

การศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของมู่ลี่

A Study on the Thermal Performance of a Venetian Blind

ศุภกิจ วรศิลป์ชัย¹ สมศักดิ์ ไชยะภินันท์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330

โทร. 0-2218-6610 โทรสาร. 0-2252-2889 Email: fmscyc@eng.chula.ac.th², bspk@hotmail.com¹

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของมู่ลี่ที่ถูกติดตั้งให้เป็นอุปกรณ์บังเงาภายในเข้ากับหน้าต่างกระจก การศึกษาสมรรถนะของมู่ลี่ถูกกระทำโดยพิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านมู่ลี่ที่ถูกติดตั้งเข้ากับกระจกชนิดต่าง ๆ ความหนาต่าง ๆ ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้หน้าต่างกระจกอยู่ 4 ชนิดคือ กระจกใส กระจกสี กระจกสะท้อนแสง และกระจก 2 ชั้น จากการศึกษาพบว่าค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่ซึ่งอยู่ในรูปของ Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) นั้นจะแปรตามค่าทิศทางการตกกระทบของรังสีซึ่งประกอบไปด้วยค่ามุมตกกระทบ และค่ามุม azimuth โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของกระจกใส กระจกสี และกระจก 2 ชั้นที่ชั้นนอกเป็นกระจกใส ในขณะที่กระจกสะท้อนแสงและกระจก 2 ชั้นที่ชั้นนอกเป็นกระจกสีจะแปรตามมุมตกกระทบเป็นหลัก และไม่แปรเปลี่ยนตามค่ามุม azimuth มากนัก และในการศึกษานี้ยังได้พัฒนาค่าดัชนีที่ใช้แสดงค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของมู่ลี่เป็นค่า Interior Solar Attenuation Coefficient (IAC) ที่แปรตามมุมตกกระทบของรังสี และมุม azimuth ของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผิวกระจกภายนอก เพื่อนำไปใช้ในคู่กับการส่งผ่านความร้อนของหน้าต่างกระจกตัวเปล่าชนิดต่าง ๆ มากำหนดเป็นค่าการถ่ายเทความร้อนรวมของหน้าต่างกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่

Abstract

This paper describes a study on the thermal performance of a venetian blind which was installed to the glass window as an interior shading device. The study of the thermal performance of a venetian blind is done by considering the effect on the heat gain through different types and thickness of glass windows installed with a venetian blind. In this study, 4 types of glass window are chosen; clear, tinted, reflective and double pane glass. The study indicates that the heat gain through the glass windows installed with a venetian blind in the form of Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) is varied with the incident and azimuth angle of the solar radiation directed on glass window outer surface especially in clear, tinted and double glass that the outer

glass is clear glass. While the heat gain through reflective and double glasses that the outer glass is tinted glass are not varied as much as that of clear and tinted glass. In this study, the venetian blind thermal performance index in the form of Interior Solar Attenuation Coefficient (IAC) is also developed. This index can be used with the values of heat gain through different types of glass windows to get the values of heat gain through the glass windows installed with a venetian blind as an interior shading device.

1. บทนำ

ในการใช้งานของระบบกระจกภายในอาคารส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กันจะติดตั้งมู่ลี่เพิ่มเติมกับระบบกระจกเสมอ เนื่องจากสาเหตุหลายประการด้วยกัน เช่น ความเป็นส่วนตัว ความสามารถในการควบคุมแสงสว่างจากแสงธรรมชาติ (Daylighting) ความสามารถในการบังเงาและความสามารถในการสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ซึ่งเชื่อกันว่าสามารถที่จะช่วยลดความร้อนที่เข้าสู่อาคารได้ในส่วนหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามในการติดตั้งมู่ลี่เพื่อให้มู่ลี่ช่วยสะท้อนความร้อนออกไปนั้นจะทำให้คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของระบบกระจกนั้นซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติทาง optical ของกระจก และของมู่ลี่ และผลการสะท้อนกลับไปที่กระจกของรังสีภายในระหว่างชั้นกระจกและมู่ลี่ นั้นหมายความว่ามู่ลี่จะมีความสามารถในการช่วยสะท้อนรังสีแสงอาทิตย์ได้มากน้อยแค่ไหนก็จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวกระจกด้วย กระจกที่ต่างชนิดกันเมื่อมีการติดตั้งมู่ลี่เข้าไปจะส่งผลให้มู่ลี่มีความสามารถในการสะท้อนรังสีที่เปลี่ยนแปลงไป และจากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้เกิดความยุ่งยากในการประเมินหาค่าความร้อนที่ถูกส่งผ่านเข้าสู่อาคารซึ่งมีหน้าต่างกระจกติดมู่ลี่มาโดยตลอด ในอดีตที่ผ่านมา ASHRAE [1] ได้พิจารณาค่าสมรรถนะเชิงความร้อนของมู่ลี่อยู่ในรูปของ Interior Solar Attenuation Coefficient (IAC) เป็นค่าเฉลี่ยเพียงค่า ๆ เดียว และสำหรับกระจกใสค่า IAC ที่ถูกกำหนดขึ้นนั้นได้จากการตรวจวัดที่มุมตกกระทบ 35 องศาเพียงมุมเดียว แต่ในความเป็นจริงรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบกระจกและถูกส่งผ่านมู่ลี่เข้าสู่ในห้องเปลี่ยนแปลงตามมุมตกกระทบและมุม azimuth การใช้ IAC เพียงค่า ๆ เดียวเพื่อกำหนดค่าการส่งผ่านความร้อนผ่านกระจกที่ติดมู่ลี่อาจไม่แม่นยำพอ ดังนั้นในบท

ความนี้จะกล่าวถึงการศึกษามุมตกกระทบเชิงความร้อนของมู่ลี่กับหน้าต่างกระจกเมื่อมีมุมตกกระทบ และมุม azimuth ที่แตกต่างกันไป

2. ค่า Solar Heat Gain Coefficient

ความร้อนที่เข้าสู่อาคารเนื่องจากระบบกระจกทั่ว ๆ ไปนั้นจะเป็นความร้อนที่เกิดเนื่องจากกลไกหลัก 2 อย่างคือการนำความร้อน และการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 1

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

- เมื่อ Q คือค่าความร้อนรวมที่เข้าสู่อาคาร, W
 U คือค่าการนำความร้อน, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
 t_{in} คือค่าอุณหภูมิภายใน, $^\circ C$
 t_{out} คือค่าอุณหภูมิภายนอก, $^\circ C$
 $SHGC$ คือค่า Solar Heat Gain Coefficient
 A คือค่าพื้นที่กระจก, m^2
 E_t คือค่ารังสีที่ตกกระทบ, W/m^2

โดยความร้อนในส่วนของการแผ่รังสีนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนของรังสีที่ส่งผ่านโดยตรง และส่วนของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจก และคายออกมาในรูปของความร้อนภายหลัง โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2

$$SHGC_G(\theta) = \tau(\theta) + N_i\alpha(\theta) \quad (2)$$

- เมื่อ $SHGC_G$ คือค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกตัวเปล่า
 τ คือ ค่า transmittance
 α คือ ค่า absorptance
 N_i คือ ค่า inward-flowing fraction
 θ คือ ค่ามุมตกกระทบ

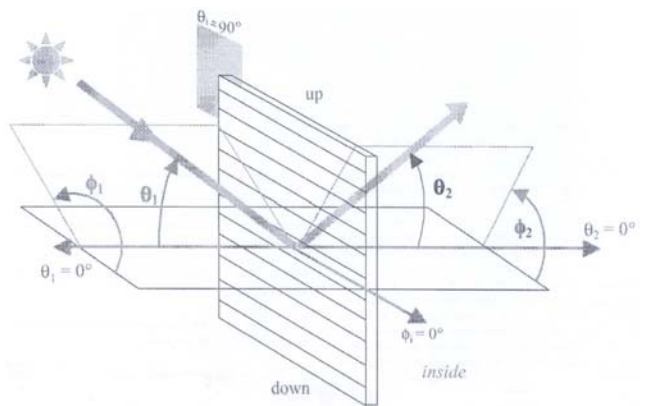
สำหรับกระจกตัวเปล่าซึ่งเป็น specular optical element เส้นทางเดินของรังสีจะมีรูปแบบที่แน่นอน และเส้นทางเดินของรังสีนั้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อมุมตกกระทบเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงเป็นผลให้ค่า SHGC ของกระจกขึ้นกับมุมตกกระทบไปด้วยเป็นไปตามสมการที่ 2

แต่อย่างไรก็ตามในกรณีของกระจกติดตั้งมู่ลี่นั้นค่าความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีนั้นจะมีความซับซ้อนมากขึ้นอันเป็นผลมาจากตัวมู่ลี่ซึ่งเป็น nonspecular optical element ที่ทำให้เส้นทางเดินของรังสีมีลักษณะที่ไม่แน่นอน ทำให้ค่าคุณสมบัติของมู่ลี่ แปรตามมุมตกกระทบ และมุม azimuth (มุม azimuth เป็นมุมเอียงของระนาบของรังสีที่ตกกระทบวัดเทียบกับระนาบในแนวระดับตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 1) จากค่าคุณสมบัติของมู่ลี่นี้เอง จึงเป็นผลให้ค่า SHGC ของระบบมีค่าที่แปรตามมุมตกกระทบและมุม azimuth ไปด้วย และสามารถหาค่าได้จากวิธีการที่เสนอโดย Klems [2,3] ดังสมการที่ 3

$$SHGC_B(\theta, \phi) = T_f(\theta, \phi) + \sum_{i=1}^M N_i A_{fi}(\theta, \phi) \quad (3)$$

- เมื่อ $SHGC_B$ คือค่า Solar Heat Gain Coefficient ของกระจกติดตั้งมู่ลี่
 T_f คือค่า front directional-hemispherical transmittance ของระบบกระจกและมู่ลี่
 A_{fi} คือค่า front absorptance ของแต่ละชั้นกระจก
 N_i คือค่า inward-flowing fraction ของแต่ละชั้นกระจก
 θ คือค่ามุมตกกระทบ
 ϕ คือมุม azimuth

โดยที่ค่า N_i สามารถหาได้จากกรทลอง [4] และ T_f กับ A_{fi} สามารถหาได้จากวิธี Matrix Layer Calculation [2,3]



รูปที่ 1 แสดงนิยามของมุมตกกระทบและมุม azimuth

ดังนั้นค่า IAC ในบทความนี้จะนิยามเป็นค่าความร้อนที่ส่งผ่านกระจกที่มีการติดตั้งมู่ลี่ต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านกระจกกระจกตัวเปล่าเนื่องจากการแผ่รังสีซึ่งจะขึ้นกับทั้งมุมตกกระทบ และมุม azimuth นั้นคือ

$$IAC(\theta, \phi) = \frac{SHGC_B(\theta, \phi)E_t}{SHGC_G(\theta)E_t} \quad (4)$$

หรือ

$$IAC(\theta, \phi) = \frac{SHGC_B(\theta, \phi)}{SHGC_G(\theta)} \quad (5)$$

3. วิธี Matrix Layer Calculation

วิธี Matrix Layer Calculation นี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Klems [2,3] เพื่อที่จะใช้ในการประเมินค่า SHGC ของระบบกระจกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์บังเงาภายใน โดยได้พิจารณาถึงการตกกระทบของรังสีเข้าสู่ระบบกระจกที่มุมตกกระทบต่าง ๆ กัน ทิศทางการวิ่งของรังสี และผลของการสะท้อนกลับไปกลับมาภายในของรังสีระหว่างชั้นของกระจกกับอุปกรณ์บังเงาภายใน เพื่อหาค่าคุณสมบัติทาง optical รวมของระบบและนำไปสู่การหาค่า SHGC ของระบบในที่สุด

โดยในการหาค่าคุณสมบัติทาง optical รวมนั้นจะพิจารณาจากการแบ่งมุม solid angle เพื่อหาค่าคุณสมบัติทาง optical รวมของระบบ

กระจกที่มุมต่าง ๆ โดย Klems ได้พิจารณาแบ่งมุมที่ละ 15 องศา และทำให้สมการคุณสมบัติทาง optical ของระบบกระจกถูกพิจารณาเป็นเมทริกซ์ โดยขนาดเมทริกซ์ก็จะขึ้นอยู่กับมุมและสามารถหาขนาดของมุมได้จาก

$$size = m \times n - (n - 1) \quad (6)$$

เมื่อ m คือจำนวนมุมตกกระทบ

n คือจำนวนมุม azimuth

โดยขนาดเมทริกซ์ที่พิจารณาโดย Klems จะมีขนาดเท่ากับ 145×145 ซึ่งมีขนาดใหญ่และยุ่งยากในการคำนวณ ดังนั้นในบทความนี้จึงได้ทำการปรับลดขนาดของ matrix ที่ใช้คำนวณลงภายใต้สมมติฐานต่าง ๆ ดังนี้คือ

-ระบบกระจกนั้นมีความสมมาตร

เนื่องจากค่าคุณสมบัติทาง optical ของกระจกนั้นมีค่าที่สมมาตรรอบแกนในแนวตั้งของกระจก และเป็นผลให้ค่า SHGC ของระบบกระจกนั้นมีความสมมาตรไปด้วย นั่นคือจากมุม azimuth ที่อยู่ในช่วง $0^\circ < \phi < 180^\circ$ สามารถที่จะพิจารณาช่วงมุมที่เหลืออยู่ในช่วง $0^\circ < \phi < 90^\circ$ ได้ ในขณะที่ค่าคุณสมบัติของระบบต่าง ๆ ยังคงครบถ้วน และสามารถลดขอบเขตของการพิจารณาลงได้

-พิจารณาเฉพาะการแผ่รังสีโดยตรง (direct SHGC)

ในการตกกระทบของรังสีแสงอาทิตย์เข้าสู่อาคารนั้นโดยส่วนใหญ่จะเป็นการตกกระทบของรังสีเหนือแนวระดับของอาคาร นั่นคือค่ามุมตกกระทบของรังสีจะมีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \phi < 90^\circ$ และมุม azimuth จะมีค่าอยู่ในช่วง $0^\circ < \phi < 180^\circ$ ในขณะที่ที่มุมในช่วง $180^\circ < \phi < 360^\circ$ นั้นจะมีผลต่อค่าการกระเจิงของรังสีที่เกิดจากการสะท้อนจากพื้นดิน ซึ่งโดยทั่วไปมีค่าที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับค่าของความร้อนที่ส่งผ่านโดยตรงผ่านระบบกระจก ทำให้ในช่วงมุม $180^\circ < \phi < 360^\circ$ ไม่มีผลต่อการคำนวณและสามารถตัดออกจากการพิจารณาได้

-การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทาง optical ไม่มีค่ามากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุม azimuth

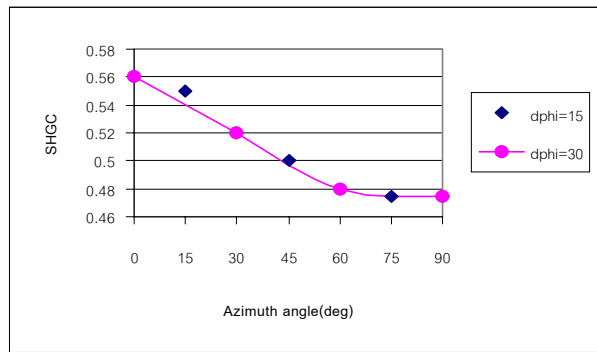
จากรูปที่ 2 ซึ่งแสดงถึงค่า SHGC ที่คำนวณได้จากการแบ่งมุม azimuth ออกเป็น $\Delta\phi = 15^\circ$ และ $\Delta\phi = 30^\circ$ ในกรณีที่มุมตกกระทบ 45 องศา (เนื่องจากว่าที่มุมตกกระทบ 45 องศาเป็นมุมตกกระทบที่แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ย) จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการแบ่งมุมทั้ง 2 แบบ มีค่าที่ใกล้เคียงกันและมีความผิดพลาดไม่มากนัก ดังนั้นจึงได้ขยายช่วงมุม azimuth ของการคำนวณออกเป็น 30 องศา ($\Delta\phi = 30^\circ$) โดยที่ค่า SHGC ที่มุมอื่น ๆ นั้นสามารถหาได้โดยตรงจากการประมาณค่าภายใน(interpolation)

จากสมมติฐานดังกล่าวในบทความนี้จึงพิจารณาค่าการแบ่งมุมดังนี้คือ

-มุมตกกระทบออกเป็น 7 มุมได้แก่ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา

-มุม azimuth ออกเป็น 4 มุมได้แก่ 0, 30, 60 และ 90 องศา

ดังนั้นจะทำให้ได้ขนาดของเมทริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณเท่ากับ



รูปที่ 2 แสดงเปรียบเทียบค่า SHGC ที่ได้จากการแบ่งมุม 15 องศาและ 30 องศาที่มุมตกกระทบเท่ากับ 45 องศา

$size = 7 \times 4 - (4 - 1) = 25$ นั่นคือเมทริกซ์ต้องมีขนาดเท่ากับ 25×25

4. การวิเคราะห์

ในการคำนวณค่า SHGC ของระบบกระจกนั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศทั้งภายนอก และภายในอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม รังสีตกกระทบ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ค่าสภาวะภูมิอากาศมาตรฐานของกรุงเทพมหานครจากงานวิจัยของสมศักดิ์ ไชยะภินันท์ และคณะ [5] และใช้สภาวะอากาศดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลขาเข้าของโปรแกรม WINDOW 5.2 [6] (โปรแกรม WINDOW 5.2 นี้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยกลุ่มวิจัย Window and Daylighting Group ของ Lawrence Berkeley National Laboratory ที่ University of California, Berkeley เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่ดัชนีที่แสดงถึงสมรรถนะเชิงความร้อนของระบบกระจก เช่น ค่าการนำความร้อน ค่า SHGC ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา และค่าการส่งผ่านแสง เป็นต้น) เพื่อหาค่า SHGC ของระบบกระจกตัวเปล่า จากนั้นจึงนำค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่ได้จากโปรแกรม WINDOW 5.2 มาเปรียบเทียบกับค่า SHGC ของกระจกติดมูลิที่คำนวณได้จากวิธี Matrix Layer Calculation แต่เนื่องจากค่า SHGC ของกระจกติดมูลิ้นั้นจะมีค่าที่แปรตามมุมตกกระทบ และมุม azimuth ในขณะที่ค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่ามีค่าที่แปรตามมุมตกกระทบเพียงอย่างเดียว ดังนั้นในการเปรียบเทียบจึงจำเป็นต้องเปรียบเทียบโดยการคงค่ามุม azimuth ไว้ เพื่อที่จะสามารถศึกษาสมรรถนะเชิงความร้อนของมูลิ้นั้นในแต่ละมุมตกกระทบได้ จากนั้นจึงค่อยเปลี่ยนแปลงค่ามุม azimuth เพื่อที่จะศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของมุม azimuth ที่มีต่อค่าสมรรถนะของมูลิ้นั้นในกรณีที่มุม azimuth เปลี่ยนแปลงไป

โดยหน้าต่างกระจกที่ใช้ในการศึกษาจะประกอบไปด้วย กระจกใสที่มีความหนาตั้งแต่ 3 มม. ถึง 12 มม. กระจกสีชนิดต่าง ๆ ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน กระจกสะท้อนแสงและกระจก 2 ชั้น โดยรายละเอียดต่าง ๆ ของกระจกจะแสดงในตารางที่ 1 และ 2 และลักษณะของมูลิ้นั้นจะพิจารณามูลิที่มีลักษณะดังนี้คือ

-ความกว้างของใบมูลิ 17.6 มม.

-ระยะห่างระหว่างมูลิ 14 มม.

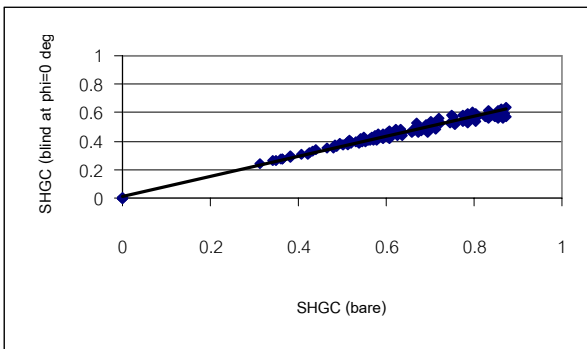
-ค่าการสะท้อนเท่ากับ 0.62 ($\rho = 0.62$)

เนื่องจากมีผู้ลักษณะดังกล่าวสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในอาคารสำนักงาน และสำหรับมุมเอียงของมู่ลี่จะพิจารณาที่มุมเอียง 45 องศา เนื่องจากเป็นลักษณะการใช้งานที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป

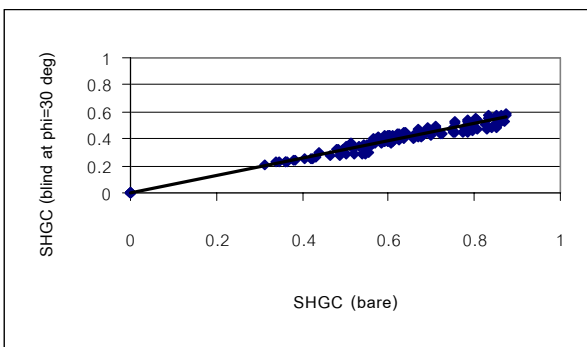
5. ผลการวิเคราะห์

ผลจากการวิเคราะห์ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 15

รูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบของค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าและกระจกติดมู่ลี่ที่มุม azimuth ต่าง ๆ กัน (ซึ่งความชันของกราฟคือค่า IAC) โดยลักษณะการพล็อตจะเป็นการพล็อตค่า SHGC เทียบกันที่ทุก ๆ มุมตกกระทบโดยคงค่ามุม azimuth ไว้ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่า SHGC ของกระจกใสและกระจกสีที่มีการติดตั้งมู่ลี่นั้นจะมีค่าที่แปรผันโดยตรงกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่า และจะยังคงความสัมพันธ์แบบเส้นตรงนี้ไปจนถึงมุม azimuth เท่ากับ 30 องศา จากกราฟดังกล่าวทำให้เห็นได้ว่าค่า IAC นั้นมีแนวโน้มว่าจะแปรตามค่ามุม azimuth เท่านั้นในช่วงมุม azimuth มีค่าเท่ากับ 0 ถึง 30 องศา



รูปที่ 3 แสดงค่า SHGC ของกระจกใส และสีติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่มุม azimuth 0 องศา



รูปที่ 4 แสดงค่า SHGC ของกระจกใส และสีติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่มุม azimuth 30 องศา

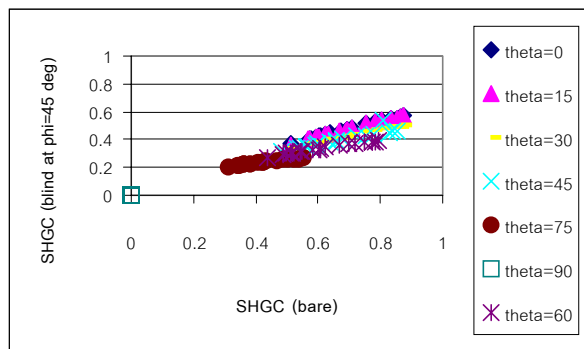
แต่หลังจากมุม azimuth มีค่าเท่ากับ 45 องศาเป็นต้นไปจะเห็นว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้จะไม่เกาะกลุ่มเป็นเส้นตรงเส้นเดียวอีกต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 แต่จะมีการแยกออกไปตามแต่มุมตกกระทบของรังสี อันเป็นผลเนื่องมาจากที่มุม azimuth สูง ๆ ลักษณะทางเดินของรังสีจะเริ่มชนตัวมู่ลี่มากขึ้น และทำให้เกิดการสะท้อนมากขึ้นเมื่อมุมตกกระทบมีค่ามากขึ้น และเป็นผลให้ค่า SHGC มีค่าแตกต่างกันในแต่ละทิศของการตกกระทบที่เป็นฟังก์ชันของ θ และ ϕ แต่อย่างไรก็ตาม

ตามความสัมพันธ์ที่ได้ก็ยังคงเป็นเส้นตรงอยู่ เพียงแต่ค่าความชัน (หรือ IAC) จะมีค่าที่แตกต่างกันในแต่ละทิศของการตกกระทบ และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความหนา ชนิดของกระจกไม่ว่าจะกระจกใสหรือกระจกสีต่างก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน นั่นคือในการติดตั้งมู่ลี่เข้ากับกระจกใสและกระจกสี 1 ชั้นนั้นจะมีสมรรถนะที่ใกล้เคียงกันโดยที่ไม่ขึ้นกับชนิดของกระจกและความหนา โดยค่าความสัมพันธ์จะมีลักษณะเส้นตรงคือ

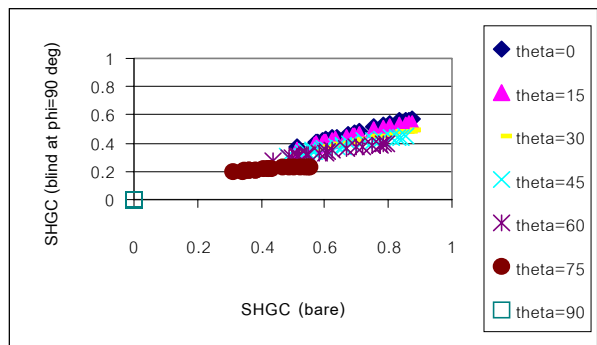
$$SHGC_B(\theta, \phi) = A \cdot SHGC_G(\theta) + B \quad (6)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ A และ B สามารถหาได้จากตารางที่ 3

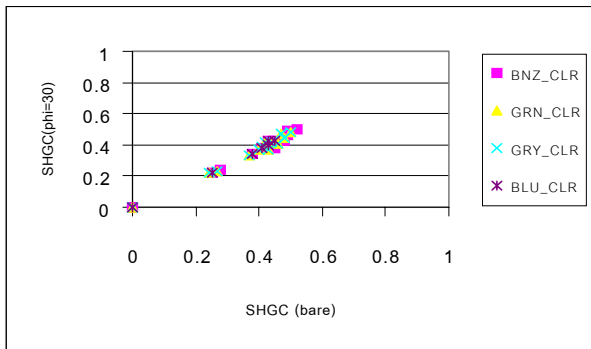
รูปที่ 7 และ 8 แสดงค่าการเปรียบเทียบของค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่และกระจกตัวเปล่า ในกรณีของกระจก 2 ชั้นที่ติดมู่ลี่กับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่า 2 ชั้นจะมีความสัมพันธ์เกาะกลุ่มกันแบบเส้นตรงไม่ว่ากระจกชั้นนอกจะเป็นกระจกสีชนิดไหนก็ตาม และความสัมพันธ์นี้ยังคงเป็นจริงจนกระทั่งที่มุม azimuth มีค่าเท่ากับ 90 องศา ดังที่แสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 7 และ 8 นั่นคือค่า IAC นั้นจะขึ้นกับมุม azimuth เป็นหลักและไม่แปรเปลี่ยนตามมุมตกกระทบมากนัก เนื่องมาจากว่ากระจกสีชั้นนอกนั้นมีการดูดกลืนที่ค่อนข้างสูง ทำให้รังสีส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนไว้ และรังสีปริมาณน้อยเท่านั้นที่จะตกกระทบมู่ลี่และเป็นผลให้อิทธิพลของมู่ลี่ลดลงไป และทำให้ค่า IAC มีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่า IAC ที่ได้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4



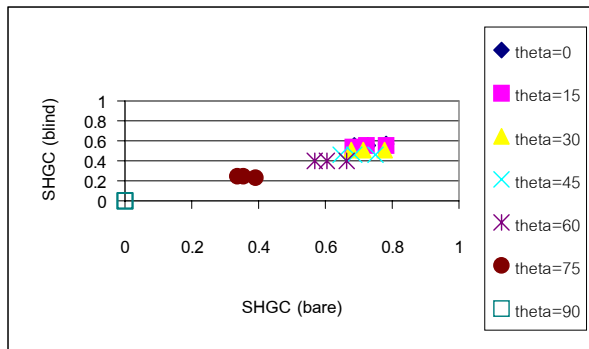
รูปที่ 5 แสดงค่า SHGC ของกระจกใส และสีติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่มุม azimuth 45 องศา



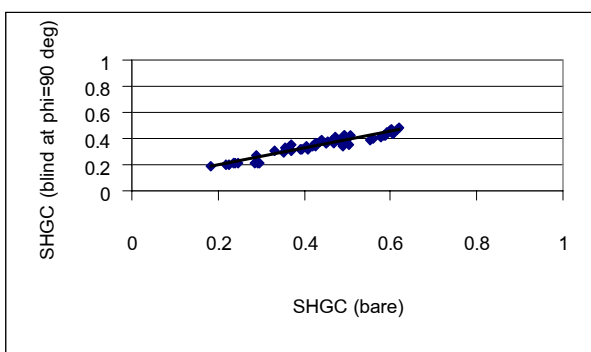
รูปที่ 6 แสดงค่า SHGC ของกระจกใส และสีติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่มุม azimuth 90 องศา



รูปที่ 7 แสดงค่า SHGC ของกระจก 2 ชั้นติดมู่ลี่ที่กระจกชั้นนอก เป็นกระจกใสเทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่า 2 ชั้นที่มุม azimuth 30 องศา



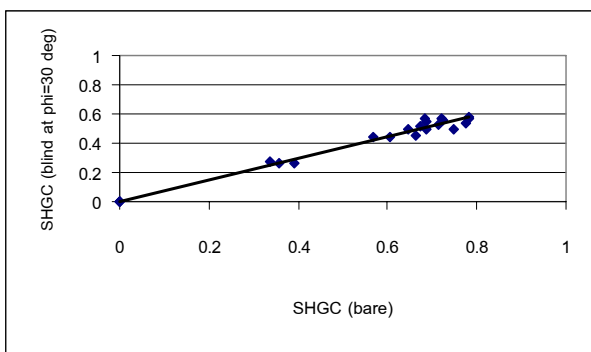
รูปที่ 10 แสดงค่า SHGC ของกระจก 2 ชั้นติดมู่ลี่ที่กระจกชั้นนอก เป็นกระจกใสเทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่า 2 ชั้นที่มุม azimuth 60 องศา



รูปที่ 8 แสดงค่า SHGC ของกระจก 2 ชั้นติดมู่ลี่ที่กระจกชั้นนอก เป็นกระจกใสเทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าที่มุม azimuth 90 องศา

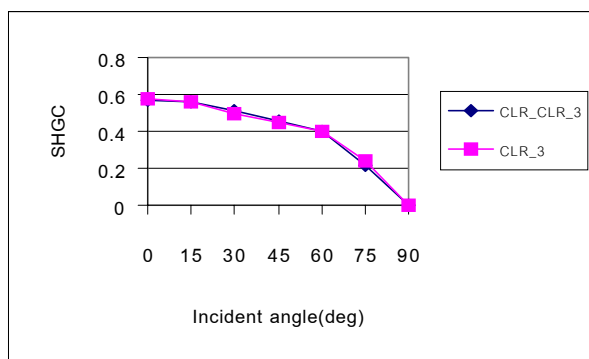
แต่อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระจก 2 ชั้นเป็นกระจกใสทั้งคู่ ทั้งชั้นนอกและชั้นในนั้นค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่จะมีค่าที่สัมพันธ์กับกรณีกระจกตัวเปล่าแบบเส้นตรงที่มุม azimuth จาก 0 ถึง 30 องศาเหมือนกรณีของกระจก 1 ชั้น โดยหลังมุม 45 องศาเป็นต้นไปค่าที่ได้จะมีค่าค่อนข้างกระจายในทุก ๆ มุมตกกระทบดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

แต่เนื่องจากปริมาณกระจกที่ใช้มีไม่มากนักจึงอาจจะต้องทำวิจัยเพิ่มเติมในส่วนนี้เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์และแนวโน้มต่าง ๆ ได้มากขึ้น



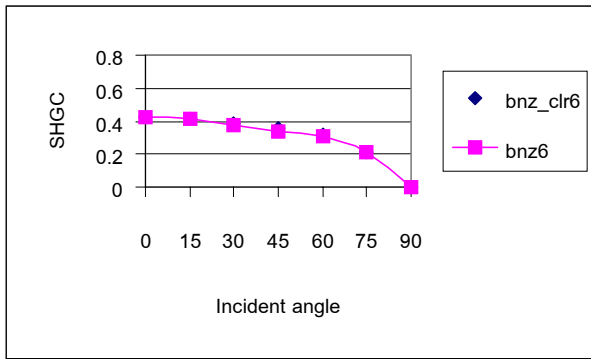
รูปที่ 9 แสดงค่า SHGC ของกระจก 2 ชั้นติดมู่ลี่ที่กระจกชั้นนอก เป็นกระจกใสเทียบกับค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่า 2 ชั้นที่มุม azimuth 30 องศา

รูปที่ 11 และ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่ของกรณีกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้น โดยที่สำหรับกระจก 2 ชั้นกระจกชั้นนอกเป็นกระจกใสที่มีชนิดเดียวกันกับของกระจก 1 ชั้นและมีกระจกชั้นในเป็นกระจกใส ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่า SHGC ของกระจกทั้ง 2 ชนิดจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันในทุก ๆ มุมตกกระทบ ทุกมุม azimuth ทุกชนิด และทุกความหนา ซึ่งหมายความว่ากระจก 1 ชั้น และ กระจก 2 ชั้นเมื่อติดตั้งมู่ลี่แล้วจะมีการถ่ายเทความร้อนในส่วนของกรณีรังสีที่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่กระจก 2 ชั้นมีความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ในเนื้อกระจกมากกว่า(เพราะมีจำนวนกระจกมากกว่า) ถึงแม้ว่าการติดตั้งมู่ลี่เข้ากับกระจก 2 ชั้นจะสามารถช่วยลดความร้อนได้ แต่ความร้อนที่เข้ามาสู่อาคารกลับลดลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับกระจก 1 ชั้นที่มู่ลี่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าและสามารถสะท้อนความร้อนออกจากอาคารได้มากกว่า



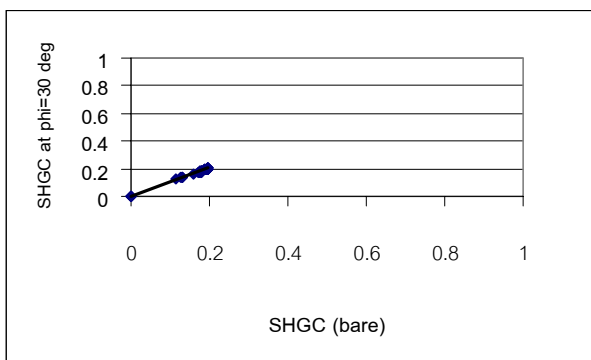
รูปที่ 11 แสดงค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่ของกรณีกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกใสหนา 3 มม.

รูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15 แสดงค่าการเปรียบเทียบของค่า SHGC ของกระจกตัวเปล่าและกระจกติดมู่ลี่ ในกรณีของกระจกสะท้อนแสงชนิดต่าง ๆ จากรูปจะเห็นว่าสมรรถนะในการลดความร้อนของมู่ลี่เมื่อทำการติดตั้งเข้ากับระบบกระจกนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารสะท้อนที่

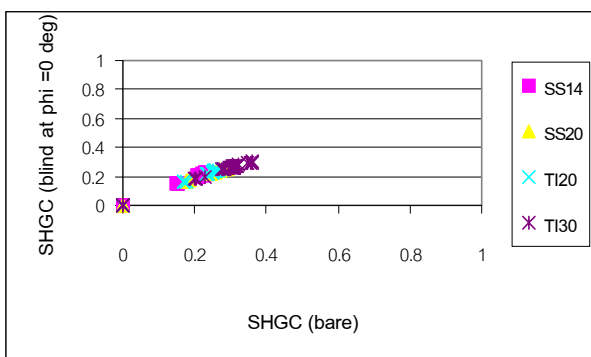


รูปที่ 12 แสดงค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่ของกรณีกระจก 1 ชั้น และกระจก 2 ชั้นเมื่อกระจกชั้นนอกเป็นกระจกสีเงินหนา 6 มม.

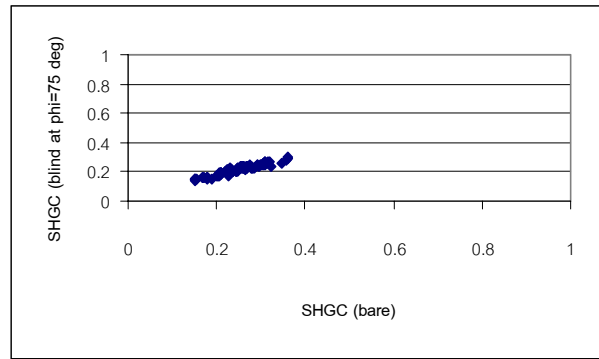
เคลือบเป็นหลัก โดยสารเคลือบชนิดต่าง ๆ ก็จะทำให้ค่าสมรรถนะที่แตกต่างกันออกไป โดยที่สารเคลือบ Stainless Steel 8 จะมีค่า SHGC ที่แทบจะไม่แตกต่างจากกระจกตัวเปล่า ในขณะที่กระจกเคลือบชนิดอื่น ๆ การติดตั้งมู่ลี่สามารถที่จะช่วยลดความร้อนได้ในส่วนหนึ่ง โดยที่สารเคลือบชนิด SS14, SS20, TI20 และ TI30 จะมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน และค่า IAC ที่ได้จะมีแนวโน้มความสัมพันธ์กับค่า SHGC ของกระจกเคลือบตัวเปล่าแบบเส้นตรงในทุก ๆ มุม azimuth



รูปที่ 13 แสดงค่า SHGC ของกระจกเคลือบชนิด Stainless Steel 8 เทียบกับค่า SHGC ของกระจกเคลือบตัวเปล่าที่มุม azimuth 30 องศา



รูปที่ 14 แสดงค่า SHGC ของกระจกเคลือบชนิดต่าง ๆ ติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกชนิดเคลือบตัวเปล่าที่มุม azimuth 0 องศา



รูปที่ 15 แสดงค่า SHGC ของกระจกเคลือบชนิดต่าง ๆ ติดมู่ลี่เทียบกับค่า SHGC ของกระจกชนิดเคลือบตัวเปล่าที่มุม azimuth 75 องศา

6. สรุป

จากการศึกษานี้จะเห็นได้ว่าการติดตั้งมู่ลี่นั้นจะมีผลให้ค่า SHGC ของระบบซับซ้อนขึ้นและมีค่าที่แปรตามมุมตกกระทบ และมุม azimuth แต่อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของค่า SHGC ของกระจกติดมู่ลี่กับค่า SHGC ก็สามารถแทนได้ด้วยค่า IAC โดยที่ค่า IAC นี้จะมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นตรง และค่าที่ได้จะขึ้นกับมุมตกกระทบ และมุม azimuth มากแต่ไหนนั้นจำเป็นต้องพิจารณาชนิดของกระจกประกอบด้วย

จากความเชื่อที่ว่า การติดตั้งมู่ลี่นั้นจะสามารถช่วยลดความร้อนเข้าสู่อาคารได้นั้นจะเป็นจริงในบางกรณีเท่านั้น โดยที่ความสามารถในการลดความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของกระจกด้วยว่าเป็นกระจกประเภทไหน โดยที่กระจกประเภทต่าง ๆ จะส่งผลให้สมรรถนะของมู่ลี่ที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับว่ากระจกชนิดนั้น ๆ จะมีความเหมาะสมกับการติดตั้งมู่ลี่มากน้อยเพียงใด ดังนั้นความเข้าใจในองค์ประกอบต่าง ๆ ดังกล่าวน่าจะมีประโยชน์โดยตรงต่อสถาปนิก และวิศวกรเพื่อที่จะสามารถประเมินความร้อนที่เข้าสู่อาคารของกระจกติดมู่ลี่ และสามารถเลือกส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบกระจกเพื่อใช้งานในอาคารได้อย่างเหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- [1] ASHRAE. ASHRAE Handbook of Fundamentals. USA, 2001.
- [2] Klems, J.H. A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: 1. Overview and Derivation of the Matrix Layer Calculation. ASHRAE Transactions. 100 (1): 1065-1072, 1994.
- [3] Klems, J.H. A new method for predicting the solar heat gain of complex fenestration systems: 2. Detailed Description of the Matrix Layer Calculation. ASHRAE Transactions. 100 (1): 1073-1086, 1994.
- [4] Klems, J.H., and G.O. Kelly. Calorimetric measurement of inward-flowing fraction for complex glazing and shading systems. ASHRAE Transactions. 102(1): 947-954, 1996.

- [5] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ เขมชาติ มังกรศักดิ์สิทธิ์ และสุรสิทธิ์ ทองจินทรัพย์. ข้อมูลภูมิอากาศมาตรฐานสำหรับใช้กับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการทำนายการใช้พลังงานของอาคาร. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, ธันวาคม 2542.
- [6] WINDOW 5.2, <http://windows.lbl.gov/>
- [7] Klems, J.H., and J.L. Warner. Measurement of bi-directional Properties of Complex shading devices. ASHRAE Transactions. 101(1): 791-801, 1995.
- [8] Klems, J.H., and J.L. Warner. Solar Heat gain Coefficient of complex fenestrations with a Venetian blind for differing slat tilt angles. ASHRAE Transactions. 103(1), 1997.
- [9] Klems, J.H., and J.L. Warner, et al. A comparison between calculated and measured SHGC for complex glazing systems. ASHRAE Transactions. 102(1): 931-939, 1996.
- [10] Cho, S.H., K.E. Shin, and M.Z. Uddin. The effect of slat angle of windows with venetian blinds on heating and cooling loads of buildings in South Korea. Energy. 20: 1225-1236, 1995.

ตารางที่ 1 แสดงชนิดของกระจก 1 ชั้นที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	T	Rf	Rb	SHGC (0)	ชนิดกระจก	ความหนา (มม.)	T	Rf	Rb	SHGC (0)
CLR_3	3	0.848	0.076	0.076	0.874	SS8GRY_6	6	0.039	0.152	0.478	0.268
CLR_4	4	0.823	0.074	0.074	0.864	SS8BLU_6	6	0.036	0.144	0.479	0.194
CLR_5	5	0.811	0.072	0.072	0.854	SS14CLR_6	6	0.107	0.267	0.444	0.232
CLR_6	6	0.809	0.072	0.072	0.833	SS14BNZ_6	6	0.065	0.130	0.443	0.229
CLR_8	8	0.766	0.069	0.069	0.805	SS14GRN_6	6	0.062	0.136	0.444	0.225
CLR_10	10	0.734	0.067	0.067	0.785	SS14GRY_6	6	0.064	0.128	0.442	0.229
CLR_12	12	0.705	0.065	0.065	0.756	SS14BLU_6	6	0.060	0.121	0.442	0.227
BNZ_3	3	0.634	0.059	0.059	0.711	SS20CLR_6	6	0.153	0.208	0.388	0.292
BNZ_4	4	0.580	0.057	0.057	0.672	SS20BNZ_6	6	0.094	0.107	0.382	0.271
BNZ_5	5	0.531	0.053	0.053	0.638	SS20GRN_6	6	0.090	0.110	0.389	0.267
BNZ_6	6	0.482	0.051	0.051	0.604	SS20GRY_6	6	0.090	0.106	0.387	0.268
GRN_3	3	0.610	0.059	0.059	0.694	SS20BLU_6	6	0.086	0.101	0.388	0.267
GRN_5	5	0.513	0.055	0.055	0.625	TI20CLR_6	6	0.143	0.215	0.399	0.276
GRN_6	6	0.470	0.054	0.054	0.594	TI20BNZ_6	6	0.092	0.118	0.399	0.259
GRY_3	3	0.585	0.059	0.059	0.693	TI20GRN_6	6	0.089	0.107	0.399	0.259
GRY_5	5	0.477	0.053	0.053	0.608	TI20GRY_6	6	0.085	0.111	0.398	0.255
GRY_6	6	0.436	0.048	0.048	0.571	TI30BLU_6	6	0.082	0.101	0.399	0.255
SKYBLU_6	6	0.450	0.060	0.060	0.577	TI30CLR_6	6	0.223	0.155	0.330	0.360
SKYBLU_8	8	0.360	0.060	0.060	0.514	TI30BNZ_6	6	0.144	0.090	0.329	0.316
SS8CLR_6	6	0.065	0.335	0.476	0.177	TI30GRN_6	6	0.134	0.085	0.331	0.309
SS8BNZ_6	6	0.040	0.157	0.478	0.194	TI30GRY_6	6	0.133	0.087	0.331	0.309
SS8GRN_6	6	0.038	0.165	0.478	0.191	TI30BLU_6	6	0.126	0.081	0.328	0.305

หมายเหตุ

CLR = clear, BNZ = bronze, GRN = green, GRY = gray, SKYBLU = skyblue, BLUGRN = bluegreen, SS = stainless steel reflective coating,

TI = titanium reflective coating

T = Solar transmittance, R = Solar Reflectance, SHGC(0) = Solar Heat Gain Coefficient at 0 angle of incident

ตัวเลขด้านหลังสัญลักษณ์ตัวของกระจกเป็นความหนาของกระจกหน่วยเป็นมิลลิเมตร

ตารางที่ 2 แสดงชนิดของกระจก 2 ชั้นที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดกระจก	ช่องอากาศ (มม.)	T	Rf	Rb	A1	A2	SHGC(0)
CLR_CLR_3	6	0.727	0.131	0.131	0.081	0.062	0.772
CLR_CLR_6	6	0.663	0.120	0.120	0.126	0.091	0.732
CLR_CLR_8	6	0.600	0.112	0.112	0.172	0.116	0.691
BNZ_CLR_3	6	0.544	0.091	0.118	0.321	0.045	0.616
BNZ_CLR_6	6	0.396	0.068	0.105	0.483	0.052	0.499
GRN_CLR_3	6	0.529	0.091	0.119	0.343	0.037	0.601
GRN_CLR_6	6	0.397	0.075	0.108	0.488	0.040	0.494
GRY_CLR_3	6	0.502	0.085	0.118	0.372	0.041	0.580
GRY_CLR_6	6	0.358	0.062	0.104	0.532	0.048	0.466
GRY_CLR_8	6	0.243	0.054	0.098	0.658	0.045	0.371
BLUGRN_CLR_6	6	0.413	0.077	0.110	0.466	0.043	0.508
BLUGRN_CLR_8	6	0.331	0.069	0.102	0.557	0.043	0.441

ดูหมายเหตุในตารางที่ 1

ตารางที่ 3 แสดงค่า IAC ของกระจกใส และสี 1 ชั้นที่มุม azimuth ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา

Phi	Coefficient	Theta=0	15	30	45	60	75
0	A	0.7217					
	B	0					
15	A	0.6826					
	B	0					
30	A	0.6434					
	B	0					
45	A	0.5551	0.5604	0.4554	0.449	0.3211	0.2545
	B	0.0885	0.0838	0.1134	0.0983	0.1392	0.1291
60	A	0.5551	0.5334	0.4268	0.3619	0.3211	0.1719
	B	0.0885	0.0919	0.1215	0.1366	0.1392	0.1473
75	A	0.5551	0.5229	0.4285	0.3709	0.3268	0.1651
	B	0.0885	0.095	0.1207	0.1341	0.1376	0.1489
90	A	0.5551	0.5124	0.4301	0.3799	0.3325	0.1583
	B	0.0885	0.0982	0.1200	0.1316	0.1360	0.1504

ตารางที่ 4 แสดงค่า IAC ของกระจก 2 ชั้นที่มีกระจกชั้นนอกเป็นกระจกสี ที่มุม azimuth ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา

Coefficient	phi=0	15	30	45	60,75,90
A	0.6709	0.6671	0.6633	0.6612	0.6592
B	0.0960	0.0855	0.0750	0.0698	0.0646

ตารางที่ 5 แสดงค่า IAC ของกระจกชนิดเคลือบ ที่มุม azimuth ตั้งแต่ 0 ถึง 90 องศา

Coefficient	phi=0	15	30	45	60,75,90
A	0.7081	0.6990	0.6899	0.6854	0.6810
B	0.0508	0.0497	0.0486	0.0481	0.0476