วัสดุทางเลือกสำหรับการเคลือบผิวกระจกอาคารเพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

Alternative Glass Coating Materials to Achieve Energy Efficient in Buildings

สุพิชฌา สุพรรณสมบูรณ์[1*] และ สุรีพรรณ์ สุพรรณสมบูรณ์[2]

[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10110
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ผังเมืองและนฤมิตศิลป์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

Supitcha Supansomboon[1*] and Sureepan Supansomboon[2]

[1]Assistant Professor, Department of Materials Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Khlong Toei Nuea, Watthana, Bangkok, 10110
[2]Assistant Professor, Faculty of Architecture Urban Design and Creative Arts, Mahasarakham University, Kham Riang, Kantharawichai, Maha Sarakham, 44150

[*]Email: supitcha@g.swu.ac.th

บทคัดย่อ

กระจกอาคารที่สามารถป้องกันความร้อนได้ดีจะส่งผลให้ประหยัดการใช้พลังงานในการทำความเย็น แต่ส่วนใหญ่มักจะยอมให้แสงธรรมชาติผ่านได้น้อย มีการสะท้อนหรือมีสีที่ส่งผลด้านลบต่อผู้ใช้อาคาร ในปัจจุบันผู้ผลิตได้พัฒนากระจกโลว์อีที่มีการเคลือบหลายชั้น แต่นอกจากสูตรการเคลือบไม่เป็นที่เปิดเผยแล้ว แต่ละชนิดยังมีสมบัติที่หลากหลาย งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอทางเลือกสารเคลือบหลัก และประยุกต์ใช้วิธีการจำลองฟิล์มบาง เพื่อศึกษาสมบัติเบื้องต้นของสารเคลือบ ในความหนา และจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับเงินบริสุทธิ์ซึ่งเป็นสารเคลือบหลักของกระจกโลว์อีและสารเคลือบอื่น โดยใช้วิธีเคลือบฟิล์มบนกระจกเพื่อวัดค่าการสะท้อนและการส่องผ่านของแสง มาสร้างแบบจำลองฟิล์มบางเปรียบเทียบกัน พบว่าถึงแม้ว่าฟิล์มบางของทองสีม่วงสะท้อนความร้อน และส่องผ่านแสงต่ำกว่าเงินบริสุทธิ์เล็กน้อย แต่แสงที่ส่องผ่านอยู่ในช่วงสเปกตรัมที่ส่งเสริมให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานของผู้ใช้อาคาร นอกจากนี้ยังยอมให้รังสียูวีส่องผ่านได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามทองสีม่วงมีราคาสูงจึงยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้ ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปต่อยอดในเลือกใช้สารเคลือบและการสร้างชั้นการเคลือบให้กระจกมีสมบัติเหมาะสมคุ้มค่ายิ่งขึ้น

คำสำคัญ: กระจก, กระจกอนุรักษ์พลังงาน, การเคลือบ, ทองสีม่วง

Abstract

Heat resistant architectural glazing systems obviously reduce the cooling load, which leads to saving energy. However, most of them allow less daylight transmission, and consequently, their reflections or colors have a negative effect on building users. Presently, low-emissivity glass coating has been developed into a multilayer. Each type contains concealed formulations and distinct properties. This research aims to present alternative materials on glass coating as a thin film. Stacks of thin film were simulated and investigated for their optical properties by using optical thin film design software. The thickness and number of layers of thin films are more varied, compared to pure silver, as the main element of low-e coating and other materials. Reflectance and transmittance of those coatings were calculated. Compared to pure silver, although a thin film of purple gold reflects and transmits slightly lower visible light, it transmits visible spectrum in the range that can improve the working performance of building users. Furthermore, it allows less UV transmission. The limitation of purple gold for this application is costly. Results of this study can be used to gain more benefits from developing an energy-saving glass coating.

Keywords: Glass, Energy-efficient Glazing, Coating, Purple gold

Received: February 9, 2022; **Revised:** April 19, 2022; **Accepted:** April 22, 2022

1. บทนำ

กระจกเป็นวัสดุโปร่งแสงหลักที่ใช้กับเปลือกอาคาร ในการใช้งานจะมีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปคือเพื่อเปิดการเชื่อมต่อระหว่างภายนอก และภายในอาคารในการมองเห็น และการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคาร ดังนั้นความใส การยอมให้แสงผ่าน และสีของกระจกจึงเป็นข้อพิจารณาพื้นฐานในการเลือกใช้กระจก สำหรับประเทศในเขตอากาศร้อนแบบในประเทศไทยยังมีข้อพิจารณาที่สำคัญที่มีผลต่อการสร้างความสบาย และอนุรักษ์พลังงานภายในอาคาร คือ การป้องกันการส่งผ่านความร้อน

ในการพัฒนาสมบัติกระจกจะมุ่งเน้นพิจารณา สมบัติด้านการป้องกันความร้อน และสมบัติการรับแสงธรรมชาติ โดยแสงธรรมชาติที่เป็นที่ต้องการจะอยู่ในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible light) ซึ่งจะประกอบด้วยสเปคตรัมสีต่าง ๆ ที่จะมีผลต่อความรู้สึก และประสิทธิภาพในการทำงานของผู้ใช้อาคาร โดยปัจจัยที่ทำให้กระจกแต่ละชนิดมีสมบัติดังกล่าวแตกต่างกัน ได้แก่ สารที่อยู่ในเนื้อกระจกหรือสารเคลือบผิวกระจก และกรรมวิธีผลิตหรือเคลือบกระจก

1.1 สมบัติด้านการป้องกันความร้อนและการรับแสงธรรมชาติ

“กฎกระทรวง กำหนดกระจกเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552” ได้กำหนดเกณฑ์ประสิทธิภาพของกระจกอนุรักษ์พลังงาน โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient; SHGC) ไม่เกิน 0.55 และ สัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อน (Light to Solar Gain; LSG) คำนวณจาก ค่าการส่องผ่านแสงธรรมชาติ (Visible Light Transmittance; VT) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (Solar Heat Gain Coefficient; SHGC) มีค่า 1.20 ขึ้นไป โดยเกณฑ์ในการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานภายในอาคาร (Building Energy Code ; BEC) กำหนดสัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อนไว้ที่ 1.00 ขึ้นไป เป็นเงื่อนไขในการใช้แสงธรรมชาติเพื่อเป็นพลังงานหมุนเวียน

เทคนิคที่ทำให้วัสดุกระจกอาคารในท้องตลาดมีสมบัติในการอนุรักษ์พลังงาน ได้แก่ การผสมโลหะออกไซด์เข้าไปในเนื้อกระจกทำให้เกิดสี และมีสมบัติในการดูดกลืนความร้อน ชื่อเรียกในท้องตลาดอยู่ในกลุ่ม กระจกสี (Tinted Glass) กระจกตัดแสง หรือ กระจกดูดกลืนความร้อน (Heat Absorbing Glass) การเคลือบโลหะสะท้อนความร้อนที่ผิวของกระจก (Metallic Coating) คือกระจกในกลุ่มกระจกสะท้อนรังสีความร้อน (Heat Reflective Glass) และการสร้างฉนวนกันความร้อนโดยเว้นช่องระหว่างแผ่นกระจก ในรูปแบบกระจกฉนวนกันความร้อน (Insulating Glass) โดยวิธีการนี้สามารถใช้กระจกที่ผ่านกรรมวิธีอื่นข้างต้นมาประกอบเป็นชั้นวัสดุทำให้กระจกฉนวนความร้อนสามารถป้องกันทั้งการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนส่งผ่านเข้าสู่ภายในอาคาร

กระจกที่มีการดูดกลืนหรือสะท้อนความร้อนที่ดี จะป้องกันการแผ่รังสีความร้อนเข้าสู่อาคารส่งผลดีต่อความสบายและประหยัดการใช้พลังงานในการทำความเย็น แต่ในหลายกรณีกระจกมีสมบัติที่ดีในการดูดกลืนหรือสะท้อนความร้อนจะยอมให้แสงผ่านเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อยทำให้สิ้นเปลืองการใช้พลังงานไฟฟ้าแสงสว่าง กระจกที่มีสมบัติที่ดีในการป้องกันความร้อนอาจจะมีข้อจำกัดอื่นที่ต้องพิจารณา ในกรณีของกระจกสี นอกจากกระจกสีเข้มจะยอมให้แสงส่องผ่านได้น้อย สีของกระจกยังมีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร (Chinazzo, G. et al.,2019 และ Chen, X. et al.,2019) ในขณะที่กระจกสะท้อนรังสีความร้อนใช้วิธีเคลือบผิวจึงมีจุดด้อยเรื่องความคงทนของสารเคลือบ และกระจกที่มีการสะท้อนในปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดมลภาวะต่ออาคารข้างเคียงได้ ซึ่งเกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย ได้กำหนดให้กระจกที่ใช้ภายนอกอาคารต้องมีค่าการสะท้อนแสง (Visible Light Reflectance; Rvis) ไม่เกิน 30% เพื่อป้องกันไม่ให้อาคารมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (สถาบันอาคารเขียวไทย, 2560)

ในปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์กระจกอนุรักษ์พลังงาน โดยใช้กระจกที่มีสมบัติดูดกลืนและ/หรือสะท้อนความร้อนในรูปแบบชั้นวัสดุเรียกว่ากระจกฉนวนกันความร้อน โดยเคลือบสารที่มีโลหะเงินบริสุทธิ์เป็นองค์ประกอบหลักลงบนพื้นผิวกระจก สารเคลือบนี้มีสมบัติสะท้อนความร้อนและยอมให้ส่องผ่านได้ดี มีค่าการคายรังสีความร้อน (Emissivity) ต่ำเรียกว่ากระจกโลว์อี (Low-E Glass) ซึ่งการเคลือบกระจกชนิดนี้ ทำให้แสงส่องผ่านได้ดีกว่าและสะท้อนความร้อนได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระจกสะท้อนรังสีความร้อน ในขณะที่สมบัติในการเก็บกักอุณหภูมิภายในอาคารได้ดี เหมาะสำหรับอาคารในสภาพอากาศหนาวที่ต้องการลดการสูญเสียความร้อนภายในอาคาร หรืออาคารปรับอากาศต้องการควบคุมอุณหภูมิภายในอาคาร

ในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่ากระจกในกลุ่มกระจกสะท้อนความร้อน จะมีข้อดีในการป้องกันความร้อน คือ มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ต่ำ ในขณะที่มีข้อจำกัดคือมีค่าการส่องผ่านแสงธรรมชาติต่ำ ทำให้รับแสงธรรมชาติได้น้อย กระจกในกลุ่มนี้จึงมีค่าสัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อนต่ำกว่าเกณฑ์กระจกอนุรักษ์พลังงาน การพัฒนาโดยเคลือบสารโลว์อี สามารถทำให้กระจกคงสมบัติการป้องกันความร้อนไว้ แต่ยอมให้แสงส่องผ่านได้มากกว่ากระจกสะท้อนความร้อนเป็นผลให้สัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อนสูงไปด้วย โดยทั่วไปแล้วกระจกในกลุ่มโลว์อีแบบแผ่นเดียว จะมีค่าการส่องผ่านแสงธรรมชาติระหว่าง 0.54-0.74 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ระหว่าง 0.45-0.66 เป็นผลให้สัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อนมีค่าสูงถึงระหว่าง 1.09-1.25 ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพในการอนุรักษ์พลังงาน (เอจีซี แฟลทกลาส (ประเทศไทย), 2564)

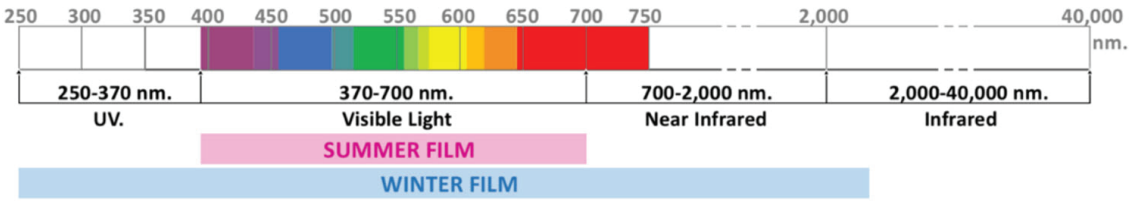
ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพด้านพลังงานของกระจกหนา 6 มิลลิเมตร

ชนิดของกระจก	ค่าการส่องผ่านแสงธรรมชาติ (VT)	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ (SHGC)	สัดส่วนการส่องผ่านของแสงต่อการส่งผ่านความร้อน (LSG)
กลุ่มกระจกใส/ ตัดแสง (สี)			
1. กระจกใส	0.88	0.82	1.07
2. Ocean Green	0.16	0.44	0.36
3.Dark Coolgray	0.76	0.60	1.27
กลุ่มกระจกสะท้อนความร้อนเทคนิค Sputtering Coating Process: SolarTAG			
4. Clear: CS 130	0.33	0.46	0.72
5. Green: CS220	0.18	0.32	0.56
6. Selective Gray	0.324	0.41	0.79
กลุ่มกระจก Low-E เทคนิค Pyrolitic Coating Process: SUNNERGY			
7. Clear	0.69	0.60	1.15
8. Green	0.56	0.42	1.33
9. Euro Gray	0.34	0.42	0.81

ที่มา: กระจกลำดับที่ 1-3 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) กระจกลำดับที่ 4-9 (เอจีซีแฟลทกลาส (ประเทศไทย), 2564)

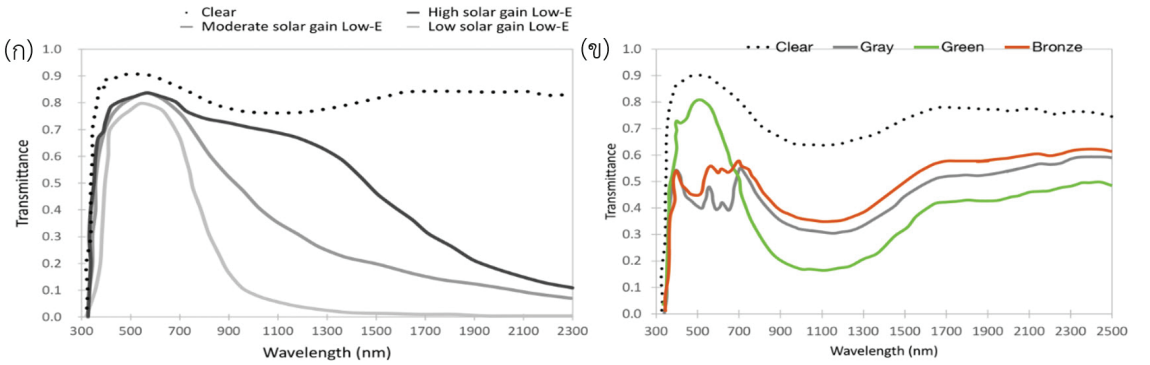
1.2 ค่าการส่องผ่านแสงตามความยาวคลื่น

ข้อพิจารณาเรื่องการส่องผ่านของแสงผ่านกระจกตามความยาวคลื่น ช่วงคลื่นของแสงจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ รังสียูวี (250-370 นาโนเมตร) แสงที่สามารถมองเห็นได้ (370-700 นาโนเมตร) รังสีใกล้อินฟราเรด (700-2,000 นาโนเมตร) และ รังสีอินฟราเรด (2,000-40,000 นาโนเมตร) ฟิล์มเคลือบกระจกที่ใช้สำหรับเขตอากาศหนาวจะต้องการรังสีความร้อนเพื่อทำความอบอุ่นให้แก่ภายในอาคาร และลดการสูญเสียความร้อน จึงต้องการการส่องผ่านของแสงระหว่างช่วง 250-3,500 นาโนเมตร ในขณะที่ในเขตอากาศร้อนจะต้องการเฉพาะช่วง 370-700 นาโนเมตร ที่เป็นช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ เพื่อเอื้อต่อการใช้แสงธรรมชาติภายในอาคาร ดังนั้นกระจกจึงควรมีลักษณะทางอุดมคติในการยอมให้รังสีความร้อนผ่านได้น้อยที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ช่วงคลื่นของแสงที่มีความเกี่ยวข้องกับการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มกระจก โดยเปรียบเทียบลักษณะทางอุดมคติของช่วงฤดูร้อนและฤดูหนาว

ที่มา: ปรับปรุงจาก (พงศ์พันธ์ จินดาอุดม และพิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ, 2539 และ KieranTimberlake, 2014)

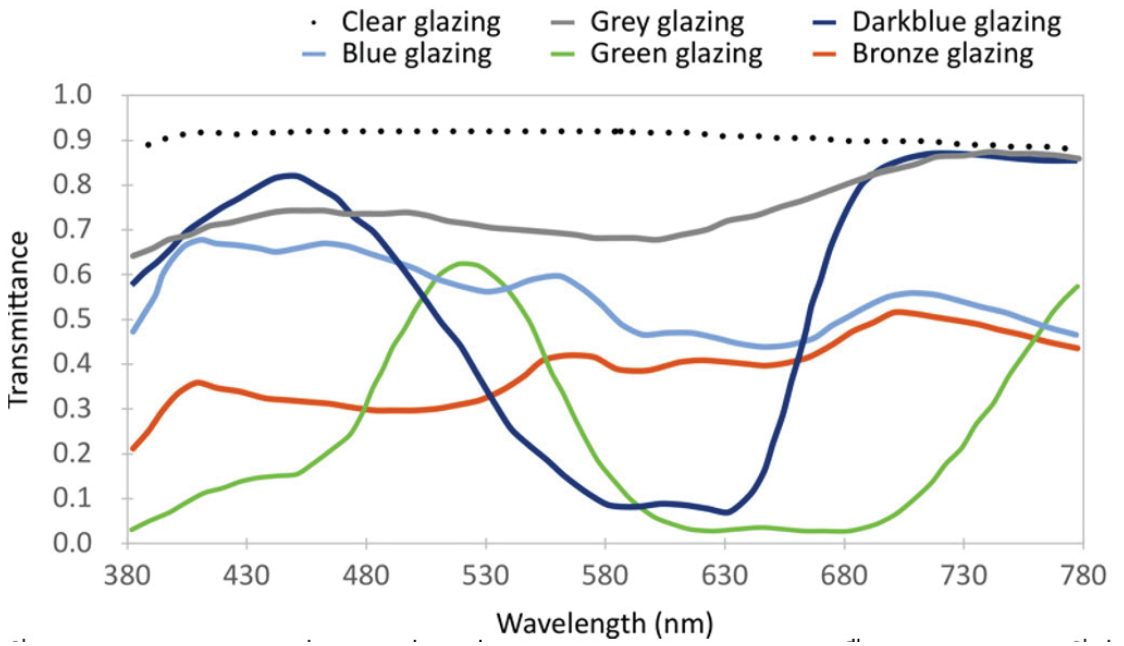


ภาพที่ 2 แผนภูมิแสดงค่าการส่องผ่านแสงตามความยาวคลื่น (ก) กระจกโลว์อีชนิดต่างๆเปรียบเทียบกับกระจกใส และ (ข) กระจกสีเปรียบเทียบกับกระจกใส

ที่มา: เขียนขึ้นใหม่จากข้อมูล (Rezaei, S.D. et al., 2017 และ Chaiyapinunta, S., & Khamporn, N., 2009)

จากแผนภูมิในภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่ากระจกที่ให้ค่าการส่องผ่านของแสงที่สูงในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่สามารถมองเห็นได้ และค่าการส่องผ่านในช่วงคลื่นอื่นที่ต่ำ คือกระจกในกลุ่มโลว์อี โดยเฉพาะกระจกโลว์อีชนิดส่งผ่านความร้อนต่ำ (Low Solar Gain Low-E) กระจกที่ยอมให้แสงส่องผ่านสูงนอกจากให้ประโยชน์ในการใช้แสงธรรมชาติแล้ว ยังจะได้รับความพึงพอใจในแง่ความสบายในการมองเห็น และการรับรู้สีสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระจกที่มีค่าการส่องผ่านที่ต่ำ (Chen, X. et al.,2019) โดยการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นของแสงที่สามารถมองเห็นได้ จะเป็นการส่องผ่านของสเปคตรัมของช่วงสี ได้แก่ ม่วง น้ำเงินเข้ม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง ในกรณีกระจกใสยอมให้แสงผ่านทุกสีพร้อมกันทำให้เห็นแสงที่ส่องผ่านเป็นสีขาว ในขณะที่กระจกสีจะมีค่าการส่องผ่านของแสงเฉพาะบางความยาวช่วงคลื่น

ในการเลือกกระจกเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พบว่ากระจกที่มีสี โดยเฉพาะสีเขียวและสีฟ้า เป็นกระจกที่ได้รับความนิยมเมื่อเปรียบเทียบกับกระจกสีเขียว และสีฟ้าที่มีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนจากรังสีอาทิตย์ใกล้เคียงกัน กระจกสีเขียวยอมให้แสงผ่านได้ดีกว่า ทำให้มีประสิทธิภาพด้านการอนุรักษ์พลังงานมากกว่า (สวิชญา ดาวประกายมงคล, 2552) ผลจากงานวิจัยที่เก็บข้อมูลความรู้สึกของกลุ่มตัวอย่างในห้องที่ใช้กระจกที่มีการส่องผ่านของแสงในช่วงคลื่นที่แตกต่างกันตามสีกระจก ห้องที่ได้รับอิทธิพลแสงในช่วงความยาวคลื่นที่สูง คือเกือบทุกช่วงสียกเว้นสีน้ำเงินเข้มและม่วง ซึ่งอยู่ในความยาวคลื่นต่ำที่สุด จะทำให้เกิดความกระตือรือร้นและมีความง่วงน้อยในช่วงเวลากลางวัน (Chen, X. et al.,2019) ห้องที่ใช้กระจกสีส้ม ทำให้รู้สึกสบายน้อยกว่าห้องที่ใช้กระจกสีน้ำเงิน เมื่ออยู่ในสภาพอากาศที่ร้อน (Chinazzo, G. et al., 2019) สภาพห้องที่ได้รับแสงที่ส่องผ่านในช่วงสเปคตรัมสีเขียวมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากที่สุด ใกล้เคียงกับกระจกใส (Chen, X. et al.,2019)



ภาพที่ 3 แผนภูมิแสดงค่าการส่องผ่านแสงตามความยาวคลื่นของกระจกสีต่างๆ
ที่มา: เขียนขึ้นใหม่จากข้อมูล (Chen, X. et al.,2019)

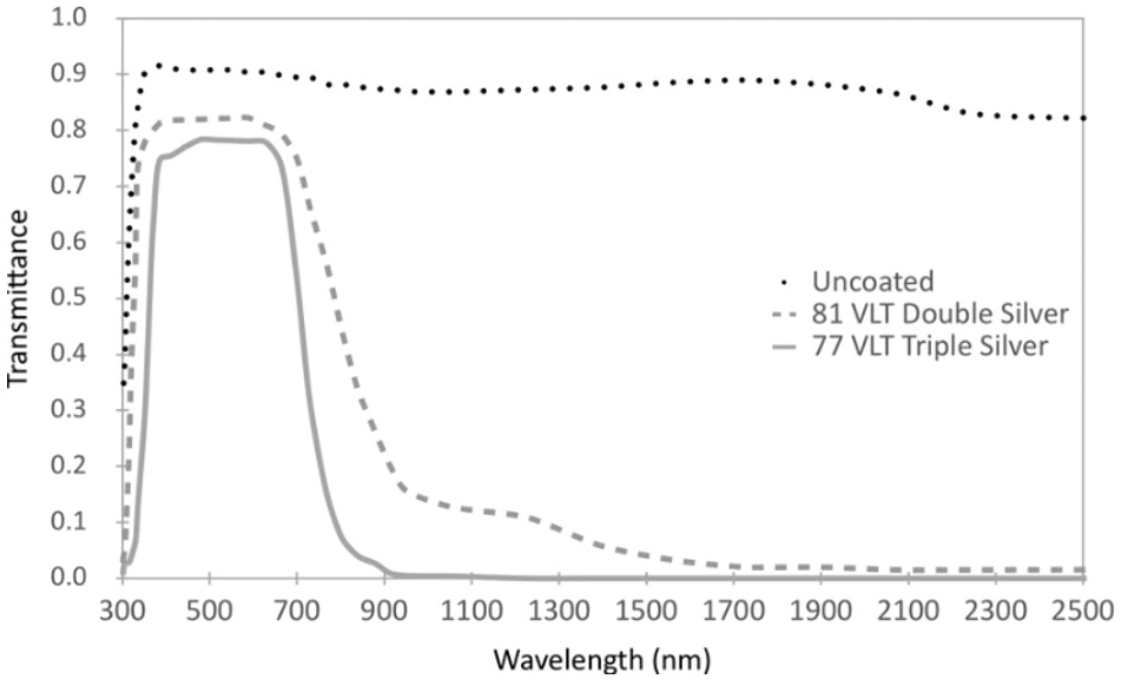
เมื่อพิจารณาร่วมกับแผนภูมิดังภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่ากระจกสีเขียวนอกจากจะมีการส่องผ่านของแสงในช่วงสเปคตรัมสีเขียวที่สูงแล้ว จะมีการส่องผ่านของช่วงคลื่นสีน้ำเงินเข้มและม่วง และช่วงคลื่นสีส้มและแดงต่ำ ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ไม่ส่งผลเสียต่อความกระตือรัน และไม่ทำให้รู้สึกร้อนสำหรับอาคารในเขตอากาศร้อนในช่วงเวลากลางวัน

1.3 การเคลือบกระจก

วิธีการเคลือบกระจกที่ใช้สำหรับกระจกในกลุ่มกระจกสะท้อนรังสีความร้อนและกระจกเคลือบสารโลว์อี แบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การเคลือบแบบฮาร์ดโค้ท (Hard Coat) และ ซอฟท์โค้ท (Soft Coat) โดยการเคลือบแบบฮาร์ดโค้ท หรือการเคลือบด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition; CVD) เป็นกระบวนการเคลือบแบบไพโรลิทิค (Pyrolytic Coating Process) วิธีนี้จะเป็นการเคลือบผิวในระหว่างขั้นตอนการผลิตกระจกคือการเคลือบขณะที่ผิวกระจกยังมีสถานะหลอมเหลว สารเคลือบจะกระจายอยู่ในเนื้อของกระจกระหว่างการคงรูป ใช้อุณหภูมิสูงระหว่าง 500-1,200 องศาเซลเซียส การเคลือบแบบนี้เป็นวิธีที่ได้ความหนาของฟิล์มเคลือบระหว่าง 4-8 ไมโครเมตร มีจุดเด่นคือสารเคลือบมีความแข็งแรงคงทนต่อการขูดขีด จึงสามารถใช้กับกระจกแผ่นเดียวได้ แต่มีจุดด้อยคือความไม่สม่ำเสมอของผิวเคลือบ และจะทำให้กระจกมีความแข็งแรงลดลง

ซอฟท์โค้ท หรือ การเคลือบด้วยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition; PVD) ใช้กระบวนการการเคลือบแบบสปัตเตอริ่ง (Sputtering Coating Process) เป็นการเคลือบภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Deposition) คือการเคลือบโลหะ หรือสารประกอบของโลหะลงบนผิวของผลิตภัณฑ์กระจก ด้วยการใช้เทคนิคโมเมนตัมสร้างอนุภาคพลังงานจลน์จากประจุไฟฟ้าในสภาวะสุญญากาศ เพื่อให้อะตอมของสารเคลือบกระจายอย่างสม่ำเสมอบนผิวกระจก วิธีการนี้จึงเป็นวิธีที่ทำให้ได้ฟิล์มที่มีความเรียบ สม่ำเสมอและบางได้มากกว่าวิธีการแรก สามารถสร้างฟิล์มบางระดับนาโนเมตร จุดเด่นของวิธีการเคลือบนี้คือมีประสิทธิภาพในการสะท้อนความร้อนที่ดีในขณะที่แสงสะท้อนจะรบกวนการมองผ่านกระจกน้อยกว่ากระจกในกลุ่มสะท้อนความร้อนชนิดอื่น แต่การเคลือบแบบนี้จะมีความทนทานน้อยกว่าวิธีแรกทำให้นิยมใช้กระจกที่เคลือบด้วยวิธีนี้เป็นชั้นของกระจกฉนวนความร้อนโดยให้ผิวเคลือบอยู่ด้านในชั้นวัสดุ

ในการพัฒนากระจกที่มีประสิทธิภาพสูงมีแนวโน้มในการพัฒนากระจกฉนวนความร้อนมากขึ้น ซึ่งมักจะใช้การเคลือบแบบซอฟท์โค้ท ให้พื้นผิวที่เคลือบอยู่ด้านในชั้นวัสดุ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเคลือบแบบซอฟท์โค้ทสามารถควบคุมความหนาของการเคลือบให้บางกว่าการเคลือบแบบฮาร์ดโค้ทหลายเท่า เป็นผลให้มีสมบัติดีขึ้นในการส่องผ่านแสงธรรมชาติ และลดการสะท้อนแสงออกไปรบกวนสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถเคลือบได้หลายชั้น การเคลือบหลายชั้นทำให้กระจกมีสมบัติที่ดีขึ้น ดังตัวอย่างการเปรียบเทียบการเคลือบสารโลว์อีด้วยเงินบริสุทธิ์ 3 ชั้น สามารถทำให้กระจกคงค่าการส่องผ่านที่สูงถึง 70% ดังแสดงในภาพที่ 4 ในขณะที่มีสมบัติในการป้องกันความร้อนดีกว่าการเคลือบเพียง 2 ชั้นประมาณ 30% (KieranTimberlake, 2014)



ภาพที่ 4 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าการส่องผ่านของกระจกใส กระจกเคลือบสารโลว์อีสอง และสามชั้น
ที่มา: เขียนขึ้นใหม่จากข้อมูล (KieranTimberlake, 2014)

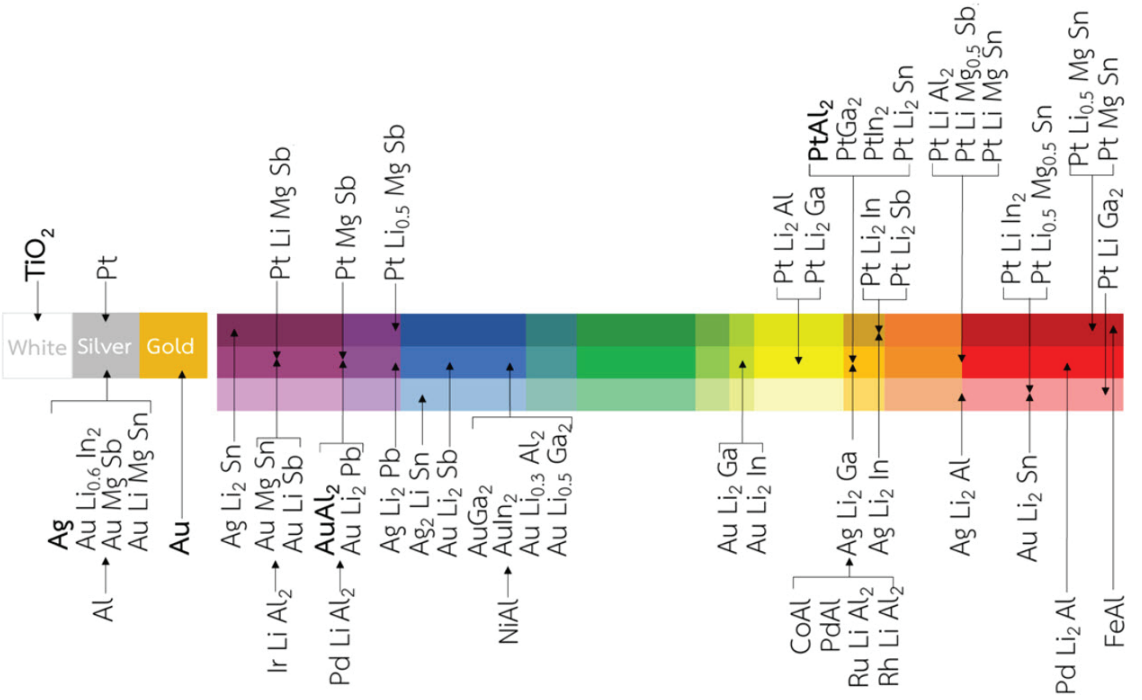
2. ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอสารเคลือบกระจกทางเลือกที่มีสมบัติการส่องผ่านในช่วงสีที่มีความน่าสนใจ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับวัสดุเคลือบโลว์อีซึ่งใช้เงินเป็นสารเคลือบหลัก โดยมีขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มลงบนกระจก การวัดสมบัติของตัวอย่างกระจกเคลือบฟิล์มบางของสารนั้น แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองสภาพการเคลือบรูปแบบต่าง ๆ และการเคลือบด้วยวัสดุที่ใช้เป็นสารเคลือบเปรียบเทียบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.1 สารเคลือบกระจก

สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic Compounds) เป็นสารประกอบของโลหะที่มีความแตกต่างจากโลหะผสมทั่วไป (Metal Alloys) โดยเป็นสารประกอบที่มีสัดส่วนจำนวนอะตอมของโลหะที่เป็นองค์ประกอบที่แน่นอน ทำให้โครงสร้าง และสมบัติแตกต่างอย่างสิ้นเชิงไปจากโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลัก (Base Metals) ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจที่สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีส่วนของประกอบของโลหะมีค่า (Precious Metals) บางชนิดที่สามารถทำให้เกิดสีที่มีความแตกต่างไปจากโลหะหลัก สีของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกนี้ ทำให้วัสดุมีสมบัติทางแสงที่น่าสนใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในลักษณะที่เป็นฟิล์มบาง (Thin film) เช่น สารประกอบ อินเทอร์เมทัลลิก AuAl2

หรือ ทองสีม่วง สามารถใช้เป็น Spectrally-selective Coatings (Supansomboon, S. et al., 2008; Sato, T. et al., 1979 และ Philipp, H. R., 1982)



ภาพที่ 5 สีของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีส่วนประกอบของ ทอง เงิน อลูมิเนียม และแพลทินัม

ที่มา: เขียนขึ้นใหม่จากข้อมูล (Wolff, I.M., 2002 และ Steinemann, S.G. et al., 2002)

จากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก 2, 3 และ 4 องค์ประกอบ จะให้สีสันที่มีความหลากหลาย ซึ่งเมื่อนำมาใช้เป็นสารเคลือบกระจกจะทำให้กระจกมีสมบัติด้านการสะท้อนแสง และส่องผ่านของแสงความยาวคลื่นที่มีความแตกต่างกัน งานวิจัยนี้ให้ความสนใจสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก 2 องค์ประกอบ ที่มีองค์ประกอบเป็นโลหะมีค่า เพราะนอกจากจะมีสีที่แตกต่างจากโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลัก และการใช้โลหะอื่นประกอบทำให้มูลค่ารวมของสารเคลือบลดลงแล้ว สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มี 2 องค์ประกอบ ยังสามารถควบคุมสัดส่วนของสารในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการเคลือบไอกายภาพได้ดีกว่าสารที่มีองค์ประกอบมากกว่า

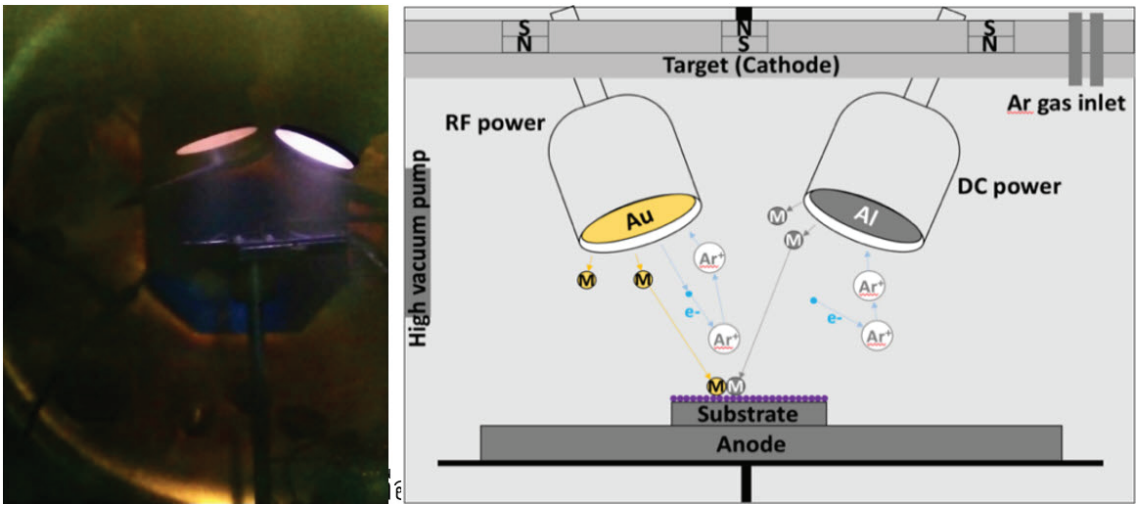
สารเคลือบกระจกที่นำมาพิจารณา คือ สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกที่มีองค์ประกอบเป็นโลหะมีค่า ได้แก่ ทอง และโลหะในกลุ่มแพลทินัม เนื่องจากเป็นโลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศและสารเคมีได้ง่าย และอะลูมิเนียม เนื่องจากเป็นโลหะมูลค่าไม่มากที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่า สารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก แม้จะให้สีที่ค่อนข้างหลากหลายแต่ก็จะมีสีแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ม่วง-น้ำเงิน และ เหลือง-น้ำตาล งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาสารเคลือบที่เป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่ม ได้แก่ สารประกอบของทอง-อะลูมิเนียมสององค์ประกอบ (Gold-Aluminium Compound: AuAl2) หรือ รู้จักกันในนามของ “ทองสีม่วง” ซึ่งเป็นสารประกอบจากทองบริสุทธิ์และอลูมิเนียมบริสุทธิ์ และสารประกอบของแพลทินัม-อะลูมิเนียมสององค์ประกอบ (Platinum-Aluminium Compound: PtAl2) หรือ “แพลทินัมสีเหลือง” ซึ่งเป็นสารประกอบจากแพลตทินัมบริสุทธิ์และอลูมิเนียมบริสุทธิ์

สารเคลือบที่ใช้เปรียบเทียบ ได้แก่ เงินบริสุทธิ์ (Silver: Ag) ทองบริสุทธิ์ (Gold: Au) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide: TiO2) เนื่องจากเป็นสารที่พบว่าใช้ในชั้นเคลือบกระจกโลว์อี (Ding, G., & Clavero, C., 2017)

2.2 วิธีการเคลือบ

การเคลือบฟิล์มบางของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกบนกระจก ในงานวิจัยนี้ทำโดยวิธีการเคลือบไอกายภาพด้วยเทคนิคดีซี แมกนีตรอน โคสปัตเตอริง (DC Magnetron Co-sputtering Technique) ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งเทคนิคนี้เป็นการสร้างผิวเคลือบด้วยการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของเป้าสารเคลือบ (Target) ด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง ภายใต้สนามแม่เหล็ก และอะตอมของสารเคลือบหลุดไปเคลือบบนวัสดุฐานรองรับ (Substrate) โดยมีการควบคุมการเข้าเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าตรง

เตรียมวัสดุโดยใช้เป้าสารเคลือบ 2 ชนิด เลือกใช้กระแสไฟฟ้าหรือกำลังไฟฟ้า ที่เหมาะสมในแต่ละเป้าสารเคลือบ เคลือบสารลงบนผิวด้านหนึ่งของกระจกหนา 1 มิลลิเมตร ขณะเคลือบให้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้ค่าการส่องผ่านแสงที่ดี (Supansomboon, S. et al, 2008) เคลือบกระจกหนา 100 นาโนเมตร



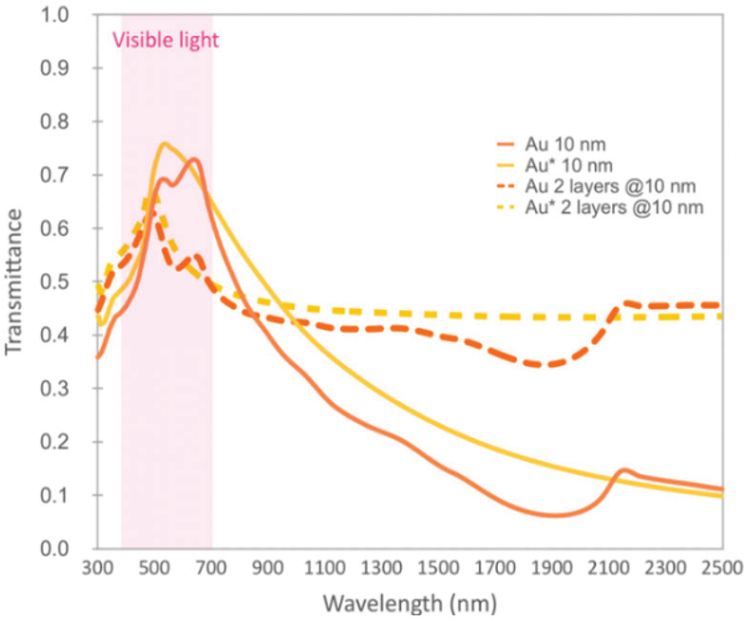
ภาพที่ 6 วิธีการเคลือบสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกของทอง-อะลูมิเนียม ด้วยเทคนิคดีซี แมกนีตรอน โคสปัตเตอริง
ที่มา: ภาพถ่ายและภาพวาดจากผู้วิจัย

2.3 การตรวจสอบผล

วัดการสะท้อนแสง และการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางทองสีม่วง (AuAl2) ฟิล์มบางแพลทินัมสีเหลือง (PtAl2) และฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์ ที่ผลิตด้วยวิธีดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ระหว่างช่วงคลื่น 300-2,500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง Perkin-Elmer Lambda 950 UV/VIS Spectrophotometer นำค่าที่วัดได้มาหาค่าคงที่ทางแสง (n และ k) ของฟิล์มบาง ด้วยโปรแกรม WVASE32 (J.A. Wollam Co.) และใช้โปรแกรม Openfilters จำลองสภาพการเคลือบในสภาวะต่าง ๆ และแสดงค่าให้อยู่ในรูปแบบค่าการสะท้อนแสง (Reflectance) และค่าการส่องผ่านแสง (Transmittance)

2.4 การสร้างแบบจำลองฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ ใช้ค่าที่วัดจากการเคลือบของสารที่ให้ความสนใจ ได้แก่ ทองสีม่วง แพลทินัมสีเหลือง และทองบริสุทธิ์ นำมาสร้างแบบจำลองฟิล์มบางและเปรียบเทียบกับข้อมูลฟิล์มบางที่อยู่ในฐานข้อมูลในโปรแกรม Openfilters ได้แก่ เงินบริสุทธิ์ ทองบริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ ค่าเปรียบเทียบที่ได้จากการวัด (Au*) และค่าจากข้อมูลของโปรแกรมใช้ข้อมูลของทองบริสุทธิ์ (Au) ปรากฏตามแผนภูมิในภาพที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าจากการวัดมีค่าสูงกว่าโดยในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้มีความใกล้เคียงกัน และในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดค่าจากการวัดจะมีค่าสูงกว่าซึ่งอาจถือเป็นข้อจำกัดสำหรับข้อมูลจากโปรแกรมของสารเคลือบอื่นด้วย



ภาพที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัด และค่าจากข้อมูลของโปรแกรม Openfilters ของทองบริสุทธิ์

กำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) เท่ากับ 3 โดยให้การจำลองฟิล์มบาง เป็นการจำลองโดยเคลือบฟิล์มบนกระจกหนา 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเดียวกับการเคลือบจริง นอกจากการศึกษาสมบัติการสะท้อนและส่องผ่านของวัสดุแล้ว ใช้การจำลองฟิล์มบางในการเปรียบเทียบตัวแปรทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ สารที่ใช้เคลือบ ความหนาของสารเคลือบ และจำนวนชั้นของการเคลือบ รายละเอียดเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบตัวแปรการจำลองฟิล์มบาง

ตัวแปรต้น	ตัวแปรเปรียบเทียบ	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
ความหนาของสารเคลือบ	5 นาโนเมตร 10 นาโนเมตร 20 นาโนเมตร 30 นาโนเมตร	เคลือบ 1 ชั้น	ค่าการสะท้อนและค่าการส่องผ่านของแสง
จำนวนชั้นของการเคลือบ	1 ชั้น 2 ชั้น	ความหนาฟิล์มชั้นละ 5 และ 10 นาโนเมตร	ค่าการสะท้อนและค่าการส่องผ่านของแสง
ชนิดของสารที่ใช้เคลือบ	ทองสีม่วง แพลทินัมสีเหลือง เงินบริสุทธิ์ ทองบริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์	ความหนาฟิล์ม 10 นาโนเมตร เคลือบ 1 ชั้น	ค่าการสะท้อนและค่าการส่องผ่านของแสง

3. ผลการวิจัย

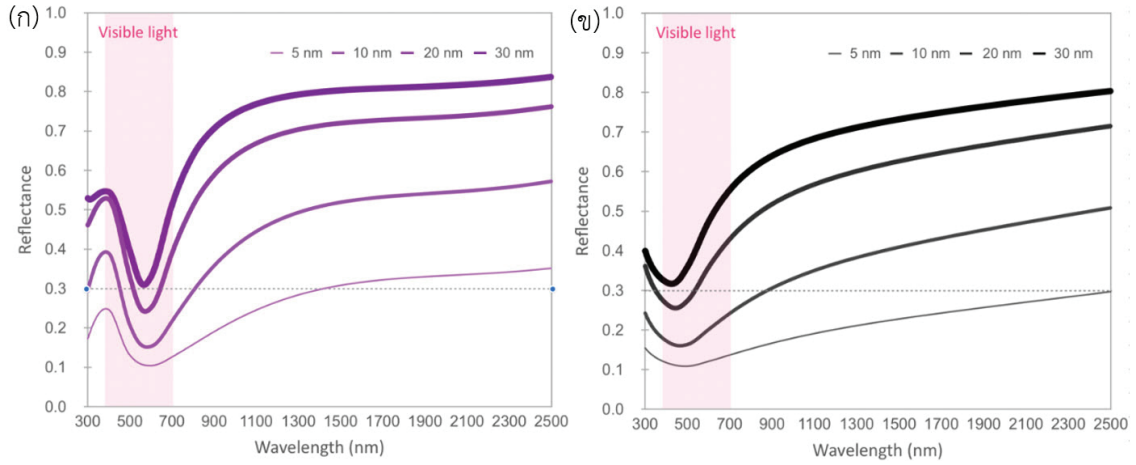
3.1 การสะท้อนแสง

ผลการวัดค่าการสะท้อนแสง ของกระจกเคลือบฟิล์มบางที่มีความหนา 100 นาโนเมตร ของ AuAl2 พบว่ามีการสะท้อนแสงในช่วงสีม่วงและสีแดง จึงทำให้เห็นฟิล์มบางเป็นสีม่วงแดง ดังแสดงในภาพที่ 8 (ก) และมีการส่องผ่านแสงในช่วงสีเขียว จึงทำให้เห็นแสงที่ส่องผ่านกระจกเป็นสีเขียว ในขณะที่ฟิล์มบางของ PtAl2 พบว่ามีการสะท้อนแสงในช่วงสีเหลือง จึงทำให้เห็นฟิล์มบางเป็นสีเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 8 (ข) และมีการส่องผ่านแสงน้อยมากในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ มองเห็นแสงที่ส่องผ่านกระจกเป็นสีดำ

ภาพที่ 8 สีของฟิล์มบางที่เคลือบลงบนกระจกหนา 1 มิลลิเมตร โดยที่ (ก) ทองสีม่วง (AuAl2) และ (ข) แพลทินัมสีเหลือง (PtAl2)

ที่มา: ภาพถ่ายจากผู้วิจัย

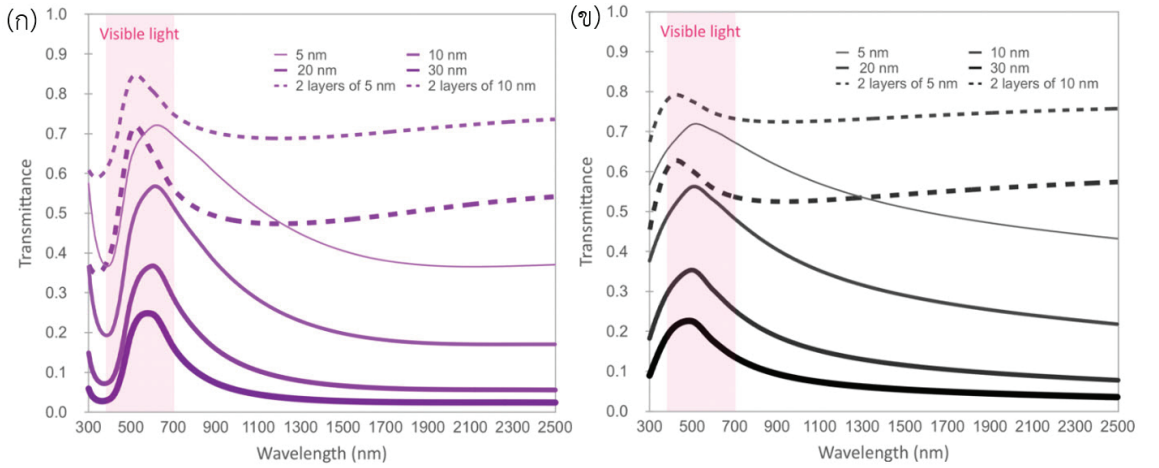
ผลจากการสร้างแบบจำลองฟิล์มบางด้วยความหนาระหว่าง 5-30 นาโนเมตร (ดูแผนภูมิจากภาพที่ 9) พบว่าผลที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนแสงยังคงช่วงสีแดงม่วงสำหรับทองสีม่วง และสีเหลืองสำหรับแพลทินัมสีเหลือง โดยค่าการสะท้อนแสงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อความหนาฟิล์มมากขึ้น ความหนา 20 นาโนเมตรขึ้นไป จะมีค่าเฉลี่ยที่เกิน 30% การสะท้อนที่เกิดขึ้นในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดซึ่งเป็น รังสีความร้อนของกระจกเคลือบฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ แสดงถึงสมบัติที่ดีการสะท้อนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบแล้วทองสีม่วงมีสมบัติด้านนี้ดีกว่าแพลทินัมสีเหลือง



ภาพที่ 9 แผนภูมิแสดงค่าการสะท้อนแสงตามความยาวคลื่นของกระจกเคลือบฟิล์มบาง (ก) ทองสีม่วง และ (ข) แพลทินัมสีเหลือง เปรียบเทียบความหนาฟิล์ม 5, 10, 20 และ 30 นาโนเมตร

3.2 การส่องผ่าน

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระจกเคลือบฟิล์มที่มีความหนาของสารเคลือบ จำนวนชั้นของการเคลือบ (ภาพที่ 10) และชนิดของสารที่ใช้เคลือบ (ภาพที่ 11) สามารถสรุปผลของค่าการส่องผ่านที่ได้ดังนี้



ภาพที่ 10 แผนภูมิแสดงค่าการส่องผ่านแสงตามความยาวคลื่นของกระจกเคลือบฟิล์มบาง (ก) ทองสีม่วง และ (ข) แพลทินัมสีเหลือง เปรียบเทียบการเคลือบ 1 ชั้น ที่ความหนาฟิล์ม 5, 10, 20 และ 30 นาโนเมตร และเปรียบเทียบการเคลือบ 2 ชั้น ที่ความหนาฟิล์มชั้นละ 5 และ 10 นาโนเมตร

1) ความหนาของสารเคลือบ

เมื่อเคลือบฟิล์มชั้นเดียวความหนาของฟิล์มเคลือบยิ่งมากยิ่งทำให้สมบัติในการส่องผ่านลดลง ฟิล์มบางของทองสีม่วงมีการส่องผ่านแสงในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ช่วงสีเหลืองค่อนไปทางสีเขียว ฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลือง มีการส่องผ่านแสงในช่วงแสงสีเขียว ค่าการส่องผ่านแสงที่มองเห็นได้ของฟิล์มจากสารประกอบทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.75 และ 0.6 สำหรับฟิล์มหนา 5 และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ การส่องผ่านที่เกิดขึ้นในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดซึ่งเป็นรังสีความร้อนของกระจกเคลือบฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้แต่เมื่อพิจารณาค่าการส่องผ่านของฟิล์มหนา 5 นาโนเมตร ที่ยอมให้แสงผ่านมากที่สุด จะยอมให้รังสีความร้อนผ่านได้สูง ระหว่าง 0.3-0.7 ทองสีม่วงมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า แพลทินัมสีเหลือง

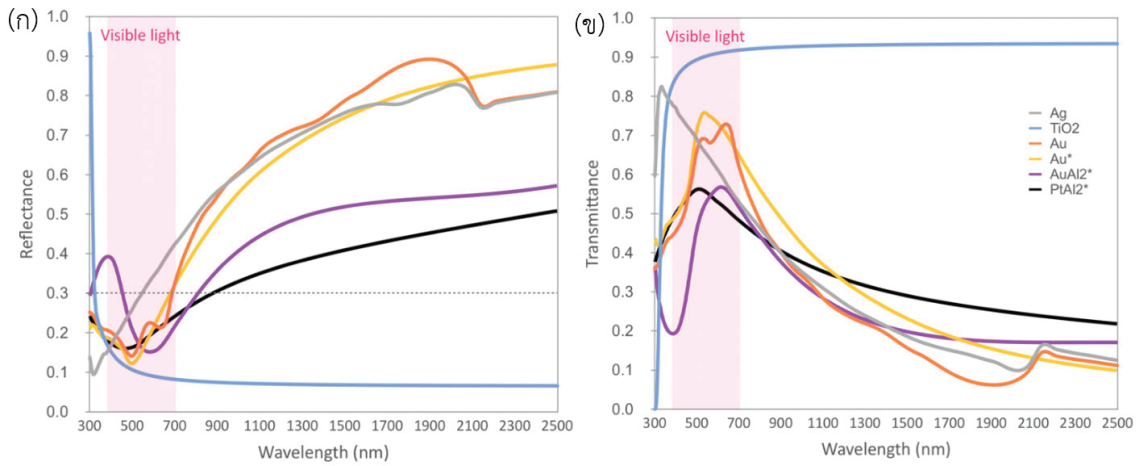
2) จำนวนชั้นของการเคลือบ

เมื่อเคลือบฟิล์มหลายชั้นกระจกจะมีสมบัติการส่องผ่านในช่วงแสงที่มองเห็นได้ที่ดีขึ้น โดยในการเคลือบฟิล์ม 2 ชั้น ฟิล์มบางของทองม่วงมีค่าการส่องผ่านดีขึ้นสูงสุด 0.15 ฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลือง มีค่าการส่องผ่านดีขึ้นสูงสุด 0.1 เมื่อเปรียบเทียบกับการเคลือบฟิล์มชั้นเดียว อย่างไรก็ตามการเคลือบฟิล์ม 2 ชั้น ก็ยอมให้รังสีความร้อนส่องผ่านได้ดีขึ้นด้วย โดยมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด ถึง 0.4 ในฟิล์มบางของทองสีม่วง และ 0.35-0.4 ในฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลือง

3) ชนิดของสารที่ใช้เคลือบ

เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มบางของสารเคลือบกระจกทั้ง 5 ชนิด ดังปรากฏตามแผนภูมิในภาพที่ 11 ในการเคลือบ 1 ชั้น ความหนา 10 นาโนเมตร พบว่าการสะท้อนแสงในช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ของสารเคลือบส่วนใหญ่จะมีค่าต่ำกว่า 0.3 ยกเว้น เงินบริสุทธิ์และทองสีม่วง ซึ่งจะมีค่าการสะท้อนประมาณ 0.4 ในช่วงคลื่นที่แตกต่างกัน คือ สะท้อนที่ช่วงคลื่นสีแดงและม่วง ตามลำดับ การสะท้อนในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่มีการสะท้อนสูง ได้แก่ เงินบริสุทธิ์ และ ทองบริสุทธิ์ กลุ่มที่มีการสะท้อนปานกลางคือ ทองสีม่วง และแพลทินัมสีเหลือง โดยทองสีม่วงมีค่าการสะท้อนสูงกว่าแพลทินัมสีเหลืองสูงสุด 0.1 โดยประมาณ และที่มีการสะท้อนน้อยมากคือไทเทเนียมไดออกไซด์

ฟิล์มบางของเงินบริสุทธิ์ยอมให้แสงที่สามารถมองเห็นได้ผ่านในระดับที่สูงที่สุด และยอมให้รังสีความร้อนผ่านในระดับน้อย ฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์ยอมให้แสงที่สามารถมองเห็นได้ผ่านในระดับรองลงมา และยอมให้รังสีความร้อนผ่านในระดับน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ฟิล์มบางของทองสีม่วง และแพลทินัมสีเหลือง ยอมให้แสงที่สามารถมองเห็นได้ผ่านค่าใกล้เคียงกันในระดับปานกลาง โดยฟิล์มบางของทองสีม่วงยอมให้รังสีความร้อนผ่านเฉลี่ยแล้วมากกว่าทองและเงินเล็กน้อย ในขณะที่ฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลืองยอมให้รังสีความร้อนผ่านสูงกว่าสารเคลือบอื่น ความต่างของค่าการส่องผ่านสูงสุดประมาณ 0.1 ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารเคลือบเดียวที่มีรูปของเส้นกราฟแตกต่างจากสารอื่น ฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์จะยอมให้แสงส่องผ่านได้สูงที่สุด โดยมีค่าการส่องผ่านสูงถึง 0.93 ตั้งแต่ช่วงแสงที่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงช่วงรังสีใกล้อินฟราเรด



ภาพที่ 11 แผนภูมิแสดง (ก) ค่าการสะท้อน และ (ข) ค่าการส่องผ่าน ตามความยาวคลื่นของกระจกเคลือบฟิล์มบางของทองสีม่วง แพลทินัมสีเหลือง เงินบริสุทธิ์ ทองบริสุทธิ์ และไทเทเนียมไดออกไซด์

ของแพลทินัมสีเหลือง ให้ค่าส่องผ่านในช่วงสีเขียวมากที่สุด แสงส่องผ่านฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์จากการวัดจริง (Au*) ในช่วงสีเขียวมากที่สุด ในขณะที่ส่องผ่านช่วงสีเขียว และสีส้มมากที่สุดในฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์จากข้อมูลตามโปรแกรม Openfilters (Au) ฟิล์มบางของทองสีม่วงให้การส่องผ่านมากที่สุดในช่วงสีเหลืองค่อนไปทางเขียว และฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์จะยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงสีเขียว เหลือง ส้ม และแดงในค่าที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผลที่ได้จากข้อมูลตามโปรแกรม Openfilters จะแสดงค่าการส่องผ่านช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดของเงินและทองบริสุทธิ์ ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบอื่น แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลของทองบริสุทธิ์ที่ได้จากการวัดกระจกเคลือบทองบริสุทธิ์ (Au*) จะเห็นว่าค่าการส่องผ่านในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดมีค่าสูงกว่า ในช่วงคลื่น 700-1,200 และ 700-1,750 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลือง และทองสีม่วงตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าการส่องผ่านฟิล์มบางของทองสีม่วงจะมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากับเงินและทองบริสุทธิ์ เมื่อมีการวัดค่าจากกระจกเคลือบจริง

4. การอภิปรายและสรุปผล

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลต่าง ๆ จากกระจกเคลือบฟิล์มบางของสารเคลือบชนิดต่าง ๆ แล้ว พบว่ากระจกเคลือบฟิล์มบางของเงินบริสุทธิ์ยังให้ค่าการสะท้อนและการส่องผ่านในภาพรวมที่เหมาะสมกับเขตอากาศร้อนมากที่สุด เพราะยอมให้แสงที่สามารถมองเห็นได้ผ่านในระดับที่สูง ในขณะที่ยอมให้แสงในช่วงรังสีความร้อนต่ำ โดยกระจกเคลือบฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ จะมีสมบัติการส่องผ่านใกล้เคียงกับกระจกใสซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสำหรับเขตอากาศหนาวมากกว่า

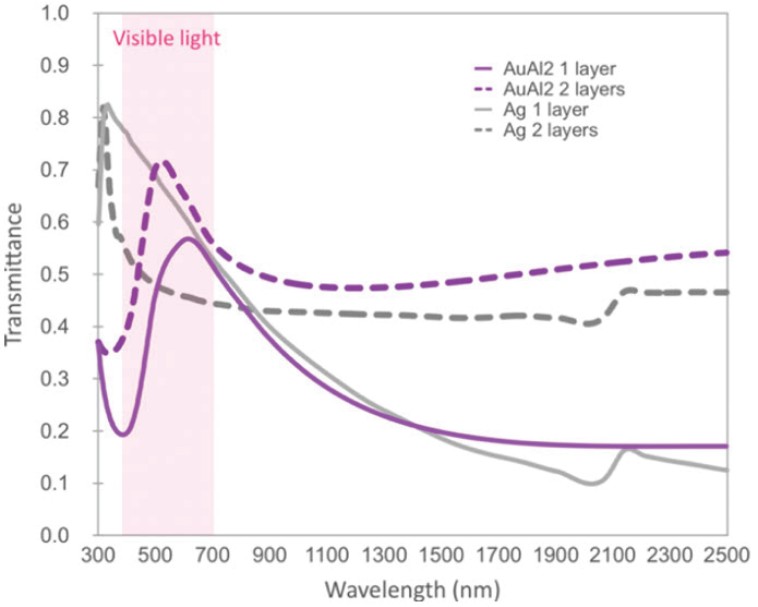
เมื่อพิจารณาสารเคลือบทางเลือกอื่น พบว่าฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์มีสมบัติการส่องผ่านแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้อยกว่าเล็กน้อย โดยฟิล์มบางของทองสีม่วงยอมให้แสงส่องผ่านและสะท้อนความร้อนต่ำกว่า เงินและทองบริสุทธิ์ ในขณะที่แพลทินัมสีเหลือง จะยอมให้แสงส่องผ่านและสะท้อนความร้อนต่ำกว่า สารเคลือบทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบระดับของการส่องผ่านจากข้อมูลกระจกในท้องตลาดตามตารางที่ 1 จะพบว่าค่าการสะท้อนแสงที่สามารถมองเห็นได้จากสารเคลือบทั้ง 4 ชนิด ยังอยู่ในเกณฑ์ที่จะสามารถกระจกอนุรักษ์พลังงานได้ โดยเฉพาะหากมีการใช้กระจกเป็นองค์ประกอบของกระจกฉนวนความร้อน

เมื่อพิจารณาสมบัติการส่องผ่านตามความยาวช่วงคลื่น ซึ่งให้สีของแสงที่ส่องผ่านที่แตกต่างกัน พบว่าแสงที่ส่องผ่านฟิล์มบางของเงินบริสุทธิ์จะเกิดการส่องผ่านในช่วงสีที่จะมีผลเสียต่อความกระตือรือร้นของผู้ใช้อาคาร (Chen, X. et al.,2019) ในขณะที่ทองบริสุทธิ์จะมีช่วงของการส่องผ่านที่อาจทำให้ผู้ใช้อาคารเกิดความรู้สึกร้อนมากกว่าอุณหภูมิจริง (Chinazzo, G. et al., 2019) ฟิล์มบางจากทองสีม่วง และแพลทินัมสีเหลือง จะมีการส่องผ่านในช่วงที่สามารถสร้างความกระตือรือร้น (Chen, X. et al.,2019) และอาจจะมีผลเชิงความรู้สึกในการรับรู้แสงสว่างมากกว่าแสงที่ได้รับจริง (สวิชญา ดาวประกายมงคล, 2552) ดังนั้นฟิล์มบางจากทองสีม่วง และแพลทินัมสีเหลือง จึงมีจุดเด่นเรื่องสีของแสงที่ส่องผ่าน

จากจุดเด่นข้างต้น จะเห็นได้ว่า ทองสีม่วง แม้จะไม่ใช่สารเคลือบกระจกที่มีสมบัติที่ดีที่สุดในการเปรียบเทียบแต่ละด้าน แต่ถือว่ามีสมบัติดีในทุกด้าน เมื่อเทียบกับเงินบริสุทธิ์แล้วจะมีสมบัติในเรื่องสีของแสงที่ส่องผ่านที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารเคลือบสองชนิด (ภาพที่ 12) ฟิล์มบางของเงินบริสุทธิ์ยังมีจุดด้อยในเรื่องการยอมให้แสงในช่วงรังสียูวีส่องผ่านได้มากที่สุด ในขณะที่ฟิล์มของทองสีม่วงยอมให้รังสียูวีส่องผ่านได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบอื่น นอกจากนี้การเคลือบหลายชั้นยังให้ผลดีต่อการส่องผ่านฟิล์มบางของทองสีม่วงมากกว่าเงินบริสุทธิ์ ซึ่งสมบัติที่ดีตามที่กล่าวมาแล้วทำให้ทองสีม่วงเป็นสารเคลือบทางเลือกที่มีความน่าสนใจในการพัฒนากระจกอนุรักษ์พลังงาน

ของแพลทินัมสีเหลือง ให้ค่าส่องผ่านในช่วงสีเขียวมากที่สุด แสงส่องผ่านฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์จากการวัดจริง (Au*) ในช่วงสีเขียวมากที่สุด ในขณะที่ส่องผ่านช่วงสีเขียวและสีส้มมากที่สุดในฟิล์มบางของทองบริสุทธิ์จากข้อมูลตามโปรแกรม Openfilters (Au) ฟิล์มบางของทองสีม่วงให้การส่องผ่านมากที่สุดในช่วงสีเหลืองค่อนไปทางเขียว และฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์จะยอมให้แสงส่องผ่านในช่วงสีเขียว เหลือง ส้ม และแดงในค่าที่ใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าผลที่ได้จากข้อมูลตามโปรแกรม Openfilters จะแสดงค่าการส่องผ่านช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดของเงินและทองบริสุทธิ์ ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบอื่น แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลของทองบริสุทธิ์ที่ได้จากการวัดกระจกเคลือบทองบริสุทธิ์ (Au*) จะเห็นว่าค่าการส่องผ่านในช่วงรังสีใกล้อินฟราเรดมีค่าสูงกว่า ในช่วงคลื่น 700-1,200 และ 700-1,750 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางของแพลทินัมสีเหลือง และทองสีม่วงตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าการส่องผ่านฟิล์มบางของทองสีม่วงจะมีค่าใกล้เคียงหรือน้อยกว่ากับเงินและทองบริสุทธิ์ เมื่อมีการวัดค่าจากกระจกเคลือบจริง



ภาพที่ 12 แผนภูมิแสดงค่าการส่องผ่านแสงตามความยาวคลื่นของกระจกเคลือบฟิล์มบางของทองสีม่วง และ เงินบริสุทธิ์ เปรียบเทียบการเคลือบ 1 และ 2 ชั้น

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาสารเคลือบกระจกด้วยวิธีการเคลือบแบบซอฟท์โค้ท ซึ่งเป็นวิธีการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะนอกจากจะใช้ความร้อนต่ำและมีกระบวนการไม่ซับซ้อนแล้ว ยังไม่มีการใช้สารที่เป็นพิษในขั้นตอนการเคลือบและทำอยู่ในระบบปิดอีกด้วย (อรุณี หลักคำ และคณะ, 2557) แต่การเคลือบแบบซอฟท์โค้ทยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือความคงทนของการเคลือบจะต่ำ ทำให้จำเป็นต้องใช้กระจกที่เคลือบด้วยวิธีนี้เป็นองค์ประกอบของกระจกฉนวนความร้อน ซึ่งเมื่อพิจารณาในแง่การลงทุนแล้วพบว่ากระจกฉนวนกันความร้อนจะถือว่ามีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการอนุรักษ์พลังงานภายในอาคาร แต่ยังถือว่าไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะอาคารที่มีค่าอัตราส่วนของกระจก ไม่เกินร้อยละ 40 (สวิชญา ดาวประกายมงคล, 2552) ข้อจำกัดสำคัญสำหรับสารเคลือบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ สารเคลือบที่ใช้ทั้งหมดเป็นโลหะมีค่า จึงอาจจะยิ่งทำให้กระจกมีราคาผลิตสูงขึ้นตามวัสดุที่ใช้เป็นสารเคลือบหลัก ตัวอย่างเช่น แม้ว่าทองสีม่วงจะมีราคาขายต่ำกว่าทองบริสุทธิ์ประมาณ 25% (สมาคมทองคำ, 2565) แต่เมื่อเปรียบเทียบแล้วทองบริสุทธิ์ก็มีราคาสูงกว่าเงินบริสุทธิ์มากหลายสิบเท่า (Kitco, 2022) อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบค่าในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ความหนาเดียวกันเพื่อการเปรียบเทียบเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วสมบัติที่ดีของสารเคลือบแต่ละชนิดอาจจะอยู่ที่

ความหนาของฟิล์มบางและจำนวนชั้นที่แตกต่างกัน ซึ่งการเคลือบด้วยวิธีซอฟท์โค้ทสามารถกำหนดความบางของฟิล์มเคลือบได้บางมากและเคลือบซ้อนทับได้หลายชั้น เมื่อมีการศึกษาต่อยอดที่ละเอียดมากกว่านี้อาจจะพบความหนาและจำนวนชั้นของวัสดุที่ทำให้เกิดความคุ้มค่ามากขึ้น

นอกจากนี้ โดยมากแล้วบริษัทผู้ผลิตจะเปิดเผยองค์ประกอบของสารเคลือบโลว์อีเพียงบางส่วนเท่านั้น จากข้อมูลจากแผนภูมิในภาพที่ 4 พบว่าการในการเคลือบเงินบริสุทธิ์หลายชั้นจะทำให้กระจกมีสมบัติการส่องผ่านลดลงเล็กน้อยในขณะที่ป้องกันความร้อนได้ดีขึ้น แต่ข้อมูลของเงินบริสุทธิ์ที่แสดงตามแผนภูมิในภาพที่ 10 กลับให้ผลตรงกันข้าม ซึ่งเป็นไปได้ว่าประสิทธิภาพที่ดีกว่าของกระจกโลว์อีเคลือบหลายชั้นอาจเกิดขึ้นจากสมบัติที่ประสานกันระหว่างเงินบริสุทธิ์กับสารอื่นที่เคลือบระหว่างชั้นของเงินบริสุทธิ์ ซึ่งถูกระบุว่าเป็นโลหะออกไซด์ (KieranTimberlake, 2014) ซึ่งเป็นเรื่องน่าสนใจที่จะต่อยอดวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในการหาข้อมูลของสารเคลือบที่สามารถพัฒนาประสิทธิภาพของกระจกให้ดีและมีความคุ้มค่ายิ่งขึ้นต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Professor Michael Cortie, Dr.Abbas Maaroof, Dr.Angus Gentle และรองศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พรหมบุญ สำหรับคำแนะนำ

6. เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). *คู่มือการตรวจประเมินแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน*.

พงศ์พันธ์ จินดาอุดม และพิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ. (2539). ฟิล์มบางแสงสำหรับอุตสาหกรรมไทย : เคลือบกระจกอาคาร. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ,* 3, 45-51.

สถาบันอาคารเขียวไทย. (2560). *เกณฑ์การประเมินความยั่งยืนทางพลังงานและสิ่งแวดล้อมไทย สำหรับอาคารระหว่างใช้งาน TREES – EB Version 1.0.*

สวิชญา ดาวประกายมงคล. (2552). *แนวทางการเลือกใช้กระจกเป็นผนังอาคารสำนักงานปรับอากาศ เพื่อให้สอดคล้องกับกฎกระทรวงการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ.2552.* ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรุณี หลักคำ, วิทวัช วงศ์พิศาล และ สินธุ จันทพันธ์. (2557). วิศวกรรมพื้นผิว ตอนที่ 3 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอเคมีและไอทางกายภาพภายใต้สภาวะสุญญากาศ. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ,* 74, 33-42.

Chen, X., Zhang, X., & Du, Ji. (2019). Glazing Type (Colour and Transmittance), Daylighting, and Human Performances at a Workspace : A Full-scale Experiment in Beijing. *Building and Environment*, 153, 168-185.

Chinazzo, G., Wienold, J., & Andersen, M. (2019). Variation in Thermal, Visual and Overall Comfort Evaluation under Coloured Glazing at Different Temperature Levels. *Journal of the International Colour Association*, 23, 45-54.

Chaiyapinunta, S., & Khamporn, N. (2009). Selecting Glass Window with Film for Buildings in a Hot Climate. *Engineering Journal*, 13 (1), 29-42.

Ding, G., & Clavero, C. (2017). Silver-Based Low-Emissivity Coating Technology for Energy- Saving Window Applications. In (Ed.), *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*. IntechOpen.

Philipp, H. R. (1982). AuAl2: Optical Properties and Consideration as a Transparent Electrode Material. *Physica Status Solidi (a)*, 69 (2), 547-551.

Rezaei, S.D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A Review of Conventional, Advanced, and Smart Glazing Technologies and Materials for Improving Indoor Environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26-51.

Sato, T., Szeto, K. Y., & Scott, G. D. (1979). Optical properties of aggregated gold on aluminum. *Applied Optics*, 18, 3119-3122.

Steinemann, S.G., Wolf, W., & Podloucky R. (2002). *Colour and Optical Properties, in Intermetallic Compounds - Principles and Practice-Volume 3* : Progress, Westbrook, J.H. & Fleischer R.L., Editors. John Wiley & Sons, Ltd.

Supansomboon, S., Maaroof, A., & Cortie, M.B. (2008). “Purple Glory”: The Optical Properties and Technology of AuAl2 Coatings. *Gold Bulletin*, 41, 296-304.

Wolff, I.M. (2002). *Precious Metal Compounds, in Intermetallic Compounds - Principles and Practice-Volume 3* : Progress, Westbrook, J.H. & Fleischer R.L., Editors. John Wiley & Sons, Ltd.

ออนไลน์

สมาคมทองคำ. (2565). ราคาทองคำ. [ออนไลน์]. ได้จาก: https://www.goldtraders.or.th [สืบค้นเมื่อวันที่ 3 มกราคม 2565].

เอจีซี แฟลทกลาส (ประเทศไทย). (2564). ผลิตภัณฑ์กระจกเคลือบผิว. [ออนไลน์]. ได้จาก: https://www.agc-flatglass.co.th/home [สืบค้นเมื่อ วันที่ 4 ธันวาคม 2564].

KieranTimberlake. (2014). Investigating Low-E Coating Technology for Glass. [Online]. Retrieved from https://kierantimberlake.com/updates/investigating-low-e-coating-technology [accessed 7 December 2021].

Kitco. (2022). Gold Spot Prices, Silver Prices, Platinum & Palladium. [Online]. Retrieved from https://www.kitco.com/market [accessed 3 January 2022].