชั้นในสภาวะอากาศแบบร้อนชื้น. กรุงเทพมหานคร: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552

ธนิต จินดาวณิก. เอกสารประกอบการสอนวิชา Energy conservation in building design. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรพนชลัท สุริโยธิน. วัสดุและการก่อสร้างกระจก. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

รัฐศักดิ์ พรหมมาศ. การลดภาระการทำความเย็นของปล่องระบายอากาศแสงอาทิตย์ด้วยวิธีการคำนวณ OTTV. กระจับปี่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, 2542.

สมสิทธิ์ นิตยะ. การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น Tropical design environment. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

อรรจน์ เศรษฐบุต. เอกสารประกอบการสอนเรื่อง Transient thermal analysis. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## ภาษาอังกฤษ

- ASHRAE. 1997 ASHRAE - Handbook - Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, 1997.
- Ballestini, G., De Carli, M., Masiero, N., and Tombola, G. Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double skin facade in Mediterranean climates. Padova: Universita degli studi di Paova, 2004.
- Boake, M. The tectonics of the double skin: What are double façades and how do they work?. Waterloo: University of Waterloo.
- Blomsterberg, A. Best facade: best practice for double skin facades. Lund: University of Lund, 2007.
- Dickson, A. Modelling double skin facades. Glasgow: University of Strathclyde, 2004.
- Eicker, U., et al. Facades and summer performance of buildings. Stuttgart: University of applied sciences Stuttgart, 2007.
- Gratia, E. and De Herde, A. Guidelines for improving natural ventilation in an office building with double-skin facade. Luavain-La-Neuve: Universite catholique de Louvain, 2006.
- Haase, M., Marques da Silva, F. and Amanto, A. Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. Norway: Energy and building, 2009.
- Hamza, N. Double versus single skin facades in hot arid areas. Northumbria: Northumbria university, 2006.
- Hensen, J. Bartak, M. and Drkal, F. Modeling and simulation of a double-skin facade system. USA: ASHRAE, 2002.
- Incropera, F. and DeWitt, D. Fundamentals of heat and mass transfer. Canada: John Wiley and sons, 1981.

- Koinakis, C. and Sakellaris, J. Office building facades and energy performance in urban environment in Greece. Crete island: PALENC Conference, 2007.
- Park, C., et al. Real-time optimization of double skin facade based on lumped modeling and occupant preference. USA: Energy and building, 2004.
- Poirazis, H. Double skin facades for office buildings. Lund: Lund university, 2004.
- Saelens, D. Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades. Leuven: K. U. Leuven, 2002.
- Saelens, D., Roels, S. and Hens H. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. Leuven: K. U. Leuven, 2006.
- Xu, X. and Yang, Z. Natural ventilation in double skin facade with Venetian blind. China: Energy and building, 2008.
- Xu, L. and Ojima, T. Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin facade system. Tokyo: Energy and building, 2005.
- Yellamraju, V. Evaluation and design of double skin facades for office building in hot climates. Texas: A&M University, 2004.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

#### รายการสัญลักษณ์

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์, ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอุณหภูมิ (Thermal diffusivity) ( $m^2/s$ )

$\tau$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์

$\rho$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์

$\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายอุณหภูมิของปริมาตร (The coefficient of volumetric thermal expansion) ( $K^{-1}$ )

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann ( $W/(m^2 \cdot K^4)$ )

$\varepsilon$  คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ (Emissivity)

$l$  คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)

$\nu$  คือ ค่าความหนืด ( $m^2/s$ )

$d$  คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้น (m)

$g$  คือ ค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )

$h$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

$h_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

$h_e$  และ  $h_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกและภายใน ( $W/(m^2 \cdot K)$ )

$k$  คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ ( $W/(m \cdot K)$ )

$k_f$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ( $W/(m \cdot K)$ )

$q''$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำต่อหน่วยพื้นที่ ( $W/m^2$ )

$Gr$  คือ ค่ากราชอฟนัมเบอร์

$Nu$  คือ ค่านัสเซลท์นัมเบอร์

$Ra$  คือ ค่าเรย์น็ลด์นัมเบอร์

$Re$  คือ ค่าเรย์น็ลด์นัมเบอร์

$H$  คือ ความสูงของช่องอากาศ (m)

$H_g$  คือ ความสูงของกระจก (m)

$I_t$  คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผิววัตถุ ( $W/m^2$ )

$L$  คือ ความกว้างของช่องอากาศ (m)

$Q_s$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ( $W/m^2$ )

$Q_{dsf}$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ( $W/m^2$ )

$Q_{cd}$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน ( $W/m^2$ )

$Q_{cv}$  คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ( $W/m^2$ )

$R_e$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_{g1}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกชั้นนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_{cv}$  คือ ค่าความต้านทานภายในช่องอากาศ ( $m^2.K/W$ )

$R_{g2}$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของกระจกชั้นนอก ( $m^2.K/W$ )

$R_i$  คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายใน ( $m^2.K/W$ )

$SC_{g1}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นนอก

$SC_{g2}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นใน

$T_1-T_2$  คือ ความต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดทั้งสอง (K)

$T_s-T_\infty$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับอากาศ (K)

$T_{dg}$  คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจก (K)

$T_i$  คือ อุณหภูมิภายในห้อง ( $^{\circ}C$ )

$T_{ri}$  คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยทุกผนังภายในห้อง ( $^{\circ}C$ )

$U$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2.K$ )

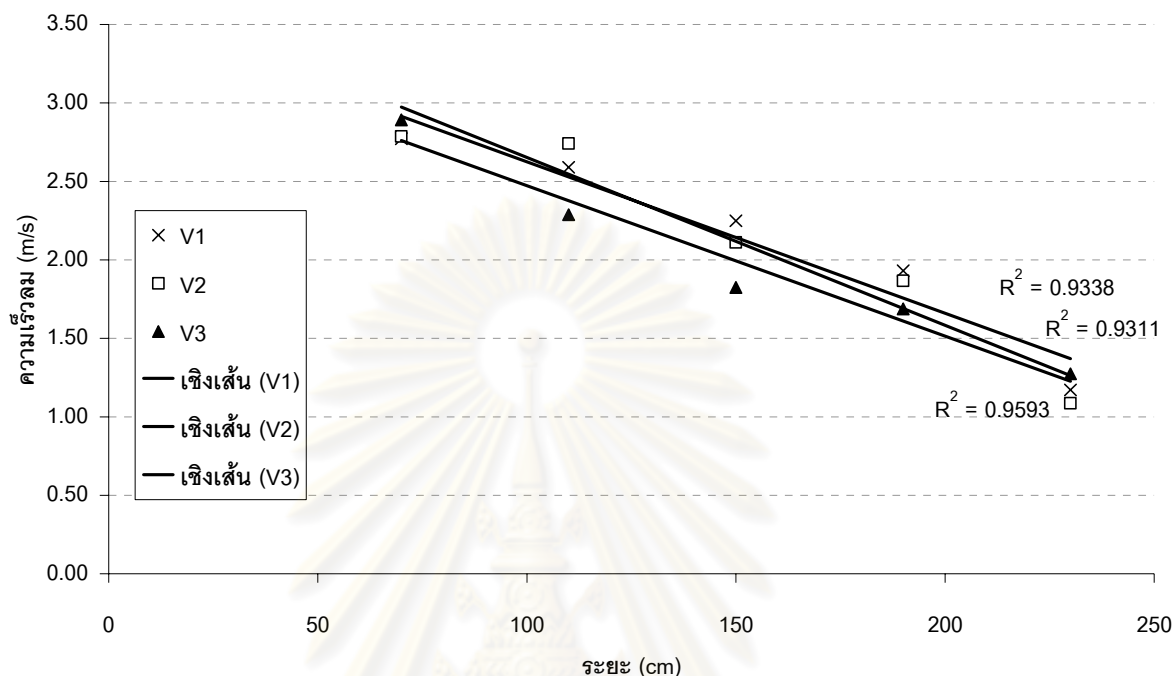
$U_{dsf}$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบผนังกระจกสองชั้น ( $W/m^2.K$ )

$U_\infty$  คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วลมของช่องไหล (m/s)



## ภาคผนวก ข

## การตรวจสอบเครื่องมือวัดความเร็วลม



จากการนำเครื่องวัดลมทั้งสามเครื่องไปตรวจสอบโดยการวัดค่าจากพัดลมในระยะที่ต่างกันผลปรากฏว่า ค่า  $R^2$  ของเครื่องหลายเลข 3 มีค่ามากที่สุดจึงใช้เป็นเครื่องหลักในการปรับแก้ สมการในการปรับแก้เครื่องวัดลมหมายเลข 1 และหมายเลข 2 เป็นดังนี้

## Average minimum

V1	V2	V3
1.17	1.09	1.27
0.10	0.19	0.00

## ปรับแก้ V1

$$y = 0.9038x + 0.0568$$

## ปรับแก้ V2

$$y = 0.8173x + 0.2618$$

1.00	1.15	1.27
0.27	0.12	0.00

## ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ไร้มิติโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor)

การหาค่า  $Ra_L$

$Ra_L, 250 \text{ W/m}^2$	$\beta$ ( $K^{-1}$ )	$g$ ( $m/s^2$ )	$L$ (m)	$T_s$ (K)	$T_\infty$ (K)	$T_f$ (K)	$\nu$ ( $m^2/s$ )	$\alpha$ ( $m^2/s$ )	$Ra_L$	$Ra_L(L/H)$	$Ra_L^{-1}$
<b>Clear-Clear</b>	0.003174	9.81	0.3	317.36	312.68	315.02	0.00001740	0.00002472	<b>9132718.659</b>	1369908	0.00000011
<b>Tint-Clear</b>	0.003184	9.81	0.3	318.49	309.56	314.03	0.00001730	0.00002458	<b>17720961.02</b>	2658144	0.00000006
<b>Reflective-Clear</b>	0.003166	9.81	0.3	321.79	309.93	315.86	0.00001749	0.00002485	<b>22891456.41</b>	3433718	0.00000004
<b>Clear-Insulate</b>	0.003146	9.81	0.3	322.15	313.66	317.91	0.00001769	0.00002515	<b>15888883.64</b>	2383333	0.00000006
<b>Tint-Insulate</b>	0.003161	9.81	0.3	321.33	311.47	316.40	0.00001754	0.00002493	<b>18875979.92</b>	2831397	0.00000005
<b>Reflective-Insulate</b>	0.003175	9.81	0.3	321.04	308.80	314.92	0.00001739	0.00002471	<b>23968878.61</b>	3595332	0.00000004

เป็นแบบแผนโดดเดี่ยว

การหาค่า  $Nu_L$

$Nu_L, \text{Bar-Cohen}$	$Nu_L$
<b>Clear-Clear</b>	<b>20.194</b>
<b>Tint-Clear</b>	<b>23.834</b>
<b>Reflective-Clear</b>	<b>25.410</b>
<b>Clear-Insulate</b>	<b>23.193</b>
<b>Tint-Insulate</b>	<b>24.214</b>
<b>Reflective-Insulate</b>	<b>25.704</b>

การหาค่า  $Gr_H$

$Gr_H, 250 \text{ W/m}^2$	$\beta$ ( $K^{-1}$ )	$g$ ( $m/s^2$ )	$H$ (m)	$T_s$ (K)	$T_\infty$ (K)	$T_f$ (K)	$\nu$ ( $m^2/s$ )	$Gr_H$
<b>Clear-Clear</b>	0.003174	9.81	2	317.36	312.68	315.02	0.00001740	<b>3844610351</b>
<b>Tint-Clear</b>	0.003184	9.81	2	318.49	309.56	314.03	0.00001730	<b>7458481301</b>
<b>Reflective-Clear</b>	0.003166	9.81	2	321.79	309.93	315.86	0.00001749	<b>9638296308</b>
<b>Clear-Insulate</b>	0.003146	9.81	2	322.15	313.66	317.91	0.00001769	<b>6692652415</b>
<b>Tint-Insulate</b>	0.003161	9.81	2	321.33	311.47	316.40	0.00001754	<b>7948471961</b>
<b>Reflective-Insulate</b>	0.003175	9.81	2	321.04	308.80	314.92	0.00001739	<b>10089991296</b>

การหาค่า  $Re_H$

$Re_H, 250 \text{ W/m}^2$	$U_\infty$ (m/s)	$H$ (m)	$\nu$ ( $m^2/s$ )	$Re_H$	$Re_H^2$
<b>Clear-Clear</b>	0.151	2	0.00001740	<b>17357.847</b>	301294837.411
<b>Tint-Clear</b>	0.153	2	0.00001730	<b>17635.047</b>	310994867.796
<b>Reflective-Clear</b>	0.170	2	0.00001749	<b>19434.847</b>	377713297.195
<b>Clear-Insulate</b>	0.166	2	0.00001769	<b>18761.565</b>	351996327.433
<b>Tint-Insulate</b>	0.154	2	0.00001754	<b>17517.211</b>	306852664.734
<b>Reflective-Insulate</b>	0.198	2	0.00001739	<b>22804.293</b>	520035786.252

เป็นการพาโดยธรรมชาติ

การหาค่า  $Ra_H$ 

$Ra_H, 250 \text{ W/m}^2$	$\beta$ ( $K^{-1}$ )	$g$ ( $m/s^2$ )	$H$ (m)	$T_s$ (K)	$T_\infty$ (K)	$T_f$ (K)	$\nu$ ( $m^2/s$ )	$\alpha$ ( $m^2/s$ )	$Ra_H$	$Ra_H^{-0.25}$
Clear-Clear	0.003174	9.81	2	317.36	312.68	315.02	0.00001740	0.00002472	<b>2705990714</b>	0.004384
Tint-Clear	0.003184	9.81	2	318.49	309.56	314.03	0.00001730	0.00002458	<b>5250655118</b>	0.003715
Reflective-Clear	0.003166	9.81	2	321.79	309.93	315.86	0.00001749	0.00002485	<b>6782653750</b>	0.003485
Clear-Insulate	0.003146	9.81	2	322.15	313.66	317.91	0.00001769	0.00002515	<b>4707817376</b>	0.003818
Tint-Insulate	0.003161	9.81	2	321.33	311.47	316.40	0.00001754	0.00002493	<b>5592882939</b>	0.003657
Reflective-Insulate	0.003175	9.81	2	321.04	308.80	314.92	0.00001739	0.00002471	<b>7101889958</b>	0.003445

เป็นแบบของกว้าง

การหาค่า  $Nu_H$ 

$Nu_H, \text{Churchill}$	$Nu_H$
Clear-Clear	<b>167.888</b>
Tint-Clear	<b>206.622</b>
Reflective-Clear	<b>223.952</b>
Clear-Insulate	<b>199.661</b>
Tint-Insulate	<b>210.764</b>
Reflective-Insulate	<b>227.220</b>

การไหลเป็น  
แบบสม่ำเสมอ  
และปั่นป่วนการหาค่า  $h_c$ 

$h_c$	$Nu_L$	$Nu_H$	$L$ (m)	$H$ (m)	$k_f$ (W/m.K)	$h_c (Nu_L)$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$h_c (Nu_H)$ (W/m <sup>2</sup> .K)
Clear-Clear	20.194	167.888	0.3	2	0.0274115	<b>1.8452024</b>	<b>2.301</b>
Tint-Clear	23.834	206.622	0.3	2	0.0273379	<b>2.1719405</b>	<b>2.824</b>
Reflective-Clear	25.410	223.952	0.3	2	0.0274738	<b>2.3270095</b>	<b>3.076</b>
Clear-Insulate	23.193	199.661	0.3	2	0.027625	<b>2.1356818</b>	<b>2.758</b>
Tint-Insulate	24.214	210.764	0.3	2	0.0275136	<b>2.2206802</b>	<b>2.899</b>
Reflective-Insulate	25.704	227.220	0.3	2	0.0274039	<b>2.3479302</b>	<b>3.113</b>

## การหาค่า U-factor

$U_{dsf}, h_c (Nu_L)$	$R_e$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{g1}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{cv}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{g2}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_i$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$U_{dsf}$ (W/m <sup>2</sup> .K)
Clear-Clear	0.044	0.031	0.542	0.027	0.120	<b>1.310</b>
Tint-Clear	0.044	0.032	0.460	0.027	0.120	<b>1.464</b>
Reflective-Clear	0.044	0.169	0.430	0.027	0.120	<b>1.268</b>
Clear-Insulate	0.044	0.012	0.468	0.428	0.120	<b>0.933</b>
Tint-Insulate	0.044	0.013	0.450	0.428	0.120	<b>0.948</b>
Reflective-Insulate	0.044	0.169	0.426	0.428	0.120	<b>0.843</b>
$U_{dsf}, h_c (Nu_H)$	$R_e$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{g1}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{cv}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_{g2}$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$R_i$ (m <sup>2</sup> .K/W)	$U_{dsf}$ (W/m <sup>2</sup> .K)
Clear-Clear	0.044	0.031	0.435	0.027	0.120	<b>1.525</b>
Tint-Clear	0.044	0.032	0.354	0.027	0.120	<b>1.734</b>
Reflective-Clear	0.044	0.169	0.325	0.027	0.120	<b>1.462</b>
Clear-Insulate	0.044	0.012	0.363	0.428	0.120	<b>1.035</b>
Tint-Insulate	0.044	0.013	0.345	0.428	0.120	<b>1.053</b>
Reflective-Insulate	0.044	0.169	0.321	0.428	0.120	<b>0.925</b>

### การคำนวณภาระการทำความเย็น (CLTD)

การคำนวณภาระการทำความเย็นของระบบผนังกระจกสองชั้นในการวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงฤดูร้อน ช่วงฤดูหนาว และช่วงอุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Clear-Clear Glass conduction hr	CLTD (°F) °C	T <sub>R</sub> °F °C	20-Apr		CLTD <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>		Q <sub>ed</sub> Btu/hr	SC	Medium weight		Area m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr
			°F	°C		T <sub>o</sub> °F	°F	°C	CLF			SHGF				
8	0	25 77	30 85	87.53	3.529	1.310	0.925	5.250	315.53	0.88	42.5	0.14	36 387.50	2037	2352.55	
9	2	25 77	30 85	87.53	5.529	1.310	0.925	5.250	494.33	0.88	42.5	0.21	36 387.50	3056	3549.87	
10	4	25 77	30 85	87.53	7.529	1.310	0.925	5.250	673.13	0.88	42.5	0.31	36 387.50	4511	5183.68	
11	7	25 77	30 85	87.53	10.529	1.310	0.925	5.250	941.33	0.88	42.5	0.42	36 387.50	6111	7052.40	
12	9	25 77	30 85	87.53	12.529	1.310	0.925	5.250	1120.13	0.88	42.5	0.52	36 387.50	7566	8686.22	
13	12	25 77	30 85	87.53	15.529	1.310	0.925	5.250	1388.34	0.88	42.5	0.57	36 387.50	8294	9681.93	
14	13	25 77	30 85	87.53	16.529	1.310	0.925	5.250	1477.74	0.88	42.5	0.58	36 387.50	8439	9916.83	
15	14	25 77	30 85	87.53	17.529	1.310	0.925	5.250	1567.14	0.88	42.5	0.53	36 387.50	7712	9278.73	
16	14	25 77	30 85	87.53	17.529	1.310	0.925	5.250	1567.14	0.88	42.5	0.47	36 387.50	6839	8405.72	
17	13	25 77	30 85	87.53	16.529	1.310	0.925	5.250	1477.74	0.88	42.5	0.41	36 387.50	5966	7443.31	
<b>Clear-Insulate</b>																
Glass conduction		T <sub>R</sub> °F °C	T <sub>o</sub> °F	CLTD <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	Q <sub>ed</sub> Btu/hr	SC	SHGF	CLF	Area m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr			
8	0	25 77	30 85	87.53	3.529	0.933	0.298	1.690	224.73	0.51	42.5	0.14	36 387.50	1179	1404.06	
9	2	25 77	30 85	87.53	5.529	0.933	0.298	1.690	352.07	0.51	42.5	0.21	36 387.50	1769	2121.07	
10	4	25 77	30 85	87.53	7.529	0.933	0.298	1.690	479.42	0.51	42.5	0.31	36 387.50	2611	3090.79	
11	7	25 77	30 85	87.53	10.529	0.933	0.298	1.690	670.44	0.51	42.5	0.42	36 387.50	3538	4208.43	
12	9	25 77	30 85	87.53	12.529	0.933	0.298	1.690	797.78	0.51	42.5	0.52	36 387.50	4380	5178.15	
13	12	25 77	30 85	87.53	15.529	0.933	0.298	1.690	988.80	0.51	42.5	0.57	36 387.50	4802	5790.36	
14	13	25 77	30 85	87.53	16.529	0.933	0.298	1.690	1052.48	0.51	42.5	0.58	36 387.50	4886	5938.27	
15	14	25 77	30 85	87.53	17.529	0.933	0.298	1.690	1116.15	0.51	42.5	0.53	36 387.50	4465	5580.75	
16	14	25 77	30 85	87.53	17.529	0.933	0.298	1.690	1116.15	0.51	42.5	0.47	36 387.50	3959	5075.33	
17	13	25 77	30 85	87.53	16.529	0.933	0.298	1.690	1052.48	0.51	42.5	0.41	36 387.50	3454	4506.23	
<b>4289.34</b>																

ช่วงฤดูร้อน

Tint-Clear		Glass conduction hr	CLTD (°F)	°C	T <sub>R</sub> °F	°C	T <sub>O</sub> °F	°C	CLTD <sub>C</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.	U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	Q <sub>ed</sub> Btu/hr	SC	SHGF	CLF	Area m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr
Glass conduction hr																		
8	0	25	77	30.85	87.53	3.529	1.464	0.258	5.250	0.925	352.67	0.67	42.5	0.14	36	387.50	1555.15	1907.82
9	2	25	77	30.85	87.53	5.529	1.464	0.258	5.250	0.925	552.52	0.67	42.5	0.21	36	387.50	2332.72	2885.24
10	4	25	77	30.85	87.53	7.529	1.464	0.258	5.250	0.925	752.37	0.67	42.5	0.31	36	387.50	3443.54	4195.91
11	7	25	77	30.85	87.53	10.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1052.14	0.67	42.5	0.42	36	387.50	4665.44	5717.58
12	9	25	77	30.85	87.53	12.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1251.99	0.67	42.5	0.52	36	387.50	5776.26	7028.25
13	12	25	77	30.85	87.53	15.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1551.76	0.67	42.5	0.57	36	387.50	6331.67	7883.43
14	13	25	77	30.85	87.53	16.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1651.68	0.67	42.5	0.58	36	387.50	6442.75	8094.43
15	14	25	77	30.85	87.53	17.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1751.61	0.67	42.5	0.53	36	387.50	5887.34	7638.95
16	14	25	77	30.85	87.53	17.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1751.61	0.67	42.5	0.47	36	387.50	5220.85	6972.46
17	13	25	77	30.85	87.53	16.529	1.464	0.258	5.250	0.925	1651.68	0.67	42.5	0.41	36	387.50	4554.36	6206.04
Tint-Insulate																		<b>5853.01</b>
Glass conduction hr		CLTD (°F)	°C	T <sub>R</sub> °F	°C	T <sub>O</sub> °F	°C	CLTD <sub>C</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.	U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> ) (W/m <sup>2</sup> .K) Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>	Q <sub>ed</sub> Btu/hr	SC	SHGF	CLF	Area m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr	
8	0	25	77	30.85	87.53	3.529	0.948	0.167	1.690	0.298	228.21	0.39	42.5	0.14	36	387.50	900.35	1128.56
9	2	25	77	30.85	87.53	5.529	0.948	0.167	1.690	0.298	357.53	0.39	42.5	0.21	36	387.50	1350.52	1708.06
10	4	25	77	30.85	87.53	7.529	0.948	0.167	1.690	0.298	486.86	0.39	42.5	0.31	36	387.50	1993.63	2480.48
11	7	25	77	30.85	87.53	10.529	0.948	0.167	1.690	0.298	680.84	0.39	42.5	0.42	36	387.50	2701.05	3381.88
12	9	25	77	30.85	87.53	12.529	0.948	0.167	1.690	0.298	810.16	0.39	42.5	0.52	36	387.50	3344.15	4154.31
13	12	25	77	30.85	87.53	15.529	0.948	0.167	1.690	0.298	1004.14	0.39	42.5	0.57	36	387.50	3665.70	4669.84
14	13	25	77	30.85	87.53	16.529	0.948	0.167	1.690	0.298	1068.80	0.39	42.5	0.58	36	387.50	3730.01	4798.82
15	14	25	77	30.85	87.53	17.529	0.948	0.167	1.690	0.298	1133.46	0.39	42.5	0.53	36	387.50	3408.46	4541.92
16	14	25	77	30.85	87.53	17.529	0.948	0.167	1.690	0.298	1133.46	0.39	42.5	0.47	36	387.50	3022.60	4156.06
17	13	25	77	30.85	87.53	16.529	0.948	0.167	1.690	0.298	1068.80	0.39	42.5	0.41	36	387.50	2636.73	3705.54
																		<b>3472.55</b>

Reflective-Clear																																							
Glass conduction		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>C</sub>		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>		SC		SHGF		CLF		Area		Q <sub>r</sub>		Q															
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	°C	CLTD <sub>C</sub>	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)												
8	0	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	305.34	0.41	42.5	0.14	36	387.50	941.85	1247.19																				
9	2	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	478.37	0.41	42.5	0.21	36	387.50	1412.77	1891.15																				
10	4	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	651.40	0.41	42.5	0.31	36	387.50	2085.52	2736.93																				
11	7	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	910.94	0.41	42.5	0.42	36	387.50	2825.55	3736.49																				
12	9	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1083.97	0.41	42.5	0.52	36	387.50	3498.30	4582.27																				
13	12	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1343.52	0.41	42.5	0.57	36	387.50	3834.67	5178.19																				
14	13	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1430.03	0.41	42.5	0.58	36	387.50	3901.95	5331.98																				
15	14	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1516.54	0.41	42.5	0.53	36	387.50	3565.57	5082.12																				
16	14	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1516.54	0.41	42.5	0.47	36	387.50	3161.92	4678.47																				
17	13	25	77	30	85	87	5.3	1.268	0.223	5.250	0.925	1430.03	0.41	42.5	0.41	36	387.50	2758.27	4188.30																				
Reflective-Insulate																																						3865.31	
Reflective-Insulate																																							
Glass conduction		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>C</sub>		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>		SC		SHGF		CLF		Area		Q <sub>r</sub>		Q															
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	°C	CLTD <sub>C</sub>	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)												
8	0	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	203.04	0.24	42.5	0.14	36	387.50	545.28	748.32																				
9	2	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	318.10	0.24	42.5	0.21	36	387.50	817.92	1136.02																				
10	4	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	433.16	0.24	42.5	0.31	36	387.50	1207.41	1640.57																				
11	7	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	605.74	0.24	42.5	0.42	36	387.50	1635.84	2241.59																				
12	9	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	720.80	0.24	42.5	0.52	36	387.50	2025.33	2746.13																				
13	12	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	893.39	0.24	42.5	0.57	36	387.50	2220.07	3113.46																				
14	13	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	950.92	0.24	42.5	0.58	36	387.50	2259.02	3209.94																				
15	14	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	1008.45	0.24	42.5	0.53	36	387.50	2064.28	3072.73																				
16	14	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	1008.45	0.24	42.5	0.47	36	387.50	1830.59	2839.03																				
17	13	25	77	30	85	87	5.3	0.843	0.148	1.690	0.298	950.92	0.24	42.5	0.41	36	387.50	1596.90	2547.81																				
Reflective-Insulate																																						2329.56	

ช่วงฤดูร้อน

Base case Glass conduction hr	T <sub>R</sub>		T <sub>o</sub>		CLTD <sub>c</sub>	U	Q <sub>24</sub>	SC	SHGF	CLF	Area		Q <sub>r</sub>	Q <sub>e</sub>	CLTD	LM	K	CLTD <sub>c</sub>	U	Area		Q <sub>wall</sub>	Q	
	°C	°F	°C	°F							m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>								m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>			Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup>
8	25	77	30.85	87.53	3.529	5.250	599.81	0.95	42.5	0.14	17.0775	183.82	1039	1638.9	3	-6.25	0.65	1.417	3.390	0.597	18.9	203.68	172.28	1811.14
9	25	77	30.85	87.53	5.529	5.250	939.704	0.95	42.5	0.21	17.0775	183.82	1559	2498.3	4	-6.25	0.65	2.087	3.390	0.597	18.9	203.68	251.32	2749.59
10	25	77	30.85	87.53	7.529	5.250	1279.6	0.95	42.5	0.31	17.0775	183.82	2301	3580.3	5	-6.25	0.65	2.717	3.390	0.597	18.9	203.68	330.36	3910.70
11	25	77	30.85	87.53	10.529	5.250	1789.44	0.95	42.5	0.42	17.0775	183.82	3117	4906.8	9	-6.25	0.65	5.317	3.390	0.597	18.9	203.68	646.50	6553.07
12	25	77	30.85	87.53	12.529	5.250	2129.33	0.95	42.5	0.52	17.0775	183.82	3859	5988.6	13	-6.25	0.65	7.917	3.390	0.597	18.9	203.68	962.64	6951.28
13	25	77	30.85	87.53	15.529	5.250	2638.17	0.95	42.5	0.57	17.0775	183.82	4230	5869.6	19	-6.25	0.65	11.82	3.390	0.597	18.9	203.68	1436.85	8206.42
14	25	77	30.85	87.53	16.529	5.250	2809.12	0.95	42.5	0.58	17.0775	183.82	4305	7113.7	24	-6.25	0.65	15.07	3.390	0.597	18.9	203.68	1832.03	8945.77
15	25	77	30.85	87.53	17.529	5.250	2979.07	0.95	42.5	0.53	17.0775	183.82	3934	6912.6	29	-6.25	0.65	18.32	3.390	0.597	18.9	203.68	2227.20	9139.80
16	25	77	30.85	87.53	17.529	5.250	2979.07	0.95	42.5	0.47	17.0775	183.82	3488	6467.3	32	-6.25	0.65	20.27	3.390	0.597	18.9	203.68	2464.31	8931.60
17	25	77	30.85	87.53	16.529	5.250	2809.12	0.95	42.5	0.41	17.0775	183.82	3043	5852	34	-6.25	0.65	21.57	3.390	0.597	18.9	203.68	2622.38	8474.42
																							6477.38	



Clear-Clear	25-Dec		S										Medium weight		Q		
	CLTD (°F)	TR	To	CLTDc	U <sub>ast</sub> (W/m <sup>2</sup> .K)	U <sub>ast</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )	U <sub>ast</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )	Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>				
hr	°C	°F	°C	°F	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> )	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	
8	0	25	77	27.22	81.00	-3.002	1.310	0.231	5.250	0.925	-268.40	0.88	204.5	0.14	36 387.50	9802	9533.28
9	2	25	77	27.22	81.00	-1.002	1.310	0.231	5.250	0.925	-89.60	0.88	204.5	0.21	36 387.50	14703	14612.92
10	4	25	77	27.22	81.00	0.998	1.310	0.231	5.250	0.925	89.20	0.88	204.5	0.31	36 387.50	21704	21792.92
11	7	25	77	27.22	81.00	3.998	1.310	0.231	5.250	0.925	357.41	0.88	204.5	0.42	36 387.50	29405	29762.44
12	9	25	77	27.22	81.00	5.998	1.310	0.231	5.250	0.925	536.21	0.88	204.5	0.52	36 387.50	36406	36942.44
13	12	25	77	27.22	81.00	8.998	1.310	0.231	5.250	0.925	804.41	0.88	204.5	0.57	36 387.50	39907	40711.24
14	13	25	77	27.22	81.00	9.998	1.310	0.231	5.250	0.925	893.81	0.88	204.5	0.58	36 387.50	40607	41500.76
15	14	25	77	27.22	81.00	10.998	1.310	0.231	5.250	0.925	983.21	0.88	204.5	0.53	36 387.50	37106	38089.56
16	14	25	77	27.22	81.00	10.998	1.310	0.231	5.250	0.925	983.21	0.88	204.5	0.47	36 387.50	32906	33888.85
17	13	25	77	27.22	81.00	9.998	1.310	0.231	5.250	0.925	893.81	0.88	204.5	0.41	36 387.50	28705	29598.72
<b>Clear-Insulate</b>																	
<b>29643.32</b>																	
Clear-Insulate	25-Dec		S										Medium weight		Q		
CLTD (°F)	TR	To	CLTDc	U <sub>ast</sub> (W/m <sup>2</sup> .K)	U <sub>ast</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )	U <sub>ast</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )	Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>					
hr	°C	°F	°C	°F	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> )	(Btu/hr)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	(Btu/hr)	
8	0	25	77	27.22	81.00	-3.002	0.933	0.164	1.690	0.298	-191.16	0.51	204.5	0.14	36 387.50	5675	5483.50
9	2	25	77	27.22	81.00	-1.002	0.933	0.164	1.690	0.298	-63.81	0.51	204.5	0.21	36 387.50	8512	8448.17
10	4	25	77	27.22	81.00	0.998	0.933	0.164	1.690	0.298	63.53	0.51	204.5	0.31	36 387.50	12565	12628.84
11	7	25	77	27.22	81.00	3.998	0.933	0.164	1.690	0.298	254.55	0.51	204.5	0.42	36 387.50	17024	17278.52
12	9	25	77	27.22	81.00	5.998	0.933	0.164	1.690	0.298	381.90	0.51	204.5	0.52	36 387.50	21077	21459.19
13	12	25	77	27.22	81.00	8.998	0.933	0.164	1.690	0.298	572.92	0.51	204.5	0.57	36 387.50	23104	23676.87
14	13	25	77	27.22	81.00	9.998	0.933	0.164	1.690	0.298	636.59	0.51	204.5	0.58	36 387.50	23509	24145.88
15	14	25	77	27.22	81.00	10.998	0.933	0.164	1.690	0.298	700.26	0.51	204.5	0.53	36 387.50	21483	22182.89
16	14	25	77	27.22	81.00	10.998	0.933	0.164	1.690	0.298	700.26	0.51	204.5	0.47	36 387.50	19051	19750.89
17	13	25	77	27.22	81.00	9.998	0.933	0.164	1.690	0.298	636.59	0.51	204.5	0.41	36 387.50	16619	17255.23
<b>17231.00</b>																	



Reflective-Clear		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>c</sub>		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>ed</sub>		SHGF		CLF		Area		Q <sub>r</sub>		Q		
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	°C	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	Btu/hr	Btu/hr	Btu/hr	Btu/hr
8	0	25	77	27.22	81.00	-3.002	1.268	0.223	5.250	0.925	-259.73	0.41	204.5	0.14	36	387.50	4548.60	4288.87						
9	2	25	77	27.22	81.00	-1.002	1.268	0.223	5.250	0.925	-86.70	0.41	204.5	0.21	36	387.50	6822.90	6736.20						
10	4	25	77	27.22	81.00	0.998	1.268	0.223	5.250	0.925	86.32	0.41	204.5	0.31	36	387.50	10071.90	10158.22						
11	7	25	77	27.22	81.00	3.998	1.268	0.223	5.250	0.925	345.87	0.41	204.5	0.42	36	387.50	13645.80	13991.67						
12	9	25	77	27.22	81.00	5.998	1.268	0.223	5.250	0.925	518.90	0.41	204.5	0.52	36	387.50	16894.80	17413.70						
13	12	25	77	27.22	81.00	8.998	1.268	0.223	5.250	0.925	778.44	0.41	204.5	0.57	36	387.50	18519.30	19297.74						
14	13	25	77	27.22	81.00	9.998	1.268	0.223	5.250	0.925	864.95	0.41	204.5	0.58	36	387.50	18844.20	19709.15						
15	14	25	77	27.22	81.00	10.998	1.268	0.223	5.250	0.925	951.47	0.41	204.5	0.53	36	387.50	17219.70	18171.17						
16	14	25	77	27.22	81.00	10.998	1.268	0.223	5.250	0.925	951.47	0.41	204.5	0.47	36	387.50	15270.30	16221.77						
17	13	25	77	27.22	81.00	9.998	1.268	0.223	5.250	0.925	864.95	0.41	204.5	0.41	36	387.50	13320.90	14185.85						
Reflective-Insulate																						<b>14017.43</b>		
Glass conduction		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>c</sub>		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>ed</sub>		SHGF		CLF		Area		Q <sub>r</sub>		Q		
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	°C	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	(W/m <sup>2</sup> ·K)	m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>	Btu/hr	Btu/hr	Btu/hr	Btu/hr
8	0	25	77	27.22	81.00	-3.002	0.843	0.148	1.690	0.298	-172.71	0.24	204.5	0.14	36	387.50	2623.77	2451.05						
9	2	25	77	27.22	81.00	-1.002	0.843	0.148	1.690	0.298	-57.66	0.24	204.5	0.21	36	387.50	3935.65	3877.99						
10	4	25	77	27.22	81.00	0.998	0.843	0.148	1.690	0.298	57.40	0.24	204.5	0.31	36	387.50	5809.77	5867.17						
11	7	25	77	27.22	81.00	3.998	0.843	0.148	1.690	0.298	229.99	0.24	204.5	0.42	36	387.50	7871.30	8101.29						
12	9	25	77	27.22	81.00	5.998	0.843	0.148	1.690	0.298	345.05	0.24	204.5	0.52	36	387.50	9745.42	10090.46						
13	12	25	77	27.22	81.00	8.998	0.843	0.148	1.690	0.298	517.63	0.24	204.5	0.57	36	387.50	10682.48	11200.11						
14	13	25	77	27.22	81.00	9.998	0.843	0.148	1.690	0.298	575.16	0.24	204.5	0.58	36	387.50	10869.89	11445.05						
15	14	25	77	27.22	81.00	10.998	0.843	0.148	1.690	0.298	632.69	0.24	204.5	0.53	36	387.50	9932.83	10565.52						
16	14	25	77	27.22	81.00	10.998	0.843	0.148	1.690	0.298	632.69	0.24	204.5	0.47	36	387.50	8808.36	9441.05						
17	13	25	77	27.22	81.00	9.998	0.843	0.148	1.690	0.298	575.16	0.24	204.5	0.41	36	387.50	7683.89	8259.05						

ช่วงฤดูหนาว

Base case Glass conduction hr	CLTD (°F)	T <sub>a</sub> °F	T <sub>o</sub> °F	CLTD <sub>c</sub>	U (W/m <sup>2</sup> .K)	Q <sub>g4</sub> Btu/hr	SC	SHGF CLF	Area m <sup>2</sup>	Area ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q <sub>g</sub> Btu/hr	CLTD Wall-E	LM	K	CLTD <sub>c</sub>	U (W/m <sup>2</sup> .K)	Area m <sup>2</sup>	Area ft <sup>2</sup>	Q <sub>net</sub> Btu/hr	Q Btu/hr					
																						°C	°C			
8	0	25	77	27.22	81.00	-3.002	5.250	0.925	-510.214	0.95	205	0.14	17.0775	183.82	5000	4489	3	12.75	0.65	7.2353	3.390	0.597	18.9	203.68	879.76	5369.19
9	2	25	77	27.22	81.00	-1.002	5.250	0.925	-170.321	0.95	205	0.21	17.0775	183.82	7499	7329	4	12.75	0.65	7.8853	3.390	0.597	18.9	203.68	958.795	8287.94
10	4	25	77	27.22	81.00	0.998	5.250	0.925	169.573	0.95	205	0.31	17.0775	183.82	11071	11240	5	12.75	0.65	8.5353	3.390	0.597	18.9	203.68	1037.83	12278.05
11	7	25	77	27.22	81.00	3.998	5.250	0.925	679.413	0.95	205	0.42	17.0775	183.82	14999	15678	9	12.75	0.65	11.135	3.390	0.597	18.9	203.68	1353.97	17032.33
12	9	25	77	27.22	81.00	5.998	5.250	0.925	1019.31	0.95	205	0.52	17.0775	183.82	18570	19589	13	12.75	0.65	13.735	3.390	0.597	18.9	203.68	1670.11	21259.54
13	12	25	77	27.22	81.00	8.998	5.250	0.925	1529.15	0.95	205	0.67	17.0775	183.82	20356	21886	19	12.75	0.65	17.635	3.390	0.597	18.9	203.68	2144.32	24059.18
14	13	25	77	27.22	81.00	9.998	5.250	0.925	1699.09	0.95	205	0.58	17.0775	183.82	20713	22412	24	12.75	0.65	20.885	3.390	0.597	18.9	203.68	2539.5	24951.42
15	14	25	77	27.22	81.00	10.998	5.250	0.925	1869.04	0.95	205	0.53	17.0775	183.82	18927	20796	29	12.75	0.65	24.135	3.390	0.597	18.9	203.68	2934.68	23730.95
16	14	25	77	27.22	81.00	10.998	5.250	0.925	1869.04	0.95	205	0.47	17.0775	183.82	16785	18654	32	12.75	0.65	26.085	3.390	0.597	18.9	203.68	3171.78	21825.35
17	13	25	77	27.22	81.00	9.998	5.250	0.925	1699.09	0.95	205	0.41	17.0775	183.82	14642	16341	34	12.75	0.65	27.385	3.390	0.597	18.9	203.68	3329.85	19670.77
<b>17231.00</b>																						<b>17843.47</b>				

ช่วงอุณหภูมิปกติ

Clear-Clear Glass conduction hr	15-Aug		S										Medium weight		Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr		
	CLTD (°F) °C	T <sub>R</sub> °F °C	T <sub>O</sub> °F °C	CLTD <sub>c</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )	Q <sub>ed</sub>	SC	SHGF	CLF	Area		Q <sub>r</sub> Btu/hr				
					(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )						(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )				m <sup>2</sup>	ft <sup>2</sup>
8	0	25	77	28.70	83.66	-0.340	1.310	0.231	5.250	0.925	-30.40	0.88	94	0.14	36	387.50	4505	4475.02
9	2	25	77	28.70	83.66	1.660	1.310	0.231	5.250	0.925	148.40	0.88	94	0.21	36	387.50	6758	6906.53
10	4	25	77	28.70	83.66	3.660	1.310	0.231	5.250	0.925	327.21	0.88	94	0.31	36	387.50	9976	10303.49
11	7	25	77	28.70	83.66	6.660	1.310	0.231	5.250	0.925	595.41	0.88	94	0.42	36	387.50	13516	14111.66
12	9	25	77	28.70	83.66	8.660	1.310	0.231	5.250	0.925	774.21	0.88	94	0.52	36	387.50	16734	17508.61
13	12	25	77	28.70	83.66	11.660	1.310	0.231	5.250	0.925	1042.41	0.88	94	0.57	36	387.50	18343	19385.89
14	13	25	77	28.70	83.66	12.660	1.310	0.231	5.250	0.925	1131.81	0.88	94	0.58	36	387.50	18665	19797.11
15	14	25	77	28.70	83.66	13.660	1.310	0.231	5.250	0.925	1221.21	0.88	94	0.53	36	387.50	17056	18277.43
16	14	25	77	28.70	83.66	13.660	1.310	0.231	5.250	0.925	1221.21	0.88	94	0.47	36	387.50	15125	16346.54
17	13	25	77	28.70	83.66	12.660	1.310	0.231	5.250	0.925	1131.81	0.88	94	0.41	36	387.50	13194	14326.25
<b>Clear-Insulate</b>																		
Glass conduction hr	T <sub>R</sub> °F °C		T <sub>O</sub> °F °C		CLTD <sub>c</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )	Q <sub>ed</sub>	SC	SHGF	CLF	Area		Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q Btu/hr		
	CLTD (°F) °C	°F °C	°F °C	(W/m <sup>2</sup> .K)		(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	(W/m <sup>2</sup> .K)						(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>			ft <sup>2</sup>	
8	0	25	77	28.70	83.66	-0.340	0.933	0.164	1.690	0.298	-21.65	0.51	94	0.14	36	387.50	2608	2586.75
9	2	25	77	28.70	83.66	1.660	0.933	0.164	1.690	0.298	105.70	0.51	94	0.21	36	387.50	3913	4018.30
10	4	25	77	28.70	83.66	3.660	0.933	0.164	1.690	0.298	233.04	0.51	94	0.31	36	387.50	5776	6008.76
11	7	25	77	28.70	83.66	6.660	0.933	0.164	1.690	0.298	424.06	0.51	94	0.42	36	387.50	7825	8249.26
12	9	25	77	28.70	83.66	8.660	0.933	0.164	1.690	0.298	551.41	0.51	94	0.52	36	387.50	9688	10239.75
13	12	25	77	28.70	83.66	11.660	0.933	0.164	1.690	0.298	742.43	0.51	94	0.57	36	387.50	10620	11362.34
14	13	25	77	28.70	83.66	12.660	0.933	0.164	1.690	0.298	806.10	0.51	94	0.58	36	387.50	10806	11612.33
15	14	25	77	28.70	83.66	13.660	0.933	0.164	1.690	0.298	869.77	0.51	94	0.53	36	387.50	9875	10744.43
16	14	25	77	28.70	83.66	13.660	0.933	0.164	1.690	0.298	869.77	0.51	94	0.47	36	387.50	8757	9626.54
17	13	25	77	28.70	83.66	12.660	0.933	0.164	1.690	0.298	806.10	0.51	94	0.41	36	387.50	7639	8444.98
<b>8289.35</b>																		

Tint-Clear		15-Aug															
Glass conduction hr	CLTD (°F)	T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>c</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>	Q
		°C	°F	°C	°F		(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )							
8	0	25	77	28.70	83.66	-0.340	1.464	0.258	0.925	-33.97	0.67	94	0.14	36	387.50	3439.62	3405.65
9	2	25	77	28.70	83.66	1.660	1.464	0.258	0.925	165.87	0.67	94	0.21	36	387.50	5159.43	5325.30
10	4	25	77	28.70	83.66	3.660	1.464	0.258	0.925	365.72	0.67	94	0.31	36	387.50	7616.30	7982.02
11	7	25	77	28.70	83.66	6.660	1.464	0.258	0.925	665.49	0.67	94	0.42	36	387.50	10318.86	10984.35
12	9	25	77	28.70	83.66	8.660	1.464	0.258	0.925	865.34	0.67	94	0.52	36	387.50	12775.73	13641.07
13	12	25	77	28.70	83.66	11.660	1.464	0.258	0.925	1165.11	0.67	94	0.57	36	387.50	14004.17	15169.28
14	13	25	77	28.70	83.66	12.660	1.464	0.258	0.925	1265.04	0.67	94	0.58	36	387.50	14249.85	15514.89
15	14	25	77	28.70	83.66	13.660	1.464	0.258	0.925	1364.96	0.67	94	0.53	36	387.50	13021.42	14386.38
16	14	25	77	28.70	83.66	13.660	1.464	0.258	0.925	1364.96	0.67	94	0.47	36	387.50	11547.29	12912.25
17	13	25	77	28.70	83.66	12.660	1.464	0.258	0.925	1265.04	0.67	94	0.41	36	387.50	10073.17	11338.21
Tint-Insulate																	
Glass conduction hr	CLTD (°F)	T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTD <sub>c</sub>	U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>	Q
		°C	°F	°C	°F		(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(Btu/hr.°F.ft <sup>2</sup> )							
8	0	25	77	28.70	83.66	-0.340	0.948	0.167	1.690	-21.98	0.39	94	0.14	36	387.50	1991.36	1969.37
9	2	25	77	28.70	83.66	1.660	0.948	0.167	1.690	107.34	0.39	94	0.21	36	387.50	2987.04	3094.37
10	4	25	77	28.70	83.66	3.660	0.948	0.167	1.690	236.66	0.39	94	0.31	36	387.50	4409.44	4646.09
11	7	25	77	28.70	83.66	6.660	0.948	0.167	1.690	430.64	0.39	94	0.42	36	387.50	5974.08	6404.72
12	9	25	77	28.70	83.66	8.660	0.948	0.167	1.690	559.96	0.39	94	0.52	36	387.50	7396.48	7956.44
13	12	25	77	28.70	83.66	11.660	0.948	0.167	1.690	753.94	0.39	94	0.57	36	387.50	8107.67	8861.62
14	13	25	77	28.70	83.66	12.660	0.948	0.167	1.690	818.60	0.39	94	0.58	36	387.50	8249.91	9068.52
15	14	25	77	28.70	83.66	13.660	0.948	0.167	1.690	883.26	0.39	94	0.53	36	387.50	7538.72	8421.98
16	14	25	77	28.70	83.66	13.660	0.948	0.167	1.690	883.26	0.39	94	0.47	36	387.50	6685.28	7568.54
17	13	25	77	28.70	83.66	12.660	0.948	0.167	1.690	818.60	0.39	94	0.41	36	387.50	5831.84	6650.44
		<b>11065.94</b>															
		<b>6464.21</b>															

Reflective-Clear		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTDC		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>	Q	
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	Btu/hr				m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Btu/hr	Btu/hr	
8	0	25.77	28.70	28.70	83.66	-0.340	1.268	0.223	5.250	0.925	-29.41	0.41	94	0.14	36	387.50	2090.80	2061.38	
9	2	25.77	28.70	28.70	83.66	1.660	1.268	0.223	5.250	0.925	143.61	0.41	94	0.21	36	387.50	3136.20	3279.81	
10	4	25.77	28.70	28.70	83.66	3.660	1.268	0.223	5.250	0.925	316.64	0.41	94	0.31	36	387.50	4629.63	4946.27	
11	7	25.77	28.70	28.70	83.66	6.660	1.268	0.223	5.250	0.925	576.19	0.41	94	0.42	36	387.50	6272.40	6848.58	
12	9	25.77	28.70	28.70	83.66	8.660	1.268	0.223	5.250	0.925	749.21	0.41	94	0.52	36	387.50	7765.83	8515.04	
13	12	25.77	28.70	28.70	83.66	11.660	1.268	0.223	5.250	0.925	1008.76	0.41	94	0.57	36	387.50	8512.54	9521.30	
14	13	25.77	28.70	28.70	83.66	13.660	1.268	0.223	5.250	0.925	1095.27	0.41	94	0.58	36	387.50	8661.88	9757.15	
15	14	25.77	28.70	28.70	83.66	13.660	1.268	0.223	5.250	0.925	1181.79	0.41	94	0.53	36	387.50	7915.17	9096.95	
16	14	25.77	28.70	28.70	83.66	13.660	1.268	0.223	5.250	0.925	1181.79	0.41	94	0.47	36	387.50	7019.11	8200.90	
17	13	25.77	28.70	28.70	83.66	12.660	1.268	0.223	5.250	0.925	1095.27	0.41	94	0.41	36	387.50	6123.05	7218.33	
Reflective-Insulate		T <sub>R</sub>		T <sub>O</sub>		CLTDC		U <sub>dsf</sub> (250 W/m <sup>2</sup> )		U <sub>dsf</sub> (1 W/m <sup>2</sup> )		Q <sub>cd</sub>	SC	SHGF	CLF	Area	Q <sub>r</sub>	Q	
hr	CLTD (°F)	°C	°F	°C	°F	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	(W/m <sup>2</sup> .K)	Btu/hr				m <sup>2</sup> ft <sup>2</sup>	Btu/hr	Btu/hr	
8	0	25.77	28.70	28.70	83.66	-0.340	0.843	0.148	1.690	0.298	-19.56	0.24	94	0.14	36	387.50	1206.03	1186.47	
9	2	25.77	28.70	28.70	83.66	1.660	0.843	0.148	1.690	0.298	95.50	0.24	94	0.21	36	387.50	1809.05	1904.55	
10	4	25.77	28.70	28.70	83.66	3.660	0.843	0.148	1.690	0.298	210.56	0.24	94	0.31	36	387.50	2670.50	2881.06	
11	7	25.77	28.70	28.70	83.66	6.660	0.843	0.148	1.690	0.298	383.14	0.24	94	0.42	36	387.50	3618.10	4001.24	
12	9	25.77	28.70	28.70	83.66	8.660	0.843	0.148	1.690	0.298	498.20	0.24	94	0.52	36	387.50	4479.56	4977.75	
13	12	25.77	28.70	28.70	83.66	11.660	0.843	0.148	1.690	0.298	670.79	0.24	94	0.57	36	387.50	4910.28	5581.07	
14	13	25.77	28.70	28.70	83.66	12.660	0.843	0.148	1.690	0.298	728.31	0.24	94	0.58	36	387.50	4996.43	5724.74	
15	14	25.77	28.70	28.70	83.66	13.660	0.843	0.148	1.690	0.298	785.84	0.24	94	0.53	36	387.50	4565.70	5351.54	
16	14	25.77	28.70	28.70	83.66	13.660	0.843	0.148	1.690	0.298	785.84	0.24	94	0.47	36	387.50	4048.83	4834.67	
17	13	25.77	28.70	28.70	83.66	12.660	0.843	0.148	1.690	0.298	728.31	0.24	94	0.41	36	387.50	3531.96	4260.27	
																		<b>4070.34</b>	

ช่วงอุณหภูมิปกติ

Base case Glass conduction hr	CLTD (°F)	T <sub>r</sub> °F	T <sub>o</sub> °F	CLTD <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> , K)	U (W/m <sup>2</sup> , K)	Q <sub>g,s</sub> Btu/hr	SC	SHGF	CLF	Area m <sup>2</sup>	Area ft <sup>2</sup>	Q <sub>r</sub> Btu/hr	Q <sub>q</sub> Btu/hr	CLTD Wall-E	LMI	K	CLTD <sub>c</sub> (W/m <sup>2</sup> , K)	U (W/m <sup>2</sup> , K)	Area m <sup>2</sup>	Area ft <sup>2</sup>	Q <sub>wall</sub> Btu/hr	Q					
																							°C	°C	°F	°F	°F
8	0	25	77	26.70	83.66	-0.340	5.250	0.925	-57.78	0.95	94	0.14	17.0775	183.82	2298	2240.3	3	-6.25	0.65	-2.453	3.390	0.697	18.9	203.68	-298.21	1942.14	
9	2	25	77	28.70	83.66	1.660	5.250	0.925	282.11	0.95	94	0.21	17.0775	183.82	3447	3729.3	4	-6.25	0.65	-1.803	3.390	0.697	18.9	203.68	-219.17	3610.13	
10	4	25	77	30.70	83.66	3.660	5.250	0.925	622.01	0.95	94	0.31	17.0775	183.82	5089	5710.7	5	-6.25	0.65	-1.153	3.390	0.697	18.9	203.68	-140.14	5570.58	
11	7	25	77	32.70	83.66	6.660	5.250	0.925	1131.85	0.95	94	0.42	17.0775	183.82	6894	8026.2	9	-6.25	0.65	1.448	3.390	0.697	18.9	203.68	176.01	8202.23	
12	9	25	77	34.70	83.66	8.660	5.250	0.925	1471.74	0.95	94	0.52	17.0775	183.82	8536	10008	13	-6.25	0.65	4.048	3.390	0.697	18.9	203.68	492.15	10499.78	
13	12	25	77	36.70	83.66	11.660	5.250	0.925	1981.68	0.95	94	0.67	17.0775	183.82	9367	11338	19	-6.25	0.65	7.948	3.390	0.697	18.9	203.68	966.36	12304.59	
14	13	25	77	38.70	83.66	12.660	5.250	0.925	2151.53	0.95	94	0.58	17.0775	183.82	9521	11672	24	-6.25	0.65	11.2	3.390	0.697	18.9	203.68	1361.53	13033.87	
15	14	25	77	40.70	83.66	13.660	5.250	0.925	2321.47	0.95	94	0.53	17.0775	183.82	8700	11022	29	-6.25	0.65	14.45	3.390	0.697	18.9	203.68	1756.71	12778.23	
16	14	25	77	42.70	83.66	13.660	5.250	0.925	2321.47	0.95	94	0.47	17.0775	183.82	7715	10037	32	-6.25	0.65	16.4	3.390	0.697	18.9	203.68	1993.82	12030.43	
17	13	25	77	44.70	83.66	12.660	5.250	0.925	2151.53	0.95	94	0.41	17.0775	183.82	6730	8881.8	34	-6.25	0.65	17.7	3.390	0.697	18.9	203.68	2151.89	11033.64	
																						<b>8289.36</b>			<b>9090.66</b>		



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายเชษฐพรธรณ สิ้นเจิมศิริ

เกิด 17 กันยายน พ.ศ.2524

### ประวัติการศึกษา

- |           |  |
|-----------|--|
| 2530-2539 | ระดับประถมศึกษาและระดับมัธยมศึกษาตอนต้น, โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย                |
| 2541      | ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย, กรมการศึกษานอกโรงเรียน (โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียนวิทยาลัย)        |
| 2542-2546 | ระดับอุดมศึกษา, ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรมหลัก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย