

ประสิทธิภาพในการกันความร้อนของระบบผนังกระจกสองชั้น
ระบายอากาศด้วยวิธีกลพร้อมติดตั้งมานาน ในภูมิอากาศร้อนชื้น

นายชยพล เพียรชอบธรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE AIRFLOW WINDOWS
EQUIPPED WITH CURTAIN IN HOT-HUMID CLIMATE

Mr. Chayapol Plianchotham



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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพในการกันความร้อนของระบบผนังกระจกสองชั้น ระบายอากาศด้วยวิธีกลพร้อมติดตั้งม่าน ในภูมิอากาศร้อนชื้น
โดย	นายชยพล เพียรชอบธรรม
สาขาวิชา	สถาปัตยกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุต

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่นรัชฎ์ กาญจนะจิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุต)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรภัทร์ ینگโรจน์ฤทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ณรงค์วิทย์ อารีมิตร)

ชยพล เพียรชอบธรรม : ประสิทธิภาพในการกันความร้อนของระบบผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีการพร้อมติดตั้งม่าน ในภูมิอากาศร้อนชื้น (ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE AIRFLOW WINDOWS EQUIPPED WITH CURTAIN IN HOT-HUMID CLIMATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรรจน์ เศรษฐบุตร, 82 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกันความร้อนและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศโดยวิธีการ ทำการทดลองโดยการจำลองกล่องทดลองที่มีความสูงหนึ่งชั้นของอาคาร ภายใต้สภาพภูมิอากาศจริงของกรุงเทพฯ โดยวัดอุณหภูมิ ณ จุดระบายอากาศเข้าและออก อุณหภูมิผิวกระจกภายนอก – ภายใน และเปรียบเทียบ 3 ตัวแปร ได้แก่ (1) ผนังกระจกชั้นเดียว (Single-Skin Façade, SSF) และผนังกระจกสองชั้น (Double Skin-Façade, DSF); (2) ในช่องอากาศแบบมีและไม่มีม่าน; (3) ปรับอัตราการระบายอากาศในช่องอากาศที่ 350, 700 และ 1050 ACH ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว อัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH และมีม่าน (D6) สามารถลดปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลองได้สูงสุดที่ 4.44 °C รองลงมาที่อัตราการระบายอากาศ 1050 ACH และไม่มีม่าน (D3) สามารถลดได้ 4.1 °C อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณค่า U-Value และหาประสิทธิภาพการกันความร้อนแล้ว การมีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 (D6), 700 (D5) และ 350 (D4) ACH ค่า U-Value ลดต่ำถึง 1.25, 2.30, 2.56 W/m²·°C ตามลำดับ นั้นหมายความว่าม่านช่วยดักรังสีอาทิตย์ และแปลงเป็นความร้อนให้อากาศพาออกไปจาก Cavity ส่วนการไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 (D3), 700 (D2) และ 350 (D1) ACH มีค่า U-Value ที่ 5.56, 5.61, 6.77 W/m²·°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าค่า U-Value ของการมีม่านนั้นต่ำกว่า และเมื่อนำผลการคำนวณไปจำลองอาคารต้นแบบแล้วพบว่าผนังกระจกสองชั้นแบบ D6 สามารถลดภาระทำความเย็นได้มากที่สุดถึงร้อยละ 34 และมีจุดคุ้มทุนอยู่ในปีที่ 3 และ D1 จุดคุ้มทุนอยู่ในปีที่ 11 จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรสำคัญที่ทำให้ระบบผนังกระจกสองชั้นมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนคือ การมีม่าน และจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำงานร่วมกับอัตราการระบายอากาศที่สูงขึ้น และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5973340625 : MAJOR ARCHITECTURE

KEYWORDS: AIR FLOW WINDOW / DOUBLE-SKIN FAÇADE / CURTAIN WALL

CHAYAPOL PLIANCHOBTHAM: ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE AIRFLOW WINDOWS EQUIPPED WITH CURTAIN IN HOT-HUMID CLIMATE. ADVISOR: ASSOC. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 82 pp.

This research aims to study heat protection performance and economic feasibility of air flow window, carried out by modeling test box under the climate in Bangkok which resemble to the height of a room in an office building. The test box takes the temperature of outside surface, inside the room and the ventilators. The researcher studies 3 variables, which are (1) air flow window types (Single-Skin Facade and Double-Skin Facade); (2) the cavity with a curtain and without; (3) ventilation rate at 350, 700 and 1050 ACH. From the study, it was indicated that when compared with single skin façade, airflow of 1050 ACH with curtain had the most effectiveness. This can decrease test box's indoor temperature by 4.4 °C whereas, at 400 ACH without curtain it can decrease by 4.1°C. After calculating the U-Value and finding heat resistant performance, it was indicated that ventilation rates of 1050 (D6), 700 (D5), 350 (D4) ACH with curtain, the U-Values drop to 1.38, 2.31, 2.70 W/m².°C respectively, that means curtain could help blocking the solar radiation and transform it into heat, then the air will take the heat out of the cavity. Without curtain, the U-Values are 5.83, 5.60, 6.83 W/m².°C orderly, which clearly show that the DSF with curtain has lower U-Values. The simulation was created by using model the outcome of U-Value calculation and presented that D6 is the most effective in cooling energy reduction which could decrease at 34% and has a payback period of 3 years, but D1 has 11 years. This study conclude that the existence of curtain in the cavity of Double-Skin façade contributes the most to the energy performance and with higher ventilation rates, the system can be effective and economically feasible.

Department: Architecture

Student's Signature

Field of Study: Architecture

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะสำเร็จไปไม่ได้เลย ถ้าไม่ได้รับความอนุเคราะห์ในด้านความรู้ความสะดวกในการวิจัยและปัจจัยต่างๆจากทั้งบุคคลและหน่วยงานดังนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อรรถจน์ เศรษฐบุตุร อาจารย์ที่ปรึกษาสำหรับทุกๆ คำปรึกษา คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางรวมถึงเวลาอันมีค่าของอาจารย์ และขอขอบพระคุณ รศ.พรพนชล์ท สุริโยธิน ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วรภัทร์ อิงค์โรจน์ฤทธิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับทุกๆความรู้ที่ได้จากการเรียนในปริญญาโทที่ช่วยส่งเสริมให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้สมบูรณ์ที่สุด และ ดร. ณรงค์วิทย์ อาริมิตร กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่สละเวลาอันมีค่าในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณ ธนิน ททรัพย์รุ่งโรจน์ สำหรับข้อมูลผนังกระจกสองชั้นของอาคาร ENCO เพื่อใช้ในการศึกษาระบบผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล

ขอขอบคุณ ครอบครัว งามประสิทธิ์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลองและสาธารณูปโภคที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ น้องจ๋ม พ่อ แม่ และพี่ของข้าพเจ้า ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และที่สำคัญเป็นแรงกายแรงใจให้ทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
สารบัญแผนภูมิ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา.....	3
1.5 สมมติฐานของการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.....	6
2.1.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient, h).....	11
2.1.3 การคำนวณ OTTV.....	14
2.1.4 คุณสมบัติกระจก.....	15
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น.....	18
2.2.1 ประวัติความเป็นมาของผนังกระจกสองชั้น.....	18

2.2.2	นิยามของระบบผนังกระจกสองชั้น	22
2.2.3	การแบ่งประเภทผนังกระจกสองชั้น	22
2.2.4	ส่วนประกอบของผนังกระจกสองชั้น	24
2.2.5	การถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น	25
2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
2.3.1	งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกันความร้อน	27
2.3.2	งานวิจัยเกี่ยวกับม่านบังแดดใน Cavity	28
2.3.3	งานวิจัยเกี่ยวกับความเร็วลมในช่อง Cavity	30
2.3.4	งานวิจัยเกี่ยวกับความกว้างของช่องอากาศ	31
2.3.5	เอกสารอื่นๆที่เกี่ยวข้อง	31
2.4	บทสรุป	32
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	33
3.1	แนวทางการวิจัย	33
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	34
3.3	ขั้นตอนการวิจัย	37
3.3.1	กำหนดสมมติฐานการวิจัย	37
3.3.2	การดำเนินการวิจัยขั้นที่ 1 ด้วยกล่องทดลอง	37
3.3.3	การทดลองขั้นที่ 2 ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1	41
3.4	บทสรุป	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	46
4.1	ผลการทดลองจากกล่องทดลอง	46
4.1.1	อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง	46
4.1.2	การหาปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง	49

4.1.3 การหาค่า U-Value.....	55
4.2 ผลการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	59
4.2.1 การจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น.....	59
4.2.2 การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว.....	62
4.2.3 การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อม Movable Blinds.....	65
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	70
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	82



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์การศึกษา วิธีการศึกษา และผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
ตารางที่ 2.1 ค่า U-Value และ R-Value ของกระจกชนิดต่างๆ.....	16
ตารางที่ 2.2 การแบ่งรูปแบบของกระจกสองชั้น.....	22
ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรที่จะใช้ทดลอง.....	38
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน.....	61
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน.....	64
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน.....	67
ตารางที่ 5.1 ความน่าเชื่อถือของ U-Value.....	72

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 ผนังกระจกสองชั้น	2
รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนในระนาบหนึ่งมิติ	7
รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและอุณหภูมิของเลเยอร์แต่ละชั้นในการพาความร้อน	9
รูปที่ 2.3 ลักษณะรังสีความร้อนที่ตกกระทบวัตถุโปร่งแสง	11
รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ	11
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการของการแผ่รังสีผ่านผืนกระจก	17
รูปที่ 2.6 อาคารที่ใช้ผนังกระจกสองชั้นในอดีต	19
รูปที่ 2.7 รูปแบบผนังกระจกสองชั้นในอาคารตลาดหลักทรัพย์	20
รูปที่ 2.8 รูปแบบผนังกระจกสองชั้นใน อาคารศูนย์ราชการแจ้งวัฒนะ	20
รูปที่ 2.9 รูปแบบผนังกระจกสองชั้นในอาคาร Energy complex	21
รูปที่ 2.10 อาคารสำนักงานในไทยที่ใช้กระจกสองชั้น	21
รูปที่ 2.11 การแบ่งชนิดของ DSF และการถ่ายเทของอากาศ ตามการแบ่งส่วนของผนัง	23
รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของอากาศ (Air flow type)	24
รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของผนังกระจกสองชั้น	25
รูปที่ 2.14 การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกของกระจกสองชั้น	26
รูปที่ 2.15 ผลการทดลองของ	28
รูปที่ 2.16 รูปแบบมันบังแดดในช่อง Cavity ตำแหน่งของมัน องศาของมัน	28
รูปที่ 2.17 ตัวแปรต้นองศาของมุมที่ใช้ในการทดลอง	29
รูปที่ 2.18 ผลการทดลองของ P.C. Wong et al	31
รูปที่ 3.1 กล้องทดลองที่ใช้ในการวิจัย	34
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder	34
รูปที่ 3.3 พัดลม Cooler Master รุ่น SickerFlow ที่ใช้ในการทดลอง	35
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดลม Testo 454 Logger	36

รูปที่ 3.5 มู่ลี่ (Venetian blind).....36

รูปที่ 3.6 องศาและการวางตำแหน่งของมู่ลี่37

รูปที่ 3.7 ลักษณะการติดตั้งเซ็นเซอร์วัด.....39

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิของแต่ละกรณีศึกษา ผนังกระจกชั้นเดียว ผนังกระจกสองชั้น39

รูปที่ 3.9 การตั้งค่าวัสดุก่อสร้างในโปรแกรม VisualDOE 4.1.....42

รูปที่ 3.10 การตั้งค่าแสงสว่าง การใช้พลังงานจากเครื่องใช้ไฟฟ้า จำนวนผู้ใช้งานอาคาร รูปแบบการใช้
 สอย และการปรับอากาศ.....43

รูปที่ 3.11 รูปแบบการตั้งค่า Façade ในโปรแกรม VisualDOE 4.143



สารบัญแผนภูมิ

หน้า

แผนภูมิที่ 1.1 ผลจากการจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบของ สวีชญา ดาวประกายมงคล (2552).....	1
แผนภูมิที่ 2.1 ผลการทดลองค่าความเข้มแสงในแต่ละจุดของห้องเรียนภายใต้ท้องฟ้าของม่านต่างๆ.....	29
แผนภูมิที่ 2.2 ผลการทดลองของ Wang, Chen et al. (2016) ผลกระทบจาก อัตราการระบายอากาศ (V) ในช่องอากาศกับ อุณหภูมิกระจกภายใน และการถ่ายเทความร้อนของอากาศ	30
แผนภูมิที่ 4.1 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 350 ACH	46
แผนภูมิที่ 4.2 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 700 ACH	47
แผนภูมิที่ 4.3 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 1050 ACH	47
แผนภูมิที่ 4.4 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 350 ACH	48
แผนภูมิที่ 4.5 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 700 ACH	48
แผนภูมิที่ 4.6 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศประมาณ 700 ACH	49
แผนภูมิที่ 4.7 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 350 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว.....	50
แผนภูมิที่ 4.8 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 700 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว.....	50
แผนภูมิที่ 4.9 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 1050 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว	51
แผนภูมิที่ 4.10 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 350 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว	51
แผนภูมิที่ 4.11 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 700 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว	52

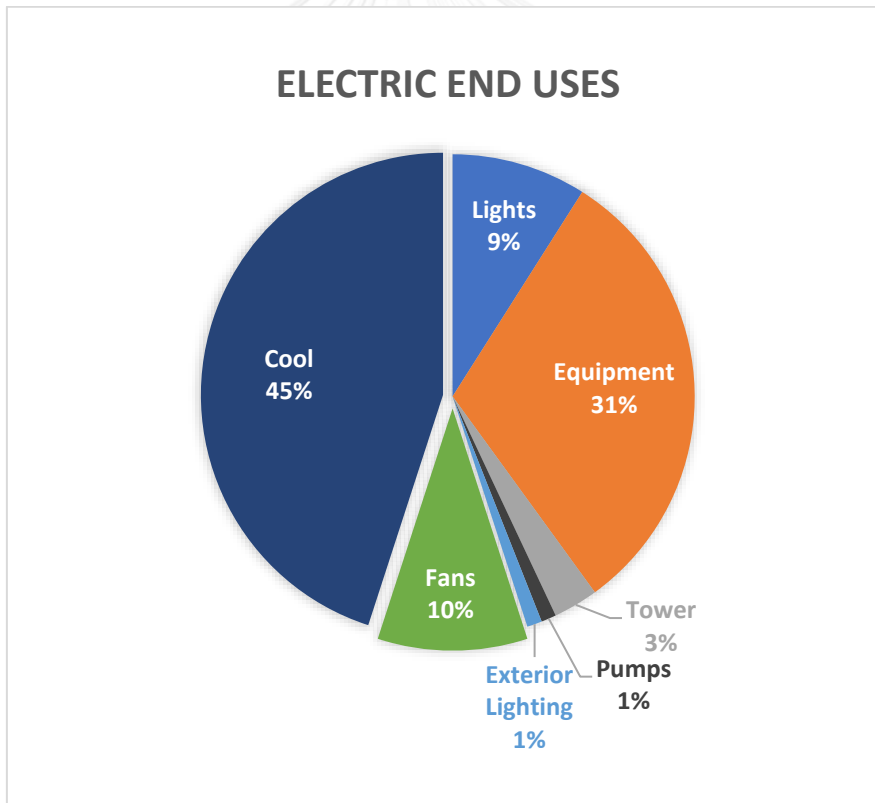
แผนภูมิที่ 4.12 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มี ม่าน มีอัตราการระบายอากาศประมาณ 1050 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว.....	52
แผนภูมิที่ 4.13 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง กับความ แตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน.....	53
แผนภูมิที่ 4.14 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง กับความ แตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน กรณีศึกษา D1-3.....	54
แผนภูมิที่ 4.15 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง กับความ แตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน กรณีศึกษา D4-6.....	54
แผนภูมิที่ 4.16 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 350 ACH.....	55
แผนภูมิที่ 4.17 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 700 ACH.....	56
แผนภูมิที่ 4.18 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH.....	56
แผนภูมิที่ 4.19 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นมีม่านอัตราการระบายอากาศ 350 ACH.....	57
แผนภูมิที่ 4.20 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นมีม่านอัตราการระบายอากาศ 700 ACH.....	57
แผนภูมิที่ 4.21 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นมีม่านอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH.....	58
แผนภูมิที่ 4.22 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นเดียว (SSF).....	58
แผนภูมิที่ 4.23 ค่า U-Value ของทุกกรณีศึกษา.....	59
แผนภูมิที่ 4.24 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นในโปรแกรม VisualDOE 4.1	60
แผนภูมิที่ 4.25 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา.....	62
แผนภูมิที่ 4.26 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวในโปรแกรม VisualDOE 4.1	63
แผนภูมิที่ 4.27 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา.....	65
แผนภูมิที่ 4.28 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวและระบบ ควบคุมม่านในโปรแกรม VisualDOE 4.1	66
แผนภูมิที่ 4.29 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้น เดียวพร้อม Movable Blinds ในโปรแกรม VisualDOE 4.1.....	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกปี สำหรับอาคารสำนักงานจากการสำรวจของกระทรวงพลังงานในปี พ.ศ. 2558 มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.2 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.5 ในปี พ.ศ. 2559 (กระทรวงพลังงาน, 2558) การใช้พลังงานในอาคารส่วนใหญ่ใช้ในช่วงดำเนินงานระบบอาคาร คือระบบทำความเย็น ระบบแสงสว่าง และอื่น ๆ โดยอาคารทั่วไปนั้นใช้พลังงานไปกับระบบทำความเย็นปรับอากาศมากเป็นอันดับแรก รองลงมาคือ ระบบแสงสว่าง และผลจากการจำลองการใช้พลังงานจากอาคารสำนักงานต้นแบบซึ่งอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ สวีชญา ดาวประกายมงคล (2552) (แผนภูมิที่ 1.1) ซึ่งสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของภาระทำความเย็นนั้นเกิดจากความร้อนทั้งจากภายนอกอาคาร และภายในอาคาร



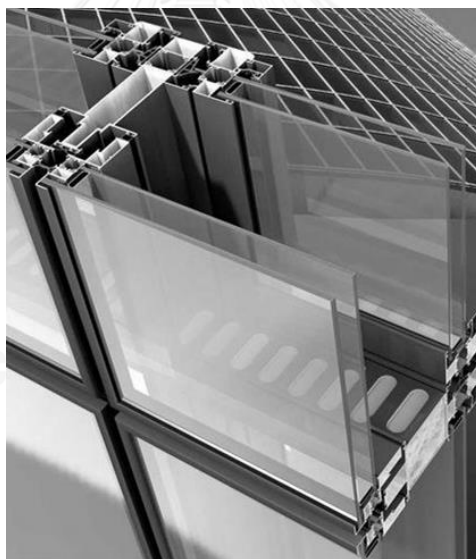
แผนภูมิที่ 1.1 ผลจากการจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบของ สวีชญา ดาวประกายมงคล (2552)

(ที่มา: จำลองโดย ชยพล เพียรชอบธรรม ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.0)

ความร้อนที่สะสมในอาคาร โดยทั่ว ๆ ไปจะมาจาก 4 สาเหตุ ได้แก่ ความร้อนภายนอกจากดวงอาทิตย์ ความร้อนภายในจากคนที่ทำงานในอาคาร และเครื่องใช้สำนักงานต่างๆ ความร้อนจากแสงสว่าง (จากหลอดไฟ และบัลลาสต์) และความร้อนจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในอาคาร ความร้อนจาก

รังสีอาทิตย์เป็นความร้อนที่มีปริมาณมาก เมื่อเทียบกับความร้อนจากส่วนอื่นๆ ความร้อนในส่วนนี้จะเข้าสู่อาคารได้ 2 ทาง ได้แก่ ความร้อนที่ผ่านหลังคา และความร้อนที่ผ่านหน้าต่าง ผนัง หรือ กำแพง ซึ่งความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่ผ่านเข้ามาทางช่องเปิด เช่น ช่องแสงหน้าต่างกระจกจะมากที่สุดถึง 2 เท่า ของความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ที่ผ่านเข้ามาทางหลังคา (ธนะชัย ถาวรวัฒน์สกุล, 2555) ทำให้การลดความร้อนที่ผ่านมาจากผนังและกระจกเป็นเรื่องสำคัญ หนึ่งในเทคโนโลยีที่ช่วยในการลดความร้อนดังกล่าวคือ “ผนังกระจกสองชั้น (Double skin Façade)”

มีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการกันความร้อนของผนังกระจกสองชั้นของ Haase and Amato (2007) ที่ฮ่องกง พบว่าผนังกระจกสองชั้นสามารถลดภาระทำความเย็นของอาคารได้ในช่วงเดือนที่มีอากาศร้อน และยังได้ทำการทดลองอีกครั้งในปีเดียวกันเทียบระหว่างผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและวิธีกลพบว่า ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล (Active airflow) สามารถลดภาระทำความเย็นในอาคารในช่วงเดือนที่มีอากาศร้อนได้มากกว่าผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive airflow) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาประสิทธิภาพในรูปแบบผนังกระจกสองชั้นที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนในภูมิอากาศร้อนชื้นในกรุงเทพฯ หรือ ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล (Active air flow windows)



รูปที่ 1.1 ผนังกระจกสองชั้น

(แหล่งที่มา: <http://www.archiexpo.com/prod/aden-meta/product-149704-1711118.html>)

การศึกษาเกี่ยวกับผนังกระจกสองชั้นนี้สามารถพบได้ทั่วไปในเมืองหนาวในประเทศแถบตะวันตก นอกจากนั้นยังพบได้ในบางประเทศที่มีสภาพอากาศใกล้เคียงกับประเทศไทยอย่างจีน (Wang, Chen et al., 2016) แต่งานวิจัยเหล่านั้นมุ่งเน้นไปในเรื่องอุณหภูมิภายในห้องและอุณหภูมิภายใน Cavity และการทดลองผนังกระจกสองชั้นใช้การจำลองรังสีอาทิตย์จากหลอดไฟ (Luo, Zhang et al., 2017) สำหรับประเทศไทยมีการศึกษามาบ้างแล้วแต่เป็นการศึกษาในระบบระบายอากาศด้วยธรรมชาติ และไม่มีม่านภายใน (เชษฐพรณ สินเจิมสิริ, 2552) การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนของผนังกระจก

สองชั้นใช้การระบายอากาศด้วยวิธีกล (Active airflow window) ด้วยม่านบังแดด และการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ ในสภาวะอากาศร้อนขึ้นในประเทศไทย รวมถึงการหาตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-value) และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎี และตัวแปรที่มีผลต่อการป้องกันความร้อน และการถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณค่า U-Value เพื่อใช้ในการคำนวณในแบบจำลองอาคารต่อไป
3. ศึกษาหาข้อสรุปความสัมพันธ์ของรูปแบบทางกายภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีผลต่อความสามารถในการป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและการลดภาระทำความเย็นของอาคารประเภทสำนักงาน
4. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการใช้ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- ศึกษาผนังกระจกสองชั้นในรูปแบบของการระบายอากาศโดยวิธีกล และแบบที่มีม่านบังแดด
- ใช้กระจกใส 6 มม. และมู่ลี่พลาสติก ในการทดลองเท่านั้น
- ความกว้างช่องระหว่างกระจก (Cavity) และความกว้างช่องลมเข้าและออกเท่ากัน
- ติดตั้งกล่องทดลองในสถานที่เปิด และศึกษาจากสภาพภูมิอากาศจริงในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม เวลา 8.00 น. – 18.00 น.
- ศึกษาในเขตอากาศร้อนขึ้น ในประเทศไทย
- จำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

แบ่งออกเป็น 4 ส่วนได้แก่

1. การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้นทั้งแบบระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและระบายอากาศด้วยวิธีกล รวมทั้งงานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการป้องกันความร้อน และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
2. การทดลองโดยใช้กล่องทดลองจำลองจากขนาดความสูงฝ้าเพดานในสำนักงานจริงตั้งรับแสงแดด และภูมิอากาศจริงในประเทศไทย เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนระหว่างผนังกระจกชั้นเดียวกับผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล โดยมีตัวแปรคือการมีหรือไม่มีม่าน และอัตราการระบายอากาศภายใน cavity ต่างๆ รวมทั้งหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น (U-Value) ของแต่ละกรณี

3. การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยนำค่า U-Value จากการคำนวณในข้อ 2 เพื่อหาภาระทำความเย็นของแต่ละกรณี
4. การเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และหาอัตราการคืนทุนระหว่างการใช้ผนังกระจกชั้นเดียวและกระจกสองชั้นโดยใช้ราคากระจกและม่านที่เหมาะสมกับตลาดภายในประเทศด้วยวิธีการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period – PB)

1.5 สมมติฐานของการวิจัย

ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศโดยวิธีกล มีความสามารถในการลดความต้องการใช้พลังงานในการทำความเย็น สามารถช่วยประหยัดพลังงาน และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ มากกว่าผนังกระจกชั้นเดียวในอาคารประเภทสำนักงาน ในสภาวะสภาพอากาศประเทศไทย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบตัวแปรที่มีผลต่อการป้องกันความร้อน และการถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้น
2. ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) เพื่อการคำนวณระบบผนังกระจกสองชั้นในโปรแกรมจำลองพลังงาน
3. ได้แนวทางในการออกแบบ ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน
4. ได้ทราบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการเลือกใช้ผนังกระจกสองชั้น

ตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ของวัตถุประสงค์การศึกษา วิธีการศึกษา และผลที่คาดว่าจะได้รับ

วัตถุประสงค์ของการศึกษา	วิธีการศึกษา	ผลที่คาดว่าจะได้รับ
ศึกษาข้อมูลพื้นฐาน และทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้น ระบายอากาศด้วยวิธีกล	ทบทวนวรรณกรรมข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบผนังกระจกสองชั้น รวมถึงวิธีการทดลองที่ใช้ในการทดสอบ	ได้ทราบข้อมูลพื้นฐาน และทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของระบบผนังกระจกสองชั้น
ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณหาค่า U-Value เพื่อใช้ในการคำนวณในแบบจำลองอาคารต่อไป	กำหนดตัวแปรในการทดลอง	ได้ทราบตัวแปรที่มีผลต่อการป้องกันความร้อน และการถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้น
	ออกแบบกล่องทดลอง	
	ทำการวัดอุณหภูมิ ภายในจุดต่างๆของกล่องทดลอง	ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) เพื่อการคำนวณระบบผนังกระจกสองชั้นในโปรแกรมจำลองพลังงาน
ศึกษาหาข้อสรุป ความสามารถในการป้องกันความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและการลดภาระทำความเย็นของอาคารประเภทสำนักงาน ของผนังกระจกสองชั้น ระบายอากาศด้วยวิธีกล	นำค่า U-Value ของผนังแต่ละรูปแบบมาคำนวณภาระการทำความเย็นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงาน	ได้แนวทางในการออกแบบ ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน
ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการใช้ผนังกระจกสองชั้น ระบายอากาศด้วยวิธีกล	วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	ได้ทราบถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในการเลือกใช้ผนังกระจกสองชั้น ระบายอากาศด้วยวิธีกล

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

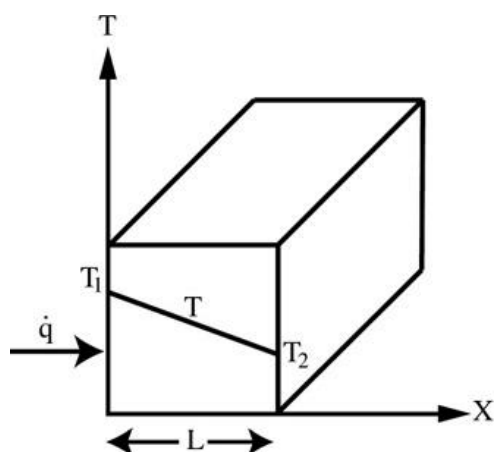
การถ่ายเทความร้อนคือ “การถ่ายเทพลังงานเนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่าง” เมื่อไหร่ก็ตามที่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้น สามารถแบ่งประเภทการถ่ายเทความร้อนจากลักษณะกระบวนการถ่ายเทได้สามรูปแบบคือ เมื่อถ่ายเทผ่านตัวกลางที่หยุดนิ่งไม่ว่าจะเป็นของแข็งหรือของเหลวจะเรียกว่า การนำ (Conduction) เมื่อถ่ายเทผ่านตัวกลางที่เคลื่อนไหวหรือของไหลเรียกว่า การพา (Convection) และเมื่อถ่ายเทแบบไม่มีตัวกลางแต่ใช้การแผ่รังสีด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเรียกว่า การแผ่ (Radiation) (Incropera and Dewitt, 1996)

การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อนเป็นกระบวนการระดับ โมเลกุล และอะตอม เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลที่มีความร้อนมากไปสู่โมเลกุลที่มีความร้อนน้อยผ่านการสั่นของโมเลกุลไปสัมผัสโมเลกุลข้างเคียง จะเกิดขึ้นกับตัวกลางที่หยุดนิ่งโดยเฉพาะของแข็ง ยังมีโมเลกุลที่เยอะและหนาแน่นมากพลังงานความร้อนก็จะสามารถส่งผ่านหรือนำภายในโมเลกุลได้เร็วและปริมาณมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้กับของเหลวที่หยุดนิ่ง

การคำนวณกระบวนการถ่ายเทความร้อนต้องคำนวณในเชิงของอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนหรือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทภายในหนึ่งหน่วยเวลา สำหรับการนำความร้อนใช้กฎของ Fourier (Fourier's Law) กล่าวว่า ในระนาบหนึ่งมิติ (รูปที่ 2.1) มีการกระจายความร้อนแบบ T สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$q_x'' = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$



รูปที่ 2.1 การถ่ายเทความร้อนในระนาบหนึ่งมิติ

(แหล่งที่มา: <http://www.globalspec.com/reference/64952/203279/chapter-5-load-estimating-fundamentals>, 26/5/60)

ปริมาณความร้อน (Heat flux- q_x), W/m^2 คืออัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทาง x ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิเป็นสัดส่วนกับระยะทางที่ความร้อนถ่ายเทไปหรือ $\Delta T/\Delta X$ โดยสัดส่วนดังกล่าวมีค่าคงที่ k หรือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Thermal Conductivity, $W/m^2 \cdot k$) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวัสดุและการติดลของ k นั้นแสดงให้เห็นว่าทิศทางการถ่ายเทความร้อนไปในทางลดซึ่งจากรูปที่ 2.1 สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

ดังนั้นสมการปริมาณความร้อนจะเป็น

$$q_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

ในแง่ของการเป็นผนังอาคาร ปริมาณความร้อนนี้เป็นปริมาณความร้อน (q_x) ที่ถูกถ่ายเทผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่สามารถทำให้เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อน (q_x) เมื่อผ่านพื้นที่ขนาด A สมการจะเขียนได้ดังนี้

$$q_x = q_x'' \cdot A \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

และเมื่อรวมสมการ 2.2 และ 2.3 ได้ดังนี้

$$q_x = k \frac{T_1 - T_2}{L} \cdot A \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

เมื่อผนังอาคารหนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังเท่ากับ U (Heat transfer coefficient, $W/m^2 \cdot k$) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อนของผนัง R หรือ $U=1/R$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

เมื่อ

$$R = \frac{\Delta x}{K} \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

ดังนั้น

$$U = \frac{K}{\Delta x} \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

และเมื่อ $\Delta x=L$ แล้วสมการการนำความร้อน (Conductivity) ในแง่ของการคำนวณผนังอาคารที่มีพื้นที่ A , m^2 และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง U , $W/m^2 \cdot k$ แล้วสมการสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q = UA\Delta T \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (W)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ($W/m^2 \cdot k$)

A คือ พื้นที่ผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน (m^2)

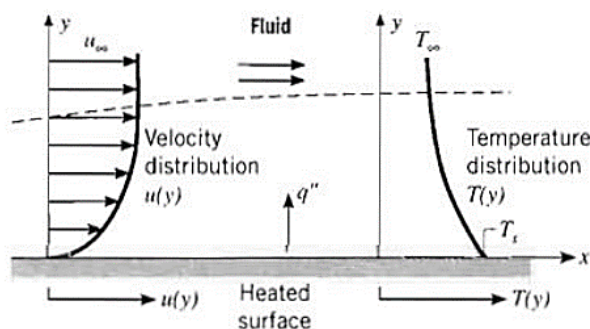
ΔT คือ ความต่างของอุณหภูมิ ($^{\circ}K$)

การพาความร้อน

การพาความร้อนคือการสะสมพลังงานในระดับโมเลกุลเมื่อโมเลกุลเคลื่อนไหวแบบสุ่มหรือสั่นทำให้เกิดการนำความร้อนระหว่างโมเลกุลและยังเกิดการไหลของโมเลกุลผ่านแรงภายนอก โมเลกุลจะลำเลียงความร้อนไปหาโมเลกุลอื่นที่อยู่โดยรอบ ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากเครื่องกล กระบวนการการพาความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนโดยแรงขับ” (Force convection) แต่ถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลอันเนื่องมาจากความต่างระหว่างอุณหภูมิ กระบวนการการพาความร้อนแบบนี้จะเรียกว่า “การพาความร้อนโดยธรรมชาติ” (Free convection or natural convection)

เมื่อนำพื้นผิวที่มีความร้อนสะสมอยู่วางอยู่บนระนาบแกน x แล้วพัดของไหลผ่านทิศทางขนานกับระนาบดังกล่าว จะทำให้ความเร็วของของไหลนั้นมีความเร็วที่พื้นผิวระนาบหรือ y_0 เป็น 0 และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามแกน y จนถึงความเร็วที่อนันต์ เรียกว่า Hydrodynamic หรือ Boundary layer ในแง่ของอุณหภูมิตามที่ผิวหรือ y_0 จะสูงเท่ากับอุณหภูมิจากของระนาบและเมื่อสูงขึ้นตาม

แกน y อุณหภูมิอาจจะสูงกว่าเท่ากับหรือน้อยกว่าอุณหภูมิที่ผิวก็ได้ เรียกอุณหภูมิดังกล่าวนี้ว่า Thermal boundary layer และถ้า อุณหภูมิพื้นผิวมากกว่าอุณหภูมิที่อนันต์ การพาความร้อนจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวกับของไหล (รูปที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมและอุณหภูมิของเลเยอร์แต่ละชั้นในการพาความร้อน (แหล่งที่มา: https://www.researchgate.net/figure/273774906_fig9_Fig-33-Boundary-layer-development-in-convection-heat-transfer-55)

จาก Newton's law of cooling สมการกระบวนการพาความร้อนเกิดจากการแปรผันกันระหว่างอุณหภูมิ ของพื้นผิว (T_s) และอุณหภูมิของไหล (T_∞) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient, h) ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ลักษณะการไหล และคุณสมบัติการสะสมความร้อนของของไหล สมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q = h \cdot A(T_\infty - T_s) \quad (\text{สมการที่ 2.9})$$

เมื่อ

Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

A คือ พื้นที่ผิวที่ถูกพาความร้อน (m^2)

T_∞ คือ อุณหภูมิของไหล ($^\circ\text{K}$)

T_s คือ อุณหภูมิผิว ($^\circ\text{K}$)

การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่ความร้อนเป็นการเปลี่ยนรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมหรือโมเลกุลพลังงานความร้อนในการแผ่คลื่นลำเลียงผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetics wave) กล่าวคือไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการลำเลียง อ้างอิงจากกฎของ Stefan-Boltzmann's law วัตถุดำ

(Black body) มีอุณหภูมิที่ T_s วัตถุดำจะแผ่พลังงานออกมา เป็น Q โดยมีค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann (σ) จะได้สมการดังนี้

$$Q = \sigma T_s^4 \quad (\text{สมการที่ 2.10})$$

ซึ่งวัตถุดำเป็นวัตถุในอุดมคติ เมื่อพลังงานความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัตถุจริงจะน้อยกว่า วัตถุดำในขณะที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ซึ่งวัตถุปกติจะมีค่าคงที่ที่เป็นคุณสมบัติของแต่ละวัตถุ (ϵ) บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการแผ่รังสีเมื่อเทียบกับวัตถุดำ ซึ่งขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัตถุ และเมื่อวัตถุนั้น มีพื้นที่ผิวเท่ากับ A สามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (\text{สมการที่ 2.11})$$

และเมื่อการแผ่รังสีจากวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิ T_s แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศโดยรอบ ที่มีอุณหภูมิ T_{sur} พลังงานความร้อนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (\text{สมการที่ 2.12})$$

เมื่อ

Q คือ พลังงานความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสี (W)

ϵ คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ

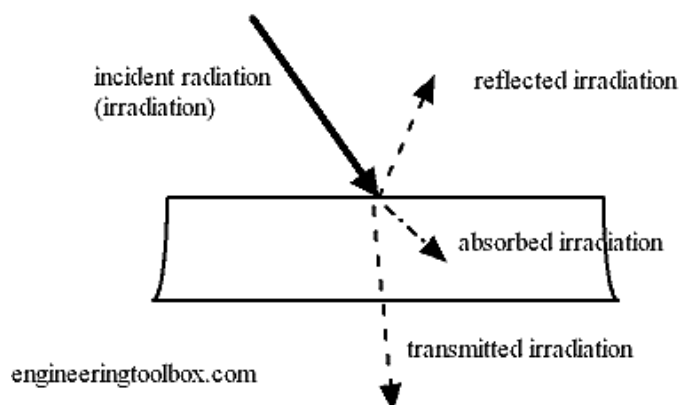
σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann เท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A คือ พื้นที่ที่เกิดการแผ่รังสี (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิว ($^{\circ}\text{C}$)

T_{sur} คือ อุณหภูมิรอบข้างที่แลกเปลี่ยน ($^{\circ}\text{C}$)

พลังงานที่ตกลงบนผิววัตถุจะถูกดูดซับเข้าไปในวัตถุ โดยวัตถุทึบแสง (Opaque) เมื่อรับรังสีอาทิตย์จะดูดซับรังสีเข้าสู่วัตถุและสะท้อนรังสีบางส่วนออกไป ในขณะที่วัตถุโปร่งแสง (Transparent) จะมีการดูดซับรังสีเข้าสู่วัตถุ สะท้อนรังสีบางส่วน และส่งผ่านรังสีบางส่วนทะลุออกไป ดังรูปที่ 2.3



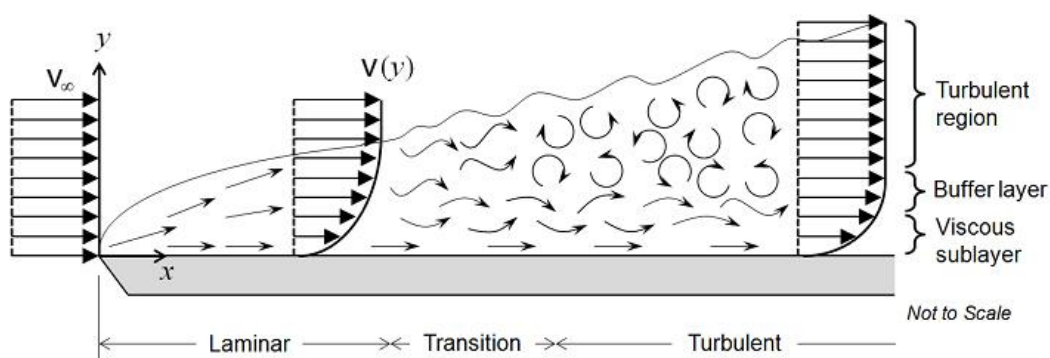
รูปที่ 2.3 ลักษณะรังสีความร้อนที่ตกกระทบวัตถุโปร่งแสง

(แหล่งที่มา: http://www.engineeringtoolbox.com/radiation-heat-transfer-d_431.html)

2.1.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient, h)

การจำลองอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 จะต้องหาค่า SHGC หรือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ซึ่งจะเป็นผลรวมระหว่างค่าการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (Solar Transmittance, T) และค่าการดูดกลืนรังสี (Absorptance, α) ของระบบผนังกระจกทั้งชั้นนอกและชั้นใน ส่วนหนึ่งของการดูดกลืนรังสีจะถูกพาความร้อนด้วยอากาศที่พัดอยู่ภายใน Cavity

ลักษณะการไหลบนระนาบเรียบ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการไหลแบบราบเรียบ

(ดัดแปลงจาก: <https://www.comsol.com/blogs>)

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีอัตราการไหลสม่ำเสมอ V_∞ จะเกิดการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) จนกระทั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นอยู่กับค่าความหนืดของของไหล (Viscosity, ν) และความเร็วของของไหลในส่วน Transition และจะกลายเป็นการไหลแบบแปรปรวน (Turbulent Flow) ซึ่งรูปแบบการไหลและความเร็วของการไหลส่งผลถึงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ทั้งหมดนั้นสามารถหาได้จากตัวแปรไร้มิติ (Non-dimensional Groups)

กลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Non-dimensional Groups)

ในการหาพิจารณาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient, h) ต้องทำการคำนวณตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Group) 3 ค่าได้แก่ นัสเซลท์นัมเบอร์, เรย์โนลด์นัมเบอร์, และแพลนด์เทิลนัมเบอร์ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย ขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหล ความเร็วของการไหล คุณสมบัติของของไหล และอุณหภูมิของของไหลเพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไปคำนวณในสมการการพาความร้อนในช่องอากาศ

นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number, Nu) กล่าวถึงการเพิ่มขึ้นของการถ่ายเทความร้อนผ่านของไหลซึ่งเป็นผลจากอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อนในเลเยอร์เดียวกัน ซึ่งจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Nu = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\delta}{k} \quad (\text{สมการที่ 2.13})$$

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

δ คือ ความยาวส่วนที่ศึกษา (m)

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

ถ้าค่า Nu เท่ากับ 1 แสดงว่าไม่มีการพาความร้อนและการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนอย่างเดียวแต่ถ้าค่า Nu มีค่ามากกว่า 1 มากเท่าไรแสดงว่าเกิดการพาความร้อนมากขึ้นเท่านั้น (เชษฐพรณ สีนเจิมสิริ, 2009: 29 อ้างถึงใน สมศรี จรุงเรือง, 2542: 221)

เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) กล่าวถึงอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertia forces) กับแรงหนืดของของไหล (Viscous forces) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Re = \frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}} = \frac{V\delta}{\nu} \quad (\text{สมการที่ 2.14})$$

V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

δ คือ ความยาวส่วนที่ศึกษา (m)

ν คือ ค่าความหนืด (m^2/s)

ถ้าค่า Re มากหมายถึงแรงเฉื่อยที่มากเมื่อเทียบกับความหนืดดังนั้นความหนืดไม่สามารถป้องกันการแปรปรวนของของไหลและหมายถึงการไหลแบบแปรปรวน (Turbulent flow) ซึ่งตัวเลขที่กำหนดแบ่งแยกระหว่างการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบแปรปรวน (Turbulent flow) คือค่าวิกฤติ ($Re_{critical} = 5 \times 10^5$)

แพลนด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number, Pr) กล่าวถึงความสัมพันธ์ของความหนาของขอบเขตของเลเยอร์ (Boundary layer) ระหว่างขอบเขตความเร็วของของไหล และขอบเขตอุณหภูมิของของไหล ซึ่งเป็นผลจากอัตราส่วนของคุณสมบัติของของไหลแสดงได้ดังนี้

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{สมการที่ 2.15})$$

ν คือ ค่าความหนืด (m^2/s)

α คือ ค่าการแพร่ความร้อน (m^2/s)

μ คือ ค่าความหนืดพลวัต ($N \cdot s/m^2$)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)

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

การไหลผ่านระนาบเรียบ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับระนาบเรียบสามารถแก้ได้โดยกฎอนุรักษ์มวลของสาร โมเมนตัม และ ความสมดุลของพลังงาน สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Nu = \frac{hL}{k} = C Re_L^m Pr^n \quad (\text{สมการที่ 2.16})$$

C, m, n คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการไหล

L คือ ความยาวของระนาบที่ศึกษา (m)

การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

นัสเซลท์นัมเบอร์ ณ ตำแหน่ง x สามารถคำนวณการไหลแบบราบเรียบได้ดังสมการนี้

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{สมการที่ 2.17})$$

นัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยของทั้งแผ่นระนาบความยาว L สำหรับช่วงที่เป็นการไหลแบบราบเรียบสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (\text{สมการที่ 2.18})$$

จากค่าวิกฤติของเรย์โนลด์ 5×10^5 ตำแหน่งของจุดเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบแปรปรวน x_{cr} สามารถหาได้ดังนี้

$$Re_{cr} = 5 \times 10^5 = \frac{V_\infty x_{cr}}{\nu} \quad (\text{สมการที่ 2.19})$$

V_∞ คือ อัตราเร็วของของไหล (m/s)

x_{cr} คือ ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบไปสู่การไหลแบบแปรปรวน (m)

ν คือ ค่าความหนืด (m^2/s)

การไหลแบบแปรปรวน (Turbulent Flow)

นัสเซลท์นัมเบอร์ ณ ตำแหน่ง x สามารถคำนวณการไหลแบบแปรปรวนได้ดังสมการนี้

$$Nu_x = \frac{hx}{k} = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad (\text{สมการที่ 2.20})$$

นัสเซลท์นัมเบอร์เฉลี่ยของทั้งแผ่นระนาบความยาว L สำหรับช่วงที่เป็นการไหลแบบแปรปรวนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Nu_L = \frac{hL}{k} = 0.037Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \text{ (สมการที่ 2.21)}$$

2.1.3 การคำนวณ OTTV

ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกของอาคาร Overall thermal temperature หรือ OTTV คือดัชนีวัดค่าเฉลี่ยของความร้อนที่เข้ามาสู่พื้นที่ปรับอากาศผ่านผนังภายนอกนั้นหมายถึงภาระทำความเย็นที่เกิดขึ้นจากความร้อนที่เข้ามา เพื่อใช้ประเมินความสามารถในการป้องกันความร้อนของเปลือกอาคารภายนอกซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านเปลือกอาคารมีดังนี้

1. ผนังทึบ ขึ้นอยู่กับสองตัวแปรคือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) คือค่าที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละวัสดุ บ่งบอกถึงความยอมให้พลังงานความร้อนผ่านวัสดุไปได้มากแค่ไหนซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน (R-Value) และมวลอุณหภาพ (Thermal mass) หมายถึงวัสดุที่มีมวลมากและมีความสามารถในการหน่วงความร้อนไม่ให้เข้าอาคารได้ขึ้นอยู่กับความจุความร้อน และความหนาของวัสดุ
2. หน้าต่าง-กระจก มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังเช่นกัน โดยกระจกจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนัง (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC) บ่งบอกถึงความยอมให้รังสีผ่านทะลุเข้าไปสู่ตัวอาคาร
3. การบังแดด คือแผงบังแดดหรือครีบบังแดดทั้งแนวตั้งและแนวนอนที่ดักรังสีก่อนถึงผนังหรือกระจกไม่ให้เข้าสู่ตัวอาคารซึ่งแต่ละรูปแบบของการบังแดดจะสามารถคำนวณออกมาเป็น ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของอุปกรณ์บังแดด (Shading Coefficient, SC)
4. สัดส่วนหน้าต่างต่อผนังอาคาร หรือ Window to Wall Ratio (WWR) คือสัดส่วนระหว่างผนังและหน้าต่างของอาคารสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$WWR = \frac{\text{overall window area}}{\text{overall wall area}} \text{ (สมการ 2.22)}$$

5. ทิศทางอาคาร มีผลต่อสัดส่วนของอาคารที่หันหน้าไปทางทิศที่มีรังสีจากอาทิตย์ส่องเท่าใดยังหันหน้าที่มีพื้นที่รับรังสีเยอะก็จะยิ่งทำให้อาคารร้อนขึ้น

ในการคำนวณ OTTV นั้นจะต้องคำนวณจากผนังแต่ละด้านและนำค่า OTTV ที่ได้มาเฉลี่ยรวมกันเพื่อหา OTTV เฉลี่ยหรือค่าเฉลี่ยของความร้อนที่เข้ามาสู่พื้นที่ปรับอากาศผ่านผนังภายนอก จากปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้การคำนวณ OTTV จะเกิดขึ้นจากสามส่วนด้วยกันคือ ความร้อนที่เกิดจากการนำ

ผ่านผนังทึบ ความร้อนที่เกิดจากการนำผ่านกระจก และความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีผ่านกระจก สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$OTTV_i = (U_w)(1 - WWR)(TD_{eq}) + (U_g)(WWR)(\Delta T) + (WWR)(SHGC)(SC)(ESR) \quad (\text{สมการ 2.23})$$

เมื่อ

$OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา (W/m^2)

U_w คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)

WWR คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างต่อพื้นที่ผนังทึบ

TD_{eq} คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ระหว่างภายนอกและภายในอาคาร รวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ ($^\circ C$)

U_g คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกระจก ($W/m^2 \cdot ^\circ K$)

ΔT คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร ($^\circ C$)

เมื่อได้ค่า $OTTV$ ในแต่ละด้านของผนังอาคารแล้วนำมาเฉลี่ยรวมกันในแต่ละด้านดังนี้

$$OTTV = \frac{(A_{w1})(OTTV_1) + (A_{w2})(OTTV_2) + \dots + (A_{wi})(OTTV_i)}{A_{w1} + A_{w2} + \dots + A_{wi}} \quad (\text{สมการ 2.24})$$

$OTTV_i$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังด้านนอกด้านที่พิจารณา (W/m^2)

A_w คือ พื้นที่ผนังรวมด้านที่พิจารณา (m^2)

2.1.4 คุณสมบัติกระจก

คุณสมบัติกระจกเป็นเรื่องสำคัญเพราะเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงแสงที่จะเข้ามา (Daylight), คุณภาพของแสง (Quality of light), ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ตัวอาคาร (Solar heat gain) สิ่งเหล่านี้ส่งผลโดยตรงกับภาวะน่าสบายทั้งในเรื่องของ อุณหภูมิ และความน่าสบายทางสายตา โดยคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ และ Coating ที่ทำให้ หน้าต่าง, Skylight และผนังโปร่งแสง สามารถนำแสงหรือความร้อนมาเท่าใดประกอบไปด้วยสามอย่างคือ

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (Thermal Conductivity, U-Value)
2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนัง (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)
3. ค่าแสงส่องผ่าน (Visible light transmittance, T_{vis})

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (Thermal Conductivity, U-Value)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังคือตัวแปรที่บ่งบอกว่ากระจกสามารถกันความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ได้ดีแค่ไหนซึ่งวัดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างด้านที่ร้อนกว่าและด้านที่เย็นกว่าหรือ $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ซึ่ง U-Value คือส่วนกลับของค่าการต้านทานความร้อน (R-Value)

ค่า U-Value สามารถวัดตรงกลางของกระจก (Center of glass) หรือทั้งบานกระจกซึ่งรวมวงกบและบานกรอบด้วย ซึ่งในการวัดแต่ละจุดไม่ว่าจะเป็นตรงกลางกระจก ขอบกระจก หรือทั้งบานกระจก จะไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามการวัดแบบทั้งผืนกระจกได้รับความนิยมในการอ้างอิงมากที่สุด

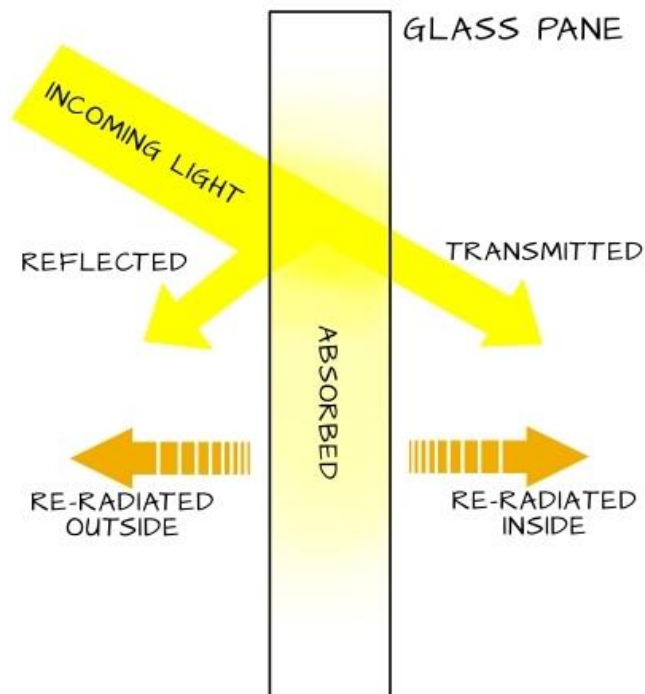
ช่องว่างระหว่างกระจก วัสดุโคตติง ก๊าซที่เติมในช่องว่างกระจก และกรอบบานของกระจกล้วนแล้วแต่มีผลต่อค่า U-Value ในประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวเหมาะกับค่า U-Value ที่ต่ำเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับการเลือกกระจก แต่ในประเทศที่มีภูมิอากาศร้อนค่า U-Value ที่ต่ำสำคัญน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนัง (SHGC) เนื่องจากความร้อนจะมาจากการแผ่รังสีความร้อนภายนอกมากกว่าการนำความร้อนผ่านกระจก

ตารางที่ 2.1 ค่า U-Value และ R-Value ของกระจกชนิดต่างๆ

Construction type	U-value		R-value	
	W/m ² •K	BTU/(h °F ft ²)	m ² •K/W	h °F ft ² /BTU
Single pane	4.8	0.85	0.21	1.2
Double pane, air filled	2.8	0.49	0.36	2.0
Double pane, low-E	2.1	0.37	0.48	2.7
Double pane, low-E, Argon filled	1.9	0.33	0.53	3.0
Triple pane	2.1	0.37	0.48	2.7
Triple pane, low-E, Argon filled	1.4	0.25	0.71	4.1
Quadruple pane, very low-E, Krypton filled	0.74	0.13	1.35	7.7
Quintuple pane, very low-E, Xenon filled	0.51	0.09	1.96	11.1

(แหล่งที่มา: <http://auworkshop.autodesk.com/printpdf/2290>)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนัง (Solar Heat Gain Coefficient, SHGC)



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการของการแผ่รังสีผ่านผนังกระจก

(แหล่งที่มา: <http://auworkshop.autodesk.com/printpdf/2290>)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านผนัง บ่งบอกว่าความร้อนจากแสงอาทิตย์จะสามารถถ่ายเทผ่านกระจกได้มากแค่ไหนและจะสะท้อนออกได้มากแค่ไหน คุณสมบัตินี้หมายถึงความสามารถของทั้งผนังกระจก ขึ้นอยู่กับชนิดของกระจกจำนวนชั้นสีของกระจกการโคัดสะท้อนแสง และการบังเงาของม่านหรือคิรืบังแดด

SHGC เป็นอัตราส่วนไม่มีหน่วยอยู่ระหว่าง 0-1 โดย 1 หมายถึงไม่มีการป้องกันใดๆ หรือรังสีความร้อนจากภายนอกสามารถเข้าไปได้ทั้งหมด และ 0 หมายถึงรังสีความร้อนจากภายนอกไม่สามารถผ่านไปได้เลย ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว SHGC จะอยู่ระหว่าง 0.9-0.2

การเลือก SHGC ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับขนาดและตำแหน่งของช่องเปิด และที่สำคัญภูมิอากาศ ณ ที่อยู่อาศัย ในภูมิอากาศร้อน SHGC เป็นเรื่องสำคัญในการกันรังสีความร้อนจากภายนอกไม่ให้เข้าสู่ตัวอาคาร โดยสามารถประมาณได้ว่าค่า SHGC ควรต่ำกว่า 0.4 ในทางกลับกันในภูมิอากาศหนาว SHGC ที่สูงเป็นเรื่องที่ดีเพราะจะทำให้อาคารได้รับความร้อนผ่านทางกระจกมาสู่ภายในอาคารได้เพื่อลดภาระทำความร้อน

ค่าแสงส่องผ่าน (Visible light transmittance, Tvis)

เป้าหมายสำคัญของกระจกคือนำแสงเข้ามาสู่ตัวอาคาร ค่าแสงส่องผ่าน (Tvis หรือ VLT) คือร้อยละของแสงที่สามารถผ่านกระจกเข้ามาได้ โดยผนังที่บหมายถึง ร้อยละ 0 และช่องเปิดที่โล่งหมายถึงร้อยละ

100 กระฉากที่ไม่ได้ทำการ Tint หรือพลาสติกมักมีค่า Tvis อยู่ที่ร้อยละ 90 หรือมากกว่า Tvis จะไม่วัดคลื่นความถี่ที่สูงหรือต่ำกว่าคลื่นที่มองเห็นกล่าวคือจะวัดแค่แสงที่มนุษย์สามารถมองเห็นเท่านั้น

การมีแสงมากไม่ได้หมายความว่าดีเสมอไปเพราะอาจทำให้เกิด แสงบาดตา และความร้อนที่มากเกินไป กระบวนการ Tint, Frits, และ Coating จะช่วยกำหนดค่า Tvis ที่เหมาะสมได้ซึ่งความเหมาะสมในการเลือกขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริง

ปัจจัยอื่นๆ

Infiltration คือการรั่วซึมของอากาศของช่องเปิด ช่องเปิดที่ปิดมิดชิดไม่ให้อากาศรั่วซึมสามารถส่งผลที่ดีต่อค่า U-Value ได้ถึงร้อยละ 10 หรือมากกว่ามาตรฐานของการรั่วซึมของอากาศอยู่ที่ 0.0015 m/s ในขณะที่กระฉากที่สามารถปิดมิดชิดสามารถลดได้ถึง 0.0001 m/s หรือแม้กระทั่ง 0.00005 m/s

Light distribution angles คือทิศทางในการหักเหแสงผ่านกระจก กระจกทั่วไปจะทำให้แสงทะลุผ่านกระจกเป็นเส้นตรงหรือหักเหไม่มาก แต่ในกระจกที่พิเศษจะหักเหแสงในมุมที่ต่างกันหรือกระจายแสงไปทั่วๆ ห้อง เป็นความสามารถพิเศษที่สำคัญกับ Skylight

Condensation จะปรากฏอยู่ในภูมิภาคที่อากาศภายนอกและภายในต่างกันมากๆ ซึ่งจะทำให้เกิด ราและเชื้อโรคต่างๆ ซึ่งส่งผลเสียต่อคุณภาพอากาศภายใน (Indoor Air Quality) กระจกที่ดีจะสามารถควบคุมการควบแน่นของอากาศได้

Acoustic damping เนื่องจากเสียงสามารถทะลุผ่านกระจกได้ดีกว่าผนัง ในพื้นที่ที่มีเสียงเยอะ กระจกที่ดีจะช่วยกันเสียงจากภายนอกได้ดีโดยเฉพาะกระจกที่มีหลายชั้นและแต่ละชั้นมีความหนาของกระจกไม่เท่ากัน และมีกรอบที่ทำจากวัสดุต่างกัน

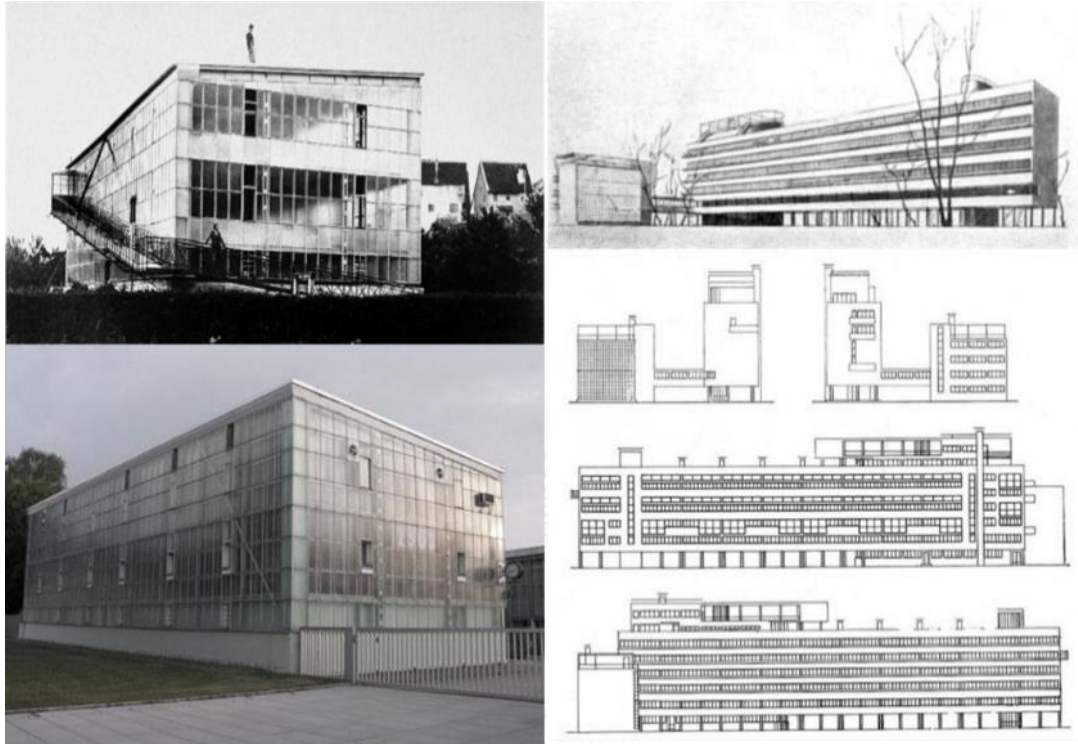
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้น

2.2.1 ประวัติความเป็นมาของผนังกระจกสองชั้น

ประวัติของผนังกระจกสองชั้นถูกกล่าวไว้ในหนังสือ Best Practice for Double Skin Façades (Heimrath, 2007) กระจกสองชั้นถูกนำมาใช้เป็นผนังอาคารครั้งแรกเมื่อปี 1903 ที่เมือง Steiff ประเทศเยอรมนี เพื่อประโยชน์ในการรับแสงธรรมชาติ ในขณะที่สามารถป้องกันอากาศภายนอกทั้งลมที่แรงและอากาศที่หนาวเย็นของภูมิภาคนั้น ผนังกระจกสองชั้นปกคลุมอาคารสามชั้นประกอบไปด้วย ชั้นเก็บของในชั้นแรกและสำนักงานในสองชั้นข้างบน ผนังกระจกสองชั้นทำหน้าที่ได้ดีจึงทำให้เกิดแนวคิดในการสร้างอาคารในรูปแบบเดียวกันนี้ในปี 1904 และ 1908

ต่อมา Otto Wagner นำเสนออาคารที่ใช้ระบบกระจกสองชั้นเป็น Skylight ในงานประกวด Post office saving bank ณ กรุงเวียนนา ประเทศออสเตรีย ก่อนที่จะชนะและได้สร้างจริงในปี 1904 ถึง 1912 จากนั้นผนังกระจกสองชั้นก็เป็นที่รู้จักในวงการสถาปัตยกรรมและมีอาคารที่ใช้ระบบดังกล่าวนี้ เช่น ในประเทศรัสเซีย Moisei Ginzburg ทดลองใช้ผนังกระจกสองชั้นในรูปแบบ Corridor type กับที่พักอาศัย

สำหรับชุมชนแบบบล็อกในอาคาร Narkomfin Building และในปี 1928 Le Corbusier ใช้ผนังกระจกสองชั้นในรูปแบบเดียวกันในอาคาร Centroyuz และในปีต่อมา Cite de Refugi และ Immeuble Clarte



รูปที่ 2.6 อาคารที่ใช้ผนังกระจกสองชั้นในอดีต โรงงาน Steiff ณ เมือง Giengen ประเทศเยอรมนี (ซ้าย)

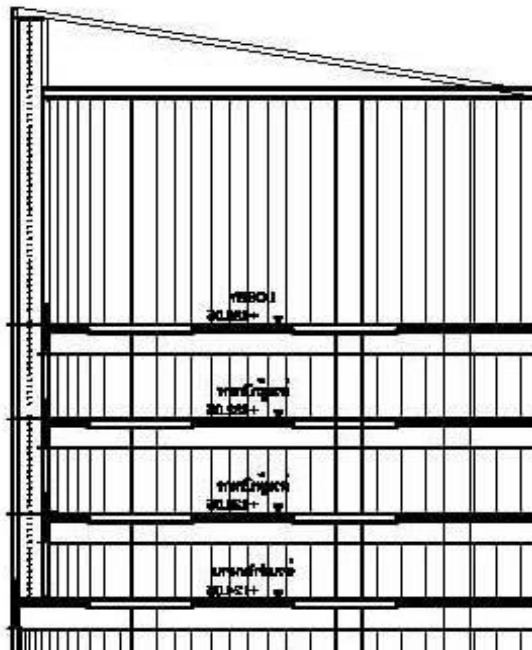
(แหล่งที่มา: <https://www.goethe.de/en/kul/arc/20430390.html>),

Narkomfin Building และ Centroyuz (ขวา)

(แหล่งที่มา: <http://www2.archi.fr/DOCOMOMO-FR/narkomfin-fr.htm>)

ไม่มีการใช้ผนังกระจกสองชั้นในปลายยุค 70 ถึงต้นยุค 80 จนกระทั่งระหว่างยุค 80 ความใส่ใจในสิ่งแวดล้อมเริ่มมีผลกระทบต่อการออกแบบสถาปัตยกรรม และอาคารเขียว (Green Building) ผนังกระจกสองชั้นเริ่มกลับมามีบทบาทอีกครั้ง เช่นในอาคารสำนักงาน Leslie and Godwin

ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้ในอาคารสำนักงานบางแห่ง เช่น อาคารตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย, อาคาร Energy complex และ อาคารศูนย์ราชการแจ้งวัฒนะ (รูปที่ 2.10) โดยทั้งสามอาคารเป็นผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล และในอาคาร Energy Complex เป็นผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านอีกด้วย (รูปที่ 2.7-2.9)



รูปที่ 2.9 รูปแบบผนังกระจกสองชั้นในอาคาร Energy complex
(ที่มา: ENCO Presentation, PowerPoint)



รูปที่ 2.10 อาคารสำนักงานในไทยที่ใช้กระจกสองชั้น อาคารสำนักงานตลาดหลักทรัพย์ (ซ้าย)

(แหล่งที่มา: <https://page.line.me/setgroup>),

อาคารศูนย์ราชการ แจ้งวัฒนะ (ขวาบน) และ อาคาร Energy complex (ขวาล่าง)

(แหล่งที่มา: <http://pttweb2.pttplc.com/citygas/th/project.aspx>)

2.2.2 นิยามของระบบผนังกระจกสองชั้น

ผนังกระจกสองชั้น (Double skin Façade) ในนิยามจาก (Heimrath, 2007) สรุปได้ว่า “คูของกระจกซึ่งถูกแยกด้วยช่องว่างอากาศที่เรียกว่า Cavity หรือ Intermediate space ประกอบไปด้วยกระจกหลักที่มักเป็น Insulated glass และกระจกรองที่มักเป็น กระจกเดี่ยว อากาศในช่องอากาศทำตัวเหมือนเป็นฉนวนกันอากาศภายนอก ลม และ เสียง” กระจกสองชั้นมีข้อดีคือ การเป็นฉนวนป้องกันเสียงจากภายนอก ให้มุมมองที่ดีกับผู้ใช้งานในอาคาร ความสบายตา เห็นทัศนียภาพภายนอกอาคารได้การป้องกันขโมยสามารถป้องกันแมงบั้งแดด ภายในช่องได้ (Jensen, Kalyanova et al., 2008) และที่สำคัญกระจกสองชั้นยังสามารถลดความร้อนที่ผ่านเข้ามาสู่อาคารได้

2.2.3 การแบ่งประเภทผนังกระจกสองชั้น

ในปัจจุบันมีการใช้กระจกสองชั้นในหลายรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมแก่บริบทที่ใช้งานด้วยคุณสมบัติที่ต่างกันทำให้แต่ละรูปแบบของกระจกมีทั้งข้อดีและข้อเสียโดยสามารถแบ่งได้ดังนี้ (ตารางที่ 2.2)

1. ชนิดของผนังกระจกสองชั้น หรือรูปแบบการแบ่ง façade รูปแบบการไหลของอากาศ (Type)
2. แร่งขับเคลื่อนอากาศ (Ventilation Mode)
3. ที่มาของอากาศ (Air flow type)

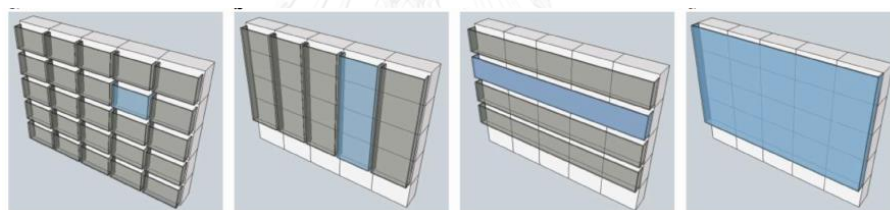
ตารางที่ 2.2 การแบ่งรูปแบบของกระจกสองชั้น (ที่มา: Ajila Aksamija, 2009)

1	Type	Box Window	Corridor Type	Shaft Box	Multi-Storey	
2	Ventilation mode	Natural		Mechanical	Hybrid	
3	Air flow type	Exhaust Air	Supply Air	Static Air Buffer	External Air Curtain	Internal Air Curtain

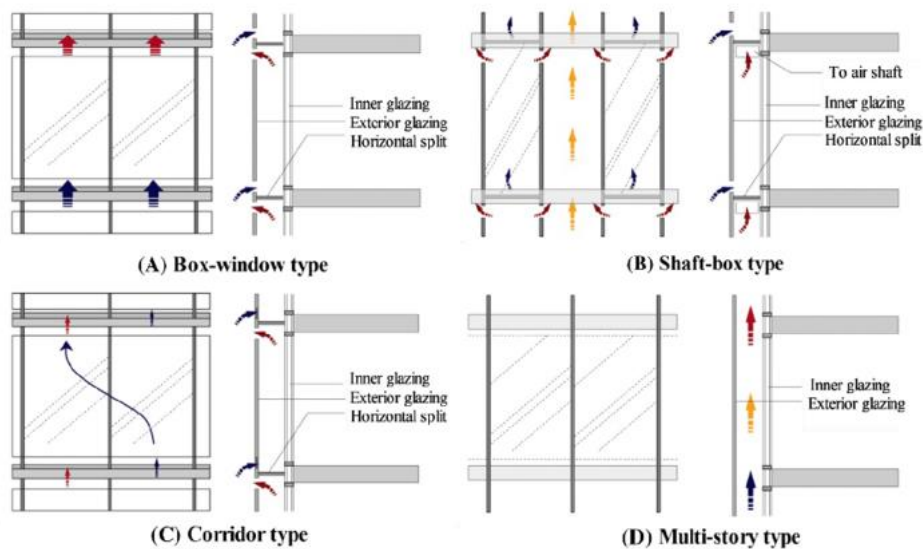
1. ชนิดของผนังกระจกสองชั้น หรือรูปแบบการแบ่ง façade รูปแบบการไหลของอากาศ (Type) โดยแบ่งตามการแบ่งส่วนของผนังสามารถแบ่งได้ 4 รูปแบบ อ้างอิงจากระบบการก่อสร้าง หรือลักษณะการแบ่งของช่องว่างระหว่างกระจก ได้ดังนี้ (Azarbayjani, 2010, Barbosa and Ip, 2014) (รูปที่ 2.11)
 - A. The Box window แบ่งช่องว่างระหว่างกระจกทั้งแนวตั้งและแนวนอนในแกนของการก่อสร้าง แบ่งเป็นห้องต่อห้อง หรือแต่ละช่องกระจก ในรูปแบบนี้กระจกภายในสามารถเปิดเพื่อรับการระบายอากาศธรรมชาติ สามารถป้องกันเสียง และกลิ่นจากห้องสู่อีกห้องได้ เหมาะสมกับการใช้ในที่ที่มีเสียงภายนอกดัง
 - B. The Shaft-box คือรูปแบบพิเศษของแบบ The Box window โดยไม่ถูกกั้นในแนวนอน และยึดคลุมหลายๆชั้นเพื่อสร้าง Stack effect ผนังรูปแบบนี้จำเป็นที่จะต้องมีการเปิด

เล็กน้อยที่ผนังข้างนอก และสามารถเป็นฉนวนสำหรับกันเสียงภายนอก เหมาะสำหรับการใช้
 ในอาคารที่ไม่สูงมาก เพราะความสูงของช่องเพื่อ Stack effect มีความสูงที่จำกัด

- C. The Corridor type ปิดช่องว่างระหว่างกระจกระหว่างชั้น และช่องว่างต่อเนื่องยาวตลอดชั้น
 ช่องนำอากาศเข้าและออกที่เลเยอร์กระจกด้านนอกควรอยู่ใกล้พื้นและเพดาน ในกรณีนี้ควร
 จะใส่ใจเป็นพิเศษในเรื่องของเสียงที่สามารถส่งผ่านช่องอากาศไปสู่ห้องได้ และอากาศที่
 ปล่อยออกจะต้องระวังเข้าสู่ห้องข้างบนได้ โดยมักจะใช้ Fish mouth เพื่อป้องกันการ
 แลกเปลี่ยนกันระหว่างอากาศที่ปล่อยออกภายนอกกับอากาศที่กำลังจะเข้าไปใหม่ และ DSF
 ชนิดนี้ยังเหมาะกับการป้องกันไฟลามจากชั้นสู่อีกชั้น
- D. The Multi-storey style เชื่อมช่องว่างระหว่างกระจกเข้าด้วยกันทั้งทางตั้งและทางนอน
 ขนาดเท่ากับจำนวนห้องหรือบางที่ขยายมากกว่าขนาดตึก การระบายอากาศของช่องว่าง
 ตั้งอยู่ที่ช่องเปิดขนาดใหญ่ที่ชั้นล่างสุด และบนสุด รูปแบบ DSF นี้เหมาะกับสถานที่ที่มีเสียง
 ดังมาก Oesterle (2001) แนะนำว่าบางห้องด้านหลังผนังชนิดนี้จำเป็นต้องระบายอากาศด้วย
 วิธีกล ช่องเปิดด้านบนและด้านล่างสามารถปิดเพื่อทำให้เกิด Greenhouse Effect ในช่อง
 ว่างระหว่างผนังได้ และในฤดูร้อนช่องเปิดจะเปิดเพื่อทำให้เกิด Stack effect



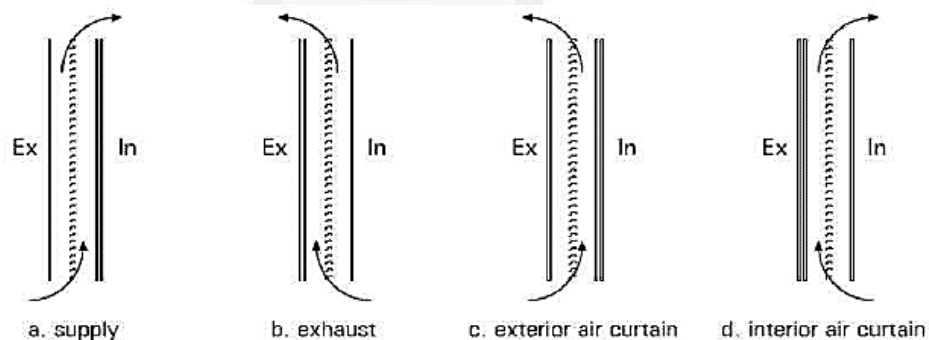
A. The Box Window B. The Shaft-box C. The Corridor Type D. The Multi-storey



รูปที่ 2.11 การแบ่งชนิดของ DSF และการถ่ายเทของอากาศ ตามการแบ่งส่วนของผนัง

(ดัดแปลงจาก: Sabrina Barbosa, 2014)

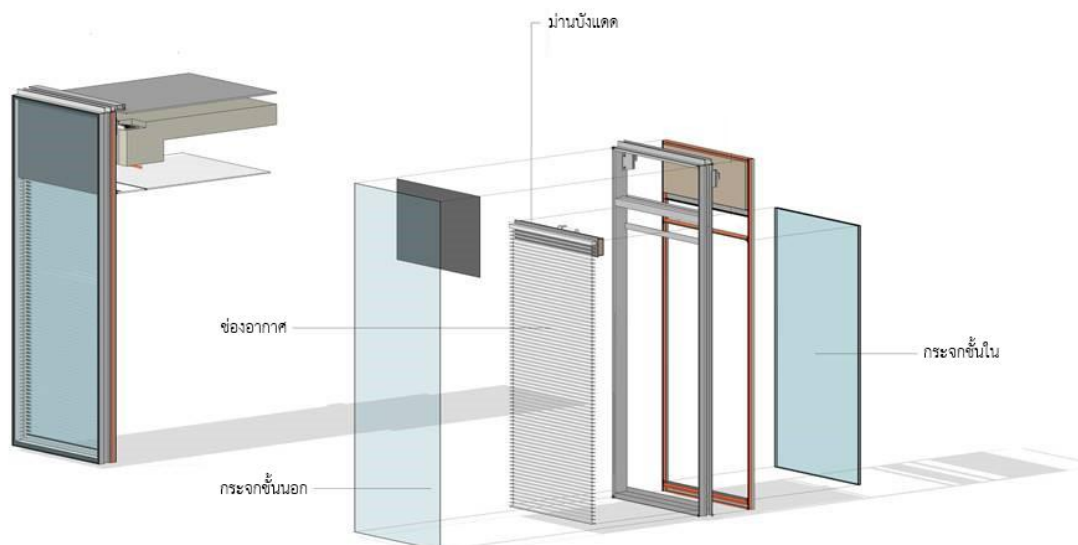
2. ที่มาของแรงขับเคลื่อนอากาศ (Ventilation Mode) แบ่งได้เป็นสามรูปแบบ คือ
 - a. การระบายอากาศโดยใช้เครื่องกล (Mechanical Ventilation หรือ Air Flow window) เกิดขึ้นจากการหมุนของพัดลมทำให้เกิดการไหลของอากาศ โดยส่วนใหญ่จะทำงานร่วมกับระบบปรับอากาศภายในอาคารซึ่งสามารถควบคุมการไหลของอากาศจะทำได้ง่ายกว่าวิธีธรรมชาติ
 - b. การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation) เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และความดัน ทำให้เกิดแรงลอยตัว (Buoyancy) การระบายอากาศแบบนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพอากาศภายนอก
 - c. การระบายอากาศโดยวิธีผสมผสาน (Hybrid Ventilation) ใช้รูปแบบการระบายอากาศทั้งสองรูปแบบข้างต้นผสมผสานกัน
3. ที่มาของอากาศ (Air flow type) (รูปที่ 2.12) (Azarbayjani, 2010)
 - a. Air supply ใช้อากาศภายนอกในการระบายอากาศ อากาศจะเข้าสู่ภายใน หรือในระบบ DSF ส่งผลให้สามารถนำอากาศบริสุทธิ์เข้าสู่ตัวอาคารได้
 - b. Air exhaust อากาศภายในห้องจะถูกปล่อยออกสู่ภายนอก ทำให้สามารถถ่ายเทอากาศออกจากอาคารได้
 - c. Exterior air curtain อากาศภายนอกจะไหลเข้ามาและไหลออกไป สร้างม่านอากาศป้องกันความร้อน
 - d. Interior air curtain อากาศจะไหลจากภายในและไหลออกสู่ภายใน สร้างม่านอากาศป้องกันความร้อน



รูปที่ 2.12 รูปแบบการไหลของอากาศ (Air flow type) (ที่มา: Azarbayjani, 2010)

2.2.4 ส่วนประกอบของผนังกระจกสองชั้น

ผนังกระจกสองชั้นที่ใช้ในทั่วไปจะประกอบไปด้วย 4 องค์ประกอบได้แก่กระจกชั้นนอก ช่องอากาศ ม่านบังแดด และกระจกชั้นใน (รูปที่ 2.13) ซึ่งจะแตกต่างกันในเรื่องของช่องอากาศที่จะไหลเข้าจากภายนอกหรือภายในซึ่งมีรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆดังนี้



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของผนังกระจกสองชั้น

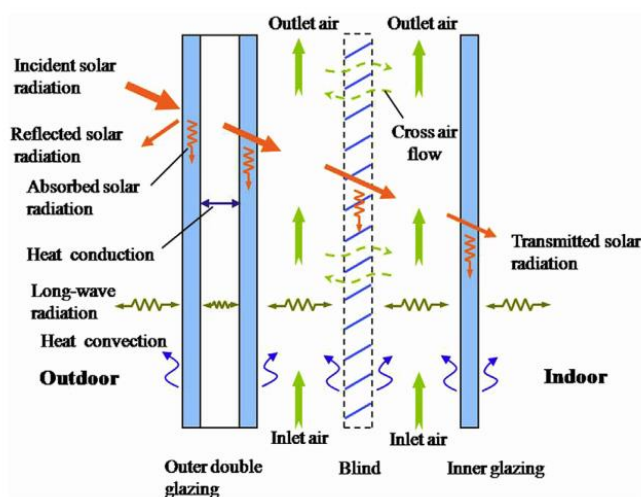
(ดัดแปลงจาก: Johnson, 2015)

1. กระจกชั้นนอก ในอาคารสูง (Outer skin) อาคารใหญ่พิเศษ และอาคารใหญ่จะต้องเป็นกระจกสองชั้นขึ้นไปประกบกันโดยมีวัสดุคั่นกลางระหว่างชั้นและยึดกระจกแต่ละชั้นให้ติดแน่นเป็นแผ่นเดียวกัน และกระจกแต่ละชั้นต้องมีคุณสมบัติในการป้องกันหรือลดอันตรายจากการบาดของเศษกระจก เมื่อกระจกแตก และวัสดุคั่นกลางต้องยึดเศษหรือชิ้นกระจกไม่ให้หลุดออกมาเมื่อกระจกแตกร้าวหรือราน และจะต้องมีปริมาณการสะท้อนแสงได้ไม่เกินร้อยละสามสิบ (กฎกระทรวง ฉบับที่ 48, 2540)
2. ช่องอากาศ (Cavity) เป็นช่องระหว่างกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในสามารถใส่ม่านบังแดด ช่องอากาศนี้จะทำหน้าที่พาความร้อนจากภายในห้องผ่านข้างล่างไปสู่ข้างบนและถูกดูดผ่านได้ผ้าไปสู่ AHU
3. ม่านบังแดด (Venetian blind) ในอาคารมักจะเป็นม่านอัตโนมัติ หรือม่านที่สามารถเปิด-ปิดได้จากภายในอาคาร ม่านจะช่วยบังรังสีความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร
4. กระจกชั้นใน (Inner skin) มักจะเป็นกระจกอินซูลเทท 2 หรือ 3 ชั้น เพื่อกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทเข้ามาในอาคารได้

2.2.5 การถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น

การถ่ายเทความร้อนของผนังกระจกสองชั้นถูกกล่าวไว้ในบทความของ Wang, Chen et al. (2016) ว่ากระจกสองชั้นประกอบไปด้วยกระจกภายนอกแบบสองชั้น และกระจกภายใน (หรือบางกรณีกระจกภายในสองชั้นกับกระจกภายนอก) กระจกภายนอกประกอบไปด้วยกระจกชั้นนอก ช่องว่างภายใน (Cavity) และกระจกภายใน อุปกรณ์กันแดดภายในช่อง Cavity ช่วยลดการส่งผ่าน

ของรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์มาตกกระทบผิวกระจกภายนอกสุดบางส่วนของรังสีจะสะท้อนกลับ อีกส่วนหนึ่งจะถ่ายเทเข้าสู่ DSF ส่วนที่เหลือจะถูกดูดกลืนโดยกระจก และ/หรือ ตัวกลางอื่นๆ การนำ การพา และการแผ่จะเกิดขึ้นพร้อมๆกันใน ระบบ DSF ลมที่พัดในช่อง Cavity จะพาความร้อนที่สะสมอยู่ในกระจกและอุปกรณ์กันแดด ซึ่งจะช่วยในการลดความร้อนที่ผ่านช่อง Cavity และ อากาศภายใน (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.14 การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกของกระจกสองชั้น (ที่มา: Wang, Chen et al, 2016)

การถ่ายเทความร้อนที่กระจกชั้นนอก

เมื่อรังสีอาทิตย์มาตกกระทบบนผนังกระจกชั้นนอกรังสีบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับไปยัง อากาศภายนอกและส่วนที่เหลือจะแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและจะถูกนำ (Conduction) ผ่านกระจกเข้าไปสู่ภายใน Cavity ในขณะที่เดียวกันรังสีคลื่นยาว (Long-wave radiation) ก็แผ่รังสีเข้าไปในระบบผนังผ่านทางกระจกนอกด้วย

การถ่ายเทความร้อนภายใน Cavity

จากกระจกชั้นนอกความร้อนที่ถูกนำผ่านกระจกชั้นนอกเข้ามาบางส่วนจะเปลี่ยนตัวเองเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกครั้งและแผ่เข้ามาใน Cavity ในขณะที่อีกส่วนจะถูกพา (Convection) เข้ามาภายใน Cavity ความร้อนทั้งสองส่วนจะถูกดักด้วยม่านบังแดดภายใน Cavity ก่อนจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนบนผิวม่านบังแดด และเกิดกระบวนการเดียวกันซ้ำอีกครั้งไปสู่กระจกชั้นใน ความร้อนที่เกาะอยู่บน ผิวกระจกชั้นนอก ผิวของม่านบังแดด และผิวของกระจกชั้นในจะถูกอากาศที่พัดอยู่ภายใน Cavity พาออกไปสู่อากาศภายนอกอีกครั้ง

การถ่ายเทความร้อนที่กระจกชั้นใน

หลังจากที่ความร้อนถูกพาและแผ่จาก Cavity สู่กระจกชั้นในสุดแล้วความร้อนที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมดแล้วบางส่วนจะถูกนำโดยกระจกเข้าไปสู่อากาศในอาคาร ซึ่งบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแผ่รังสีเข้าไปสู่อากาศในขณะที่ยังบางส่วนจะถูกอากาศภายในห้องพาเข้าไปในห้องเช่นกัน

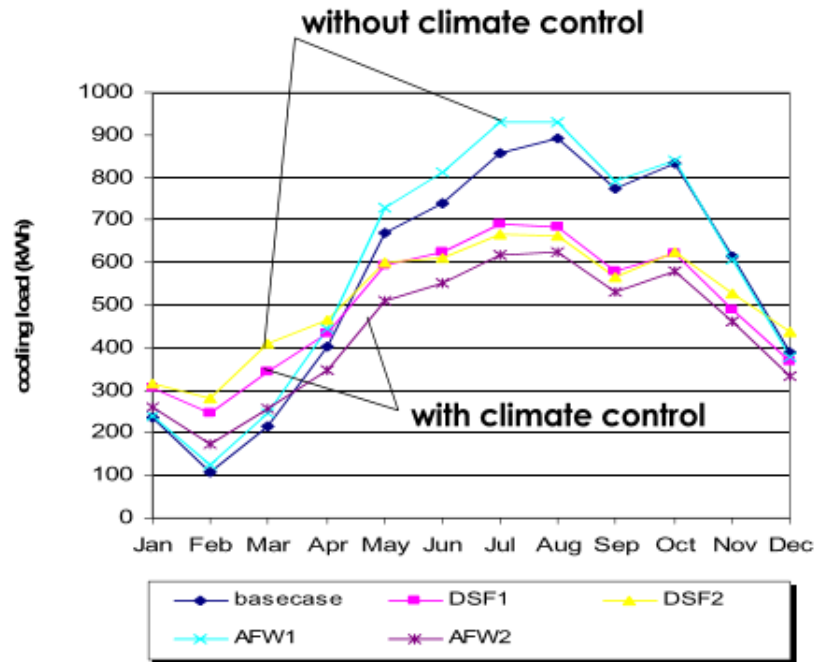
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบผนังกระจกสองชั้นทั้งรูปแบบที่ระบายอากาศด้วยวิธีกลและระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น ได้ดังนี้

- 2.3.1 งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกันความร้อน
- 2.3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับม่านบังแดดใน Cavity
- 2.3.3 งานวิจัยเกี่ยวกับความเร็วลมใน Cavity
- 2.3.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความกว้าง Cavity
- 2.3.5 เอกสารอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

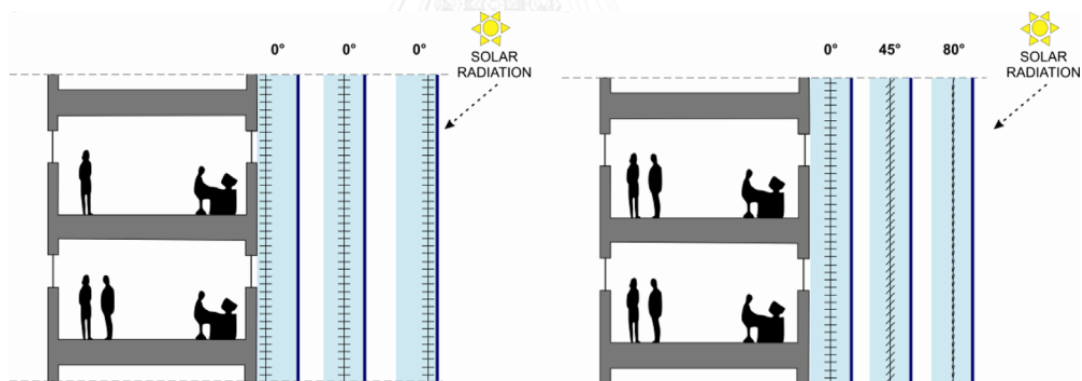
2.3.1 งานวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพการกันความร้อน

Haase and Amato (2007) ได้ทำการทดลองเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของ ผนังกระจกสองชั้น โดยการระบายอากาศวิธีธรรมชาติ (DSF) ที่ฮ่องกง สมมติฐานว่าตัวแปรหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อ การพาความร้อนใน Cavity คือแรงลมในการพาความร้อนขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ของความดันอากาศ (C_p) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวแปร 1.ความสูง ณ ตำแหน่งที่ Façade นั้นอยู่ 2.ทิศทางของลมที่ตกกระทบ Façade นอกจากนั้นยังทดลองกับการเปรียบเทียบกับ ผนังกระจกชั้นเดียว ผลการทดลองพบว่า DSF ช่วยประหยัดพลังงานได้จริงในช่วงเดือนที่มีอากาศร้อน และความดันอากาศและความสูง ณ ตำแหน่งของ Façade ที่ตั้งอยู่ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการลดภาระทำความเย็น จึงได้ทดลองต่อกับผนังกระจกสองชั้น โดยการระบายอากาศวิธีกล (AFW) เมื่อเทียบกับ DSF แล้วโดยติดตั้งอุปกรณ์ Climate control ทำงานด้วยการเป่า Exhaust ออกเมื่อความร้อนจากปริมาณรังสีอาทิตย์เข้ามาในปริมาณที่ถึงเกณฑ์แล้ว (ในกรณีนี้คือ มากกว่า 200 W/m^2) โดยแยก DSF และ AFW เป็นสองกรณีคือ มีและไม่มี Climate control ผลจากการทดลอง เห็นได้ชัดว่า AFW แบบไม่มี Climate control ทำให้ภาระทำความเย็นของอาคารเพิ่มขึ้นมากกว่า Base case ในทางกลับกัน AFW ที่ใช้ Climate control สามารถลดภาระทำความเย็นได้มากกว่า DSF เช่นเดียวกับ DSF Climate control มีผลทำให้ลดภาระความเย็นลงได้แต่ไม่มากเท่ากับ AFW (รูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.15 ผลการทดลองของ Haase and Amato (2007)

2.3.2 งานวิจัยเกี่ยวกับม่านบังแดดใน Cavity



รูปที่ 2.16 รูปแบบม่านบังแดดในช่อง Cavity ตำแหน่งของม่าน (ซ้าย) องศาของม่าน (ขวา)

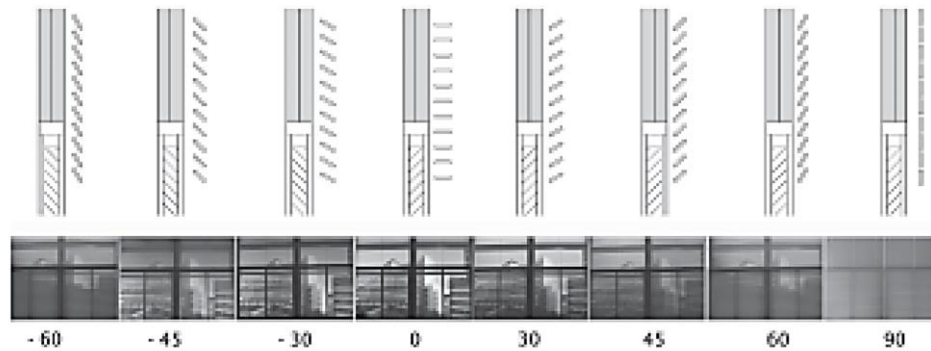
(ที่มา: Barbosa, Ip, 2014)

Barbosa and Ip (2014) ทดลองกับตำแหน่งของม่านบังแดด 3 กรณีศึกษาคือ 1. ม่านอยู่ใกล้กระจกใน 2. ม่านใกล้กระจกนอก และ 3. ม่านอยู่ตรงกลาง (รูปที่ 2.16 ซ้าย) ด้วยวิธีการจำลองอาคารในโปรแกรม TAS ซึ่งเป็นโปรแกรมจำลองสามมิติ วิเคราะห์การใช้พลังงานในอาคาร การจำลองระบบควบคุมและจำลอง CFD พบว่าอุณหภูมิของผิวกระจกภายในสูงขึ้นเมื่อม่านอยู่ใกล้กระจกภายในซึ่งนำไปสู่การพาความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อม่านอยู่ตรงกลางของ Cavity แล้ว อากาศสามารถพัดผ่านทั้งสองข้างของม่านและผิวกระจกทั้งสองฝั่งได้ดี ทำให้ความร้อนที่พาเข้าสู่ตัวอาคารลดลง

นอกจากนั้นยังได้ทำการจำลองในโปรแกรม TAS ถึงผลกระทบจากองศาของม่าน (0, 30, 45, 60 และ 80) (รูปที่ 2.16 ขวา) กับการนำ พา และ แผ่ ของความร้อน พบว่าองศาที่มากของม่าน ไม่เพียงแต่กัน

รังสีจากแสงแดดได้ดีแต่ยังสามารถเพิ่มความเร็วลมใน Cavity ได้ และในกรณีศึกษา นี้ ม่านสามารถเพิ่มความเร็วมามากถึง 35% เมื่อใช้องศาที่ 80 องศา และทดลองถึงเรื่องสีของม่าน พบว่าเมื่อม่านสีดำ อุณหภูมิในช่องอากาศจะสูงกว่าสีขาวถึง 11 องศา และการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง Shading Coefficient (SC) พบว่าการถ่ายเทความร้อนผ่าน DSF จะต่างกันตั้งแต่ต่ำสุดที่ 18 W/m² ถึงสูงสุดที่ 59 W/m² เมื่อใช้ SC ที่มีช่วงตั้งแต่ 0.3-0.7

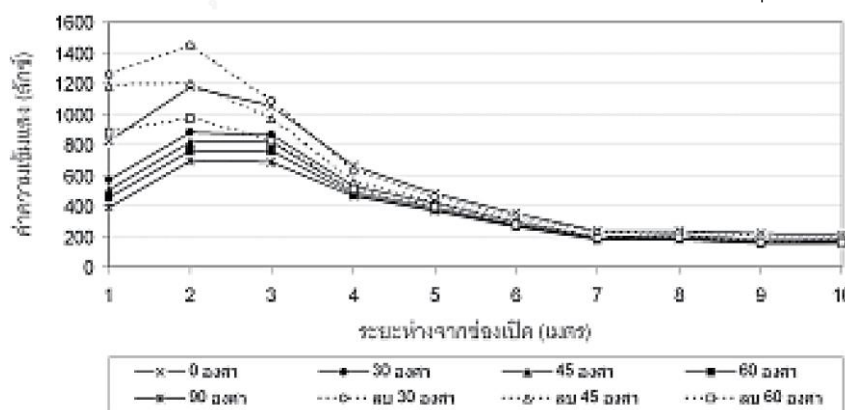
น้ำผึ้ง สายหงษ์ (2550) ทดลองโดยหาว่าองศาของมู่ลี่องศาใดที่ทำให้แสงธรรมชาติจากภายนอกเข้าสู่อาคารได้เพียงพอต่อการใช้งานและมีความสบายตาในห้องเรียนที่ปิดไฟ กำหนดตัวแปรต้นคือองศาของม่านตั้งแต่ -60 – 60 องศา (รูปที่ 2.17) วัดจากสถานที่จริงโดยให้กลุ่มทดลองทำการประเมินผลด้านความสบายตาโดยใช้แบบสอบถามและวัดแสงที่พื้นที่ทำงาน (Task)



รูปที่ 2.17 ตัวแปรต้นองศาของมู่ลี่ที่ใช้ในการทดลอง

(ที่มา: น้ำผึ้ง สายหงษ์, 2007)

ผลการทดลองพบว่า การปรับมู่ลี่ที่ 30 45 และ 60 องศาทำให้กลุ่มทดลองมีความสบายตาและยังช่วยลดความแตกต่างของความเข้มแสงระหว่างบริเวณใกล้ช่องเปิดและบริเวณส่วนในสุดของห้องได้อีกด้วย



แผนภูมิที่ 2.1 ผลการทดลองค่าความเข้มแสงในแต่ละจุดของห้องเรียนภายใต้องศาของม่านต่างๆ

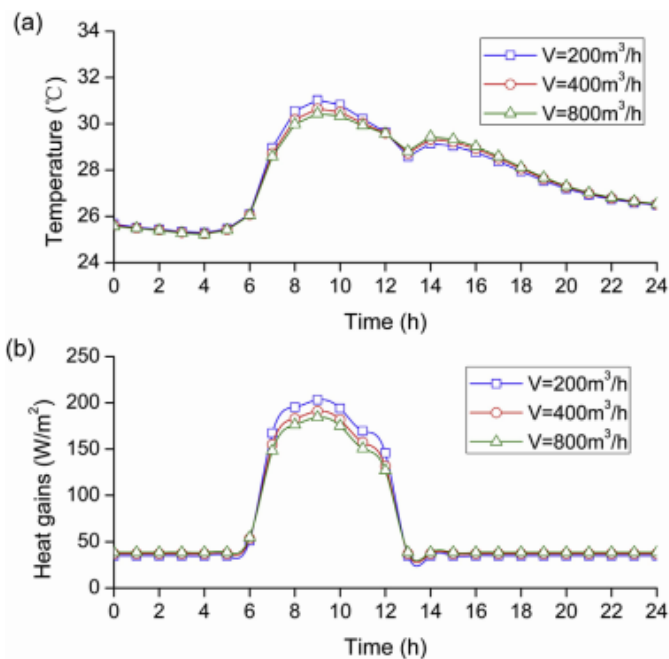
(ที่มา: น้ำผึ้ง สายหงษ์, 2007)

เมื่อรวมความสามารถในการป้องกันความร้อนจากงานวิจัยของ Barbosa and Ip (2014) และงานวิจัยเกี่ยวกับแสงที่พอเพียงและความสม่ำเสมอของแสงภายในห้องของ น้ำผึ้ง สายหงษ์ (2550) แล้ว

พบว่ามู่ลี่ที่ทำมุม 60 องศานอกจากจะช่วยป้องกันความร้อนจากรังสีอาทิตย์ได้ดีแล้วยังช่วยทำให้ภายในห้องมีแสงสว่างที่เพียงพอและยังทำให้แสงสว่างสม่ำเสมอตั้งแต่ส่วนริมหน้าต่างไปถึงส่วนในสุดของห้องอีกด้วย

2.3.3 งานวิจัยเกี่ยวกับความเร็วลมในช่อง Cavity

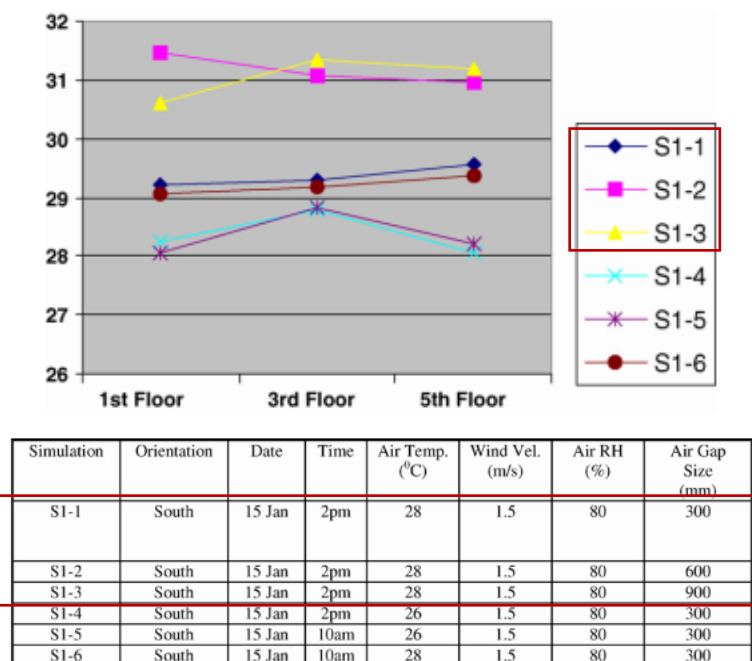
Wang, Chen et al. (2016) ได้ทำการหาผลกระทบจาก อัตราการระบายอากาศ (V) ในช่องอากาศกับการถ่ายเทความร้อนของอากาศและอุณหภูมิกระจกภายในที่ประเทศจีนในเขตร้อน พบว่าการระบายอากาศมีผลต่ออุณหภูมิกระจกภายในเมื่อปริมาตรลมเปลี่ยนไป $200 \text{ m}^3/\text{h}$ อุณหภูมิกระจกภายในอยู่ที่ 31.2 องศา และ 30.4 องศาเมื่อปริมาตรลมเปลี่ยนไปเท่ากับ $800 \text{ m}^3/\text{h}$ นั้นหมายความว่าปริมาตรลมที่เปลี่ยนไป 200 กับ $800 \text{ m}^3/\text{h}$ สามารถทำให้อุณหภูมิลดลง 0.8 องศา ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 20 W/m^2 โดยเฉพาะในกรณีที่รังสีอาทิตย์น้อย (แผนภูมิที่ 2.2) แต่ในบางกรณีการเพิ่มของความเร็วลมไม่สามารถช่วยลดอุณหภูมิกระจกภายใน และการถ่ายเทความร้อนได้ เมื่ออุณหภูมิภายนอกและใน Cavity สูงกว่ากระจกด้านใน การเพิ่มของความเร็วลมจะเพิ่มอุณหภูมิกระจกด้านใน เพราะลมจะพาความร้อนจากกระจกด้านนอกเข้าไปสู่กระจกด้านใน



แผนภูมิที่ 2.2 ผลการทดลองของ Wang, Chen et al. (2016) ผลกระทบจาก อัตราการระบายอากาศ (V) ในช่องอากาศกับ อุณหภูมิกระจกภายใน (บน) และการถ่ายเทความร้อนของอากาศ (ล่าง)

(ที่มา: Wang, Chen et al, 2016)

2.3.4 งานวิจัยเกี่ยวกับความกว้างของช่องอากาศ



รูปที่ 2.18 ผลการทดลองของ P.C. Wong et al (ดัดแปลงจาก: Wong, Prasad et al, 2008)

Wong, Prasad et al. (2008) ทดลองความกว้างของช่องอากาศ กับอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง ด้วยการจำลองในโปรแกรม ค้นพบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองจะลดลงต่ำสุด เมื่อใช้ความกว้างช่องอากาศที่ 300 มม. (S1-1) (เทียบกับตัวแปรควบคุมเดียวกันต่างกันแค่ ความกว้างของช่องอากาศ 300(S1-1) 600(S1-2) 900(S1-3) มม. (รูปที่ 2.18))

2.3.5 เอกสารอื่นๆที่เกี่ยวข้อง

โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองคือ VisualDOE 4.1 ในการคำนวณผลการใช้พลังงานของอาคาร และ ภาระทำความเย็นภายในอาคารจัดทำขึ้นโดย Lawrence Berkley Laboratory ได้รับการยอมรับจาก นักวิจัย และเป็นเครื่องมือในการช่วยพัฒนาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับกฎหมายในการอนุรักษ์พลังงานในหลาย ประเทศทั่วโลก (อภิชนา อธิคมบัณฑิตกุล, 2555) การคำนวณผลการใช้พลังงานของโปรแกรมนี้ออกเป็น 4 องค์ประกอบได้แก่ ภาระทำความเย็น (Load) ระบบไฟฟ้า (System) ระบบทำความเย็น (Plant) และ เศรษฐศาสตร์ (Economics) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณมีทั้งปัจจัยภายนอกและปัจจัยภายใน ปัจจัย ภายนอกได้แก่ สภาพภูมิอากาศและสถานที่ตั้งของอาคาร ประสิทธิภาพของผนังอาคารในการป้องกันความ ร้อนทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารทั้งในส่วนของผนังและส่วนของหลังคา และการรั่วซึม ของอากาศ ปัจจัยภายในได้แก่ ความร้อนที่เกิดจากความหนาแน่นของผู้ใช้อาคารต่อพื้นที่ ความร้อนที่เกิด จากเครื่องใช้ไฟฟ้าและไฟฟ้าแสงสว่าง และเลือกระบบทำความเย็นที่เหมาะสมกับอาคาร และโปรแกรมจะ คำนวณว่าผลการใช้พลังงานเป็นอย่างไร

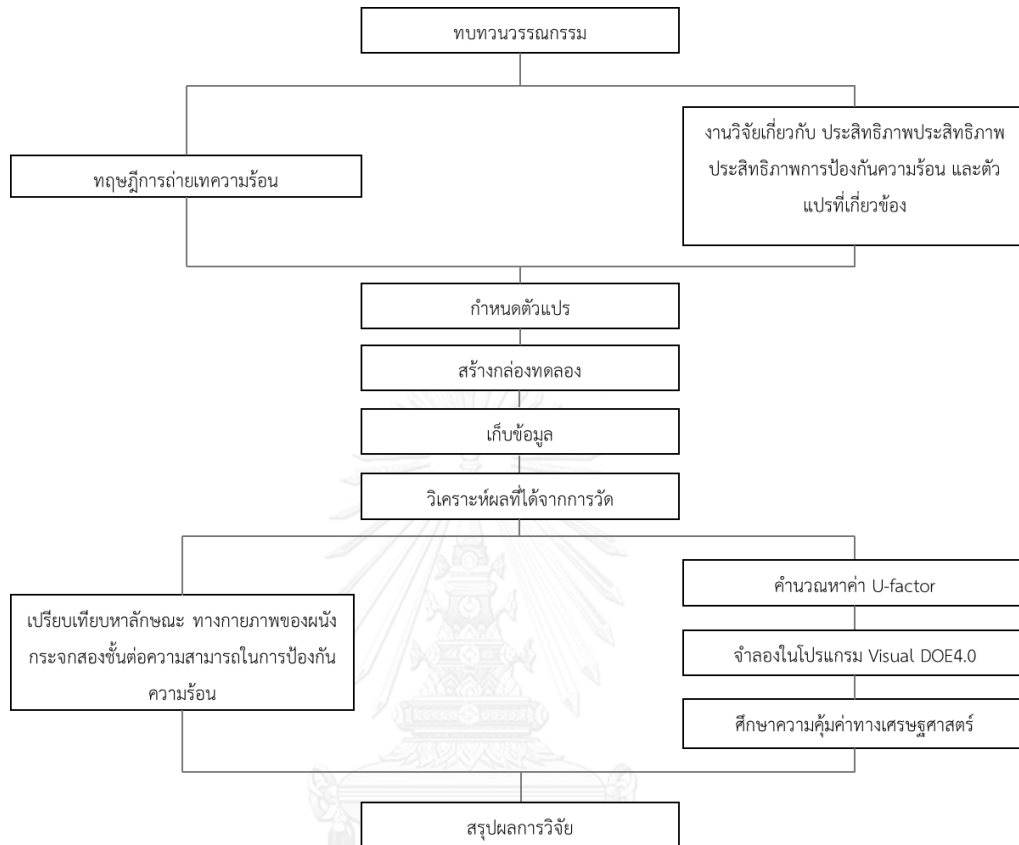
2.4 บทสรุป

จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า อากาศภายใน Cavity จะสามารถพาความร้อนที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านผนังกระจกสองชั้นออกจาก Cavity ผ่านทางการระบายอากาศได้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากต่อการพาความร้อนคือ ความยาวของระนาบที่เกิดการพาความร้อนอ้างอิงจากสมการที่ 2.16 เมื่อเทียบกับผนังกระจกสองชั้นที่ใช้ในการทดลองคือความสูงของระบบผนังกระจกสองชั้น การทดลองในที่นี่จึงอ้างอิงจากความสูงของผนังกระจกที่ใช้ทั่วไปในหนึ่งชั้นของอาคารสำนักงานคือ 2.4 ม. อย่างไรก็ตามความกว้างของผนังกระจกไม่มีผลต่อการพาความร้อนของรังสีอาทิตย์จากภายนอกนั้นจะผ่านเข้ามาทางกระจกชั้นนอกและจะถูกดักด้วยม่านและเปลี่ยนเป็นความร้อนให้อากาศภายใน Cavity พาออกไป แต่รังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านได้ถึงภายในกล่องทดลองนั้นอากาศไม่สามารถพาความร้อนออกจากระบบได้

ในประเทศไทยซึ่งเป็นเขตอากาศร้อนชื้นนั้นความร้อนจากภายนอกอาคารเข้ามาสู่ภายในอาคารผ่านทางผนังกระจกในปริมาณมากเมื่อเทียบกับผนังอื่นๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผนังกระจกจึงเป็นเรื่องจำเป็นเพื่อจะศึกษาผนังกระจกที่มีประสิทธิภาพต่อการลดภาระทำความเย็นในอาคาร ผนังกระจกสองชั้นซึ่งมีการใช้กันบ้างแล้วในอาคารสำนักงานบางแห่งในไทย งานวิจัยที่มีอยู่แล้วในต่างประเทศจะศึกษาถึงแค่อุณหภูมิภายในห้อง (Wang, Chen et al., 2016) หรือการจำลองแต่เพียงภายในห้องทดลองที่มีสภาพปิดและไม่ใช้ความสูงเท่ากับหนึ่งชั้นในอาคารสำนักงาน (Luo, Zhang et al., 2017) และในประเทศไทยก็มีงานวิจัยที่มุ่งเน้นการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและทดลองกับชนิดกระจกที่แตกต่างกัน (เชษฐพรพรรณสินเจิมสิริ, 2552) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการทดลองในสภาพอากาศจริงในช่วงที่ระบบทำความเย็นมีการระหนักที่สุดหรือช่วงฤดูร้อน ซึ่งการทดลองในสภาพอากาศจริง (Field experiments) จะทำให้สามารถเห็นความสัมพันธ์ของอุณหภูมิภายในห้อง เทียบกับเวลาต่างๆของวันได้

จากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในเรื่องของประสิทธิภาพของการป้องกันความร้อนและรูปแบบทางกายภาพต่างๆในระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อประกอบการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลองพบว่าเมื่ออ้างอิงจากงานวิจัยของ Barbosa and Ip (2014) ม่านที่อยู่ภายใน Cavity ควรจะอยู่ตรงกลางของ Cavity และทำมุม 60° เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกันความร้อนสูงและยังทำให้ภายในห้องมีแสงสว่างเพียงพอต่อการทำงานเมื่ออ้างอิงจากการทดลอง น้ำผึ้ง สายหงษ์ (2550) และอ้างอิงจากงานวิจัยของ Wong, Prasad et al. (2008) พบว่าช่องอากาศที่ทำให้อุณหภูมิภายในห้องต่ำที่สุดคือ 30 เซนติเมตร สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองนั้นใช้ VisualDOE 4.1 ซึ่งมีความสามารถในการจำลองภาระทำความเย็นของอาคาร

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย



แผนภูมิที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

3.1. แนวทางการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรภายในผนังกระจกสองชั้นต่ออุณหภูมิภายในกล่องทดลอง หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) ในกรณีศึกษาต่างๆ และสุดท้ายนำไปคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สามารถสรุปได้ในแผนภูมิที่ 3.1 การวิจัยจึงแบ่งเป็นสองช่วงคือ ช่วงการทดลองด้วยกล่องทดลองในสภาพอากาศจริง เพื่อศึกษาอุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศเข้าและออก และอุณหภูมิผิวกระจกทั้งภายนอกและภายใน เปรียบเทียบระหว่างผนังกระจกสองชั้นกรณีศึกษาต่างๆ กับผนังกระจกชั้นเดียว และขั้นที่สองการจำลองภาระทำความเย็นด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 กับอาคารสำนักงานสูง 30 ชั้นโดยแทนค่า U-Value จากการคำนวณและนำมาเปรียบเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียวเพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

กล่องทดลองที่ใช้มีขนาด 2.15x2.0x3.0 เมตร ทำจากโครงเหล็กผนังภายในบุด้วยอิพซิมบอร์ด ผนังภายนอกบุด้วยแผ่นรีวาบอร์ดระหว่างกลางกรุด้วยโฟม Polystyrene หนา 2 นิ้ว แบ่งเป็นสองห้อง ผนังกระจกชั้นเดียว (Base case) และผนังกระจกสองชั้นเพื่อทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างสองห้อง



รูปที่ 3.1 กล่องทดลองที่ใช้ในการวิจัย

วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ 12 Channels Temperature Recorder

พัดลมที่ใช้ระบายอากาศใน Cavity เป็นพัดลมคอมพิวเตอรี่ยี่ห้อ Cooler Master รุ่น SickerFlow X ขนาด 120 x 120 x 25 มม. มีอัตราการไหลของอากาศอยู่ที่ 90 CFM หรือ 152.8 m³/hr. (รูปที่ 3.3) ซึ่ง

เมื่อต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและใช้พัดลม 10 ตัวและใช้เครื่องวัดลม Testo 454 Logger พบว่าวัดได้ 3.16 m/s และสามารถคิดเป็นอัตราการระบายอากาศได้ดังนี้

ความเร็วลมที่วัดได้	3.16	m/s
ในหน้าตัด	0.0144	m ²
คิดเป็นอัตราเร็วลม	0.046	m ³ /s
หรือ	165.37	m ³ /hr.
ปริมาตร Cavity 1.0 x 0.3 x 3.15 m.	0.945	m ³
เพราะฉะนั้น		
อัตราการระบายอากาศต่อพัดลม 1 ตัวใน Cavity	174.99	ACH

ใน Cavity ใช้พัดลม 6 ตัวเพื่อระบายอากาศซึ่งจะทำให้เกิดอัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ประมาณ 1050 ACH ซึ่งอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้นเป็นอัตราการระบายอากาศภายใน Cavity ที่มีปริมาตรเพียง 0.945 ลูกบาศก์เมตร หรือกว้างเพียง 30 เซนติเมตร



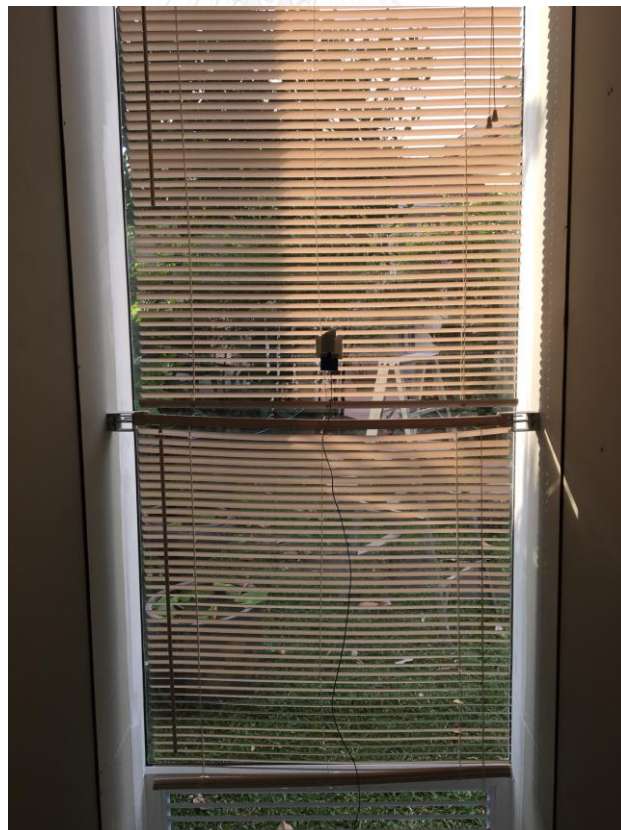
รูปที่ 3.3 พัดลม Cooler Master รุ่น SickerFlow ที่ใช้ในการทดลอง (บน)
 (ที่มา: <http://apac.coolermaster.com/th/cooling/case-fan/sickleflow-x-non-led/>)
 พัดลมที่ติดตั้งด้านบน Cavity (ล่าง)



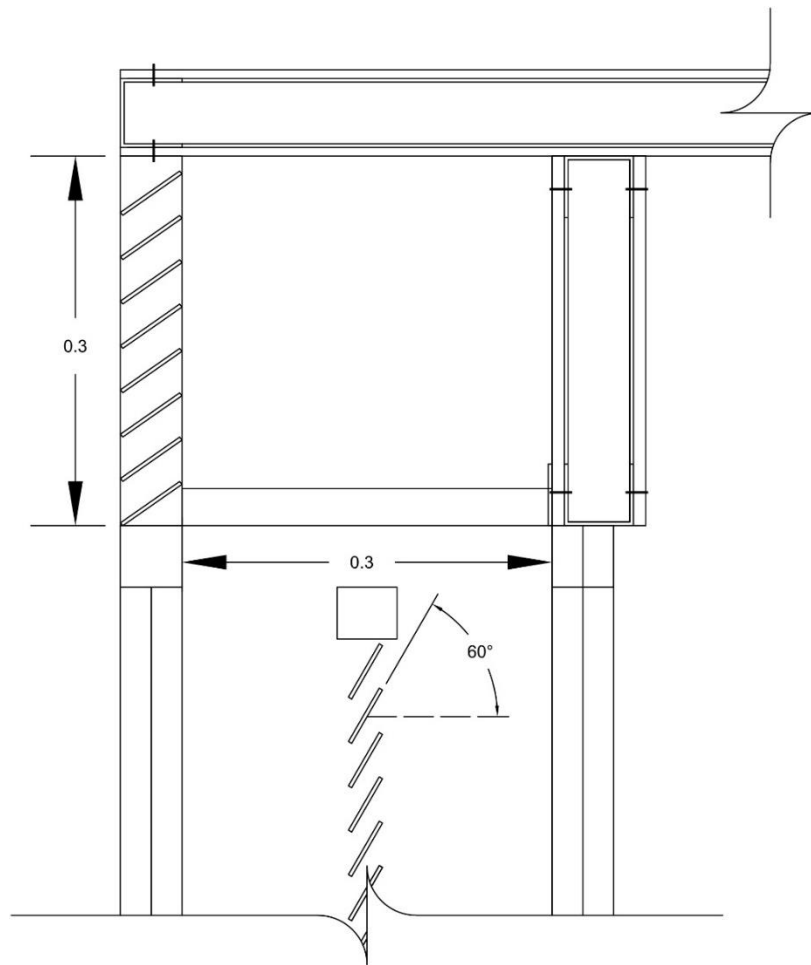
รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดลม Testo 454 Logger

(แหล่งที่มา: <http://www.seeanco.com/wp-content/uploads/454.jpg>)

มู่ลี่ (Venetian blind) ขนาด 90 X 130 ซม. สีเหลือง จำนวน 2 ชุด เพื่อป้องกันให้ครอบครัวผื่น
 กระจก



รูปที่ 3.5 มู่ลี่ (Venetian blind)



รูปที่ 3.6 องศาและการวางตำแหน่งของมุม

3.3. ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1. กำหนดสมมติฐานการวิจัย

ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศโดยวิธีกลทั้งแบบไม่มีม่านและไม่มีม่าน มีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารและลดความต้องการใช้พลังงานในการทำความเย็น สามารถช่วยประหยัดพลังงาน และลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าของอาคาร มากกว่าผนังกระจกชั้นเดียว ในอาคารประเภทสำนักงาน ในสภาวะสภาพอากาศของกรุงเทพ ประเทศไทย

3.3.2. การดำเนินการวิจัยขั้นที่ 1 ด้วยกล่องทดลอง

การกำหนดตัวแปรของงานวิจัย

ตัวแปรต้น

- ผนังกระจกชั้นเดียว (SSF) และผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล (AFW)
- มี่ม่านทำมุม 60 องศาและไม่มีม่านในช่องระหว่างกระจก (Cavity)

- อัตราการระบายอากาศ (ACH) ในช่องว่างระหว่างกระจก

ตัวแปรตาม

- อุณหภูมิ ณ จุดต่างๆภายในกล่องทดลอง
- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value)

ตัวแปรควบคุม

- ชนิดกระจกทั้งผนังกระจกสองชั้นและผนังกระจกชั้นเดียวใช้กระจกใส 6 มม.
- ความกว้างช่องระหว่างกระจก (Cavity)
- ความกว้างช่องลมเข้าและออก
- ความสูงกระจก
- ทิศ หันหน้ากระจกทางทิศใต้

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรที่จะใช้ทดลอง

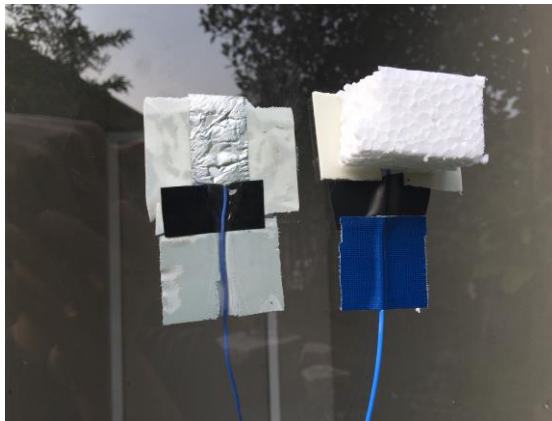
ชนิดของผนังกระจก	ม่าน	อัตราการระบายอากาศ (ACH)	เลขกล่อง
SSF	×	×	S ₁
DSF	×	350	D ₁
		700	D ₂
		1050	D ₃
	✓	350	D ₄
		700	D ₅
		1050	D ₆

จากข้อมูลที่เก็บได้เมื่อคัดเลือกค่าที่มีความคงที่ของตัวเลขแล้ว ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของกล่องทดลองรูปแบบต่างๆ (ΔT) ระหว่างอุณหภูมิผิวภายนอก (T_o) และอุณหภูมิผิวภายใน (T_i) สามารถนำค่าดังกล่าวคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) ดังสมการต่อไปนี้

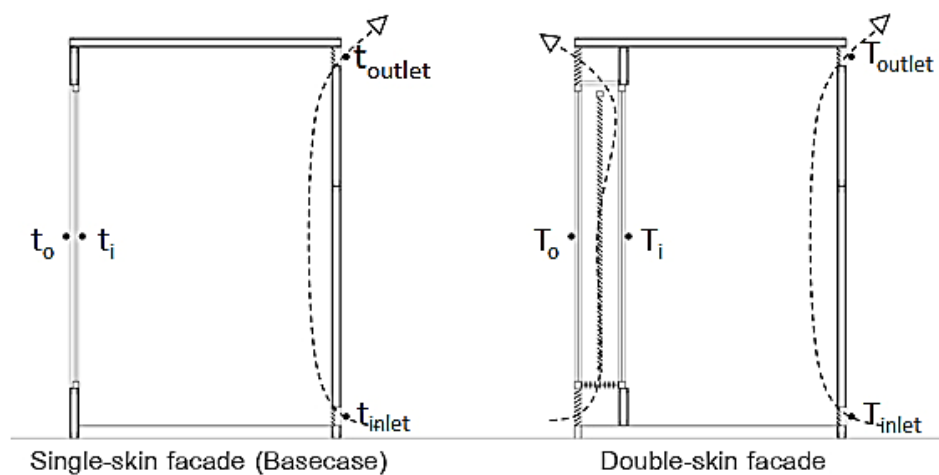
การวัดอุณหภูมิในกล่องทดลอง

ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิกรณีศึกษาละ 4 จุดคือ อุณหภูมิ ณ อากาศระบายเข้า (T_{inlet}) อุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศออก (T_{outlet}) อุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก (T_o) อุณหภูมิผิวกระจกด้านใน (T_i)

ในส่วนของการวัดอุณหภูมิผิว ป้องกันเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิด้วยแผ่นฟอยล์อลูมิเนียมป้องกันรังสีอาทิตย์ และ ปิดด้วยโฟม Polystyrene เพื่อป้องกันความร้อนภายนอกอีกชั้นหนึ่งเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำมากที่สุด



รูปที่ 3.7 ลักษณะการติดตั้งเซ็นเซอร์วัด



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิของแต่ละกรณีศึกษา ผนังกระจกชั้นเดียว (ซ้าย) ผนังกระจกสองชั้น (ขวา)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value)

การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (Q) คือการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ปริมาณความร้อน T_o ผ่านตัวกลางและเปลี่ยนปริมาณความร้อนไปเป็น T_i ซึ่งตัวกลางจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) บ่งบอกถึงความสามารถในการป้องกันความร้อนของผนังความสัมพัน์นี้สามารถคำนวณเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q = U \cdot A(T_o - T_i) \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ

- Q คือ ปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์ผ่านระบบผนังกระจกสองชั้นเข้าสู่กล่อง
ทดลอง (W/m^2)
- U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของระบบผนังกระจกสองชั้น
($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- A คือ พื้นที่ของเปลือกอาคารที่ถ่ายเทความร้อน ในที่นี้คือพื้นที่ผนังกระจก (m^2)
- T_o คือ อุณหภูมิภายนอกของระบบผนังกระจกสองชั้น ($^\circ C$)
- T_i คือ อุณหภูมิผิวในของระบบผนังกระจกสองชั้น ($^\circ C$)

Relative Heat Gain เป็นการคำนวณจาก ASHRAE (1989) บ่งบอกถึงค่าการถ่ายเทความร้อนรวมที่ผ่านกระจกเข้าสู่ภายในอาคารทั้งหมด ซึ่งรวมพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์โดยตรงซึ่งพิจารณาได้จากค่า สัมประสิทธิ์การบังแดด (Shading Coefficients) และพลังงานความร้อนจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคารพิจารณาได้จากค่า U-Value รวมเข้าด้วยกัน โดย RHG สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$RHG = 6.37SC + 7.8K \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

เมื่อ

- RHG คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมที่ผ่านกระจกเข้าสู่ภายใน
- SC คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกและแผงกันแดด
- K คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนัง ($W/m \cdot ^\circ C$)

ซึ่งค่า U-Value และค่า RHG ในที่นี้มีค่าเทียบเท่ากัน

$$RHG = Q \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

$$6.37SC + 7.8K = K \cdot A(T_o - T_i) \quad (\text{สมการที่ 3.4})$$

$$K = \frac{6.37SC}{A(T_o - T_i) - 7.8} \quad (\text{สมการที่ 3.5})$$

และเพื่อให้ได้ค่า U-Value จะต้องนำค่า K มารวมกับค่าการต้านทานความร้อนของอากาศทั้งภายนอกและภายใน ($R_{airfilm}$) โดยสามารถรวมได้จากการแปลงค่า K ให้เป็น R ดังนี้

$$R = \frac{\Delta x}{K} \quad (\text{สมการที่ 3.6})$$

เมื่อ

- R คือ ค่าการต้านทานความร้อน ($m^{\circ}C / W$)
 K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนัง ($W/m^{\circ}C$)
 ΔX คือ ความหนาของผนัง (m)

จากนั้นจะสามารถหาค่า U-Value ได้จากส่วนกลับของผลรวมค่าความต้านทานของผนังกระจกกับค่าความต้านทานของฟิล์มอากาศ (Air film) ทั้งภายนอกและภายในสามารถแสดงสมการได้ดังนี้สมการ

$$U_{eff} = \frac{1}{R_{airfilmout} + R_{airfilmin} + R_{air flow window}} \quad (\text{สมการที่ 3.7})$$

เมื่อ

- U_{eff} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น ($W/m^{\circ}C$)
 $R_{airfilmout}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกมีค่า 0.044 ($m^{\circ}C / W$)
 $R_{airfilmin}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในมีค่า 0.120 ($m^{\circ}C / W$)
 $R_{air flow window}$ คือ ค่าความต้านทานความร้อนของผนังกระจกสองชั้น ($m^{\circ}C / W$)

และสามารถนำค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง ไปแทนค่าเพื่อหา ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม ของผนังด้านนอกอาคาร (OTTV) ในโปรแกรม VisualDOE 4.1

3.3.3. การทดลองขั้นที่ 2 ด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

เพื่อหาปริมาณการใช้พลังงานของผนังกระจกสองชั้นในรูปแบบต่างๆ โดยการจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบอ้างอิงจากงานวิจัยของ สวิชญา ดาวประกายมงคล (2552) ซึ่งได้สำรวจความคิดเห็นของกลุ่มตัวอย่างที่เป็นสถาปนิกที่มีประสบการณ์ในการออกแบบอาคารสำนักงานขนาดใหญ่จำนวน 22 คน จาก 10 บริษัท ในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ทั่วไป (typical large office building) ทำให้ได้ข้อมูลสำหรับเป็นอาคารสำนักงานต้นแบบ หลังจากนั้นจะนำปริมาณการใช้พลังงานของกระจกรูปแบบต่างๆมาเปรียบเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว (Base case) เพื่อหาปริมาณพลังงานที่สามารถประหยัดได้เพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

ตัวแปรต้น

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น (AFW) ในรูปแบบต่างๆ และผนังกระจกชั้นเดียว (SSF)

ตัวแปรตาม

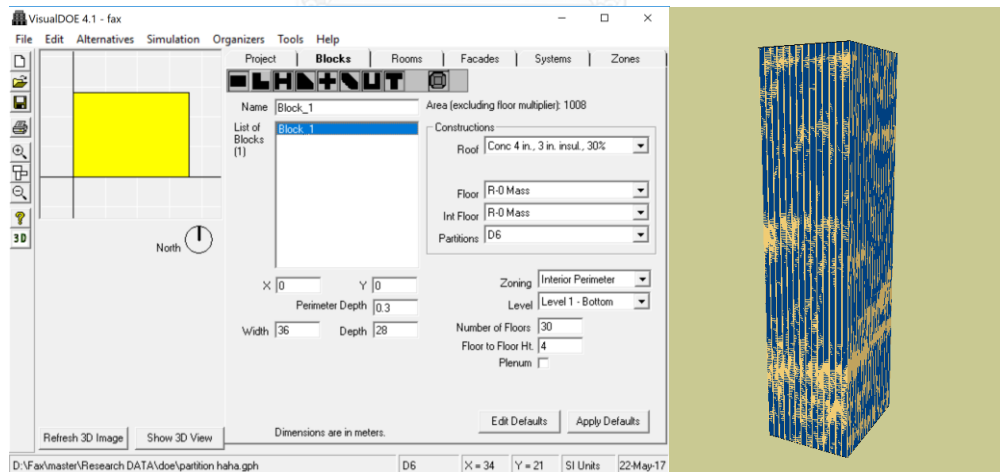
- การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh)

- ค่าไฟที่ประหยัดได้
- ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปรควบคุม

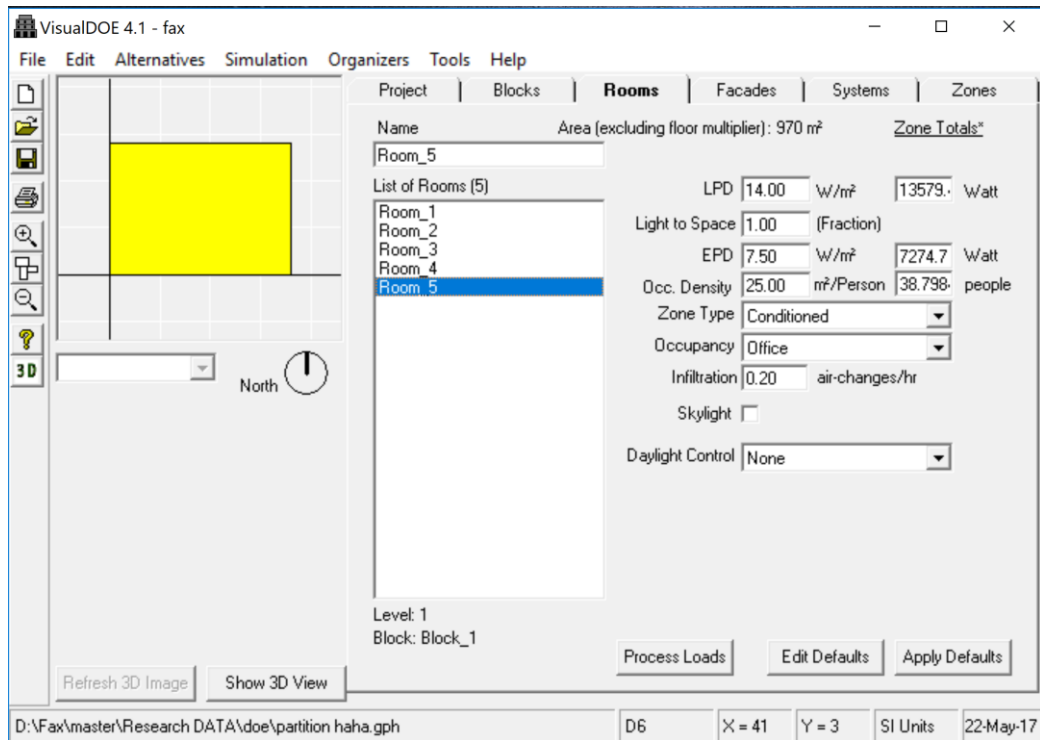
- อาคารสำนักงาน ใช้อาคารสำนักงานต้นแบบ (สวิชญา ดาวประกายมงคล, 2552) มีรายละเอียดดังนี้

ความกว้าง	28.00 เมตร
ความยาว	36.00 เมตร
ความสูง	120.00 เมตร
ความสูงแต่ละชั้น	4.00 เมตร
จำนวนชั้น	30 ชั้น
พื้นที่ปรับอากาศแต่ละชั้น	1,008 ตร.ม.
พื้นที่ปรับอากาศทั้งหมด	30,204 ตร.ม.
ผนัง	ผนังอลูมิเนียมสำเร็จรูป หนา 4 มม. ช่องว่างอากาศภายในผนัง หนา 100 มม. ในฉนวนใยแก้วความหนาแน่น 24 กก./ลบ.ม. หนา 2 นิ้ว
ผนังภายใน	ผนังแผ่นยิปซัม หนา 12 มม.
WWR	ร้อยละ 80



รูปที่ 3.9 การตั้งค่าวัสดุก่อสร้างในโปรแกรม VisualDOE 4.1 (ซ้าย)

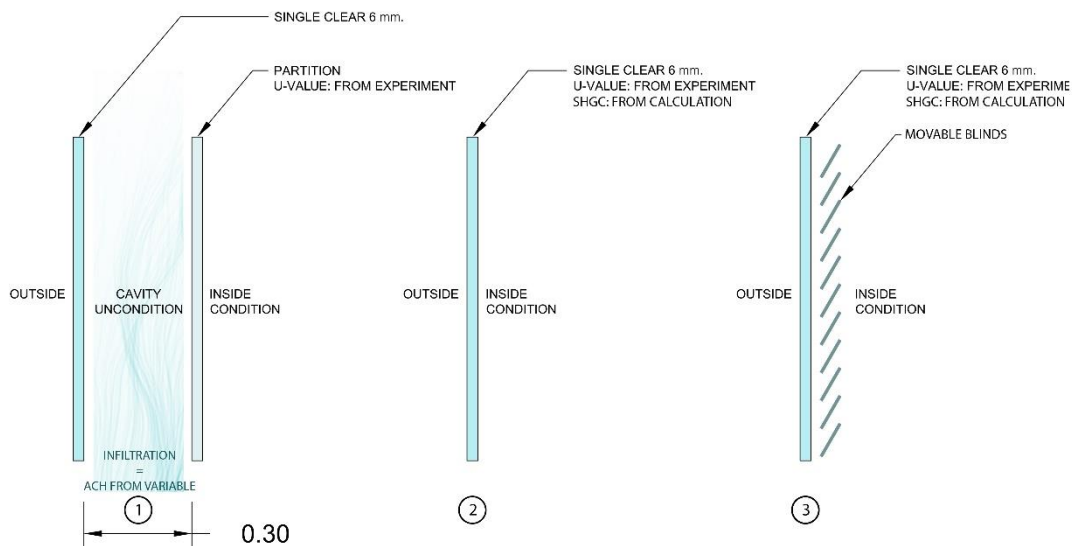
รูปแบบอาคารในโปรแกรม VisualDOE 4.1 (ขวา)



รูปที่ 3.10 การตั้งค่าแสงสว่าง การใช้พลังงานจากเครื่องใช้ไฟฟ้า จำนวนผู้ใช้งานอาคาร

รูปแบบการใช้สอย และการปรับอากาศ

เนื่องด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 ไม่มีการคำนวณผนังกระจกสองชั้นโดยเฉพาะ การจำลองในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีจำลอง 3 รูปแบบดังนี้ (รูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 รูปแบบการตั้งค่า Façade ในโปรแกรม VisualDOE 4.1 รูปแบบที่ 1 (ซ้าย) รูปแบบที่ 2 (กลาง) รูปแบบที่ 3 (ขวา)

1. จำลองผนังทั้งสองชั้นด้วยโปรแกรมโดยขอบนอกของอาคารถอยร่นเข้ามา 0.3 ม. เพื่อให้เป็นช่อง Cavity ของกระจกสองชั้นโดยใช้คำสั่ง Perimeter และกระจกชั้นนอกตั้งค่าวัสดุให้เป็นกระจกใส 6 มม. และผนังภายในเป็น Partition ซึ่งมีค่า U-Value แตกต่างไปตามค่า U-Value ที่คำนวณได้จากการทดลอง และกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนัง (Absorptions) เป็น 0.32 ตามค่า Absorptions ของมู่ลี่พลาสติก (Chaiyapinunt and Khamporn, 2011) ภายในช่อง Cavity ตั้งค่าอัตราการระบายอากาศด้วย Infiltration ตามตัวแปรที่กำหนด ดังรูปที่ 3.11 การจำลองในลักษณะนี้จะกำหนดให้ผนังกระจกชั้นในไม่มีรังสีอาทิตย์ผ่าน หรือ SHGC=0
2. จำลองให้ผนังกระจกสองชั้นเป็นผนังกระจกชั้นเดียวโดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นผนังกระจกใสหนา 6 มม. และเปลี่ยนค่า U-Value ให้เท่ากับที่ได้จากการทดลองโดยการจำลองในรูปแบบนี้ รังสีความร้อนจากภายนอกจะสามารถเข้ามาในอาคารได้แต่จะกำหนดให้ค่า SHGC มาจากการคำนวณดังสมการที่ 3.8
3. จำลองด้วยกระจกชั้นเดียวเหมือนรูปแบบที่ 2 แต่เพิ่ม Movable Blinds โดยตั้งค่าให้มันปิดเมื่อรังสีอาทิตย์เข้าสู่ผนังกระจกเกิน 30 W/m^2

$$SHGC = \tau + \frac{\alpha_o U_o}{h_o} + \left(\frac{U_o}{h_o} + \frac{U_i}{h_s} \right) \alpha_i \quad (\text{สมการที่ 3.8})$$

SHGC คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์

τ คือ ค่าการส่องผ่านของรังสีอาทิตย์ (Solar transmittance) รวมทั้งกระจกชั้นนอกและชั้นใน

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอก (Air film out)

h_s คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่พัดในช่อง Cavity

α_o คือ ค่าการดูดกลืนรังสี (Solar absorptance) ของกระจกชั้นนอก

α_i คือ ค่าการดูดกลืนรังสี (Solar absorptance) ของกระจกชั้นใน

U_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value) ของกระจกชั้นนอก

U_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value) ของกระจกชั้นใน

3.3.4. การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อนำค่า U-Value มาจำลองกับอาคารต้นแบบแล้ว วิเคราะห์กับเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนมาติดตั้งกระจกด้วย AFW แทนการใช้ผนังกระจกชั้นเดียว เปรียบเทียบค่าไฟที่ประหยัดได้ต่อปี และหาอัตราการคืนทุนด้วยวิธีการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period – PB)

$$\text{Payback period (PB)} = \frac{\text{เงินลงทุนที่เพิ่มขึ้น}}{\text{ค่าไฟที่ประหยัดได้ต่อปี}} \quad (\text{สมการที่ 3.9})$$

3.4. บทสรุป

จากผลการทดลองทั้งในการทดลองขั้นที่ 1 ก็กับการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนเข้าสู่กล่องทดลอง และนำค่าที่วัดได้คำนวณหา U-Value เปรียบเทียบตัวแปรที่มีผลต่อการป้องกันความร้อนของระบบผนัง และนำค่า U-Value มาแทนค่าในโปรแกรม VisualDOE 4.1 เพื่อหา ปริมาณการประหยัดพลังงานของอาคารกรณีศึกษาเมื่อเปลี่ยนมาใช้ระบบผนังกระจกสองชั้น และคำนวณกับจำนวนเงินที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนเพื่อหาระยะเวลาคืนทุน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศโดยวิธีกลและมีม่าน

บทที่ 4

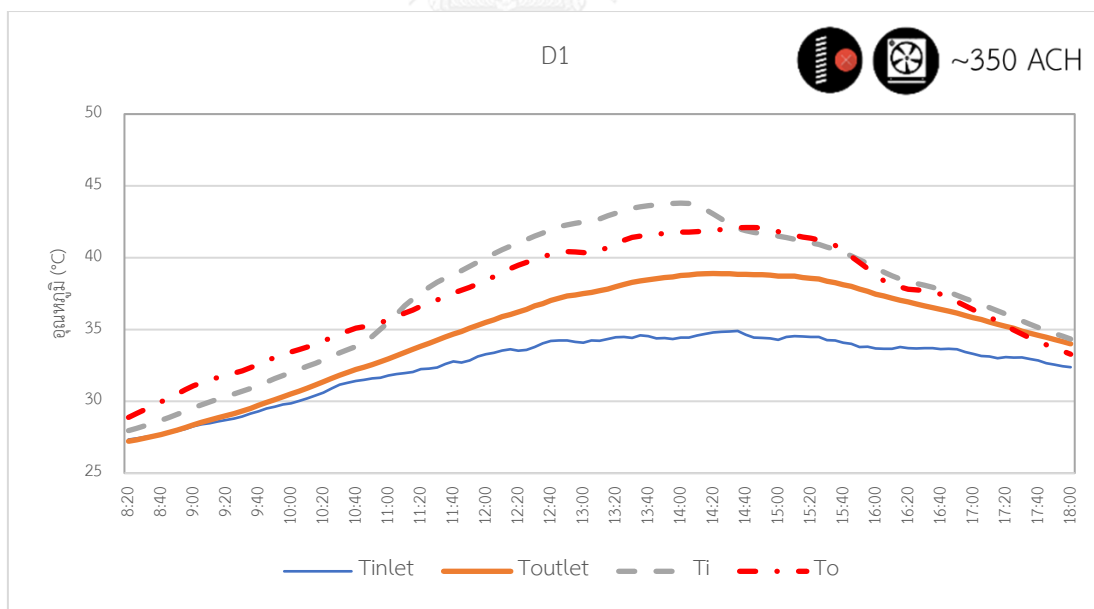
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองจากกล่องทดลอง

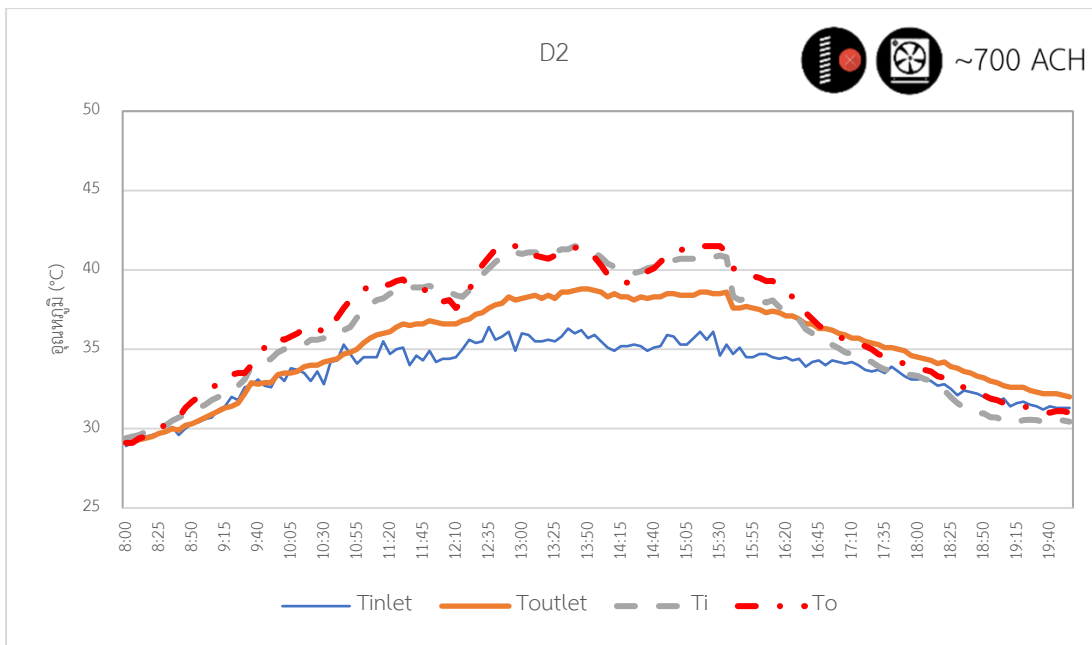
การทดลองด้วยกล่องทดลองแบ่งเป็นสองขั้นคือ การเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศเข้า (T_{inlet}) และออก (T_{outlet}) เพื่อวัดปริมาณความร้อนภายในห้อง และการหาค่า U-Value จากการคำนวณจากการวัด อุณหภูมิผิวกระจกนอก (T_o) และใน (T_i)

4.1.1 อุณหภูมิภายในกล่องทดลอง

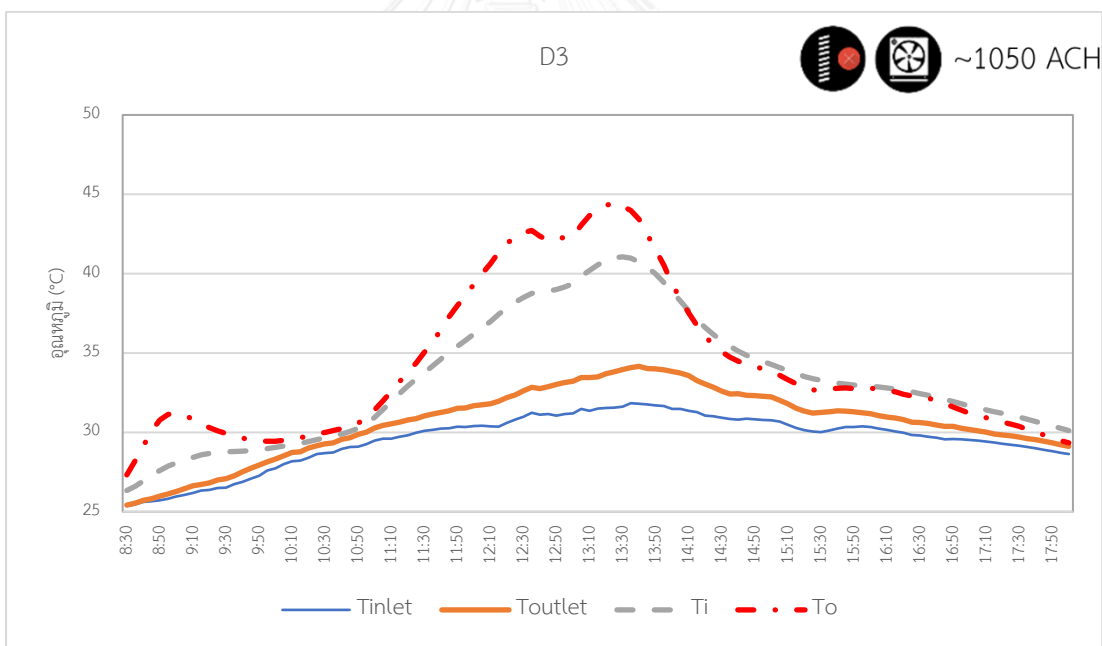
ผลจากการวัดอุณหภูมิสามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการป้องกันความร้อน โดยที่อุณหภูมิผิวเมื่ออุณหภูมิผิวนอกมากกว่าผิวในมากก็นั้นแสดงว่าความร้อนจากภายนอกไม่สามารถเข้ามาถึงภายในได้มาก หมายถึงประสิทธิภาพการกันความร้อนของกระจกที่ดี และถ้าอุณหภูมิ ณ ช่องอากาศออกไม่ต่างจากอุณหภูมิ ณ ช่องอากาศเข้ามากหมายถึงอากาศที่ไหลเวียนภายในกล่องจากช่องระบายอากาศเข้าเอาปริมาณความร้อนจากกล่องไปได้น้อย ซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพที่ดีในการกันความร้อนของกระจกเช่นกัน อุณหภูมิที่วัดเป็นอุณหภูมิจากกล่องทดลองโดยวัดในที่ที่มีพระอาทิตย์ส่องทางทิศใต้ทั้งวันในเวลาที่มีรังสีอาทิตย์อยู่ คือ 8.00น.-18.00น.วัด 6 กรณีศึกษาได้ผลดังนี้



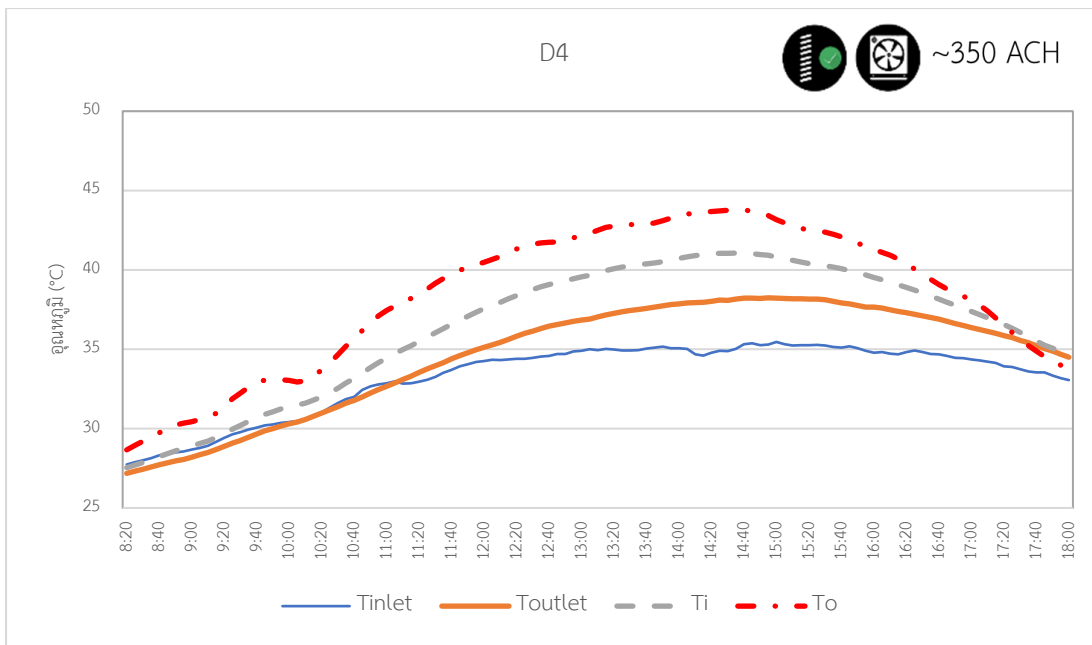
แผนภูมิที่ 4.1 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศ 350 ACH



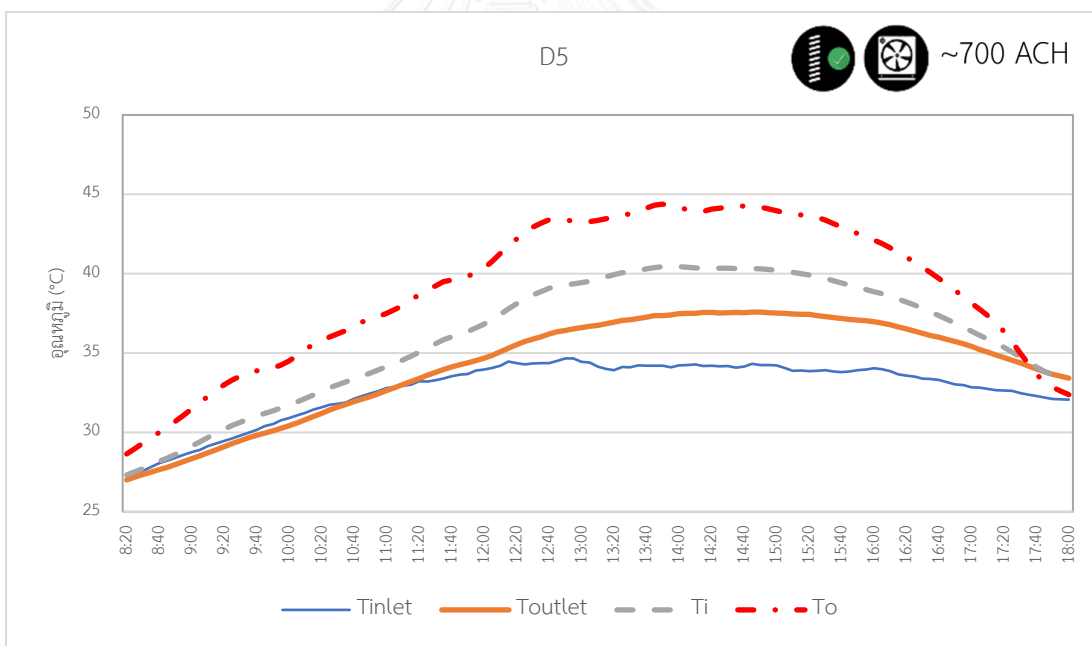
แผนภูมิที่ 4.2 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศ 700 ACH



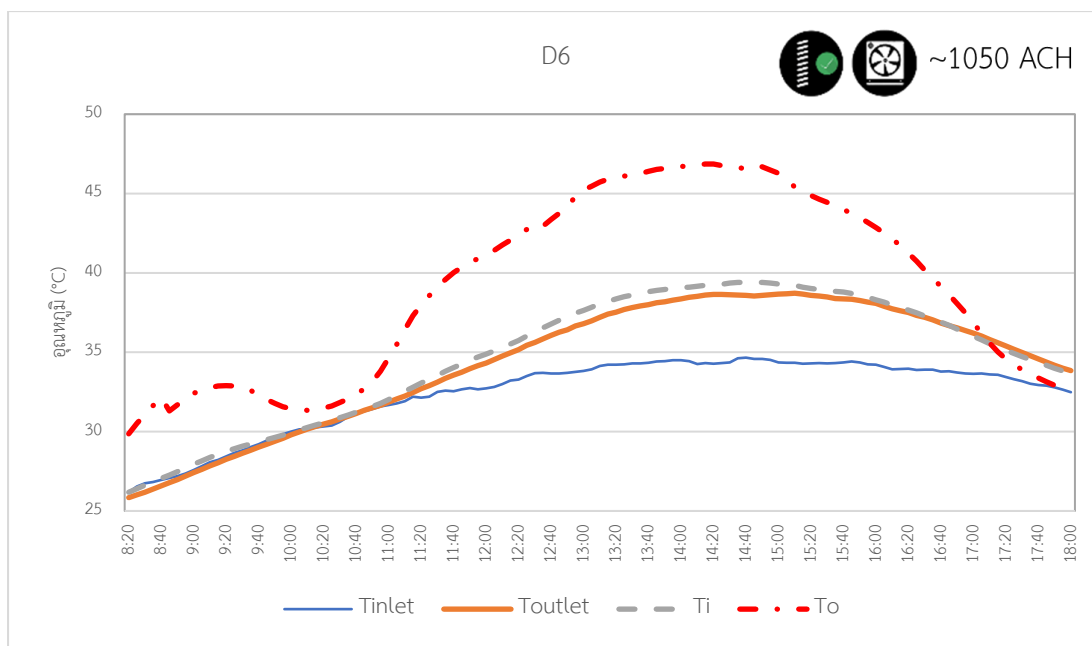
แผนภูมิที่ 4.3 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศ 1050 ACH



แผนภูมิที่ 4.4 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศ 350 ACH



แผนภูมิที่ 4.5 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศ 700 ACH

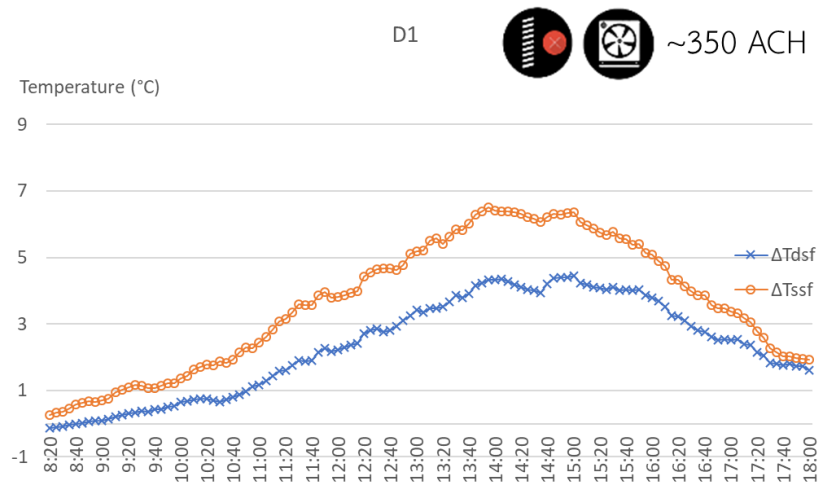


แผนภูมิที่ 4.6 ผลการวัดอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆของกล่องทดลองของผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่าน อัตราการระบายอากาศ 700 ACH

จากแผนภูมิที่ 4.1-4.6 จะเห็นได้ว่า ความต่างของอุณหภูมิผิวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับซึ่งหมายถึงประสิทธิภาพการกันความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามลำดับด้วย แต่อุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศเข้าและออกซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณความร้อนภายในไม่สามารถเห็นได้ชัดเจนว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร เพราะด้วยความแตกต่างของรังสีอาทิตย์ในแต่ละวันไม่เท่ากัน จึงต้องเทียบความแตกต่างอุณหภูมิของผนังกระจกสองชั้นและผนังกระจกชั้นเดียวในวันและเวลาเดียวกันเพราะจะได้เปรียบที่เท่ากัน โดยจะหาค่าปริมาณความร้อนในกล่องได้ดังนี้

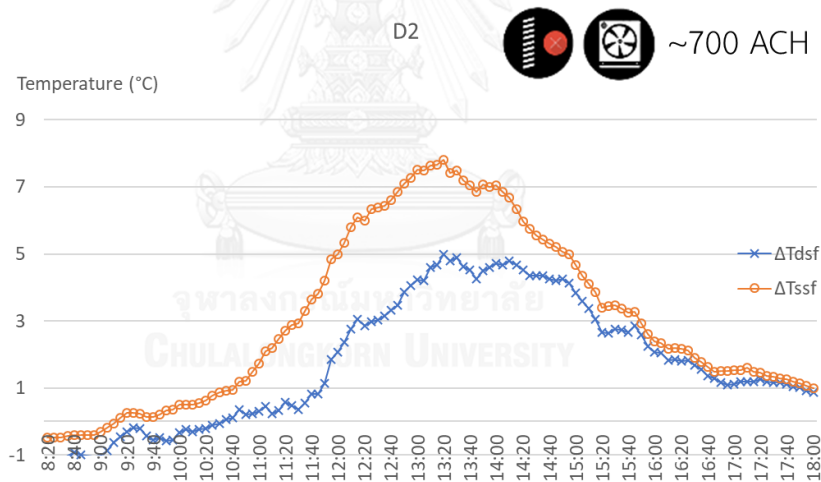
4.1.2 การหาปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง

การทดลองในแต่ละวันทดลองเทียบกันระหว่างผนังกระจกสองชั้นในรูปแบบต่างๆและผนังกระจกชั้นเดียว การวิเคราะห์ผลสามารถเทียบความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ของ T_{inlet} และ T_{outlet} เพื่อหาปริมาณความร้อนที่อากาศจาก T_{inlet} สามารถพาออกไปทาง T_{outlet} ซึ่งหมายถึงปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในกล่องทดลอง และเมื่อนำ ΔT นั้นมาเทียบกันระหว่างผนังกระจกสองชั้นและผนังกระจกชั้นเดียวในวันและเวลาเดียวกันแล้ว ก็จะสามารถเห็นความแตกต่างของความสามารถในการป้องกันความร้อนของผนังกระจกสองชั้นและผนังกระจกชั้นเดียวได้



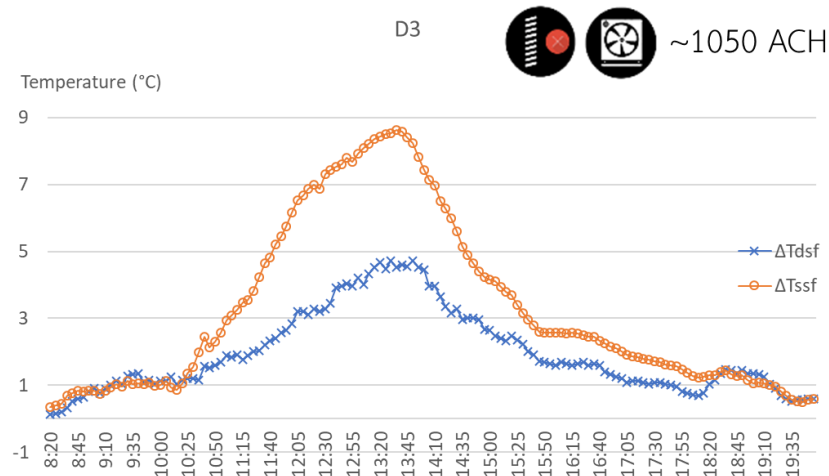
แผนภูมิที่ 4.7 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 350 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

จากแผนภูมิที่ 4.7 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 350 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 2.22°C หมายถึงปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลองผนังกระจกสองชั้นมีปริมาณที่น้อยกว่าผนังกระจกชั้นเดียว



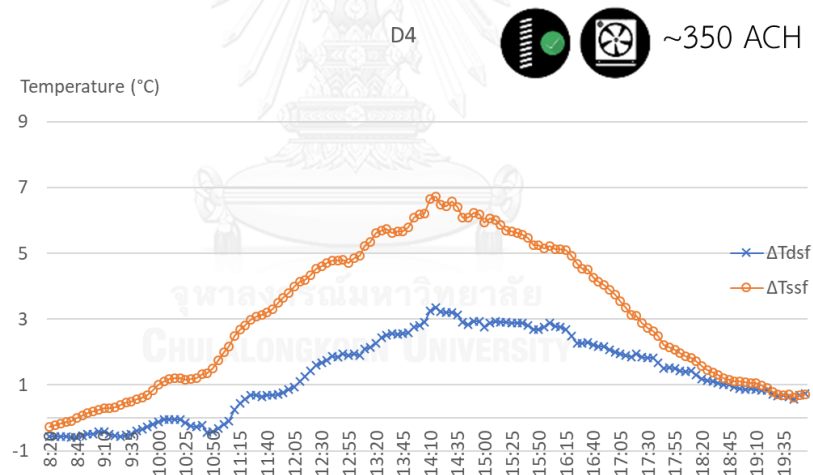
แผนภูมิที่ 4.8 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 700 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

จากแผนภูมิที่ 4.8 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 3.38°C อากาศที่พัดอยู่ใน Cavity มีส่วนช่วยให้ความร้อนที่สะสมอยู่ภายใน Cavity ออกไป และทำให้ความร้อนไม่สามารถเข้าไปในกล่องทดลองได้ เพราะอัตราการระบายอากาศที่สูงกว่าทำให้มีความสามารถในการพัดความร้อนออกไปจากกล่องทดลองได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับ D1 ที่มีอัตราการระบายอากาศที่ต่ำกว่า



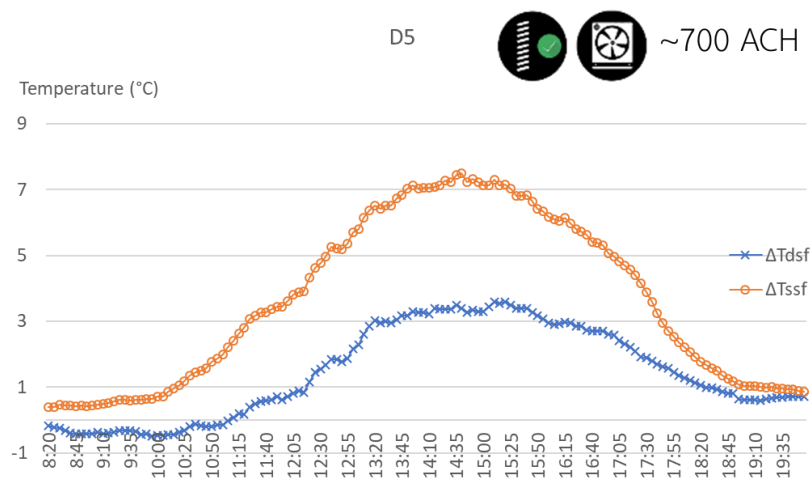
แผนภูมิที่ 4.9 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

จากแผนภูมิที่ 4.9 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 4.1°C การเพิ่มอัตราการระบายอากาศยังคงทำให้ปริมาณความร้อนภายในห้องลดลงไปมากกว่าทั้ง D2 และ D1 ที่มีอัตราการระบายอากาศที่ต่ำกว่า



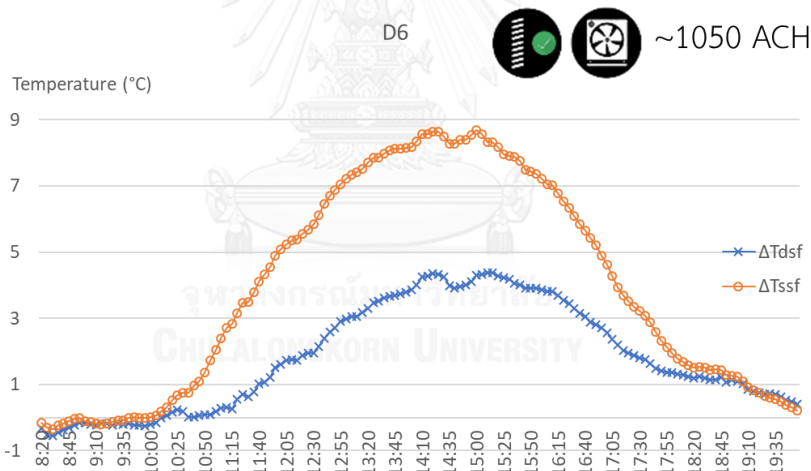
แผนภูมิที่ 4.10 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 350 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

จากแผนภูมิที่ 4.10 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 350 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 3.4°C ซึ่งมากกว่ากรณีศึกษาที่ไม่มีม่านทั้ง D1 และ D2 แต่น้อยกว่า D3 ที่มีอัตราการระบายอากาศที่มากกว่าถึงแม้จะไม่มีม่านก็ตาม



แผนภูมิที่ 4.11 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 700 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

จากแผนภูมิที่ 4.11 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 4.1°C ซึ่งเท่ากับ D3 ที่ไม่มีม่านแต่มีอัตราการระบายอากาศที่มากกว่า



แผนภูมิที่ 4.12 แสดงความต่างของอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่าง T_{inlet} และ T_{outlet} ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่าน มีอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH และผนังกระจกชั้นเดียว

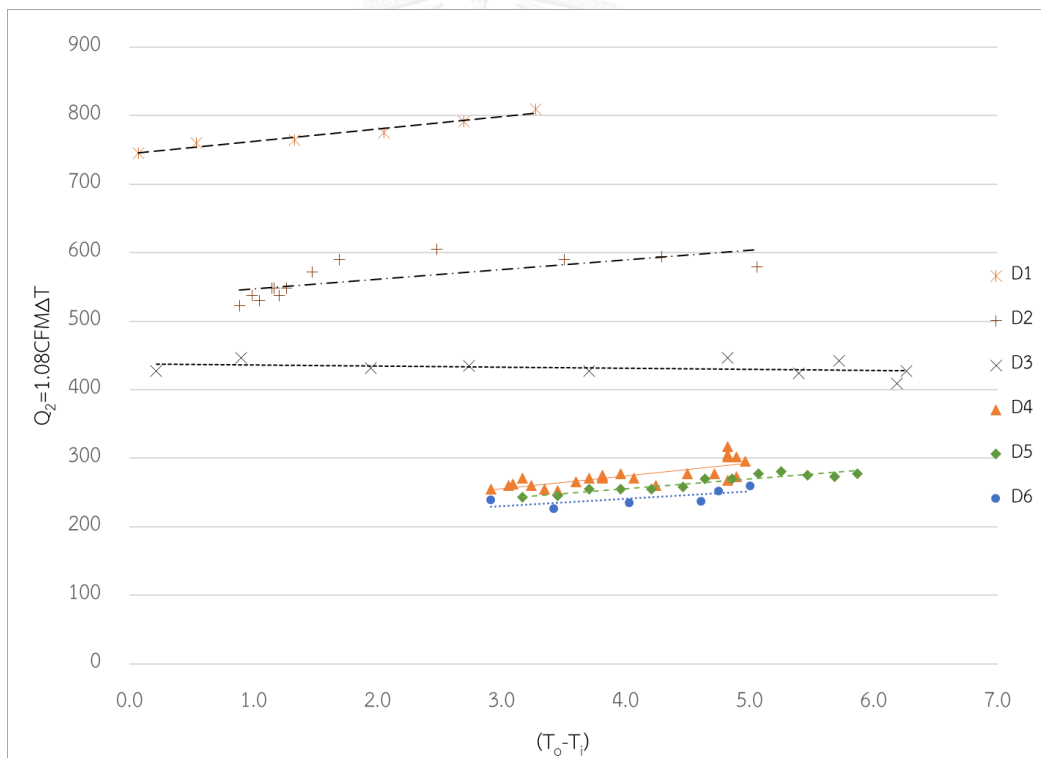
จากแผนภูมิที่ 4.12 จะเห็นว่า ΔT ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH ต่ำกว่าผนังกระจกชั้นเดียวสูงสุดที่ 4.44°C สูงที่สุดในทุกกรณีศึกษาเพราะว่านอกจากจะมีม่านแล้วยังมีอัตราการระบายอากาศที่สูงที่สุดอีกด้วย

จากแผนภูมิที่ 4.7-4.12 พบว่าในรูปแบบ D6 มีผลต่างอุณหภูมิมากที่สุดที่ 4.44°C เนื่องจากการดักรังสีของม่านและอัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ 1050 ACH สามารถพาความร้อนจากม่านและผิวกระจกภายในช่องอากาศออกไปสู่ภายนอกได้ดีที่สุดรองลงมาคือ D5 และ D3 เท่ากันที่ 4.10°C อัตราการระบายอากาศสูงสุดที่ 1050 ACH อาจจะสามารถแทนที่การป้องกันความร้อนของม่านได้จึงสามารถกันแดดพอกับ

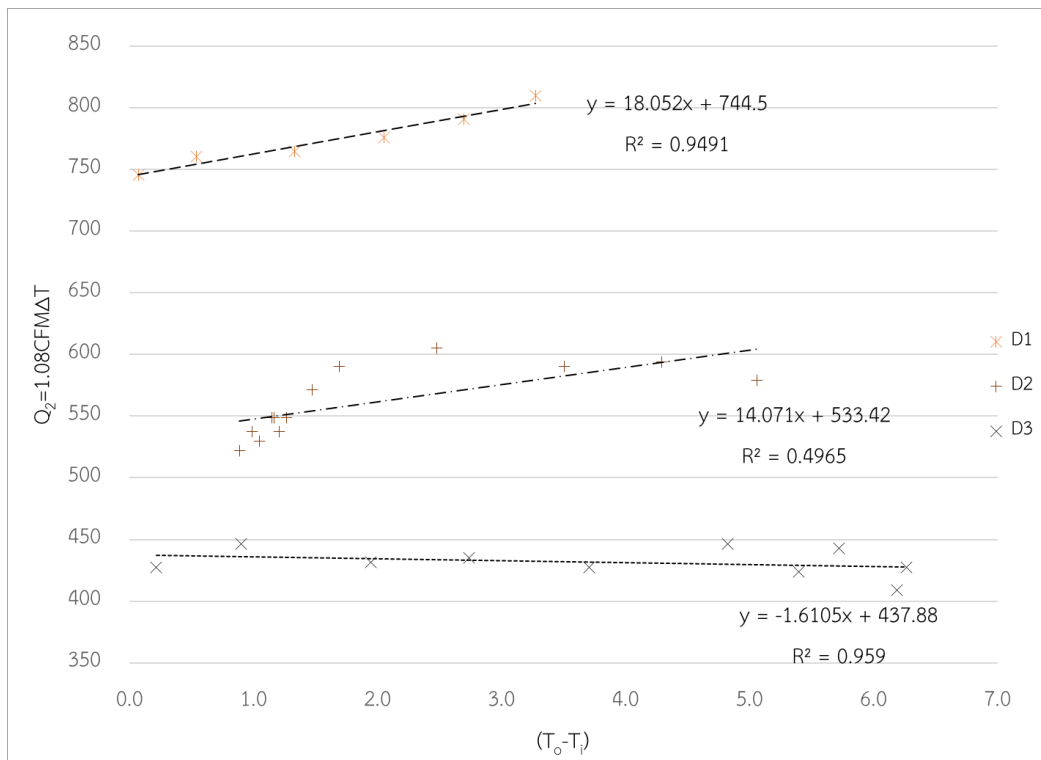
D5 ที่มีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH D4 ที่ 3.40°C D2 ที่ 3.38°C และต่ำที่สุด D1 ที่ 2.22°C เนื่องจากการไม่มีม่านและอัตราการระบายอากาศที่ต่ำสุดที่ 350 ACH ทำให้พาความร้อนออกจากช่องอากาศได้น้อยและไม่สามารถกันรังสีอาทิตย์ได้ และเมื่อนำอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละวันของทุกกรณีศึกษามาวิเคราะห์การถดถอย (Regression) เทียบระหว่างปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง (Q_2) ซึ่งได้จากสมการที่ 4.1 เทียบกับความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน (T_o-T_i) ได้ดังนี้

$$Q_2 = 1.08 \cdot \text{CFM} \cdot \Delta T \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

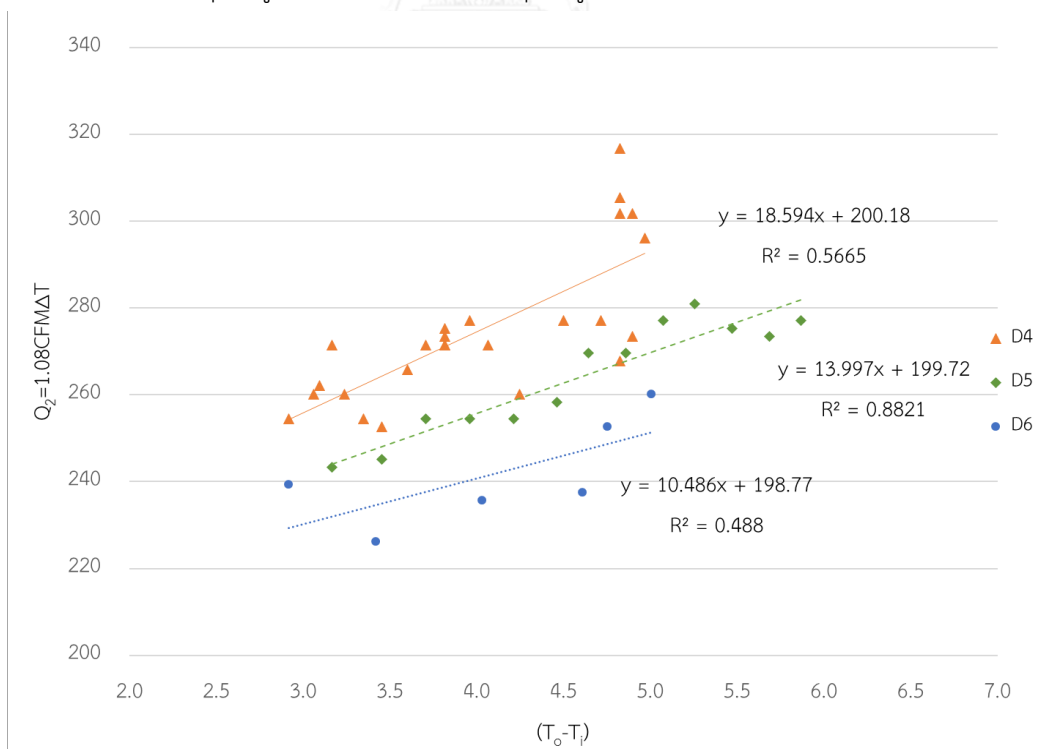
CFM คือ อัตราการระบายอากาศของพัดลม ($\text{ft}^3/\text{min.}$)
 T_{inlet} คือ อุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศเข้า ($^{\circ}\text{F}$)
 T_{outlet} คือ อุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศออก ($^{\circ}\text{F}$)
 1.08 คือ ค่าคงที่



แผนภูมิที่ 4.13 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยเทียบระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง (Q_2) กับ ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน (T_o-T_i)



แผนภูมิที่ 4.14 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยเทียบระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง (Q_2) กับ ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน ($T_o - T_i$) กรณีศึกษา D1-3

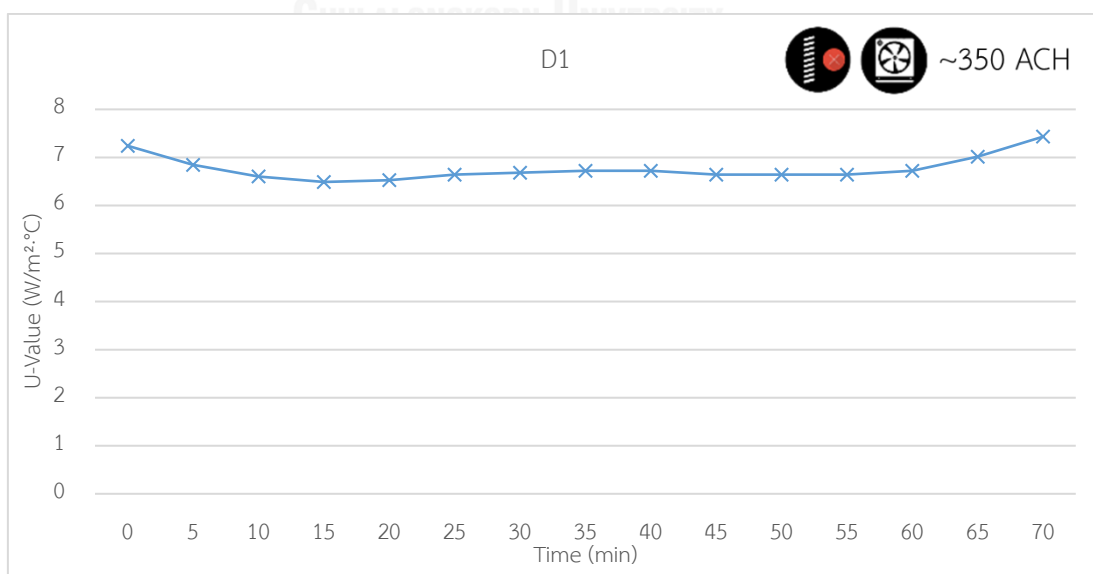


แผนภูมิที่ 4.15 แผนภาพวิเคราะห์การถดถอยเทียบระหว่าง ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง (Q_2) กับ ความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน ($T_o - T_i$) กรณีศึกษา D4-6

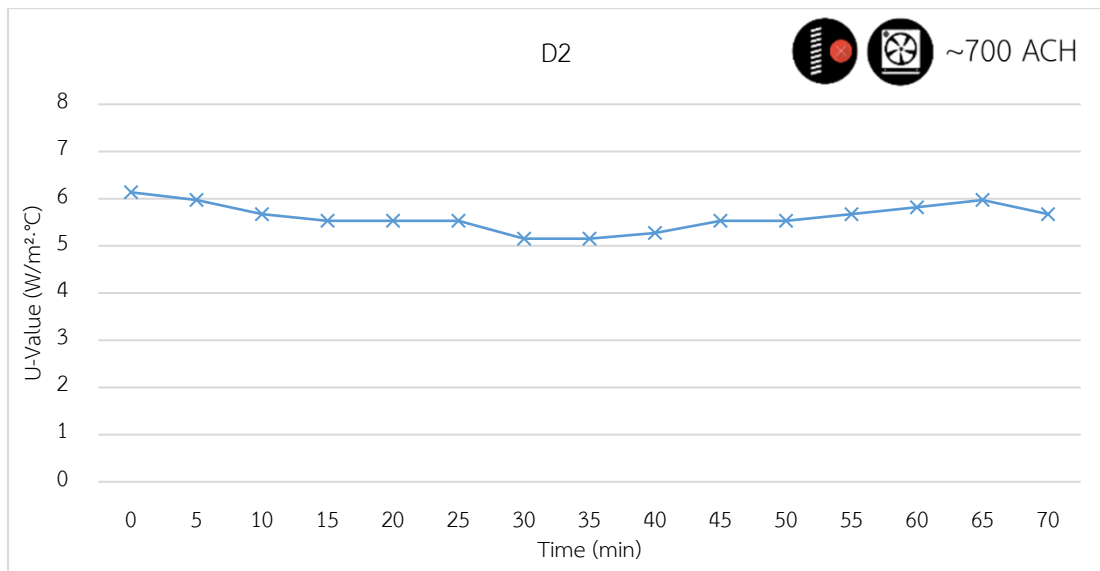
จากแผนภูมิที่ 4.13-4.15 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของความแตกต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกกับอุณหภูมิผิวกระจกภายใน (T_o-T_i) ที่แกน x กับปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง (Q_2) ที่แกน y เป็นสมการเส้นตรงและมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวกระจกมากแล้วคือมีความร้อนเข้าสู่ภายในกล่องทดลองมากทำให้ปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลองของกรณีศึกษาที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH (D6) ต่ำที่สุดและกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 350 ACH (D1) สูงที่สุดไม่ว่าจะทดลองในวันไหนก็ตาม จากการทดลองทั้ง 6 กรณีศึกษาพบว่า ผนังกระจกสองชั้นทั้ง 6 กรณีมีความสามารถในการป้องกันความร้อนมากกว่าผนังกระจกชั้นเดียวซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานโดย D6 สามารถพิสูจน์ได้ว่าการมีม่านและอัตราการระบายอากาศที่สูงทำให้มีความสามารถในการป้องกันความร้อนได้สูงที่สุดโดยเมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียวแล้วแตกต่างกันถึง 4.44°C ม่านใน Cavity ช่วยดักรังสีอาทิตย์ที่ส่งผ่านกระจกชั้นแรกและเปลี่ยนรังสีนั้นเป็นความร้อนให้อากาศที่พุดอยู่ใน Cavity พายออกไปสู่ภายนอกกล่องทดลอง ร่องลงมาเท่ากันสองกรณีศึกษาคือ D5 ซึ่งมีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH และมีม่าน และ D3 ซึ่งมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH แต่ไม่มีม่าน แสดงให้เห็นว่าการมีอัตราการระบายอากาศที่สูงอาจจะสามารถแทนที่ม่านบังแดดแต่มีอัตราการระบายอากาศที่ต่ำได้ และอีกสามลำดับที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนน้อยลงมากคือ D4, D2 และ D1 มี ΔT ที่ 3.40, 3.38 และ 2.22°C แสดงให้เห็นว่าการมีม่านยังคงสำคัญว่าอัตราการระบายอากาศที่สูง

4.1.3 การหาค่า U-Value

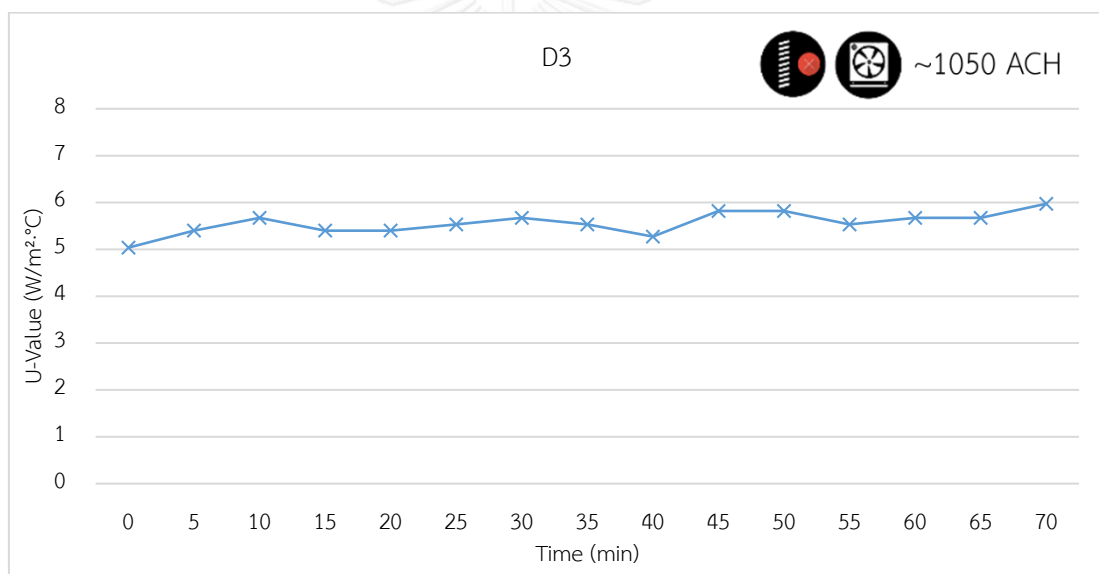
จากการวัดอุณหภูมิผิวนอก (T_o) และผิวใน (T_i) สามารถหา U-Value ได้จากสมการโดยคัดเลือกช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ความต่างของอุณหภูมิตั้งระหว่าง T_i และ T_o คงที่ซึ่งหมายถึงความร้อนเข้าไปสู่กล่องทดลองได้เต็มที่และสามารถนำมาคำนวณหาค่า U-Value ได้ ผลจากการคำนวณได้ดังนี้



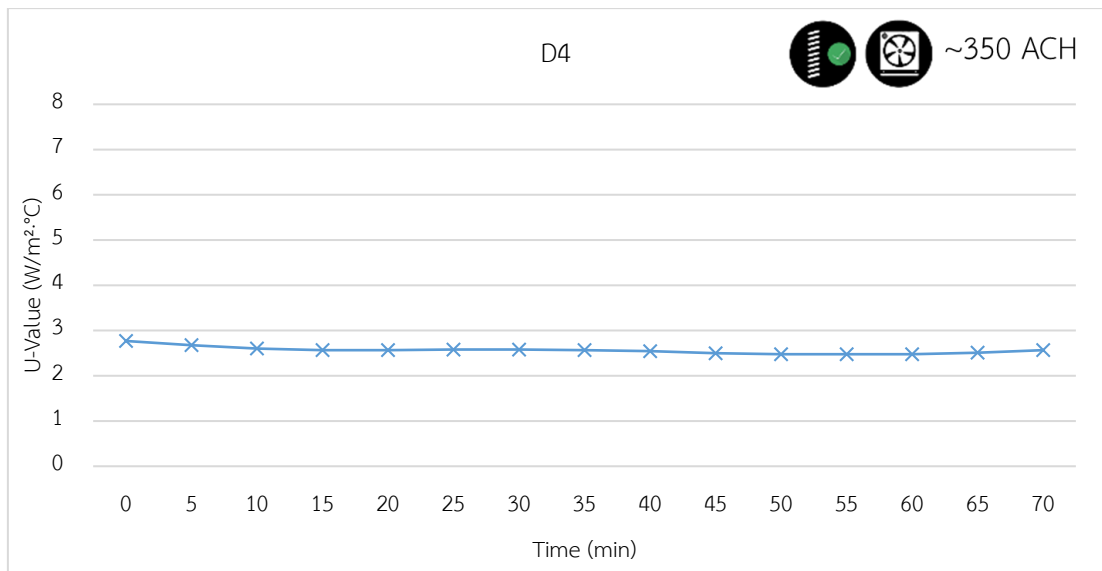
แผนภูมิที่ 4.16 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 350 ACH



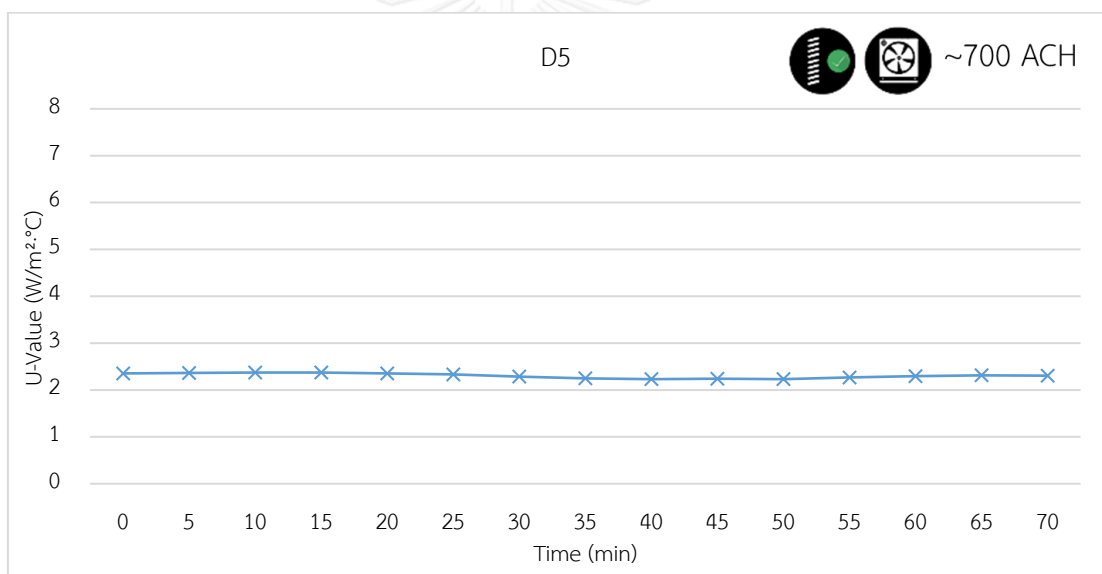
แผนภูมิที่ 4.17 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 700 ACH



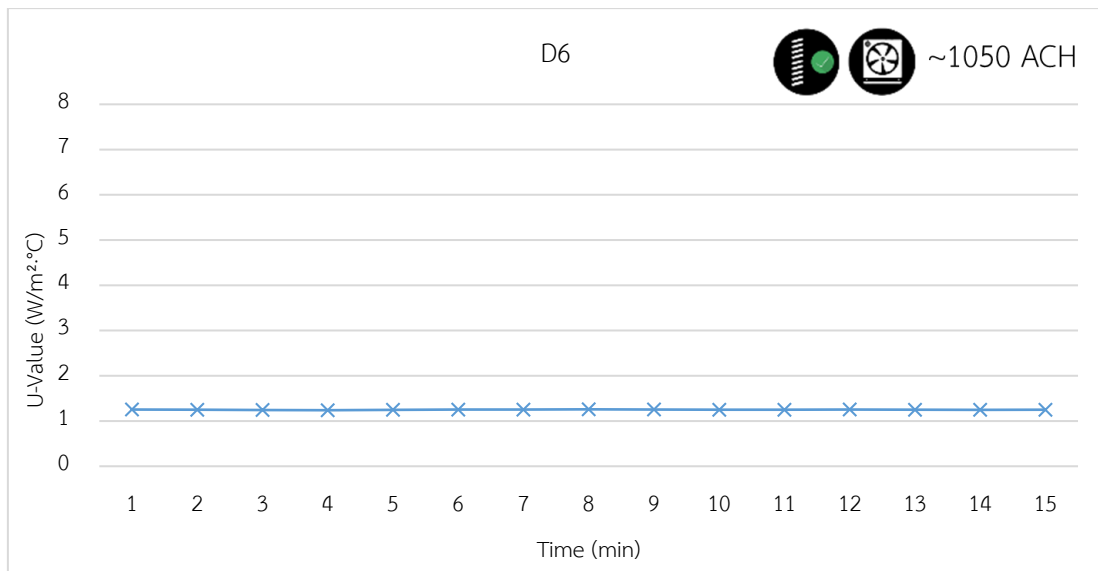
แผนภูมิที่ 4.18 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่ไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH



แผนภูมิที่ 4.19 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 350 ACH

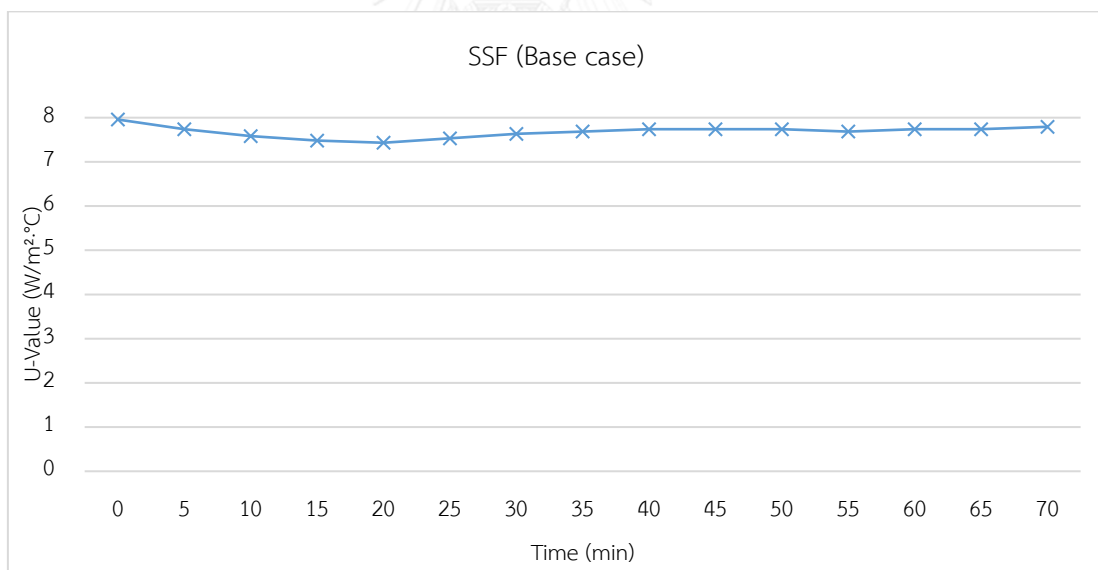


แผนภูมิที่ 4.20 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 700 ACH



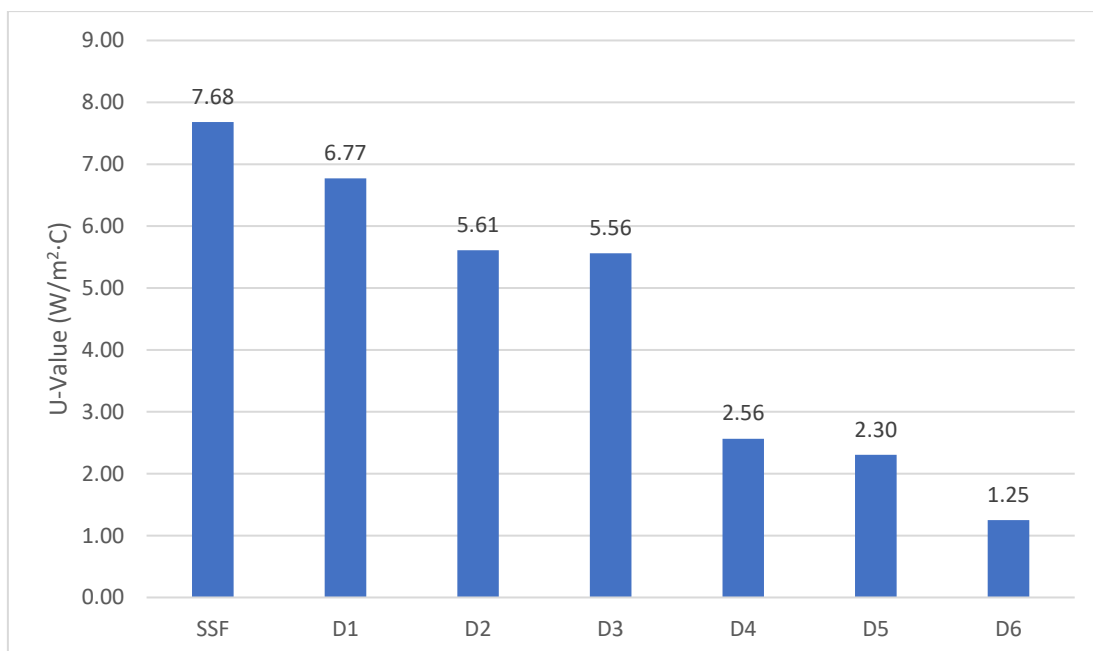
แผนภูมิที่ 4.21 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH

จากแผนภูมิที่ 4.16-4.21 จะเห็นได้ว่าค่า U-Value มีความคงที่กล่าวคืออยู่ในช่วงขึ้นลงไม่เกิน 1 W/m²·°C ซึ่งจาก D1-D6 ค่า U-Value มีแนวโน้มต่ำลงโดยระหว่าง D2-D3 จะต่ำกว่ากันไม่มาก และเมื่อนำผลจากการวัด ผนังกระจกชั้นเดียว (SSF) มาคำนวณหาค่า U-Value จะได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.22 ค่า U-Value ของผนังกระจกสองชั้นเดียว (SSF)

จากแผนภูมิที่ 4.22 พบว่า ค่า U-Value ที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่ากรณีศึกษา D1-D6 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าทุกกรณีศึกษาที่ใช้ผนังกระจกสองชั้นมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดีกว่าผนังกระจกชั้นเดียว และเมื่อนำค่า U-Value ทั้งช่วงมาเฉลี่ยจะได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.23 ค่า U-Value ของทุกกรณีศึกษา

จากแผนภูมิที่ 4.23 ค่า U-Value แบ่งออกมาได้อย่างเห็นได้ชัดคือ D4, D5 และ D6 ที่มีม่านจะมีค่า U-Value ที่ต่ำ โดยอัตราการระบายอากาศจะช่วยพาความร้อนจากผิวกระจกและความร้อนที่สะสมบนผิวม่านภายใน Cavity ออกไปได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อนได้มากกว่าส่วนของ D1, D2, และ D3 ซึ่งไม่มีม่าน อัตราการระบายอากาศที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกันความร้อนของผนังกระจกมากนักและเมื่ออ้างอิงจากการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง D2 และ D3 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการระบายอากาศได้พาความร้อนที่เกิดจากการนำและพาเข้าสู่ระบบผนังกระจกออกจากผนังกระจกทั้งหมดแต่ความร้อนที่เกิดจากรังสีภายนอกไม่สามารถนำออกไปจากระบบผนังกระจกด้วยการพาได้ เพราะฉะนั้นอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มมากขึ้นมากกว่า 700 ACH ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกันความร้อนของผนังกระจกสองชั้น อย่างไรก็ตามทั้ง D2 และ D3 ยังคงมีค่า U-Value ต่ำกว่า D1 ที่ไม่มีม่านและใช้อัตราการระบายอากาศต่ำที่สุด

4.2 ผลการจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1

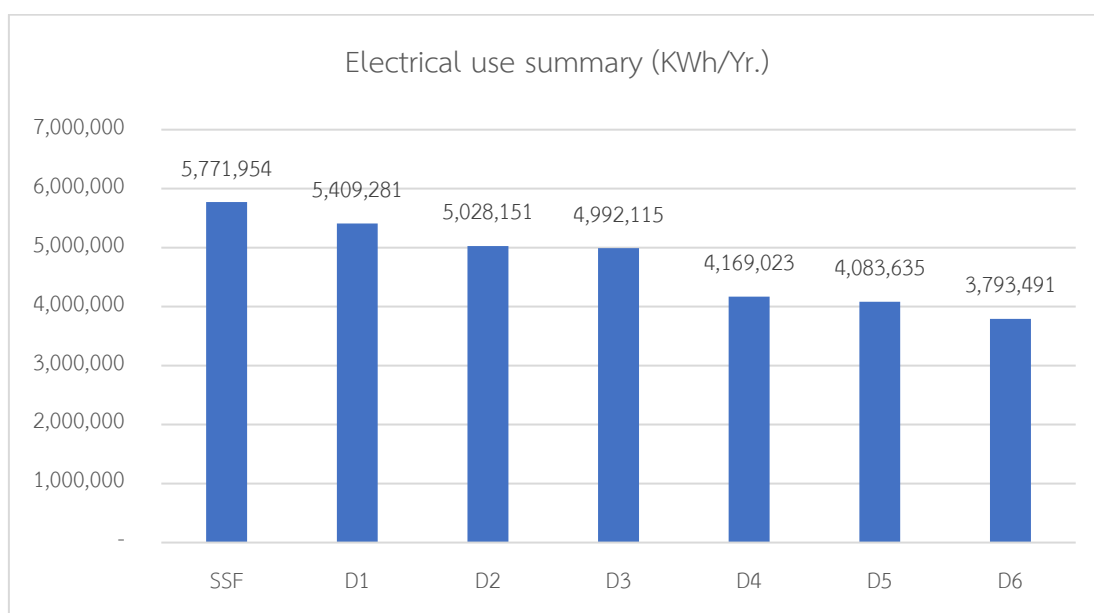
เนื่องด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 ไม่มีการคำนวณผนังกระจกสองชั้นโดยเฉพาะการจำลองในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีจำลอง 2 รูปแบบการจำลองแบ่งเป็นสองรูปแบบคือจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นและผนังกระจกชั้นเดียว

4.2.1 การจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น

จำลองผนังทั้งสองชั้นด้วยโปรแกรมโดยขอบนอกของอาคารถอยร่นเข้ามา 0.3 ม. เพื่อให้เป็นช่อง Cavity ของกระจกสองชั้นโดยใช้คำสั่ง Perimeter และกระจกชั้นนอกตั้งค่าวัสดุให้เป็นกระจกใส 6 มม.

และผนังภายในเป็น Partition ซึ่งมีค่า U-Value แตกต่างไปตามค่า U-Value จากการทดลอง และกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของผนัง (Absorptions) เป็น 0.32 ตามค่า Absorptions ของมู่ลี่พลาสติก ภายในช่อง Cavity ตั้งค่าอัตราการระบายอากาศด้วย Infiltration ตามตัวแปรที่กำหนด การจำลองในลักษณะนี้จะกำหนดให้ผนังกระจกชั้นในไม่มีรังสีอาทิตย์ผ่านเข้ามาได้ หรือหมายความว่าทำการจำลองเสมือนม่านปิดสนิทแบบผนังทึบที่มีค่า SHGC = 0

ผลจากการจำลองเพื่อหาปริมาณพลังงานที่ใช้ได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.24 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นในโปรแกรม

VisualDOE 4.1

จากการจำลองอาคารกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 แล้วได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี ดังแผนภูมิที่ 4.24 จะเห็นว่าผนังกระจกสองชั้นทั้งหมด (D1-D6) สามารถลดการใช้พลังงานได้จริงเมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว (SSF) โดยผนังกระจกสองชั้นกรณีศึกษาที่มีม่าน (D4-D6) จะสามารถลดได้เยอะกว่ารูปแบบที่ไม่มีม่าน (D1-D3) เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น (U-Value) น้อยกว่ามาก และที่ลดได้มากที่สุดคือผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่านและระบายอากาศสูงที่สุดที่ 1050 ACH (D6) ซึ่งสามารถลดได้ร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียวรองลงมาคืออัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D5) และอัตราการระบายอากาศที่ 350 ACH (D4) ลดได้ร้อยละ 29 และ 28 ตามลำดับ และในกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D3) และอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D2) ลดการใช้พลังงานได้ใกล้เคียงกันคือร้อยละ 14 และ 13 ตามลำดับเนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้นใกล้เคียงกัน และกรณีศึกษาที่ลดได้น้อยที่สุดคืออัตราการระบายอากาศ 350 ACH (D1) ลดได้ร้อยละ 6 เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้นสูงที่สุด

การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

หลังจากได้ค่าพลังงานที่ประหยัดแล้ว สามารถคิดเป็นราคาการลงทุนและราคาที่ประหยัดได้เพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้วยการคำนวณโดยใช้สูตร Payback period (PB) การคำนวณราคาค่าไฟฟ้า คิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง (<http://www.mea.or.th/profile/109/114,2558,24/5/60>) ในประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ ในช่วง On peak หรือ 9.00-22.00 วันจันทร์-วันศุกร์ ในแรงดัน 12-24 กิโลโวลต์ มีค่าไฟอยู่ที่ 4.2097 บาท/หน่วย โดยคิดวันละ 8 ชม. คือ 8.00น.-12.00น. และ 13.00น.-17.00น. ได้ผลการคำนวณดังนี้

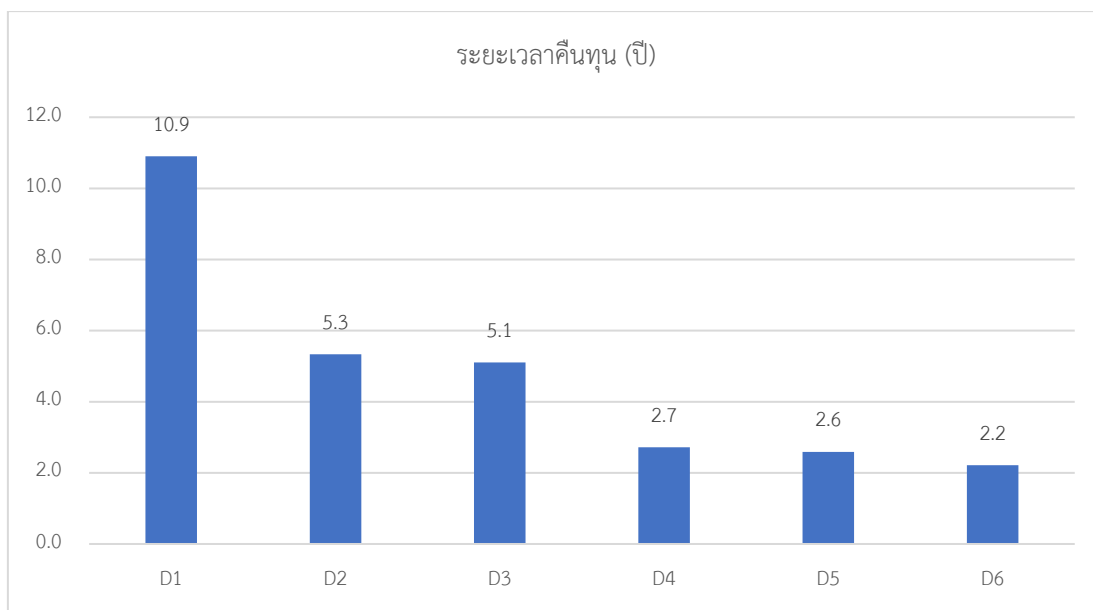
ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period)

	SSF	D1	D2	D3	D4	D5	D6
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	2,349,655	2,296,967	2,233,522	2,245,761	2,102,808	2,083,742	2,052,951
ค่าไฟฟ้าต่อปี	9,891,343	9,669,542	9,402,458	9,453,980	8,852,191	8,771,929	8,642,308
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน							
1. ค่าผนังกระจกพร้อมอลูมิเนียม* (บาท)		16,588,800	16,588,800	6,588,800	16,588,800	16,588,800	16,588,800
2. ค่ามู่ลี่* (บาท)					1,708,032	1,708,032	1,708,032
3. ค่าไฟฟ้าจากการระบายอากาศ** (บาท)		55,867	111,734	167,601	55,867	111,734	167,601
รวมค่าใช้จ่ายในการลงทุน (บาท)		16,644,667	16,700,534	16,756,401	18,352,699	18,408,566	18,464,433
ราคาค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)		1,526,745	3,131,187	3,282,888	6,747,859	7,107,316	8,328,736
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้เมื่อเทียบกับ Base case (%)		6%	13%	14%	28%	29%	34%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		10.9	5.3	5.1	2.7	2.6	2.2

หมายเหตุ

* ราคาตัววัสดุก่อสร้างเป็นราคาโดยรวมค่าดำเนินการ, กำไรผู้ประกอบการ ร่วมกับราคากลางกำหนดโดยกระทรวงพาณิชย์ (2550)

** ค่าไฟฟ้าจากการใช้พัดลมระบายอากาศคิดกำลังไฟฟ้าจากพัดลมที่ใช้ในการทดลอง



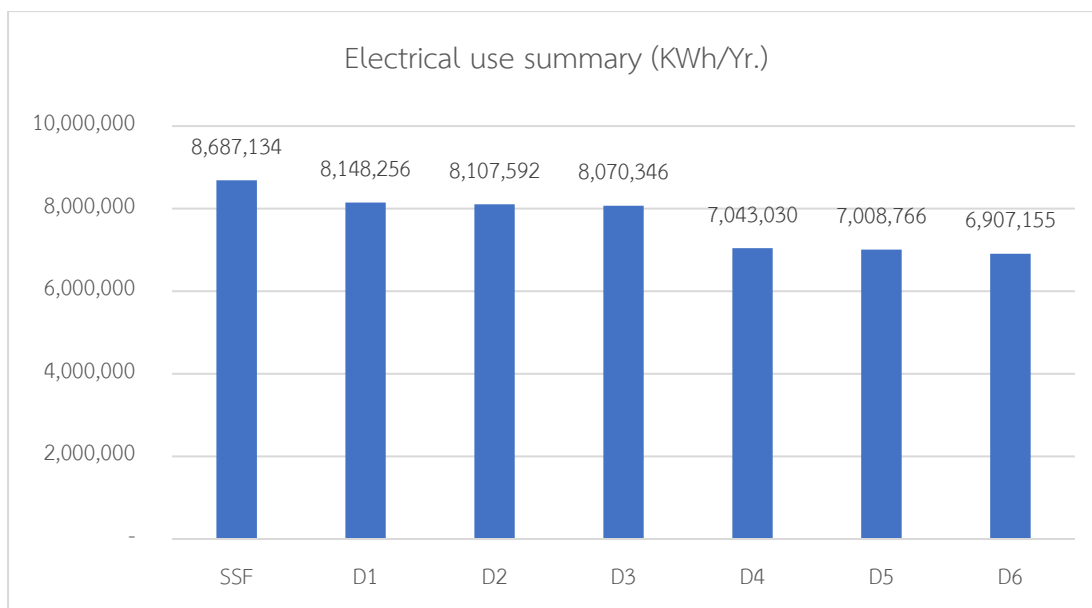
แผนภูมิที่ 4.25 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา

จากตารางที่ 4.1 และแผนภูมิที่ 4.25 แสดงถึงค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี และระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีศึกษาเมื่อใช้การจำลองด้วย VisualDOE 4.1 ด้วยวิธีจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D6) มีระยะเวลาคืนทุนต่ำที่สุดคือต้นปีที่ 3 เนื่องจากสามารถประหยัดได้สูงที่สุด รองลงมาคือผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D5) และ 350 ACH (D4) มีระยะเวลาคู่มือทุนอยู่ปลายปีที่ 3 ซึ่งทั้งสามกรณีศึกษานี้มีระยะเวลาคู่มือทุนเร็วกว่ากรณีศึกษาที่ไม่มีม่านโดยกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D3) และ 700 ACH (D2) มีระยะเวลาคู่มือทุนใกล้เคียงกันที่ต้นปีที่ 6 เนื่องจากสามารถประหยัดได้ใกล้เคียงกัน และกรณีศึกษาที่มีระยะเวลาคู่มือทุนยาวนานที่สุดคือกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 300 ACH (D1) เนื่องจากประหยัดได้น้อยที่สุดโดยมีระยะเวลาคู่มือทุนอยู่ในปีที่ 11

4.2.2 การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว

จำลองให้ผนังกระจกสองชั้นเป็นผนังกระจกชั้นเดียวโดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นเป็นผนังกระจกใสหนา 6 มม. และเปลี่ยนค่า U-Value ให้เท่ากับที่ได้จากการทดลองโดยการจำลองในรูปแบบนี้ รังสีความร้อนจากภายนอกจะสามารถเข้ามาในอาคารได้แต่จะกำหนดให้ค่า SHGC มาจากการคำนวณดังสมการที่ 3.8

ผลจากการจำลองเพื่อหาปริมาณพลังงานที่ใช้ได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.26 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวในโปรแกรม

VisualDOE 4.1

จากการจำลองอาคารกรณีศึกษาด้วยโปรแกรม VisualDOE 4.1 แล้วได้ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อปี ดังแผนภูมิที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าผนังกระจกสองชั้นทั้งหมด (D1-D6) สามารถลดการใช้พลังงานได้จริงเมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว (SSF) โดยผนังกระจกสองชั้นกรณีศึกษาที่มีม่าน (D4-D6) จะสามารถลดได้เยอะกว่ารูปแบบที่ไม่มีม่าน (D1-D3) เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น (U-Value) น้อยกว่ามาก และที่ลดได้มากที่สุดคือผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่านและระบายอากาศสูงที่สุดที่ 1050 ACH (D6) ซึ่งสามารถลดได้ร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียวรองลงมาคืออัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D5) และอัตราการระบายอากาศที่ 350 ACH (D4) ลดได้ร้อยละ 19 เท่ากันเนื่องจากทั้งสองกรณีศึกษามีค่า SHGC ที่ใกล้เคียงกัน และในกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D3) และอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D2) ลดการใช้พลังงานได้เท่ากันคือร้อยละ 7 เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้นรวมถึงค่า SHGC ใกล้เคียงกัน และกรณีศึกษาที่ลดได้น้อยที่สุดคืออัตราการระบายอากาศ 350 ACH (D1) ลดได้ร้อยละ 6 เนื่องจากมีค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้นและค่า SHGC สูงที่สุด โดยการจำลองในรูปแบบนี้มีค่าการใช้พลังงานต่อปีสูงกว่าการจำลองโดยใช้ผนังกระจกสองชั้นเพราะการจำลองในรูปแบบผนังกระจกชั้นเดียวจะยอมให้รังสีความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคารได้มากกว่าการจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น

การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

หลังจากได้ค่าพลังงานที่ประหยัดแล้วก็สามารถคิดเป็นราคาการลงทุนและราคาที่ประหยัดได้เพื่อหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้วยการคำนวณโดยใช้สูตร Payback period (PB) การคำนวณราคาค่าไฟฟ้าคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง (<http://www.meo.or.th/profile/109/114,2558,24/5/60>) ในประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ ในช่วง On peak หรือ 9.00-22.00 วันจันทร์-วันศุกร์ ในแรงดัน 12-24

กิโลวัตต์ มีค่าไฟอยู่ที่ 4.2097 บาท/หน่วย โดยคิดวันละ 8 ชม. คือ 8.00น.-12.00น. และ 13.00น.-17.00 น. ได้ผลการคำนวณดังนี้

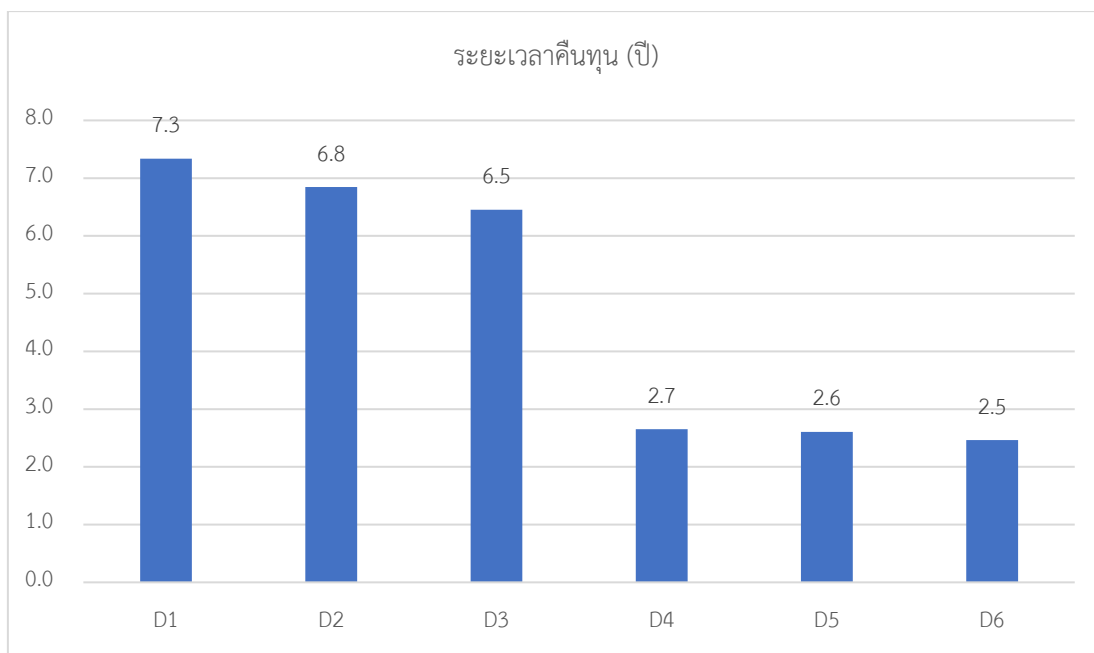
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period)

	SSF	D1	D2	D3	D4	D5	D6
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	2,349,655	2,296,967	2,233,522	2,245,761	2,102,808	2,083,742	2,052,951
ค่าไฟฟ้าต่อปี	9,891,343	9,669,542	9,402,458	9,453,980	8,852,191	8,771,929	8,642,308
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน							
1. ค่าผนังกระจกพร้อม อลูมิเนียม* (บาท)		6,588,800	6,588,800	6,588,800	6,588,800	6,588,800	6,588,800
2. ค่ามู่ลี่* (บาท)					1,708,032	1,708,032	1,708,032
3. ค่าไฟฟ้าจากการ ระบายอากาศ** (บาท)		55,867	111,734	167,601	55,867	111,734	167,601
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)		6,644,667	6,700,534	6,756,401	8,352,699	8,408,566	8,464,433
ราคาค่าไฟฟ้าที่ประหยัด ได้ต่อปี (บาท)		2,268,515	2,439,698	2,596,492	6,921,185	7,065,426	7,493,178
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Base case (%)		6%	7%	7%	19%	19%	20%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		7.3	6.8	6.5	2.7	2.6	2.5

หมายเหตุ

* ราคาตัววัสดุก่อสร้างเป็นราคาโดยรวมค่าดำเนินการ, กำไรผู้ประกอบการ ร่วมกับราคากลางกำหนด
โดยกระทรวงพาณิชย์ (2550)

** ค่าไฟฟ้าจากการใช้พัดลมระบายอากาศคิดกำลังไฟฟ้าจากพัดลมที่ใช้ในการทดลอง



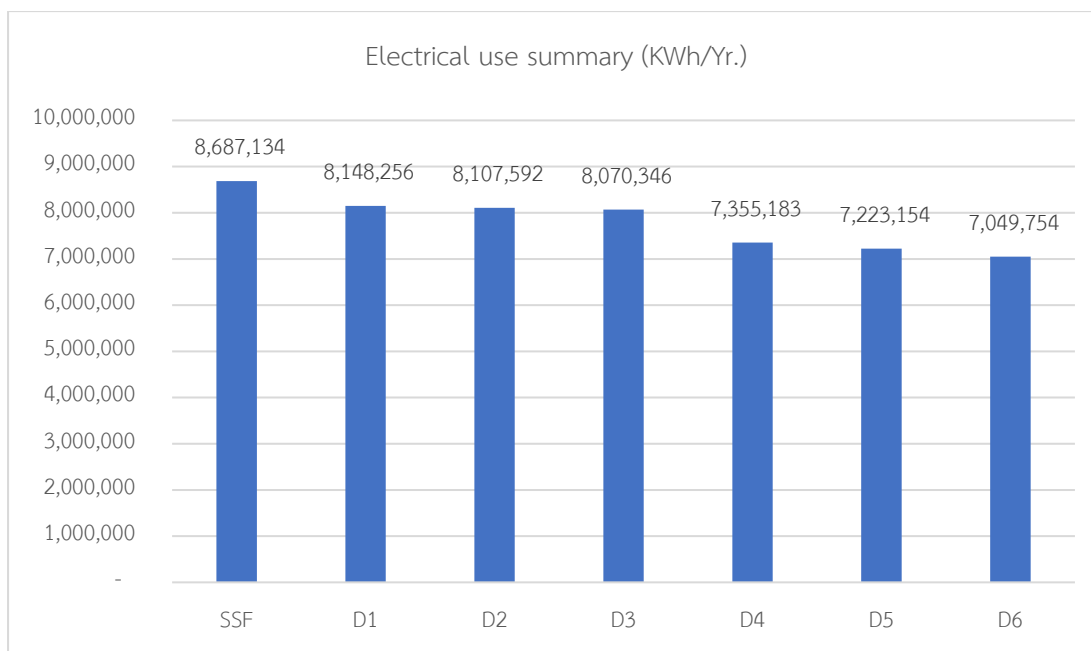
แผนภูมิที่ 4.27 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา

จากตารางที่ 4.2 และแผนภูมิที่ 4.27 แสดงถึงค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี และระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีศึกษาเมื่อใช้การจำลองด้วย VisualDOE 4.1 ด้วยวิธีจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D6), 700 ACH (D5) และ 350 ACH (D4) มีระยะเวลาคืนทุนใกล้เคียงกันคือกลางปีที่ 3 เนื่องจากมีค่า SHGC ใกล้เคียงกันซึ่งมีผลมากกว่าค่า U-Value ในกระจก แต่ทั้งสามกรณีศึกษามีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่ากรณีศึกษาที่ไม่มีม่าน (D1-D3) โดยอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D3) มีระยะเวลาคืนทุนในกลางปีที่ 7 ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศ 700 ACH เนื่องจากมีค่า U-Value และ SHGC ใกล้เคียงกัน และกรณีศึกษาที่มีระยะเวลาคืนทุนยาวนานที่สุดคืออัตราการระบายอากาศ 350 ACH (D1) เพราะสามารถประหยัดได้น้อยที่สุด

4.2.3 การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อม Movable Blinds

เนื่องจากปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถใช้เซนเซอร์วัดปริมาณรังสีอาทิตย์ที่แผ่มาสู่ผนังกระจกการและการปรับม่านให้เหมาะสมกับรังสีที่แผ่มา นั่น เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดทั้งในด้านการป้องกันรังสีอาทิตย์จากภายนอกและแสงที่เพียงพอต่อการทำงาน จึงทำการจำลองโดยใช้แนวคิดดังกล่าวมาใช้งานร่วมกับผนังกระจกสองชั้น โดยใช้วิธีจำลองเหมือนผนังกระจกชั้นเดียวแบบหัวข้อ 4.2.2 แต่เพิ่มระบบควบคุมม่าน (Moveable blinds) โดยกำหนดให้ม่านปิดเมื่อได้รับรังสีเกิน 30 W/m^2

ผลจากการจำลองเพื่อหาปริมาณพลังงานที่ใช้ได้ดังนี้



แผนภูมิที่ 4.28 แสดงการใช้พลังงานของอาคารกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวและระบบควบคุม ม่านในโปรแกรม VisualDOE 4.1

จากแผนภูมิที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าในกรณีศึกษาที่ไม่ม่าน (D1-D3) มีค่าการใช้พลังงานเท่าการใช้วิธีจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว (แผนภูมิที่ 4.26) เนื่องจากไม่มีม่านดักรังสีความร้อนจากภายนอกเหมือน การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวจึงใช้พลังงานเท่าเดิม แต่ในกรณีศึกษาที่มีม่าน (D4-D6) มีค่าการใช้ พลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงเช้าและเย็นที่รังสีความร้อนจากภายนอกยังไม่ถึง 30 W/m^2 ม่านยังคง เปิดรับรังสีความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ตัวอาคารทำให้ภาระทำความเย็นเพิ่มจากการจำลองด้วยผนังกระจก ชั้นเดียวซึ่งปิดม่านตลอดวัน ในกรณีศึกษาที่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D6) สามารถ ลดได้สูงที่สุดร้อยละ 20 และกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D5) และ 350 ACH (D4) สามารถลดได้ร้อยละ 18 และ 17 ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการ จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว

การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

หลังจากได้ค่าพลังงานที่ประหยัดแล้วก็สามารถคิดเป็นราคาการลงทุนและราคาที่ประหยัดได้เพื่อ หาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ด้วยการคำนวณโดยใช้สูตร Payback period (PB) การคำนวณราคาค่า ไฟฟ้าคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง (<http://www.mea.or.th/profile/109/114,2558,24/5/60>) ในประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ ในช่วง On peak หรือ 9.00-22.00 วันจันทร์-วันศุกร์ ในแรงดัน 12-24 กิโลโวลต์ มีค่าไฟอยู่ที่ 4.2097 บาท/หน่วย โดยคิดวันละ 8 ชม. คือ 8.00น.-12.00น. และ 13.00น.-17.00 น. ได้ผลการคำนวณดังนี้

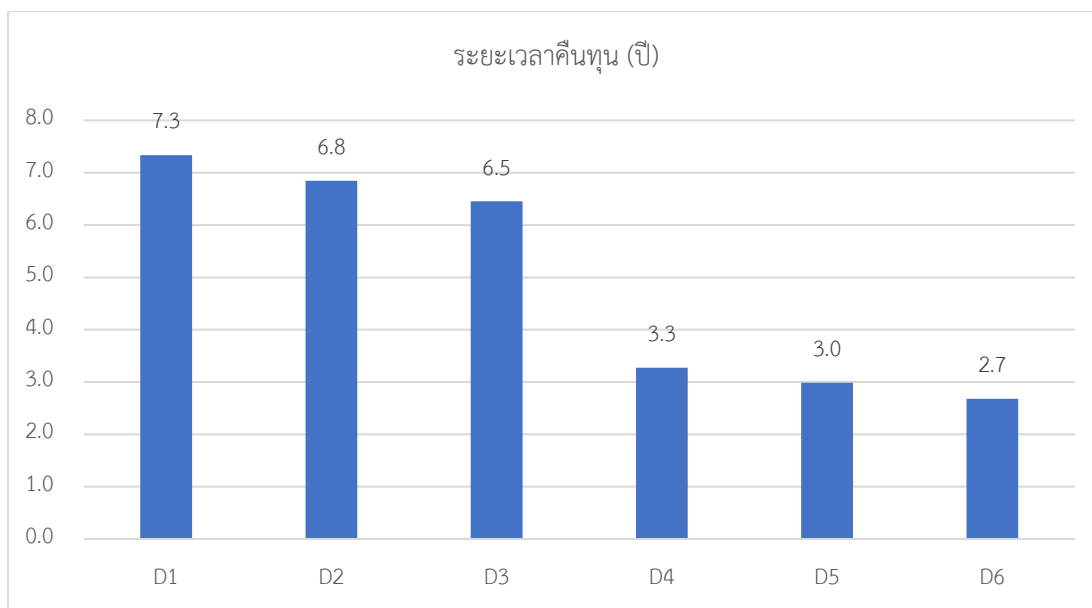
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าต่อปีและระยะเวลาคืนทุนของอาคารสำนักงาน (Payback Period)

	SSF	D1	D2	D3	D4	D5	D6
พลังงานไฟฟ้าต่อปี (kWh/year)	2,349,655	2,296,967	2,233,522	2,245,761	2,102,808	2,083,742	2,052,951
ค่าไฟฟ้าต่อปี	9,891,343	9,669,542	9,402,458	9,453,980	8,852,191	8,771,929	8,642,308
ค่าใช้จ่ายในการลงทุน							
1. ค่าผนังกระจกพร้อม อลูมิเนียม* (บาท)		16,588,800	16,588,800	6,588,800	16,588,800	16,588,800	16,588,800
2. ค่ามู่ลี่* (บาท)					1,708,032	1,708,032	1,708,032
3. ค่าไฟฟ้าจากการ ระบายอากาศ** (บาท)		55,867	111,734	167,601	55,867	111,734	167,601
รวมค่าใช้จ่ายในการ ลงทุน (บาท)		16,644,667	16,700,534	16,756,401	18,352,699	18,408,566	18,464,433
ราคาค่าไฟฟ้าที่ ประหยัดได้ต่อปี (บาท)		2,268,515	2,439,698	2,596,492	5,607,114	6,162,917	6,892,879
ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ เมื่อเทียบกับ Base case(%)		7%	7%	8%	17%	18%	20%
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)		7.3	6.8	6.5	3.3	3.0	2.7

หมายเหตุ

* ราคาค่าวัสดุก่อสร้างเป็นราคาโดยรวมค่าดำเนินการ, ถ้าใครผู้ประกอบการ ร่วมกับราคากลางกำหนด
โดยกระทรวงพาณิชย์ (2550) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

** ค่าไฟฟ้าจากการใช้พัดลมระบายอากาศคิดกำลังไฟฟ้าจากพัดลมที่ใช้ในการทดลอง



แผนภูมิที่ 4.29 ระยะเวลาคืนทุน (ปี) เมื่อใช้ผนังกระจกในแต่ละกรณีศึกษา จำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว พร้อม Movable Blinds ในโปรแกรม VisualDOE 4.1

จากตารางที่ 4.3 และแผนภูมิที่ 4.29 แสดงถึงค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี และระยะเวลาคืนทุนของแต่ละกรณีศึกษาเมื่อใช้การจำลองด้วย VisualDOE 4.1 ด้วยวิธีจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อม Movable Blinds พบว่าในกรณีศึกษาที่มีม่าน (D4-D6) มีระยะเวลาคืนทุนที่นานขึ้นเมื่อเทียบกับการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวเนื่องจากรังสีความร้อนจากอาทิตย์สามารถเข้ามาสู่ภายในอาคารได้ช่วงที่ม่านยังไม่ปิดหรือช่วงที่รังสีความร้อนยังไม่ถึง 30 W/m^2 ทำให้จะต้องใช้พลังงานในการทำความร้อนมากกว่าผนังกระจกสองชั้นที่ปิดม่านตลอดวัน โดยในกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH (D6) มีระยะเวลาคืนทุนในปลายปีที่ 3 และกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศที่ 700 ACH (D5) และ 350 ACH (D4) มีระยะเวลาคืนทุนในต้นปีที่ 4 ทั้งนี้กรณีศึกษาที่ไม่มีม่าน (D1-D3) มีระยะเวลาคืนทุนเท่าเดิม

จากการจำลองด้วย VisualDOE 4.1 พบว่าทั้งสามวิธีผนังกระจกสองชั้นทุกกรณีศึกษาสามารถประหยัดได้มากกว่าผนังกระจกชั้นเดียว และการจำลองทั้งสองวิธีมีระยะเวลาคืนทุนใกล้เคียงกันโดยทั้งสองวิธีกระจกสองชั้นที่มีม่านจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 3 ปี และเมื่อไม่มีม่านระยะเวลาคืนทุนเมื่อใช้วิธีจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นอยู่ที่ 6-11 ปี และการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 7-8 ปี ซึ่งเมื่อเทียบการจำลองทั้งสองวิธีแล้วจากแผนภูมิที่ 4.25 และ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อไม่มีม่านระยะเวลาคืนทุนของทั้งสองวิธีการจำลองจะใกล้เคียงกันเพราะว่าในวิธีการจำลองด้วยกระจกสองชั้นกำหนดให้ผนังชั้นในเป็นผนังทึบและการจำลองด้วยกระจกชั้นเดียวมีค่า SHGC ต่ำ โดยตั้งสมมติฐานว่าม่านใน Cavity ถูกปิดสนิทโดยผู้ใช้อาคารซึ่งเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม VisualDOE 4.1 ความร้อนจากรังสีจึงมีผลน้อยดังนั้นตัวแปรที่สำคัญจึงขึ้นอยู่กับความร้อนที่เกิดจากการนำเข้าสู่อาคารซึ่งทั้งสองวิธีการจำลองมีค่าเทียบเท่ากัน แต่ในกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านการจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น ระยะเวลาคืนทุนของกรณีศึกษา D2 และ D3 ต่ำกว่าระยะเวลา

ต้นทุนของการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว เนื่องจากการจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้นกำหนดให้ผนังชั้นในเป็นผนังทึบแต่การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวกำหนดให้ค่า SHGC ของกระจกสูง ตัวแปรที่สำคัญจึงเป็นรังสีความร้อนจากภายนอกจึงทำให้วิธีการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวซึ่งมีค่า SHGC สูงมีระยะเวลาต้นทุนสูงกว่าวิธีการจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลจากการศึกษาในส่วนของอุณหภูมิภายในห้องที่เกิดจากการวัดปริมาณความร้อนจากความต่างอุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศเข้าและออกพบว่า อัตราการระบายอากาศมีผลคือเมื่ออัตราการระบายอากาศสูงอุณหภูมิภายในห้องก็จะลดต่ำลงไปด้วยอย่างไรก็ตามเมื่อวัดอุณหภูมิผิวกระจกนอกและใน และนำไปคำนวณค่า U-Value เพื่อหาประสิทธิภาพในการกันความร้อน พบว่ามันเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกันความร้อนสูง โดยเมื่อใช้มันกับอัตราการระบายอากาศที่สูงซึ่งสามารถพาความร้อนออกจากผิวกระจกและผิวมันภายใน Cavity ก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกันความร้อนอีกด้วย ในทางกลับกันเมื่อไม่มีมันรังสีความร้อนก็จะเข้าสู่กล่องทดลองได้ง่ายนั้นหมายถึงประสิทธิภาพการกันความร้อนที่ต่ำเมื่ออ้างอิงค่า U-Value ของกรณีศึกษาที่ D2 และ D3 พบว่าอัตราการระบายอากาศมีผลน้อยมากเนื่องจากอัตราการระบายอากาศได้พาพาความร้อนที่เกิดจากการนำและพาเข้าสู่ระบบผนังกระจกออกจากผนังกระจกทั้งหมดแต่ความร้อนที่เกิดจากรังสีอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถช่วยลดได้ อย่างไรก็ตามทั้ง D2 และ D3 ยังคงดีกว่า D1 ที่ไม่มีมันและใช้อัตราการระบายอากาศต่ำที่สุด เพราะฉะนั้นอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มมากขึ้นมากกว่า 700 ACH ไม่ได้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกันความร้อนของผนังกระจกสองชั้นเท่าใดนัก

จากการนำผลจากการคำนวณ U-Value ไปจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบด้วยสามวิธีพบว่า กระจกสองชั้นทุกกรณีศึกษาสามารถลดภาระทำความเย็นได้จริง ซึ่งเมื่อจำลองโดยใช้ผนังกระจกสองชั้นพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีมันมีระยะคืนทุนอยู่ที่ 3 ปี ในทุกอัตราการระบายอากาศ และเมื่อไม่มีมันและมีอัตราการระบายอากาศ 1050 และ 700 ACH มีระยะคืนทุนที่ 6 ปีและอัตราการระบายอากาศ 350 ACH มีระยะคืนทุนที่ 11 ปี เมื่อจำลองโดยใช้ผนังกระจกชั้นเดียวพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีมันมีระยะคืนทุนที่ 3 ปีใกล้เคียงกับวิธีการจำลองโดยใช้ผนังกระจกสองชั้น และเมื่อไม่มีมันและมีอัตราการระบายอากาศ 1050 และ 750 ACH มีระยะคืนทุนที่ 7 ปี และอัตราการระบายอากาศ 350 มีระยะคืนทุนที่ 8 ปี และเมื่อจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อมติดตั้ง Movable Blinds พบว่าในกรณีศึกษาที่มีมันมีระยะเวลาคืนทุนสูงกว่าการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวเนื่องจากในช่วงที่รังสีอาทิตย์แผ่มาสู่ผนังกระจกสองชั้นไม่ถึง 30 W/m^2 มันยังคงไม่ปิดและมีความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารจึงทำให้ประหยัดได้น้อยกว่าการจำลองโดยใช้มันปิดทั้งวัน โดยในกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH มีระยะเวลาคุ้มทุนในปลายปีที่ 3 และอัตราการระบายอากาศ 700 ACH และ 350 ACH มีระยะเวลาคุ้มทุนในต้นปีที่ 4 ทั้งนี้ในกรณีศึกษาที่ไม่มีมันมีระยะเวลาคุ้มทุนเท่ากับการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

ประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทุกปีโดยเฉพาะอาคารประเภทสำนักงาน และส่วนที่เป็นการใช้พลังงานส่วนใหญ่คือระบบทำความเย็นซึ่งเป็นมากกว่าร้อยละ 50 ของการใช้พลังงานในอาคาร สาเหตุเพราะความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารสำนักงาน ความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นจาก 4 ปัจจัย ได้แก่ ความร้อนจากดวงอาทิตย์ ความร้อนจากมนุษย์และเครื่องใช้ภายในสำนักงาน ความร้อนจากแสงสว่าง และความร้อนจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ภายในอาคาร ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดคือความร้อนที่เกิดจากดวงอาทิตย์ พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์สามารถเข้ามาภายในอาคารได้สองทางคือ ทางผนังและทางหลังคา ความร้อนจะสามารถเข้ามาในอาคารผ่านผนังผ่านผนังและกระจกได้ถึงสองเท่าจากความร้อนที่ผ่านมาทางหลังคา ทำให้การลดความร้อนที่ผ่านมาจากผนังเป็นเรื่องสำคัญ หนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถลดความร้อนดังกล่าวได้คือ “ระบบผนังกระจกสองชั้น” (Double-skin Façade) ผนวกกับงานวิจัยที่ผ่านมา Haase and Amato (2007) พบว่าเมื่อเทียบประสิทธิภาพการกันความร้อนของผนังกระจกสองชั้นระหว่างระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติและการระบายอากาศด้วยวิธีกลผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกลสามารถลดภาระทำความเย็นของอาคารได้มากกว่า งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาประสิทธิภาพในรูปแบบผนังกระจกสองชั้นที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนในภูมิอากาศร้อนชื้นในกรุงเทพฯ หรือ “ผนังกระจกสองชั้นระบายอากาศด้วยวิธีกล” (Air flow windows)

จากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องพบว่า หลักการทำงานของผนังกระจกสองชั้นตามทฤษฎีอากาศที่ไหลอยู่ใน Cavity จะช่วยพาความร้อนออกจากระบบผนังและไม่ส่งผ่านไปถึงภายในกล่องทดลอง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการป้องกันความร้อนที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามระบบผนังสามารถป้องกันความร้อนจากการนำและการพาที่ผ่านระบบผนังกระจกไปได้ แต่การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้ม่านดักรังสีเพื่อป้องกันไม่ให้รังสีผ่านม่านไปได้ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับผนังกระจกสองชั้น Haase and Amato (2007) ได้ทำการทดลองเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของ ผนังกระจกสองชั้น โดยการระบายอากาศวิธีธรรมชาติ (DSF) ที่ต้องงพบว่าผนังกระจกสองชั้นช่วยประหยัดพลังงานได้จริงในช่วงเดือนที่มีอากาศร้อน และจะดียิ่งขึ้นเมื่อมีม่านและเทคโนโลยีต่างๆเข้ามาช่วย ทั้งการเปิดปิดม่านอัตโนมัติ และ Climate Control Wang, Chen et al. (2016) ทำการทดลองเกี่ยวกับม่านบังแดดใน cavity ในเรื่องตำแหน่งของม่านและองศาของม่านพบว่า ผนังกระจกสองชั้นสามารถลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้มากที่สุดเมื่ออยู่ตรงกลางของ cavity เนื่องจากอากาศที่พัดภายใน Cavity จะสามารถพาความร้อนที่สะสมอยู่บนผิวกระจกภายในและม่านบังแดดออกจากระบบผนังได้อย่างมีประสิทธิภาพและม่านมีองศา 60 องศา นอกจากจะทำให้ดักรังสีอาทิตย์ได้ดีแล้วยังไม่ขวางทางอากาศที่พัดอยู่ด้วย Wang, Chen et al. (2016) ยังได้ทำการทดลองเกี่ยวกับ ผลกระทบจาก อัตราการระบายอากาศใน Cavity กับอุณหภูมิกระจกภายในและการถ่ายเท

ความร้อนของอากาศที่ประเทศจีนในเขตร้อน พบว่าปริมาตรลมเปลี่ยนไปที่ต่างกันของ 200 กับ 800 m³/h สามารถทำให้อุณหภูมิลดลง 0.8 องศา ผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนอยู่ที่ 20 W/m² Wong, Prasad et al. (2008) ทดลองความกว้างของช่องอากาศ กับอุณหภูมิภายในกล่องทดลอง ค้นพบว่าอุณหภูมิในกล่องทดลองจะลดลงต่ำสุด เมื่อใช้ความกว้างช่องอากาศที่ 300 มม.

การวิจัยนี้ใช้การทดลอง เริ่มโดยการทบทวนวรรณกรรมและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อหาตัวแปรในการออกแบบกรณีศึกษาต่างๆ และทำการจำลองความสูงของผนังกระจกอาคารสำนักงานหนึ่งชั้นด้วยกล่องทดลองขนาด 2.15x2.0x3.0 เมตร ทำจากโครงเหล็กผนังภายในบุด้วยยิปซัมบอร์ดผนังภายนอกบุด้วยแผ่นวีว้าบอร์ดระหว่างกลางกรุด้วยโฟม Polystyrene หนา 2 นิ้ว แบ่งเป็นสองห้อง ผนังกระจกชั้นเดียว (Base case) และผนังกระจกสองชั้นเพื่อทดลองเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างสองห้อง ตั้งอยู่ในที่โล่งแจ้ง กระจกหันหน้าไปทางทิศใต้เพื่อให้ได้รับแดดตลอดวัน การทดลองแบ่งเป็นสองชั้นคือการทดลองด้วยกล่องทดลอง และการจำลองในโปรแกรม VisualDOE 4.1 ในส่วนของการจำลองด้วยกล่องทดลองนั้นมีตัวแปรคือ อัตราการระบายอากาศและการมีม่านและไม่มีม่านใน Cavity ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิกรณีศึกษา 4 จุดคือ อุณหภูมิ ณ อากาศระบายเข้า (T_{inlet}) อุณหภูมิ ณ ช่องระบายอากาศออก (T_{outlet}) เพื่อหาความต่างของอุณหภูมิที่สื่อถึงปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง และวัดอุณหภูมิผิวกระจกด้านนอก (T_o) อุณหภูมิผิวกระจกด้านใน (T_i) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-Value) เพื่อนำไปจำลองในโปรแกรม VisualDOE 4.1 โดยใช้สามวิธีการจำลองคือการจำลองด้วยผนังกระจกสองชั้น, การจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว และการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อม Movable Blinds เพื่อหาค่าการใช้พลังงานของกรณีศึกษาต่างๆ และนำไปคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ผลการศึกษาพบว่าอัตราการระบายอากาศและการมีม่านมีผลต่อปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลอง โดยมีผลมากที่สุดเมื่อใช้การระบายอากาศที่ 1050 ACH และมีม่านสามารถลดปริมาณความร้อนภายในกล่องทดลองได้ 4.44 °C เมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว รองลงมาคือ 700 ACH และไม่มีม่านสามารถลดได้ 4.1 °C เมื่อเทียบกับผนังกระจกชั้นเดียว อย่างไรก็ตามเมื่อคำนวณค่า U-Value และหาประสิทธิภาพการกันความร้อนแล้ว การมีม่านมีผลกับประสิทธิภาพการกันความร้อนของผนังกระจกกว่าการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ เพราะเมื่อมีม่านและมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050, 700 และ 350 ACH ค่า U-Value ลดต่ำถึง 1.25, 2.30, 2.56 W/m²·°C ตามลำดับ นั่นหมายความว่าม่านช่วยตัดรังสีอาทิตย์ และแปลงเป็นความร้อนให้อากาศพาออกไปจาก Cavity ส่วนการไม่มีม่านมีค่า U-Value ที่ 5.56, 5.61, 6.77 W/m²·°C ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ชัดว่ามีค่า U-Value สูงกว่าแบบไม่มีม่าน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของค่า U-Value ที่ทดลอง สรุปได้เป็นตารางดังนี้ (ตารางที่ 5.1)

ตารางที่ 5.1 ความน่าเชื่อถือของ U-Value

Researcher	Method.	Location	DSF Ventilation type	Air gap depth (m.)	ACH	Blind	U-Value (W/m ² ·°C)
Yongqiang Luo	Experiment	China	Mechanical	0.25	1313	✓	1.5
This research	Experiment	Thailand	Mechanical	0.30	1050	✓	1.25
MULYADI, Rosady	Calculate	Indonesia	Natural	0.80	Natural	✓	3.45
This research	Experiment	Thailand	Mechanical	0.30	300	✓	2.56

จากการเทียบค่า U-Value กับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Luo, Zhang et al. (2017) ซึ่งใช้กระจกใส 6 มม. และใช้อัตราการระบายอากาศที่ใกล้เคียง ค่า U-Value ที่ได้ มีความแตกต่างกันเพียงร้อยละ 16.67 แต่เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Mulyadi, Yoon et al. (2012) ซึ่งใช้การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ ค่า U-Value จึงมีค่าที่สูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองร้อยละ 25.8

เมื่อนำผลจากการคำนวณ U-Value ไปจำลองอาคารสำนักงานต้นแบบโดยสามวิธีการจำลองพบว่า กระจกสองชั้นทุกกรณีศึกษาสามารถลดภาระทำความเย็นได้มากกว่าผนังกระจกชั้นเดียวซึ่งเมื่อจำลองโดยใช้ผนังกระจกสองชั้นพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านมีระยะคืนทุนอยู่ที่ 3 ปี ในทุกอัตราการระบายอากาศ และเมื่อไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศ 1050 และ 700 ACH มีระยะคืนทุนที่ 6 ปีและอัตราการระบายอากาศ 350 ACH มีระยะคืนทุนที่ 11 ปี เมื่อจำลองโดยใช้ผนังกระจกชั้นเดียวพบว่าผนังกระจกสองชั้นที่มีม่านมีระยะคืนทุนที่ 3 ปีใกล้เคียงกับวิธีการจำลองโดยใช้ผนังกระจกสองชั้น และเมื่อไม่มีม่านและมีอัตราการระบายอากาศ 1050 และ 750 ACH มีระยะคืนทุนที่ 7 ปี และอัตราการระบายอากาศ 350 มีระยะคืนทุนที่ 8 ปี และเมื่อจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวพร้อมติดตั้ง Movable Blinds พบว่าในกรณีศึกษาที่มีม่านมีระยะเวลาคืนทุนสูงกว่าการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียวเนื่องจากในช่วงที่รังสีอาทิตย์แผ่มาสู่ผนังกระจกสองชั้นไม่ถึง 30 W/m² ม่านยังคงไม่ปิดและมีความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารจึงทำให้ประหยัดได้น้อยกว่าการจำลองโดยใช้ม่านปิดทั้งวัน โดยในกรณีศึกษาที่มีอัตราการระบายอากาศ 1050 ACH มีระยะเวลาคืนทุนในปลายปีที่ 3 และอัตราการระบายอากาศ 700 ACH และ 350 ACH มีระยะเวลาคืนทุนในต้นปีที่ 4 ทั้งนี้ในกรณีศึกษาที่ไม่มีม่านมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับการจำลองด้วยผนังกระจกชั้นเดียว

จากการทดลองและศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าตัวแปรสำคัญที่ทำให้ระบบผนังกระจกสองชั้นมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนคือ การมีม่านและจะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อทำงานร่วมกับอัตราการระบายอากาศที่สูงและผนังกระจกสองชั้นที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สูงสุดคือ ผนังกระจกสองชั้นแบบมีม่านมีอัตราการระบายอากาศที่ 1050 ACH

5.2. ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยต่อไปควรศึกษาในแง่มุมอื่นเพื่อความหลากหลายต่อผู้ที่จะนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ต่อไปดังนี้

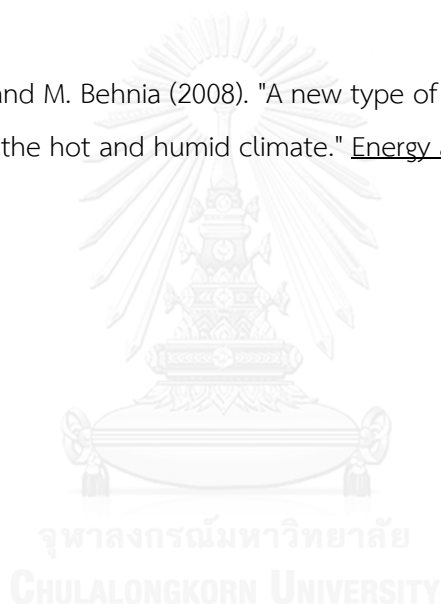
1. กระจกที่ใช้ในงานเป็นกระจกใส 6 มม. ซึ่งมีการป้องกันการนำความร้อนและป้องกันแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ได้น้อย การศึกษาวิจัยกระจกที่หลากหลายนอกจากจะทำให้การป้องกันความร้อนได้มากกว่าแล้ว ยังสามารถรู้ค่า U-Value เมื่อผนังกระจกสองชั้นใช้กระจกชนิดอื่นๆด้วย
2. องศาของม่านในงานวิจัยนี้ใช้องศาของม่านแบบเดียวเท่านั้น ในงานวิจัยต่อไปควรจะศึกษาองศาของม่านแบบอื่นๆ เพื่อความหลากหลายของรูปแบบการใช้งานจริงเมื่อต้องการแสงสว่างเข้าสู่ภายในอาคาร
3. การระบายอากาศใน Cavity เป็นการระบายอากาศโดยใช้อากาศภายนอกกล่องทดลองในการถ่ายเท ซึ่งในความเป็นจริงจะต้องใช้อากาศจากห้องที่ใช้งานที่ปรับอากาศแล้วกลับไปสู่เครื่องปรับอากาศ (Return Air) การทดลองกับเครื่องปรับอากาศจริงจึงจะให้ผลที่แม่นยำกว่า
4. อาคารที่ใช้ในการจำลองเป็นอาคารตัวอย่างรูปแบบเดียวเท่านั้น ความหลากหลายของอาคารที่ใช้ในการจำลองผนังกระจกสองชั้นจะทำให้รู้ถึงภาระทำความเย็นของอาคารในหลากหลายรูปแบบเพื่อรู้ความเหมาะสมเมื่อไปใช้ในอาคารรูปแบบอื่นๆ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลที่ได้จากการศึกษา วิจัย และทดลองในวิทยานิพนธ์นี้จะสามารถเป็นประโยชน์ต่อผู้ร่วมงานวิจัยไปศึกษาหรือพัฒนาต่อ หรือนำข้อมูลไปเลือกพิจารณาระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อใช้ในอาคารจริงสำหรับการประหยัดพลังงานในอาคาร

รายการอ้างอิง

- เชษฐพรพรรณ สิ้นเจิมศิริ (2552). ประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้ระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาโทบริหารธุรกิจ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กระทรวงพลังงาน. (2558). "สถานการณ์พลังงาน ปี 2558 และแนวโน้ม ปี 2559." Retrieved 15 พ.ย., 2559, from http://www.chanthaburi.buu.ac.th/~office_building/power/documents/.
- ธนะชัย ถาวรวัฒน์สกุล (2555). การศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของอาคารเคี็อบกระจกกันความร้อนของอาคารในเขตสภาพอากาศแบบร้อนชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- น้ำผึ้ง สายหงษ์ (2550). "แนวทางการออกแบบแสงสว่างในห้องเรียนสี้อผสม." วารสารวิจัยแะสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง 1: 65-81.
- สวิชญา ดาวประกายมงคล (2552). แนวทางการเลือกใช้กระจกเป็นผนังอาคารสำนักงานปรับอากาศ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎกระทรวงการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Azarbayjani, M. (2010). Beyond arrows: Energy performance of a new, naturally ventilated double-skin facade configuration for a high-rise office building in Chicago. Doctoral dissertation, University of Illinois.
- Barbosa, S. and a. K. Ip (2014). "Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews 40: 1019-1029.
- Chaiyapinunt, S. and a. N. Khamporn (2011). "Effect of Installing a Curved Venetian Blind to the Glass Window on Heat Transmission." The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering 2.
- Haase, M. and A. Amato (2007). "Integrating Ventilated façade in hot and humid climate." CIB World Building Congress 197: 206-218.
- Heimrath, R. (2007). Best Practice for Double Skin Façades. BESTFACADE. Intelligent Energy.
- Incropera, F. P. and D. P. Dewitt (1996). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York, Wiley.
- Jensen, R. L., O. Kalyanova and a. P. Heiselberg (2008). "Modeling a Naturally Ventilated Double Skin Façade with a Building Thermal Simulation Program." Building Physics 8: 143-150.

- Luo, Y., L. Zhang, X. Wang, L. Xie, Z. Liu, J. Wu, Y. Zhang and X. He (2017). "A comparative study on thermal performance evaluation of a new double skin façade system integrated with photovoltaic blinds." Applied Energy **199**: 281-293.
- Mulyadi, R., G. Yoon and M. Okumiya (2012). "STUDY ON SOLAR HEAT GAIN AND THERMAL TRANSMITTANCE OF EAST- AND WEST-FACING DOUBLE-SKIN FACADE IN HOT AND HUMID CLIMATE." AIJ Journal of Technology and Design **18**(40): 989-994.
- Oesterle, E. (2001). Double-skin Facades: Integrated Planning : Building Physics, Construction, Aerophysics, Air-conditioning, Economic Viability, Prestel.
- Wang, Y., Y. Chen and J. Zhou (2016). "Dynamic modeling of the ventilated double skin façade in hot summer and cold winter zone in China." Building and Environment **106**: 365-377.
- Wong, P. C., D. Prasad and M. Behnia (2008). "A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate." Energy and Buildings **40**(10): 1941-1945.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

รายการสัญลักษณ์

A	คือ พื้นที่ที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน (m^2)
C_p	คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)
CFM	คือ อัตราการระบายอากาศของพัดลม ($ft^2/min.$)
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
h_o	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอก (Air film out)
h_s	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่พัดในช่อง Cavity
K	คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)
L	คือ ระยะทางที่ต้องการจะศึกษา (m)
Nu	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)
Nu_x	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number) ณ ตำแหน่ง x
Nu_L	คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number) เฉลี่ยของทั้งแผ่นระนาบความยาว L
OTTV	คือ ดัชนีวัดค่าเฉลี่ยของความร้อนที่เข้ามาสู่พื้นที่ปรับอากาศผ่านผนังภายนอก (Overall Thermal Transfer Value)
Pr	คือ แพลนด์เทิลนัมเบอร์ (Prandtl number)
q''	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำต่อหน่วยพื้นที่ (Heat flux, W/m^2)
q_{conv}	คือ พลังงานในการถ่ายเทความร้อนด้วยการพา (W/m^2)
q_{cond}	คือ พลังงานในการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำ (W/m^2)
R	คือ ค่าการต้านทานความร้อน ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)
$R_{airfilmout}$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายนอกมีค่า 0.044 ($m^2 \cdot ^\circ C /W$)
$R_{airfilmmin}$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศภายในมีค่า 0.120 ($m^2 \cdot ^\circ C /W$)
$R_{air flow window}$	คือ ค่าความต้านทานความร้อนของผนังกระจกสองชั้น ($m^2 \cdot ^\circ C /W$)
Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
Re_{cr}	คือ ค่าวิกฤติของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Critical Reynolds number)
SHGC	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์
ΔT	คือ ความต่างของอุณหภูมิ ($^\circ C$)
T_∞	คือ อุณหภูมิอากาศ ($^\circ K$)
T_s	คือ อุณหภูมิพื้นผิว ($^\circ K$)
T_{sur}	คือ อุณหภูมิรอบข้างที่แลกเปลี่ยน ($^\circ C$)

TD_{eq}	คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเทียบเท่า ระหว่างภายนอกและภายในอาคาร รวมถึงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของผนังทึบ ($^{\circ}C$)
U	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)
U_{eff}	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังกระจกสองชั้น ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)
U_g	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของกระจก ($W/m^2 \cdot K$)
U_o	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value) ของกระจกชั้นนอก
U_i	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-Value) ของกระจกชั้นใน
U_w	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนังทึบ ($W/m^2 \cdot K$)
V	คือ ความเร็วของของไหล (m/s)
WWR	คือ อัตราส่วนพื้นที่ของหน้าต่างต่อพื้นที่ผนังทึบ
Δx	คือ ความหนาของวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ (m)
α	คือ ค่าการดูดซึมความร้อน (Absorptance)
α_o	คือ ค่าการดูดกลืนรังสี (Solar absorptance) ของกระจกชั้นนอก
α_i	คือ ค่าการดูดกลืนรังสี (Solar absorptance) ของกระจกชั้นใน
σ	คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann
ε	คือ ค่าการแผ่รังสีของวัตถุ
τ	คือ ค่าการส่องผ่านของรังสีอาทิตย์ (Solar transmittance) รวมทั้งกระจกชั้นนอกและชั้นใน
μ	คือ ค่าความหนืดพลวัต ($N \cdot s/m^2$)
ν	คือ ค่าความหนืดของของไหล (Viscosity, m^2/s)
δ	คือ ความยาวส่วนที่ศึกษา (m)

ภาคผนวก ข

คุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 atm

Properties of air at 1 atm pressure

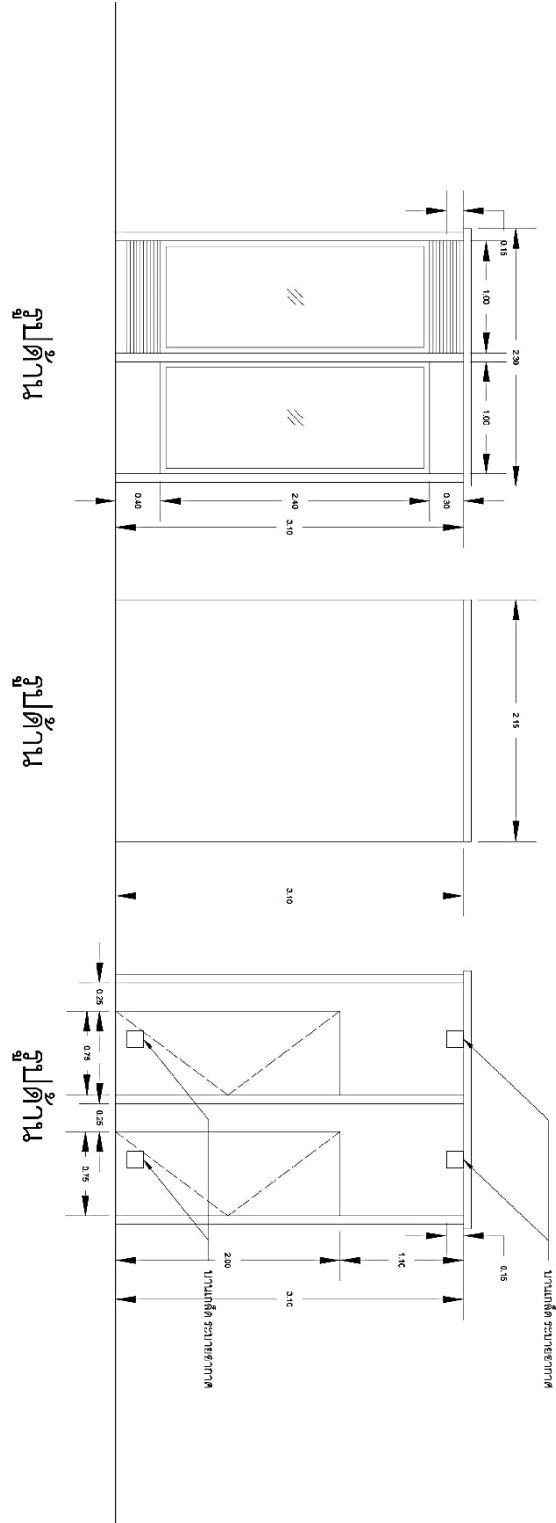
Temp. <i>T</i> , °C	Density ρ , kg/m ³	Specific Heat c_p , J/kg·K	Thermal Conductivity k , W/m·K	Thermal Diffusivity α , m ² /s	Dynamic Viscosity μ , kg/m·s	Kinematic Viscosity ν , m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values of ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

ที่มา: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984; and Thermophysical Properties of Matter. Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

ภาคผนวก ค

แบบก่อสร้างกล่องทดลอง



1:50

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชยพล เพียรชอบธรรม เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมจากโรงเรียนสาธิตจุฬาฯ สำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาตรี สถาปัตยกรรมศาสตร์บัณฑิต คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาเทคโนโลยีสถาปัตยกรรมและสิ่งแวดล้อม ในปีการศึกษา 2559

