

## การเลือกฟิล์มสำหรับหน้าต่างกระจกของอาคาร โดยพิจารณาผลของความสบายเชิงความร้อน A Selection of Films for Building's Glass Windows Considering Thermal Comfort Effect

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์<sup>1\*</sup> นพรัตน์ คำพร<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม ถ. เพชรเกษม กรุงเทพมหานคร 10160

\*Email: [fmescy@eng.chula.ac.th](mailto:fmescy@eng.chula.ac.th)

Somsak Chaiyapinunt<sup>1\*</sup> Nopparat Khamporn<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai, Bangkok 10330

<sup>2,3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Siam University, Petchkasem, Bangkok 10160

\*Email: [fmescy@eng.chula.ac.th](mailto:fmescy@eng.chula.ac.th)

### บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการศึกษาเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งจะทำให้สามารถนำไปเลือกฟิล์มเพื่อใช้กับหน้าต่างกระจกของอาคารในการลดการส่งผ่านความร้อนและยังคงความสบายเชิงความร้อนของผู้ใช้อาศัยในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้ ดัชนีความสบายเชิงความร้อนที่ใช้ในการศึกษานี้คือค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) ซึ่งค่าดัชนีดังกล่าวจะสามารถแบ่งเป็นค่า PPD จากผลของอุณหภูมิผิวและ ค่า PPD จากผลของการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงที่ตกกระทบต่อผู้อยู่อาศัย ฟิล์มประเภทต่าง ๆ ถูกนำมาติดกับหน้าต่างกระจกใส และทำการการศึกษาเพื่อหาการส่งผ่านความร้อนและความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มดังกล่าว จากการศึกษาค้นคว้าพบว่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนจะแปรตามค่าการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีรวมของกระจกติดฟิล์ม และค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการส่องสว่างถูกนำมากำหนดเป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้ในการเลือกฟิล์ม ความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการส่องสว่างของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มกับค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการดูดกลืนรังสีรวมและค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มแต่ละประเภทถูกพัฒนาขึ้น ซึ่งทำให้สามารถกำหนดความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ดังกล่าวกับค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนเพื่อนำไปเป็นเกณฑ์ในการเลือกฟิล์มติดกระจกที่เหมาะสมได้

**คำหลัก** หน้าต่างกระจก ฟิล์ม ความสบายเชิงความร้อน

### Abstract

This paper describes a study for defining the parameters to use for film selection to apply to the building's glass windows in reducing heat gain while maintaining certain acceptable thermal comfort condition for the occupants. The thermal comfort index used in this study is Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). This index can be divided into PPD due to surface temperature effect and PPD due to solar radiation effect directed on the occupants. Different types of film are chosen to be applied on a clear glass windows. The study is carried out to find heat gain and thermal comfort index for glass windows with films. It is found from the study that the thermal comfort index is varied with total transmittance and absorptance of glass windows with films. Visible transmittance is chosen to be one of the parameters to use for film selection. The relationship between the visible transmittance and total transmittance, absorptance and other properties of each type of glass windows with films are developed. Therefore the relationship between the such parameters and thermal comfort index can be developed to use as the criteria for proper film selection.

**Keywords:** glass window, film, thermal comfort

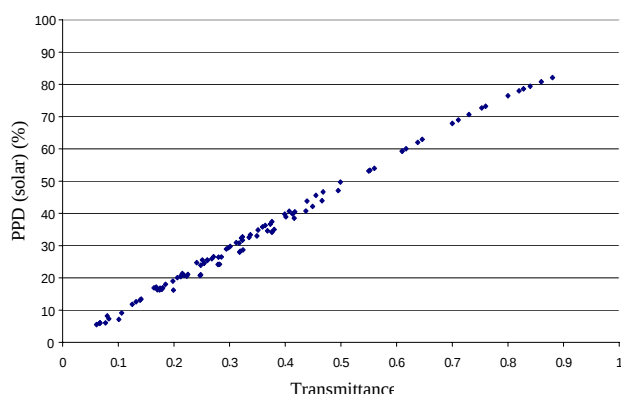
## 1. บทนำ

หน้าต่างกระจกเป็นกรอบอาคารแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างมากของอาคารสำนักงานและอาคารพาณิชย์ส่วนใหญ่ในประเทศไทย ในขณะที่หน้าต่างกระจกทำหน้าที่เป็นส่วนที่ช่วยให้ผู้อยู่อาศัยสามารถรับแสงสว่าง เห็นทิวทัศน์ด้านนอก แต่ในขณะเดียวกันหน้าต่างกระจกก็จะรับความร้อนจำนวนมากจากแสงอาทิตย์เข้าสู่ภายในอาคารโดยตรง ก่อให้เกิดเป็นภาระการทำความเย็นจำนวนมากที่ต้องกำจัดออกจากอาคารเพื่อรักษาภาวะภายในอาคารให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ประกอบกับประเทศไทยได้มีการออกพระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 และได้มีการออกกฎกระทรวงเพื่อควบคุมไม่ให้อาคารที่เข้าข่ายควบคุมทั้งเก่าและที่จะสร้างใหม่นั้นมีกรอบอาคารที่ส่งผ่านความร้อนเข้าสู่อาคารเกินค่าที่กำหนด ดังนั้นกรอบอาคารใดที่มีการส่งผ่านพลังงานความร้อนเกินค่าที่กำหนด เจ้าของอาคารจะต้องทำการปรับปรุงกรอบอาคารนั้นเพื่อให้การส่งผ่านพลังงานความร้อนอยู่ในค่าที่กำหนด การปรับปรุงกรอบอาคารอาจทำได้โดยนำฟิล์มกรองแสงมาติดเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติการส่งผ่านพลังงานความร้อนของหน้าต่างกระจก การเลือกใช้ฟิล์มกรองแสงที่เหมาะสมจำเป็นต้องมีความเข้าใจคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามความยาวคลื่นของกระจกตัวเปล่า และของฟิล์มที่จะนำมาติด แต่ปัญหาก็คือ ค่าข้อมูลทางเทคนิคของฟิล์มกรองแสงที่มีขายในประเทศไทยมักจะมีน้อย และไม่พอเพียงในการที่จะนำไปใช้วิเคราะห์สมรรถนะของหน้าต่างกระจกภายหลังการติดตั้งฟิล์ม ข้อมูลที่ให้มักจะมีอ้างอิงกับกระจกใสเพียงอย่างเดียว ข้อมูลที่ให้มักจะเป็น ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงของการมองเห็น (Visible Transmittance) ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา (Shading Coefficient) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar Heat Reduction) เป็นต้น มักไม่มีการให้ข้อมูลเชิง optic ที่แปรตามความยาวคลื่น ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงของรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสี ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการเลือกกระจกติดฟิล์มในแง่ความสบายเชิงความร้อน และการส่งผ่านความร้อน ดังนั้นบทความนี้จะกล่าวถึงการพัฒนาพารามิเตอร์สำคัญจากข้อมูลทั่วไปของฟิล์มกรองแสงเพื่อนำไปเลือกหน้าต่างกระจกติดฟิล์มที่เหมาะสมโดยมีการพิจารณาความสบายเชิงความร้อนประกอบไปด้วย

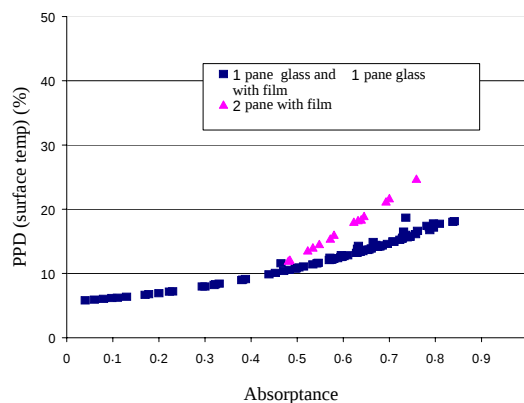
## 2. สมรรถนะของหน้าต่างกระจกติดฟิล์ม

ในการวิเคราะห์ความสบายเชิงความร้อนของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มจำเป็นต้องรู้ค่าคุณสมบัติทาง optic ของหน้าต่างกระจกที่ติดฟิล์มที่แปรตามความยาวคลื่น ค่าคุณสมบัติที่จำเป็นต้องรู้ได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสี (transmittance) ค่าการดูดกลืนรังสี (absorptance) และค่าการสะท้อนรังสี (reflectance) ความยาวคลื่นที่จะพิจารณาจะแบ่งออกเป็น ช่วงการมองเห็น (visible range) ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 360 ถึง 760 นาโนเมตร (.36 ถึง .76 ไมครอน) และช่วงรังสีอินฟราเรดที่มีค่าตั้งแต่ 760 นาโนเมตรขึ้นไปจนถึงประมาณ 3500 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการแผ่รังสีความร้อนคลื่นยาว และช่วงรังสีแสงอาทิตย์ (solar) จะเป็นช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 360 ถึง 2500 นาโนเมตร Chaiyapinunt et al.[1] ได้วิเคราะห์หาสมรรถนะของกระจกติดฟิล์มในแง่ความสบายเชิงความร้อนและการส่งถ่ายความร้อน โดยการใช้ค่าคุณสมบัติทาง optic ที่แปร

ตามความยาวคลื่นของกระจกติดฟิล์ม ค่าดัชนีของความสบายเชิงความร้อนที่เลือกใช้คือ ค่า Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)[2] และค่าดังกล่าวจะสามารถแบ่งออกเป็นค่า PPD ที่เกิดจากผลการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ และค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจก และยังพบว่าค่า PPD ที่เกิดจากผลการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์นั้นจะแปรตามค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ของกระจกติดฟิล์ม และค่า PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกจะแปรตามค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกติดฟิล์ม รูปที่ 1 และ 2 [1] แสดงถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการจะเลือกหน้าต่างกระจกติดฟิล์มโดยพิจารณาในแง่ความสบายเชิงความร้อน จำเป็นต้องรู้ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสี



รูปที่ 1 แสดงถึงดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD ที่เกิดจากการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ที่แปรตามค่าการส่งผ่านรังสีของกระจกและกระจกติดฟิล์ม

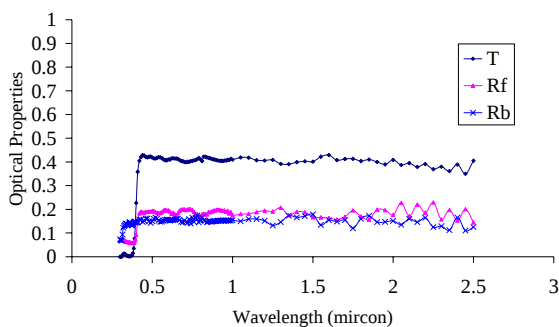


รูปที่ 2 แสดงถึงค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อน PPD ที่เกิดจากผลของอุณหภูมิผิวกระจกที่แปรตามค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกและกระจกติดฟิล์ม

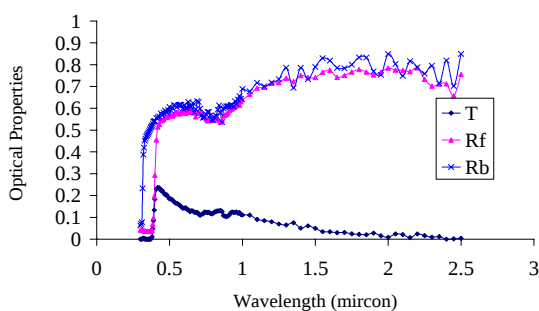
## 3. การวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ได้นำฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายอยู่จำนวน 47 ชนิด (จาก library ของโปรแกรม opti5[3]) มาพิจารณา การพิจารณากระทำโดยตรวจสอบคุณลักษณะของการส่งผ่านรังสีและการสะท้อนรังสีที่แปรตามความยาวคลื่นของฟิล์มแต่ละชนิดและทำการจับกลุ่มของฟิล์มที่มีลักษณะของคุณสมบัติที่มีความคล้ายคลึงกัน ในการศึกษานี้จะ

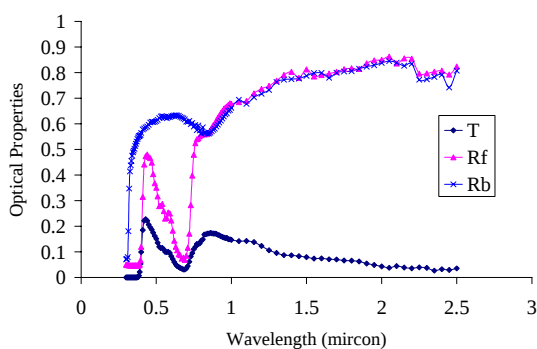
สามารถจับกลุ่มได้ 6 กลุ่ม รูปที่ 3 แสดงถึงตัวอย่างของค่าการส่งผ่านรังสีและค่าการสะท้อนรังสีของฟิล์มทั้ง 6 กลุ่ม ฟิล์มกลุ่มที่ 1 : จะมีลักษณะของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น (visible transmittance) คล้ายคลึงกับลักษณะการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรด โดยมีขนาดใกล้เคียงกัน ในกลุ่มที่ 1 นี้จะมีฟิล์มอยู่ 17 ชนิด ฟิล์มกลุ่มที่ 2 จะมีขนาดของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นมากกว่าขนาดของการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรด ในกลุ่มที่ 2 นี้จะมีฟิล์มอยู่ 13 ชนิด ฟิล์มกลุ่มที่ 3 จะมีลักษณะของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นมีค่ามากตอนต้นและมีค่าลดลงเมื่อความยาวคลื่นมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ลักษณะของการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรดก็จะคล้ายคลึงกัน ในกลุ่มที่ 3 นี้จะมีฟิล์มอยู่ 3 ชนิด ฟิล์มกลุ่มที่ 4 จะมีขนาดของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นสูงมากในขณะที่ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงอินฟราเรดมีค่าน้อย ในกลุ่มที่ 4 นี้มีฟิล์มอยู่ 3 ชนิด ฟิล์มกลุ่มที่ 5 จะมีขนาดของการส่งผ่านรังสีต่ำในช่วงการมองเห็น และมีค่าการส่งผ่านรังสีค่อนข้างสูงมากในช่วงอินฟราเรด (ประมาณ 0.8-0.9) ในกลุ่มที่ 5 นี้จะมีฟิล์มอยู่ 5 ชนิด ฟิล์มกลุ่มสุดท้ายจะมีลักษณะคล้ายฟิล์มกลุ่มที่ 5 แต่จะมีค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นสูงขึ้น ในกลุ่มนี้จะมีฟิล์มอยู่ 6 ชนิด



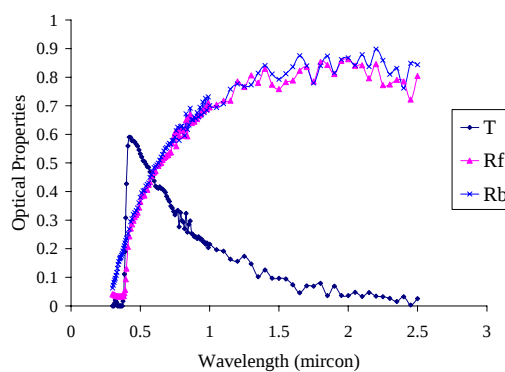
กลุ่มที่ 1



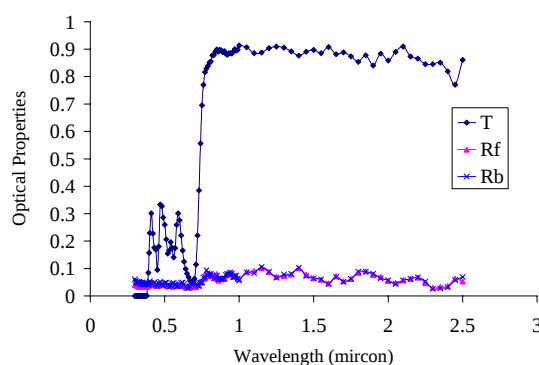
กลุ่มที่ 2



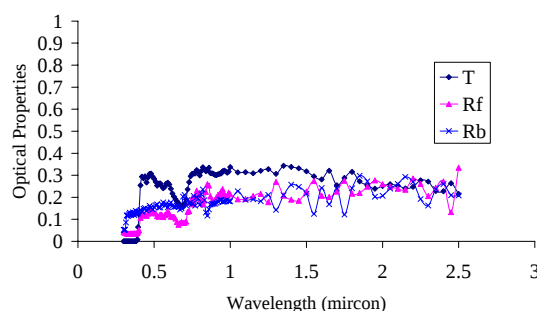
กลุ่มที่ 3



กลุ่มที่ 4



กลุ่มที่ 5



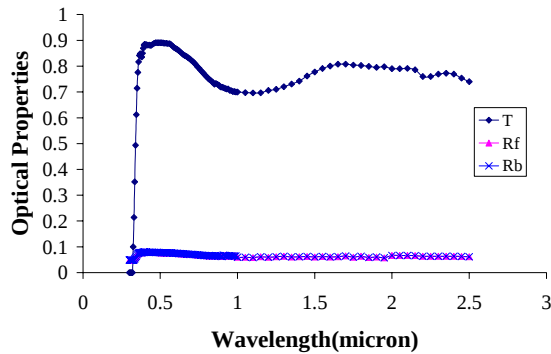
กลุ่มที่ 6

รูปที่ 3 ค่าการส่งผ่านรังสี(T) การสะท้อนรังสีด้านหน้า(Rf) และการสะท้อนรังสีด้านหลัง(Rb) ของฟิล์มกลุ่มต่าง ๆ กัน

จากนั้นจึงนำฟิล์มดังกล่าวมาแปะติดกับกระจกใสหนา 6 มม. ซึ่งกระจกตัวเปล่าดังกล่าวจะมีค่าคุณสมบัติเชิง optic ที่แปรตามความยาวคลื่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของหน้าต่างกระจกที่ติดฟิล์มตามวิธีที่นำเสนอโดย Rubin et al.[4] และ Finalayson et al.[5] ซึ่งได้แก่ ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการสะท้อนรังสี และการดูดกลืนรังสีที่แปรตามความยาวคลื่น ค่าการส่งผ่านรังสี ค่าการสะท้อนรังสี และค่าการดูดกลืนรังสีในรูปรวมในช่วงการมองเห็นและในช่วงของรังสีแสงอาทิตย์ ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา (shading coefficient)

เมื่อได้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ แล้ว จึงนำค่าดังกล่าวมาประมวลเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เข้าไปคำนวณค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนต่อไป ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของหน้าต่างกระจกที่ติดฟิล์มชนิด

ต่าง ๆ ต่อไปนี้ คือ ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ ค่าการดูดกลืนรังสี ค่าสัมประสิทธิ์บังเงา ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นและค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ ค่าการลดลงของความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ (solar heat reduction)



รูปที่ 4 ค่าการส่งผ่านรังสี(T) การสะท้อนรังสีด้านหน้า(Rf) และการสะท้อนรังสีด้านหลัง(Rb) ของกระจกใสหนา 6 มม

ค่าการลดลงของความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์สามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$SHR = \frac{SC_{glass} - SC_{glass\ with\ film}}{SC_{glass}} \times 100 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

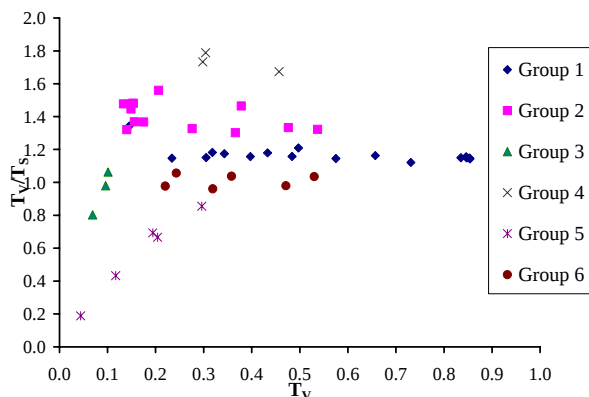
โดยที่ SHR คือ Solar heat reduction เปอร์เซ็นต์

$SC_{glass}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์บังเงาของกระจกตัวเปล่า

$SC_{glass\ with\ film}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์บังเงาของกระจกติดฟิล์ม

#### 4. ผลการวิเคราะห์

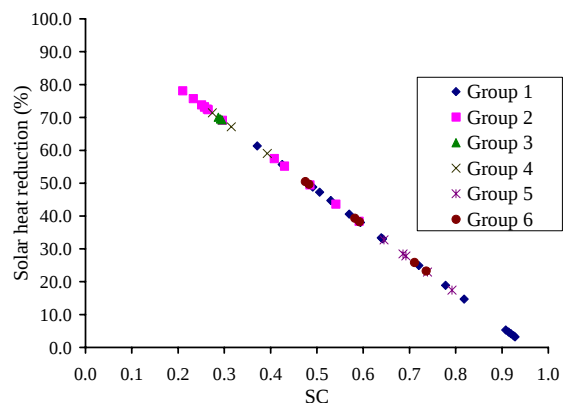
เมื่อนำเอาค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นและค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ของกระจกใสติดฟิล์มทั้ง 6 กลุ่มมาพล็อตเทียบกับค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น จะสามารถเห็นลักษณะความแตกต่างของกระจกใสติดฟิล์มทั้ง 6 กลุ่มอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 5



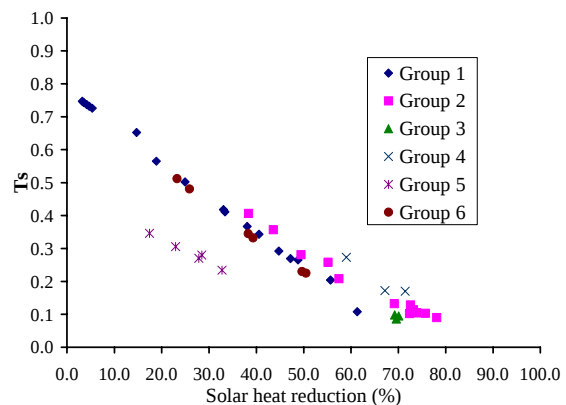
รูปที่ 5 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น( $T_v$ )และค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์( $T_s$ ) กับค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น( $T_v$ )

กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 1 จะมีค่าอัตราส่วนการส่งผ่านรังสีค่อนข้างคงที่และมีค่าอยู่ในช่วง 1.1 - 1.2 ในขณะที่กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 2 จะมีค่าอัตราส่วนการส่งผ่านรังสีแปรตามค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นในลักษณะกระจายและมีค่าอยู่ในช่วง 1.3 - 1.5 กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 3 จะมีค่าอัตราส่วนการส่งผ่านรังสีแปรตามค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นโดยมีค่าประมาณ 0.8 - 1.1 และมีค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นประมาณ 0.06 - 0.1 กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 4 จะมีขนาดของค่าอัตราส่วนการส่งผ่านรังสีค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 1.6 - 1.8 กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 5 จะมีลักษณะการกระจายตัวของค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีแปรตามค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นโดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 - 0.9 และมีค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นอยู่ในช่วง 0.04 - 0.3 และกระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 6 จะมีค่าอัตราส่วนการส่งผ่านรังสีที่ไม่แปรตามค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น และมีค่าประมาณ 1

และเมื่อนำเอาค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์มาพล็อตกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงาจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 และเมื่อนำเอาค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์มาพล็อตกับค่าการลดลงของความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กระจายเป็นกลุ่มเกือบเป็นเส้นตรง 2 ชุด โดยมีกระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 5 แยกออกมาต่างหาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7

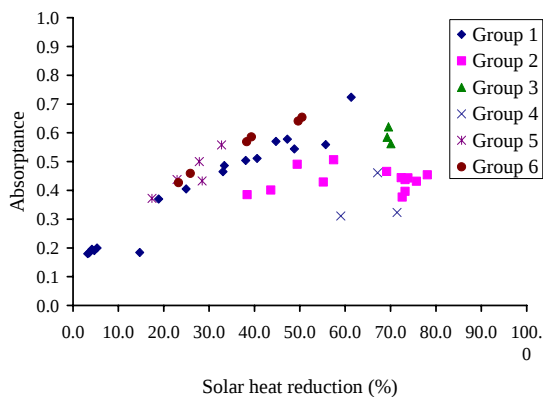


รูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์กับค่าสัมประสิทธิ์บังเงา

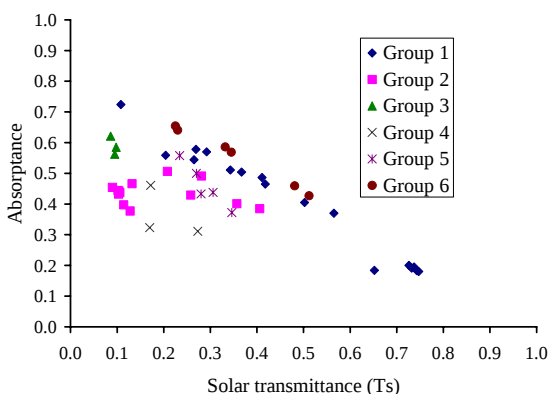


รูปที่ 7 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์( $T_s$ )กับค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์

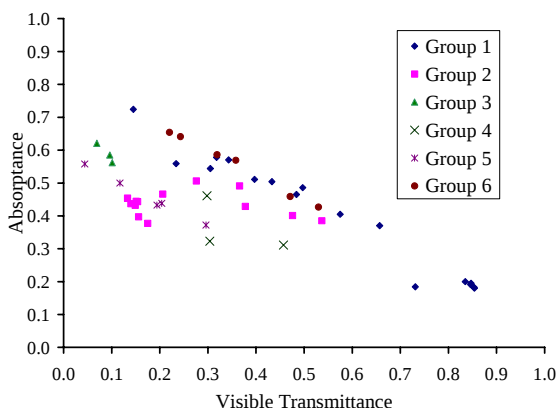
และเมื่อเอาค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกติดฟิล์มทั้ง 6 กลุ่มมาหาความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ตัวอื่น รูปที่ 8 9 และ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนรังสีกับค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนรังสีนั้นไม่ชัดเจนเหมือนกับกรณีของค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์



รูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนรังสีกับค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์

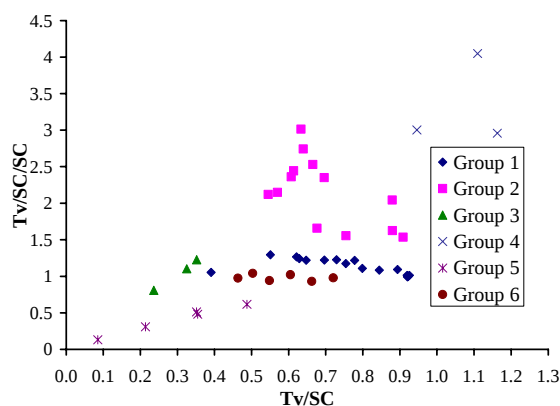


รูปที่ 9 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนรังสี กับค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์(Ts)



รูปที่ 10 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนรังสี กับค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น(Tv)

จากความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่หาได้พอสรุปได้ว่า ในการเลือกใช้ฟิล์มสำหรับอาคารที่พิจารณาในแง่ความสบายเชิงความร้อน ซึ่งต้องการรู้ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกที่ติดฟิล์มแต่ไม่มีข้อมูลดังกล่าว พารามิเตอร์ที่มักถูกกำหนดให้คือ ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาเท่านั้น ขั้นตอนในการเลือกก็คือ นำค่าสัมประสิทธิ์บังเงาของกระจกที่ติดฟิล์มไปทำการหาค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 6 แต่เนื่องจากการที่มีเฉพาะค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงาเท่านั้น จะไม่สามารถกำหนดได้ว่าจะกระจกติดฟิล์มที่พิจารณาอยู่ในกลุ่มไหน ในการศึกษานี้จึงได้หาความสัมพันธ์ชุดใหม่ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับฟิล์มกลุ่มต่าง ๆ ซึ่งพบว่าการแบ่งกลุ่มของฟิล์มกระทำได้โดยการใช้ความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงา และค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากกำลังสอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงา (Tv/SC) และค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากำลังสอง (Tv/SC/SC)

จากรูปที่ 11 กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 1 3 และ 6 จะมีค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากกำลังสองอยู่ในช่วง 1 - 1.5 โดยมีค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงาอยู่ในช่วง 0.2 - 1 ในขณะที่กระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 5 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากำลังสองอยู่ในช่วงต่ำกว่า 1 และกระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 2 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากำลังสองอยู่ในช่วง 1.5 - 3 และกระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 4 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากำลังสองในช่วงเกิน 3 และมีค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงาเกิน 1

จากการที่สามารถกำหนดได้ว่าจะกระจกติดฟิล์มที่พิจารณาอยู่ในกลุ่มฟิล์มชุดไหน ก็จะสามารถนำค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่หาได้ไปหาค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์จากความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 และนำการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ ค่า

การลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ หรือค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ไปหาค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกติดฟิล์มในรูปที่ 8 9 หรือ 10 แต่จะเห็นได้ว่าสำหรับกระจกใสติดฟิล์มกลุ่มที่ 2 ค่าการดูดกลืนรังสีที่หาจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 8 9 หรือ 10 อาจไม่แม่นยำนักเนื่องจากการกระจายตัวของค่าดังกล่าวค่อนข้างเป็นลักษณะสุ่ม

เมื่อได้ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกติดฟิล์ม ก็สามารถคำนวณหาค่าดัชนีความสบายสำหรับกระจกชั้นเดียวติดฟิล์มจากความสัมพันธ์ที่นำเสนอโดย Chaiyapinunt et al.[1] ในรูปที่ 1 และ 2 เป็น

$$PPD(solar) = 96.807T_s - 0.6517 \quad (1)$$

$$PPD(surface\ temperature) = 5.1988e^{1.5063A} \quad (2)$$

โดย

$PPD(solar)$  = Predicted Percentage of Dissatisfied due to solar

$PPD(surface\ temperature)$  = Predicted Percentage of  
Dissatisfied due to surface temperature

$T_s$  = Solar transmittance

$A$  = Absorptance

ความสัมพันธ์ของการหาค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสีที่ได้จากการศึกษานี้สามารถเขียนได้เป็น

$$SHR = -104.28SC + 100 \quad (3)$$

$$\text{for Group 1 and 6} \quad T_s = -0.0109SHR + 0.7799 \quad (4)$$

$$\text{for Group 2 and 3} \quad T_s = 0.0001SHR^2 - 0.0235SHR + 1.1278 \quad (5)$$

$$\text{for Group 4} \quad T_s = -0.0088SHR + 0.7874 \quad (6)$$

$$\text{for Group 5} \quad T_s = -0.007SHR + 0.4693 \quad (7)$$

$$\text{for Group 1 and 6} \quad A = -0.7333T_v + 0.8093 \quad (8)$$

$$\text{for Group 2 and 3} \quad A = 111.24T_v^4 - 149.51T_v^3 + 69.235T_v^2 - 12.925T_v + 1.2666 \quad (9)$$

$$\text{for Group 4} \quad A = -0.5441T_v + 0.5571 \quad (10)$$

$$\text{for Group 5} \quad A = -0.7428T_v + 0.5872 \quad (11)$$

โดยที่  $A$  = ค่าการดูดกลืนรังสี (Absorptance)

$SHR$  = ค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ (Solar heat reduction) (percent)

$SC$  = ค่าสัมประสิทธิ์การบังเงา (Shading coefficient)

$T_s$  = ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ (Solar transmittance)

$T_v$  = ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ (Visible transmittance)

## 5. สรุป

บทความนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาวิธีการที่จะใช้เลือกฟิล์มกรองแสงซึ่งมีข้อมูลคุณสมบัติค่อนข้างจำกัดมาใช้กับหน้าต่างกระจกของอาคารโดยมีการพิจารณาความสบายเชิงความร้อนประกอบไปด้วย ผลการศึกษาได้พัฒนาวิธีการเลือกโดยใช้ค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็น ค่าสัมประสิทธิ์บังเงา ของหน้าต่างกระจกติดฟิล์มเพียง 2 ค่านำมาหาค่าการลดลงของความร้อนจากแสงอาทิตย์ ค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงา และค่าอัตราส่วนของการส่งผ่านรังสีในช่วงการมองเห็นกับค่าสัมประสิทธิ์บังเงากำลึงสอง และจากค่าดังกล่าวนำไปใช้หาค่าการส่งผ่านรังสีแสงอาทิตย์ และค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกติดฟิล์ม จากค่าคุณสมบัติทั้งสองค่าก็จะสามารถนำไปหาค่าดัชนีความสบายเชิงความร้อนของกระจกติดฟิล์มดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับฟิล์มอื่น ๆ เพื่อเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในการเลือกฟิล์มมาใช้กับอาคารนอกเหนือจากการพิจารณาในแง่การลดลงของการส่องสว่าง และการส่งผ่านความร้อน จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าวิธีดังกล่าวใช้ได้ดีในการหาค่าการส่งผ่านรังสีในช่วงรังสีแสงอาทิตย์ แต่อาจไม่แม่นยำนักสำหรับการหาค่าการดูดกลืนรังสี โดยเฉพาะสำหรับกลุ่มที่ 2-4 การศึกษาสามารถกระทำต่อเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกว่าในกรณีของการหาค่าการดูดกลืนรังสี และในกรณีที่นำฟิล์มดังกล่าวทั้งหมดไปใช้กับกระจกชนิดอื่น นอกเหนือจากกระจกใส

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chaiyapinunt, B. Phueakphongsuriya, K. Mongkornsaksit, and N. Khamporn, "Performance Rating of Glass Windows and Glass Windows with Films in Aspect of Thermal Comfort and Heat Transmission," Energy and Buildings, Vol. 37, No. 7, July 2005, pp. 725 – 738.
- [2] Fanger, P.O. "Thermal comfort analysis and application in environmental engineering," Kansas State University, McGraw-Hill, 1970.
- [3] Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley National laboratory, "Optic5," [URL:http://windows.lbl.gov/materials/optic5/](http://windows.lbl.gov/materials/optic5/)
- [4] Rubin, M., Rottkay, K.V., and Powles, R. "Window optics," Solar Energy, vol. 62, 1988, pp. 149-161. "
- [5] Finalyson, E., Arastech, D., Huizenga, C., Rubin, M., and Reilly, S. "Window 4.0 Documentation of calculation procedures," Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory Report 33943, August 1993.