วิธีการอย่างเรียบง่ายเพื่อใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกติดมู่ลี่

A Simplified Method for Predicting the Overall Heat Transfer Coefficient of Glazing Window with a Venetian Blind

ศุภกิจ วรศิลป์ชัย [1] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ [2]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330
โทร. 0-2218-6610 โทรสาร. 0-2252-2889
Email: supakit.w@gmail.com [1] fmescy@eng.chula.ac.th [2]

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เรียบง่ายเพื่อใช้ในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของระบบกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายใน โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนทั้งในส่วนของการพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับอากาศภายนอก ระหว่างกระจกกับมู่ลี่ และระหว่างมู่ลี่กับอากาศภายในห้อง สำหรับตัวมู่ลี่ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะเป็น nonspecular optical layer และมีความซับซ้อนในการจำลองการส่งผ่านความร้อน เพื่อให้มีลักษณะเรียบง่าย ตัวมู่ลี่จะถูกพิจารณาให้เป็นระนาบเสมือนที่มีคุณลักษณะที่สอดคล้องกับมู่ลี่จริง จากนั้นจึงทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่รวมทั้งตัวกระจกและมู่ลี่ และทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมที่ได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ากับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ของงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต จากการเปรียบเทียบเห็นได้ว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันค่อนข้างดี

คำหลัก มู่ลี่, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม

Abstract

This article describes the development of a simplified mathematical model for predicting the overall heat transfer coefficient of a glazing window system consisting of glass windows and a venetian blind installed as an interior-shading device. The development is done by considering heat transfer, both convection and longwave radiation, between the outer glass and the outdoor air, between the inner glass surface and a venetian blind and between a venetian blind and the indoor air. The venetian blind which is a complex device due to its nonspecular optical properties makes the modeling of heat transfer through the blind itself rather complex. For simplify purpose, the blind is modeled as an effective layer with its properties corresponding to the actual blind. Then, a simplified mathematical model including both glass and a venetian blind is developed. The simulation results obtained from the model are then compared to the other simulation results. The agreement of the comparison is quite acceptable.

Keywords: venetian blind, mathematical model, overall heat transfer coefficient

1. บทนำ

การติดตั้งมู่ลี่เป็นอุปกรณ์บังเงาภายในเข้ากับระบบกระจกภายในอาคารนั้นสามารถพบเห็นได้ทั่วไป อันเป็นผลมาจากข้อดีหลายประการของตัวมู่ลี่ ตัวอย่างเช่น ในเรื่องของความเป็นส่วนตัว ความสามารถในการควบคุมแสงสว่างจากแสงธรรมชาติ ความสามารถในการบังเงา และความสามารถในการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งมู่ลี่เข้าไปนั้น จะทำให้ค่าคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนของระบบกระจกนั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากมู่ลี่นั้นจะไปรบกวนทั้งลักษณะการพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวที่ส่งผ่านจากผิวกระจกด้านในเข้ามาในห้อง จึงเป็นผลให้การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนี้มีความยุ่งยากมากขึ้น

และเนื่องจากลักษณะของมู่ลี่ที่มีลักษณะเป็นใบซ้อน ๆ กัน จึงทำให้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนนั้นมีเงื่อนไขขอบเขตที่ซับซ้อน และเป็นผลให้การหาผลเฉลยแบบแม่นตรง (exact solution) ของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่นั้นเป็นไปได้ยาก โดยในปัจจุบัน การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้จึงทำได้โดยใช้ 2 วิธีหลัก คือ โดยการใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลข [1-2] และโดยใช้การทดลอง [3-5]

อย่างไรก็ตามการใช้วิธีดังกล่าวข้างต้นก็มีข้อจำกัดที่ค่อนข้างมาก อย่างเช่น ในกรณีของการทดลอง เนื่องจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องนั้นมีเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการทดลองจึงต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก และจะมี

ค่าใช้จ่ายที่สูง และเป็นผลให้การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายการแลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างแม่นยำนั้น เป็นทางเลือกที่ประหยัด และมีความเหมาะสม และในกรณีของการใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขเพื่อช่วยในการทำนายการแลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ถึงแม้จะสามารถช่วยในการทำนายได้ดี แต่เนื่องจากการทำนายโดยตัวเลขนั้น เมื่อมีค่าตัวแปรบางตัวของระบบกระจกติดมู่ลี่เปลี่ยนไป เช่น มู่ลี่มีมุมเอียงที่เปลี่ยนไป เป็นต้น จะก่อให้เกิดเงื่อนไขขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งทำให้ต้องวิเคราะห์ และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใหม่ในทุก ๆ ครั้ง จึงทำให้การประยุกต์ใช้ยังเป็นไปได้ยาก ในขณะที่หากสามารถหาวิธีการที่สามารถคำนวณได้ง่าย ถึงแม้ว่าจะให้ผลลัพท์ที่มีความแม่นยำน้อยลงไปบ้างน่าจะเป็นประโยชน์มากกว่าสำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ ดังนั้นในบทความนี้จึงมุ่งเน้นอยู่ที่การพัฒนาวิธีการอย่างเรียบง่ายที่ช่วยในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนี้ได้ง่ายขึ้น และมีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้

2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม

ความร้อนที่เข้าสู่อาคารเนื่องจากระบบกระจกทั่ว ๆ ไปนั้นจะเป็นความร้อนที่เกิดเนื่องจากกลไกหลัก 2 อย่างคือการนำความร้อน และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

$$Q = UA(t_{out} - t_{in}) + (SHGC)AE_t \qquad (1)$$

เมื่อ Q คือค่าความร้อนรวมที่เข้าสู่อาคาร U คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม t_{in} คือค่าอุณหภูมิภายใน t_{out} คือค่าอุณหภูมิภายนอก $SHGC$ คือค่า Solar Heat Gain Coefficient A คือค่าพื้นที่กระจก E_t คือค่ารังสีที่ตกกระทบ

โดยค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนั้นจะสัมพันธ์กับค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบกระจกดังสมการที่ 2

$$U = 1/R_{tot} \qquad (2)$$

เมื่อ R_{tot} คือค่าความต้านทานความร้อนรวม

และค่าความต้านทานความร้อนรวมนี้ จะเป็นผลรวมของความต้านทานความร้อนของผิวในแต่ละด้านของกระจก/มู่ลี่ นั่นคือ

$$R_{tot} = \sum_{i=1}^{n+1} R_i \qquad (3)$$

โดยที่ R_i คือค่าความต้านทานความร้อนของแต่ละด้าน n คือจำนวนชั้นของระบบกระจก

ค่าความต้านทานความร้อนที่ผิวนี้จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาว โดยจะมีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันตามลักษณะทางกายภาพ ดังนี้

ที่ผิวกระจกด้านนอก

$$R_i = \frac{1}{h_{c,out} + h_{r,out}} + \frac{0.5d}{k_i} \qquad (4)$$

ที่ผิวกระจกด้านใน

$$R_i = \frac{1}{h_{c,in} + h_{r,in}} + \frac{0.5d}{k_i} \qquad (5)$$

ที่ระหว่างชั้นกระจก และระหว่างกระจก/มู่ลี่

$$R_i = \frac{1}{h_{c,gap} + h_{r,gap}} + \frac{0.5d_i}{k_i} + \frac{0.5d_{i+1}}{k_{i+1}} \qquad (6)$$

เมื่อ $h_{c,x}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน $h_{r,x}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาว k_i คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ d คือความหนาของวัสดุ, ดัชนี x แทน in , out และ gap

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนต่าง ๆ นั้น มักจะหาค่าได้จากการทดลอง และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาว จะหาค่าได้จากผลต่างของ radiative heat flux ของแต่ละชั้นกระจก/มู่ลี่ หารด้วยผลต่างของอุณหภูมิของแต่ละชั้นกระจก/มู่ลี่ โดยค่า radiative heat flux จะมีความสัมพันธ์แบบทั่ว ๆ ไปคือ

$$Q_{si}^r = \sigma\varepsilon_{si}\theta_{si}^4 + R_{i,i}^f Q_{s\,2i-2}^r + T_{i,i}^f Q_{s\,2i+1}^r \qquad (7)$$

เมื่อ Q_{si}^r คือค่ารังสีรวมที่ผิว σ คือค่า Stefan-Bolzman constant ε_{si} คือค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาว θ คือค่าอุณหภูมิผิวกระจก/มู่ลี่ $R_{i,i}^f$ คือค่าการสะท้อนของรังสีคลื่นยาว $T_{i,i}^f$ คือค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาว $Q_{s\,2i-2}^r$ คือค่า radiative heat flux ของพื้นผิวที่ 2i-2 $Q_{s\,2i+1}^r$ คือค่า radiative heat flux ของพื้นผิวที่ 2i+1

3. การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวกระจกด้านนอกกับอากาศภายนอก

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกนั้นสามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ [6] ดังนี้

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ต้นลม (windward side of the building)

$$h_0 = 8.07 \cdot V^{0.605} \quad \text{ถ้า } V > 2 \ m/s \qquad (8)$$

$$h_0 = 12.27 \quad \text{ถ้า } V < 2 \ m/s \qquad (9)$$

ที่ด้านของอาคารที่อยู่ใต้ลม (leeward side of the building)

$$h_0 = 18.64(0.3 + 0.05V)^{0.605} \qquad (10)$$

เมื่อ V คือค่าความเร็วลมภายนอก, m/s

สำหรับการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวนั้นมักจะพิจารณาให้อากาศภายนอกเป็นพื้นผิวดำ (black body surface) ดังนั้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวภายนอก คือ

$$h_{r,out} = \frac{Q_{s1}^{r} - Q_{sky}^{r}}{t_{s1} - t_{out}} \quad (11)$$

4. การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างชั้นกระจก

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนนี้จะมีความสัมพันธ์กับ Nusselt number ดังนี้

$$h_{gap} = \frac{k \cdot Nu}{\omega} \quad (12)$$

เมื่อ k คือค่า thermal conductivity ของก๊าซระหว่างชั้นกระจก ω คือความกว้างของช่องกระจก Nu คือ Nusselt number

โดยที่ Nusselt number นั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่า Rayleigh number ดังสมการที่ 13 [6]

$$Nu = \left[1 + \left(0.0303 Ra^{0.402}\right)^{11}\right]^{0.091} \quad (13)$$

โดยที่

$$Ra = Gr \cdot \Pr \quad (14)$$

เมื่อ Gr คือ Grashof number และ $\Pr$ คือ Prandtl number

โดยค่า Gr จะสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซดังนี้

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2\omega^3\Delta\theta}{\mu^2} \quad (15)$$

เมื่อ g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก β คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวของอากาศ ρ คือค่าความหนาแน่นของก๊าซ μ คือค่าความหนืดของก๊าซ θ คือค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของกระจกทั้งสองด้าน

โดยที่ค่าคุณสมบัติของก๊าซที่อยู่ในช่องกระจกต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาค่าได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยของกระจกทั้งสองด้าน และจะมีค่าที่ถูกเปลี่ยนให้สอดคล้องกับค่าอุณหภูมิใหม่ทุกครั้งที่มีการคำนวณ

และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกคือ

$$h_{r,gap} = \frac{Q_{si}^{r} - Q_{si-1}^{r}}{t_{si} - t_{si-1}} \quad (16)$$

5. การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวมู่ลี่ด้านในกับอากาศภายในห้อง

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในส่วนนี้จะเกิดจากการระบายความร้อนออกจากตัวมู่ลี่เข้าสู่ห้อง โดยถ้าสมมติให้มู่ลี่นั้นเป็นระนาบเสมือนที่ถูกติดตั้งเข้าไปกับระบบกระจก ค่าการพาความร้อนในส่วนนี้อาจจะประยุกต์ใช้แบบจำลองของกระจกได้ นั่นคือ [6]

$$h_{c,in} = 1.77\left(\left|t_{s2n} - t_{in}\right|\right)^{0.25} \quad (17)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวในส่วนนี้จะมีค่าที่เท่ากับ

$$h_{r,in} = \frac{Q_{s2n}^{r} - Q_{room}^{r}}{t_{s2n} - t_{in}} \quad (18)$$

อย่างไรก็ตามค่า Q_{s2n}^{r} นี้จะมีค่าที่แตกต่างกับกรณีของกระจก โดยสำหรับกระจกนั้น เนื่องจากมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียว ค่า radiative heat flux จึงประกอบไปด้วยแค่ 2 ส่วน นั่นคือ การสะท้อนรังสีคลื่นยาวและการเปล่งรังสีคลื่นยาว ในขณะที่มู่ลี่นั้นจะมีค่า radiative heat flux ทั้ง 3 ส่วน นั่นคือ การสะท้อนรังสีคลื่นยาว การเปล่งรังสีคลื่นยาว และการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวอันเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่ที่มีลักษณะเป็นใบซ้อน ๆ กันทำให้รังสีสามารถลอดผ่านได้ นอกจากนั้นค่าคุณสมบัติที่เกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนความร้อนเหล่านี้ยังคงขึ้นกับมุมเอียงของมู่ลี่อีกด้วย โดยการหาค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวเหล่านี้จะหาค่าได้จากการพิจารณาให้มู่ลี่เป็นระนาบเสมือน ที่มีค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวที่สอดคล้องกับมู่ลี่จริง ที่เป็นฟังก์ชันของค่าการสะท้อนที่ผิวมู่ลี่ และมุมเอียงของมู่ลี่

6. การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผิวกระจกและมู่ลี่

การแลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนนี้ถือได้ว่ามีความยุ่งยากมากที่สุดอันเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของมู่ลี่เอง ที่มีลักษณะที่เป็นใบซ้อน ๆ กัน และสามารถปรับเปลี่ยนมุมเอียงได้ ทำให้มีค่าคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความร้อนที่หลากหลาย ซึ่งต่างกับกรณีของกระจกที่เป็นเนื้อกระจกล้วน ๆ และมีค่าคุณสมบัติที่ตายตัว

โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระจกกับกระจกนั้น จะเกิดขึ้นในสองโหมดหลัก นั่นคือ การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกทั้งสอง ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4

ในขณะที่มู่ลี่นั้นมีลักษณะที่เป็นใบซ้อน ๆ กัน และสามารถปรับเปลี่ยนมุมเอียงได้ นั่นคือ การแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นนอกจากจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนในสองโหมดหลัก คือ การพาความร้อน และการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับมู่ลี่แล้วนั้น จะยังมีการแลกเปลี่ยนความร้อนอีกส่วนหนึ่ง คือ ส่วนที่การแผ่รังสีคลื่นยาวจากกระจกลอดระหว่างใบของมู่ลี่ออกมา และเกิดแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายในห้องโดยตรง

จากลักษณะทางกายภาพดังกล่าวจึงเป็นผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนส่วนนี้จะประกอบไปด้วย 3 โหมดหลัก นั่นคือ

- การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่, $q_{c,blind}$
- การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับมู่ลี่, $q_{r,exchange}$
- การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับอากาศภายในห้อง, $q_{r,transmit}$

จากลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวจึงทำให้การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้ต้องประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ 3 ตัว นั่นคือ

- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่, $h_{c,blind}$
- ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวที่ส่งผ่านระหว่างใบของมู่ลี่เข้ามาภายในห้อง, $h_{r,transmit}$
- ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่, $h_{r,exchange}$

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้ ยังไม่มีการเสนอให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้งานได้ทั่ว ๆ ไป เหมือนกรณีของช่องกระจก โดยสิ่งหลัก ๆ ที่ได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตนั้น มีเพียงค่าปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนที่สัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ เท่านั้น

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยทั่วไปนั้น สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์ [7]

$$h = \frac{-k_f \, \partial T / \partial y \big|_{y=0}}{t_s - t_a} \tag{19}$$

เมื่อ T คือค่าฟังก์ชั่นการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศ t_s คือค่าอุณหภูมิของพื้นผิว t_a คือค่าอุณหภูมิอากาศ k_f คือค่าการนำความร้อนของชั้นอากาศเหนือพื้นผิว (air layer)

จากสมการที่ 19 จะเห็นได้ว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นจำเป็นต้องทราบถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ภายในช่องระหว่างผิวกระจก และมู่ลี่ โดยการกระจายตัวของอุณหภูมินี้ยังคงขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของอากาศอีกด้วย นอกจากนั้นเงื่อนไขขอบเขตของระบบก็มีความซับซ้อน จึงเป็นผลให้การหาผลเฉลยแบบแม่นตรงนั้นเป็นไปได้ยาก

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในส่วนนี้ ในปัจจุบันจึงได้มีการนำวิธีเชิงตัวเลข [1-2,10] มาช่วยในการแก้ปัญหา เพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของอากาศ (velocity profile) และ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิ (temperature distribution) จากนั้นจึงนำค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ เหล่านั้น มาหาการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เกิดขึ้น เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่จุดต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวม (U) ในที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหานั้นประกอบด้วยขั้นตอนเป็นจำนวนมาก และแต่ละขั้นตอนก็ยังยุ่งยากอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ถ้ามองในอีกมุมหนึ่งนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้ จะมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่แลกเปลี่ยนกันแบบง่าย ๆ คือ

$$q_x = h_x \left(t_g - t_a\right) \tag{20}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้เป็น

$$h_x = \frac{q_x}{\left(t_g - t_a\right)} \tag{21}$$

จากสมการที่ 21 จะเห็นได้ว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์นั้นอาจกระทำได้อีกทาง และหลีกเลี่ยงการหาค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศที่ยุ่งยาก โดยการหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทแทน ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายกว่า ดังนั้นในบทความนี้ก็จะใช้แนวทางนี้เป็นแนวทางเพื่อทำให้ปัญหาการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในโหมดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่ได้ง่ายขึ้น

โดยค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทในส่วนของการพาความร้อนและค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านนั้นสามารถหาค่าได้จากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอย (regression analysis) ที่เสนอโดย Collins [8] และมีค่าดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อน เมื่อ b มีหน่วยเป็น มม. และ t มีหน่วยเป็น $^\circ C$

ค่าตัวแปร	$q_{c,blind}$, W/m^2	$q_{r,transmit}$, W/m^2
constant	-77.761 ± 1.634	29.822 ± 9.574
b	1.309 ± 0.228	-0.434 ± 0.132
t_g	2.178 ± 0.157	-1.811 ± 0.128
ε_b	16.17 ± 6.436	-15.422 ± 9.892
ε_g	5.083 ± 2.271	-96.784 ± 7.998
q_b	-0.339 ± 0.004	-0.032 ± 0.047
$\cos\phi$	-17.337 ± 11.461	-13.485 ± 1.550
b^2	-0.034 ± 0.005	-
bt_g	0.012 ± 0.003	0.012 ± 0.002
$b\varepsilon_b$	-0.393 ± 0.119	-
$b\varepsilon_g$	-	0.228 ± 0.108
bq_b	0.009 ± 0.001	0.002 ± 0.001
$b\cos\phi$	0.810 ± 0.211	-
t_g^2	0.014 ± 0.003	0.019 ± 0.002
$t_g\varepsilon_b$	-0.182 ± 0.085	0.563 ± 0.070
$t_g\varepsilon_g$	-0.212 ± 0.095	4.183 ± 0.077
$t_g q_b$	0.002 ± 0.001	0.001 ± 0.000
$t_g\cos\phi$	-0.254 ± 0.151	0.654 ± 0.123
ε_b^2	-	8.689 ± 4.587
$\varepsilon_b\varepsilon_g$	-	-13.458 ± 3.604
$\varepsilon_b q_b$	0.056 ± 0.024	-0.111 ± 0.019
$\varepsilon_g q_b$	-	-0.221 ± 0.022
$q_b\cos\phi$	-0.160 ± 0.042	-

โดยสมการสำหรับหาค่าปริมาณความร้อนโดยการพา และค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านโดยการแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวกระจกกับอากาศภายในห้องนี้ สามารถหาค่าได้โดยคูณตัวแปรทางด้ายซ้ายมือด้วยค่าที่อยู่ในตาราง เมื่อ b คือระยะระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ ε_b คือค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่ ε_g คือค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของกระจก q_b คือค่าปริมาณความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ในตัวมู่ลี่ ϕ คือมุมเอียงของมู่ลี่วัดเทียบกับแนวระดับ

จากค่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการพาระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่ และค่าปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านมู่ลี่เข้ามาในห้อง สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างกระจกกับมู่ลี่โดยเฉลี่ย ได้ดังนี้

$$h_{c,blind} = \frac{q_{c,blind}}{t_g - t_a} \tag{22}$$

และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับอากาศภายในห้องโดยเฉลี่ย ดังนี้

$$h_{r,transmit} = \frac{q_{r,transmit}}{t_g - t_a} \tag{23}$$

เมื่อ $q_{c,blind}$ คือค่าปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นระหว่างผิวกระจกกับมู่ลี่ $q_{r,transmit}$ คือค่าปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่ส่งผ่านมู่ลี่เข้ามาภายในห้องโดยการแผ่รังสีคลื่นยาว t_g คือค่าอุณหภูมิผิวกระจกด้านใน t_a คือค่าอุณหภูมิอากาศภายในห้อง

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างกระจกกับมู่ลี่โดยตรงนั้น จะหาค่าได้ก็ต่อเมื่อรู้ค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวของมู่ลี่ ที่เป็นฟังก์ชันของค่าการสะท้อนที่ใบมู่ลี่ และมุมเอียงของใบมู่ลี่ โดยค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวเหล่านี้ สามารถหาค่าได้จากการพิจารณาให้มู่ลี่เป็นระนาบเสมือน โดยรายละเอียดนั้นจะอยู่ในหัวข้อถัดไป

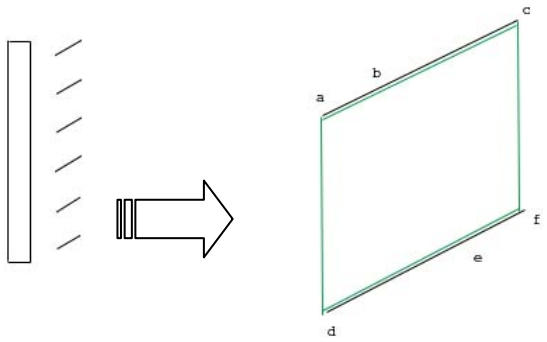
7. ระนาบเสมือนของมู่ลี่

นอกเหนือจากการที่กระจกส่งผ่านรังสีคลื่นยาวผ่านมู่ลี่เข้ามาแล้วนั้น อีกส่วนหนึ่งกระจกก็จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างมู่ลี่เองอีกด้วย เนื่องจากค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวตัวของมู่ลี่นั้นมีค่าที่แตกต่างกับของกระจก และสามารถแปรเปลี่ยนได้โดยจะแปรตามค่าการสะท้อนที่ผิวของมู่ลี่ และมุมเอียงของมู่ลี่

ดังนั้นเพื่อเป็นการคำนวณหาค่าคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อให้เป็นระนาบเสมือนประกอบเข้าไปกับระบบกระจก ดังนั้นจะทำการจำลองให้มู่ลี่นั้นประกอบไปด้วยพื้นผิวปิดหลาย ๆ ผิว ที่วางซ้อน ๆ กันอยู่ โดยแต่ละพื้นผิวปิดจะประกอบไปด้วยมู่ลี่สองใบ และพื้นผิวที่แทนอากาศด้านหน้า และด้านหลัง โดยจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานดังนี้คือ

- ทุก ๆ พื้นผิวปิดนั้น มีลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมือนกัน ดังนั้น การพิจารณาพื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยสามารถที่จะใช้เป็นตัวแทนของมู่ลี่รวมทั้งหมดได้
- ในแต่ละพื้นผิวปิดนั้น พื้นที่ผิวต่าง ๆ นั้นที่ประกอบกันเป็นพื้นผิวปิด มีค่าคุณสมบัติการสะท้อน การเปล่งรังสีคลื่นยาว และค่าอุณหภูมิที่คงที่ตลอดพื้นผิว
- มู่ลี่มีความยาวมากกว่าความกว้างมู่ลี่มาก และเกิดการแลกเปลี่ยนรังสีในแบบ 2 มิติ
- แต่ละพื้นผิวในพื้นผิวปิดมีลักษณะเป็นแบบ flat plate

จากสมมติฐานที่กำหนดขึ้น และทำวิเคราะห์แบบผิวปิดโดยให้พื้นผิวปิดหนึ่งหน่วยประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว [9]



รูปที่ 1 แสดงการจำลองพื้นผิวปิด 1 หน่วย เป็นตัวแทนของมู่ลี่รวมทั้งหมด โดยแต่ละพื้นผิวปิดประกอบไปด้วยพื้นผิว 6 ผิว

เมื่อ พื้นผิวที่ 1 คือพื้นผิว ab พื้นผิวที่ 2 คือพื้นผิว bc พื้นผิวที่ 3 คือพื้นผิว de พื้นผิวที่ 4 คือพื้นผิว ef พื้นผิวที่ 5 คือพื้นผิว ad และพื้นผิวที่ 6 คือพื้นผิว cf

จากการกำหนดพื้นผิวปิดดังแสดงในรูปที่ 1 จะทำให้ได้ค่าคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนรังสีคลื่นยาวของมู่ลี่ ตามความสัมพันธ์ดังนี้

ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวด้านหน้า

$$\varepsilon_f = \frac{G_5}{\sigma T^4} \tag{24}$$

ค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$\varepsilon_b = \frac{G_6}{\sigma T^4} \tag{25}$$

ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวด้านหน้า

$$T^f = \frac{G_6}{G_{front}} \tag{26}$$

ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวด้านหน้า

$$R^f = \frac{G_5}{G_{front}} \tag{27}$$

ค่าการดูดกลืนรังสีด้านหน้า

$$A^f = \frac{\varepsilon_{top}\left(A_1G_1 + A_2G_2\right) + \varepsilon_{bottom}\left(A_3G_3 + A_4G_4\right)}{A_{front}\,G_{front}} \tag{28}$$

หรือ

$$A^f = 1 - \frac{\left(G_5 + G_6\right)}{G_{front}} \tag{29}$$

ค่าการส่งผ่านรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$T^b = \frac{G_5}{G_{back}} \tag{30}$$

ค่าการสะท้อนรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$R^b = \frac{G_6}{G_{back}} \tag{31}$$

ค่าการดูดกลืนรังสีคลื่นยาวด้านหลัง

$$A^b = \frac{\varepsilon_{top}\left(A_1G_1 + A_2G_2\right) + \varepsilon_{bottom}\left(A_3G_3 + A_4G_4\right)}{A_6G_{back}} \tag{32}$$

หรือ

$$A^b = 1 - \frac{\left(G_5 + G_6\right)}{G_{back}} \tag{33}$$

เมื่อ G_i คือค่ารังสีที่ตกกระทบพื้นผิวใด ๆ G_{front} คือค่ารังสีสมมติที่เข้ามาตกกระทบพื้นผิวปิดที่ผิว 5 G_{back} คือค่ารังสีสมมติที่เข้ามาตกกระทบพื้นผิวปิดที่ผิว 6 A_i คือพื้นที่ผิวของพื้นผิวใด ๆ ε_{top} คือค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของใบมู่ลี่ที่อยู่ด้านบน ε_{bottom} คือค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวของใบมู่ลี่ที่อยู่ด้านล่าง

จากค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวเหล่านี้ จะทำให้สามารถหาค่า radiative heat flux ได้ และจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวระหว่างผิวกระจกด้านในกับมู่ลี่ได้ดังนี้คือ

$$h_{r,exchange} = \frac{Q^r_{s\,2n-2} - Q^r_{s\,2n-1}}{t_{s\,2n-2} - t_{s\,2n-1}} \tag{34}$$

8. การวิเคราะห์

จากการจำลองมู่ลี่เป็นระนาบเสมือนเพื่อค่าคุณสมบัติการแผ่รังสีคลื่นยาวของมู่ลี่ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวต่าง ๆ ที่เหมาะสม จะทำให้สามารถหาค่าความต้านทานความร้อนรวมในแต่ละผิว ความต้านความร้อนรวมของระบบกระจกติดมู่ลี่ทั้งหมด และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกติดมู่ลี่ได้ในที่สุด

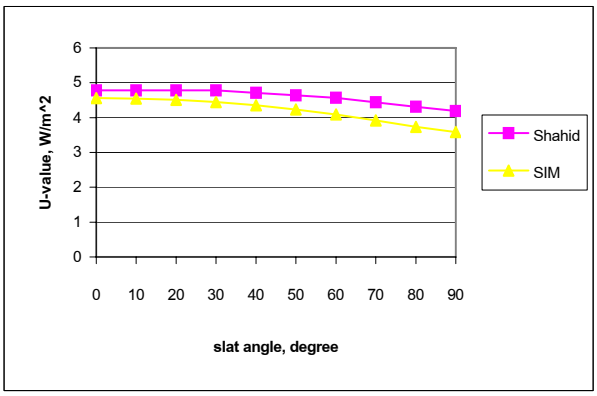
แต่เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ นั้น มีค่าที่แปรตามอุณหภูมิของแต่ละชั้นกระจก/มู่ลี่ ในขณะที่ค่าอุณหภูมิที่ทราบมีเพียงค่าอุณหภูมิภายนอก และภายในเท่านั้น ดังนั้นในการคำนวณจึงจะเริ่มจากการสมมติให้การกระจายตัวของอุณหภูมินั้นเป็นแบบเส้นตรง จากนั้นจึงหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในโหมดต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่สมมติขึ้น จากนั้นจึงทำการทำซ้ำจนคำตอบลู่เข้า และเกิดสมดุลความร้อนในทุก ๆ ส่วนของระบบกระจก/มู่ลี่

จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการคำนวณโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมที่ได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นกับการศึกษาที่ผ่านมาในอดีต ภายใต้สภาวะอากาศแบบเดียวกัน

โดยจะทำการวิเคราะห์ในสองกรณีคือ กรณีกระจกใส 1 ชั้น และกรณีกระจกใส 2 ชั้น ที่มีช่องอากาศเท่ากับ 12.7 มม. โดยกระจกทั้งหมดเป็นกระจกใสหนา 3 มม. และมู่ลี่ที่พิจารณาจะมีความกว้างของใบเท่ากับ 25.4 มม. ระยะห่างระหว่างใบมู่ลี่ 22.28 มม. ใบมู่ลี่หนา 0.16 มม. มีค่าการเปล่งรังสีคลื่นยาวเท่ากับ 0.8 ติดตั้งห่างจากผิวกระจกด้านในเป็นระยะ 40 มม.

9. ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์กระทำโดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมที่ได้จากการคำนวณเทียบกับ ค่าที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขโดย Shahid [10] เมื่อระบบกระจกติดมู่ลี่อยู่ภายใต้ภาวะอากาศมาตรฐานของ ASHRAE summer condition ที่มีค่าการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์เท่ากับศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3

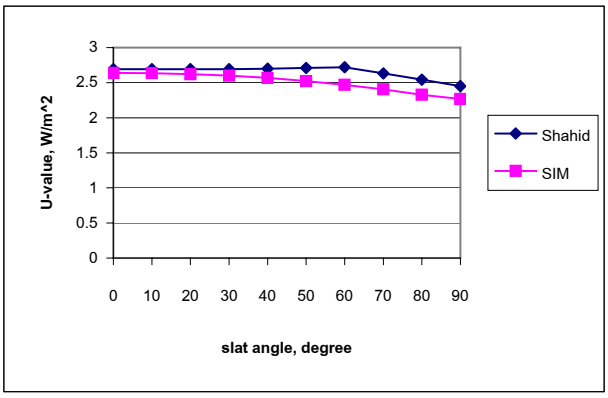


รูปที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมในกรณีของกระจกใส 1 ชั้น

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า U ที่คำนวณได้นั้นมีค่า และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากกรรมวิธีเชิงตัวเลข และมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยที่ความแตกต่างของค่าทั้งสองจะมีค่าที่มากขึ้นเมื่อมุมเอียงของมู่ลี่มากขึ้น ส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากการจำลองการพาความร้อนในส่วนของมู่ลี่เข้าสู่อากาศภายในห้อง

ในการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อากาศภายในห้องนั้นอาจมีค่าที่ใกล้เคียงกับกรณีของพื้นผิวกระจกในกรณีที่

มู่ลี่มีมุมเอียง 0 องศา (ขนานกับแนวระดับ) แต่อย่างไรก็ตามการพาความร้อนออกจากมู่ลี่สามารถมีค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะการเอียงของมู่ลี่ โดยเมื่อมู่ลี่มีการเอียงมากขึ้น อากาศจะสามารถไหลได้ง่ายขึ้น และอาจจะก่อให้เกิดการพาความร้อนที่ดีขึ้น ในขณะที่แบบจำลองนั้นกลับคิดเป็นค่าคงที่เพียงค่า ๆ เดียว และไม่ได้ครอบคลุมในส่วนนี้ จึงเป็นผลให้ค่าที่คำนวณได้นั้นมีค่าที่น้อยกว่าจากแบบจำลองโดยตัวเลข โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มู่ลี่มีมุมเอียงที่มากขึ้น



รูปที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมในกรณีของกระจกใส 2 ชั้น

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่า U ที่คำนวณได้นั้นมีค่า และแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการศึกษาโดยตัวเลขเช่นกัน และความแตกต่างของค่าที่ทั้งสองก็ยังคงมีลักษณะในแบบเดียวกันกับกรณีของกระจกใส 1 ชั้น กล่าวคือ จะมีความแตกต่างมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของมู่ลี่มีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่าทั้งสองจะมีค่าที่น้อยกว่า อันเป็นผลมาจากในกระจกหลายชั้นนั้นผิวด้านในจะมีค่าใกล้เคียงกับอากาศภายในมากขึ้นเรื่อย ๆ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าน้อยกว่าลักษณะการพาความร้อนน้อยกว่า ความแตกต่างที่เกิดขึ้นก็น้อยตามลงไป โดยที่ความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้นในการหาค่า U ของกระจกใส 1 และ 2 ชั้น เมื่อเทียบกับการศึกษาเชิงตัวเลขจะมีค่าเท่ากับ 13 และ 10 % ตามลำดับ

10. สรุป

จากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าวิธีการที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมของกระจกติดมู่ลี่ได้ค่อนข้างดี และมีความถูกต้องอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้น อาจแก้ไขได้โดยแบ่งลักษณะการพาความร้อนจากมู่ลี่เข้าสู่อากาศภายในห้องให้ละเอียดมากขึ้น หรือหาแบบจำลองการพาความร้อนที่แปรตามมุมเอียงของมู่ลี่ ก็จะทำให้สามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนรวมนี้ได้แม่นยำมากขึ้น นอกจากนั้น วิธีนี้ยังมีลักษณะการใช้งานที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่าย ซึ่งอาจเป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ ที่จะใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาค่า thermal heat gain และประเมินสมรรถนะเชิงความร้อนของกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ได้ง่ายยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Ye, P., S.J. Harrison, P.H. Oosthuizen, and D. Naylor " Convective Heat Transfer from a Window with a Venetian Blind: Detail modeling," ASHRAE Transaction, vol. 105(2), 1999, pp. 1031 – 1037

[2] Collins, M., S.J. Harrison, D. Naylor, and P.H. Oosthuizen " Heat Transfer from an Isothermal Vertical Surface with Adjacent Heated Horizontal Louvers: Numerical analysis," Transaction of the ASME. Vol. 124, 2002, pp. 1072 – 1077.

[3] Collins, M., S.J. Harrison, D. Naylor, and P.H. Oosthuizen " Heat Transfer from an Isothermal Vertical Surface with Adjacent Heated Horizontal Louvers: Validation," Transaction of the ASME. Vol. 124, 2002, pp. 1078 – 1087.

[4] Duarte, N., D. Naylor, P.H. Oosthuizen, and S.J. Harrison " An Interferometric Study of Free Convection at a Window Glazing with a Heated Venetian Blind," ASHRAE Transaction, vol. 107(2), 2001, pp.390 – 405.

[5] Fang, X.D. "A Study of the U-factor of the Window with a High Reflectivity Venetian Blind," Solar Energy, vol.68(2), 2000, pp. 207 – 214.

[6] Finlayson, E.U., D.K. Arasteh, C. Huizenga, M.D. Rubin, and M.S. Reilly "WINDOW 4.0: Documentation of Calculation Procedures," LBL – 33943, 1993.

[7] Incropera F.P., and D.P. DeWitt, Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, USA, 1985, pp. 288.

[8] Collins, M.R., and S.J. Harrison "Estimating the Solar Heat and Thermal Gain from a Window with an Interior Venetian Blind," ASHRAE Transaction, 2004, pp. 486 – 500.

[9] Yahoda, D.S., and J.L. Wright "Methods for Calculating the Effective Longwave Radiative Properties of a Venetian Blind Layer," ASHRAE Transaction, 2004, pp.463 – 473.

[10] Shahid, H., and D. Naylor "Energy Performance Assessment of a Window with a Horizontal Venetian Blind," Energy and Building, 37(8), 2005, pp. 836 – 843.