# ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น

นางสมศรินทร์ ณ สงขลา

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENERGY EFFICIENCY OF THERMOCHROMIC (TC), POLYMER-DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC), AND LOW-E GLASS WINDOWS IN TROPICAL CLIMATE

Mrs. Somsarin Nasongkhla

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Architecture
Department of Architecture
Faculty of Architecture
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น |
| โดย | นางสมศรินทร์ ณ สงขลา |
| สาขาวิชา | สถาปัตยกรรม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร |

---

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....................................................................คณบดีคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปิ่นรัชฎ์ กาญจนัษฐิติ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....................................................................ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ พรรณชลัท สุริโยธิน)

.....................................................................อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร)

.....................................................................กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์)

.....................................................................กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ดารณี จารีมิตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สมศรินทร์ ณ สงขลา : ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น (ENERGY EFFICIENCY OF THERMOCHROMIC (TC), POLYMER-DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC), AND LOW-E GLASS WINDOWS IN TROPICAL CLIMATE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร, 101 หน้า.

งานวิจัยนี้ เปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก (TC), โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล (PDLC), และโลว์-อี (Low-e) ในเขตอากาศร้อนชื้น โดยศึกษาประสิทธิภาพของกระจกลามิเนต TC, ลามิเนต Low-e TC, ลามิเนต/อินซูเลต PDLC และลามิเนต Low-e เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของกระจกลามิเนตเขียวใสและการติดตั้งกระจกพร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก (Shading Coefficient – SC) ด้วยกล่องทดลอง และการจำลองพลังงานในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ในอาคารสำนักงานปรับอากาศขนาดใหญ่ ทำงานตอนกลางวันเป็นหลัก

กระจกลามิเนต Low-e TC มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 15.92% - 24.26% มากกว่ากระจกลามิเนต Low-e 11.02% - 18.17% และมากกว่ากระจกลามิเนต Low-e พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ 0.50% - 2.98% รองลงมาคือกระจกอินซูเลต PDLC มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็น 9.19% - 14.21% และมีประสิทธิภาพมากกว่ากระจกอินซูเลตเขียวใส 6.61%-12.21% กระจกลามิเนต PDLC มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.00% - 11.08% และมีประสิทธิภาพมากกว่ากระจกลามิเนตเขียวใส 8%-11.08% การติดตั้งกระจกลามิเนต/อินซูเลตเขียวใสพร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติมีประสิทธิภาพมากกว่ากระจกลามิเนต/อินซูเลต PDLC 0.67% - 4.43% และ 3.95% - 9.99% ตามลำดับ กระจกลามิเนต TC ส่งผลให้อาคารต้องใช้พลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น -7.89% ถึง -11.55% การติดตั้งกระจกในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ส่งผลให้อาคารประหยัดพลังงานมากที่สุด และอัตราการประหยัดพลังงานแปรผันตรงกับสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด

การคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ กระจกลามิเนต Low-e มีระยะเวลาคุ้มทุน 7.8-14.6 ปี กระจกลามิเนต Low-e TC และกระจกลามิเนต/อินซูเลต PDLC มีระยะเวลาคุ้มทุน 16-63 ปี การคุ้มทุนภายใน 10 ปี กระจกลามิเนต Low-e TC ต้องลดราคาลง 81% - 87% กระจกลามิเนต PDLC ต้องลดราคาลง 49% - 63% และกระจกอินซูเลต PDLC ต้องลดราคาลง 55% - 69% ขึ้นกับทิศและสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของอาคาร

ภาควิชา สถาปัตยกรรมศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต ........................................

สาขาวิชา สถาปัตยกรรม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ........................................

ปีการศึกษา 2558

# # 5773583625 : MAJOR ARCHITECTURE
KEYWORDS: SMART GLASS IN TROPICAL CLIMATE / THERMOCHROMIC GLASS / PDLC GLASS / LOW-E GLASS

SOMSARIN NASONGKHLA: ENERGY EFFICIENCY OF THERMOCHROMIC (TC), POLYMER-DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC), AND LOW-E GLASS WINDOWS IN TROPICAL CLIMATE. ADVISOR: ASST. PROF. ATCH SRESHTHAPUTRA, Ph.D., 101 pp.

This research compares the energy efficiency of thermochromic (TC), polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) and Low-e glass windows to reduce energy for cooling in hot and humid climate. Performances of laminated TC and Low-e TC, laminated/insulated PDLC and laminated Low-e glasses are compared with clear-green laminated glass, with and without automatic blinds for shading, to determine shading coefficient (SC) values. Large-scale air-conditioned office, operated mainly during daytime, is simulated in Visual DOE 4.1, using the acquired SC values, to determine the efficiencies of each glass.

The laminated Low-e TC glass can save the most energy for cooling (15.92% - 24.26%) and performs better than both laminated Low-e glass (by 11.02% - 18.17%) and laminated Low-e glass with automatic blinds (by 0.50% - 2.98%). The 2$^{nd}$ best glass is insulated PDLC which can save cooling energy by 9.19% - 14.21% and performs better than the insulated clear/green glass by 6.61%-12.21%. The 3$^{rd}$ best glass is laminated PDLC which can save cooling energy by 8.00% - 11.08%. However, the installation of laminated or insulated clear/green glasses with automatic blinds can save more energy than that of only laminated or insulated PDLC glasses by 0.67% - 4.43% and 3.95% - 9.99% respectively. Using laminated TC glass windows results in the most energy consumption for cooling (-7.89% to -11.55%). Installing these glasses in the building that positions in the northeast-southwest direction can save the energy for cooling the most. The capacity of these glasses to save energy also directly varies with the window-to-wall ratio (WWR) of the building.

Regarding the economic analysis, laminated Low-e glass has the payback period of 7.8-14.6 years whereas laminated Low-e TC and laminated/insulated PDLC glasses have the payback period of 16-54 years. To breakeven in the present time, it is suggested that the price of the laminated Low-e TC glass be lowered by 81% - 87%, that of the laminated PDLC glass by 49% - 63% and that of the insulated PDLC glass by 55% - 69%, depending on the positioning of the building and its WWR.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Department: | Architecture | Student's Signature | ..................................... |
| Field of Study: | Architecture | Advisor's Signature | ..................................... |
| Academic Year: | 2015 | | |

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. อรรจน์ เศรษฐบุตร ในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอด ขอขอบพระคุณ รศ. พรรณชลัท สุริโยธิน ในฐานะประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. วรภัทร์ อิงคโรจน์ฤทธิ์ ในฐานะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. ดารณี จารีมิตร กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาในการให้คำแนะนำและร่วมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณมารดา สมาชิกทุกคนในครอบครัว และเพื่อนๆ ที่ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ ดร. รุจ ณ สงขลา สำหรับคำปรึกษา และกำลังใจที่ดีเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ........ ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ........ จ

กิตติกรรมประกาศ ........ ฉ

สารบัญ ........ ช

สารบัญตาราง ........ 1

สารบัญภาพ ........ 2

บทที่ 1 บทนำ ........ 7

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ........ 7

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา ........ 8

1.3 ขอบเขตของการศึกษา ........ 8

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา ........ 9

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ........ 12

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ........ 13

2.1 กระจกประหยัดพลังงานยุคปัจจุบัน ........ 13

2.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา ........ 17

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย ........ 19

3.1 แนวทางการวิจัย ........ 19

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ........ 20

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล ........ 23

3.4 การกำหนดตัวแปรของงานวิจัย ........ 24

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย ........ 25

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล ........ 29

หน้า

4.1 วิธีการรวบรวมข้อมูล ........ 29
4.2 ผลการศึกษาวิจัยจากกล่องทดลอง ........ 32
4.2.1 กลุ่มกระจกลามิเนต / อินซูเลต Low-e และ PDLC ........ 32
1.1 กระจกลามิเนต 6ข+6ส ........ 32
1.2 กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ........ 36
1.3 กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e ........ 39
1.4 กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส ........ 42
1.5 กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ........ 45
4.2.2 กระจกกลุ่ม TC ........ 49
4.3 ผลการศึกษาวิจัยจากการจำลองอาคาร ........ 59
4.3.1 กระจกกรณีศึกษา ........ 59
4.3.2 บานหน้าต่างกระจกพร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ ........ 71
4.4 การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์ ........ 80
4.4.1 การเปรียบเทียบความคุ้มทุนของกระจกกรณีศึกษาทั้ง 6 ชนิด ........ 80
4.4.2 การเปรียบเทียบความคุ้มทุนระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และ
กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านอัตโนมัติ ........ 88
4.5 การคำนวณหาราคากระจกที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดปัจจุบัน ........ 89
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ........ 93
5.1 สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการเลือกใช้กระจก smart glass ........ 93
5.2 ข้อเสนอแนะในการนำกระจก smart glass ไปประยุกต์ใช้........ 95
5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป ........ 96
รายการอ้างอิง ........ 97
ภาคผนวก........ 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

นิยามศัพท์ ........................................................ 100

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ........................................................ 101

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1: ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน ณ เวลาสิ้นสุดการทดลอง, ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับกระจก3 มม.ใส และ ค่า SC ........ 56

ตารางที่ 4.2: ค่า SC, U-Value และ VLT ของกระจกทั้ง 7 ชนิด ........ 57

ตารางที่ 4.3: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) สำหรับอาคาร WWR40 ........ 60

ตารางที่ 4.4: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR40 ........ 61

ตารางที่ 4.5: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR60 ........ 61

ตารางที่ 4.6: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR60 ........ 62

ตารางที่ 4.7: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR80 ........ 63

ตารางที่ 4.8: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR80 ........ 64

ตารางที่ 4.9: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR100 ........ 65

ตารางที่ 4.10: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR100 ........ 66

ตารางที่ 4.11: ราคาต่อตารางฟุตของกระจกแต่ละชนิด ........ 80

ตารางที่ 4.12: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40 ........ 81

ตารางที่ 4.13: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60 ........ 83

ตารางที่ 4.14: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80 ........ 85

ตารางที่ 4.15: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100 ........ 87

# สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1: สเปกตรัม พลังงานแสงอาทิตย์ ........ 13
ภาพที่ 2.2: การเปลี่ยนสีของกระจก thermochromic ........ 14
ภาพที่ 2.3: การเปลี่ยนสีของกระจก electrochromic ........ 15
ภาพที่ 2.4: คุณสมบัติของกระจก Low-e ........ 15
ภาพที่ 2.5: การทำงานของกระจก thermochromic ........ 16
ภาพที่ 2.6: การวิจัยด้วยกล่องทดลอง ........ 18
ภาพที่ 3.1: กล่องทดลองในสภาพแดดจริง ........ 19
ภาพที่ 3.2: ผังพื้นแสดงลักษณะการจัดกล่องทดลอง ........ 20
ภาพที่ 3.3: เครื่องวัดอุณหภูมิ ........ 21
ภาพที่ 3.4: จุดวัดอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก ........ 21
ภาพที่ 3.5: การบังหัววัดอุณหภูมิจากแสงแดด ........ 22
ภาพที่ 3.6: จุดวัดอุณหภูมิช่องอากาศเข้า ........ 22
ภาพที่ 3.7: จุดวัดอุณหภูมิช่องอากาศออก ........ 22
ภาพที่ 3.8: รายละเอียดวัสดุก่อสร้างของอาคารสำนักงาน จำลองในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ........ 26
ภาพที่ 3.9: การตั้งค่าแสงสว่าง ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ลักษณะอาคาร และการปรับอากาศ ........ 27
ภาพที่ 3.10: การตั้งค่า interior shading ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ........ 28
ภาพที่ 4.1: แสดงการจำลองทิศทางของอาคารทั้ง 4 ทิศ ........ 29
ภาพที่ 4.2: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจก 3 มม. ใส ........ 33

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.3: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+6ข และกระจก 3 มม. ใส ........ 33

ภาพที่ 4.4: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจก 3 มม.ใส ........ 34

ภาพที่ 4.5: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข และกระจก 3 มม.ใส ........ 34

ภาพที่ 4.6: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และ 6ส+6ข ........ 35

ภาพที่ 4.7: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส ........ 36

ภาพที่ 4.8: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส ........ 37

ภาพที่ 4.9: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส ........ 38

ภาพที่ 4.10: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส ........ 38

ภาพที่ 4.11: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และ 6ส+6ข PDLC ........ 39

ภาพที่ 4.12: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจก 3 มม.ใส ........ 40

ภาพที่ 4.13: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส Low-e+6ข และกระจก 3 มม.ใส ........ 40

ภาพที่ 4.14: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจก 3 มม.ใส ........ 41

ภาพที่ 4.15: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส Low-e + 6ข และกระจก 3 มม.ใส ........ 41

ภาพที่ 4.16: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และ 6ส Low-e +6ข ........ 42

ภาพที่ 4.17: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจก 3 มม.ใส ........ 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.18: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+A12+6ข และกระจก 3 มม.ใส ..... 43

ภาพที่ 4.19: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจก 3 มม.ใส ..... 44

ภาพที่ 4.20: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข และกระจก 3 มม.ใส ..... 44

ภาพที่ 4.21: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และ 6ส+A12 +6ข ..... 45

ภาพที่ 4.22: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน ..... 46

ภาพที่ 4.23: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของ ..... 46

ภาพที่ 4.24: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส ..... 47

ภาพที่ 4.25: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส ..... 48

ภาพที่ 4.26: ค่าเฉลี่ย SCของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และ 6ส+A12+6ข PDLC ... 48

ภาพที่ 4.27: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกทั้ง 5 ชนิด ..... 49

ภาพที่ 4.28: ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ สถานีพระตำหนักวังสวนกุหลาบ วันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559 ..... 50

ภาพที่ 4.29: ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ..... 51

ภาพที่ 4.30: ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ..... 51

ภาพที่ 4.31: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC และกระจก 3 มม.ใส ..... 52

ภาพที่ 4.32: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจก 3 มม.ใส ..... 53

ภาพที่ 4.33: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC และกระจก 3 มม.ใส ..... 53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 4.34: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจก 3 มม.ใส ........ 54
ภาพที่ 4.35: ค่าเฉลี่ย SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ........ 54
ภาพที่ 4.36: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ........ 55
ภาพที่ 4.37: การจำลองอาคารในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ........ 59
ภาพที่ 4.38: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40 ........ 60
ภาพที่ 4.39: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60 ........ 62
ภาพที่ 4.40: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80 ........ 63
ภาพที่ 4.41: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100 ........ 65
ภาพที่ 4.42: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น ........ 69
ภาพที่ 4.43: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น ........ 70
ภาพที่ 4.44: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น ........ 71
ภาพที่ 4.45: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ........ 72
ภาพที่ 4.46: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ........ 73
ภาพที่ 4.47: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ........ 73
ภาพที่ 4.48: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ........ 74
ภาพที่ 4.49: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ........ 75
ภาพที่ 4.50: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ........ 75
ภาพที่ 4.51: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ........ 76
ภาพที่ 4.52: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ........ 76
ภาพที่ 4.53: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ........ 77
ภาพที่ 4.54: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ........ 78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.55: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ..... 78

ภาพที่ 4.56: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ..... 79

ภาพที่ 4.57: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40 ..... 82

ภาพที่ 4.58: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60 ..... 84

ภาพที่ 4.59: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80 ..... 86

ภาพที่ 4.60: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100 ..... 88

ภาพที่ 4.61: Payback Period ของการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ..... 89

ภาพที่ 4.62: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR40 ..... 91

ภาพที่ 4.63: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR60 ..... 91

ภาพที่ 4.64: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR80 ..... 92

ภาพที่ 4.65: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR100 ..... 92

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน ภาคอาคารเป็นส่วนหลักของสังคมที่อุปโภคพลังงาน ไม่ว่าจะเป็นพลังงานในการทำความเย็น ความร้อน หรือแสงสว่าง ในช่วง 2-3 ทศวรรษที่ผ่านมา สถาปนิกในประเทศไทยให้ความนิยมในการใช้กระจกบนเปลือกนอกของอาคารเป็นอย่างมาก ทั้งๆ ที่กระจกเป็นวัสดุหลักตัวหนึ่งที่นำความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานในการทำความเย็นในเขตอากาศร้อนชื้นเช่นประเทศไทยสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การระบุสี ความหนา และประเภทของกระจกที่ใช้ในบานหน้าต่าง มีความสำคัญต่อการใช้พลังงานในการทำความเย็นของอาคารในเขตอากาศร้อนชื้นเป็นอย่างมาก กระจกตัดแสงเฉดสีต่างๆ (อาทิเช่น เขียว ฟ้า ชาดำ) เหมาะสำหรับการใช้ในอาคารที่ต้องการลดแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ แต่กระจกเหล่านี้ มีคุณสมบัติในการอมความร้อนมากกว่ากระจกใส ประเภทของกระจก เช่น กระจกแผ่นเดียว หรือ กระจก 2 หรือ 3 ชั้น ล้วนมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร สถาปนิกและผู้ออกแบบ จึงต้องมีความรู้และสามารถระบุลักษณะกระจกให้ตรงต่อการใช้งานของอาคาร เพื่อการส่งเสริมการลดอัตราการใช้พลังงานได้อย่างเหมาะสม

เทคโนโลยีปัจจุบันได้ส่งเสริมให้ผู้ผลิตกระจกสามารถผลิตกระจกที่มีประสิทธิภาพสูง เจ้าของโครงการและผู้ออกแบบสามารถเลือกชนิดกระจกที่เหมาะสมกับการใช้งานได้ แต่สิ่งที่พบคือ หลายรายยังไม่ได้ให้ความสำคัญกับการลงทุนเลือกใช้กระจกที่มีคุณสมบัติช่วยประหยัดพลังงานตั้งแต่เริ่มโครงการ สิ่งที่ตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือการต้องใช้ระบบปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่เกินความจำเป็น การรับภาระค่าไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งานของอาคาร และภาวะความไม่สบายของผู้ใช้อาคาร ดังนั้น การมีความรู้ด้านคุณสมบัติของกระจกประหยัดพลังงานที่ผู้ผลิตกระจกยุคปัจจุบันสามารถผลิตได้ และการกำหนดราคาของกระจกเหล่านั้นอย่างเหมาะสม จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ทั้งผู้ออกแบบและเจ้าของโครงการไม่ควรละเลย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

**1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา**

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นของหน้า ต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น
2. เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้กระจกที่เหมาะสมที่สุดกับสภาพอากาศนี้
3. เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบเลือกใช้กระจกประหยัดพลังงาน

**1.3 ขอบเขตของการศึกษา**

1. ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของกระจกกรณีศึกษา 7 ชนิด ได้แก่

| | |
|---|---|
| 1.1 ลามิเนต 6 มม.เขียว + 6 มม.ใส | (base case, 6ข+6ส) |
| 1.2 ลามิเนต 6 มม.เขียว + 6 มม.ใส PDLC | (6ข+6ส PDLC) |
| 1.3 ลามิเนต 6 มม.เขียว + 6 มม.ใส TC | (6ข+6ส TC) |
| 1.4 ลามิเนต 6 มม.เขียว + 6 มม.ใส โลว์-อี | (6ข+6ส Low-e) |
| 1.5 ลามิเนต 6 มม.เขียว + 6 มม.ใส โลว์-อี TC | (6ข + 6ส Low-e TC) |
| 1.6 อินซูเลต 6 มม.เขียว + Air gap 12 + 6 มม.ใส | (6ข+A12+6ส) |
| 1.7 อินซูเลต 6 มม.เขียว + Air gap 12 + 6 มม.ใส PDLC | (6ข +A12+6ส PDLC) |

คุณสมบัติของกระจก TC ในการทดลองนี้ จะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มขึ้นที่อุณหภูมิของผิวกระจกประมาณ 35°C และสำหรับกระจก PDLC เป็นการนำฟิล์ม PDLC มาติดประกบกับผิวของกระจกที่ทำการทดลอง มีวงจรไฟฟ้าควบคุมความเข้มของสี สามารถปรับหรี่ความโปร่งแสงของฟิล์ม เมื่อทึบเต็มที่ สามารถกันแสงเข้าได้ 80%

คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อน (Q) และค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก (shading coefficient - SC) จากกล่องทดลองในสภาพแสงแดดจริง

2. ใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 จำลองอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ (66,000 ตรม.) เปิดเครื่องปรับอากาศเวลากลางวันและใช้งาน 5 วันต่อสัปดาห์ อาคารตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร เพื่อเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของอาคารที่ใช้กระจกแต่ละชนิด
3. ศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการประหยัดพลังงานของกระจกแต่ละชนิดต่ออัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังอาคาร (window-to-wall ratio - WWR) 4 ค่า ได้แก่ 40%, 60%, 80% และ 100%

4. ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้กระจกที่เหมาะที่สุดกับสภาพอากาศในเขตร้อนชื้น

5. คำนวณราคาของกระจกที่เหมาะสมกับตลาดภายในประเทศในปัจจุบัน

6. ไม่รวมการใช้พลังงานสำหรับแสงสว่างภายในอาคารและภาวะแสงบาดตา

## 1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพของกระจกอัจฉริยะ (smart glass) จากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่ช่วงประมาณปี 2000 เป็นต้นไป

2. การทดลองเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อน โดยใช้กล่องทดลองจำนวน 2 กล่อง วางทดลองภายใต้แสงแดดจริง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของกระจกกรณีศึกษา และหาค่า SC การวัดอุณหภูมิมี 4 จุด ได้แก่ 1. อุณหภูมิช่องอากาศเข้า 2. อุณหภูมิช่องอากาศออก 3. อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก 4.อุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน และบันทึกอุณหภูมิทั้ง 4 จุด ทุกๆ 2 วินาทีเป็นเวลาทั้งสิ้น 120 นาที (ถาวรวัฒน์สกุล, 2555)

สำหรับการทดลองกระจกลามิเนต TC ทั้ง 2 ตัวนั้น เป็นการทดลองภายใต้แสงแดดจริงทั้งวันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC และพลังงานแสงอาทิตย์ (solar radiation)

3. การจำลองการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ใช้ค่า SC ที่คำนวณได้จากข้อ 2 สำหรับกระจกกรณีศึกษาในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อศึกษาข้อมูล ดังนี้

3.1 อัตราการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกชนิดต่างๆ สำหรับอาคารสำนักงานที่ใช้งานช่วงกลางวันเป็นหลัก ศึกษาเปรียบเทียบอาคารที่หันหน้าทิศเหนือ-ใต้ (NS), ตะวันออก-ตะวันตก (EW), ตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ (ES-NW) และตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)

3.2 ความสัมพันธ์ของอัตราการประหยัดพลังงานของกระจกแต่ละชนิดต่อ WWR

4. การคำนวณเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในกรณีดังนี้

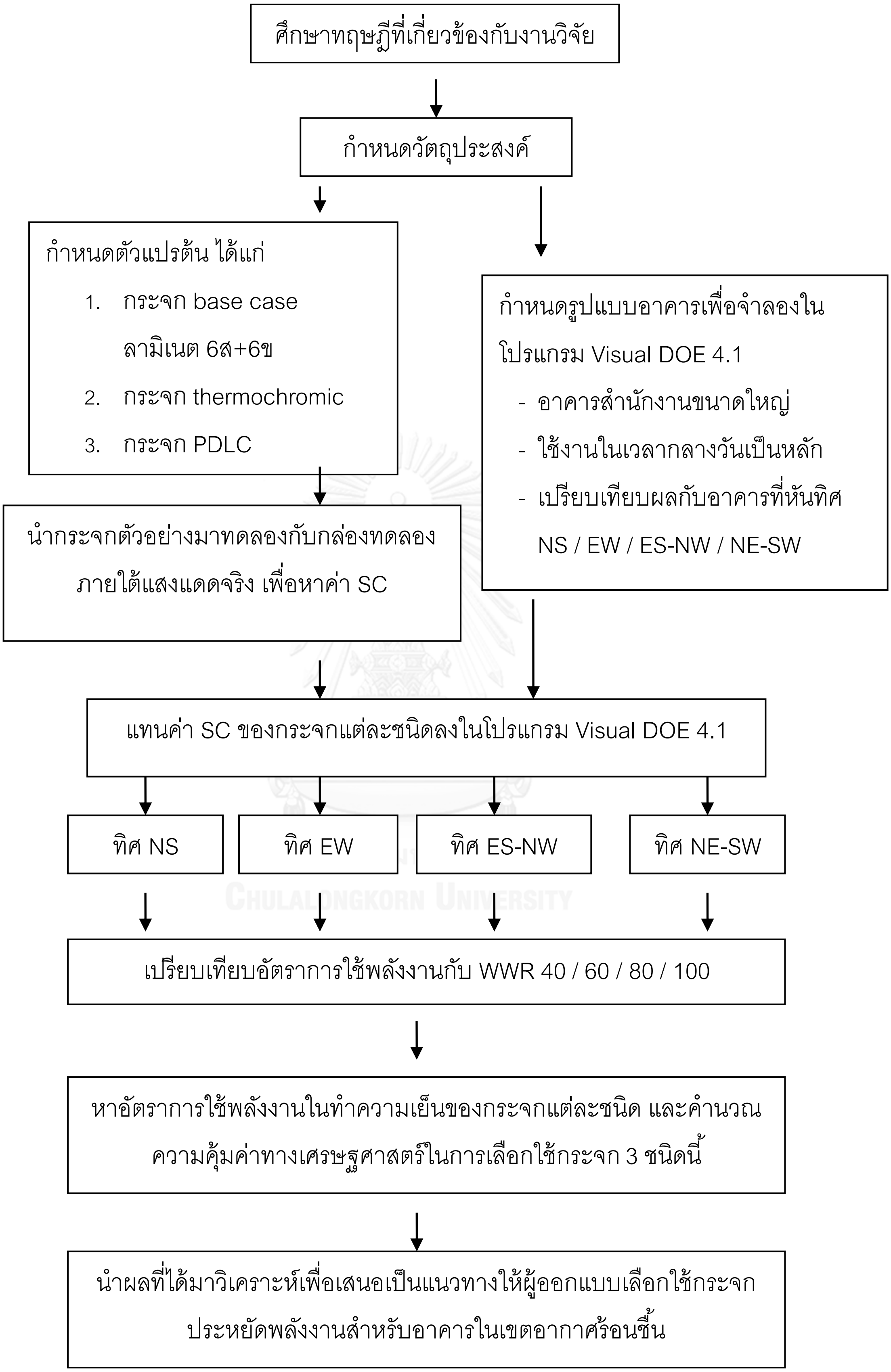
4.1 ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระจกทั้ง 6 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกระจก base case

4.2 เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ระหว่างการติดตั้งหน้าต่างกระจกด้วยเทคโนโลยี TC และ PDLC และการติดตั้งกระจกลามิเนตหรือกระจกอินซูเลตเขียว/ใสพร้อมม่านบัง

แดดอัตโนมัติ กระจกทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นกระจกที่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติการส่องผ่านแสงตามสภาพแวดล้อมหรือความต้องการของผู้ใช้ มีลักษณะการใช้งานคล้ายกับม่านบังแดดอัตโนมัติ

4.3 ศึกษาหาราคากระจกประหยัดพลังงานที่เหมาะสมกับตลาดภายในประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการวิจัย จะเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบหรือเจ้าของอาคารในการเลือกใช้กระจกชนิดต่างๆ ให้เหมาะสมกับการใช้งานของอาคาร เพื่อประโยชน์ด้านการลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกเข้าสู่ภายในอาคาร ด้านความคุ้มค่า และนำไปสู่การประหยัดพลังงานในการทำความเย็นและลดภาวะโลกร้อน

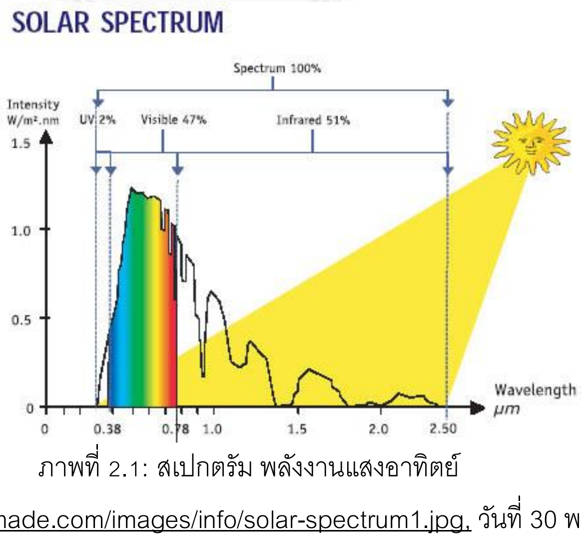
| | วัตถุประสงค์ | วิธีการ | ผลที่ได้รับ |
|---|---|---|---|
| 1. | เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น | ติดตั้งกระจกกรณีศึกษาขนาด 30x30 ซม.บนกล่องทดลองในสภาพแดดจริง บันทึกและเปรียบเทียบอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เพื่อคำนวณค่า Q และ SC<br>จำลองอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 แทนค่า SC ที่ได้จากการทดลองกล่องเพื่อคำนวณหาอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของกระจกแต่ละประเภท | ประสิทธิภาพของกระจกแต่ละประเภทในการประหยัดพลังงานทำความเย็นในเขตอากาศร้อนชื้น |
| 2. | เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบเลือกใช้กระจกประหยัดพลังงานสำหรับอาคารในเขตอากาศร้อนชื้น | ทำการจำลองวิเคราะห์ผลการใช้พลังงาน | แนวทางการเลือกใช้กระจกประหยัดพลังงานและการออกแบบอาคารที่มี WWR ที่เหมาะสมในแต่ละทิศ |
| 3. | เพื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้กระจกที่ประหยัดพลังงานแต่ละประเภท | การคำนวณค่าการประหยัดพลังงานจากการจำลอง | ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และข้อเสนอแนะด้านราคาที่เหมาะสมกับตลาดในประเทศไทยของกระจกประหยัดพลังงานแต่ละชนิด |

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กระจกประหยัดพลังงานยุคปัจจุบัน

ดวงอาทิตย์คือแหล่งที่มาของความร้อนหลัก โดยประมาณ พลังงานที่มาจากแสงอาทิตย์แบ่งออกได้ดังนี้ 45% อยู่ในช่วงที่สายตามนุษย์มองเห็น (0.4-0.7 μm) อีก 50% อยู่ในช่วงรังสีอินฟราเรด (0.7-2.5 μm) และที่เหลืออีก 5% เป็นรังสีอัลตราไวโอเลต (น้อยกว่า 0.4 μm) (Granqvist, 2015; Ye, Meng, & Xu, 2012) (ภาพที่ 2.1) สำหรับอาคารที่เปลือกนอกประกอบด้วยกระจกเป็นส่วนใหญ่ ผู้ออกแบบจึงต้องให้ความสำคัญต่อศักยภาพในการประหยัดพลังงานของกระจกในการลดความร้อนจากดวงอาทิตย์ โดยเลือกใช้กระจกที่เหมาะสมกับสภาวะอากาศ ที่ผ่านมา นักวิจัยทั่วโลกจึงได้ให้ความสนใจในการค้นคว้าหา smart glass เพื่อตอบสนองความต้องการอาคารกระจก และส่งเสริมรณรงค์การลดโลกร้อนที่นักอนุรักษ์ทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญเป็นอย่างมากในสหัสวรรษนี้




ภาพที่ 2.1: สเปกตรัม พลังงานแสงอาทิตย์

*ที่มา.* http://www.solarmade.com/images/info/solar-spectrum1.jpg, วันที่ 30 พฤศจิกายน 2558

Smart glass คือกระจกที่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติในการส่องผ่านแสงหรือการดูดซับความร้อนตามสภาพแวดล้อมหรือความต้องการของผู้ใช้อาคาร สามารถแบ่งออกเป็น 3 หมวดหมู่

ได้แก่ 1. Thermo-, electro- chromic 2. Liquid crystals (LC) และ 3. Suspended particles (SP) (Jelle et al., 2012) มีการกล่าวถึงคุณสมบัติของกระจก thermochromic (TC) มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1959 (Morin, 1959) ว่าเป็นกระจกที่สามารถเปลี่ยนสีระหว่างทึบหรือใสตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (ภาพที่ 2.2) เมื่อถึงจุดอุณหภูมิเปลี่ยนสี จากเดิมที่มีสีใส แสงสามารถส่องผ่านได้มาก กระจกจะเปลี่ยนสภาพเป็นสีทึบ สามารถกันแสงส่องผ่านและความร้อนในช่วงรังสีอินฟราเรดได้ (Ye et al., 2012)

ภาพที่ 2.2: การเปลี่ยนสีของกระจก thermochromic

*ที่มา.* http://ceramics.org/wp-content/uploads/2011/09/ppgpleotintsidebysidew1.jpg, วันที่ 25 พฤศจิกายน 2558

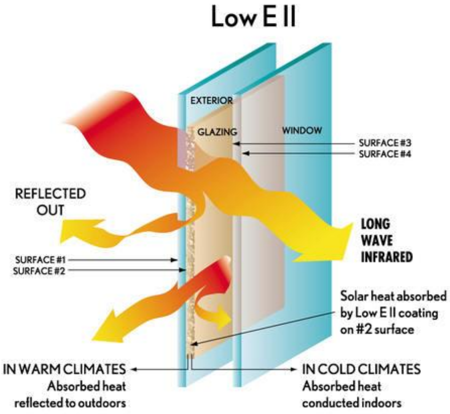
กระจก electrochromic (EC) คือกระจกที่สามารถเปลี่ยนสีได้ด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณประมาณ 1-5V สามารถบังคับแสงให้มีคลื่นไปทางเดียว (polarization) และใช้กระแสไฟฟ้าในช่วงการเปลี่ยนสีของกระจกเท่านั้น (ภาพที่ 2.3) ในขณะที่กระจก LC ต้องใช้กระแสไฟฟ้าตลอดการเปลี่ยนสีกระจกให้เป็นสีใส (Lampert, 2003) กระจก LC และ SP มีลักษณะคล้ายกัน คือเป็นกระจกที่เปลี่ยนจากสีขุ่นเป็นสีใสโดยการใช้กระแสไฟฟ้าในการเปลี่ยนทิศทางของอณู liquid crystals หรือ suspended, light absorbing, microscopic particles ปัจจุบันกระจก polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) เป็นชนิดหนึ่งของกระจก LC ที่พบมากที่สุด และจากการทดสอบตัวอย่างกระจก PDLC ขนาด 125x350 $cm^2$ พบว่ากระจกสามารถเปลี่ยนสีระหว่างใสและขุ่นได้อย่างคงที่กว่า 3 ล้านครั้ง (Baetens, Jelle, & Gustavsen, 2010)

ภาพที่ 2.3: การเปลี่ยนสีของกระจก electrochromic

*ที่มา.* https://i.ytimg.com/vi/yFX8Rhzgt7Y/hqdefault.jpg วันที่ 25 พฤศจิกายน 2558

กระจก Low-e คือกระจกที่ได้รับการเคลือบโดยโลหะ (metallic oxides) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีอินฟราเรดและลดการแผ่ความร้อนของกระจก (ภาพที่ 2.4) แบ่งออกเป็น hard coat และ soft coat การเคลือบแบบ hard coat สามารถทำได้ในขบวนการผลิตกระจกโฟลต มีความทนทานมากกว่าและสามารถนำกระจก Low-e hard coat ไปอบเพื่อเป็นกระจกนิรภัยเทมเปอร์ได้ ในขณะที่การเคลือบแบบ soft coat จะเกิดขึ้นหลังขบวนการผลิตกระจกโฟลตด้วยวิธี sputtering กระจก Low-e soft coat สามารถสะท้อนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าและมีความใสกว่ากระจก Low-e hard coat แต่กระจกที่เคลือบ soft coat จะต้องนำไปผ่านกระบวนการลามิเนตหรืออินซูเลตต่อในทันที เพื่อความคงทนของสารเคลือบบนผิวกระจก (Jelle et al., 2012)

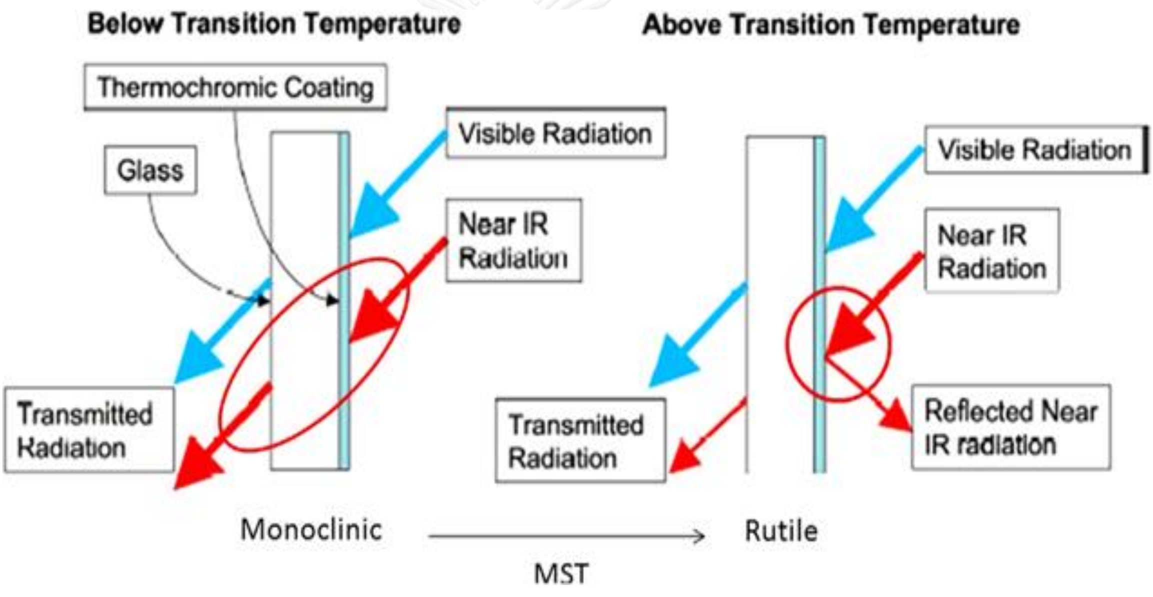
CHULALONGKORN UNIVERSITY




ภาพที่ 2.4: คุณสมบัติของกระจก Low-e

*ที่มา.* http://www.cornerstone-exteriors.com/wp-content/uploads/2012/03/Low-e-glass.jpg, วันที่ 30 พฤศจิกายน 2558

งานวิจัยของ (Arutjunjan et al., 2003; Kamalisarvestani, Saidur, Mekhilef, & Javadi, 2013; Kokogiannakis, Darkwa, & Aloisio, 2014; Lee, Pang, Hoffmann, Goudey, & Thanachareonkit, 2013; Raicu et al., 2002; Saeli, Piccirillo, Parkin, Binions, & Ridley, 2010) พบว่า การใช้กระจก TC ในอาคารที่มีพื้นที่หน้าต่างกระจกยิ่งมากจะยิ่งประหยัดพลังงาน และกระจก TC สามารถประหยัดพลังงานในเขตอากาศอุ่นได้มากกว่าเขตอากาศหนาว เนื่องจากกระจก TC สามารถควบคุมการส่องผ่านความร้อนของดวงอาทิตย์เมื่ออยู่ในสถานะสีเข้ม และสามารถดูดซับความร้อนได้ดี (ภาพที่ 2.5) ในขณะที่ (Ye et al., 2012) กล่าวว่า การควบคุมการแผ่รังสีของกระจกโดยใช้กระจก Low-e มีผลต่อการประหยัดพลังงานของอาคารมากกว่าการควบคุมการส่องผ่านความร้อนของดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลสรุปที่แตกต่างจากงานวิจัยอื่นที่ผ่านมา




ภาพที่ 2.5: การทำงานของกระจก thermochromic

ที่มา. *(Kokogiannakis et al., 2014)*

สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของกระจก EC ได้ผลวิจัยคล้ายกับผลที่ได้จากกระจก TC โดย (Assimakopoulos, Tsangrassoulis, Guarracino, & Santamouris, 2004; Baetens et al., 2010; Lampert, 2003; Papaefthimiou, Syrrakou, & Yianoulis, 2006; Pittaluga, 2015) พบว่า ความสามารถในการควบคุมแสงส่องผ่านของกระจก EC ส่งผลให้ประหยัดพลังงานในการทำความเย็นมากที่สุด จึงเหมาะกับการใช้งานในเขตอากาศอุ่นมากกว่าเขตอากาศหนาว และอัตราการประหยัดพลังงานจะแปรผันตรงกับ WWR ในขณะที่

(Piccolo, 2010) พบว่ากระจก EC และ Low-e มีศักยภาพในการช่วยลดพลังงานของอาคารได้ใกล้เคียงกัน

## 2.2 แนวทางการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาศักยภาพในการประหยัดพลังงานการทำความร้อน/เย็น (และแสงสว่าง) สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองลักษณะห้องหรืออาคารในเขตพื้นที่อากาศต่างๆ และนำผลการจำลองพลังงานที่ได้เปรียบเทียบกับผลจากกล่องทดลองหรือสถานที่ทดลองจริง โปรแกรมดังกล่าว ได้แก่ EnergyPlus BuildingEnergy TRNSYS DOE เป็นต้น จากงานวิจัยที่ทบทวน มีทั้งสิ้น 2 ฉบับ ใช้โปรแกรม BuildingEnergy (Long & Ye, 2014; Ye et al., 2012) 4 ฉบับใช้โปรแกรม EnergyPlus (Grynning, Gustavsen, Time, & Jelle, 2013; Lee et al., 2013; Pittaluga, 2015; Saeli et al., 2010) และงานวิจัยเหล่านี้ ใช้โปรแกรม ESP-r (Kokogiannakis et al., 2014) Four-Flux (Raicu et al., 2002) TRNSYS (Assimakopoulos et al., 2004) และ RESFEN 3.1 (Papaefthimiou et al., 2006)

ในด้านของการใช้กล่องทดลอง (Piccolo, Pennisi, & Simone, 2009) ได้ใช้กล่องขนาด 0.42 x 0.43 x 0.44 เมตร (กว้างxยาวxสูง) เจาะช่องสำหรับใส่กระจกทดสอบขนาด 12 x 12 เซนติเมตร (ภาพที่ 2.6) เพื่อเก็บข้อมูลด้านความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจก EC ตัวอย่างในช่วงหน้าร้อน ประเทศอิตาลี และได้ใช้กล่องเดียวกันนี้ทำการทดสอบกระจก EC อีกชุดในปี 2010 (ถาวรวัฒน์สกุล, 2555) ทดลองประสิทธิภาพของสารเคลือบกระจกชนิดต่าง โดยใช้กล่องทดลองขนาด 0.60 x 0.60 x 0.60 เมตร มีช่องสำหรับใส่กระจกทดสอบขนาด 30 x 30 เซนติเมตร ใช้หลอดอินฟราเรดขนาด 500w เป็นแหล่งความร้อน และจำลองอาคารในโปรแกรม Visual DOE 4.1 งานวิจัยตัวอื่นๆ ใช้สถานที่จริงหรือห้องทดลองที่มีขนาดเท่าของจริงในการเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยส่วนใหญ่จะกำหนดให้ห้องมีบานเปิดหน้าต่างเพียงบานเดียว หันหน้าไปทางทิศใต้หรือตะวันตก เก็บข้อมูลต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาหน้าร้อน

ภาพที่ 2.6: การวิจัยด้วยกล่องทดลอง

*ที่มา. (Piccolo et al., 2009)*

จากการทบทวนวรรณกรรมในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา พบว่า กระจก EC และ TC มีศักยภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นในเขตอากาศอุ่น/ร้อนมากที่สุด แต่ยังมีความขัดแย้งในเรื่องของทฤษฎีการป้องกันความร้อนของกระจกในเขตอากาศนี้ การทดลองของ (Ye et al., 2012) ใช้กระจกแผ่นเดียว ไม่ระบุความหนา เคลือบด้วยสาร TC พบว่าการควบคุมการแผ่รังสีของกระจกมีผลมากกว่าการควบคุมการส่งผ่านความร้อนของดวงอาทิตย์ ดังนั้น กระจก Low-e จึงประพยัดพลังงานมากกว่ากระจก EC และ TC ในขณะที่งานวิจัยของ (Lee et al., 2013) ใช้กระจกลามิเนตอินซูเลตในการทดลอง สรุปผลว่ากระจกลามิเนตอินซูเลต Low-e TC ประหยัดพลังงานมากกว่ากระจกลามิเนตอินซูเลต Low-e และ (Piccolo, 2010) ใช้กระจกอินซูเลต EC ในการทดลองเปรียบเทียบกับกระจกใส 4 มม. พบว่ากระจกอินซูเลต EC มีศักยภาพในการลดพลังงานของอาคารได้ใกล้เคียงกับกระจกสะท้อนแสงเคลือบสาร Low-e นอกจากนี้ แม้กระจก EC และ PDLC จะมีลักษณะการใช้งานและคุณสมบัติแสงส่องผ่านแสงคล้ายกัน ยังไม่พบงานวิจัยที่นำกระจก PDLC, กระจก TC และกระจก Low-e มาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นของอาคาร

# บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

## 3.1 แนวทางการวิจัย

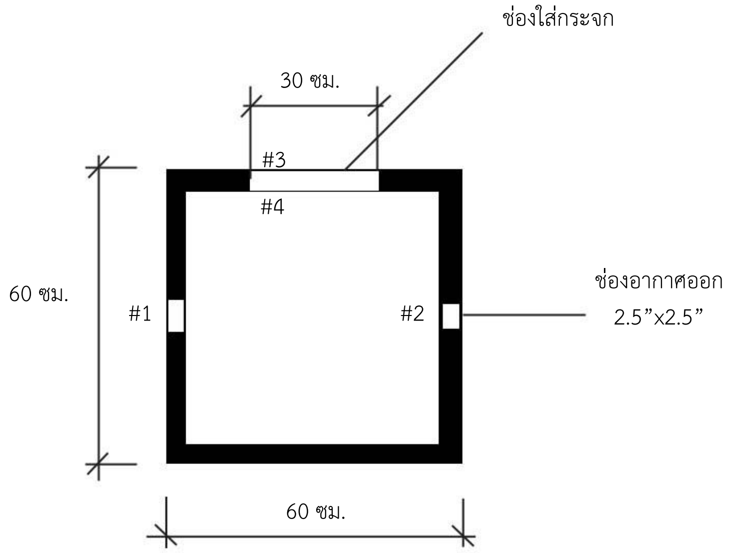
งานวิจัยนี้ ศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของหน้าต่างกระจกเทอร์โมโครมิก, โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล, และโลว์-อี ในเขตอากาศร้อนชื้น โดยแบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน 1. การใช้กล่องทดลองในสภาพแดดจริง (ภาพที่ 3.1) เพื่อศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก และอุณหภูมิของผิวกระจกของกระจกกรณีศึกษา เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใส เพื่อคำนวณหาค่า Q และค่า SC

ภาพที่ 3.1: กล่องทดลองในสภาพแดดจริง

2. ใช้โปรแกรม Visual DOE 4.1 จำลองอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ สูง 30 ชั้น พื้นที่การใช้งานประมาณ 66,000 ตรม. แทนค่า SC ที่ได้จากการวิจัยกล่องทดลอง ค่า U-Value และ visible light transmittance (VLT) ที่ได้จากผู้ผลิตกระจก คำนวณอัตราการใช้พลังงานทำความเย็น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

## 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

กล่องที่ใช้ในการทดลอง มีขนาด 60x60x60 ซม. ใช้แผ่นเหล็กสีขาวเป็นวัสดุด้านในและนอก กรุด้วยโฟม polyurethane หนา 2 นิ้ว ติดตั้งพัดลมที่ช่องอากาศออก ความเร็วลม 559.4477 ฟุต/เมตร และติดหัววัดอุณหภูมิ 4 จุด ได้แก่ #1. อุณหภูมิช่องอากาศเข้า #2. อุณหภูมิช่องอากาศออก #3. อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก และ #4. อุณหภูมิของผิวกระจกด้านใน (ภาพที่ 3.2) โดยมีอุปกรณ์บังหัววัดอุณหภูมิจากแสงแดด (ภาพที่ 3.3 - ภาพที่ 3.7)

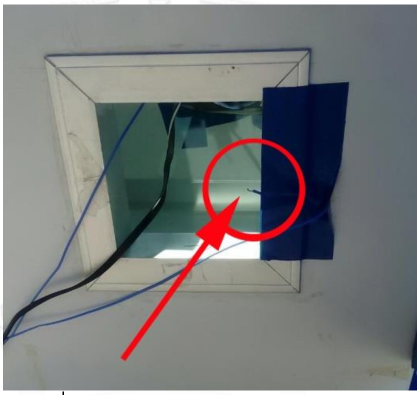



ภาพที่ 3.2: ผังพื้นแสดงลักษณะการจัดกล่องทดลอง

ภาพที่ 3.3: เครื่องวัดอุณหภูมิ

ภาพที่ 3.4: จุดวัดอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก

ภาพที่ 3.5: การบังหัววัดอุณหภูมิจากแสงแดด



ภาพที่ 3.6: จุดวัดอุณหภูมิช่องอากาศเข้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาพที่ 3.7: จุดวัดอุณหภูมิช่องอากาศออก

### 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การบันทึกอุณหภูมิช่องอากาศเข้า-ออก และอุณหภูมิของผิวกระจก แบ่งกระจกกรณีศึกษาออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. กระจกลามิเนต 6ข+6ส, กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC บันทึกข้อมูลทุกๆ 2 วินาที เป็นเวลาติดต่อกัน 120 นาที (ถาวรวัฒน์สกุล, 2555)
2. กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที เป็นเวลาติดต่อกัน 8 ชั่วโมง เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC และพลังงานแสงอาทิตย์

การคำนวณหาค่า SC จาก ASHRAE คำนวณได้จากสมการดังนี้

$Q\ (Btu/hr) = 1.08 \times CFM \times \Delta T(°F)$

โดยที่

Q คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่กล่องทดลอง

1.08 คือ ค่าคงที่

CFM คือ ความเร็วลม x พื้นที่ = 559.4477 ft/min x 0.0434 $ft^2$ = 24.28 $ft^3$/min

$\Delta T$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก

จากนั้น แทนค่า Q ที่ได้จากสมการข้างต้นลงในสูตรการหาค่า SC ดังต่อไปนี้

$$Q_{\text{ที่วัดจากกระจกทดลอง}} = Q_{\text{ที่ผ่านกระจกเข้าไปในกล่อง}}$$

$$1.08 \times CFM \times \Delta T = Qradiation + Qconduction$$

$$1.08 \times CFM \times \Delta T = (SHGC \times I_0) + (U + \Delta T)$$

$$(SHGC \times I_0)_{glass} = (1.08 \times CFM \times \Delta T)_{glass} - (U + \Delta T)_{glass} \quad (1)$$

$$(SHGC \times I_0)_{glass\ 3\ mm} = (1.08 \times CFM \times \Delta T)_{glass\ 3\ mm} - (U + \Delta T)_{glass\ 3\ mm} \quad (2)$$

$$SC = \frac{Q\ radiation}{Q\ radiation\ (glass\ 3\ mm)}$$

$$SC = \frac{(SHGC \times I_0)_{glass}}{(SHGC \times I_0)_{glass\ 3\ mm}} \quad (3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แทนค่า (1) และ (2) ใน (3)

$$SC = \frac{Q_{glass} - (U + \Delta T)_{glass}}{Q_{glass\ 3\ mm} - (U + \Delta T)_{glass\ 3\ mm}}$$

โดยที่ SC คือ สัมประสิทธิ์การบังเงาของกระจก

$Q_{glass}$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่กล่องทดลอง ผ่านกระจกทดลอง

$Q_{glass3mm}$ คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนที่เข้าสู่กล่องทดลอง ผ่านกระจก 3 มม.ใส

U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของกระจก

$\Delta T$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า-ออก (°F)

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระจกกรณีศึกษาแต่ละชนิด ใช้การคำนวณระยะเวลาคุ้มทุนภายใน 10 ปี (Payback period – PB) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return - IRR) ดังสมการดังนี้

$$I_o = \sum_{t=0}^{n} \times \frac{EST}{(1+IRR)^t}$$

โดย

n = อายุของโครงการ (ปี)

EST = ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n

$I_o$ = เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ

IRR = อัตราผลตอบแทนภายใน

การลงทุนที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะต้องมี ค่า IRR น้อยกว่า 7.5 (Horngren, Foster, & Datar, 1997)

## 3.4 การกำหนดตัวแปรของงานวิจัย

**ตัวแปรต้น**

- กระจกกรณีศึกษาชนิดต่างๆ

**ตัวแปรตาม**

- อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก
- อุณหภูมิของผิวกระจก
- ค่าการถ่ายเทความร้อน
- ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา
- อัตราการใช้พลังงานทำความเย็น

**ตัวแปรควบคุม**

- กล่องทดลอง
- ช่วงเวลาและลักษณะสภาพอากาศในวันที่ทำการทดลอง
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิ
- ลักษณะอาคารที่จำลองในโปรแกรม Visual DOE 4.1

## 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับวิวัฒนาการของกระจก smart glass ในช่วงเวลาไม่เกิน 15 ปีที่ผ่านมา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่นำสมัย เหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในยุคปัจจุบัน

การกำหนดตัวแปรต้น เลือกใช้กระจกลามิเนตและกระจกอินซูเลต เนื่องจากกระจก 2 ชั้น ประหยัดพลังงานมากกว่ากระจกชั้นเดียว เทคโนโลยีกระจก smart glass ที่งานวิจัยนี้เลือกนำมาทดลองได้แก่ เทอร์โมโครมิก (TC) และ โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล (PDLC) มีคุณสมบัติในการควบคุมการส่องผ่านแสงหรือการดูดซับความร้อนตามสภาพแวดล้อมหรือความต้องการของผู้ใช้อาคาร สามารถนำมาผลิตรวมเข้ากับกระจกลามิเนตหรืออินซูเลตได้ ส่วนกระจก Low-e เป็นเทคโนโลยีที่มีมาก่อนหน้า จึงต้องนำมาทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานกับกระจก smart glass ทั้ง 2 ชนิดนี้

กระจกกรณีศึกษาทั้ง 7 ชนิด ได้แก่

2. ลามิเนต 6ข + 6ส
3. ลามิเนต 6ข + 6ส PDLC
4. ลามิเนต 6ข + 6ส TC
5. ลามิเนต 6ข + 6ส Low-e

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

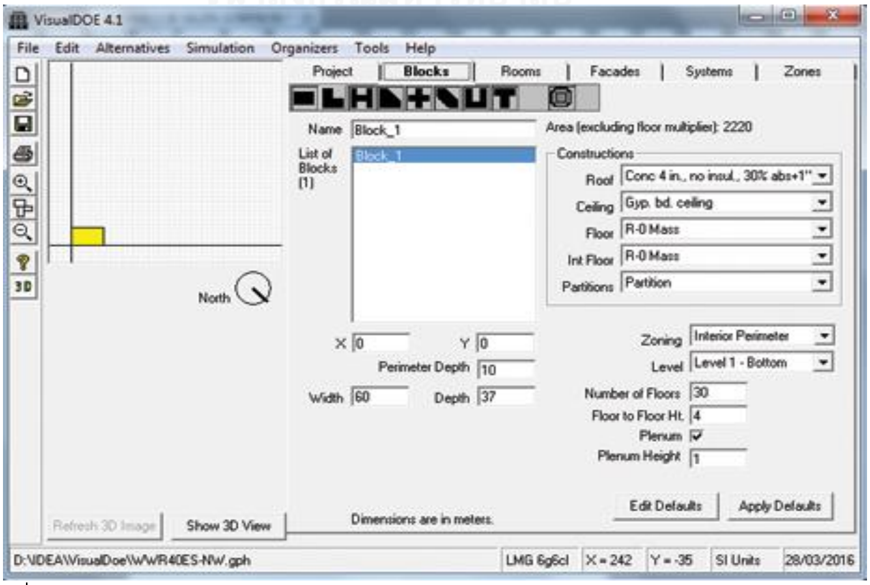
6. ลามิเนต 6ข + 6ส Low-e TC
7. อินซูเลต 6ข + A12 + 6ส
8. อินซูเลต 6ข + A12 + 6ส PDLC

กระจก base case สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นในโปรแกรม Visual DOE 4.1 คือ ลามิเนต 6ข + 6ส

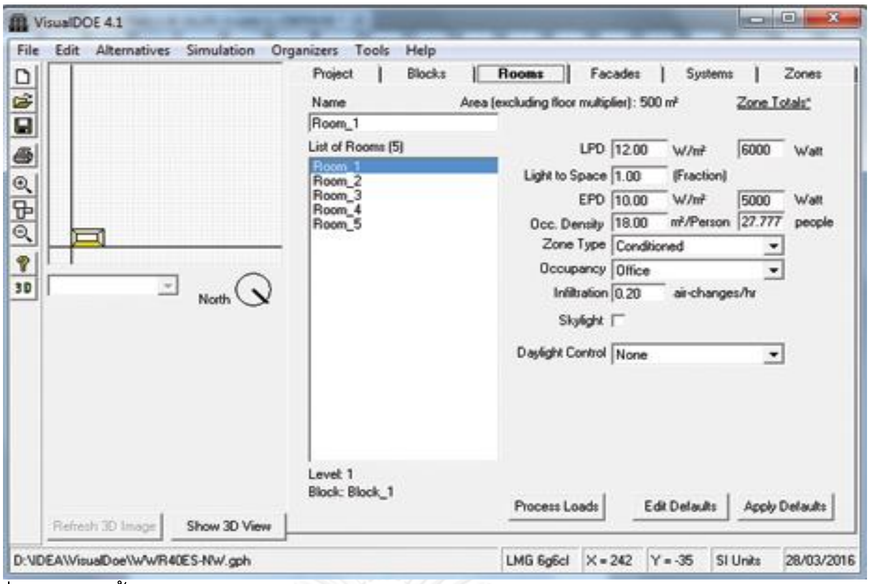
การบันทึกข้อมูลกระจกกลุ่มลามิเนต / อินซูเลต Low-e และ PDLC เป็นการบันทึกทุกๆ 2 วินาที ติดต่อกันเป็นเวลา 120 นาที (ถาวรวัฒน์สกุล, 2555) ทำการทดลองในวันท้องฟ้าโปร่งช่วงเวลากลางวัน นำผลที่ได้หาค่าเฉลี่ย Q และ SC ในโปรแกรม Excel

การบันทึกข้อมูลกระจกกลุ่ม TC เป็นการบันทึกทุกๆ 5 นาที ติดต่อกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เริ่มบันทึกตั้งแต่เวลาประมาณ 8 นาฬิกา เลือกทำการทดลองในวันที่สภาพอากาศโดยเฉลี่ยฟ้าโปร่ง นำผลที่ได้คำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC และพลังงานแสงอาทิตย์ในโปรแกรม Excel

การจำลองอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 อาคารรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีส่วนเสริมการประหยัดพลังงานของอาคาร (รับคำอินทร์, 2552) ขนาดของอาคาร 37 x 60 เมตร สูง 30 ชั้น แต่ละชั้นสูง 4 เมตร มีโครงสร้างและลักษณะการตกแต่งของอาคารสำนักงานทั่วไป ตามมาตรฐาน ASHRAE 90.1:2007 ดังภาพที่ 3.8 และ ภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.8: รายละเอียดวัสดุก่อสร้างของอาคารสำนักงาน จำลองในโปรแกรม Visual DOE 4.1




ภาพที่ 3.9: การตั้งค่าแสงสว่าง ความหนาแน่นของผู้ใช้อาคาร ลักษณะอาคาร และการปรับอากาศ ในโปรแกรม Visual DOE 4.1

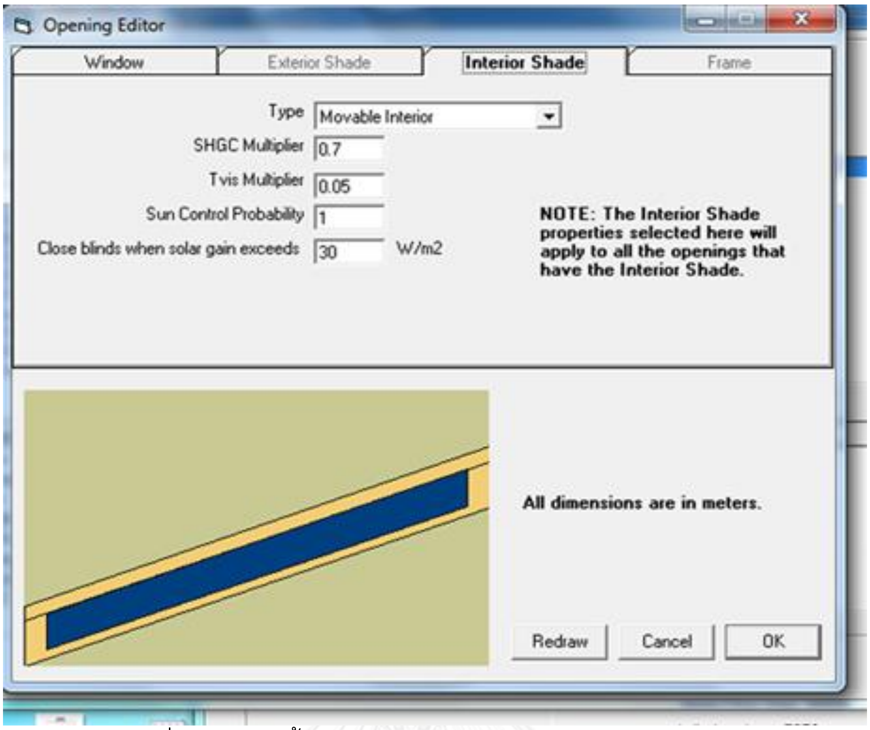
จากนั้นนำค่า SC ที่คำนวณได้จากการทดลองกล่องกลางแสงแดด พร้อมค่า U-Value และ VLT ที่ได้จากผู้ผลิตกระจกทั้ง 7 ชนิด แทนค่าลงในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อคำนวณและเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็น และวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นระหว่างการติดตั้งกระจกลามิเนต Low-e TC, กระจกลามิเนต PDLC และกระจกอินซูเลต PDLC และการติดตั้งกระจกลามิเนต/อินซูเลตเขียว/ใสพร้อมม่านบังแดดระบบไฟฟ้าอัตโนมัติ แบ่งการเปรียบเทียบกระจกออกเป็น 3 คู่ ดังนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ลามิเนต 6ข+6ส *Low-e TC* VS. ลามิเนต 6ข+6ส *Low-e* ***+ ม่านบังแดดอัตโนมัติ***
2. ลามิเนต 6ข+6ส *PDLC* VS. ลามิเนต 6ข+6ส + ***ม่านบังแดดอัตโนมัติ***
3. อินซูเลต 6ข+A12+6ส *PDLC* VS. อินซูเลต 6ข+A12+6ส ***+ ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

การแทนค่าม่านบังแดดอัตโนมัติลักษณะใช้ภายในอาคาร ใน Visual DOE 4.1 สามารถบังแสงแดดได้ 95% (แสงแดดสามารถส่องผ่านได้เพียง 5%) มีสมมติฐานว่า ผู้ใช้งานภายในอาคารจำนวน 100% ปิดม่านบังแดดอัตโนมัติเมื่อมีความร้อนเข้ามาภายในอาคารเกิน 30 W/m$^2$ ตามค่า default ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 รายละเอียดดังภาพที่ 3.10




ภาพที่ 3.10: การตั้งค่า interior shading ในโปรแกรม Visual DOE 4.1

ศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการคำนวณพลังงานที่ใช้ทำความเย็นกรณีติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส, กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e หรือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เพื่อเสนอเป็นแนวทางการออกแบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# บทที่ 4

# ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

## 4.1 วิธีการรวบรวมข้อมูล

แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่

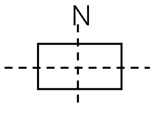
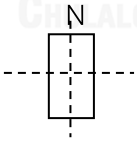
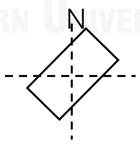
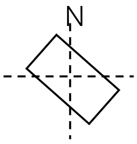
1. การบันทึกอุณหภูมิจากกล่องทดลอง เพื่อหาค่า Q และ SC แบ่งประเภทกระจกออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1.1 กระจกลามิเนต / อินซูเลต Low-e และ PDLC

1.2 กระจกลามิเนต TC

2. การคำนวณจากโปรแกรม Visual DOE 4.1 ตามลำดับดังนี้

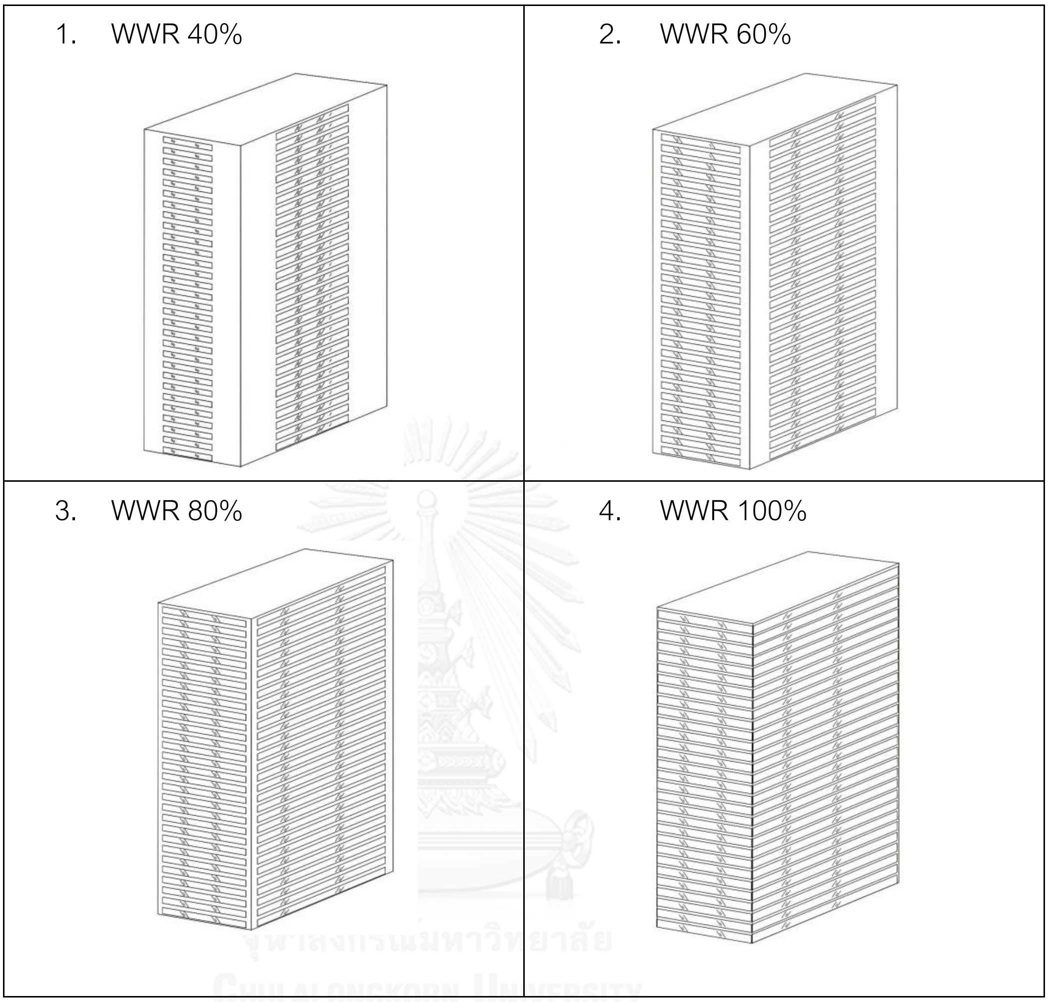
2.1 จำลองอาคารสำนักงานขนาดใหญ่ สูง 30 ชั้น มีพื้นที่ใช้สอยรวม 66,000 ตารางเมตร ใช้งานในช่วงเวลากลางวันเป็นหลัก 5 วัน/สัปดาห์ หันทิศทางอาคาร 4 ทิศ ดังภาพที่ 4.1

| | | | |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| ทิศเหนือ-ใต้ (NS) | ทิศตะวันออก-ตะวันตก (EW) | ทิศตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ (ES-NW) | ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW) |

ภาพที่ 4.1: แสดงการจำลองทิศทางของอาคารทั้ง 4 ทิศ

2.2 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด หันอาคารแต่ละทิศตามข้อ 2.1 ระบุอัตราส่วนพื้นที่หน้าต่างต่อพื้นที่ผนังอาคารทั้งหมด ( WWR) 4 กรณี ได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แทนค่า SC ของกระจกกรณีศึกษาทั้ง 7 ชนิดลงในอาคารจำลองตามข้อ 2.1 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด ใช้ข้อมูลค่าพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง รายละเอียดดังนี้

อาคารขนาดใหญ่ มีอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 3 เดือน เกินกว่า 250,000 หน่วย/เดือน[1]

| | |
|---|---|
| ค่าพลังงานไฟฟ้า | 4.2097 บาท/หน่วย |
| ค่าบริการ | 312.24 บาท/เดือน |

[1] ที่มา http://www.mea.or.th/profile/index.php?l=th&tid=3&mid=114&pid=109 วันที่ 27 พฤษภาคม 2559

On Peak 9:00 – 22:00 (วันจันทร์ – ศุกร์)

2.4 เปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ กรณีติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส, กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e หรือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ แทนค่ารายละเอียดม่านบังแดดชนิดใช้ภายในอาคารลงในโปรแกรม Visual DOE 4.1 เปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของกระจกเป็นคู่ๆ ได้แก่

4. ลามิเนต 6ข+6ส ***Low-e TC*** VS. ลามิเนต 6ข+6ส ***Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

2 ลามิเนต 6ข+6ส ***PDLC*** VS. ลามิเนต 6ข+6ส + ***ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

3 อินซูเลต 6ข+A12+6ส ***PDLC*** VS. อินซูเลต 6ข+A12+6ส ***+ ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

คำนวณต้นทุนเฉลี่ยของม่านบังแดดอัตโนมัติจากบริษัทผู้ผลิต 4 ราย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

## 4.2 ผลการศึกษาวิจัยจากกล่องทดลอง

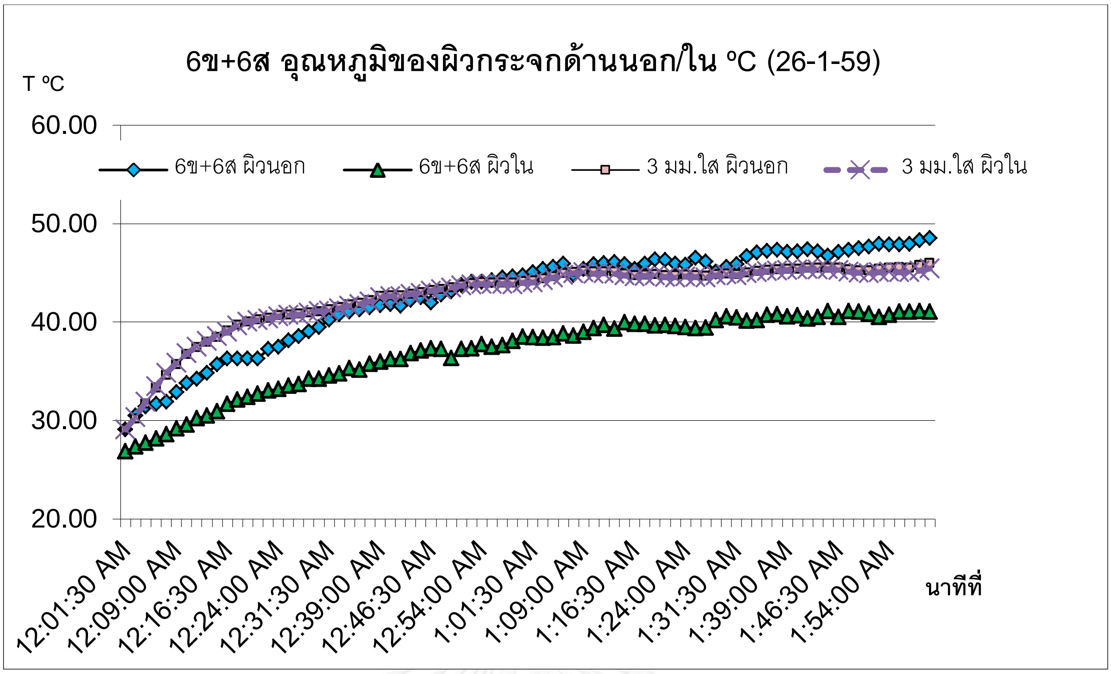
การติดตั้งกระจกลามิเนตหรืออินซูเลตที่มีกระจกคนละสีอยู่คนละด้าน (ในกรณีนี้ ด้านหนึ่งเป็นสีใส อีกด้านหนึ่งมีสีเขียว) มีผลต่อประสิทธิภาพการประหยัดพลังงาน งานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยติดตั้งกระจกทั้งด้านสีใสและสีเขียวออกนอกกล่องทดลอง ตั้งกล่องทดลองภายนอกอาคารในวันท้องฟ้าโปร่ง บันทึกอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกโดยเครื่องวัดอุณหภูมิ ทุกๆ 2 วินาทีติดต่อกัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ธนะชัย ถาวรวัฒน์สกุล, 2555) คำนวณหาค่า Q และ SC จากผลความแตกต่างของอุณหภูมิที่บันทึก เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระจกชนิดเดียวกัน กรณีติดตั้งสลับด้าน ได้ผลดังนี้

### 4.2.1 กลุ่มกระจกลามิเนต / อินซูเลต Low-e และ PDLC

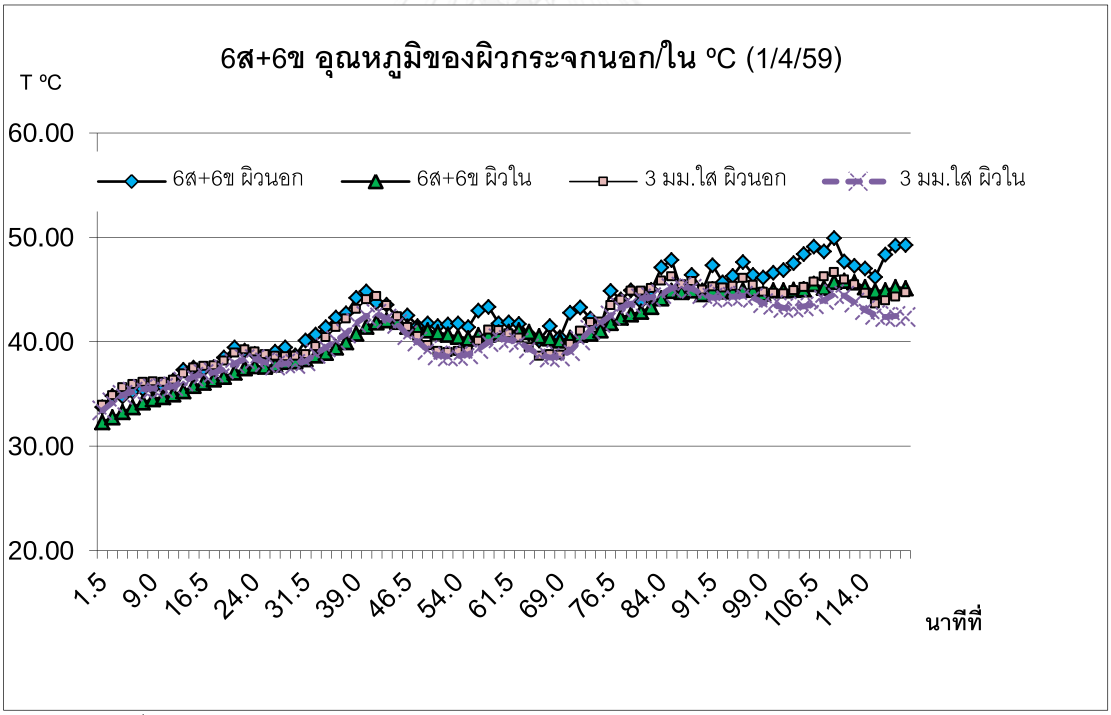
การทดลองกระจกทั้ง 5 ชนิดในกลุ่มนี้ เกิดขึ้นต่างวัน จึงไม่สามารถนำอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน และอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบในกราฟเดียวกัน กระจกที่มีคุณสมบัติในการประหยัดพลังงานที่ดีกว่า จะมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในสูงกว่า และมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกน้อยกว่า

1.1 กระจกลามิเนต 6ข+6ส

ภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 แสดงถึงผลต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจกลามิเนต 6ส+6ข ณ นาทีที่ 120 กระจกลามิเนตที่ติดตั้งกระจกแผ่นสีเขียวออกด้านนอกกล่องทดลอง มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในสูงกว่ากระจกลามิเนตที่ติดตั้งแผ่นกระจกสีใสออกด้านนอก 81.16%  เนื่องจากกระจกสีเขียวมีคุณสมบัติอมความร้อนและแผ่นฟิล์มลามิเนตที่อยู่ระหว่างกระจกทั้ง 2 แผ่นสามารถหน่วงไม่ได้ความร้อนทั้งหมดถ่ายเทเข้าสู่กระจกสีใสแผ่นใน



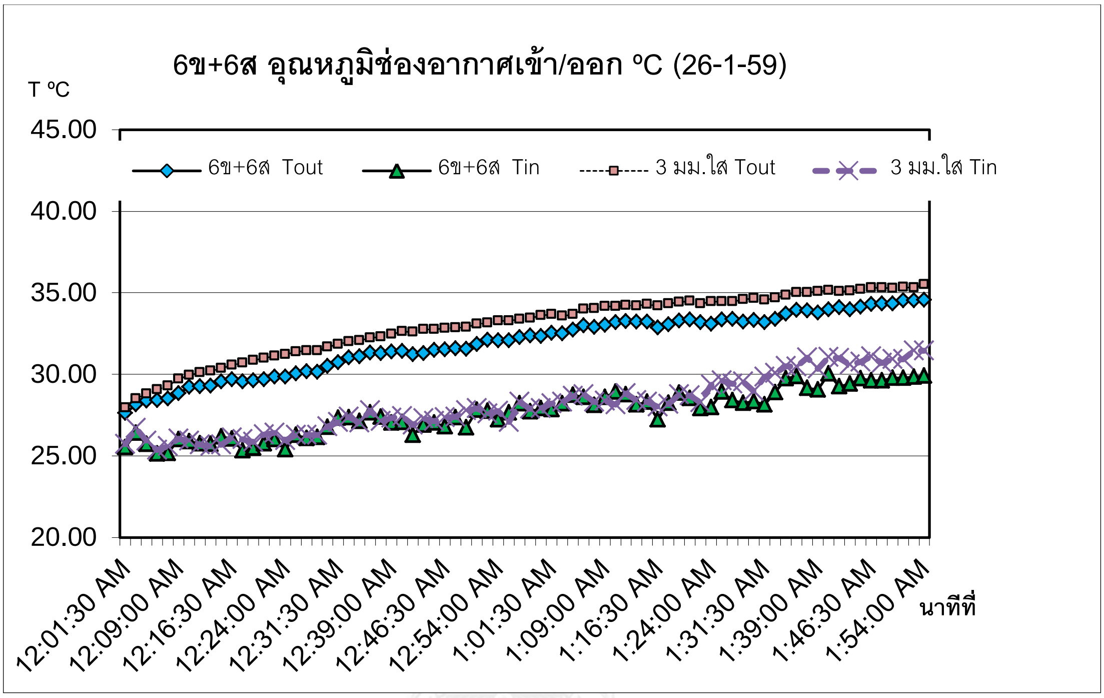

ภาพที่ 4.2: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจก 3 มม.ใส



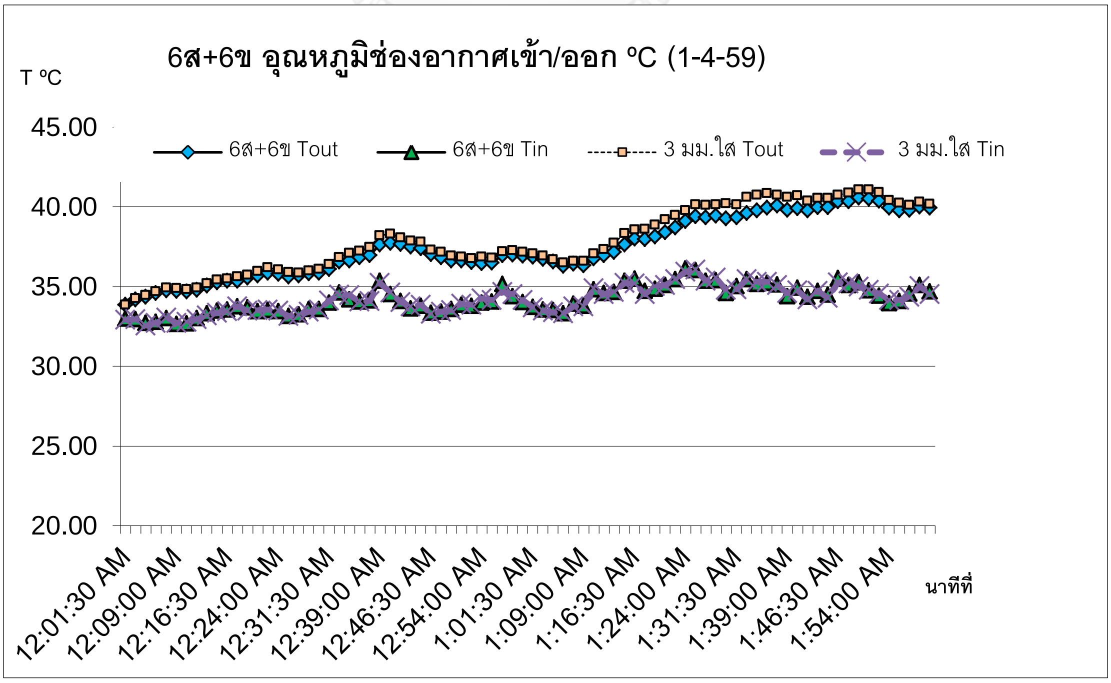

ภาพที่ 4.3: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+6ข และกระจก 3 มม.ใส

ภาพที่ 4.4 และ ภาพที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจกลามิเนต 6ส+6ข เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใส ณ นาที

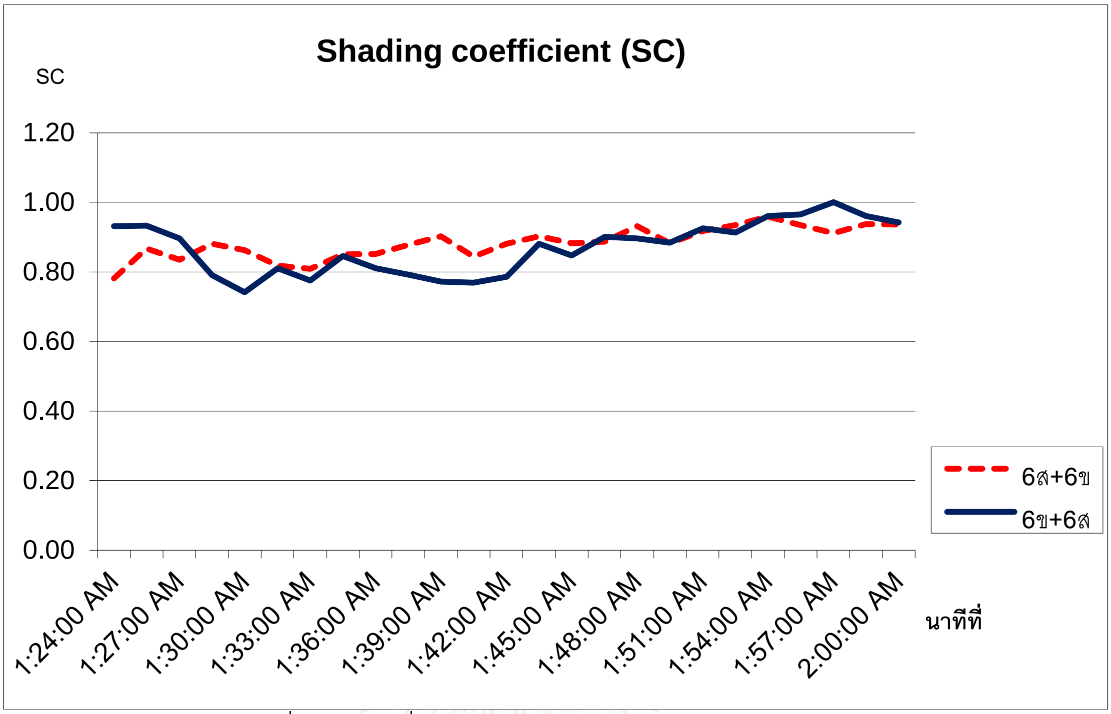
ที่ 120 ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 12.81% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 12.31%




ภาพที่ 4.4: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.5: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.6: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และ 6ส+6ข

กราฟอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เริ่มคงที่ตั้งแต่นาทีที่ 01:24:00 ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจกลามิเนต 6ส+6ข จึงคำนวณจากนาทีที่ 01:24:00 – 02:00:00 (ภาพที่ 4.6) ได้ดังนี้

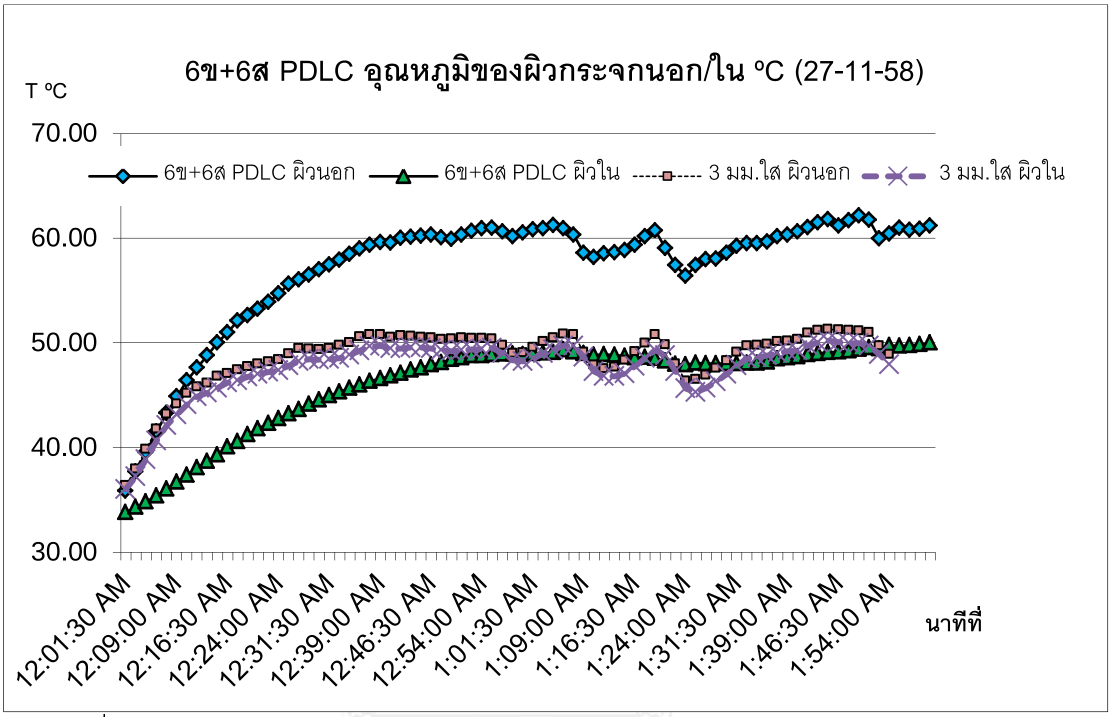
| | | | |
|---|---|---|---|
| **SC กระจกลามิเนต <u>6ข</u>+6ส** | = | 0.88 | ผลต่าง -1.13% |
| SC กระจกลามิเนต <u>6ส</u>+6ข | = | 0.89 | |

ค่า Visible Light Transmittance (VLT) และ U-Value ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส และกระจกลามิเนต 6ส+6ข มีค่าเท่ากัน คือ 70.90% และ 5.50 W/m2K ตามลำดับ การทดลองหาค่า SC โดยใช้กล่องทดลอง จึงได้ค่า SC ที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้สอดคล้องกับกระจกกรณีศึกษาชนิดอื่นๆ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้กระจกลามิเนต 6ข+6ส ในการวิจัยต่อไป

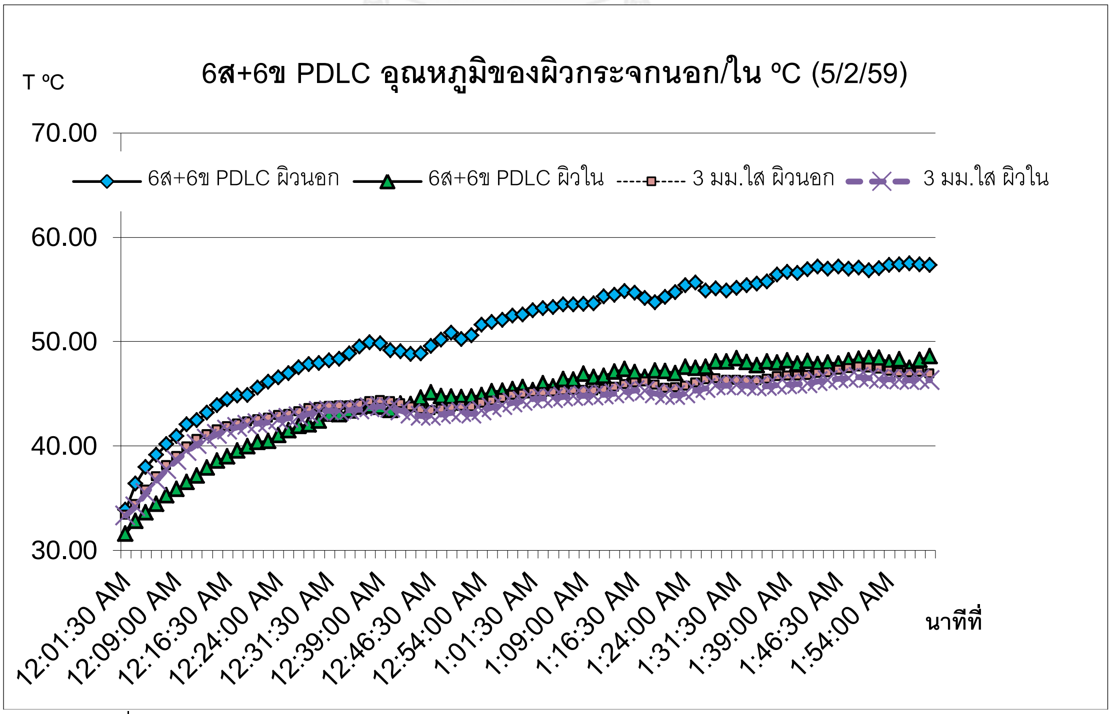
1.2 กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC

ภาพที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.8 แสดงถึงอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ด้านในของกระจกที่ทำการทดลอง ณ นาทีที่ 120 บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของ

กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ได้ 11.13 °C และเมื่อติดตั้งกระจกแผ่นใสออกด้านนอกกล่อง (กระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC) บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในได้ 8.72°C น้อยกว่าของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC 21.65%

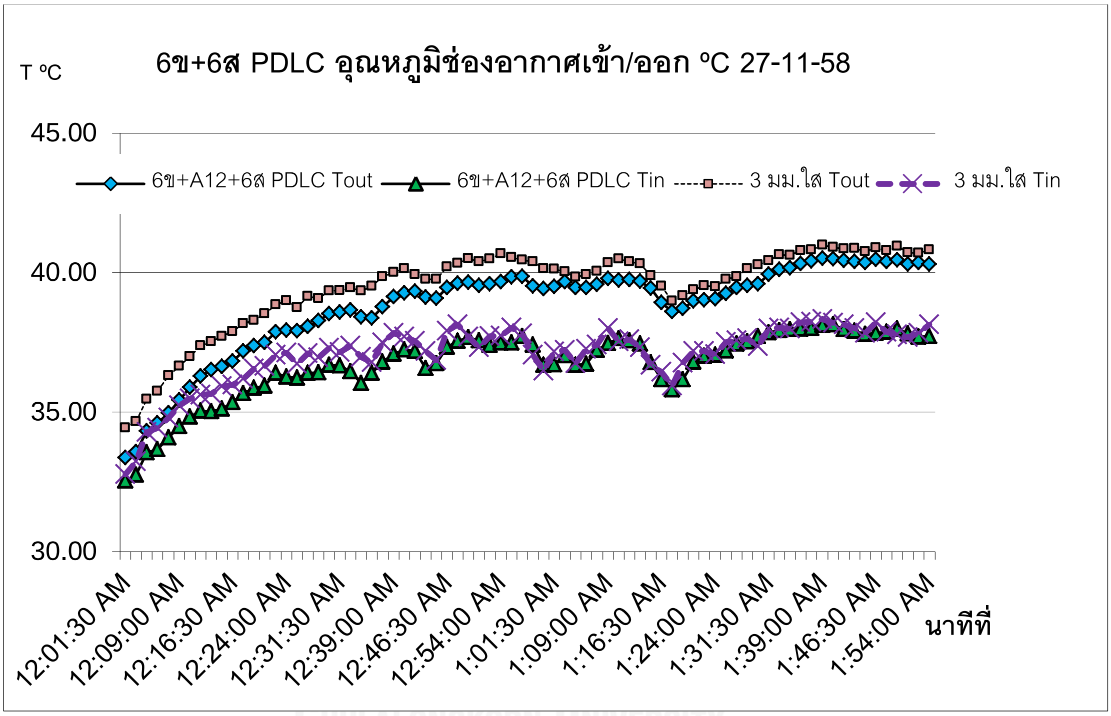



ภาพที่ 4.7: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส

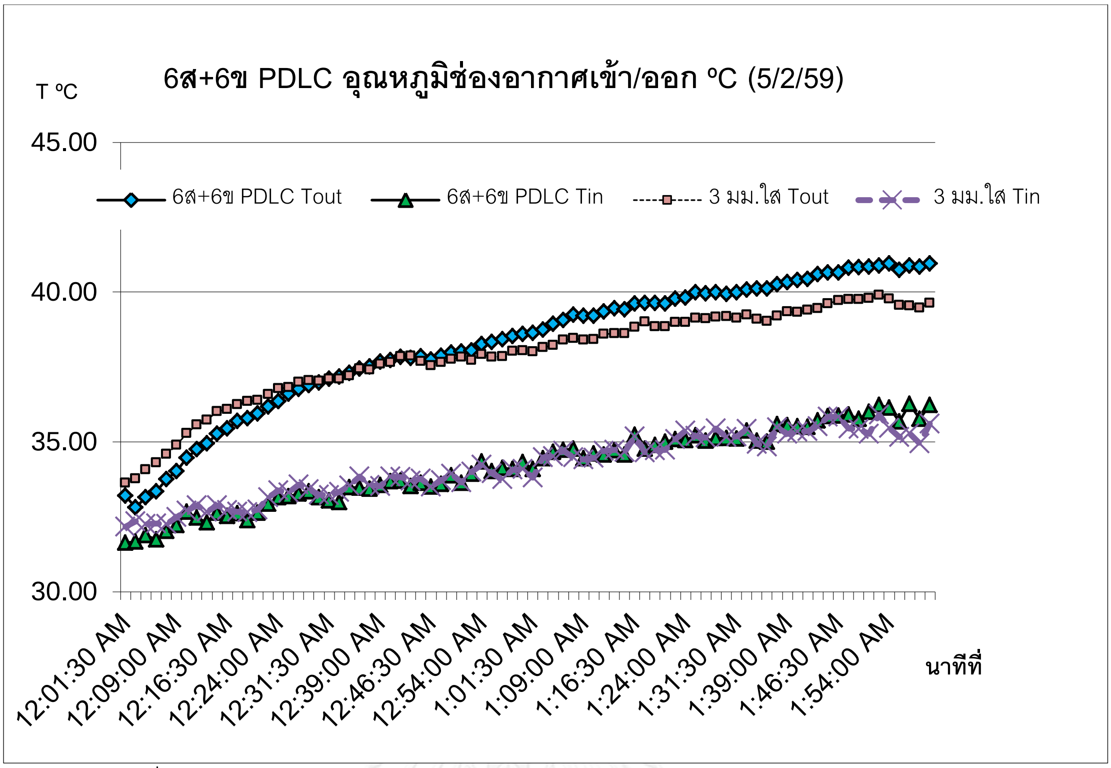



ภาพที่ 4.8: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส

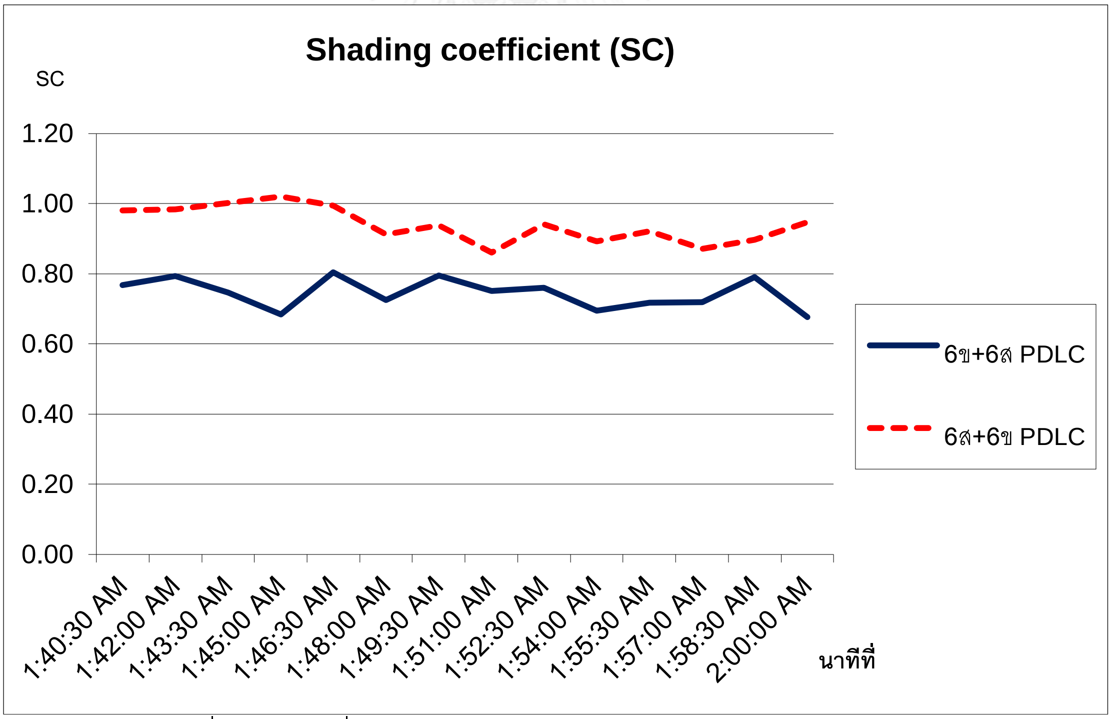
ภาพที่ 4.9 และ ภาพที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใสที่ทำการทดลองคู่กัน ณ นาทีที่ 120 ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจก ลามิเนต 6ข+6ส PDLC น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 15.75% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC มีค่ามากกว่าของกระจก 3 มม.ใส 16.88%




ภาพที่ 4.9: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.10: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส



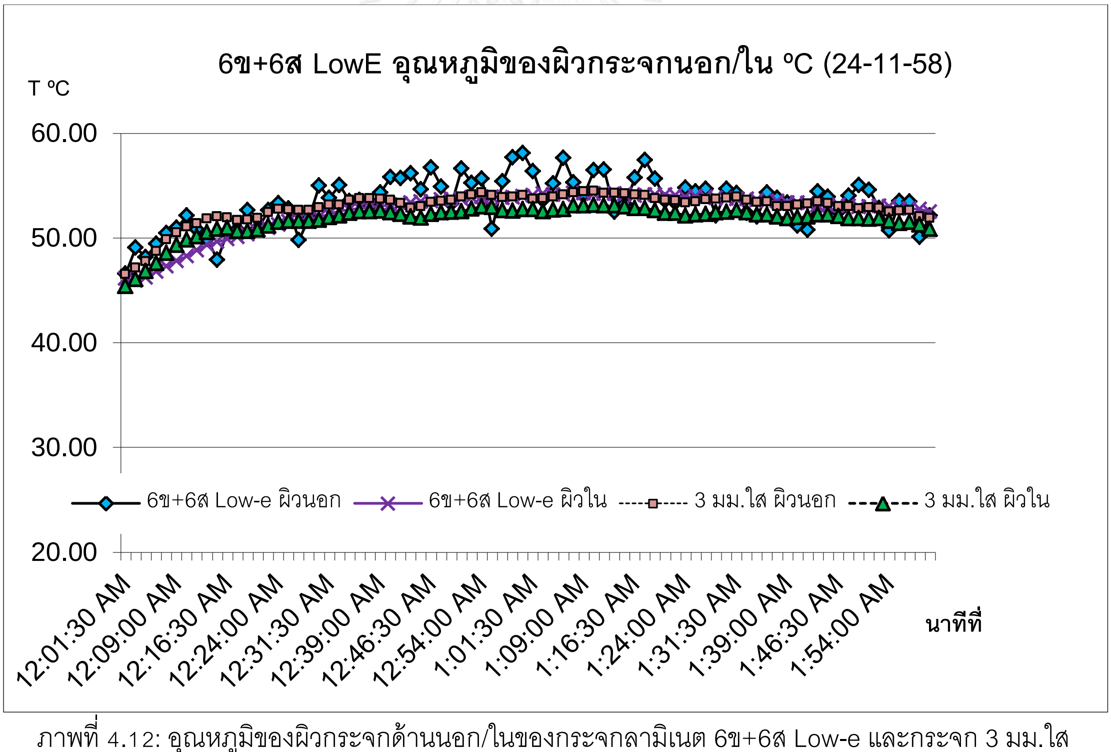

ภาพที่ 4.11: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และ 6ส+6ข PDLC

กราฟอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เริ่มคงที่ตั้งแต่นาทีที่ 01:40:00 ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC จึงคำนวณจากนาทีที่ 01:40:00 – 02:00:00 (ภาพที่ 4.11) ได้ดังนี้

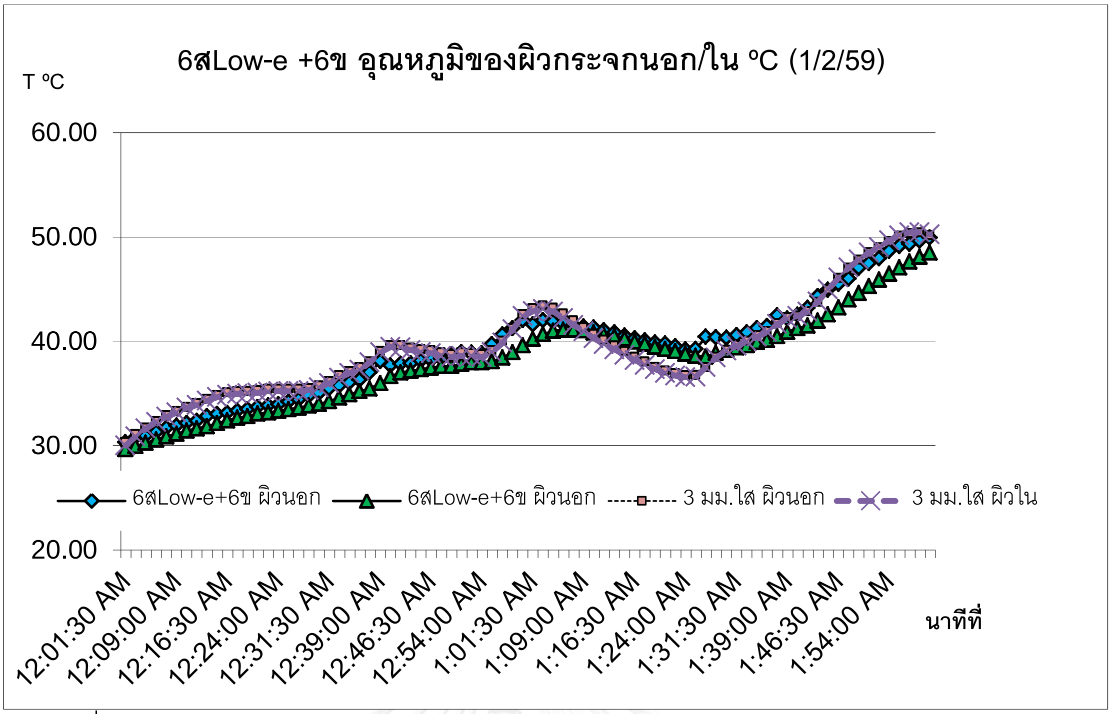
**SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC = 0.71**
SC กระจกลามิเนต 6ส+6ข PDLC = 0.90
} ผลต่าง -27.6%

1.3 กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e

ภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13 แสดงถึงอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกลามิเนต 6ส Low-e+6ข ณ นาทีที่ 120 บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e ได้ 4.64 °C เมื่อติดตั้งกระจกแผ่นใสออกด้านนอกกล่องทดลอง บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกได้ 4.93 °C มากกว่าของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e 6.25%

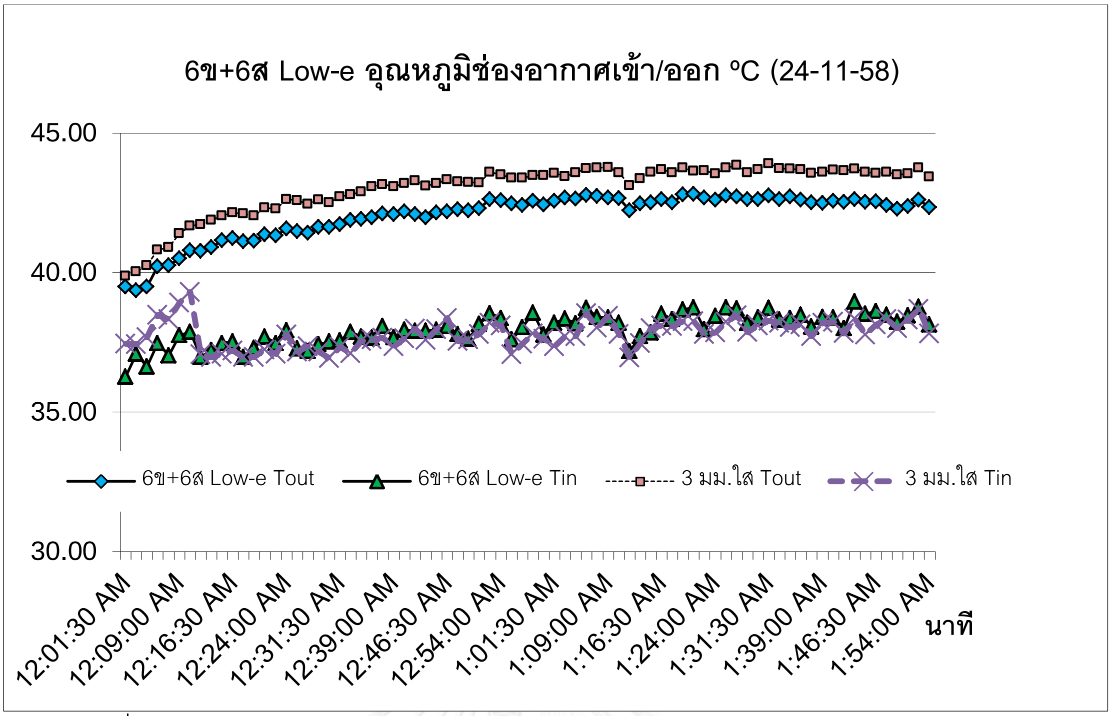



ภาพที่ 4.12: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจก 3 มม.ใส

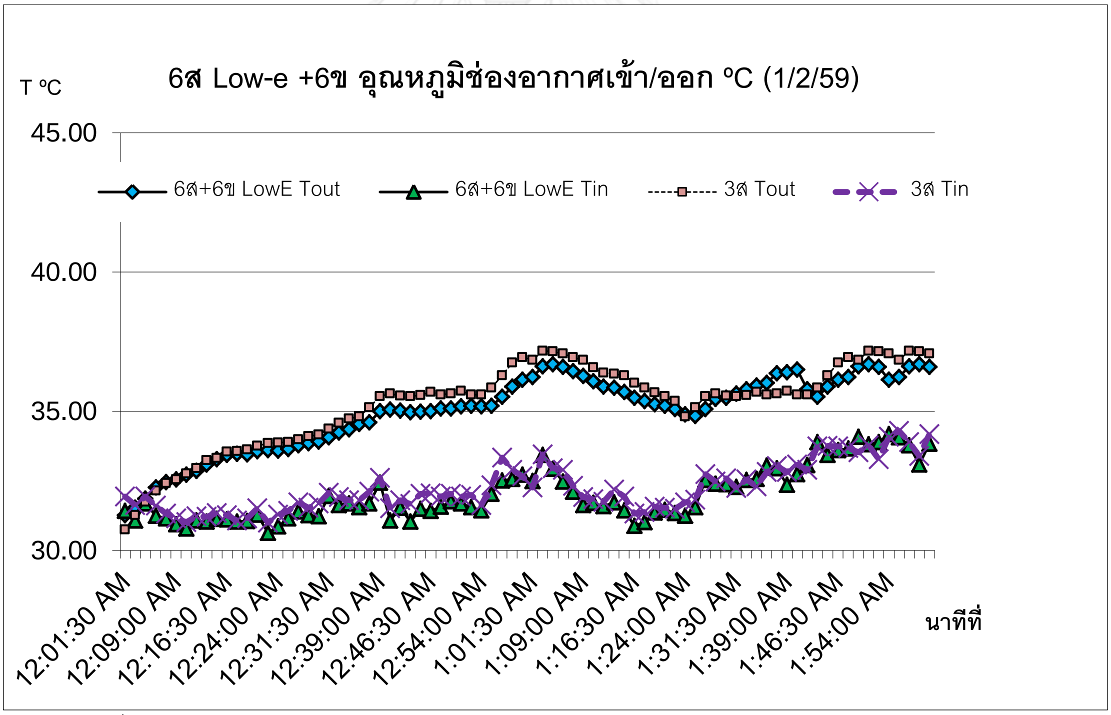



ภาพที่ 4.13: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส Low-e+6ข และกระจก 3 มม.ใส

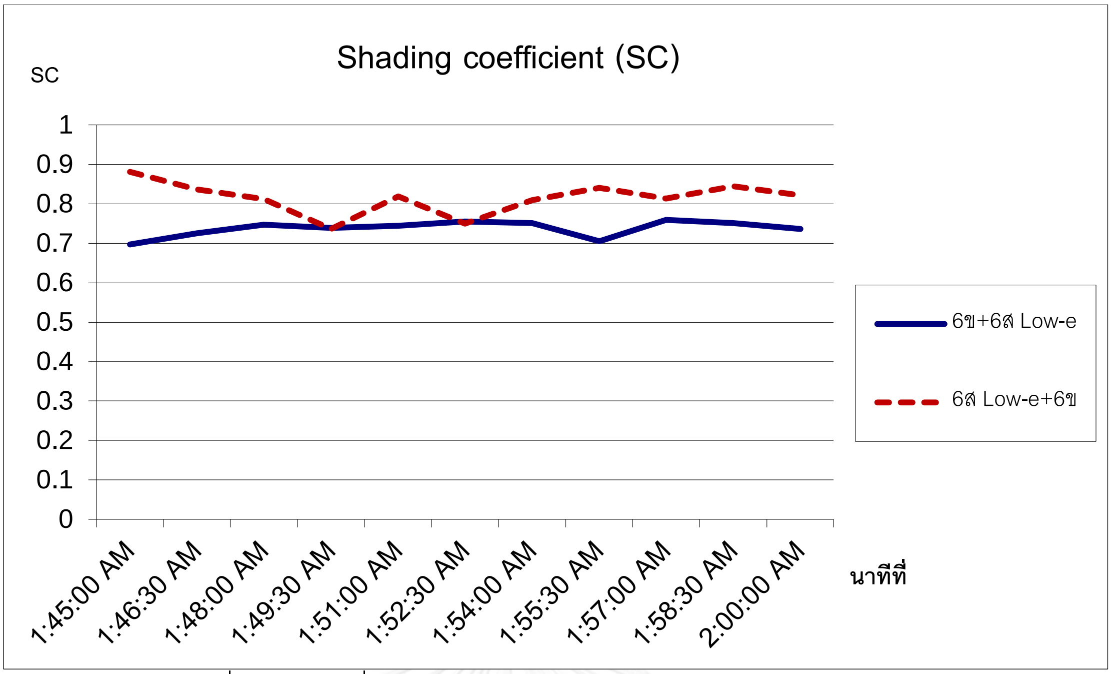
ภาพที่ 4.14 และ ภาพที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกลามิเนต 6ส Low-e+6ข เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใสที่ทำการทดลองคู่กัน ณ นาทีที่ 120 ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจก ลามิเนต 6ข+6ส Low-e น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 26.33% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจก 6ส Low-e+6ข น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 17.78%




ภาพที่ 4.14: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.15: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ส Low-e + 6ข และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.16: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และ 6ส Low-e +6ข

กราฟอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เริ่มคงที่ตั้งแต่นาทีที่ 01:45:00 ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกลามิเนต 6ส Low-e+6ข จึงคำนวณจากนาทีที่ 01:45:00 – 02:00:00 (ภาพที่ 4.16) ได้ดังนี้

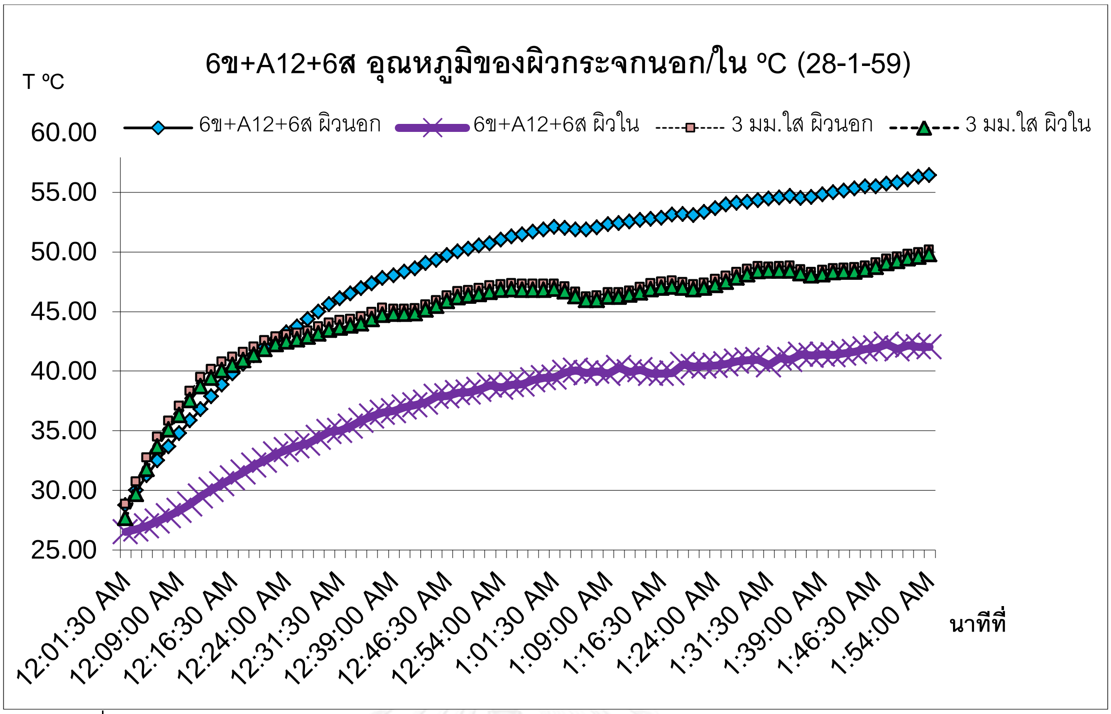
**SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส** Low-e = 0.77

SC กระจกลามิเนต 6ส Low-e + 6ข = 0.93

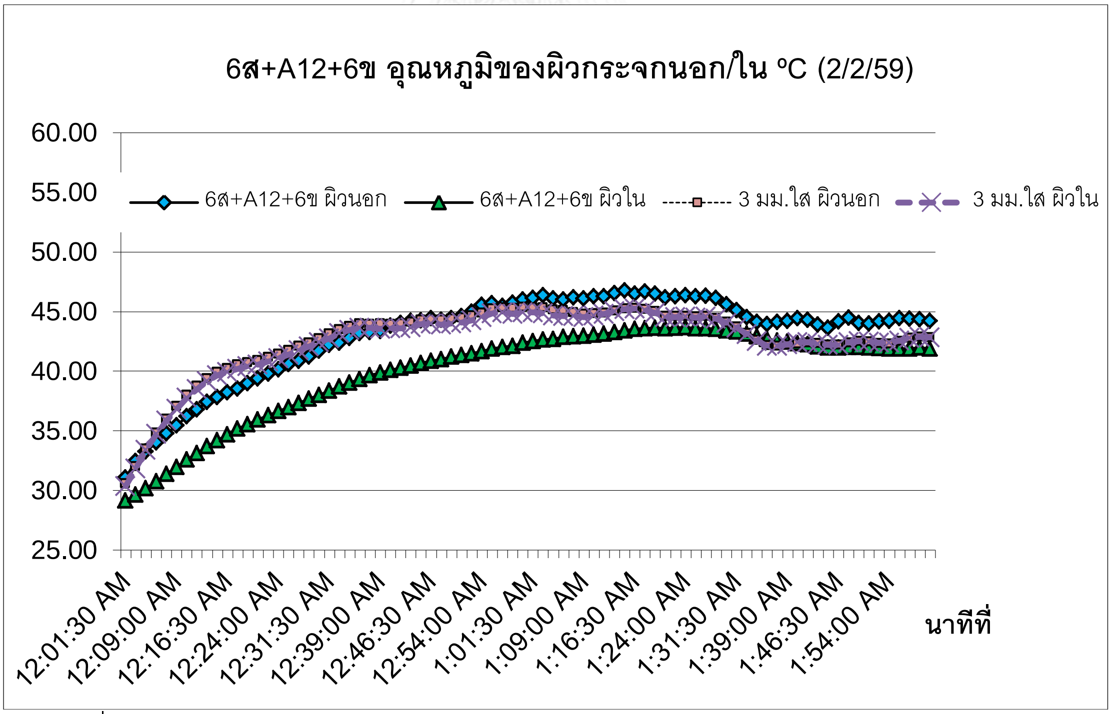
ผลต่าง -21.1%

1.4 กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส

ภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18 แสดงอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข ณ นาทีที่ 120 บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส ได้ 13.96 °C เมื่อติดตั้งกระจกแผ่นใสออกด้านนอกกล่อง บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในได้ 2.34°C น้อยกว่าของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส 83.24%



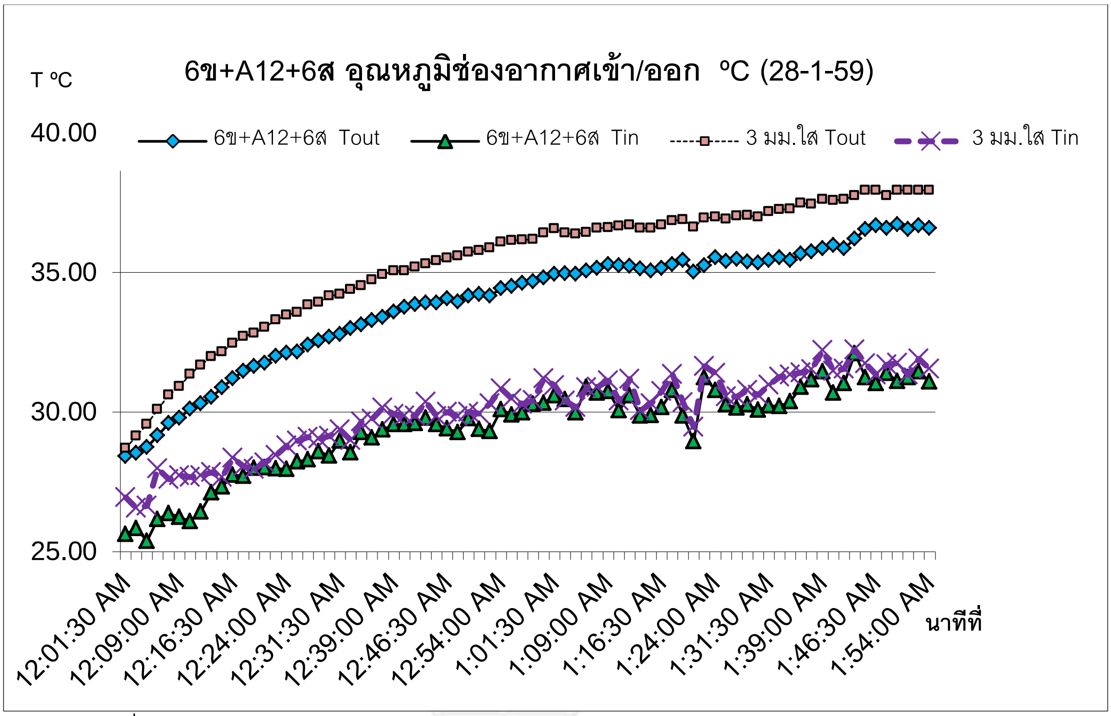

ภาพที่ 4.17: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจก 3 มม.ใส



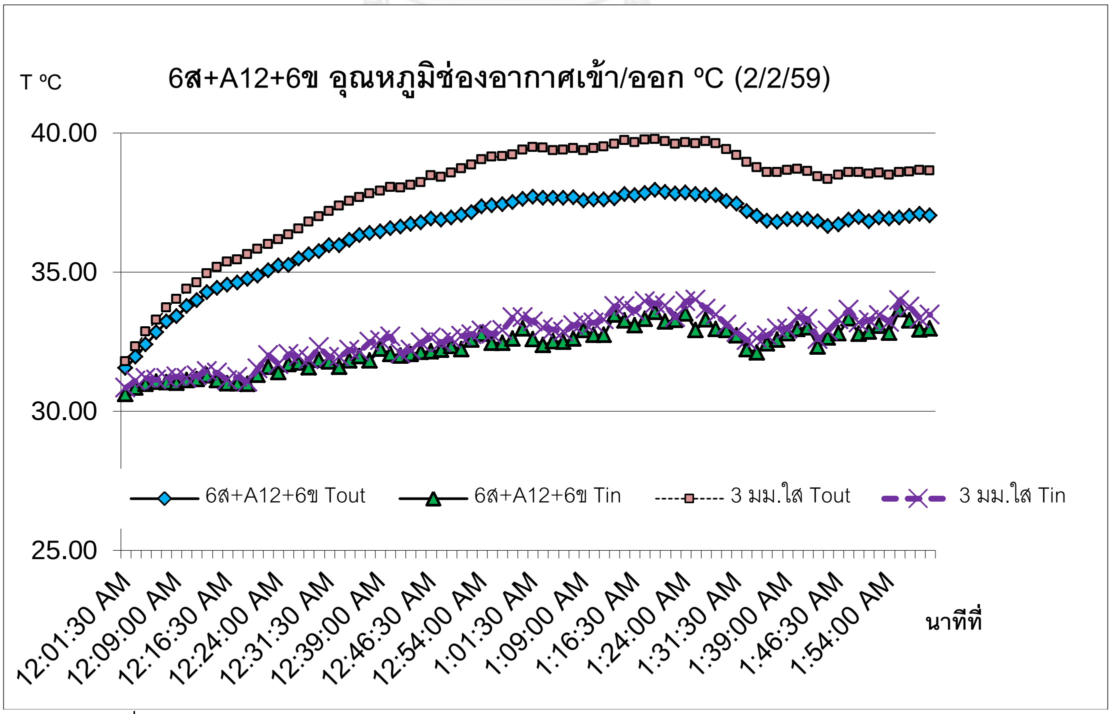

ภาพที่ 4.18: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ส+A12+6ข และกระจก 3 มม.ใส

ภาพที่ 4.19 และ ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.

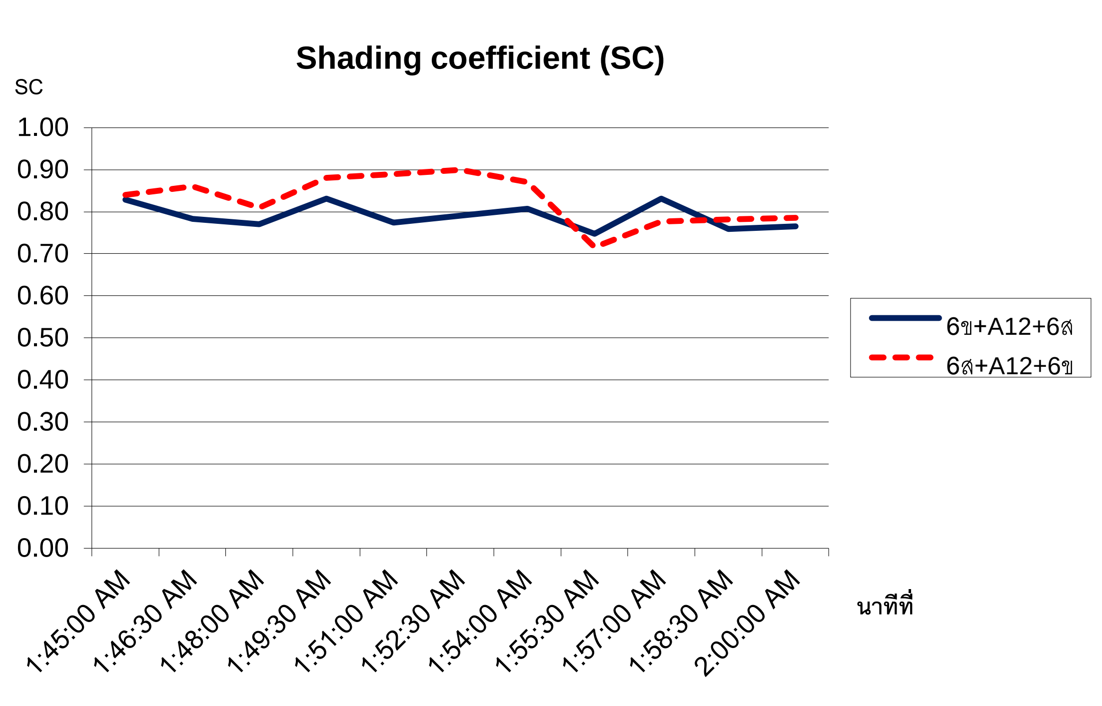
ใสที่ทำการทดลองคู่กัน ณ นาทีที่ 120 ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 23.90% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 21.46%




ภาพที่ 4.19: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.20: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.21: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และ 6ส+A12 +6ข

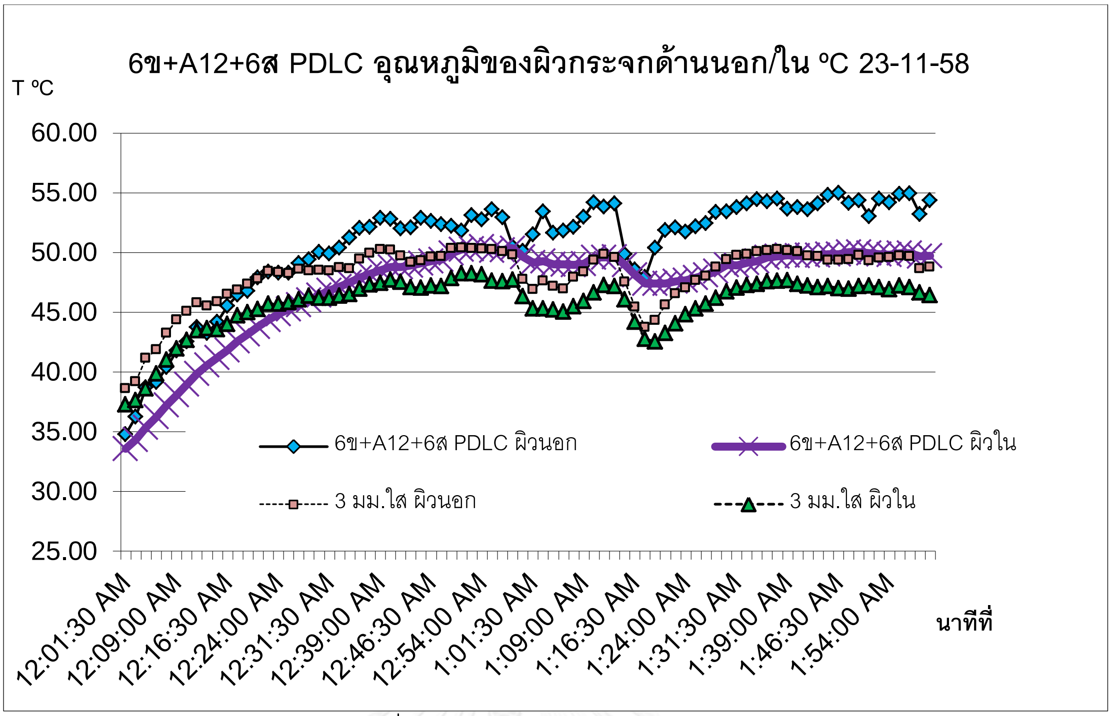
กราฟอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เริ่มคงที่ตั้งแต่นาทีที่ 01:45:00 ค่าเฉลี่ย SC กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข จึงคำนวณจากนาทีที่ 01:45:00 – 02:00:00 (ภาพที่ 4.21) ได้ดังนี้

**SC กระจกลามิเนต 6ข+A12+6ส = 0.81**
SC กระจกลามิเนต 6ส+A12+6ข = 0.86

ผลต่าง -6.2%

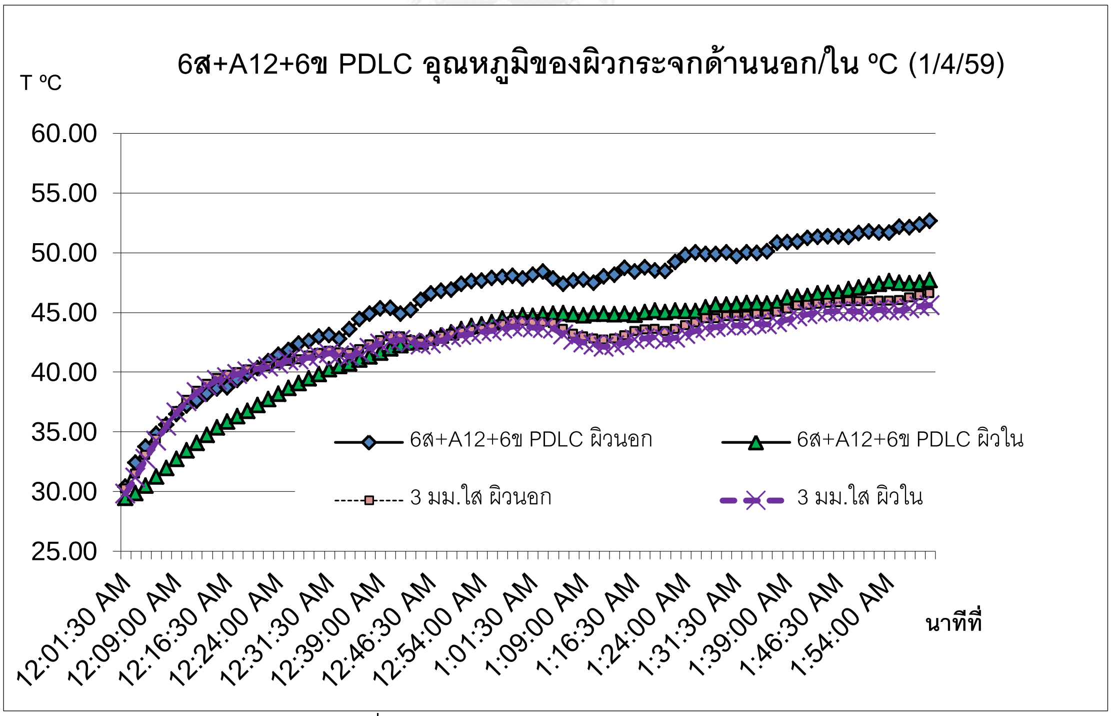
1.5 กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC

ภาพที่ 4.22 และภาพที่ 4.23 แสดงถึงอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC ณ นาทีที่ 120 บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกอินซูเลต 6ข+6ส PDLC ได้ 4.64 °C เมื่อติดตั้งกระจกแผ่นใสออกด้านนอก บันทึกความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในได้ 4.93 °C มากกว่าของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC 6.25%




ภาพที่ 4.22: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน

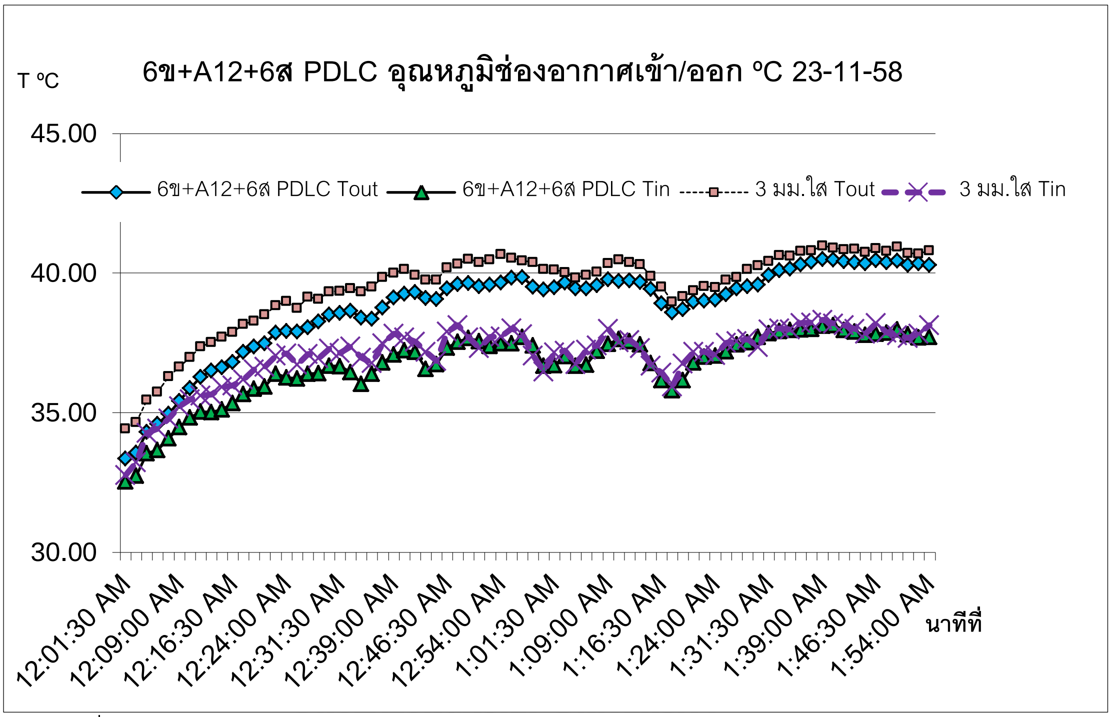
ของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส



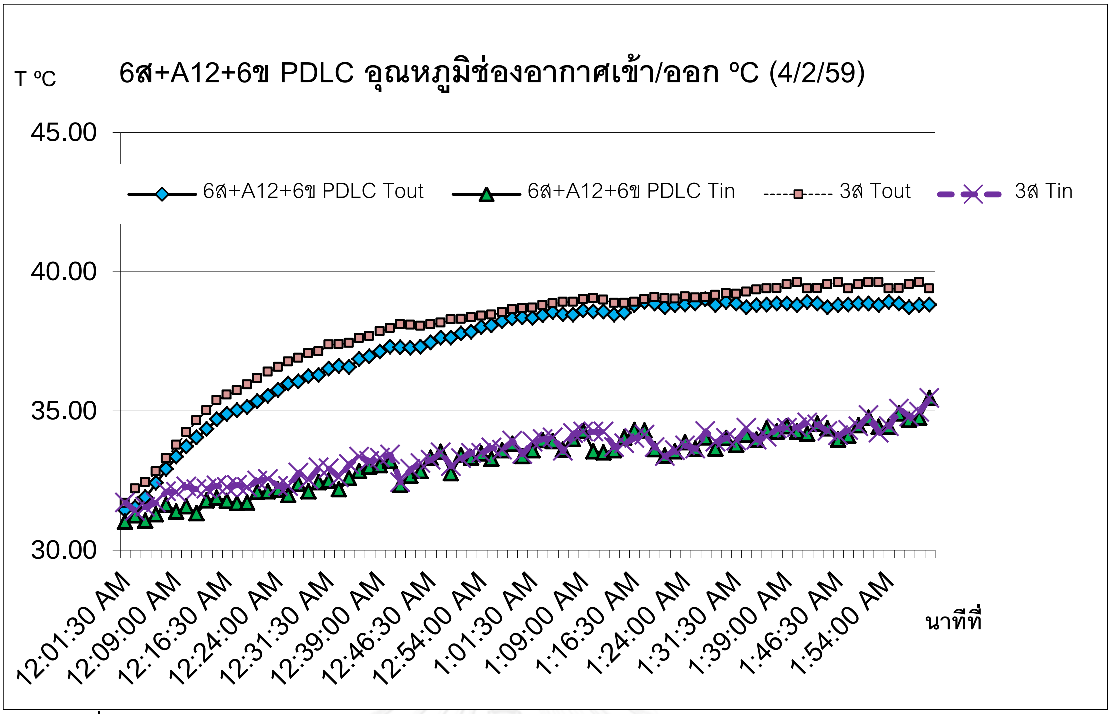

ภาพที่ 4.23: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของ

กระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส

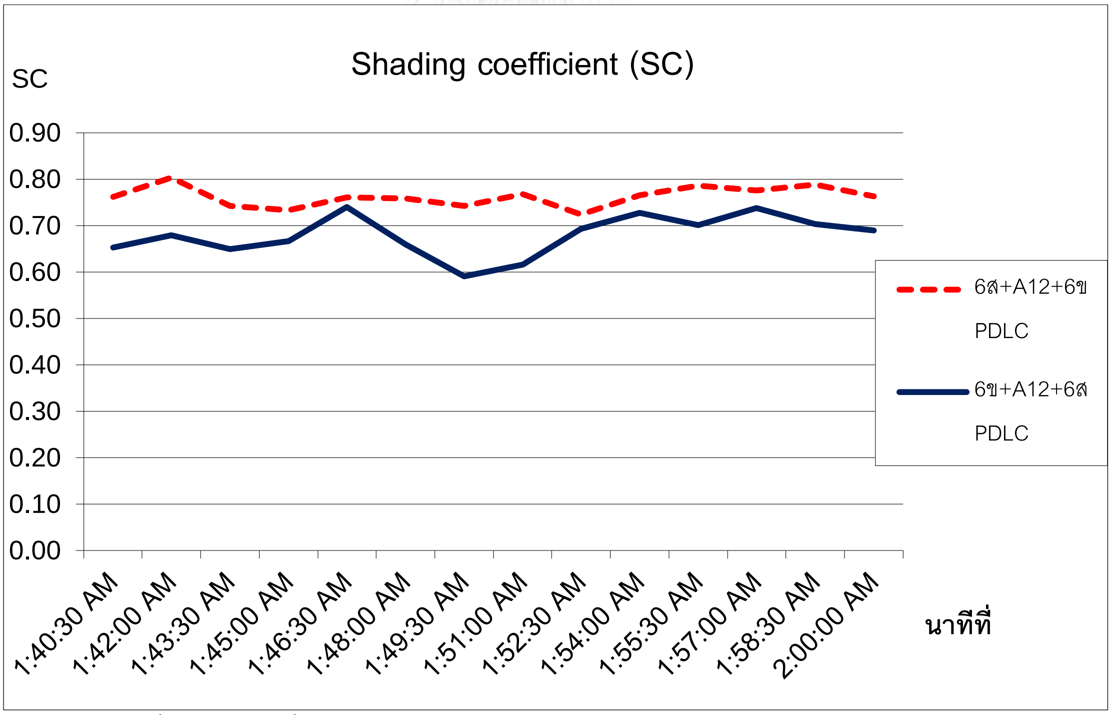
ภาพที่ 4.24 และ ภาพที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC เปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใสที่ทำการทดลองคู่กัน ณ นาทีที่ 120 ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 8.81% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจก 6ส+A12+6ข PDLC น้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 1.49%




ภาพที่ 4.24: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.25: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC และกระจก 3 มม.ใส




ภาพที่ 4.26: ค่าเฉลี่ย SCของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และ 6ส+A12+6ข PDLC

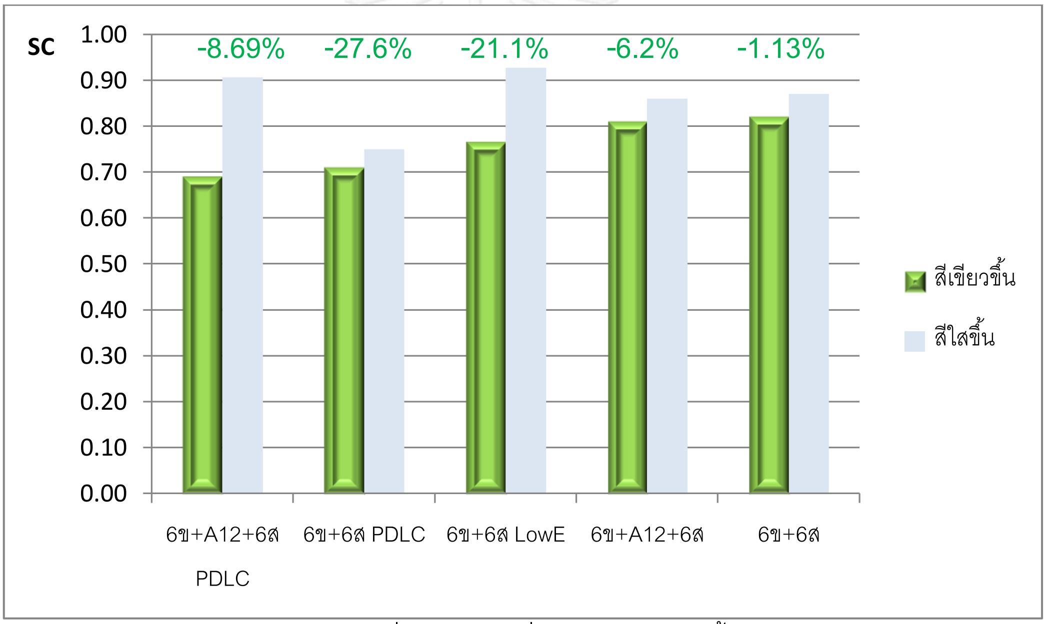
กราฟอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก เริ่มคงที่ตั้งแต่นาทีที่ 01:40:00 เฉลี่ย SC ของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC จึงคำนวณจากนาทีที่ 01:40:00 – 02:00:00 (ภาพที่ 4.26) ได้ดังนี้

**SC กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC = 0.69**

SC กระจกอินซูเลต 6ส+A12+6ข PDLC = 0.75

ผลต่าง -8.69%

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย SC ของกระจกทั้ง 5 ชนิด พบว่า ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกที่ติดตั้งด้านสีเขียวออกด้านนอกน้อยกว่าค่าเฉลี่ย SC ของกระจกที่ติดตั้งด้านสีใสออกด้านนอก 1% - 27% (ภาพที่ 4.27) การติดตั้งกระจกด้านสีเขียวออกด้านนอกกล่อง จึงสามารถลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในกล่องทดลองได้มากกว่าการติดตั้งกระจกด้านสีใสออกด้านนอก




ภาพที่ 4.27: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกทั้ง 5 ชนิด

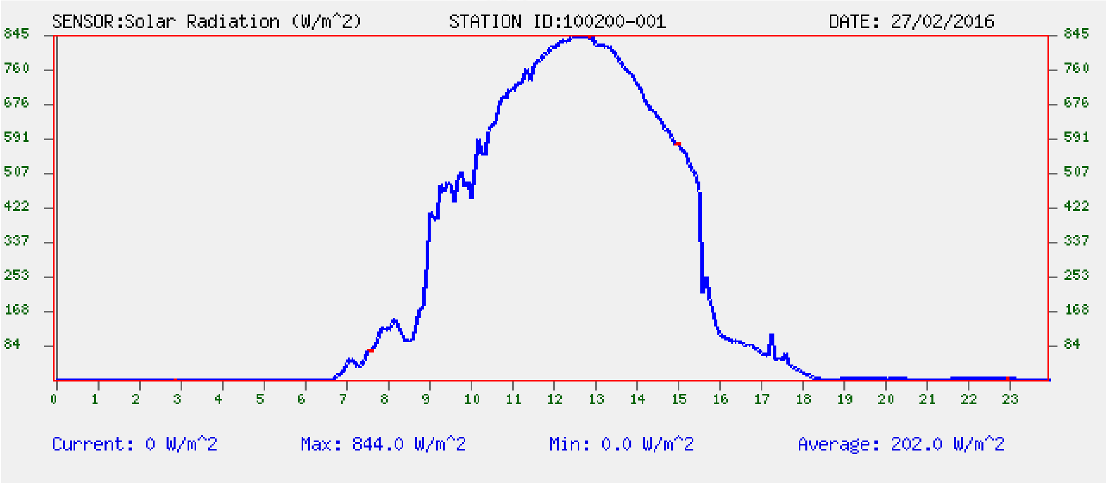
สำหรับกระจกกลุ่ม TC จึงทำการทดลองโดยติดตั้งกระจกด้านสีเขียวออกด้านนอกกล่องวิธีเดียว

### 4.2.2 กระจกกลุ่ม TC

คุณสมบัติของกระจก TC คือความสามารถในการเปลี่ยนสีกระจกให้เข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระจกสูงขึ้น โดยสีของกระจกจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มที่อุณหภูมิของผิวกระจกประมาณ

35ºC เป็นต้นไป และเปลี่ยนกลับเป็นสีเขียวอ่อนลงเมื่ออุณหภูมิของผิวกระจกลดลง การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า SC ต่อพลังงานแสงอาทิตย์ การวิจัยกระจก TC จึงบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที ติดต่อกันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยเลือกทำการทดลองในวันที่สภาพอากาศโดยเฉลี่ยฟ้าโปร่ง

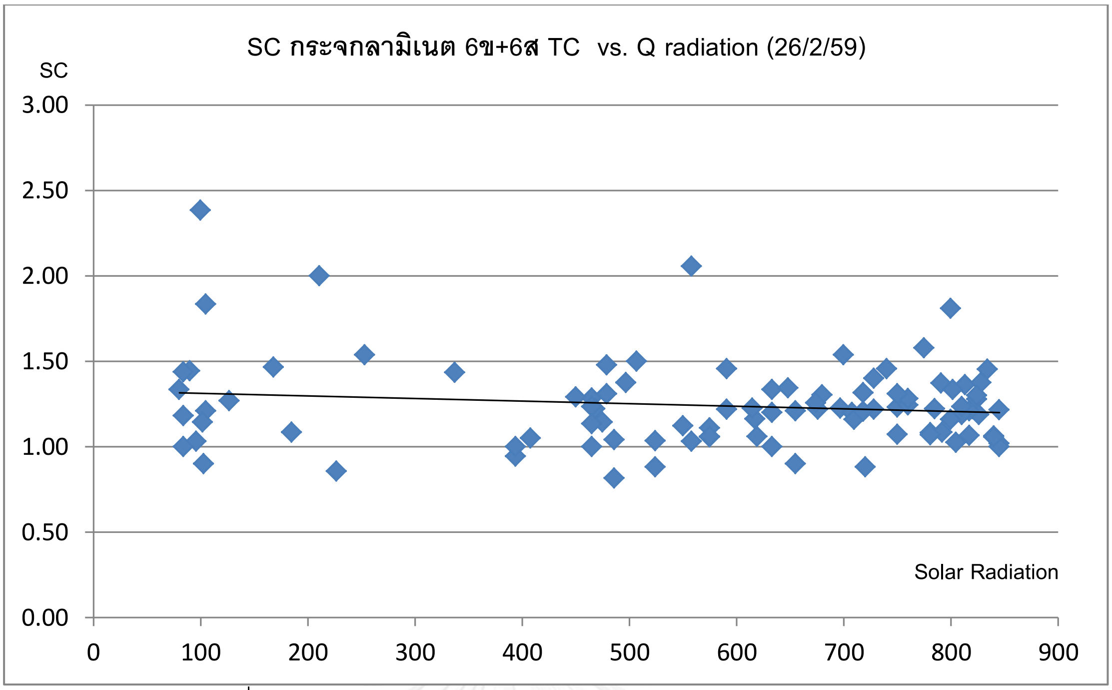
สำหรับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ นำข้อมูลจาก http://www.weatherwatch.in.th โดยเลือกสถานีพระตำหนักวังสวนกุหลาบ วันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559 (ภาพที่ 4.28) ซึ่งเป็นสถานีที่มีข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ใกล้สถานที่ทำการทดลองมากที่สุด และเป็นช่วงวันที่มีสภาพอากาศใกล้เคียงกัน (ทดลองกล่องกระจกในวันที่ 26 และ 29 กุมภาพันธ์ 2559 ที่อ.บางปะกง จ.ชลบุรี)




ภาพที่ 4.28: ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ณ สถานีพระตำหนักวังสวนกุหลาบ วันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2559

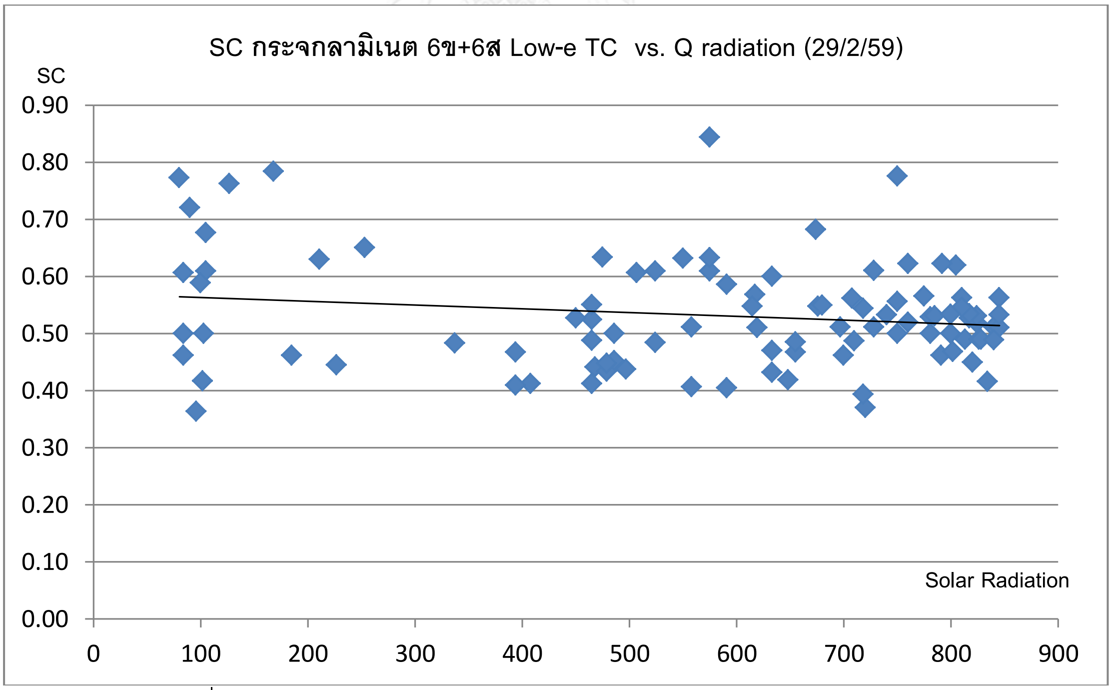
*ที่มา.* http://www.weatherwatch.in.th/index.php?station=100200-001&date=2016-02-27&pid=10, วันที่ 16 เมษายน 2559

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University




ภาพที่ 4.29: ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC

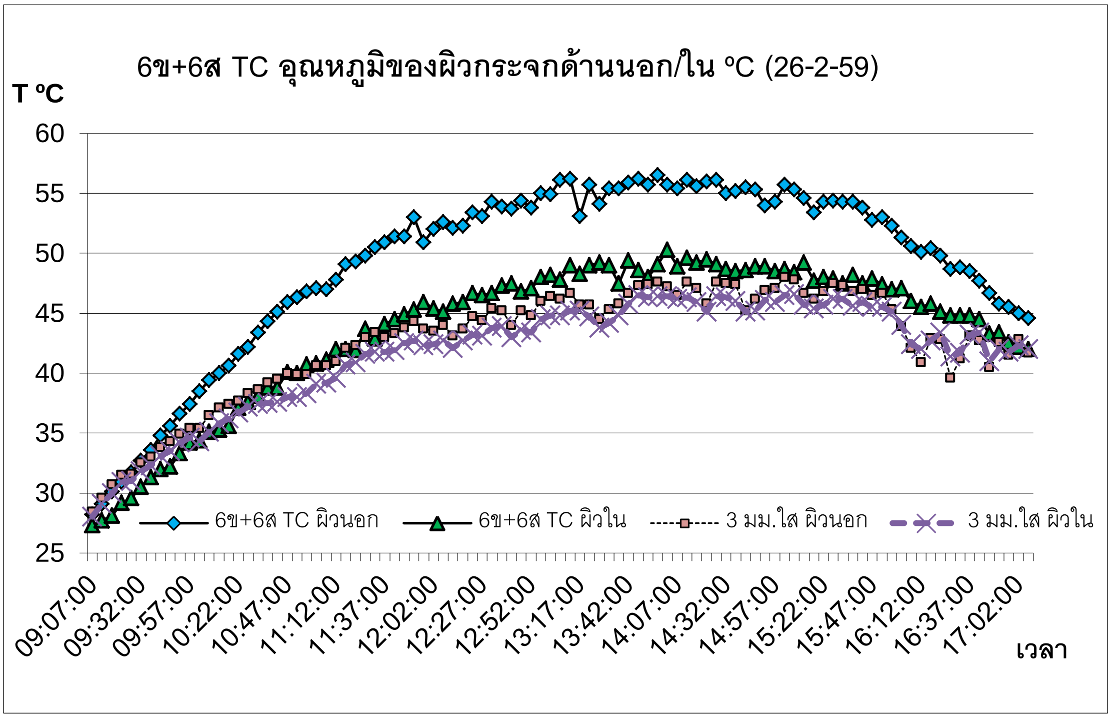
และพลังงานแสงอาทิตย์ (Q radiation)



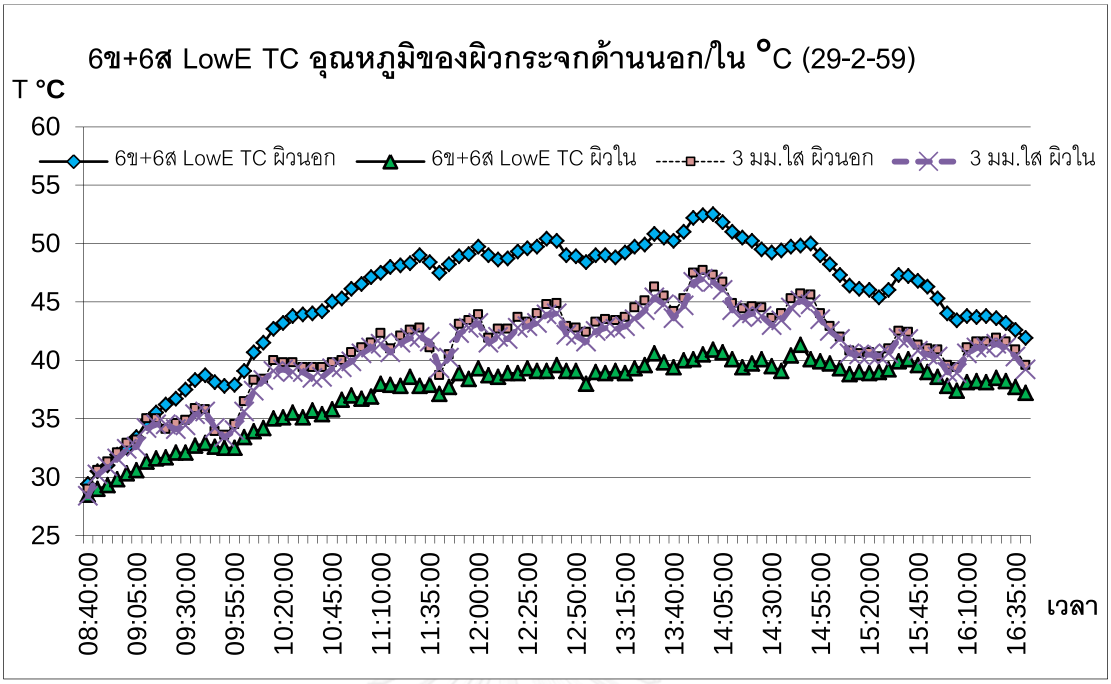

ภาพที่ 4.30: ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC

และพลังงานแสงอาทิตย์ (Q radiation)

จากภาพที่ 4.29 และ ภาพที่ 4.30 ค่า SC ของกระจกลามิเนต TC ไม่มีแนวโน้มแปรเปลี่ยนตามค่าพลังงานแสงอาทิตย์ (Q radiation) หรือช่วงเวลาของวัน ภาพที่ 4.31 และภาพที่ 4.32 แสดงอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก ณ เวลา 17:00 น. บันทึกได้ประมาณ 44.5°C และ 42 °C ตามลำดับ อุณหภูมิของผิวกระจกไม่ได้ลดลงเท่าช่วงเช้าที่เริ่มทำการทดลอง ในขณะที่ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับช่วงเริ่มทดลอง (ภาพที่ 4.28) ความร้อนที่สะสมในเนื้อกระจก ทำให้กระจก TC คงสภาพสีเข้มและสามารถป้องกันความร้อนจากรังสีของดวงอาทิตย์ได้ในช่วงเวลาสิ้นสุดการทดลอง

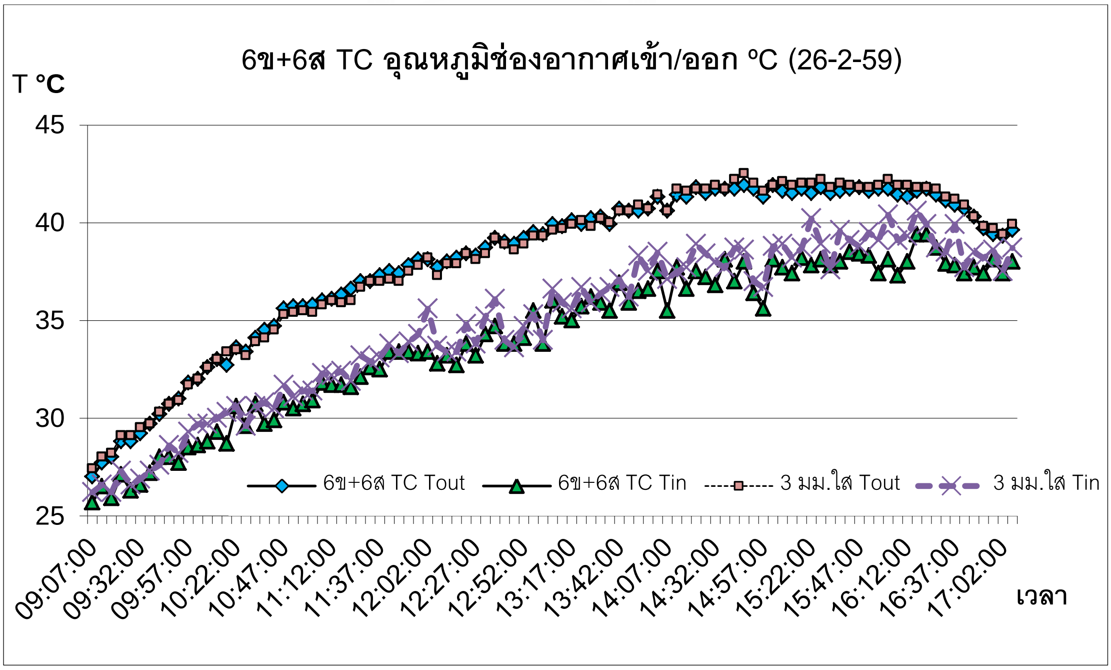



ภาพที่ 4.31: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC และกระจก 3 มม.ใส

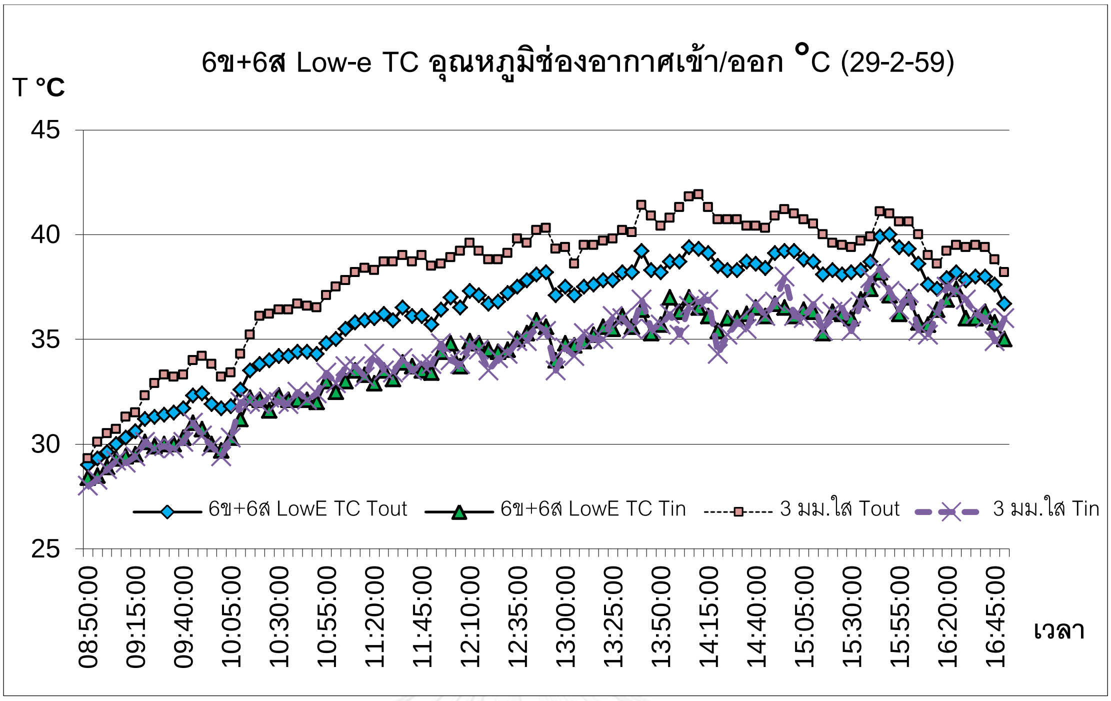



ภาพที่ 4.32: อุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจก 3 มม.ใส

ภาพที่ 4.33 ณ เวลาสิ้นสุดการทดลอง ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC มีค่ามากกว่าของกระจก 3 มม.ใส 33.33% และความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีค่าน้อยกว่าของกระจก 3 มม.ใส 27.73% (ภาพที่ 4.34)




ภาพที่ 4.33: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC และกระจก 3 มม.ใส

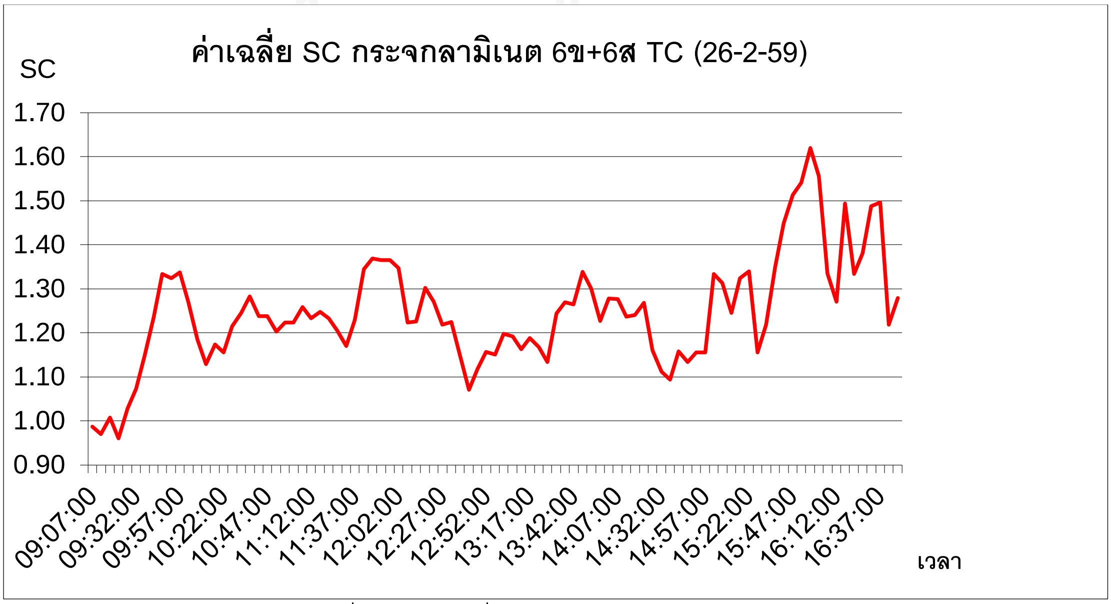



ภาพที่ 4.34: อุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจก 3 มม.ใส

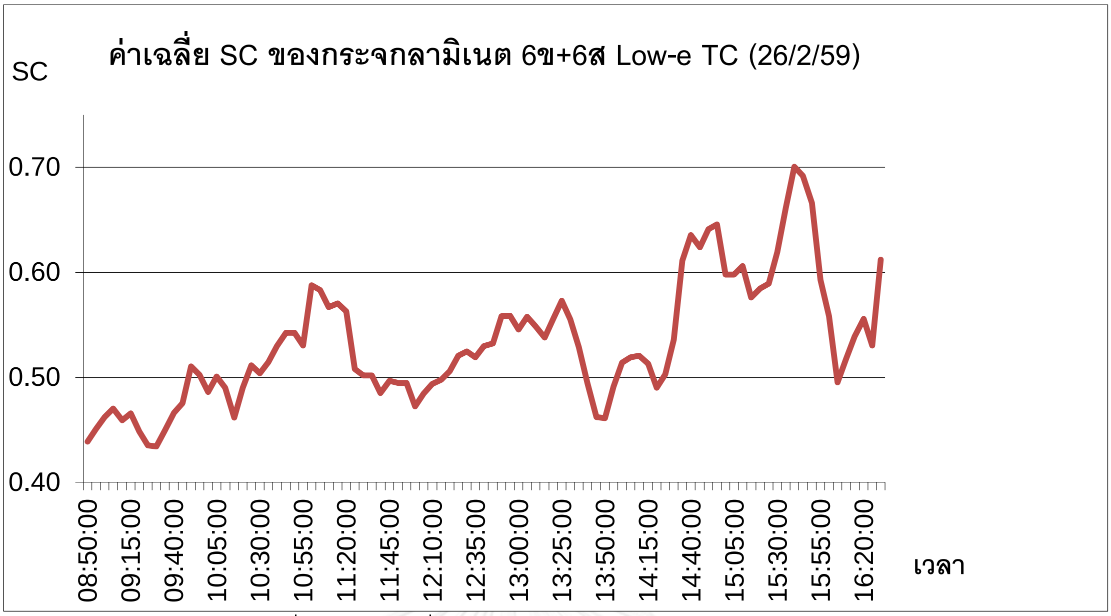
การหาค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC คำนวณจากการหาค่าเฉลี่ย SC ของทั้งวัน (ภาพที่ 4.35 และ ภาพที่ 4.36) สรุปผลได้ดังนี้

SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC = 1.24

**SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC = 0.53**




ภาพที่ 4.35: ค่าเฉลี่ย SC กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC




ภาพที่ 4.36: ค่าเฉลี่ย SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC

กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC คำนวณค่าเฉลี่ย SC ได้ 1.24 แสดงถึงความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่กล่องทดลองมากกว่ารังสีจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนกระจก เมื่อกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC มีอุณหภูมิสูงขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้ม กระจกมีการสะสมความร้อนมากขึ้นและแผ่เข้าสู่ภายในกล่องทดลอง ในขณะที่กระจกลามิเนต Low-e TC มีคุณสมบัติของ Low-e ป้องกันไม่ให้ความร้อนที่สะสมในเนื้อกระจกแผ่เข้าสู่ภายในกล่องทดลอง จากภาพที่ 4.31 และภาพที่ 4.32 อุณหภูมิของผิวกระจกด้านในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ช่วงที่สูงที่สุดคือ 50 °C สูงกว่าอุณหภูมิของผิวกระจกด้านในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ประมาณ 10 °C และในช่วงเวลาเย็น อุณหภูมิของผิวกระจกด้านในไม่ได้ลดลงไปถึงจุดเริ่มต้นการทดลองในตอนเช้า ค่าเฉลี่ยผลต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มากกว่าของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC 49%

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดดังนี้

1) ความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน ณ เวลาสิ้นสุดการทดลอง คู่ของกระจกลำดับที่ 3, 5 และ 6 กระจกที่มีค่า SC น้อยกว่า มีความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในมากกว่า คู่ของกระจกลำดับที่ 2 และ 4 กระจกแผ่นที่มีค่า SC น้อยกว่า มีค่าความ

แตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในน้อยกว่า ค่า SC ของกระจกไม่ได้แปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ในแต่อย่างเดียว

2) กระจกแผ่นที่มีค่า SC น้อยกว่า มีสัดส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกเมื่อเปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใสน้อยกว่า ค่า SC ของกระจกแปรผันตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออก

ค่า SC ในการคำนวณในโปรแกรม Visual DOE 4.1 คือค่า SC ที่น้อยกว่าในทุกลำดับคู่ของกระจกที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.1: ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน ณ เวลาสิ้นสุดการทดลอง, ความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกของกระจกกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับกระจก3 มม.ใส และ ค่า SC

| ลำดับที่ | ชนิดกระจก | ความแตกต่างของอุณหภูมิของผิวกระจกด้านนอก/ใน | สัดส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิช่องอากาศเข้า/ออกเปรียบเทียบกับของกระจก 3 มม.ใส | ค่า SC |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **6ข+6ส Low-e TC** | **4.70 ºC** | **-22.73%** | **0.53** |
| 2 | **6ข+A12+6ส PDLC** | 4.64 ºC | **-8.81%** | **0.69** |
| | 6ส+A12+6ข PDLC | **4.93 ºC** | -1.49% | 0.75 |
| 3 | **6ข+6ส PDLC** | **11.13 ºC** | **-15.75%** | **0.71** |
| | 6ส+6ข PDLC | 8.72 ºC | +16.88% | 0.90 |
| 4 | **6ข+6ส Low-e** | 0.82 ºC | **-26.33%** | **0.77** |
| | 6ส+6ข Low-e | **1.45 ºC** | -17.78% | 0.93 |
| 5 | **6ข+A12+6ส** | **13.96 ºC** | **-23.90%** | **0.81** |
| | 6ส+A12+6ข | 2.34 ºC | -21.46% | 0.86 |
| 6 | **6ข+6ส** | **7.50 ºC** | **-12.81%** | **0.88** |
| | 6ส+6ข | 4.14 ºC | -12.31% | 0.89 |
| 7 | **6ข+6ส TC** | **2.60 ºC** | **+33.33%** | **1.24** |

การสร้างชนิดกระจกใหม่ในโปรแกรม Visual DOE 4.1 ใช้ค่า U-value และ VLT จากผู้ผลิตกระจกแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2: ค่า SC, U-Value และ VLT ของกระจกทั้ง 7 ชนิด[2]

| | |
|---|---|
| **6ข+6ส Low-e TC** | |
| SC | 0.53 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 2.73 |
| VLT | 0.20 |
| **6ข+A12+6ส PDLC** | |
| SC | 0.69 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 2.83 |
| VLT | 0.53 |
| **6ข+6ส PDLC** | |
| SC | 0.71 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 5.50 |
| VLT | 0.58 |
| **6ข+6ส Low-e** | |
| SC | 0.77 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 3.97 |
| VLT | 0.55 |
| **6ข+A12+6ส** | |
| SC | 0.81 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 2.83 |
| VLT | 0.65 |
| **6ข+6ส** | |
| SC | 0.82 |
| U-Value (W/m$^2$K) | 5.50 |
| VLT | 0.70 |
| **6ข+6ส TC** | |
| SC | 1.24 **(1)** |
| U-Value (W/m$^2$K) | 4.93 **(24)** |
| VLT | 0.29 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[2] บริษัท เอสอาร์ แอดวานซ์อินดัสตรีส์ จำกัด และ AGC Flat Glass (Thailand) PLC.

ค่า SC ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ที่คำนวณได้ 1.24 นั้น ในการแทนค่าลงใน Visual DOE 4.1 ต้องใช้สมการ

RHG (W/$m^2$) = (SC x 637) + (U x 7.8)

โดย

RHG = Relative Heat Gain

SC = Shading Coefficient

U = U-Value

เมื่อแทนค่า SC ที่ได้จากการทดลอง และ U-Value จากผู้ผลิตกระจกเข้าในสมการ

RHG (W/$m^2$) = (1.24 x 637) + (4.93 x 7.8)

**RHG (W/$m^2$) = 828**

สำหรับโปรแกรม Visual DOE 4.1 การแทนค่า SC ต้องไม่เกิน 1.0 เมื่อแทนค่า SC นี้กลับเข้าในสมการ ได้ค่า U-Value ดังนี้

828 = (1.00 x 637) + (U x 7.8)

$$U = \frac{828 - (1.00 \times 637)}{7.8}$$

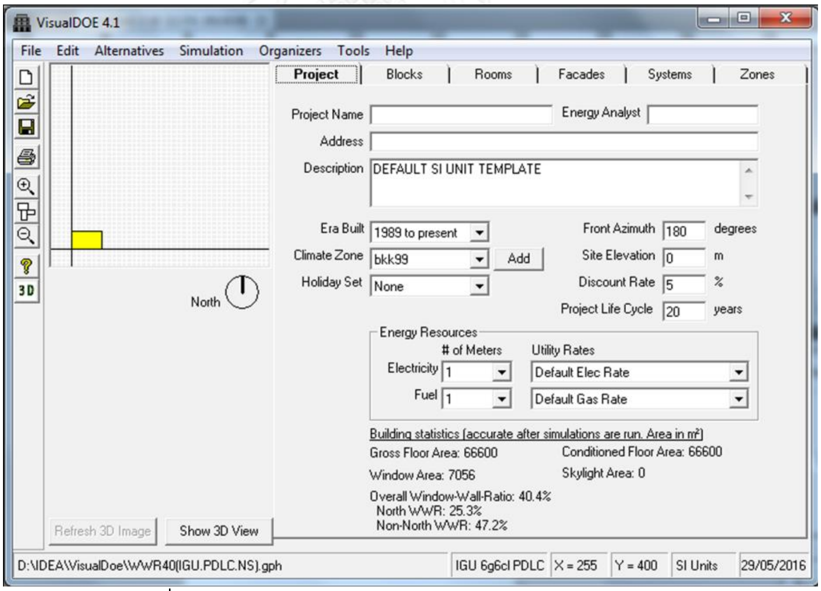
**U = 24 W/$m^2$**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 4.3 ผลการศึกษาวิจัยจากการจำลองอาคาร

### 4.3.1 กระจกกรณีศึกษา

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพของกระจกเทอร์โมโครมิก (TC), โพลิเมอร์-ดิสเพอร์สด์ ลิควิด คริสตัล (PDLC), และโลว์-อี (Low-e) การจำลองอาคารในโปรแกรม Visual DOE 4.1 จึงศึกษาเปรียบเทียบค่าพลังงานทำความเย็นเป็นหลัก มีกระจกลามิเนต 6ข+6ส เป็นกระจก base case อาคารที่จำลองเป็นอาคารสำนักงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดของอาคาร 37 x 60 เมตร สูง 30 ชั้น พื้นที่รวม 66,600 ตรม. (ณัฐภูมิ รับคำอินทร์, 2552) (ภาพที่ 4.37) เปิดเครื่องปรับอากาศและใช้งานช่วงกลางวันเป็นหลัก แบ่งลักษณะอาคารเพื่อการคำนวณโดยใช้สัดส่วนของหน้าต่างต่อพื้นที่ผิวอาคาร หรือ WWR เป็น 4 กรณี คือ WWR40 / WWR60 / WWR80 และ WWR100 หมุนอาคาร 4 ทิศ ได้แก่ ทิศเหนือ-ใต้ (NS), ตะวันออก-ตะวันตก (EW), ตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ (ES-NW) และตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ (NE-SW)




ภาพที่ 4.37: การจำลองอาคารในโปรแกรม Visual DOE 4.1

1. WWR40

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.38 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC อาคารจะใช้พลังงานทำความเย็นน้อยที่สุด รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส

PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ตามลำดับ และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารจะมีอัตราการใช้พลังงานในการทำความเย็นสูงที่สุด อาคารที่หันหน้าทิศ ES-NW และ NE-SW ต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 ทิศ

ตารางที่ 4.3: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) สำหรับอาคาร WWR40

| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข+6ส (base case) | ลามิเนต 6ข+6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 5,970,088 | 6,448,140 | 6,532,008 | 6,709,576 | 6,904,680 | 7,100,322 | 7,660,710 |
| EW | 6,155,269 | 6,735,660 | 6,834,230 | 7,067,694 | 7,317,764 | 7,544,254 | 8,172,100 |
| ES-NW | 6,447,049 | 7,204,696 | 7,336,928 | 7,622,162 | 7,924,224 | 8,206,896 | 8,865,290 |
| NE-SW | 6,413,419 | 7,133,991 | 7,263,055 | 7,545,532 | 7,830,720 | 8,114,467 | 8,787,173 |

ภาพที่ 4.38: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40

จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานการทำความเย็นของกระจกทั้ง 6 ชนิดกับกระจก base case ลามิเนต 6ข+6ส (ตารางที่ 4.4) สำหรับอาคาร WWR40 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส สามารถลดพลังงานทำความเย็นได้มากที่สุด (15.92% - 20.96%) รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC (9.19% - 12.08%) และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC (8% - 10.49%) และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วย

กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารต้องใช้พลังงานในการทำความเย็นมากกว่ากระจกลามิเนต 6ข+6ส (7.89% – 8.29%)

ตารางที่ 4.4: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR40

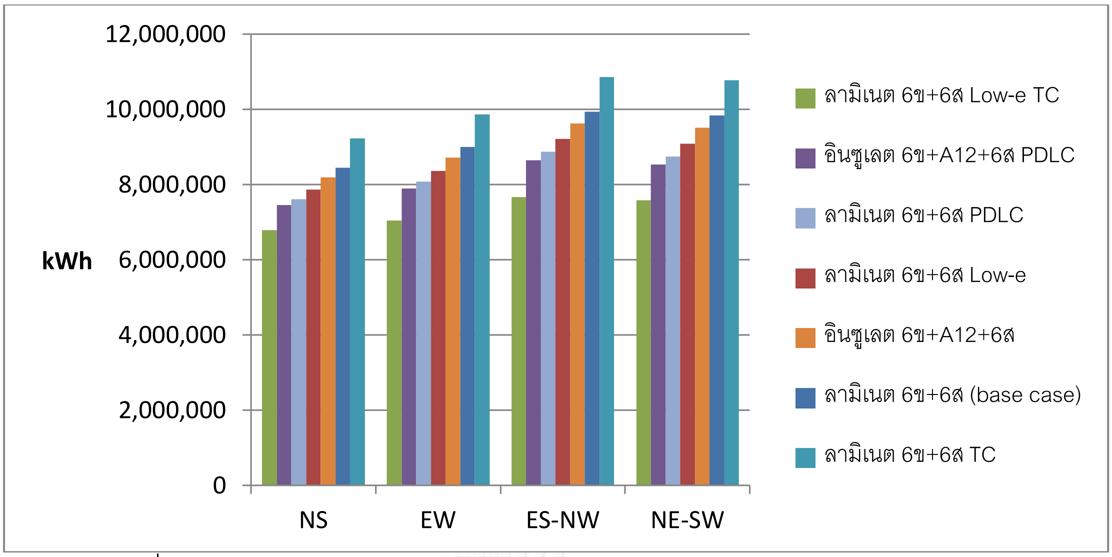
| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข + 6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข + A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข + 6ส PDLC | ลามิเนต 6ข + 6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข + 6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 15.92% | 9.19% | 8.00% | 5.50% | 2.76% | -7.89% |
| EW | 18.41% | 10.72% | 9.41% | 6.32% | 3.00% | -8.32% |
| ES-NW | 21.44% | 12.21% | 10.60% | 7.12% | 3.44% | -8.02% |
| NE-SW | 20.96% | 12.08% | 10.49% | 7.01% | 3.50% | -8.29% |

2. WWR60

ผลการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของอาคาร WWR60 เป็นเช่นเดียวกับผลที่ได้ของอาคาร WWR40 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC อาคารจะใช้พลังงานทำความเย็นน้อยที่สุด รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ตามลำดับ และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารจะมีอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นมากที่สุด อาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW ต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันหน้าอีก 2 ทิศ (ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.39)

ตารางที่ 4.5: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR60

| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข+6ส (base case) | ลามิเนต 6ข+6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 6,782,990 | 7,456,142 | 7,611,265 | 7,864,272 | 8,184,592 | 8,443,404 | 9,232,649 |
| EW | 7,045,282 | 7,898,286 | 8,078,032 | 8,362,943 | 8,716,913 | 9,004,299 | 9,868,633 |
| ES-NW | 7,667,906 | 8,648,912 | 8,876,803 | 9,215,440 | 9,627,214 | 9,936,793 | 10,857,260 |
| NE-SW | 7,584,036 | 8,528,806 | 8,748,361 | 9,088,971 | 9,509,016 | 9,836,851 | 10,771,810 |




ภาพที่ 4.39: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60

จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานการทำความเย็นของกระจกทั้ง 6 ชนิดกับกระจก base case ลามิเนต 6ข+6ส (ตารางที่ 4.6) ผลเป็นเช่นเดียวกับอาคาร WWR40 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส สามารถลดพลังงานทำความเย็นได้มากที่สุด (19.67% - 22.90%) รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC (11.69% - 13.30%) และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC (9.86% - 11.07%) และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่ากระจกลามิเนต 6ข+6ส (9.35% – 9.50%)

ตารางที่ 4.6: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR60

| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข+6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 19.67% | 11.69% | 9.86% | 6.86% | 3.07% | -9.35% |
| EW | 21.76% | 12.28% | 10.29% | 7.12% | 3.19% | -9.60% |
| ES-NW | 22.83% | 12.96% | 10.67% | 7.26% | 3.12% | -9.26% |
| NE-SW | 22.90% | 13.30% | 11.07% | 7.60% | 3.33% | -9.50% |

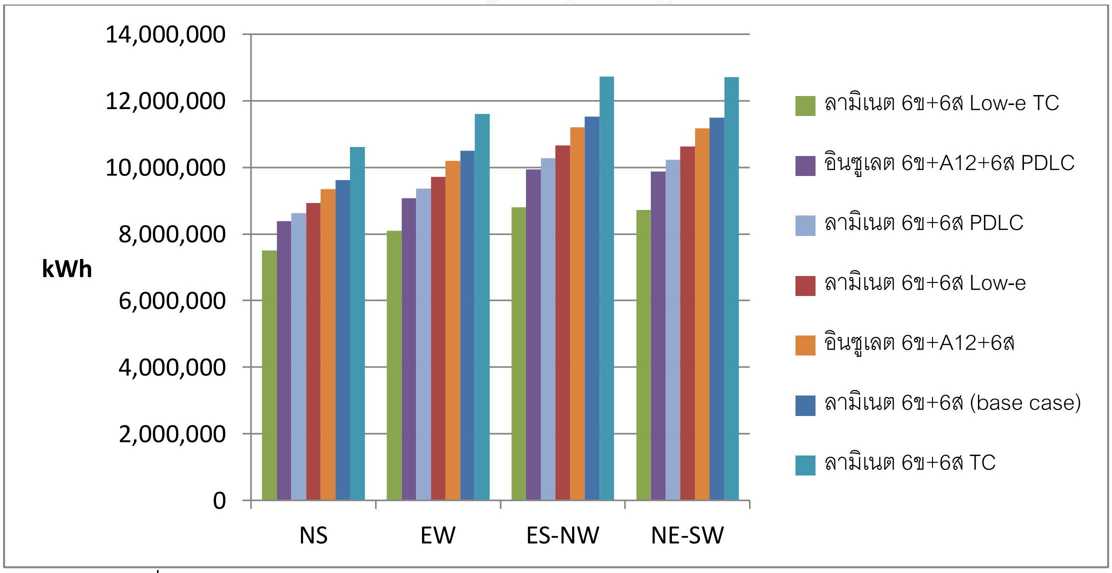
3. WWR80

ผลการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของอาคาร WWR80 เป็นเช่นเดียวกับผลที่ได้ของอาคาร WWR40 และ WWR60 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC อาคารจะใช้พลังงานทำความเย็นน้อยที่สุด รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และลามิเนต 6ข+6ส PDLC ตามลำดับ และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารจะมีอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นมากที่สุด อาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW ต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากว่าอาคารที่หันหน้าอีก 2 ทิศ (

ตารางที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.40)

ตารางที่ 4.7: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR80

| **ทิศของอาคาร** | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e TC | **อินซูเลต 6ข+A12+6ส** PDLC | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | **อินซูเลต 6ข+A12+6ส** | **ลามิเนต 6ข+6ส** (base case) | **ลามิเนต 6ข+6ส** TC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 7,505,358 | 8,378,664 | 8,625,947 | 8,933,986 | 9,347,422 | 9,614,885 | 10,614,300 |
| EW | 8,090,647 | 9,078,024 | 9,366,070 | 9,716,314 | 10,198,470 | 10,496,170 | 11,610,910 |
| ES-NW | 8,807,039 | 9,933,921 | 10,276,340 | 10,667,130 | 11,207,210 | 11,531,820 | 12,723,000 |
| NE-SW | 8,717,312 | 9,882,047 | 10,220,110 | 10,623,120 | 11,164,930 | 11,492,980 | 12,704,020 |




ภาพที่ 4.40: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80

จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานการทำความเย็นของกระจกทั้ง 6 ชนิดกับกระจก base case ลามิเนต 6ข+6ส (ตารางที่ 4.8) ผลเป็นเช่นเดียวกับอาคาร WWR40 และ WWR60 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส สามารถลดพลังงานทำความเย็นได้มากที่สุด (21.94% - 24.15%) รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6 ข+A12+6ส PDLC (12.86% - 14.02%) และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC (10.29% - 11.08%) และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่ากระจกลามิเนต 6ข+6ส (10.39% – 10.54%)

ตารางที่ 4.8: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6 ข+6ส (base case) อาคาร WWR80

| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข+6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 21.94% | 12.86% | 10.29% | 7.08% | 2.78% | -10.39% |
| EW | 22.92% | 13.51% | 10.77% | 7.43% | 2.84% | -10.62% |
| ES-NW | 23.63% | 13.86% | 10.89% | 7.50% | 2.81% | -10.33% |
| NE-SW | 24.15% | 14.02% | 11.08% | 7.57% | 2.85% | -10.54% |

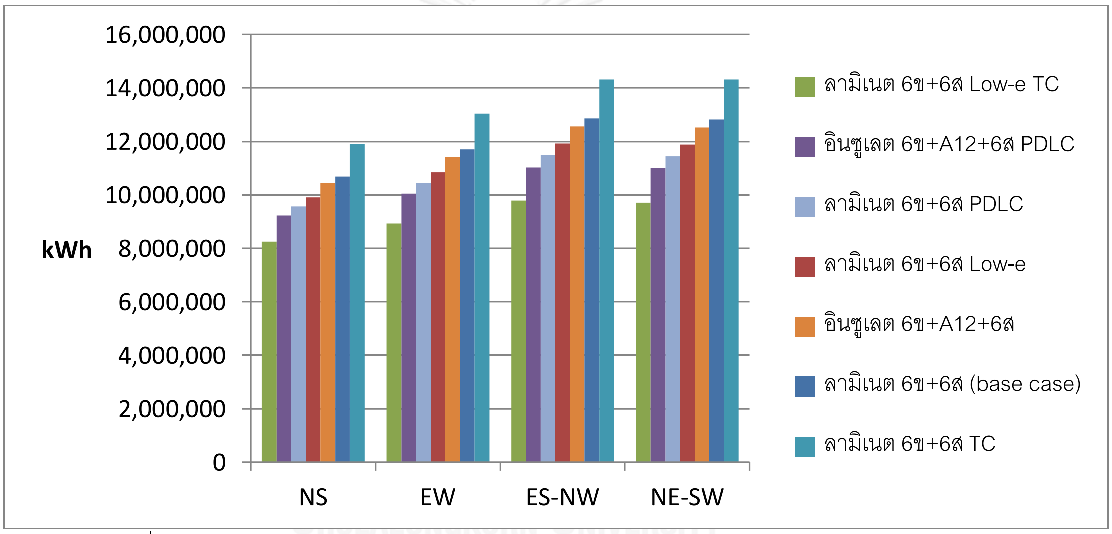
4. WWR100

ผลการเปรียบเทียบอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นของอาคาร WWR100 เป็นเช่นเดียวกับผลที่ได้ของอาคาร WWR40, WWR60 และ WWR80 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC อาคารจะใช้พลังงานทำความเย็นน้อยที่สุด รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และลามิเนต 6ข+6ส PDLC ตามลำดับ และการติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารจะมีอัตราการใช้พลังงานทำความเย็นมากที่สุด อาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW ต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันหน้าอีก 2 ทิศ (ตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.41)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.9: จำนวนหน่วยการใช้พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) อาคาร WWR100

| ทิศของอาคาร | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC | อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส PDLC | ลามิเนต 6ข+6ส Low-e | อินซูเลต 6ข+A12+6ส | ลามิเนต 6ข+6ส (base case) | ลามิเนต 6ข+6ส TC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 8,247,757 | 9,224,964 | 9,560,644 | 9,897,453 | 10,436,810 | 10,680,420 | 11,891,500 |
| EW | 8,931,158 | 10,051,640 | 10,447,020 | 10,835,410 | 11,426,850 | 11,706,720 | 13,046,190 |
| ES-NW | 9,778,184 | 11,032,060 | 11,491,080 | 11,918,030 | 12,566,340 | 12,857,010 | 14,311,370 |
| NE-SW | 9,713,969 | 11,002,610 | 11,441,360 | 11,870,800 | 12,522,480 | 12,825,490 | 14,306,970 |




ภาพที่ 4.41: การใช้พลังงานทำความเย็นต่อปี (kWh) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100

จากการเปรียบเทียบการใช้พลังงานการทำความเย็นของกระจกทั้ง 6 ชนิดกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส base case (ตารางที่ 4.10) ผลเป็นเช่นเดียวกับอาคาร WWR40, WWR60 และ WWR80 การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส สามารถลดพลังงานทำความเย็นได้มากที่สุด (22.78% - 24.26%) รองลงมาคือกระจก อินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC (13.63% - 14.21%) และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC (10.48% - 10.79%) การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC อาคารต้องใช้พลังงานทำความเย็นมากกว่ากระจกลามิเนต 6ข+6ส (11.34% – 11.55%)

ตารางที่ 4.10: สัดส่วนการประหยัดพลังงานการทำความเย็น/ปีระหว่างกระจกกรณีศึกษาและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR100

| **ทิศของอาคาร** | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e TC | **อินซูเลต 6ข+A12+6ส** PDLC | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | **อินซูเลต** 6ข+A12+6ส | **ลามิเนต 6ข+6ส** TC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NS | 22.78% | 13.63% | 10.48% | 7.33% | 2.28% | -11.34% |
| EW | 23.71% | 14.14% | 10.76% | 7.44% | 2.39% | -11.44% |
| ES-NW | 23.95% | 14.19% | 10.62% | 7.30% | 2.26% | -11.31% |
| NE-SW | 24.26% | 14.21% | 10.79% | 7.44% | 2.36% | -11.55% |

จากการคำนวณสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็นของกระจกกรณีศึกษาเปรียบเทียบกับของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) ของอาคารที่หันหน้าทั้ง 4 ทิศ เรียงลำดับกระจกที่ประหยัดพลังงานจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดได้ดังนี้

1. กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC
2. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC
3. กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC
4. กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e
5. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส

กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC เป็นกระจกที่ไม่ประหยัดพลังงานทำความเย็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC

การเปลี่ยนมาใช้หน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) สามารถลดสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็น 15.92% - 24.26% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.07% - 0.31% (ยกเว้น WWR40 อาคารที่หันทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NE-SW 0.48%) อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ EW 0.55% - 2.55% และอาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NS 1.48% - 5.05% อาคาร WWR80 และ WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุดในสัดส่วนใกล้เคียงกัน 21.94% - 24.26% รองลงมาคืออาคาร WWR 60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น

19.67% - 22.90% และ อาคาร WWR 40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 15.92% - 21.44%

2. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC

การเปลี่ยนมาใช้หน้าต่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) สามารถลดสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็น 9.19% - 14.21% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.02% - 0.34% (ยกเว้น WWR40 อาคารที่หันทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NE-SW 0.13%) อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ EW 0.08% - 1.37% และอาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NS 0.59% - 2.90% อาคาร WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 13.63% - 14.21% รองลงมาคืออาคาร WWR 80 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 12.86% - 14.02% อาคาร WWR 60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 11.69% - 13.30% และ อาคาร WWR 40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 9.19% - 12.21%

3. กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC

การเปลี่ยนมาใช้หน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) สามารถลดสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็น 8.00% - 11.08% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.17% - 0.40% (ยกเว้น WWR40 อาคารที่หันทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NE-SW 0.11%) อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ EW 0.03% - 1.08% และอาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NS 0.31% - 2.49% อาคาร WWR80 และ WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุดในสัดส่วนใกล้เคียงกัน 10.29% - 11.08% รองลงมาคืออาคาร WWR 60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 9.86% - 11.07% และอาคาร WWR 40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.00% - 10.60%

4. กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e

การเปลี่ยนมาใช้หน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) สามารถลดสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็น 5.50% - 7.60% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.07% - 0.34% (ยกเว้น WWR40 อาคารที่หันทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NE-SW 0.11%) อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ EW 0.14% - 0.69% (ยกเว้น WWR100 อาคารที่หันทิศ NE-SW และ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเท่ากัน) และอาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NS 0.11% - 1.51% อาคาร WWR 60, WWR80 และ WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นใกล้เคียงกัน 6.32% - 7.60% และอาคาร WWR 40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 5.50% - 7.12%

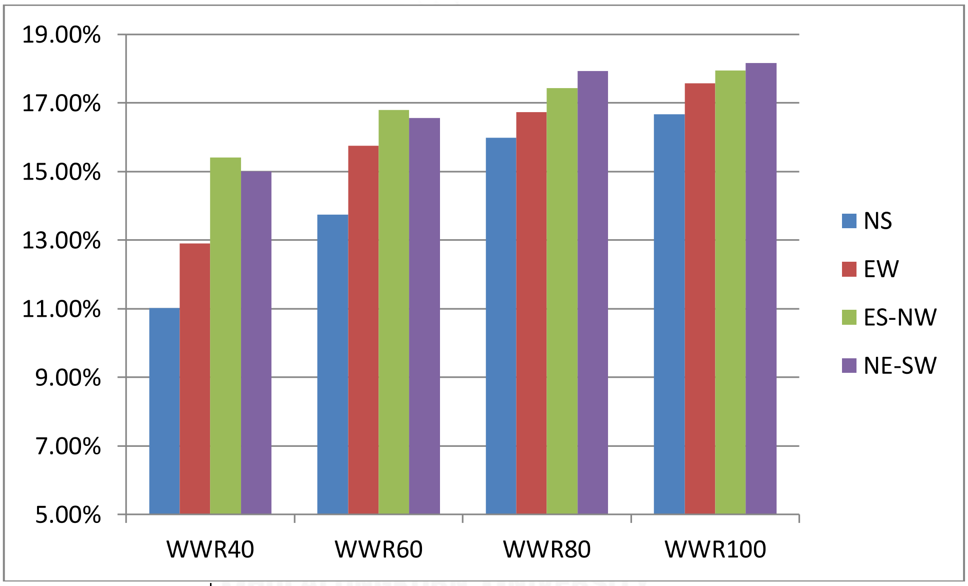
5. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส

การเปลี่ยนมาใช้หน้าต่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) สามารถลดสัดส่วนการใช้พลังงานทำความเย็น 2.26% - 3.50% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.04% - 0.22% อาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ EW 0.02% - 0.49% (ยกเว้น WWR100 อาคารที่หันทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าทิศ NE-SW 0.03%) และอาคารที่หันทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าอาคารที่หันทิศ NS 0.08% - 1.74% อาคาร WWR40 และ WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุดในสัดส่วนใกล้เคียงกัน 2.76% - 3.33% อาคาร WWR80 และ WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นใกล้เคียงกัน 2.26% - 2.85%

ภาพที่ 4.42 แสดงสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e อาคาร WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 16.67% - 18.17% WWR80 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 15.99% - 17.94% WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 13.75% - 16.79% และ WWR40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 11.02%

- 15.42% อาคาร WWR40 และ WWR60 เป็นอาคารที่มีพื้นที่หน้าต่างไม่มาก อิทธิพลของทิศทางของอาคารจึงมีมากกว่าอิทธิพลจากดวงอาทิตย์ อาคารที่หันทิศ ES-NW จึงส่งผลให้ประหยัดพลังงานมากกว่าทิศ NE-SW

ทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e มากที่สุด 15.00% - 18.17% ทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 15.42% - 17.95% ทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 12.91% - 17.57% และทิศ NS มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 11.02% - 16.67%

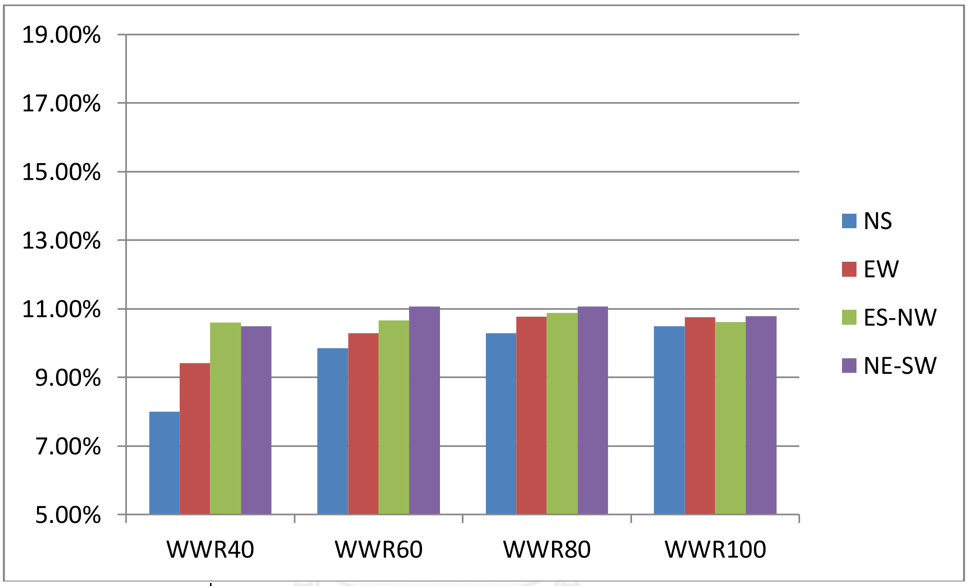



ภาพที่ 4.42: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น
เมื่อติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e

ภาพที่ 4.43 แสดงสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR100 และ WWR80 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 10.29% - 11.08% WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 9.86% - 11.07% และ WWR40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.00% - 10.60% และเช่นเดียวกับอาคารที่ติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC อาคาร WWR40 เป็นอาคารที่มีพื้นที่หน้าต่างไม่มาก อิทธิพลจากทิศทางของอาคารจึงมีมากกว่าอิทธิพลจากดวงอาทิตย์ อาคารที่หันทิศ ES-NW จึงส่งผลให้ประหยัดพลังงานมากกว่าทิศ NE-SW

และสำหรับอาคาร WWR100 ทิศทางของอาคารด้าน EW และ NE-SW ซึ่งหันด้านยาวของอาคารไปทางตะวันตก มีการประหยัดพลังงานมากกว่าอีก 2 ทิศ

ทิศ ES-NW และ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส มากที่สุดในสัดส่วนใกล้เคียงกัน 10.49% - 11.08% ทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 9.41% - 10.77% และทิศ NS มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.00% - 10.48%

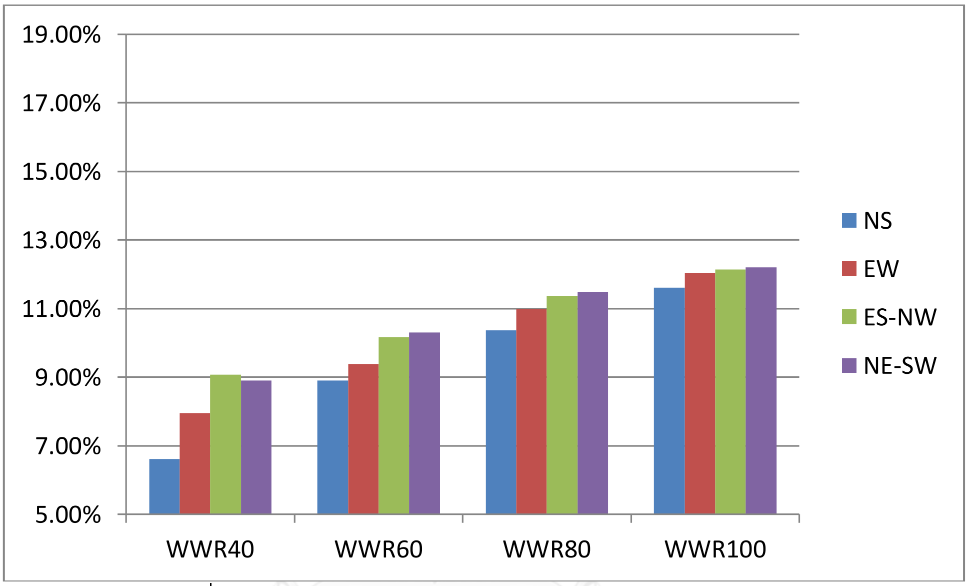



ภาพที่ 4.43: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น
เมื่อติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.44 แสดงสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส อาคาร WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 11.61% - 12.21% WWR80 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 10.36% - 11.49% WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.90% - 10.31% และ WWR40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 6.61% - 9.08% และเช่นเดียวกับอาคารที่ติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC อาคาร WWR40 เป็นอาคารที่มีพื้นที่หน้าต่างไม่มาก อิทธิพลจากทิศทางของอาคารจึงมีมากกว่าอิทธิพลจากดวงอาทิตย์ อาคารที่หันทิศ ES-NW จึงส่งผลให้ประหยัดพลังงานมากกว่าทิศ NE-SW และสำหรับอาคาร WWR100 ทิศทางของอาคารด้าน EW และ NE-SW ซึ่งหันด้านยาวของอาคารไปทางตะวันตก มีการประหยัดพลังงานมากกว่าอีก 2 ทิศ

ทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มากที่สุด 9.08% - 12.21% ทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 8.90% - 12.14% ทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 7.95% - 12.03% และทิศ NS มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น 6.61% - 11.61%




ภาพที่ 4.44: เปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็น
เมื่อติดตั้งกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส

### 4.3.2 บานหน้าต่างกระจกพร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ

งานวิจัยในส่วนนี้ เลือกใช้ม่านบังแดดระบบอัตโนมัติเพื่อให้มีคุณสมบัติเทียบเท่ากับกระจก TC และกระจก PDLC ในการเปลี่ยนความโปร่งแสงของบานหน้าต่างจากการควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสภาพแวดล้อม และเปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นระหว่างการติดตั้งกระจกลามิเนต Low-e TC หรือกระจกลามิเนต/อินซูเลต PDLC และการติดตั้งกระจกลามิเนต/อินซูเลตเขียว/ใสพร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ ภาพที่ 3.10 แสดงการตั้งค่าม่านบังแดดในโปรแกรม Visual DOE 4.1

การเปรียบเทียบกระจก แบ่งออกเป็น 3 คู่ ดังนี้

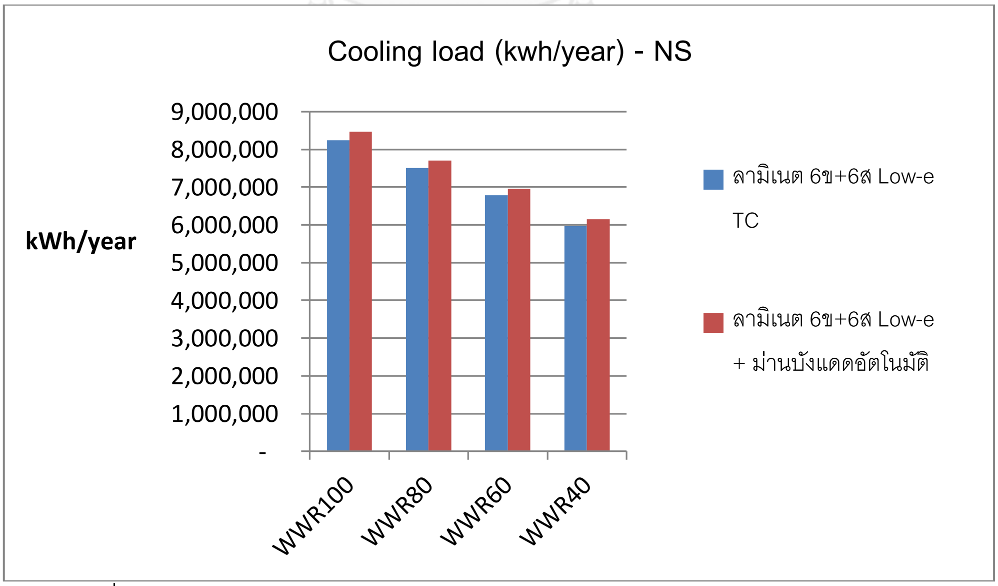
1. ลามิเนต 6ข+6ส *Low-e TC* VS. ลามิเนต 6ข+6ส *Low-e* + ***ม่านบังแดดอัตโนมัติ***
2. ลามิเนต 6ข+6ส *PDLC* VS. ลามิเนต 6ข+6ส **+ *ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

3. อินซูเลต 6ข+A12+6ส *PDLC* VS. อินซูเลต 6ข+A12+6ส + ***ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

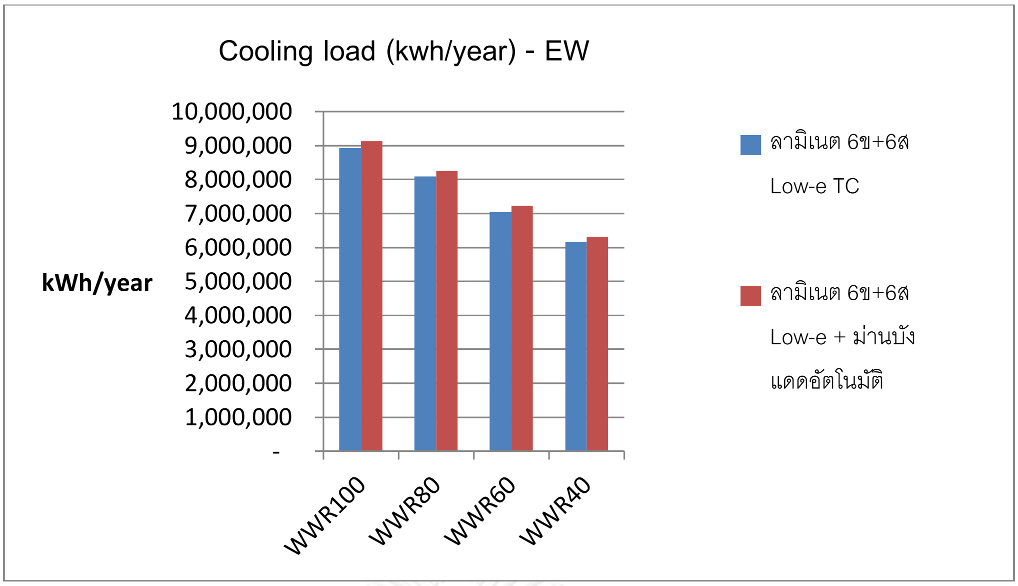
1. กระจกลามิเนต 6ข+6ส *Low-e TC* VS. กระจกลามิเนต 6ข+6ส *Low-e* **+ *ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

การเปรียบเทียบชุดหน้าต่างกระจกคู่นี้ เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานทำความเย็นของการผลิตกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e ให้เป็นกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC เปรียบเทียบกับการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติภายในอาคาร

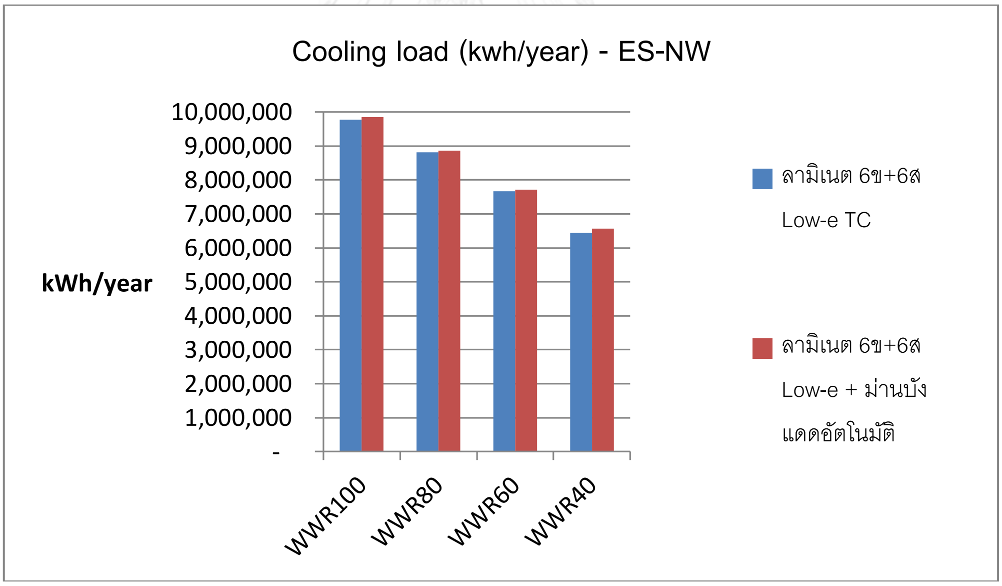
อาคาร WWR ทุกกรณี การผลิตกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e ให้เป็นกระจกลามิเนต 6 ข+6ส Low-e TC สามารถประหยัดพลังงานทำความเย็นได้มากกว่าการติดตั้งกระจกลามิเนต 6 ข+6ส Low-e พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติภายในอาคาร (ภาพที่ 4.45 - ภาพที่ 4.48) ทิศ NS ประหยัดพลังงานมากกว่าในอัตราที่สูงกว่าทิศอื่นๆ 2.65% - 2.98% รองลงมาคือทิศ EW 1.92% - 2.57% ทิศ NE-SW 0.50% - 1.84% และทิศ ES-NW 0.56% - 1.79% การติดตั้งม่านบังแดดอัตโนมัติภายในอาคาร ไม่ได้ลดการถ่ายเทความร้อนจากตัวกระจกเข้าสู่ภายในอาคาร แต่การใช้เทคโนโลยี TC ในการผลิตกระจกลามิเนต ส่งผลให้กระจกกันความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์เมื่อกระจกเปลี่ยนเป็นสีเข้มขึ้น และการเคลือบกระจกลามิเนตด้วยสาร Low-e มีผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อกระจกไม่ให้เข้าสู่ภายในอาคาร



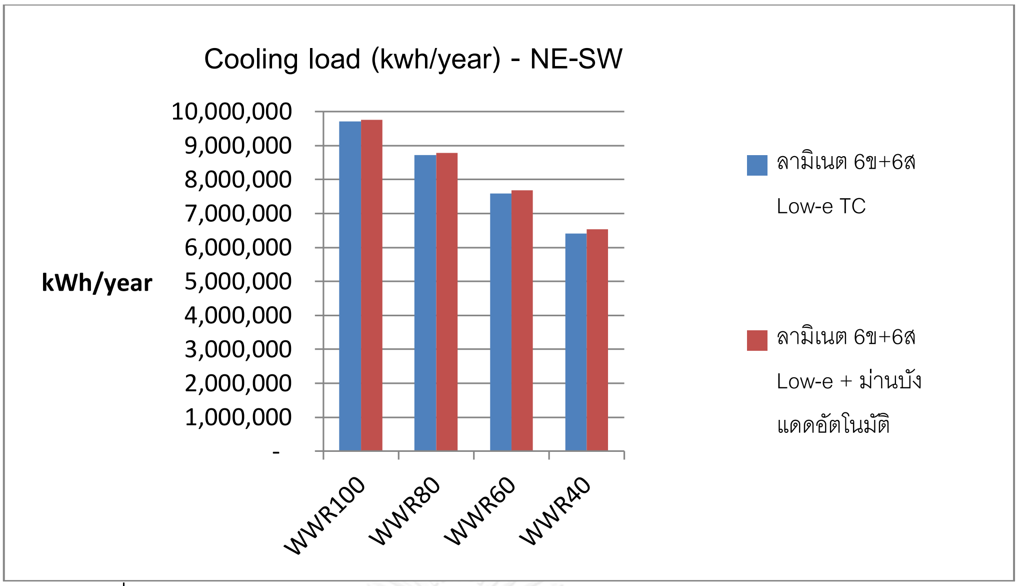

ภาพที่ 4.45: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NS




ภาพที่ 4.46: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ EW




ภาพที่ 4.47: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ ES-NW

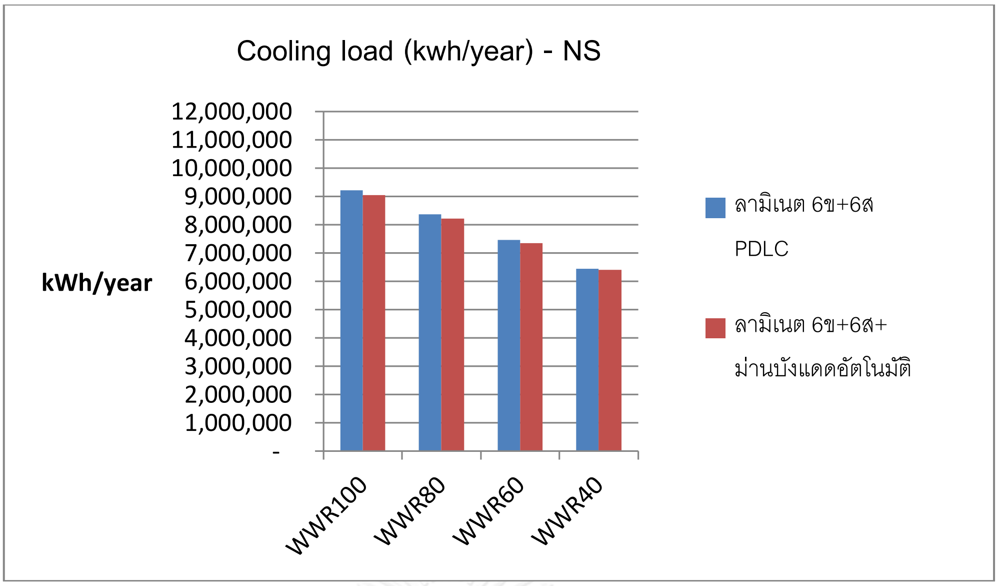



ภาพที่ 4.48: พลังงานการทำความเย็น kWh/ปี ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NE-SW

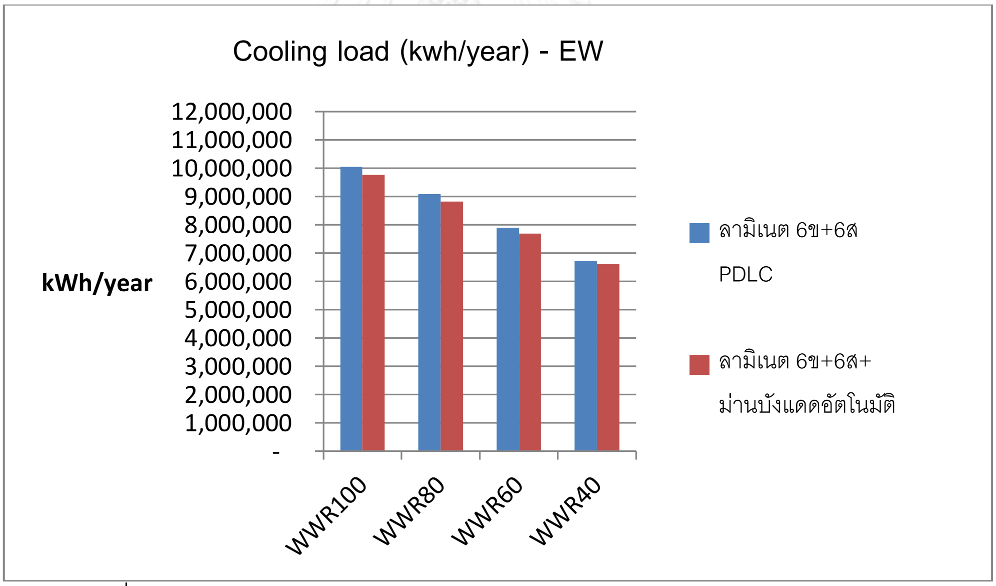
2. กระจกลามิเนต 6ข+6ส ***PDLC*** VS. กระจกลามิเนต 6ข+6ส **+ *ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

การเปรียบเทียบชุดหน้าต่างกระจกคู่นี้ เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานทำความเย็นของการผลิตกระจกลามิเนต 6ข+6ส ให้เป็นกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC เปรียบเทียบกับการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติภายในอาคาร

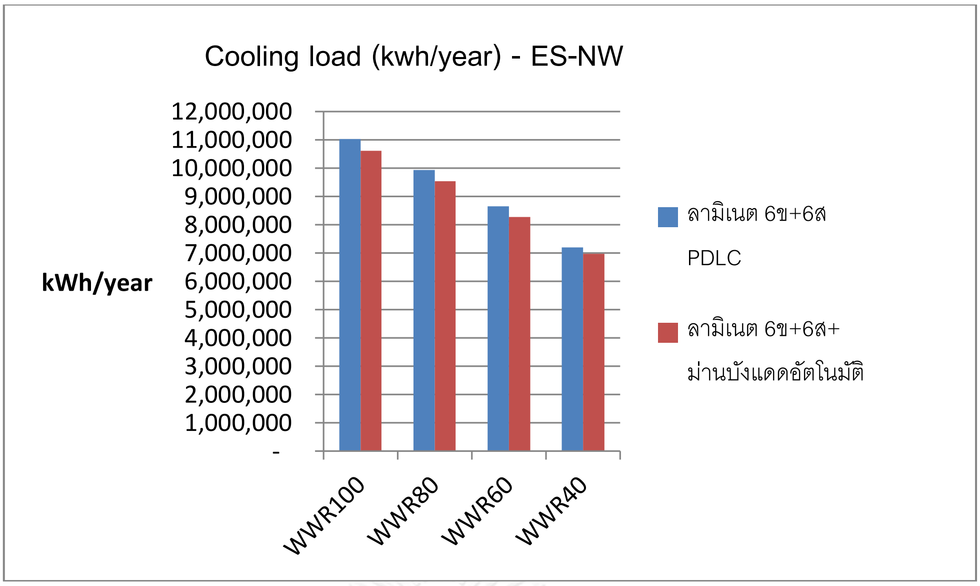
อาคาร WWR ทุกกรณี การติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ ส่งผลให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานทำความเย็นได้มากกว่าการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC (ภาพที่ 4.49 - ภาพที่ 4.52) ทิศ NE-SW และ ES-NW กระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติประหยัดพลังงานมากกว่ากระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ในอัตรามากที่สุด 2.98% - 4.43% และ 3.21% - 4.31% ตามลำดับ รองลงมาคือทิศ EW 1.65% - 2.84% และทิศ NS 0.67% - 2.00%



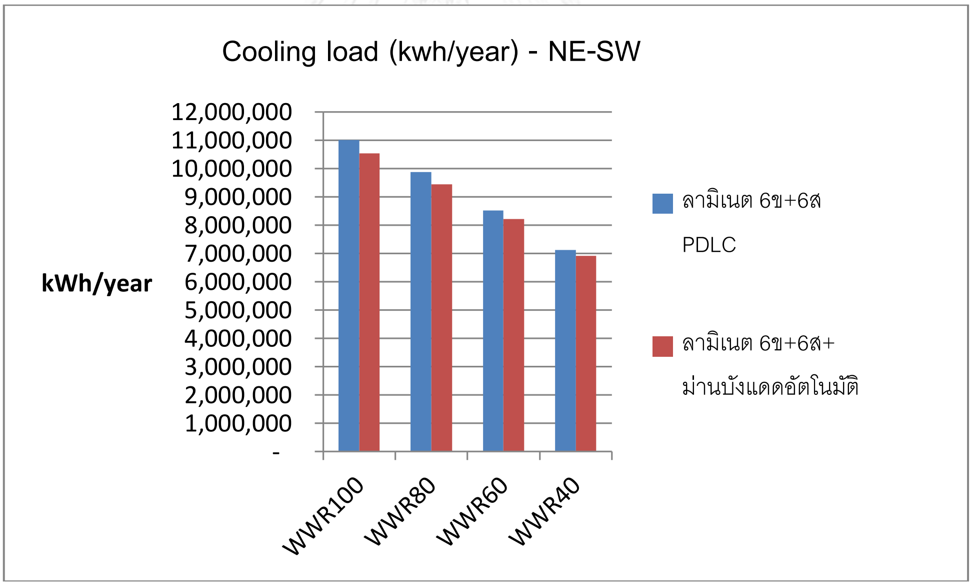

ภาพที่ 4.49: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NS




ภาพที่ 4.50: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ EW




ภาพที่ 4.51: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ ES-NW

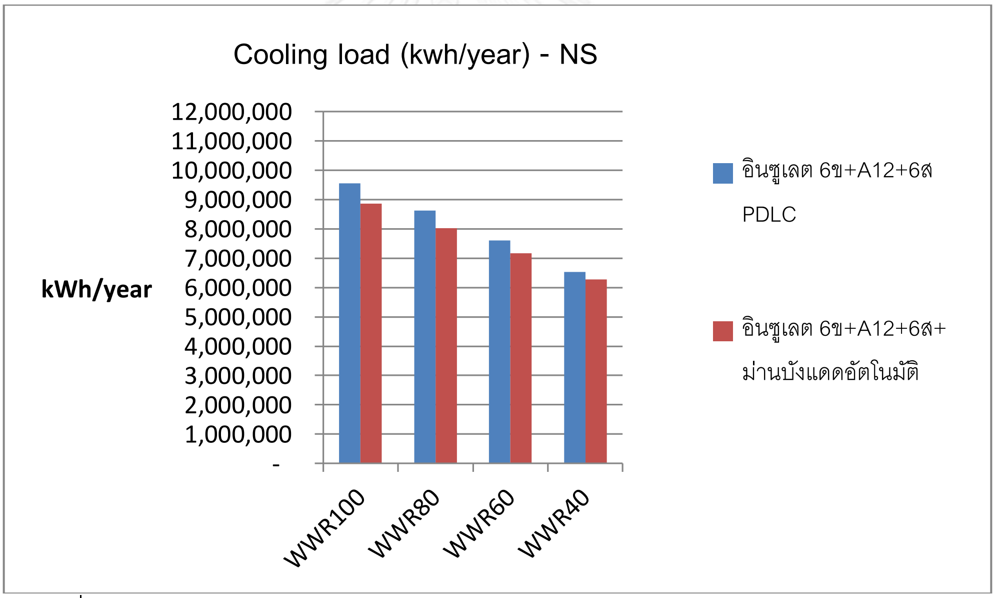



ภาพที่ 4.52: พลังงานการทำความเย็น (kWh/ปี) ระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NE-SW

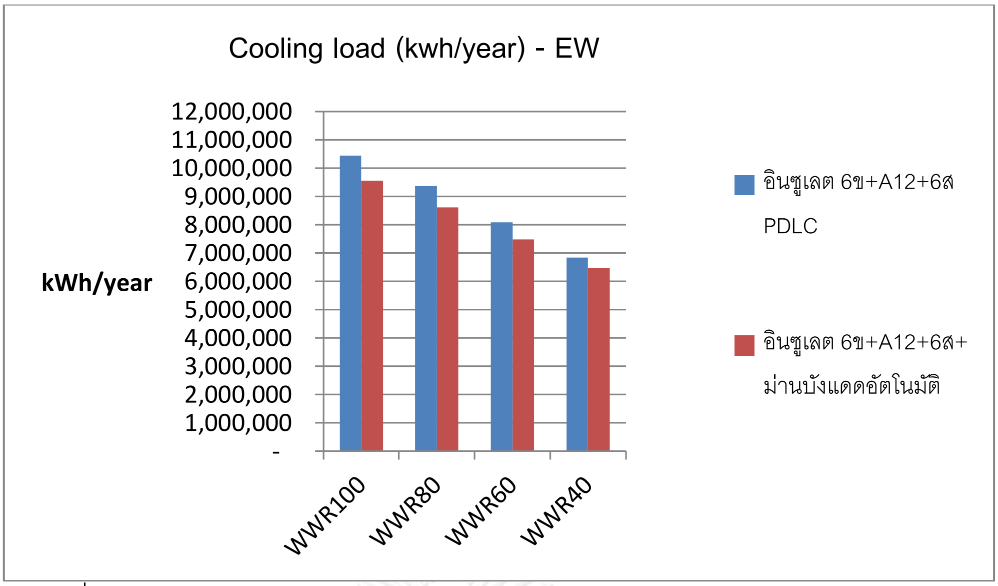
3. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส *PDLC* VS. กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+***ม่านบังแดดอัตโนมัติ***

การเปรียบเทียบชุดหน้าต่างกระจกคู่นี้ เพื่อศึกษาการประหยัดพลังงานทำความเย็นของการผลิตกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส ให้เป็นกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC เปรียบเทียบกับการติดตั้งกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติภายในอาคาร

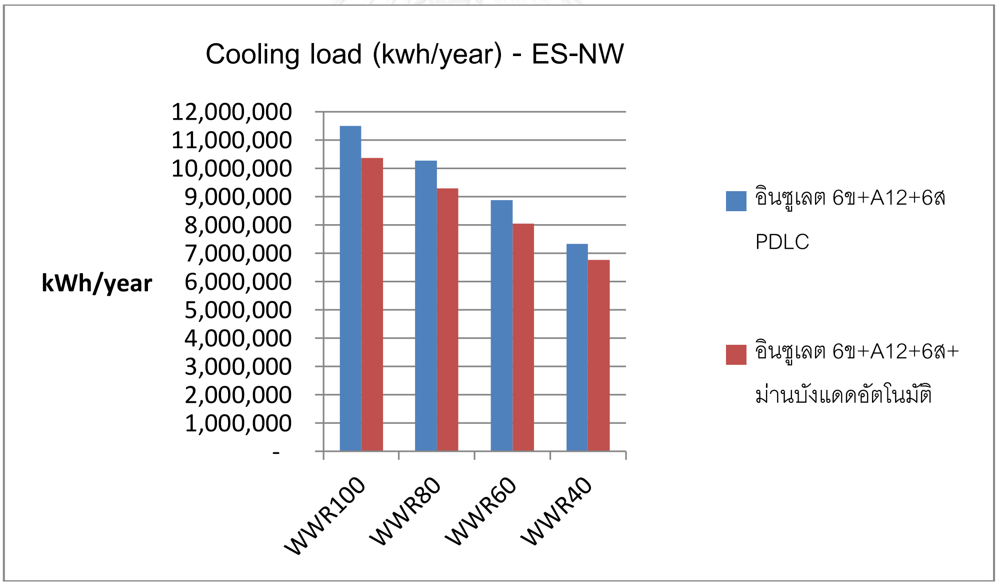
อาคาร WWR ทุกกรณี การติดตั้งกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ ส่งผลให้อาคารสามารถประหยัดพลังงานทำความเย็นได้มากกว่าการติดตั้งกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC (ภาพที่ 4.53 - ภาพที่ 4.56) ทิศ NE-SW และ ES-NW กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติประหยัดพลังงานมากกว่ากระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ในอัตรามากที่สุด คือ 7.75% - 9.72% และ 7.41% - 9.99% ตามลำดับ รองลงมาคือทิศ EW 5.43% - 8.56% และทิศ NS 3.95% - 7.25%



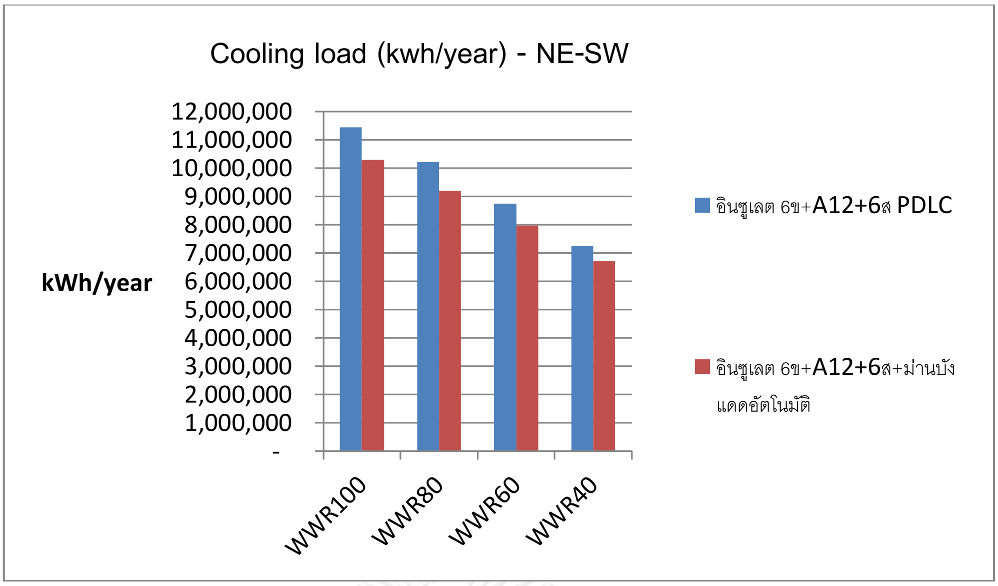

ภาพที่ 4.53: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NS




ภาพที่ 4.54: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ EW




ภาพที่ 4.55: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ ES-NW




ภาพที่ 4.56: พลังงานการทำความเย็นต่อปี (kWh) ระหว่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส+ม่านบังแดดอัตโนมัติ อาคารหันทิศ NE-SW

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## 4.4 การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์

วิเคราะห์จากจำนวนเงินลงทุนที่เพิ่มขึ้นจากการเปลี่ยนมาติดตั้งหน้าต่างด้วยกระจกกรณีศึกษา แทนการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) เปรียบเทียบกับค่าไฟที่ประหยัดได้ต่อปี และหาอัตราการคุ้มทุนด้วยวิธีการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback period –PB) ระยะเวลาคุ้มทุนไม่เกิน 10 ปี[3] กรณีที่กระจกศึกษามี PB ไม่คุ้มการลงทุน ผู้วิจัยจะคำนวณหาราคากระจกที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดปัจจุบัน โดยใช้วิธีคำนวณอัตราการตอบแทนภายใน (Internal rate of return – IRR) คำนวณราคาขั้นต้นที่ทำให้อัตราคิดลดอยู่ที่ประมาณ 7.5% เพื่อให้มี PB 10 ปี

การเปรียบเทียบระยะเวลาคุ้มทุน แบ่งเป็น 2 ลำดับ 1.การเปรียบเทียบความคุ้มทุนระหว่างกระจกกรณีศึกษาทั้ง 6 ชนิดและกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) 2. การเปรียบเทียบความคุ้มทุนของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC กับกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านอัตโนมัติ

4.4.1 การเปรียบเทียบความคุ้มทุนของกระจกกรณีศึกษาทั้ง 6 ชนิด

การคำนวณต้นทุนของกระจก อ้างอิงราคาจากตัวแทนจำหน่ายสินค้า (ตารางที่ 4.11) และพื้นที่กระจกของอาคาร ไม่รวมค่าเฟรมหน้าต่างและค่าแรงการติดตั้ง จากนั้นนำต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากต้นทุนของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) เปรียบเทียบกับค่าไฟต่อปีที่ประหยัดได้จากการเปลี่ยนชนิดกระจก เพื่อหา PB

ตารางที่ 4.11: ราคาต่อตารางฟุตของกระจกแต่ละชนิด[4]

| | **ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC** | **อินซูเลต 6ข+ A12+6ส PDLC** | **ลามิเนต 6ข+6ส PDLC** | **ลามิเนต 6ข+6ส Low-e** | **อินซูเลต 6ข+ A12+6ส** | **ลามิเนต 6ข+6ส (base case)** | **ลามิเนต 6ข+6ส TC** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **บาท/ตรฟ.** | 2,576.00 | 690.00 | 675.00 | 192.00 | 150.00 | 135.00 | 2,520.00 |

[3] โครงการสินเชื่อประหยัดพลังงานของธนาคารกสิกรไทย

[4] บริษัท เอสอาร์ แอดวานซ์อินดัสตรีส์ จำกัด และ AGC Flat Glass (Thailand) PLC.

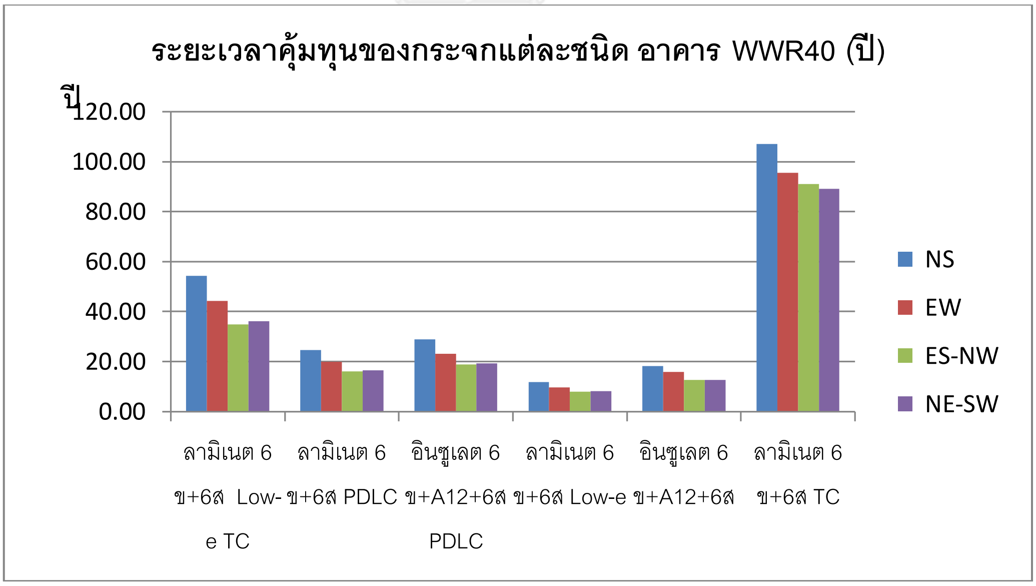
กระจก smart glass 3 ชนิดแรกของอาคาร WWR40 ที่มีอัตราการประหยัดไฟฟ้าในการทำความเย็นมากที่สุด มีระยะเวลาคุ้มทุนนานกว่า 10 ปีในทุกทิศของอาคาร กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีระยะเวลาคุ้มทุนนานที่สุด 34.8 – 54.2 ปี รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีระยะเวลาคุ้มทุนใกล้เคียงกัน 16 – 29 ปี กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มีระยะเวลาคุ้มทุน 12.6 – 18.2 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e มีอัตราการประหยัดพลังงานดีเป็นลำดับที่ 4 มีระยะเวลาคุ้มทุนสั้นที่สุด 7.8 – 11.7 ปี และอาคารที่หันในทิศ ES-NW และ NE-SW มีระยะเวลาคุ้มทุนสั้นกว่าทิศ NS และ EW (ตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.57)

ตารางที่ 4.12: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40

| | WWR40 | **เงินลงทุน** | **ทิศ** | **ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)** | **ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 13,531,639.68 | NS | 29,893,972.40 | base case |
| | | | EW | 31,762,792.94 | |
| | | | ES-NW | 34,552,316.97 | |
| | | | NE-SW | 34,163,218.61 | |
| 2 | **ลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC** | 258,203,731.97 | NS | 25,136,026.33 | 4,757,946.07 |
| | | | EW | 25,915,582.79 | 5,847,210.15 |
| | | | ES-NW | 27,143,889.06 | 7,408,427.92 |
| | | | NE-SW | 27,002,316.84 | 7,160,901.77 |
| 3 | **ลามิเนต 6ข+6ส PDLC** | 67,658,198.40 | NS | 27,148,481.84 | 2,745,490.57 |
| | | | EW | 28,358,854.78 | 3,403,938.16 |
| | | | ES-NW | 30,333,355.63 | 4,218,961.34 |
| | | | NE-SW | 30,035,708.79 | 4,127,509.82 |
| 4 | **ลามิเนต 6ข+6ส PDLC** | 69,161,713.92 | NS | 27,501,540.96 | 2,392,431.45 |
| | | | EW | 28,773,804.91 | 2,988,988.03 |
| | | | ES-NW | 30,890,012.68 | 3,662,304.29 |
| | | | NE-SW | 30,579,029.51 | 3,584,189.10 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | 19,244,998.66 | NS | 28,249,048.97 | 1,644,923.44 |
| | | | EW | 29,756,618.31 | 2,006,174.63 |
| | | | ES-NW | 32,090,762.25 | 2,461,554.72 |
| | | | NE-SW | 31,768,172.94 | 2,395,045.67 |
| 6 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 15,035,155.20 | NS | 29,070,378.28 | 823,594.13 |
| | | | EW | 30,809,337.99 | 953,454.95 |
| | | | ES-NW | 33,362,352.65 | 1,189,964.32 |
| | | | NE-SW | 32,968,728.86 | 1,194,489.75 |
| 7 | **ลามิเนต 6ข+6ส** TC | 252,590,607.36 | NS | 32,253,037.77 | -2,359,065.36 |
| | | | EW | 34,405,836.25 | -2,643,043.31 |
| | | | ES-NW | 37,323,958.19 | -2,771,641.22 |
| | | | NE-SW | 36,995,109.06 | -2,831,890.45 |




ภาพที่ 4.57: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR40

อาคาร WWR60 (ตารางที่ 4.13 และ

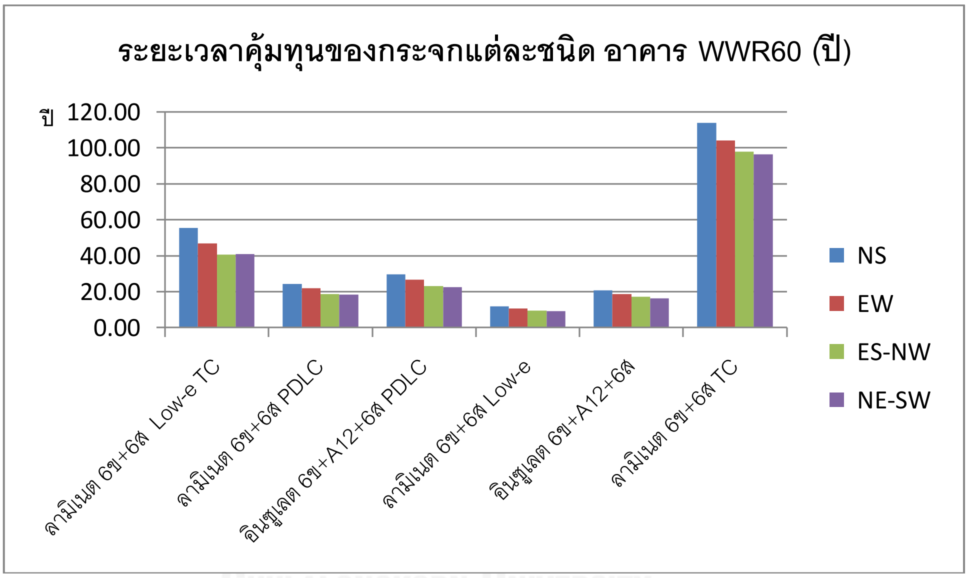
ภาพที่ 4.58) กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีระยะเวลาคุ้มทุนนานที่สุด 40.5 – 55.4 ปี กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มีระยะเวลาคุ้มทุนใกล้เคียงกัน 16.3 – 29.6 ปี และเช่นเดียวกับผลของอาคาร WWR40 กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e มีระยะเวลาคุ้มทุนที่น้อยที่สุด 9.2 – 11.8 ปี

ตารางที่ 4.13: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60

| | WWR60 | **เงินลงทุน** | **ทิศ** | **ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท)** | **ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 13,531,639.68 | NS | 29,893,972.40 | base case |
| | | | EW | 31,762,792.94 | |
| | | | ES-NW | 34,552,316.97 | |
| | | | NE-SW | 34,163,218.61 | |
| 2 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e TC | 258,203,731.97 | NS | 25,136,026.33 | 4,757,946.07 |
| | | | EW | 25,915,582.79 | 5,847,210.15 |
| | | | ES-NW | 27,143,889.06 | 7,408,427.92 |
| | | | NE-SW | 27,002,316.84 | 7,160,901.77 |
| 3 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 67,658,198.40 | NS | 27,148,481.84 | 2,745,490.57 |
| | | | EW | 28,358,854.78 | 3,403,938.16 |
| | | | ES-NW | 30,333,355.63 | 4,218,961.34 |
| | | | NE-SW | 30,035,708.79 | 4,127,509.82 |
| 4 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 69,161,713.92 | NS | 27,501,540.96 | 2,392,431.45 |
| | | | EW | 28,773,804.91 | 2,988,988.03 |
| | | | ES-NW | 30,890,012.68 | 3,662,304.29 |
| | | | NE-SW | 30,579,029.51 | 3,584,189.10 |
| 5 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | 19,244,998.66 | NS | 28,249,048.97 | 1,644,923.44 |
| | | | EW | 29,756,618.31 | 2,006,174.63 |
| | | | ES-NW | 32,090,762.25 | 2,461,554.72 |
| | | | NE-SW | 31,768,172.94 | 2,395,045.67 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 6 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 15,035,155.20 | NS | 29,070,378.28 | 823,594.13 |
| | | | EW | 30,809,337.99 | 953,454.95 |
| | | | ES-NW | 33,362,352.65 | 1,189,964.32 |
| | | | NE-SW | 32,968,728.86 | 1,194,489.75 |
| 7 | **ลามิเนต 6ข+6สTC** | 252,590,607.36 | NS | 32,253,037.77 | - 2,359,065.36 |
| | | | EW | 34,405,836.25 | - 2,643,043.31 |
| | | | ES-NW | 37,323,958.19 | - 2,771,641.22 |
| | | | NE-SW | 36,995,109.06 | - 2,831,890.45 |




CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ 4.58: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR60

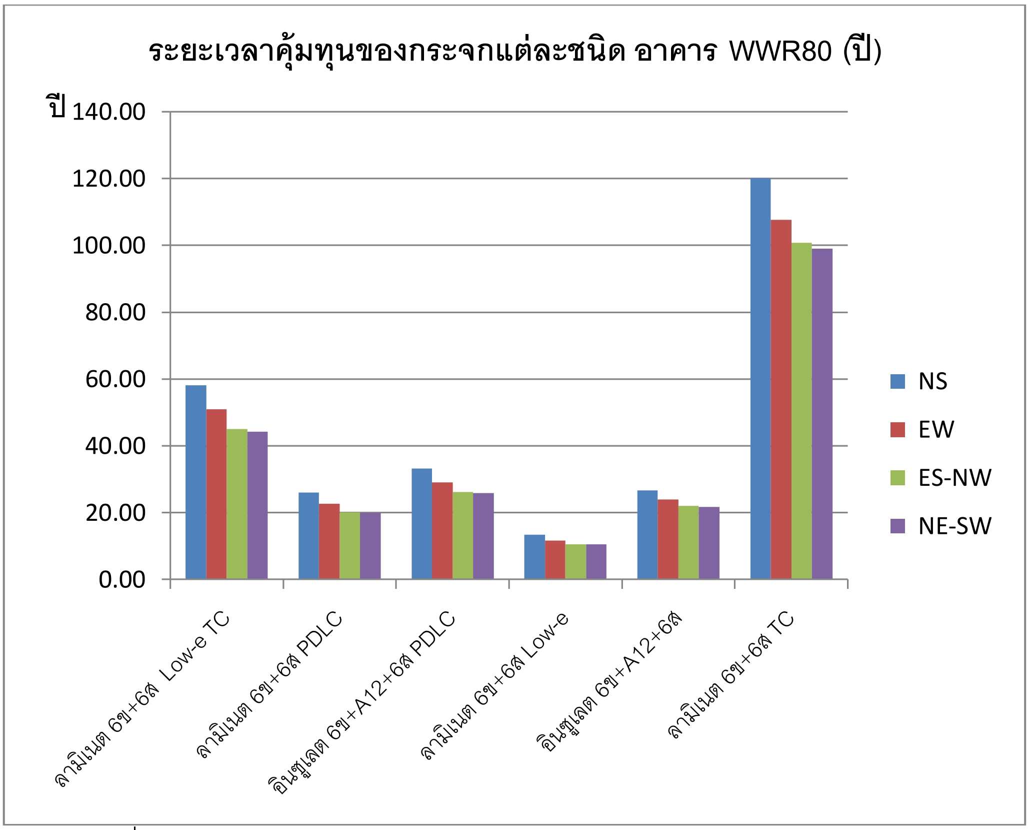
อาคาร WWR80 ไม่มีกระจกชนิดใดที่มีระยะคุ้มทุนภายใน 10 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีระยะเวลาคุ้มทุน 44 – 58 ปี และเช่นเดียวกับผลของอาคาร WWR60 กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มีระยะเวลาคุ้มทุนใกล้เคียงกัน (20 – 33 ปี) กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e มีระยะเวลาคุ้มทุนน้อยที่สุด 10.5 – 13.4 ปี (ตารางที่ 4.14 และ ภาพที่ 4.59)

ตารางที่ 4.14: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80

| | WWR80 | เงินลงทุน | ทิศ | ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท) | ค่าไฟที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 27,063,279.36 | NS | 40,479,528.26 | base case |
| | | | EW | 44,189,473.73 | |
| | | | ES-NW | 48,549,249.53 | |
| | | | NE-SW | 48,385,744.79 | |
| 2 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e TC | 516,407,463.94 | NS | 31,599,052.45 | 8,880,475.81 |
| | | | EW | 34,062,943.56 | 10,126,530.17 |
| | | | ES-NW | 37,078,738.96 | 11,470,510.58 |
| | | | NE-SW | 36,701,015.21 | 11,684,729.58 |
| 3 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 135,316,396.80 | NS | 35,275,408.72 | 5,204,119.54 |
| | | | EW | 38,219,504.51 | 5,969,969.22 |
| | | | ES-NW | 41,822,574.11 | 6,726,675.42 |
| | | | NE-SW | 41,604,200.14 | 6,781,544.65 |
| 4 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 138,323,427.84 | NS | 36,316,395.97 | 4,163,132.30 |
| | | | EW | 39,432,091.76 | 4,757,381.97 |
| | | | ES-NW | 43,264,055.38 | 5,285,194.16 |
| | | | NE-SW | 43,027,343.95 | 5,358,400.84 |
| 5 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | 38,489,997.31 | NS | 37,613,147.74 | 2,866,380.52 |
| | | | EW | 40,906,513.93 | 3,282,959.80 |
| | | | ES-NW | 44,909,164.04 | 3,640,085.49 |
| | | | NE-SW | 44,723,895.14 | 3,661,849.64 |
| 6 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 30,070,310.40 | NS | 39,353,589.27 | 1,125,938.99 |
| | | | EW | 42,936,246.04 | 1,253,227.69 |
| | | | ES-NW | 47,182,738.82 | 1,366,510.72 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | NE-SW | 47,004,752.70 | 1,380,992.09 |
| | **ลามิเนต 6ข+6ส** | | | | |
| 7 | TC | 505,181,214.72 | NS | 44,686,765.59 | - 4,207,237.33 |
| | | | EW | 48,882,194.71 | - 4,692,720.98 |
| | | | ES-NW | 53,563,759.98 | - 5,014,510.45 |
| | | | NE-SW | 53,483,859.87 | - 5,098,115.09 |



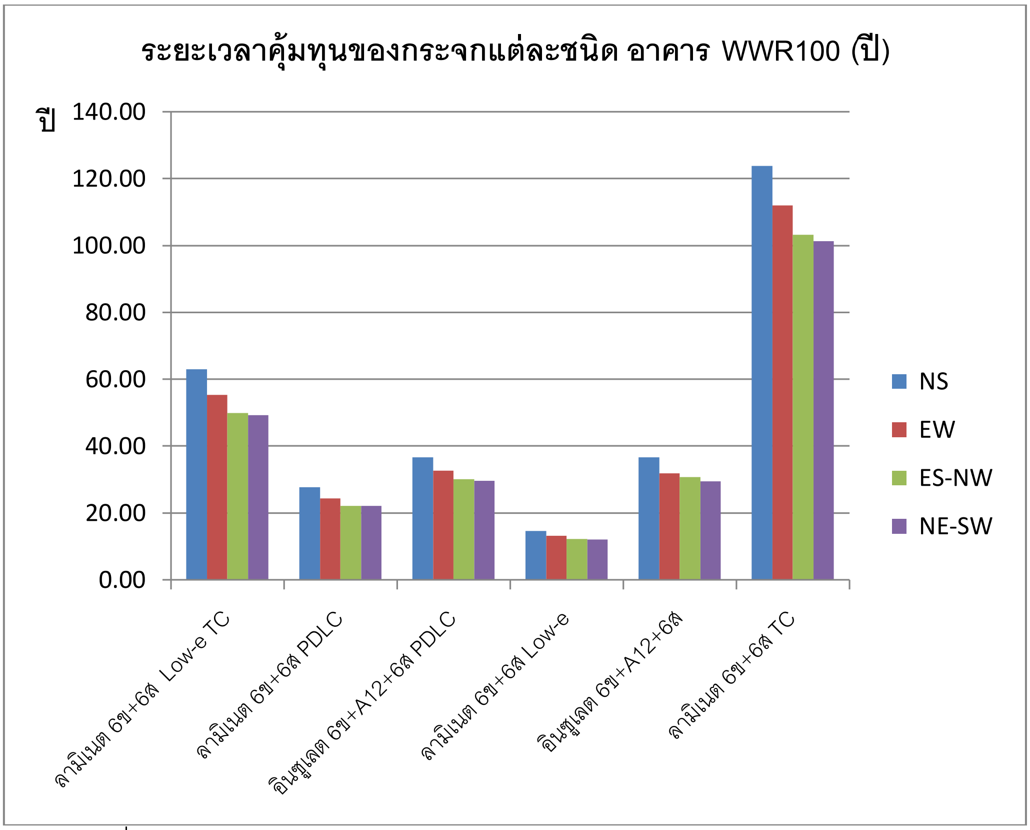

ภาพที่ 4.59: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR80

การคำนวณระยะเวลาคุ้มทุนของอาคาร WWR100 ได้ผลเช่นเดียวกับของอาคาร WWR80 ไม่มีกระจกชนิดใดที่มีระยะเวลาคุ้มทุนภายใน 10 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีระยะเวลาคุ้มทุนนานที่สุด 49 – 63 ปี รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มีระยะเวลาคุ้มทุนใกล้เคียงกัน 29 – 36.7 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีระยะเวลาคุ้มทุน 22 – 27.6 ปี และเช่นเดียวกับผลของอาคาร WWR40, WWR60 และ WWR80 กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e มีระยะเวลาคุ้มทุนน้อยที่สุด 12 – 14.6 ปี (ตารางที่ 4.15 และ ภาพที่ 4.60)

ตารางที่ 4.15: ค่าไฟฟ้าต่อปีที่ใช้ในการทำความเย็นของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100

| | WWR100 | เงินลงทุน | ทิศ | ค่าไฟฟ้าต่อปี (บาท) | ค่าไฟฟ้าที่ประหยัดได้ต่อปี (บาท) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 33,829,099.20 | NS | 44,965,110.95 | base case |
| | | | EW | 49,285,526.06 | |
| | | | ES-NW | 54,127,901.88 | |
| | | | NE-SW | 53,995,212.13 | |
| 2 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e TC | 645,509,329.92 | NS | 34,724,329.52 | 10,240,781.43 |
| | | | EW | 37,601,242.71 | 11,684,283.35 |
| | | | ES-NW | 41,166,968.06 | 12,960,933.81 |
| | | | NE-SW | 40,896,642.18 | 13,098,569.95 |
| 3 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 169,145,496.00 | NS | 38,838,077.83 | 6,127,033.12 |
| | | | EW | 42,318,135.79 | 6,967,390.28 |
| | | | ES-NW | 46,445,409.86 | 7,682,492.01 |
| | | | NE-SW | 46,321,434.20 | 7,673,777.94 |
| 4 | **ลามิเนต 6ข+6ส** PDLC | 172,904,284.80 | NS | 40,251,189.93 | 4,713,921.03 |
| | | | EW | 43,982,566.97 | 5,302,959.09 |
| | | | ES-NW | 48,377,746.36 | 5,750,155.52 |
| | | | NE-SW | 48,168,440.07 | 5,826,772.06 |
| 5 | **ลามิเนต 6ข+6ส** Low-e | 48,112,496.64 | NS | 41,669,054.77 | 3,296,056.18 |
| | | | EW | 45,617,572.36 | 3,667,953.71 |
| | | | ES-NW | 50,175,077.77 | 3,952,824.11 |
| | | | NE-SW | 49,976,253.64 | 4,018,958.49 |
| 6 | **ลามิเนต 6ข+6ส** | 37,587,888.00 | NS | 43,939,585.94 | 1,025,525.02 |
| | | | EW | 48,107,357.33 | 1,178,168.74 |
| | | | ES-NW | 52,904,268.38 | 1,223,633.50 |

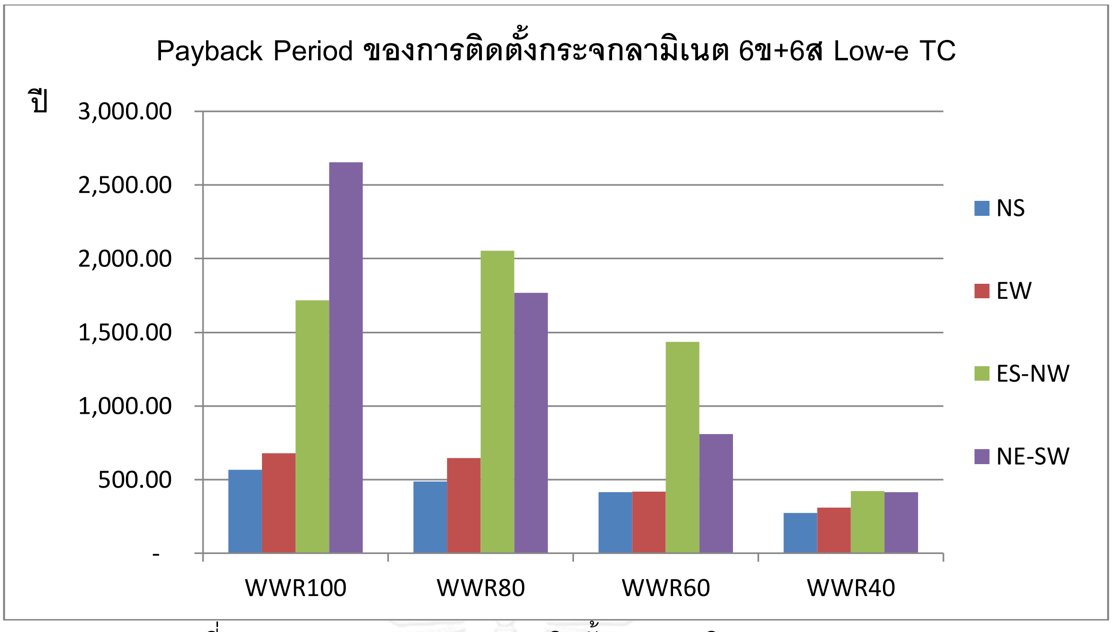
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | NE-SW | 52,719,630.94 | 1,275,581.20 |
| 7 | **ลามิเนต 6ข+6ส TC** | 631,476,518.40 | NS | 50,063,394.43 | - 5,098,283.48 |
| | | | EW | 54,924,292.92 | - 5,638,766.86 |
| | | | ES-NW | 60,250,321.17 | - 6,122,419.29 |
| | | | NE-SW | 60,231,798.49 | - 6,236,586.36 |




ภาพที่ 4.60: ระยะเวลาคุ้มทุน (Payback period) ของกระจกแต่ละชนิด อาคาร WWR100

4.4.2 การเปรียบเทียบความคุ้มทุนระหว่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านอัตโนมัติ

ภาพที่ 4.61 แสดงผลการเปรียบเทียบระยะเวลาคุ้มทุน กรณีเลือกติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านบังแดดอัตโนมัติ ระยะเวลาคุ้มทุนที่สั้นที่สุดคือ 274 ปี (อาคาร WWR40 หันทิศ NS)




ภาพที่ 4.61: Payback Period ของการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC
แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e + ม่านอัตโนมัติ

### 4.5 การคำนวณหาราคากระจกที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดปัจจุบัน

จากการคำนวณหาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานการทำความเย็น 9.19% - 24.26% พบว่ามีระยะคุ้มทุน 16 - 63 ปี การคำนวณในส่วนนี้ใช้สูตรการคำนวณ IRR เพื่อหาราคาที่มี PB 10 ปี และได้อัตราคิดลดขั้นต่ำที่ 7.5% (ภาพที่ 4.62 - ภาพที่ 4.65)

อาคาร WWR40 ที่เลือกติดตั้งหน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกชนิดนี้ได้ 2.41 – 3.75 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR60 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ได้ 2.36 – 3.22 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR80 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ได้ 2.25 – 2.96 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส และอาคาร WWR100 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC 2.08 – 2.65 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส

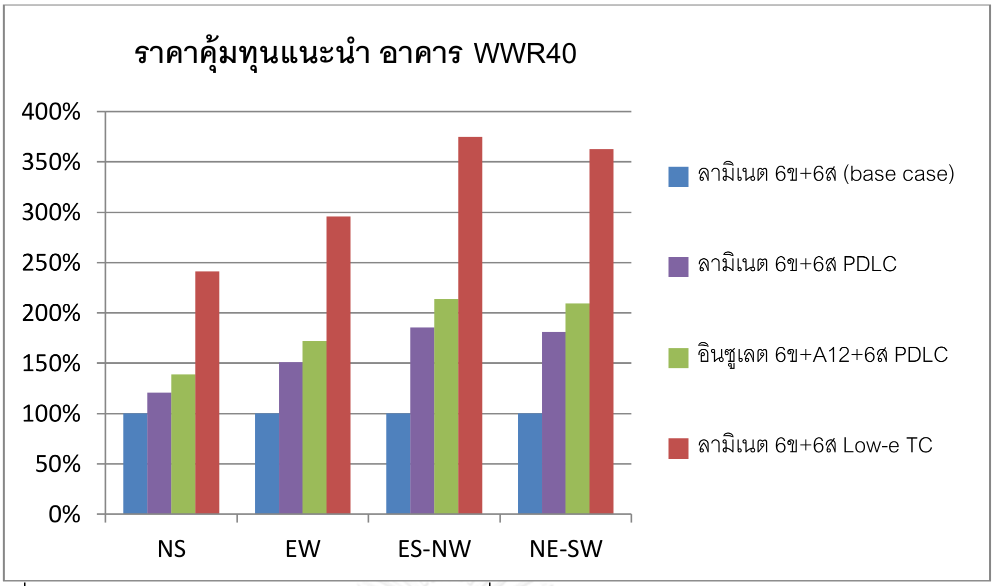
อาคาร WWR40 ที่เลือกติดตั้งหน้าต่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกชนิดนี้ได้ 1.39 – 2.14 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส

อาคาร WWR60 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ได้ 1.40 – 1.86 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR80 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ได้ 1.32 – 1.72 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส และอาคาร WWR100 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ได้ 1.24 – 1.55 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส

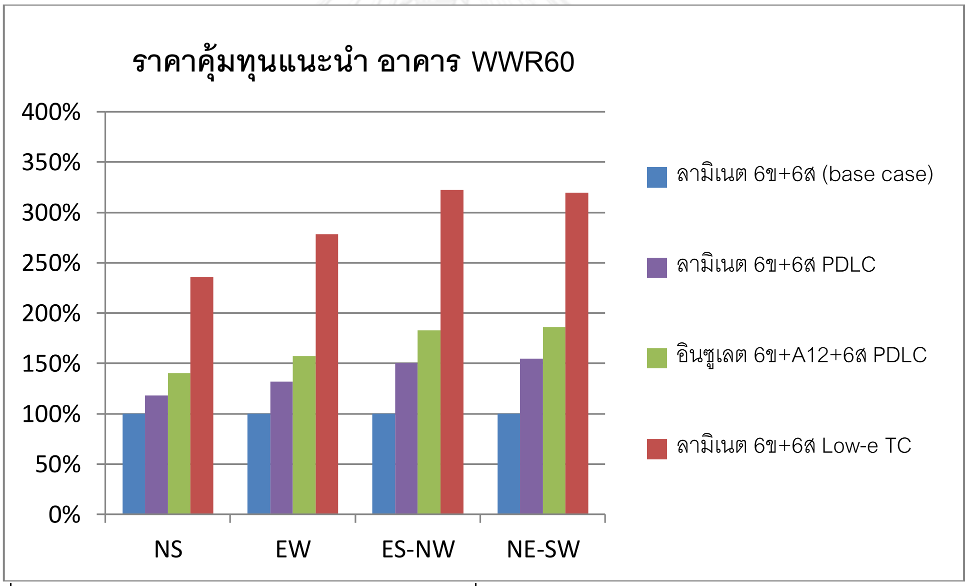
อาคาร WWR40 ที่เลือกติดตั้งหน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกชนิดนี้ได้ 1.21 – 1.85 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR60 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ได้ 1.18 – 1.55 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส อาคาร WWR80 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ได้ 1.05 – 1.36 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส และอาคาร WWR100 คำนวณราคาคุ้มทุนภายในเวลา 10 ปีของกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ได้ 0.96 – 1.18 เท่าของราคากระจกลามิเนต 6ข+6ส

ราคาคุ้มทุนแนะนำสำหรับกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) ในอาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW มีสัดส่วนที่สูงกว่าราคาคุ้มทุนสำหรับอาคารที่หันทิศ NS และ EW กระจก 3 ชนิดนี้ในอาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW มีสัดส่วนราคาคุ้มทุนเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case)ใกล้เคียงกัน 2% - 5% ยกเว้นอาคาร WWR40 ราคาคุ้มทุนของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ใน 2 ทิศนี้ต่างกัน 12% เมื่อติดตั้งในอาคารที่หันทิศ EW กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีสัดส่วนคุ้มทุนเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) น้อยกว่าการติดตั้งในอาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW 10% - 79% และเมื่อติดตั้งในอาคารที่หันทิศ NS กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีสัดส่วนคุ้มทุนเมื่อเปรียบเทียบกับราคาของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) น้อยกว่าการติดตั้งในอาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW 21% - 134%

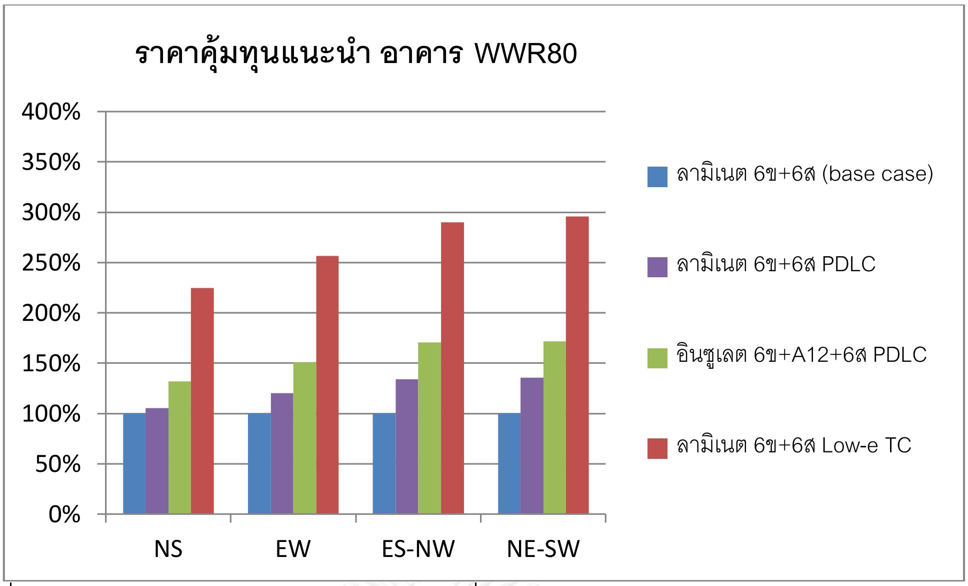
กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจก ลามิเนต 6ข+6ส PDLC สามารถช่วยลดพลังงานทำความเย็นในอาคารที่หันทิศ ES-NW และ NE-SW ได้มากกว่าในอาคารที่หันทิศ NS และ EW ราคาแนะนำเมื่อเทียบกับราคาของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) จึงอยู่ในสัดส่วนที่สูงกว่า



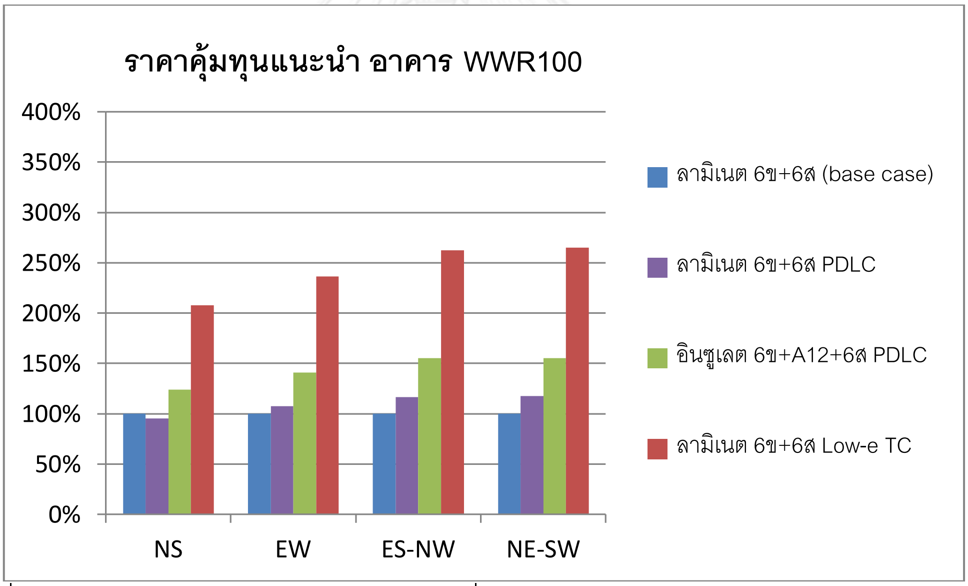

ภาพที่ 4.62: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR40




ภาพที่ 4.63: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR60




ภาพที่ 4.64: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR80




ภาพที่ 4.65: ราคาคุ้มทุนแนะนำภายในเวลา 10 ปี เมื่อเปรียบเทียบกับกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) อาคาร WWR100

# บทที่ 5

# อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัยและแนวทางในการเลือกใช้กระจก smart glass

จากการศึกษาประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นระหว่างหน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC เปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) ในเขตอากาศร้อนชื้น พบว่า กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด 15.92% - 24.26% รองลงมาคือกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC 9.19% - 14.21% กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC 8.00% - 11.08% กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส 2.76% - 2.36% และกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e 5.50% - 7.60% สำหรับกระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ไม่ส่งผลให้เกิดการประหยัดพลังงาน อาคารต้องใช้พลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 7.89% -11.55% เพราะกระจก TC มีคุณสมบัติเปลี่ยนสีกระจกให้เข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิกระจกสูงขึ้น จึงเกิดการสะสมความร้อนในเนื้อกระจกเพิ่มมากขึ้น การที่กระจกลามิเนต 6ข+6ส TC ไม่ได้เคลือบสาร Low-e ความร้อนที่สะสมในกระจกจึงถูกส่งผ่านเข้าภายในกล่องทดลองมากกว่ากระจกแผ่นที่เคลือบสาร Low-e ดังนั้น หากต้องการใช้เทคโนโลยี TC ในกระจกลามิเนตเพื่อช่วยในการประหยัดพลังงานทำความเย็น จำเป็นต้องใช้กระจกลามิเนต TC ควบคู่กับการเคลือบสาร Low-e

สัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส เมื่อเปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) แปรผันตรงกับสัดส่วนของ WWR โดยอาคาร WWR40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้เปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) 2.76% - 21.44% อาคาร WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้เปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) 3.07% - 22.90% อาคาร WWR80

มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้เปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) 2.78% - 24.15% และอาคาร WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้เปรียบเทียบกับการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส (base case) 2.26% - 24.26%

การติดตั้งหน้าต่างกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส แทนกระจก 6ข+6ส (base case) ในอาคารที่หันทิศ NE-SW ประหยัดพลังงานทำความเย็นมากที่สุด มากกว่าในอาคารที่หันทิศ ES-NW 0.02% - 0.40% การติดตั้งในอาคารที่หันทิศ NE-SW ประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าในอาคารที่หันทิศ EW 0.02% - 2.55% และการติดตั้งในอาคารที่หันทิศ NE-SW ประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าในอาคารที่หันทิศ NS 0.08% - 5.05%

การติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนลามิเนต 6ข+6ส ส่งผลให้อาคารมีสัดส่วนการประหยัดพลังงานเพิ่มขึ้นทุกกรณี อาคาร WWR100 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้นมากที่สุด 10.29% - 18.17% รองลงมาคืออาคาร WWR80 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 10.29% - 17.94% อาคาร WWR60 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 9.86% - 16.79% และอาคาร WWR40 มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 8.00% - 15.42%

ทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งหน้าต่างอาคารด้วยกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC แทนกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มากที่สุด 10.49% - 18.17% ทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้นรองลงมา 10.49% - 17.95% ทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 9.41% - 17.57% และทิศ NS มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 8.00% - 16.67%

สำหรับการติดตั้งหน้าต่างกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC แทนกระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส ทิศ ES-NW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้นมากที่สุด 9.08% - 12.21% ทิศ NE-SW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้นรองลงมา 8.90% -

12.14% ทิศ EW มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 7.95% - 12.03% และทิศ NS มีสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นเพิ่มขึ้น 6.61% - 11.61%

การเปรียบเทียบการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC, กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC กับการติดตั้งกระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส หรือ กระจกลามิเนต 6ข+6ส พร้อมม่านบังแดดอัตโนมัติ พบว่า กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่าม่านบังแดดในทุกทิศของทุก WWR (0.56% - 2.98%) แต่การติดตั้งอินซูเลต 6ข+A12+6ส พร้อมม่านบังแดดมีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานทำความเย็นมากกว่ากระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC 0.67% - 4.43% และ 3.95% - 9.99% ตามลำดับ

ผลการคำนวณเชิงเศรษฐศาสตร์ กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC มีระยะคุ้มทุน 34.8 – 63 ปี กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC มีระยะคุ้มทุน 18.9 – 36.7 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีระยะคุ้มทุน 16 – 27.6 ปี กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส มีระยะคุ้มทุน 12.6 – 36.65 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e ที่มีประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานทำความเย็นดีเป็นอันดับ 4 มีระยะคุ้มทุนน้อยที่สุด 7.8 – 14.6 ปี

เพื่อให้กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC, กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC มีระยะเวลาคุ้มทุนภายใน 10 ปี กระจกลามิเนต 6ข+6ส Low-e TC ควรมีราคาลดลงกว่าราคาปัจจุบัน 81% - 87% กระจกอินซูเลต 6ข+A12+6ส PDLC ควรมีราคาลดลงกว่าราคาปัจจุบัน 55% - 69% และกระจกลามิเนต 6ข+6ส PDLC ควรมีราคาลดลงกว่าราคาปัจจุบัน 49% - 63% ขึ้นกับทิศและสัดส่วน WWR ของอาคาร

### 5.2 ข้อเสนอแนะในการนำกระจก smart glass ไปประยุกต์ใช้

จากการศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนการประหยัดพลังงานทำความเย็นของกระจกกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ เทคโนโลยีของกระจกที่ช่วยในการประหยัดพลังงานทำความเย็นของอาคารขนาดใหญ่ในเขตอากาศร้อนชื้นที่ดีที่สุด คือกระจกลามิเนต Low-e TC รองลงมาคือกระจกอินซูเลต PDLC และกระจกลามิเนต PDLC ตามลำดับ ราคาของกระจกทั้ง 3 ชนิดนี้ ควรอยู่ในเกณฑ์ที่งานวิจัยนี้เสนอแนะ เพื่อความคุ้มทุนของเจ้าของโครงการภายในระยะเวลา 10 ปี กรณีที่

ราคาของกระจกทั้ง 3 ชนิดนี้ไม่สามารถปรับลงได้ตามที่งานวิจัยนี้เสนอแนะ กระจกลามิเนต Low-e เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดรองจากกระจก smart glass ทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมา

### 5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยต่อไป

1. งานวิจัยนี้ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระจกกรณีศึกษากับกระจก base case เพียงชนิดเดียว คือกระจกลามิเนต 6ข+6ส สำหรับงานวิจัยต่อๆ ไป สามารถศึกษาเปรียบเทียบกับกระจก base case ชนิดอื่นๆ
2. กระจก smart glass มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยต่อๆ ไปสามารถนำกระจก smart glass เทคโนโลยีใหม่มาศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ
3. สำหรับงานวิจัยต่อไป สามารถศึกษาในเรื่องของพลังงานแสงสว่างที่อาจเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของกระจกกรณีศึกษาที่แตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้นำมาคำนวณรวมอยู่ในอัตราการประหยัดพลังงานของอาคาร
4. งานวิจัยนี้ ศึกษาประสิทธิภาพของกระจกเป็นหลัก สำหรับงานวิจัยต่อๆ ไป สามารถนำกระจกจากงานวิจัยนี้ เป็น base case เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวัสดุอาคารชนิดอื่นๆ ที่มีผลต่อการประหยัดพลังงานการทำความเย็นของอาคารต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ถาวรวัฒน์สกุล, ธ. (2555). ประสิทธิภาพการประหยัดพลังงานของสารเคลือบกระจกกันความร้อนของอาคารในเขตสถาพอากาศแบบร้อนชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รับคำอินทร์, ณ. (2552). อิทธิพลของสัดส่วนและทิศทางอาคารที่มีผลต่อการใช้พลังงานในอาคาร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Arutjunjan, R., Markoya, T., Halopenen, I., Maksimov, I., Tutunnikov, A., & Yanush, O. (2003). *Glass Processing Days 2003*.

Assimakopoulos, M., Tsangrassoulis, A., Guarracino, G., & Santamouris, M. (2004). Integrated energetic approach for a controlable electrochromic device. *Energy and Buildings, 36*, 415-422.

Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 94*, 87-105.

Granqvist, C. (2015). Fenestration for reducing building cooling needs: an introduction to spectral selectivity, thermochromics, and electrochromics. *Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, 441-471.

Grynning, S., Gustavsen, A., Time, B., & Jelle, B. P. (2013). Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers? *Energy and Buildings, 61*, 185-192.

Horngren, C. T., Foster, G., & Datar, S. M. (1997). *Cost Accounting: A Managerial Emphasis*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.

Jelle, B. P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H., & Hart, R. (2012). Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 96*, 1-28.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Kamalisarvestani, M., Saidur, R., Mekhilef, S., & Javadi, F. (2013). Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26*, 353-364.

Kokogiannakis, G., Darkwa, J., & Aloisio, C. (2014). Simulating thermochromic and heat mirror glazing systems in hot and cold climates. *Energy Procedia, 62*, 22-31.

Lampert, C. (2003). Large-area smart glass and integrated photovoltaics. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 76*, 489-499.

Lee, E. S., Pang, X., Hoffmann, S., Goudey, H., & Thanachareonkit, A. (2013). An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives. *Solar Energy Materials & Solar Cells, 116*, 14-26.

Long, L., & Ye, H. (2014). Discussion of the performance improvement of thermochromic smart glazing applied in passive buildings. *Solar Energy, 107*, 230-244.

Morin, F. (1959). Oxides which show a metal to insulator transition at the neel temperature. *Physical Review Letters, 3(1)*, 34-36.

Papaefthimiou, S., Syrrakou, E., & Yianoulis, P. (2006). Energy performance assessment of an electrochromic window. *Thin Solid Films, 502*, 257-264.

Piccolo, A. (2010). Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environment test cell. *Energy and Buildings, 42*, 1409-1417.

Piccolo, A., Pennisi, A., & Simone, F. (2009). Daylighting performance of an electrochromic window in a small scale test-cell. *Solar Energy, 83*, 832-844.

Pittaluga, M. (2015). Electrochromic glazing and walls for reducing building cooling needs. *Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, 473-497.

Raicu, A., Wilson, H. R., Nitz, P., Platzer, W., Wittwer, V., & Jahns, E. (2002). Facade systems with variable solar control using thermotropic polymer blends. *Solar Energy, 72*, 31-42.

Saeli, M., Piccirillo, C., Parkin, I. P., Binions, R., & Ridley, I. (2010). Energy modelling studies of thermochromic glazing. *Energy and Buildings, 42*, 1666-1673.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Ye, H., Meng, X., & Xu, B. (2012). Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window. *Energy and Buildings, 49*, 164-172.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

# ภาคผนวก

## นิยามศัพท์

| | | |
|---|---|---|
| **กระจก** TC | = | กระจก Thermochromic |
| **กระจก** PDLC | = | กระจก Polymer-Dispersed Liquid Crystal |
| **กระจก** Low-e TC | = | กระจก Low-e Thermochromic |
| **ทิศ** NS | = | ทิศเหนือ-ใต้ |
| **ทิศ** EW | = | ทิศตะวันออก-ตะวันตก |
| **ทิศ** ES-NW | = | ทิศตะวันออกเฉียงใต้-ตะวันตกเฉียงเหนือ |
| **ทิศ** NE-SW | = | ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ |
| WWR | = | Window-to-Wall Ratio |
| IRR | = | Internal Rate of Return |
| PB | = | Payback Period |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสมศรินทร์  ณ สงขลา เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จาก College of Environmental Design, University of California, Berkeley ปีการศึกษา 2542 และเข้ารับการศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ภาคนอกเวลาราชการ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในสาขาวิชานวัตกรรมการออกแบบนิเวศสถาปัตย์ ในภาคปลายการศึกษา 2557

ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองกรรมการผู้จัดการ บริษัท เอสอาร์ แอดวานซ์อินดัสตรีส์ จำกัด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University