

สมรรถนะของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ

Energy performance of naturally ventilated double skin facade

เชษฐพรพรรณ สินเจิมสิริ¹ และ ผศ. ดร. อรรถนธ์ เศรษฐบุบตร²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบผนังกระจกสองชั้นแบบใช้การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ โดยใช้กล่องทดลองมีขนาด 1.3x2.5x3.0 ม. มีความกว้างของช่องลมเข้าและช่องลมออก 0.3 ม. และมีความกว้างของช่องอากาศ 0.3 ม. ทำการทดลองโดยใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 8 หลอด แทนแสงอาทิตย์จริง ทำการทดลองในห้องปิดที่ไม่มีอิทธิพลของรังสีอาทิตย์และแรงลมภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง วัดอุณหภูมิและความเร็วลมในส่วนต่างๆ ของกล่องทดลอง ทำการทดลองกับกระจก 5 ชนิด โดยกระจกชั้นนอกจะใช้กระจก 3 ชนิด คือ กระจกใส กระจกสีตัดแสง และกระจกสะท้อนแสง ส่วนกระจกชั้นในจะใช้กระจกใสและกระจกอินซูลูเลทเพื่อเป็นตัวแทนของกระจกที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงและต่ำตามลำดับ ซึ่งกระจกทั้ง 5 ชนิดนี้สามารถนำมาจับคู่เพื่อทำการทดลองได้ทั้งหมด 6 รูปแบบคือ กระจกใสกับกระจกใส กระจกสีตัดแสงกับกระจกใส กระจกสะท้อนแสงกับกระจกใส กระจกใสกับกระจกอินซูลูเลท กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลูเลท และกระจกสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลูเลท

หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิและความเร็วลมที่วัดได้มาคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) จากการคำนวณพบว่าความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเร็วลมและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) ถ้ามีความต่างมากความเร็วลมและค่า h_c ภายในช่องอากาศก็จะมีค่ามากตาม ซึ่งค่า h_c จะมีผลต่อค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นอย่างมาก โดยค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลูเลทเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยที่สุดคือ $0.843 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor มากที่สุดคือ $1.464 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และเมื่อนำค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นมาเปรียบเทียบกับระบบผนังกระจกชั้นเดียว พบว่าค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นมีค่าต่ำกว่า 51-72%

การใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกในระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้นแล้วจะมีค่า U-factor และ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC) ที่น้อยที่สุด การใช้กระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลูเลทจะทำให้ลดความแตกต่างของค่า U-factor ที่เกิดขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกันลงได้ โดยในระบบผนังกระจกสองชั้นค่า SC จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกันความร้อนมากกว่าค่า U-factor เนื่องจากค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่ากระจกภายนอกจะต่างชนิดกัน

คำสำคัญ: ระบบผนังกระจกสองชั้น; การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

¹ นิสิตระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. บทนำ

ผนังภายนอกอาคารเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อภาระการทำความเย็นในอาคาร ดังนั้นการออกแบบผนังอาคารให้มีประสิทธิภาพในการลดความร้อนก่อนที่จะสูดตัวอาคารได้มากเท่าไร ก็จะช่วยลดการใช้พลังงานในอาคารได้มากขึ้นเท่านั้น

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

การศึกษาเกี่ยวกับระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นไปอย่างกว้างขวางในยุโรป อเมริกาเหนือ และ ญี่ปุ่น ซึ่งเป็นประเทศที่สามารถใช้ประโยชน์จากผนังรูปแบบนี้ได้ทั้งฤดูร้อนและฤดูหนาว ในฤดูหนาวระบบผนังกระจกสองชั้นจะทำหน้าที่กักเก็บความร้อนไว้ในช่องอากาศ โดยปิดช่องลมเข้าและช่องลมออก ทำให้ช่องอากาศระหว่างผนังทำหน้าที่เป็นฉนวนกันอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำถ่ายเทเข้าสู่ตัวอาคาร ในฤดูร้อนจะใช้ช่องอากาศนี้ระบายอากาศและกันความร้อนจากภายนอกอาคาร ส่วนประเทศไทยไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาวมากนัก ดังนั้นก่อนที่จะนำระบบผนังอาคารสองชั้นมาใช้จึง

จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้และข้อจำกัด รวมถึงการปรับใช้อย่างเหมาะสมกับสภาพอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย

การวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงการทำงานของระบบผนังกระจกสองชั้นและประสิทธิภาพในการกันความร้อน รวมถึงทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model) ที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้อธิบายถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบผนังนี้ เพื่อหาข้อสรุปและแนวทางในการเลือกใช้กระจกซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของระบบผนังนี้อย่างเหมาะสม และเป็นการส่งเสริมงานวิจัยเกี่ยวกับการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในประเทศไทยให้มากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพที่มีผลต่อการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติและการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น ให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนได้โดยทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาข้อสรุปเกี่ยวกับประสิทธิภาพด้านการประหยัดพลังงานของระบบผนังกระจกสองชั้น

1.2 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบผนังกระจกสองชั้นที่ระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ โดยการใส่กล่องทดลอง (Test cell) สูงเท่ากับอาคารชั้นเดียว มีช่องลมเข้าและช่องลมออกมีความกว้างคงที่คือ 30 ซม. และไม่มีบานเกล็ด มีความกว้างของช่องอากาศคงที่คือ 30 ซม. และภายในช่องอากาศของกล่องทดลองไม่มีการติดตั้งแผงกันแดด กระจกที่ใช้ในการทดลองมี 5 ชนิดคือ กระจกลามิเนทใส กระจกลามิเนทสีตัดแสง และกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E ใช้ปรับเปลี่ยนเป็นกระจกชั้นนอก ส่วนกระจกใส และกระจกอินซูลูทใส low-E ใช้ปรับเปลี่ยนเป็นกระจกชั้นใน

1.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ทำการศึกษาข้อมูลพื้นฐานและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบผนังกระจกสองชั้น รวมถึงวิธีการ

ทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อกำหนดตัวแปรและวิธีการทดลองตลอดจนรูปแบบของกล่องทดลองและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง แล้วดำเนินการก่อสร้างกล่องทดลองพร้อมทั้งปรับปรุงพื้นที่ที่ทำการทดลองให้มีลักษณะเป็นห้องปิดไม่มีอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์และแรงลมภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง

ทำการเก็บข้อมูลโดยการวัดอุณหภูมิและความเร็วลมที่เกิดขึ้นภายในส่วนต่างๆ ของกล่องทดลอง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกมาคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับระบบผนังกระจกสองชั้นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) ของผนังแต่ละชนิด หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองพร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางในการใช้งานระบบผนังกระจกสองชั้นในประเทศไทย

2. ทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

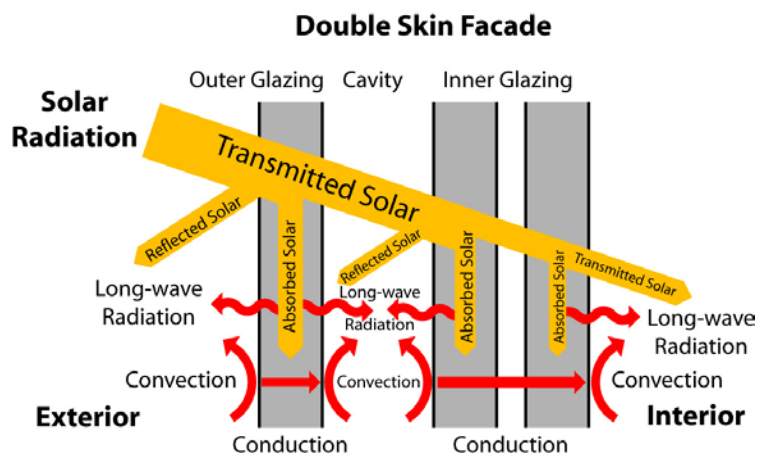
การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

1) การถ่ายเทความร้อนที่กระจกชั้นนอก การถ่ายเทความร้อนในระบบผนังกระจกสองชั้นเริ่มต้นจากรังสีอาทิตย์ตกกระทบผิวกระจกชั้นนอก รังสีบางส่วนสะท้อนกลับออกไป บางส่วนทะลุเข้าสู่ช่องอากาศ และบางส่วนถูกดูดซับเข้าไปในกระจกแล้วเปลี่ยนรูปของพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในกระจกชั้นนอกนี้บางส่วนถ่ายเทสู่ภายนอกจากการพาความร้อนที่ผิวกระจก ในขณะที่เดียวกันมีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างสภาพแวดล้อมกับกระจกชั้นนอกนี้

2) การถ่ายเทความร้อนในช่องอากาศ จากรังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านกระจกชั้นนอกเข้าสู่ช่องอากาศ รังสีส่วนนี้จะตกกระทบกระจกชั้นในในลักษณะเดียวกับกระจกชั้นนอกเพียงแต่มีปริมาณที่ลดลง รังสีบางส่วนถูกสะท้อนอยู่ภายในช่องอากาศ บางส่วนทะลุผ่านเข้าสู่ภายในห้อง บางส่วนถูกดูดซับไว้ในกระจกเปลี่ยนเป็น

ความร้อนแล้วแผ่รังสีออกไปยังช่องอากาศและภายในห้อง ความร้อนที่อยู่ในช่องอากาศนี้จะทำให้อากาศภายในช่องอากาศขยายตัว ความหนาแน่นของอากาศภายในจะน้อยกว่าอากาศภายนอก ทำให้เกิดแรงลอยตัวตามธรรมชาติไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางช่องลมออกด้านบน ในขณะที่เดียวกันอากาศภายนอกที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่อากาศในช่องอากาศ ทำให้เกิดการระบายความร้อนภายในช่องอากาศ ในขณะที่กระจกภายในและกระจกภายนอกจะมีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนซึ่งกันและกัน

3) การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภายในห้อง หลังจากรังสีความร้อนทะลุผ่านกระจกชั้นนอกและชั้นในเข้าสู่ภายในห้อง รังสีอาทิตย์ที่เหลืออยู่นี้ จะถูกดูดซับโดยวัตถุภายในห้อง เช่น ผนัง ฝ้าเพดาน อุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ แล้วเปลี่ยนเป็นความร้อนและแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระจกชั้นในด้วยการแผ่รังสีคลื่นยาว ในขณะที่เดียวกันก็มีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวกระจกชั้นใน



รูปที่ 1 แสดงการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้นในส่วนของกระจก

วัตถุโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติที่สามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสามดังต่อไปนี้

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของปริมาณรังสีอาทิตย์รวม (I_t) ได้ดังนี้

$$I_t = \alpha I_t + \tau I_t + \rho I_t \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

หากให้ระบบผนังกระจกสองชั้นเปรียบเสมือนผนังผนังหนึ่งและมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ค่าหนึ่ง (ρ) สะท้อนรังสีอาทิตย์บางส่วนออกไป ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่กระทำต่อผนังนี้จะเท่ากับ

$$I_t - \rho I_t = \alpha I_t + \tau I_t \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

ในเทอมของการดูดซับรังสีอาทิตย์ในผนังนี้จะเท่ากับการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น (Q_{dfs}) และในเทอมของส่งผ่านรังสีอาทิตย์จะเท่ากับความร้อนที่ผ่านผนังกระจกภายนอกและภายใน

$$Q_s = Q_{dfs} + (SC_{g1})(SC_{g2})I_t \quad (\text{W/m}^2) \quad (4)$$

กฎการถ่ายเทความร้อนโดยการนำของ Fourier สามารถเขียนสมการการนำความร้อนให้อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) ได้ดังนี้

$$Q = U (T_1 - T_2) \quad (\text{W/m}^2) \quad (5)$$

เมื่อแทนค่า Q_{dfs} ให้อยู่ในรูปของค่า U จะได้สมการเป็นดังนี้

$$Q_s = U_{dfs} (T_1 - T_2) + (SC_{g1})(SC_{g2})I_t \quad (\text{W/m}^2) \quad (6)$$

เมื่อเขียนให้อยู่ในรูปของการสมดุลความร้อน (Heat balance) จะได้สมการดังนี้

$$\alpha I_t = Q_{dfs} = Q_{cd1} = Q_{cv} = Q_{cd2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (7)$$

ค่า U เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการนำความร้อนของวัสดุ (k) กับความหนาของวัสดุ (L) และเป็นส่วนกลับกับค่าความต้านทานความร้อนรวมของวัสดุ (R) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = \frac{k}{L} = \frac{1}{\Sigma R} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (8)$$

ค่า U ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นส่วนกลับของค่า R ในแต่ละชั้นของผนังเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U_{dfs} = \frac{1}{R_e + R_{g1} + R_{cv} + R_{g2} + R_i} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (9)$$

ค่าความต้านทานความร้อนของกระจก (R_g) สามารถหาได้จากส่วนกลับของค่า U ของกระจกโดยด้วยค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มอากาศทั้งภายนอกและภายใน (R_e, R_i) และค่าความต้านทานความร้อนภายในช่องอากาศ (R_{cv}) มีค่าเท่ากับส่วนกลับของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c)

จากสมการที่ 7 ค่าการนำความร้อน (Q_{cd}) และค่าการพาความร้อน (Q_{cv}) ในระบบผนังกระจกสองชั้นสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_{cd} = \frac{k H_g}{d} (T_1 - T_2) \quad (\text{W/m}) \quad (10)$$

$$Q_{cv} = H_g h_c (T_s - T_\infty) \quad (\text{W/m}) \quad (11)$$

ในการหาค่า h_c เพื่อใช้หาค่า R_{cv} จำเป็นต้องทราบถึงค่านัสเซลท์นัมเบอร์ (Nu) ซึ่งสามารถแทนค่า Nu เพื่อหาค่า h_c ได้ตามสมการดังนี้

$$Nu_\ell = \frac{h_c \ell}{k_f} \quad (12)$$

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องการหาค่า Nu ที่ใช้ในช่องอากาศมีวิธีการคำนวณด้วยกัน 2 วิธีคือ

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

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

$$Nu_L = \left[\frac{576}{(Ra_L L/H)^2} + \frac{2.87}{(Ra_L L/H)^{1/2}} \right]^{-1/2} \quad (13)$$

โดยมีความสัมพันธ์กับค่าเรย์น็อลด์ (Ra_L) เมื่อพัฒนาเต็มรูปแบบ (Fully developed) Ra_LL/H ≤ 10 และเมื่อเป็นแผ่นโดดเดี่ยว (Isolated plate) Ra_LL/H ≥ 100

- วิธีที่ 2 ค่า Nu ที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังในแนวตั้ง (The wall averaged heat transfer rate from a vertical wall) แบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities)

สมการสำหรับช่องอากาศกว้างสามารถหาได้จากสมการสหสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังในแนวตั้งของ Churchill and Chu (1975) มีสมการเป็นดังนี้

$$Nu_H = 0.68 + 0.515Ra_H^{1/4} \quad (14)$$

สำหรับการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) (Gr_H < 10⁹)

$$Nu_H = (0.825 + 0.325Ra_H^{1/6})^2 \quad (15)$$

สำหรับการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน (Laminar and turbulent) (10¹ < Ra_H < 10¹²)

ในงานการทดลองนี้จะทำการหาค่า Nu ทั้ง 2 วิธีและมีการเปรียบเทียบค่า Nu ที่ได้ พร้อมทั้งสรุปหา

ค่าที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้หาค่า h_c ต่อไป

3. การดำเนินการทดลอง

3.1 ปริมาณรังสีอาทิตย์

กำหนดให้ปริมาณรังสีที่ใช้ในการทดลองคือ 200 W/m² 300 W/m² 400 W/m² และ 500 W/m² โดยค่า 200 W/m² และ 300 W/m² เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงรังสีอาทิตย์ปกติที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ส่วน 400 W/m² และ 500 W/m² เป็นค่าที่ใช้อ้างอิงรังสีอาทิตย์ที่มากกว่าปกติและเพื่อดูความต่อเนื่องของข้อมูล โดยใช้หลอดฮาโลเจนขนาด 500 W จำนวน 8 หลอด แทนรังสีอาทิตย์จริง

3.2 ชนิดของกระจก

กระจกที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 5 ชนิด โดยกระจกภายนอกจะใช้กระจกที่มีลักษณะแตกต่างกัน 3 ชนิดคือ กระจกลามิเนทใส กระจกลามิเนทสีตัดแสง และกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E ซึ่งกระจกที่ใช้เป็นกระจกภายนอกนี้จำเป็นต้องเป็นกระจกลามิเนทตามกฎหมายพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร กระจกภายในมีด้วยกัน 2 ชนิดได้แก่ กระจกใส และกระจกอินซูเลทใส low-E ค่าประสิทธิภาพของกระจกแต่ละชนิดเป็นดังนี้

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

ตารางที่ 1 ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นนอก

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

ตารางที่ 2 ค่าประสิทธิภาพของกระจกชั้นใน

3.3 ขนาดของกล่องทดลอง

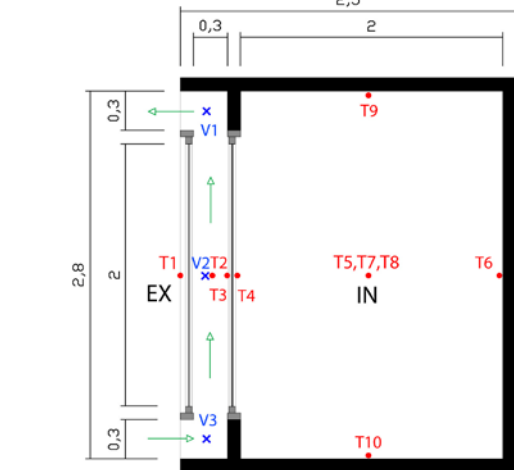
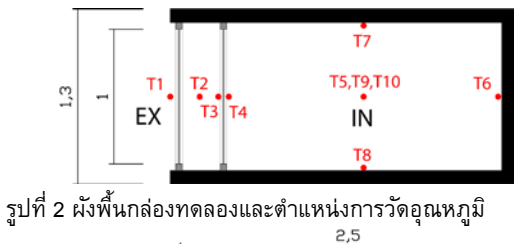
กล่องทดลองมีขนาด 1.3x2.5x3.0 ม. มีความกว้างของช่องลมเข้าและช่องลมออก 0.3 ม. และมีความกว้างของช่องอากาศ 0.3 ม. (รูปที่ 2 และ 3)

3.4 ตำแหน่งเครื่องมีวัตต์

ตำแหน่งการวางเครื่องมีวัตต์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ มีด้วยกัน 10 จุด โดยแบ่งเป็นการวัดอุณหภูมิผิว 8 จุด และอุณหภูมิอากาศ 2 จุดคือ ตำแหน่ง T2 และ T5 ตำแหน่งการวัดแสงไว้ในรูปที่ 2 และ 3

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



รูปที่ 2 ผังพื้นกล่องทดลองและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

- ตำแหน่งการวัดความเข้มรังสี ทำการวัดความเข้มแสงเฉลี่ยที่ตกกระทบลงบนกระจกชั้นนอก

3.5 วิธีการวัด

ในการวัดค่ากล่องทดลองมีลำดับวิธีการในการวัดค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต้นดังนี้

| ชนิดกระจก | | กระจกชั้นใน | |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------------|--|
| | | กระจกใส | กระจกอินซูลเลทใส low-E |
| กระจกชั้นนอก | กระจกลามิเนทใส | กระจกลามิเนทใส/กระจกใส | กระจกลามิเนทใส/กระจกอินซูลเลทใส low-E |
| | กระจกลามิเนทสีตัดแสง | กระจกลามิเนทสีตัดแสง/กระจกใส | กระจกลามิเนทสีตัดแสง/กระจกอินซูลเลทใส low-E |
| | กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E | กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E/กระจกใส | กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E/กระจกอินซูลเลทใส low-E |

ตารางที่ 3 รูปแบบการปรับเปลี่ยนกระจกที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการทดลองคือ ชนิดของกระจกทั้ง 5 ชนิด ซึ่งสามารถจับคู่ได้ 6 รูปแบบคือ กระจกลามิเนทใสกับกระจกใส กระจกลามิเนทสีตัดแสงกับกระจกใส กระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกใส กระจกลามิเนทใสกับกระจกอินซูลเลทใส low-E กระจกลามิเนทสีตัดแสงกับกระจกอินซูลเลทใส low-E และกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลเลทใส low-E

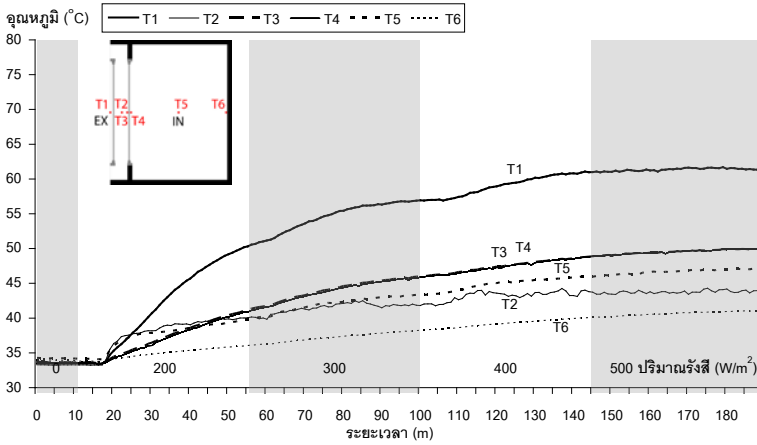
ในแต่ละรูปแบบจะมีการใส่ตัวแปรต้นอีกตัวหนึ่งคือ ปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนกระจกชั้นนอก โดยมีค่าตั้งแต่ 200 W/m² 300 W/m² 400 W/m² จนถึง 500 W/m² โดยใช้เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์วัดค่าให้ตรงกับปริมาณที่ต้องการ

ทำการวัดอุณหภูมิจุดต่างๆ ภายในกล่องทดลอง และค่าความเร็วลมภายในช่องอากาศ เป็นระยะเวลา 2 ชม. โดยวัดค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที และค่าความเร็วลมทุกๆ 10 นาที ต่อปริมาณรังสีหนึ่งค่า และทำการทดลองกับรูปแบบทั้ง 6 รูปแบบของชนิดกระจก

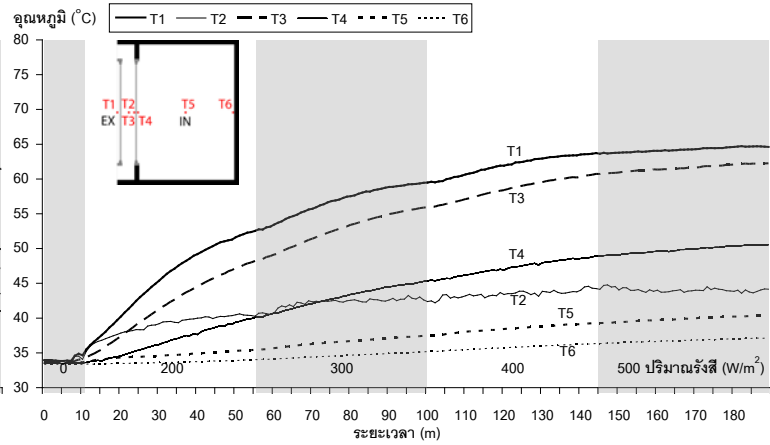
หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปใส่ในสมการที่ 9 เพื่อให้ได้ค่า U-factor ของผนัง 6 รูปแบบ เพื่อทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

4. ผลการทดลอง

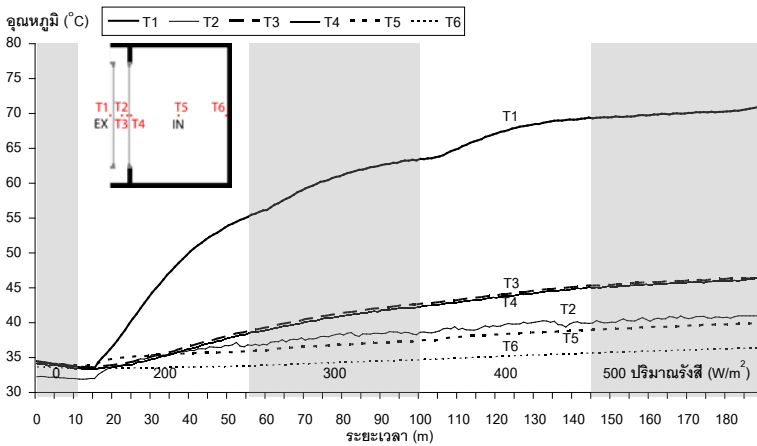
4.1 อุณหภูมิ



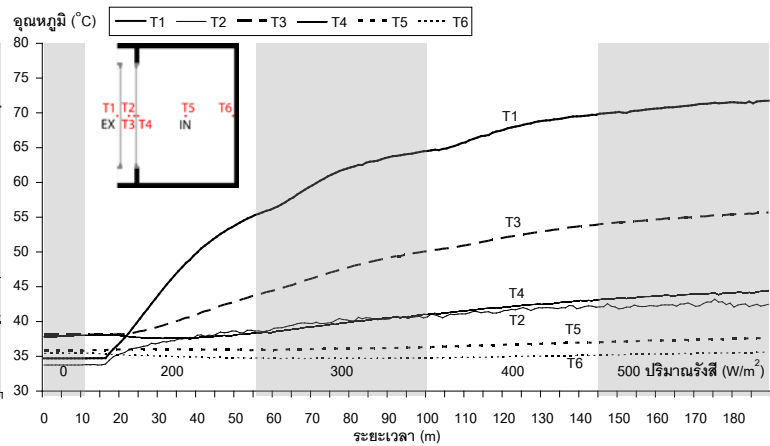
รูปที่ 4 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Clear-Clear)



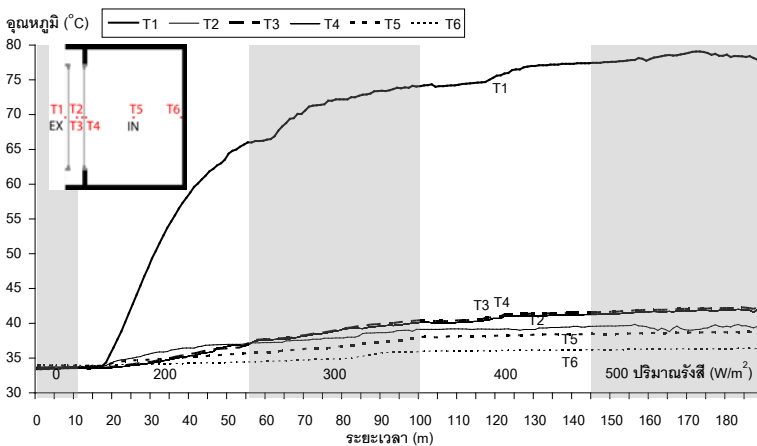
รูปที่ 7 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตใสเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาติส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Clear-Insulate)



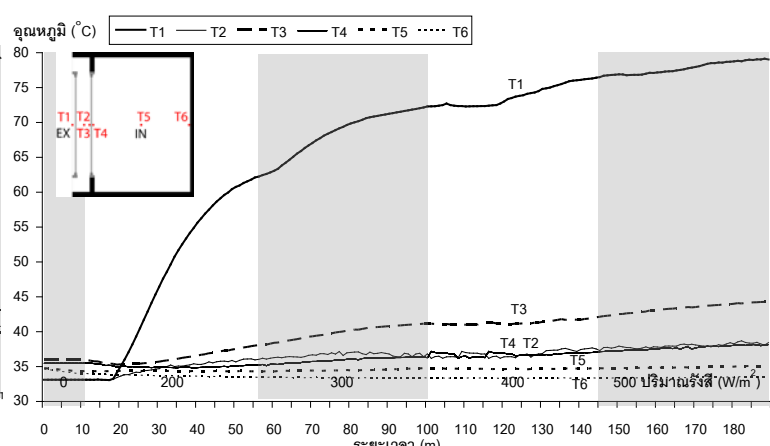
รูปที่ 5 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Tint-Clear)



รูปที่ 8 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาติส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Tint-Insulate)



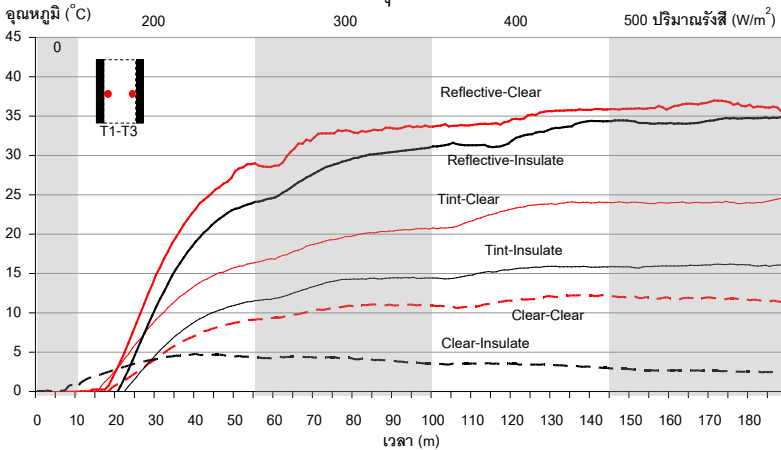
รูปที่ 6 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Clear)



รูปที่ 9 อุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ของกล่องทดลอง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสีของผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาติส low-E เป็นกระจกชั้นใน (Reflective-Insulate)

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในกล่องทดลองที่มีชนิดกระจกแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่ากระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E ที่ใช้เป็นกระจกชั้นนอกมีอุณหภูมิผิวกระจกสูงที่สุดในกระจก 3 ชนิดเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับความร้อน (α) มากที่สุด รองลงมาคือกระจกสีตัดแสงและกระจกใสตามลำดับ

ผนังที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในจะไม่มีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายนอกและภายใน ($T_3=T_4$) อุณหภูมิในช่องอากาศ (T_2) และอุณหภูมิภายในห้อง (T_5) ของผนังที่มีกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E เป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลาเทใส low-E เป็นกระจกชั้นในมีค่าน้อยที่สุดและผนังที่มีกระจกลามิเนทเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 10 ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในภายในช่องอากาศของผนังแต่ละชนิด (T1-T3) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี

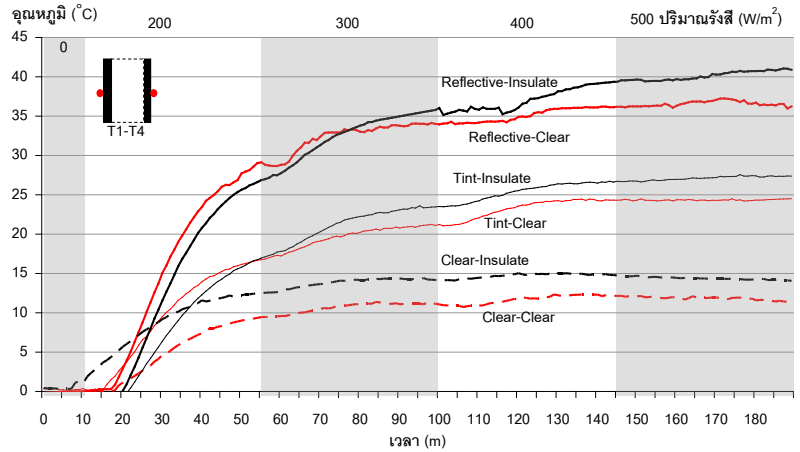
เนื่องจากกระจกภายนอกเป็นกระจกชั้นเดียว อุณหภูมิผิวภายนอกและภายในของกระจกจึงไม่มีความแตกต่างกันมากนัก จึงใช้ค่าอุณหภูมิที่จุด T1 แทนอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกภายในช่องอากาศ

จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าผนังกระจกที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่าความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกภายในช่องอากาศมากกว่าผนังกระจกที่มีกระจกอินซูลาเทใส low-E เป็นกระจกชั้นใน

คู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกใสมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นในและชั้นนอกภายในช่องอากาศมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทใส

รูปที่ 12 ลักษณะของอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ตั้งแต่ภายนอกจนถึงภายในห้องของกระจกชนิดต่างๆ ที่ปริมาณรังสี 250 W/m²

ใส low-E ถัดมาคือคู่ของกระจกสีกับกระจกใส, กระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส low-E, กระจกใสกับกระจกใส และกระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส low-E ตามลำดับ

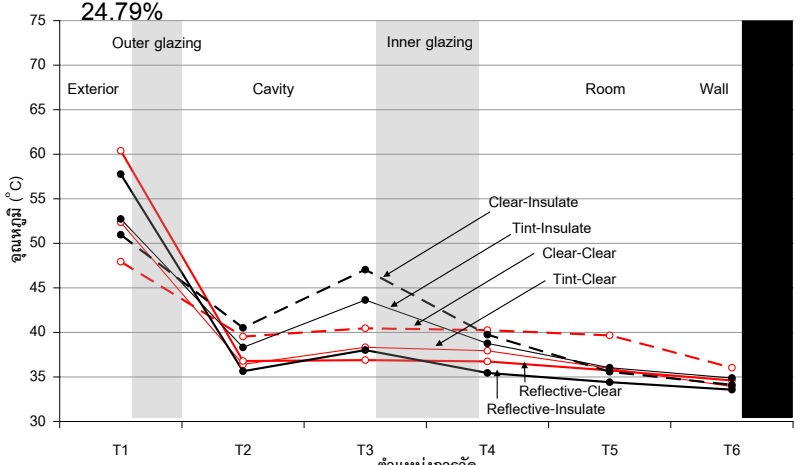


รูปที่ 11 ความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในของผนังแต่ละชนิด (T1-T4) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี

จากรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าผนังกระจกที่มีกระจกอินซูลาเทใส low-E ใสเป็นกระจกชั้นในมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นในมากกว่าผนังกระจกที่มีกระจกใสเป็นกระจกชั้นใน

คู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทใส low-E มีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นในและชั้นนอกมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E กับกระจกใส ถัดมาคือคู่ของกระจกสีตัดแสงกับกระจกอินซูลาเทใส low-E, กระจกสีตัดแสงกับกระจกใส, กระจกใสกับกระจกอินซูลาเทใส low-E และกระจกใสกับกระจกใสตามลำดับ

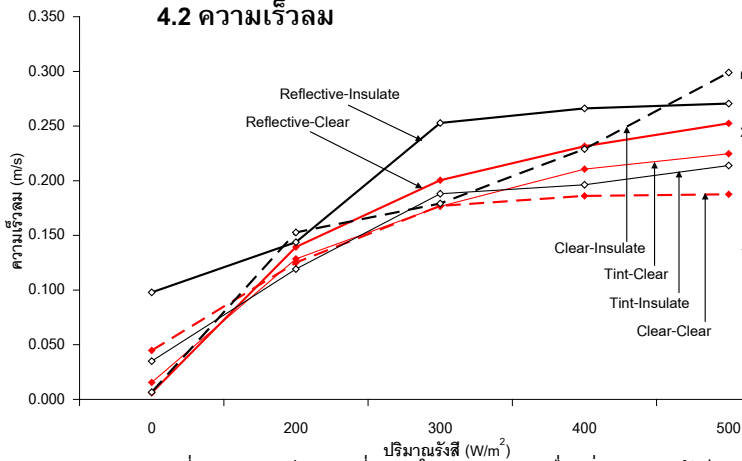
คู่ของกระจกที่มีความต่างอุณหภูมิผิวของกระจกชั้นในและชั้นนอกอันดับ 1 กับอันดับ 2 มีความต่างกัน 1.97% อันดับ 3 กับอันดับ 4 มีความต่างกัน 4.08% และอันดับ 5 กับอันดับ 6 มีความต่างกัน 24.79%



จากรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนผ่านทางอุณหภูมิที่ผ่านกระจกแต่ละชั้นเข้าสู่ภายในห้องและถูกดูดซับภายในผนังห้อง โดยอุณหภูมิจะสูงที่สุดที่ผิวกระจกทุกชนิดกระจกและจะลดต่ำลงในช่องอากาศและจะสูงขึ้นอีกที่ผิวกระจกชั้นในภายในช่องอากาศในกรณีของกระจกอินซูลาเทส low-E และจะลดต่ำลงเมื่อผ่านกระจกชั้นในและลดต่ำลงเมื่อเข้าสู่ภายในห้องและผิวผนังตามลำดับ ส่วนกรณีของกระจกชั้นในเป็นกระจกใสอุณหภูมิที่ผิวกระจกชั้นในจะมีค่าพอกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ

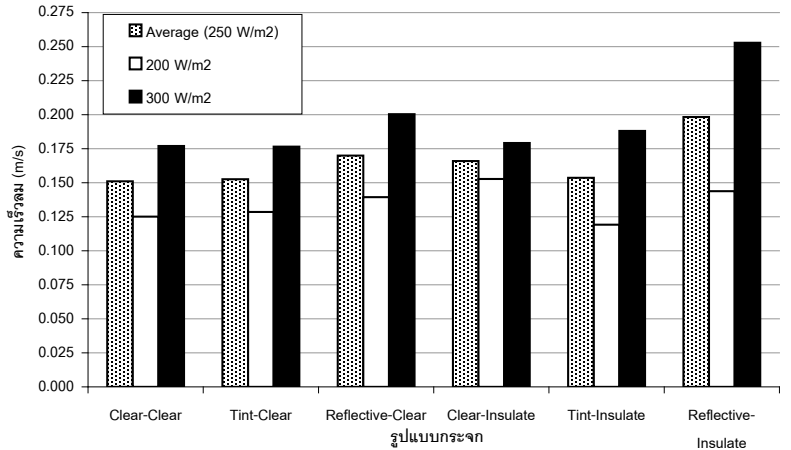
ที่อุณหภูมิภายในห้อง (T5) อุณหภูมิของคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทส low-E มีค่าต่ำที่สุด คู่ของกระจกลามิเนตใสกับกระจกใสมีค่าสูงที่สุด ส่วนกระจกอีก 4 ชนิดมีค่าไม่ต่างกัน โดยกระจก 4 ชนิดนี้มีอุณหภูมิต่ำกว่าคู่ของกระจกลามิเนตใสกับกระจกใสอยู่ 9.70% และอุณหภูมิของคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกอินซูลาเทส low-E มีค่าต่ำกว่าคู่ของกระจกลามิเนตใสกับกระจกใสอยู่ 13.26% และต่ำกว่ากระจกอีก 4 ชนิดอยู่ 3.95%

4.2 ความเร็วลม



รูปที่ 13 ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศเมื่อเพิ่มปริมาณรังสี

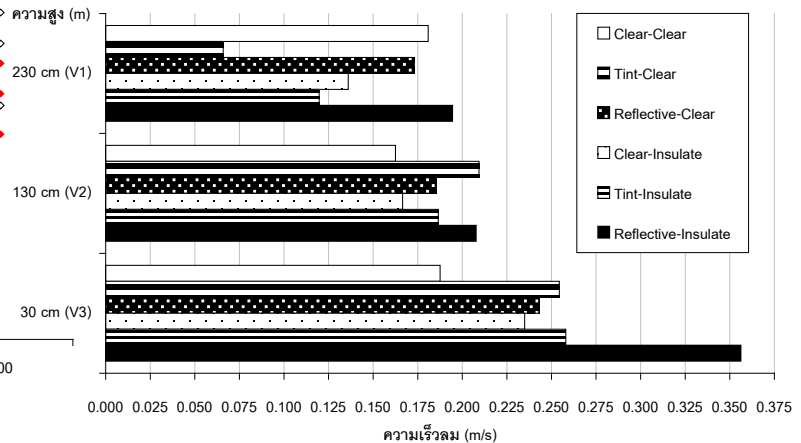
จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าความเร็วลมมีค่าแปรผันตามกับปริมาณรังสี โดยที่คู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทส low-E มีความเร็วลมเฉลี่ยมากที่สุด กระจกชนิดอื่นๆ มีความเร็วลมเกิดขึ้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 14 ความเร็วลมเฉลี่ยภายในช่องอากาศในช่วงปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย

ความเร็วลมที่เกิดขึ้นในช่วงปริมาณรังสี

อาทิตย์ปกติในประเทศไทยคือช่วงรังสี 200-300 W/m² ผนังที่มีกระจกลามิเนตสะท้อนแสงเป็นส่วนประกอบมีความเร็วลมมากกว่ากระจกชนิดอื่น เมื่อกระจกชั้นในเป็นกระจกชนิดเดียวกัน และจากค่าเฉลี่ยในช่วงปริมาณรังสีนี้ พบว่าความเร็วลมของคู่กระจกลามิเนตสะท้อนแสงกับกระจกอินซูลาเทส low-E มีความเร็วลมเฉลี่ยมากที่สุด รองลงมาคือคู่ของกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E กับกระจกใส และกระจกลามิเนตใสกับกระจกอินซูลาเทส low-E มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกระจกอีก 3 ชนิดที่เหลือมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 15 ความเร็วลมเฉลี่ยแต่ละตำแหน่งภายในช่องอากาศในช่วงที่ปริมาณรังสีอาทิตย์ปกติในประเทศไทย

จากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าความเร็วลมภายในช่องอากาศเกิดขึ้นมากที่สุดที่บริเวณช่องลมเข้า แล้วลดต่ำลงจนถึงช่องลมออก เกือบทุกคู่กระจกยกเว้นคู่ของกระจกลามิเนตใสกับกระจกใส

4.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor)

ในการหาค่า h_c จำเป็นต้องหาค่า Nu ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 12 จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบการหาวิธีการหาค่า Nu 2 วิธี ในการหาค่า Nu นี้จะใช้ค่าของอุณหภูมิและความเร็วลมในช่วงปริมาณรังสี 250 W/m² ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยปริมาณแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

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

จากการสมการที่ 13 วิธีการนี้เป็นการหาค่า Nu จากความกว้างของช่องอากาศ (L) ซึ่งจากการตรวจสอบค่าเรย์โนลด์สเบอร์ (Ra_L) พบว่าการไหลของอากาศเป็นแบบแผ่นโดดเดี่ยว (Isolate plate) ค่า Nu ที่ได้เป็นดังนี้

| Nu _L , Bar-Cohen | Nu _L |
|-----------------------------|-----------------|
| Clear-Clear | 20.194 |
| Tint-Clear | 23.834 |
| Reflective-Clear | 25.410 |
| Clear-Insulate | 23.193 |
| Tint-Insulate | 24.214 |
| Reflective-Insulate | 25.704 |

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

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

จากสมการที่ 14 วิธีการนี้เป็นการหาค่า Nu จากความสูงของช่องอากาศ (H) จาก การตรวจสอบค่ากราชอฟฟ์นัมเบอร์ (Gr) และเรโนลด์นัมเบอร์ (Re) พบว่าค่า Gr มีค่ามากกว่าค่ากำลังสองของค่า Re มาก

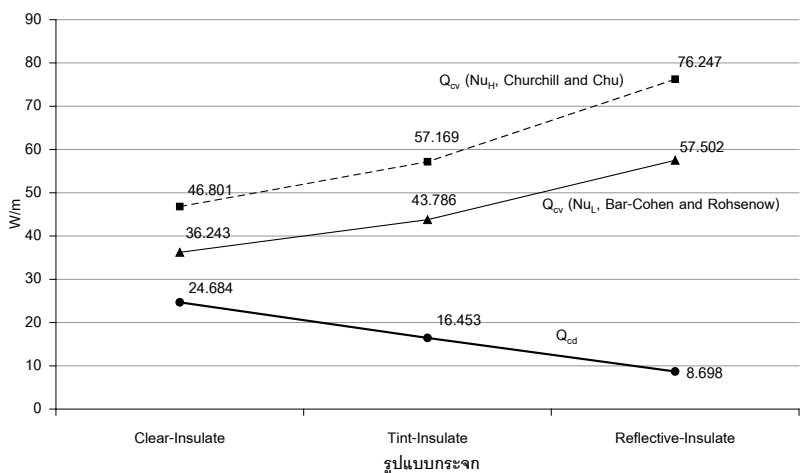
ถือว่าเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ จากนั้นได้ตรวจสอบรูปแบบของช่องอากาศว่าเป็นแบบช่องอากาศกว้าง (Wide cavities) หรือแบบช่องอากาศแคบ (Narrow cavities) พบว่าค่า $L/H > Ra_H^{-1/4}$ และ $L/H > Ra_L^{-1}$ จึงสรุปได้ว่าเป็นแบบช่องอากาศกว้าง

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

| Nu _H , Churchill | Nu _H |
|-----------------------------|-----------------|
| Clear-Clear | 167.888 |
| Tint-Clear | 206.622 |
| Reflective-Clear | 223.952 |
| Clear-Insulate | 199.661 |
| Tint-Insulate | 210.764 |
| Reflective-Insulate | 227.220 |

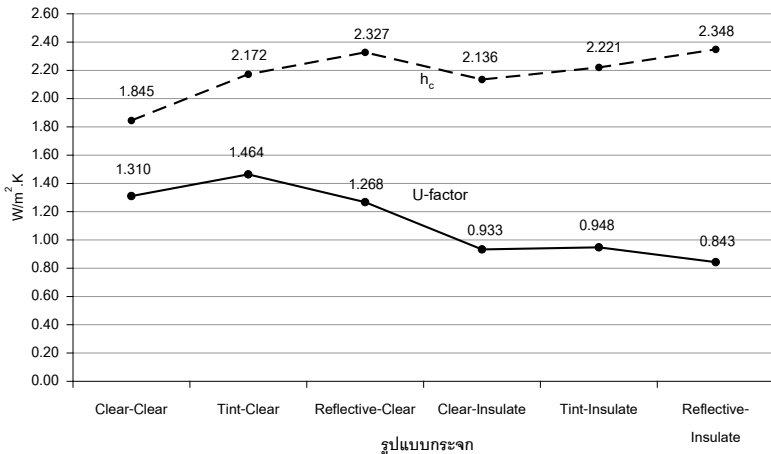
ตารางที่ 5 ค่า Nu ที่ได้จากสมการของ Churchill and Chu (1975)

จากนั้นทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่า Nu ที่ได้โดยนำค่า Nu ที่ได้จากสมการทั้งสองไปหาค่าการพาความร้อน (Q_{cv}) ในสมการที่ 11 และหาค่าการนำความร้อน (Q_{cd}) ของผนังกระจกชั้นในที่ประกอบด้วยกระจกอินซูลูเลท low-E เนื่องจากมีความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกมาก ทำให้สามารถเห็นผลของค่า Q_{cd} ที่ผ่านกระจกชั้นในได้ชัดเจน ซึ่งจากสมการสมดุลความร้อน (Heat balance) สมการที่ 7 ค่าของ Q_{cd} จะเท่ากับค่า Q_{cv}



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบค่า Q_{cd} กับค่า Q_{cv} ในระบบผนังกระจกสองชั้นเพื่อหาความถูกต้องของค่า Nu

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



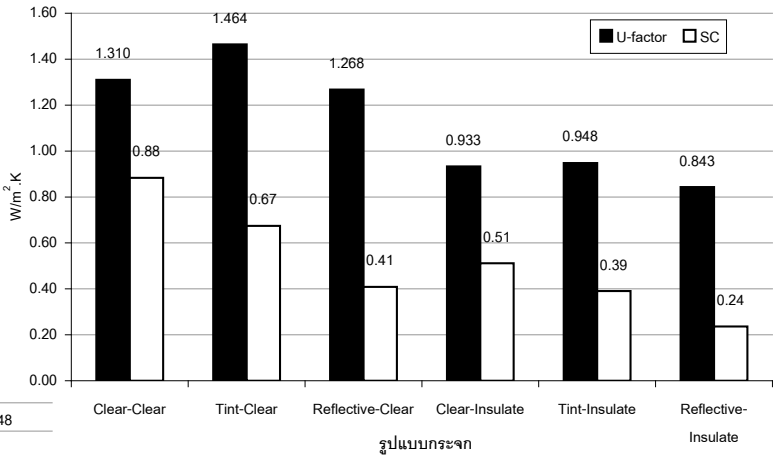
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบค่า h_c กับค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้น

จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่า h_c กับค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นแต่ละรูปแบบพบว่าผนังที่ใช้กระจกลามิเนตใสเป็นกระจกชั้นนอกจะมีค่า h_c มากกว่ากระจกลามิเนตสีตัดแสงและกระจกลามิเนตสะท้อนแสง low-E

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

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

หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นที่ได้กับค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC) ของกระจกแต่ละรูปแบบได้ผลเป็นดังนี้



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่า U-factor กับค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้น

จากรูปที่ 18 พบว่าค่า SC ของกระจกชั้นนอกที่เป็นกระจกลามิเนตใสจะมีค่าสูงกว่ากระจกลามิเนตสีตัดแสงและกระจกลามิเนตสะท้อนแสงตามลำดับ เมื่อกระจกชั้นในเป็นกระจกชนิดเดียวกันและการใช้กระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลาต low-E จะทำให้ค่า SC ต่ำกว่าการใช้กระจกใส

5.การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิภายในช่องอากาศจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิผิวกระจกทั้งภายในและภายนอก โดยที่อุณหภูมิของผิวกระจกภายนอกที่เป็นกระจกสะท้อนแสงจะมีอุณหภูมิผิวกระจกสูงที่สุดและกระจกใสจะมีอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดเนื่องจากค่า α ของกระจก แต่อุณหภูมิภายในช่องอากาศของกระจกสะท้อนแสงจะต่ำกว่ากระจกใสเนื่องจากค่า τ ซึ่งความต่างของอุณหภูมิผิวกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศนี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความเร็วลมและค่า h_c ซึ่งถ้ามีความต่างมากความเร็วลมและค่า h_c ภายในช่องอากาศก็จะมีค่ามากตาม

ส่วนกระจกชั้นในหากเป็นกระจกที่มีค่า α สูง ก็จะมีผลทำให้อุณหภูมิที่ผิวกระจกสูง และความต่างอุณหภูมิก็มีผลกับความเร็วลมและค่า h_c เช่นกัน เพียงแต่มีผลน้อยกว่ากระจกภายนอกมาก เนื่อง

อิทธิพลจากรังสีที่ผ่านเข้ามาได้ถูกกรองโดยกระจกชั้นนอกจนมีปริมาณลดลง

ความต่างอุณหภูมิระหว่างกระจกชั้นในและชั้นนอก (T1-T4) จะมีความสัมพันธ์กับค่า U และค่า SC ของกระจก ถ้าค่า U และค่า SC ของกระจกมีค่าน้อยความต่างของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นมาก

5.2 ความเร็วลม

ความเร็วลมจะเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกสะท้อนแสง ส่วนกระจกใสและกระจกสีตัดแสงนั้นมีค่าความเร็วลมเฉลี่ยไม่แตกต่างกัน จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและอุณหภูมิพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความเร็วลมคือความต่างอุณหภูมิระหว่างผิวกระจกชั้นนอกกับอุณหภูมิภายในช่องอากาศ (T1-T2) ซึ่งถ้าความต่างอุณหภูมิมีมากความเร็วลมจะมากตาม

5.3 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_c) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor)

จากรูปที่ 17 พบว่าค่า h_c ภายในช่องอากาศมีผลต่อค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นเป็นอย่างมาก สังเกตได้จากกระจกชั้นนอกที่เป็นกระจกใส ซึ่งมี U สูงที่สุดในกระจกที่นำมาทดลอง แต่กลับมีค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นต่ำกว่ากระจกสีตัดแสงเนื่องจากค่า h_c ของกระจกใสที่มีค่าน้อยที่สุดในกระจกที่นำมาทดลอง เป็นผลให้ค่าความต้านทานความร้อนภายในช่องอากาศ (R_{cv}) มีค่าสูงที่สุด จึงทำให้ค่า U-factor ของกระจกใสมีค่าน้อยกว่ากระจกสีตัดแสงเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้น

ซึ่งค่า h_c นั้นเกิดจากค่า Nu ซึ่งอาศัยความต่างของอุณหภูมิผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหล ถ้าความต่างของอุณหภูมิผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหลมีค่ามากกว่า Nu จะมีค่าน้อยตามและส่งผลให้ค่า h_c มากไปด้วย

การป้องกันความร้อนถ่ายเทเข้าสู่ภายในห้องด้วยการใช้กระจกอินซูลทซึ่งมีค่า U ต่ำที่สุดเป็น

กระจกชั้นใน จะทำให้ลดความแตกต่างของค่า U-factor ที่เกิดขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกันลงได้เป็นอย่างมาก ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับการใช้กระจกใสธรรมดาเป็นกระจกชั้นในจะทำให้เกิดความแตกต่างของค่า U-factor มากขึ้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกต่างชนิดกัน

5.4 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (U-factor) และค่าสัมประสิทธิ์การบังแดด (SC)

การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกนั้นจะประกอบด้วย การนำความร้อนและการแผ่รังสีประสิทธิภาพในการกันความร้อนของผนังกระจกจึงขึ้นอยู่กับค่า U-factor ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกันความร้อนจากการนำความร้อน และค่า SC ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการกันรังสีอาทิตย์ โดยค่า U-factor เกิดขึ้นจากค่า U ของกระจกกับค่า h_c ภายในช่องอากาศ ส่วนค่า SC นั้นเกิดจากค่า SC ของกระจกชั้นนอกและกระจกชั้นใน

ค่า U-factor กับค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้นนั้นไม่ได้แปรผันตามกัน (รูปที่ 18) เนื่องจากค่า h_c มีผลต่อค่า U-factor

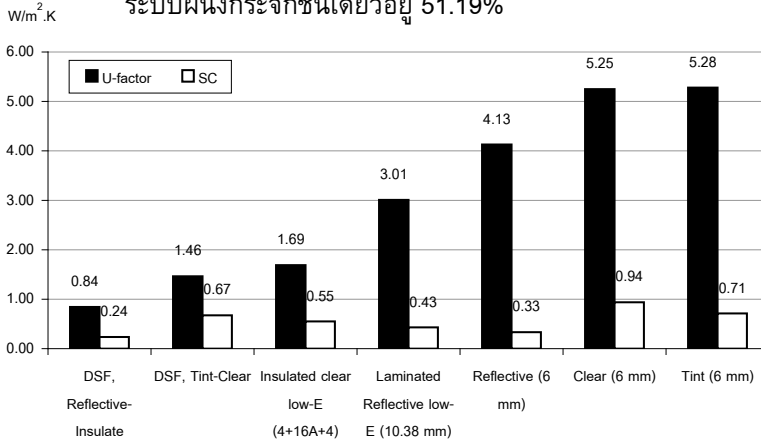
6. สรุปผลการวิจัย

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

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

3. เมื่อเปรียบเทียบระบบผนังกระจกสองชั้นมีค่า U-factor มากที่สุดและน้อยที่สุดกับระบบผนังกระจกชั้นเดียว (Single skin facade) ที่มีค่า U-factor ประมาณ $3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ พบว่าระบบผนังกระจกสองชั้นที่มี

กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลูเลทเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียวอยู่ 71.90% และระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกสีตัดแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกใสเป็นกระจกชั้นในมีค่า U-factor น้อยกว่าระบบผนังกระจกชั้นเดียวอยู่ 51.19%



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบค่า U-factor และค่า SC ของระบบผนังกระจกสองชั้น (DSF) กับระบบผนังกระจกชั้นเดียว (SSF) ชนิดต่างๆ

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

4. ระบบผนังกระจกสองชั้นที่มีกระจกชั้นนอกและชั้นในเป็นกระจกใสจะลดความร้อนจากรังสีอาทิตย์ภายนอกเข้าสู่ภายในห้องได้น้อยที่สุด เนื่องจากมีค่า U-factor และค่า SC มากที่สุด และผนังที่มีกระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกและกระจกอินซูลูเลทเป็นกระจกชั้นในจะสามารถลดความร้อนเข้าสู่ภายในห้องได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า U-factor และค่า SC น้อยที่สุด ส่วนกระจกอีก 4 รูปแบบมีความสามารถในการลดความร้อนเข้าสู่ภายในห้องได้ใกล้เคียงกัน

7. ข้อเสนอแนะ

1. การใช้กระจกสะท้อนแสงเป็นกระจกชั้นนอกในระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีประสิทธิภาพใน

การกันความร้อนได้ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อนำมาประกอบเป็นระบบผนังกระจกสองชั้นแล้วจะมีค่า U-factor และค่า SC ที่น้อยที่สุด

2. ในระบบผนังกระจกสองชั้นค่า SC จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกันความร้อนมากกว่าค่า U-factor เนื่องจากค่า U-factor ของระบบผนังกระจกสองชั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่ากระจกภายนอกจะต่างชนิดกัน

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

4. ในการเลือกลงทุนระหว่างกระจกชั้นนอกกับกระจกชั้นใน พบว่าการลงทุนกับกระจกชั้นนอกหรือกระจกชั้นในอย่างใดอย่างหนึ่งมีค่าไม่ต่างกัน จะเห็นได้จากกรณีที่กระจกชั้นนอกเป็นกระจกลามิเนทสะท้อนแสง low-E และกระจกชั้นในเป็นกระจกใส กับกรณีของกระจกชั้นนอกเป็นกระจกลามิเนทใสและกระจกชั้นในเป็นกระจกอินซูลูเลท low-E พบว่ามีประสิทธิภาพในการกันความร้อนใกล้เคียงกัน

5. การนำค่า U-factor จากการทดลองนี้ไปใช้กับระบบผนังอาคารสองชั้นที่มีความสูงแตกต่างกันออกไป จำเป็นที่จะต้องมีการคำนวณค่า h_c ใหม่ เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ค่า h_c จากกล่องทดลองที่มีความสูงเท่ากับอาคารชั้นเดียว และค่า U และค่า SC ของกระจกที่ใช้ในการลองเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณของโรงงานกระจก ซึ่งแต่ละโรงงานจะมีค่าประสิทธิภาพของกระจกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด

6. สำหรับงานวิจัยต่อเนื่องในอนาคตควรจะมีการนำค่า U-factor และ SC ที่ได้ไปจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานกับผนังรูปแบบอื่นๆ พร้อมทั้งหากการใช้ไฟฟ้ารายปีเพื่อคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป และ

การศึกษาเกี่ยวกับแผงกันแดดภายในช่องอากาศเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากประเทศไทยได้รับอิทธิพลจากรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งปี แผงกันแดดจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการลดความร้อนที่จะเข้าสู่ตัวอาคาร

8. รายการสัญลักษณ์

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีอาทิตย์
 T คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์
 ρ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์
 l คือ ความยาวที่ต้องการศึกษา (Characteristic length) (m)
 d คือ ค่าเฉลี่ยความหนาของชั้น (m)
 h_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/(m^2.K)$)
 k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ ($W/(m.K)$)
 k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล ($W/(m.K)$)
 Gr คือ ค่าการชอพนัมเบอร์ (Grashof number)
 Nu คือ ค่านัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)
 Ra คือ ค่าเรย์นอลด์นัมเบอร์ (Rayleigh number)
 Re คือ ค่าเรย์นอลด์นัมเบอร์ (Reynolds number)
 H คือ ความสูงของช่องอากาศ (m)
 H_g คือ ความสูงของกระจก (m)
 I_t คือ รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนผิววัตถุ (W/m^2)
 L คือ ความกว้างของช่องอากาศ (m)
 Q_s คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของผนัง (W/m^2)
 Q_{dsf} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนภายในระบบผนังกระจกสองชั้น (W/m^2)
 Q_{cd} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W/m^2)
 Q_{cv} คือ ค่าการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (W/m^2)

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

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

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

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

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

SC_{g1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นนอก

SC_{g2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การบังแดดของกระจกชั้นใน

T_1-T_2 คือ ความต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดทั้งสอง (K)

T_s-T_∞ คือ ความต่างอุณหภูมิระหว่างผิววัตถุกับอากาศ (K)

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

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

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

10. เอกสารอ้างอิง

- 1) จารุณี เข้มพิลา. การจำลองการไหลของอากาศภายในอาคารผนังสองชั้น. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2550.
- 2) จิฐพร วงศ์วัชรไพบูลย์. ประสิทธิภาพการระบายอากาศของปล่องแสงอาทิตย์. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2551.

- 3) ตริ่งใจ บุรณสมภพ. การออกแบบสถาปัตยกรรมเมืองร้อนในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: นำอักษรการพิมพ์, 2521.
- 4) ตริ่งใจ บุรณสมภพ. การออกแบบอาคารที่มีประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงาน. จำนวน 10,000 เล่ม. กรุงเทพมหานคร: อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง, 2539.
- 5) ธนิต จินดาวณิก. เอกสารประกอบการสอนวิชา Energy conservation in building design. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- 6) พรรณชลัท สุริโยธิน. วัสดุและการก่อสร้างกระจก. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- 7) รัฐศักดิ์ พรหมมาศ. การลดภาระการทำความเย็นของปล่องระบายอากาศแสงอาทิตย์ด้วยวิธีการคำนวณ OTTV. ประจวบคีรีขันธ์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล, 2542.
- 8) สมสิทธิ์ นิตยะ. การออกแบบอาคารสำหรับภูมิอากาศเขตร้อนชื้น Tropical design environment. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- 9) สมศรี จรุงเรือง. ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- 10) อรรถจัน เศรษฐบุตร. เอกสารประกอบการสอนเรื่อง Transient thermal analysis. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- 11) Ballestini, G., De Carli, M., Masiero, N., and Tombola, G. Possibilities and limitations of natural ventilation in restored industrial archaeology buildings with a double skin facade in Mediterranean climates. Padova: Universita degli studi di Paova, 2004.
- 12) Boake, M. The tectonics of the double skin: What are double façades and how do they work?. Waterloo: University of Waterloo.
- 13) Dickson, A. Modelling double skin facades. Glasgow: University of Strathclyde, 2004.
- 14) Eicker, U., et al. Facades and summer performance of buildings. Stuttgart: University of applied sciences Stuttgart, 2007.
- 15) Gratia, E. and De Herde, A. Guidlines for improving natural ventilation in an office building with double-skin facade. Luavain-La-Neuve: Universite catholique de Louvain, 2006.
- 16) Haase, M., Marques da Silva, F. and Amanto, A. Simulation of ventilated facades in hot and humid climates. Norway: Energy and building, 2009.
- 17) Hamza, N. Double versus single skin facades in hot arid areas. Northumbria: Northumbria university, 2006.
- 18) Hensen, J. Bartak, M. and Drkal, F. Modeling and simulation of a double-skin facade system. USA: ASHRAE, 2002.
- 19) Incropera, F. and DeWitt, D. Foundamentals of heat and mass transfer. Canada: John Wiley and sons, 1981.
- 20) Koinakis, C. and Sakellaris, J. Office building facades and energy performance in urban environment in Greece. Crete island: PALENC Conference, 2007.
- 21) Park, C., et al. Real-time optimization of double skin facade based on lumped modeling and occupant preference. USA: Energy and building, 2004.

- 22) Poirazis, H. Double skin facades for office buildings. Lund: Lund university, 2004.
- 23) Saelens, D. Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades. Leuven: K. U. Leuven, 2002.
- 24) Saelens, D., Roels, S. and Hens H. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. Leuven: K. U. Leuven, 2006.
- 25) Xu, X. and Yang, Z. Natural ventilation in double skin facade with Venetian blind. China: Energy and building, 2008.
- 26) Xu, L. and Ojima, T. Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin facade system. Tokyo: Energy and building, 2005.