

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงอาคารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในภูมิอากาศเขตร้อน

Heat Transfer Analysis of Building Window Films Using the Finite Element Method with Economic Evaluation in a Tropical Climate

กิตติพงษ์ ศรีแซไตร^{1*}

Kittipong Srikhaetai^{1*}

Received: April 9, 2026; Revised: June 6, 2026; Accepted: June 26, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของฟิล์มกรองแสง 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก แม้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มกรองแสงแล้ว แต่ยังขาดการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน ควบคู่กับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในบริบทของภูมิอากาศเขตร้อน ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ โดยพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมภาษาซี และทำการทวนสอบความถูกต้องของผลลัพธ์กับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ผลการวิจัยพบว่า ฟิล์มเซรามิกมีสมรรถนะในการลดการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง โดยสามารถลดอุณหภูมิที่ผิวกระจกด้านในได้ต่ำสุดที่ 35.12 องศาเซลเซียส และลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านกระจกได้ร้อยละ 31.67 ในด้านการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ พบว่าฟิล์มเซรามิก ช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ประมาณ 929.39 บาทต่อปี ส่งผลให้ค่าไฟฟ้าลดลงเหลือ 2,005.51 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยประมาณ 3.87 ปี ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มความคุ้มค่าในการลงทุนภายใต้สมมติฐานของแบบจำลอง อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้พิจารณาเฉพาะการนำความร้อน (Conduction) และไม่รวมผลของการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ดังนั้นผลลัพธ์จึงควรถูกตีความภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเชื่อมโยงการวิเคราะห์เชิงอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อสนับสนุนการเลือกใช้วัสดุสำหรับการออกแบบอาคารประหยัดพลังงานในสภาพภูมิอากาศร้อน

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน; ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์; ฟิล์มกรองแสงอาคาร; การอนุรักษ์พลังงาน; การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์

¹ สำนักการศึกษาทั่วไป สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

¹ Office of General Education, Panyapiwat Institute of Management

* Corresponding Author, Tel. 09 0963 8375, E - mail: kittipongsrik@pim.ac.th

Abstract

This study investigates heat transfer behavior within buildings under steady-state conditions by comparing the performance of five types of window films: metallic film, black phosphorus film, clear heat-resistant film, safety film, and ceramic film. Although previous studies have examined the properties of window films, there remains a lack of comparative analysis under a unified numerical model combined with economic evaluation in a tropical climate context. In this study, the Finite Element Method (FEM) was applied to analyze the two-dimensional temperature distribution. A numerical model was developed using the C programming language, and the results were validated against simulations obtained from COMSOL Multiphysics. The findings indicate that the ceramic film provides the most effective thermal performance under the given modeling conditions. It achieves the lowest inner glass surface temperature of 35.12 °C and reduces heat transfer through glass by 31.67 %. From an economic perspective, the ceramic film can reduce annual energy costs by approximately 929.39 THB, lowering the electricity expense to 2,005.51 THB per year, with a payback period of approximately 3.87 years. These results suggest a strong potential for cost-effectiveness under the model assumptions. However, the model considers only conductive heat transfer and does not account for convection and radiation effects. Therefore, the results should be interpreted within these limitations. This study contributes to bridging thermodynamic analysis and economic decision-making, supporting the selection of materials for energy-efficient building design in hot climate regions.

Keywords: Heat Transfer; Finite Element Method; Building Window Films; Energy Conservation; Economic Evaluation

บทนำ

ภาคอาคารเป็นหนึ่งในแหล่งใช้พลังงานหลักของโลก โดยเฉพาะในประเทศเขตร้อนที่มีอุณหภูมิสูงและได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปี ส่งผลให้ภาระการทำความเย็น (Cooling Load) และความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แนวทางการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกรอบอาคาร (Building Envelope) จึงเป็นกลยุทธ์สำคัญในการปรับปรุงประสิทธิภาพพลังงานของอาคาร การติดตั้งฟิล์มกรองแสงบนกระจกเป็นวิธีที่ได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถลดการรับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ (Solar Heat Gain) และลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่ผ่านมาพิสูจน์ให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้ฟิล์มกรองแสงสามารถลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ได้อย่างมีนัยสำคัญ (Bahadori-Jahromi et al., 2017; Huang et al., 2024) นอกจากนี้ชนิดของฟิล์มกรองแสงยังมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติทางความร้อนและเชิงแสงของกระจกหน้าต่างอาคาร (Rawat, 2017) ในทางวิศวกรรมปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations: PDEs) ซึ่งสามารถหาผลเฉลย (Solution) ได้ทั้งระเบียบวิธีเชิงวิเคราะห์และวิธีเชิงตัวเลข เช่น วิธีผลต่างจำกัด (Finite Difference Method: FDM) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ทั้งนี้ FEM ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปทรงเรขาคณิตซับซ้อนและมีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่หลากหลาย (Bathe, 1996; Zienkiewicz and Taylor, 2000; Incropera et al., 2007) ที่ผ่านมามีการประยุกต์ใช้แบบจำลอง FEM เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในอาคารอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น การประเมินการดูดซับรังสีความร้อนในอาคารคอนกรีตชั้นเดียว ซึ่งพบว่าการละเว้นการติดตั้งฉนวนบริเวณหลังคาและช่องเปิด ส่งผลให้อุณหภูมิภายในอาคารพุ่งสูงขึ้นถึงร้อยละ 70 แม้จะมีการบุฉนวนที่ผนังแล้วก็ตาม

(Karim, 2025) ข้อค้นพบนี้ตอกย้ำถึงบทบาทสำคัญของกรอบอาคารต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ยังมีการใช้ FEM ศึกษาผลสัมฤทธิ์ของวัสดุชั้นสูง เช่น วัสดุเปลี่ยนสถานะ (Phase Change Materials: PCM) โดยผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การติดตั้ง PCM บริเวณผิวด้านในของผนังสามารถหน่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhou et al., 2021) และช่วยลดอุณหภูมิภายในอาคารในสภาวะการทำงานจริงได้อย่างมีนัยสำคัญ (Baskar and Chellapandian, 2022) อย่างไรก็ตาม มาตรการดังกล่าวยังคงเผชิญกับข้อจำกัดด้านต้นทุนและความซับซ้อนในการติดตั้ง ในประเด็นความแม่นยำของแบบจำลอง การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่างระเบียบวิธี FEM แบบสามมิติกับผลการทดลองจริงบ่งชี้ว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงมีความจำเป็นต้องใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรง (Mayer et al., 2014) ในขณะที่การศึกษาอื่นระบุว่า ปรากฏการณ์การพาความร้อน (Convection) ภายในพื้นที่ปรับอากาศมีบทบาทสำคัญต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยพลศาสตร์การไหลของอากาศช่วยลดความผันผวนของอุณหภูมิได้อย่างมีนัยสำคัญ (Chen, 2023) งานวิจัยหลายฉบับได้ใช้ FEM ในการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อนผ่านองค์ประกอบของกรอบอาคาร เช่น โครงสร้างผนังไม้ (Timber Frame Structures) ซึ่งสามารถทำนายการกระจายความร้อนและการสูญเสียพลังงานได้อย่างแม่นยำ (Valachova and Skotnica, 2019) แม้ว่าการวิจัยก่อนหน้านี้จะครอบคลุมการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในอาคารอย่างกว้างขวาง แต่ยังคงพบว่าการวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นการศึกษาฟิล์มแต่ละประเภทแยกกัน หรือใช้เงื่อนไขการจำลองที่แตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะได้อย่างเป็นระบบ และยังขาดการบูรณาการระหว่างการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) กับการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ โดยเฉพาะในบริบทภูมิอากาศเขตร้อน ซึ่งมีผลต่อการเลือกใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาพฤติกรรมถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว (Steady-State) เมื่อติดตั้งฟิล์มกรองแสง 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ (Metallized Film) ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส (Black Phosphorus Film) ฟิล์มใสกันความร้อน (Clear Heat-Resistant Film) ฟิล์มนิรภัย (Safety Film) และฟิล์มเซรามิก (Ceramic Film) 2) ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษาซี (C Programming) เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ และ 3) ประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) อ้างอิงจากฐานข้อมูลค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้ารายปี ทั้งนี้งานวิจัยได้ดำเนินการทวนสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Model Validation) โดยเปรียบเทียบผลเฉลยกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics เพื่อสังเคราะห์เป็นแนวทางปฏิบัติทางวิศวกรรมสำหรับการออกแบบอาคารอนุรักษ์พลังงานอย่างยั่งยืน ในขณะเดียวกัน งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในด้านการเปรียบเทียบวัสดุภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน และการเชื่อมโยงผลลัพธ์ทางอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว และไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการประยุกต์ใช้งานจริง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. แบบจำลองทางกายภาพและสมมติฐานของแบบจำลอง (Physical Model and Model Assumptions)

การศึกษานี้พิจารณาแบบจำลองห้องภายในอาคารขนาด 3×5 เมตร ซึ่งเป็นตัวแทนของพื้นที่ใช้งานทั่วไปในอาคารพักอาศัย ทั้งนี้ผนังห้องถูกสมมติให้เป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous Material) ที่มีสมบัติทางความร้อนคงที่และไม่แปรผันตามอุณหภูมิ พื้นผิวด้านหนึ่งของห้องกำหนดให้เป็นกระจกที่ติดตั้งฟิล์มกรองแสง สำหรับการกำหนดสภาวะของแบบจำลอง อุณหภูมิภายในห้องถูกกำหนดให้คงที่ที่ 25°C เพื่อจำลองสภาวะของพื้นที่ปรับอากาศ ในขณะที่อุณหภูมิภายนอกถูกกำหนดไว้ที่ 39.81°C ซึ่งถือเป็นค่าตัวแทนของสภาวะอุณหภูมิสูงสุดของช่วงฤดูร้อนในประเทศไทย อ้างอิงจากข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยที่รวบรวมจากสถานีตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยา 131 แห่งทั่วประเทศ (Thai Meteorological Department, 2025) ค่าดังกล่าวถูกใช้เป็นเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในโดเมน ซึ่งครอบคลุมพิจารณาฟิล์มกรองแสงจำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ

ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก โดยสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง ได้แก่ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ความหนาแน่น (Density) และความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ดังตารางที่ 1 โดยข้อมูลดังกล่าวอ้างอิงจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มั่นใจในความน่าเชื่อถือของพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 สมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน k (W/m-K)	ความหนาแน่น, ρ (kg/m ³)	ความจุความร้อนจำเพาะ, C_p (J/kg-K)	แหล่งอ้างอิง
ผนังคอนกรีต	1.40	2,300	880	Incropera et al. (2007)
กระจก	0.96	2,500	750	Incropera et al. (2007)
ฟิล์มเคลือบโลหะ	2.50	1,400	900	Lampert (1981)
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	15.00 - 30.00 (Anisotropic)	2,690	700	Luo et al. (2015)
ฟิล์มใสกันความร้อน	0.03	120	1,000	Fleury et al. (2020)
ฟิล์มนิรภัย	0.20 - 0.40	1,200	1,000	Incropera et al. (2007)
ฟิล์มเซรามิก	1.00 - 3.00	2,500	800	Callister (2007)

จากตารางที่ 1 พบว่าฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภทมีสมบัติทางความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าของวัสดุทั่วไปอ้างอิงจากตำรามาตรฐานด้านการถ่ายเทความร้อน โดยในส่วนของฟิล์มนิรภัยได้อ้างอิงจากสมบัติทางความร้อนมาตรฐานของกลุ่มวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer Data) ส่วนวัสดุฟิล์มชั้นสูงกำหนดจากช่วงค่าที่รายงานในวรรณกรรมเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะกายภาพของวัสดุ ผลการพิจารณาฟิล์มใสกันความร้อนมีค่าการนำความร้อนต่ำที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการหน่วงความร้อนที่ดีภายใต้กลไกการนำความร้อน ในขณะที่ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสมีค่าการนำความร้อนสูงที่สุดเนื่องจากโครงสร้างแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเป็นช่วงค่าเพื่อสะท้อนการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับทิศทาง (Luo et al., 2015) ความแตกต่างของสมบัติดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลอง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ควรถูกตีความภายใต้สมมติฐานสภาวะคงตัวและกลไกการนำความร้อนของแบบจำลอง

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

2.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

เพื่อวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในโดเมนสองมิติภายใต้สภาวะคงตัว กำหนดให้การถ่ายเทความร้อนเกิดจากกลไกการนำเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการควบคุม ดังสมการที่ (1)

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

โดย

- T คือ อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในโดเมน (°C)
- k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของวัสดุ (W/m-K)
- ∇ คือ ตัวดำเนินการเกรเดียนต์ (Gradient Operator)
- $\nabla \cdot$ คือ ตัวดำเนินการไดเวอร์เจนส์ (Divergence Operator) เมื่อพิจารณากรณีวัสดุเนื้อเดียวและสมบัติทางความร้อนคงที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ สมการที่ (1) สามารถลดรูปเป็นสมการลาปลาซ (Laplace Equation) สำหรับโดเมนสองมิติได้ ดังสมการที่ (2)

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2)$$

2.2 สมการค่าการแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity)

การวิเคราะห์ทางความร้อนของวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยค่าการแพร่ความร้อน ดังสมการที่ (3)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3)$$

โดยที่

α ค่าการแพร่ความร้อนของวัสดุ (m^2/s)

ρ ความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

c_p ความร้อนจำเพาะของวัสดุ ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

2.3 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ในการวิเคราะห์โดเมนปัญหาการถ่ายเทความร้อน แบบจำลองนี้ได้กำหนดเงื่อนไขทางคณิตศาสตร์เชิงฟิสิกส์ไว้ 3 รูปแบบ (Çengel, 2002) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

ขอบเขตทางกายภาพ	ประเภทเงื่อนไข	รูปแบบทางคณิตศาสตร์	ค่าที่กำหนด
ผิวกระจกที่ติดฟิล์ม	ดิริชเลต์ (Dirichlet)	$T = T_{film}$	อ้างอิงจากการคำนวณ 1 มิติ พื้นที่ปรับอากาศ
อากาศภายในห้อง		$T = 25^\circ \text{C}$	
ผนังอื่นของห้อง	นอยมันน์ (Neumann)	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	ผนังฉนวน (Adiabatic)
สภาพแวดล้อมภายนอก	พารามิเตอร์ขอบเขต (Boundary Parameter)	$T_{out} = 39.81^\circ \text{C}$	ข้อมูลกรมอุตุนิยมวิทยา

โดยที่ n แทนเวกเตอร์ในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวขอบเขต (Normal Vector to the Surface Boundary) เงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 2 ถูกกำหนดเพื่อแทนสถานะทางกายภาพของระบบ โดยอุณหภูมิภายในห้องและภายนอก ถูกกำหนดเป็นเงื่อนไขแบบดิริชเลต์ เพื่อสะท้อนสภาวะคงตัวของพื้นที่ปรับอากาศและสภาพแวดล้อมภายนอกตามลำดับ ขณะที่ผนังด้านอื่นถูกสมมติให้เป็นฉนวนความร้อนตามเงื่อนไขแบบนอยมันน์ สำหรับผิวกระจกที่ติดฟิล์มค่าอุณหภูมิ T_{film} ถูกใช้เป็นตัวแทนของผลกระทบจากฟิล์มกรองแสง โดยได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองการนำความร้อนหนึ่งมิติ (1D Analytical Solution) เพื่อช่วยลดความซับซ้อนของปัญหาในแบบจำลองสองมิติ

2.4 เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions)

ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายใต้สภาวะคงตัว แบบจำลองเชิงตัวเลขนี้กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น เพื่อช่วยในการเข้าสู่ผลเฉลยเชิงตัวเลข โดยค่าเริ่มต้นดังกล่าวไม่ได้มีผลต่อค่าผลเฉลยสุดท้ายในกรณีสภาวะคงตัวแต่มีบทบาทในการเพิ่มเสถียรภาพของกระบวนการคำนวณ ในการศึกษาครั้งนี้ค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกภายหลังการติดตั้งฟิล์ม (T_{film}) ถูกนำมาใช้เป็นค่าประมาณเริ่มต้น โดยอ้างอิงจากผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ของการนำความร้อนแบบหนึ่งมิติ เพื่อสะท้อนผลกระทบของฟิล์มกรองแสงในระดับเบื้องต้น แนวทางดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการเชื่อมโยงแบบจำลอง (Model Coupling) ระหว่างการวิเคราะห์เชิงวิเคราะห์หนึ่งมิติและการจำลองเชิงตัวเลขสองมิติ อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่า T_{film} ในลักษณะนี้เป็นเพียงการประมาณค่าเพื่อใช้ในการคำนวณ และไม่ได้แสดงถึงการจำลองเชิงกายภาพของฟิล์มในโดเมนโดยตรง เงื่อนไขเริ่มต้นทางคณิตศาสตร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$T(x, y, 0) = T_{film} \quad (4)$$

โดยค่าของอุณหภูมิ T_{film} สำหรับฟิล์มแต่ละประเภทดังตารางที่ 3 ซึ่งสะท้อนความแตกต่างของสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ในขณะที่เดียวกันความแตกต่างดังกล่าวควรถูกพิจารณาร่วมกับข้อจำกัดของแบบจำลอง เนื่องจากแบบจำลองนี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อน และไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี

ตารางที่ 3 อุณหภูมิที่ผ่านฟิล์มกรองแสงและใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น

ประเภทของฟิล์ม	อุณหภูมิภายนอก (°C)	อุณหภูมิหลังผ่านฟิล์ม T_{film} (°C)
ฟิล์มเคลือบโลหะ	39.81	38.60
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	39.81	36.37
ฟิล์มใสกันความร้อน	39.81	39.80
ฟิล์มนิรภัย	39.81	37.07
ฟิล์มเซรามิก	39.81	35.12

3. การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: (FEM))

เพื่อแก้สมการการนำความร้อนในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการควบคุมถูกแปลงให้อยู่ในรูปสมการอ่อน (Weak Form) โดยใช้ระเบียบวิธีของกาลเอร์คิน (Galerkin's Method) ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์ด้วย FEM (Reddy, 2019) ดังสมการที่ (1) นำฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function, w) คูณทั้งสองข้างของสมการ และทำการอินทิเกรตบนโดเมน Ω จะได้ดังสมการที่ (5)

$$\int_{\Omega} w \nabla \cdot (k \nabla T) d\Omega = 0 \quad (5)$$

จากนั้นใช้เทคนิคการอินทิเกรตที่ละส่วน (Integration by Parts) จะได้ผลลัพธ์ดังสมการที่ (6)

$$\int_{\Omega} k \nabla w \cdot \nabla T d\Omega - \int_{\Gamma} w k \frac{\partial T}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad (6)$$

โดยที่

k	คือ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ
w	คือ	ฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting Function)
N_i	คือ	ฟังก์ชันรูปร่าง (Shape Function) ของโหนดที่ i
T_i	คือ	อุณหภูมิที่โหนดที่ i (Nodal Temperature)
Ω	คือ	โดเมนของปัญหา
Γ	คือ	ขอบเขตของโดเมน
n	คือ	เวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวขอบเขต

พจน์บนขอบเขตของโดเมนดังสมการที่ (6) ถูกกำหนดตามเงื่อนไขขอบเขตที่ระบุดังตารางที่ 2 โดยเงื่อนไขแบบดิริชเลต์ถูกนำไปใช้ในการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ผิวกระจกและอากาศภายในห้อง ส่วนเงื่อนไขแบบนอยมันน์ถูกใช้แทนผนังที่เป็นฉนวนความร้อน ในระเบียบวิธีการเลอว์คิน กำหนดให้ฟังก์ชันน้ำหนักมีค่าเท่ากับฟังก์ชันรูปร่าง ($w = N_i$) การประมาณอุณหภูมิภายในเอลิเมนต์ (T) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$T(x, y) \approx \sum_{i=1}^n N_i(x, y) T_i \quad (7)$$

โดยที่

N_i คือ ฟังก์ชันรูปร่างของโหนดที่ i

n คือ จำนวนโหนดในเอลิเมนต์

เมื่อนำสมการที่ (7) ไปแทนค่าในสมการรูปแบบอย่างอ่อน จะได้ระบบสมการเชิงเส้นในรูปเมทริกซ์ดังสมการที่ (8)

$$[K]\{T\} = \{F\} \quad (8)$$

โดยที่

$[K]$ คือ เมทริกซ์สภาพนำความร้อน (Thermal Stiffness Matrix หรือ Conductance Matrix)

$\{T\}$ คือ เวกเตอร์อุณหภูมิ ณ โหนด (Nodal Temperature Vector)

$\{F\}$ คือ เวกเตอร์ภาระทางความร้อน (Thermal Load Vector) ซึ่งเป็นผลมาจากเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

สมการดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายอุณหภูมิภายในโดเมนกับสมบัติทางความร้อนของวัสดุและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด สำหรับการสร้างตาข่าย (Mesh Generation) โดเมนของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม (Triangular Elements) โดยใช้ฟังก์ชันรูปร่างเชิงเส้น (Linear Shape Function) ชนิด 3 โหนดต่อเอลิเมนต์ ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนสองมิติ (Reddy, 2019) การเลือกชนิดของเอลิเมนต์ดังกล่าวช่วยให้สามารถประมาณค่าการกระจายอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องภายในโดเมน และลดความซับซ้อนของการคำนวณ

4. ขั้นตอนวิธีของโปรแกรมภาษาซี (Numerical Algorithm)

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองโปรแกรมภาษาซี เพื่อหาผลเฉลยของสมการไฟน์ดเอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Algorithm) ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การนำเข้าข้อมูล (Input Data): กำหนดพิกัดของโหนด (Nodes) ข้อมูลการเชื่อมโยงเอลิเมนต์ (Elements) และสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างสมการระดับเอลิเมนต์ (Element Formulation): คำนวณเมทริกซ์สภาพนำความร้อนระดับเอลิเมนต์ (Local Stiffness Matrix) สำหรับทุกเอลิเมนต์ในโดเมนปัญหา

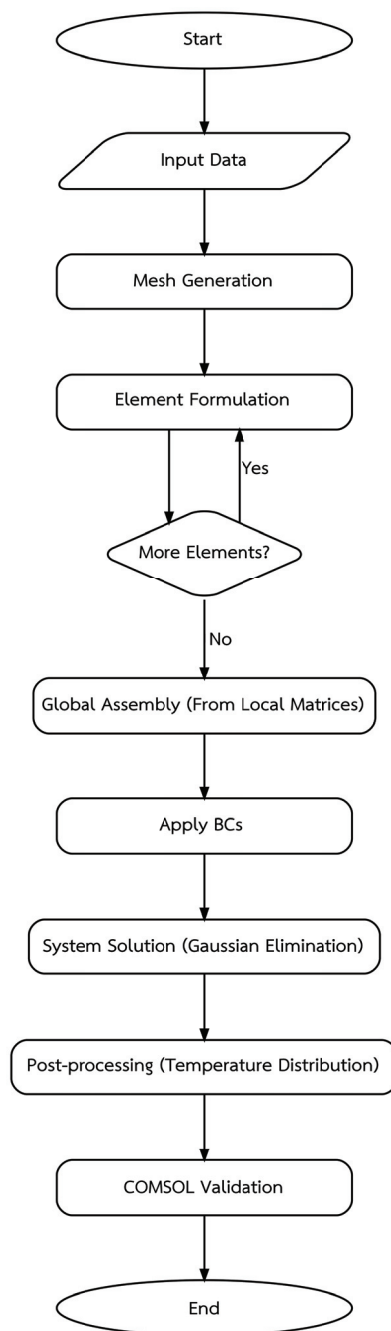
ขั้นตอนที่ 3 บูรณาการเมทริกซ์ระดับเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน เพื่อสร้างเมทริกซ์สภาพนำความร้อนของระบบ (Global Stiffness Matrix) ดังสมการที่ (9)

$$[K] = \sum [k_e] \quad (9)$$

ขั้นตอนที่ 4 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขต (Apply Boundary Conditions): ปรับลดรูปเมทริกซ์ของระบบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตทางความร้อนที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 5 ดำเนินการหาผลเฉลยของสมการเมทริกซ์ที่ (8) โดยประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบการกำจัดของเกาส์ (Gaussian Elimination)

ขั้นตอนที่ 6 การประมวลผลภายหลัง (Post-Processing): ประเมินค่าอุณหภูมิ ณ แต่ละโหนด และแสดงผลในรูปแบบแผนภาพการกระจายตัวของอุณหภูมิ ผลลัพธ์ที่ประมวลผลได้จากโปรแกรมชุดนี้ จะถูกนำไปทวนสอบความถูกต้อง (Validation) โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ขั้นตอนวิธีดังกล่าวสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงาน (Flowchart) ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนวิธีเชิงตัวเลขของการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Implementation) ด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การนำเข้าข้อมูล การสร้างตาข่าย การประกอบสมการ การประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขต การแก้ระบบสมการ และการประมวลผลผลลัพธ์ พร้อมการทวนสอบกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics

ผลการวิจัย

1. การทวนสอบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลข (Verification and Validation of the Numerical Model)

เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลข งานวิจัยนี้ได้ทดสอบความเป็นอิสระของตาข่าย (Mesh Independence Test) โดยพิจารณาความละเอียดของตาข่าย 3 ระดับ ได้แก่ ตาข่ายหยาบ

(Coarse Mesh) ประมาณ 1,500 เอลิเมนต์ ตาข่ายปานกลาง (Medium Mesh) ประมาณ 5,000 เอลิเมนต์ และตาข่ายละเอียด (Fine Mesh) ประมาณ 12,000 เอลิเมนต์ ผลการจำลองดังรูปที่ 2(ก) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในโดเมนกับจำนวนเอลิเมนต์พบว่าเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิที่ได้มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่โดยค่าที่ได้จากตาข่ายละเอียดมีค่าเท่ากับ 35.12 °C และถูกใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง (Benchmark Solution)

ในกรณีของตาข่ายระดับปานกลาง พบว่าค่าอุณหภูมิแตกต่างจากค่ามาตรฐานน้อยกว่าร้อยละ 0.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในงานวิศวกรรม อีกทั้งยังให้ความสมดุลที่เหมาะสมระหว่างความแม่นยำและเวลาในการคำนวณ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตาข่ายระดับปานกลางในการวิเคราะห์ในทุกกรณีศึกษา ทั้งนี้เพื่อประเมินพฤติกรรมการลู่เข้าของผลเฉลยเชิงตัวเลข ได้คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) โดยเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิงจากตาข่ายละเอียด ดังสมการที่ (10)

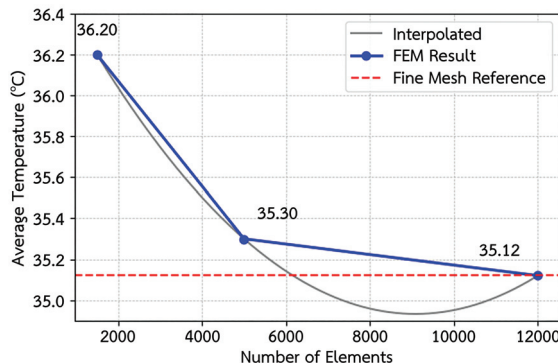
$$Error = \frac{|T_{mesh} - T_{ref}|}{T_{ref}} \times 100 \quad (10)$$

โดยที่

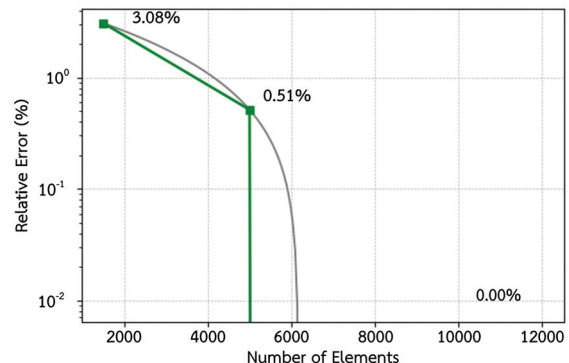
T_{ref} คือ ค่าอุณหภูมิจากตาข่ายละเอียด ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง

T_{mesh} คือ ค่าอุณหภูมิจากตาข่ายที่นำมาเปรียบเทียบ

ผลการทดสอบจากรูปที่ 2(ข) บ่งชี้ถึงพฤติกรรมการลู่เข้าของผลเฉลยเชิงตัวเลข (Mesh Convergence) โดยพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ลดลงอย่างต่อเนื่องแปรผกผันกับจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนได้ลดลงจากร้อยละ 3.08 ในโครงข่ายระดับหยาบสู่ร้อยละ 0.51 ในระดับปานกลาง และมีค่าลู่เข้าใกล้ศูนย์ในโครงข่ายระดับละเอียด ซึ่งเป็นการยืนยันเสถียรภาพและความแม่นยำของแบบจำลอง



(ก) การลู่เข้าของอุณหภูมิเฉลี่ย
เมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้น



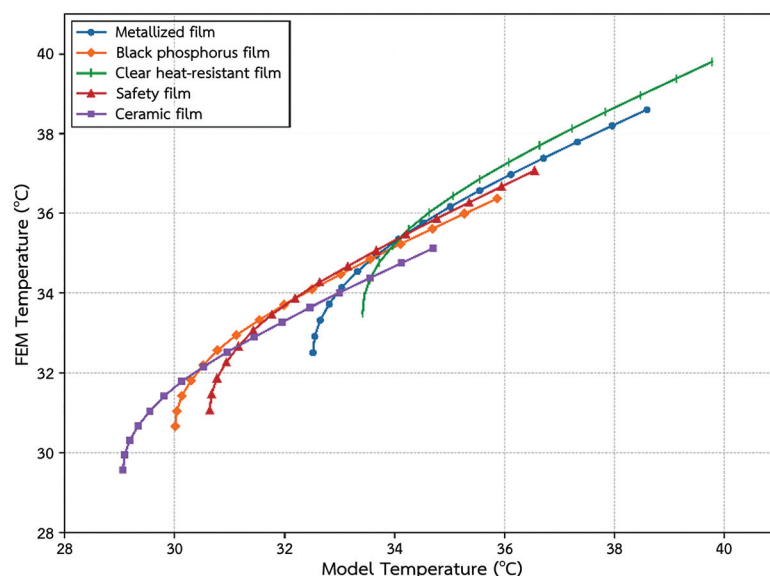
(ข) การลู่เข้าของค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์
ตามการเพิ่มความละเอียดของตาข่าย

รูปที่ 2 การทดสอบความเป็นอิสระของตาข่ายและการลู่เข้าของผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่า แบบจำลองมีความเป็นอิสระจากขนาดตาข่าย (Mesh-Independent Solution) ภายใต้ระดับความละเอียดที่เลือกใช้ และแสดงถึงเสถียรภาพของวิธีเชิงตัวเลขที่นำมาใช้ในการคำนวณนอกจากนี้ จำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลโดยตรงต่อจำนวนโหนดภายในโดเมน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิและสร้างกราฟการกระจายอุณหภูมิ ดังนั้น เมื่อความละเอียดของตาข่ายเพิ่มขึ้น จำนวนโหนดที่มากขึ้นจะช่วยให้สามารถประมาณค่าการกระจายอุณหภูมิได้ละเอียดและต่อเนื่องมากขึ้น ส่งผลให้เส้นกราฟมีความเรียบและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่อย่างชัดเจน ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับแผนที่ความร้อน (Temperature Contour Map) แบบสองมิติ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของการกระจายอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้นภายใต้ตาข่ายที่มีความละเอียดสูง และสะท้อนถึงอิทธิพลของการแบ่งโดเมน (Mesh Discretization) ต่อความแม่นยำของผลเฉลยในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2. การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขกับ COMSOL (Validation Against COMSOL)

งานวิจัยนี้ได้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองเชิงตัวเลขเพิ่มเติม โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีกับผลเฉลยจากซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics ซึ่งถูกใช้เป็นฐานอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การประเมินความสอดคล้องของผลลัพธ์ดำเนินการโดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิในแต่ละโหนด (Nodal Temperature) ภายใต้สภาวะคงตัว พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Correlation) และการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute Error Distribution) ดังรูปที่ 3 และ 4



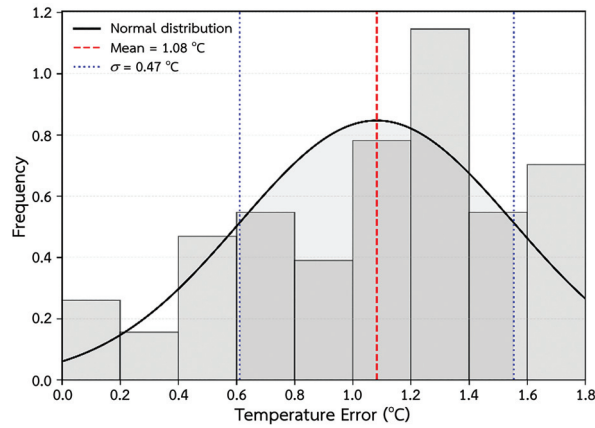
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของผลเฉลยอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

จากรูปที่ 3 พบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับผลลัพธ์จาก COMSOL Multiphysics อย่างชัดเจน โดยผลการถดถอยเชิงเส้นแสดงให้เห็นถึงระดับความสอดคล้องที่สูง (Good Agreement) ระหว่างทั้งสองวิธี การประเมินเชิงสถิติยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE) และค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error: RMSE) มีค่าต่ำ ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1.0 ซึ่งสะท้อนถึงความสอดคล้องของแนวโน้มผลลัพธ์ภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง

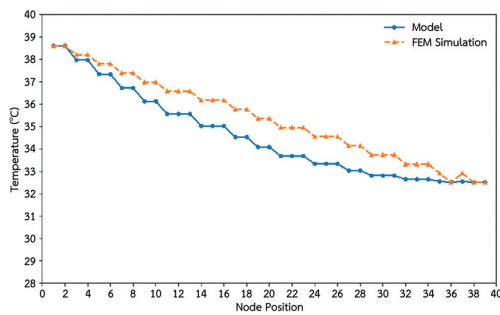
ผลการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนดังรูปที่ 4 พบว่าค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละโหนดอยู่ในช่วงที่ต่ำมาก ผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่คำนวณได้อยู่ในขอบเขตของ Engineering Tolerance และสอดคล้องกับกรอบแนวคิดการประเมินความไม่แน่นอนและการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตัวเลขตามแนวทางของ Roache (1994) ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าอัลกอริทึมและกระบวนการประกอบ เมทริกซ์ในโปรแกรมภาษาซีมีความเสถียร และสามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับ FEM เชิงพาณิชย์ได้ในระดับที่น่าพอใจ

การเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิตามตำแหน่งโหนด ดังรูปที่ 5(ก) - (จ) สำหรับฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภทแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของกราฟจากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันอย่างชัดเจน โดยค่าจาก COMSOL มีแนวโน้มสูงกว่าเล็กน้อยในช่วงต้นของโดเมน และมีแนวโน้มลู่เข้าหากันในช่วงปลาย พฤติกรรมดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของแบบจำลองในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ (Spatial Temperature Variation) ได้อย่างสอดคล้องกับผลเฉลยจาก FEM เชิงพาณิชย์

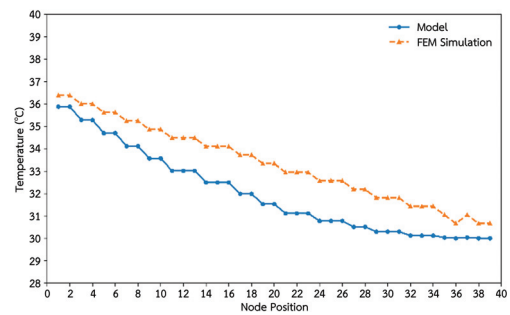
โดยสรุปการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซีและ COMSOL Multiphysics แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องทั้งในเชิงปริมาณและเชิงแนวโน้ม ซึ่งสนับสนุนความน่าเชื่อถือของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มกรองแสงภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด



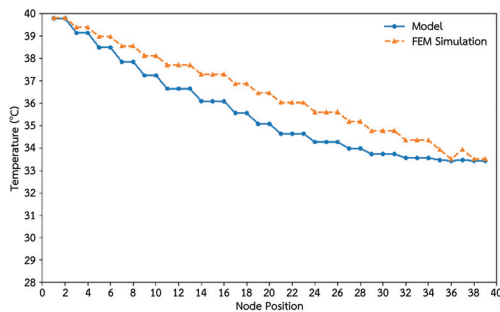
รูปที่ 4 การกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



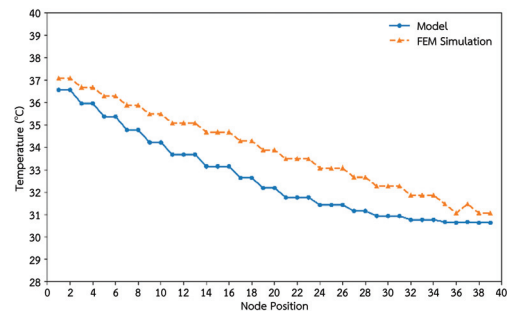
(ก) ฟิล์มเคลือบโลหะ



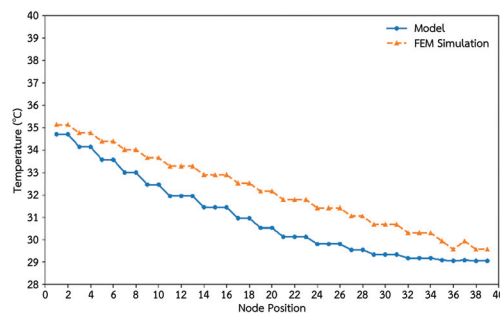
(ข) ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส



(ค) ฟิล์มไส้กันความร้อน



(ง) ฟิล์มนิรภัย

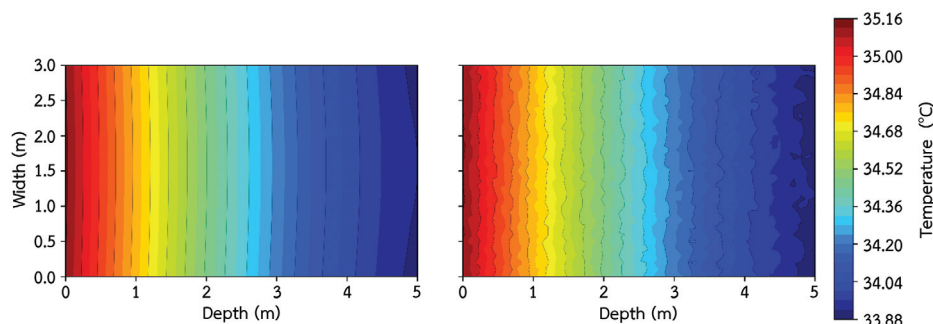


(จ) ฟิล์มเซรามิก

รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิภายใต้สภาวะคงตัวตามตำแหน่งโหนดที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3. การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ (2D Temperature Contour Analysis)

เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการกระจายอุณหภูมิภายในพื้นที่แบบสองมิติ ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำเสนอในแบบแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 6 ซึ่งสามารถแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในเชิงพื้นที่ได้อย่างต่อเนื่องและละเอียดกว่าวิธีการวิเคราะห์แบบหนึ่งมิติ



(ก) แบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนา

(ข) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

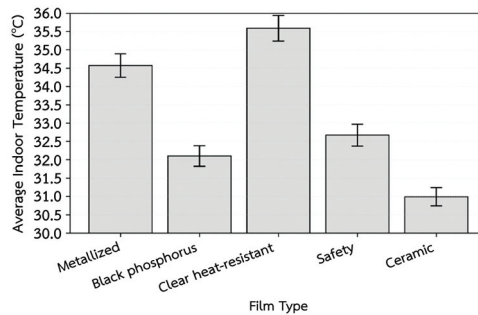
ด้วยโปรแกรมภาษาซี

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิแบบสองมิติภายในพื้นที่จำลอง (มุมมองจากด้านบน) สำหรับฟิล์มเซรามิก

จากแผนผังการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณผิวกระจกและลดลงอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ภายในห้อง ซึ่งสะท้อนถึงกลไกการนำความร้อนตามทิศทางของความต่างอุณหภูมิ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำตามกฎของฟูริเยร์ (Fourier's Law of Heat Conduction) ลักษณะของการกระจายอุณหภูมิแสดงให้เห็นถึงที่เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) มีความชันสูงในบริเวณใกล้ผิวกระจก ซึ่งเป็นผลมาจากการรับความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอก และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเคลื่อนเข้าสู่บริเวณภายในห้อง โดยรูปแบบดังกล่าวมีลักษณะสอดคล้องกันในทุกประเภทของฟิล์มกรองแสง อย่างไรก็ตาม ระดับของอุณหภูมิและความเข้มของเกรเดียนต์มีความแตกต่างกันตามชนิดของฟิล์ม โดยฟิล์มที่มีสมรรถนะในการลดการถ่ายเทความร้อนได้ดี เช่น ฟิล์มเซรามิก จะสามารถหน่วงการแพร่กระจายของความร้อนเข้าสู่ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้บริเวณภายในห้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มประเภทอื่น ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบจำลองสองมิติสามารถแสดงรายละเอียดของการกระจายอุณหภูมิในแนวระนาบได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเหนือแบบจำลองหนึ่งมิติ เนื่องจากสามารถสะท้อนพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจริงภายในโดเมนได้ดียิ่งขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบในหัวข้อก่อนหน้า และแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและสอดคล้องทั้งในเชิงตัวเลขและเชิงกายภาพภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

4. การวิเคราะห์สมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มกรองแสง (Thermodynamic Performance Analysis of Heat Transfer through Window Films)

งานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองเชิงตัวเลขมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและประเมินสมรรถนะทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Performance) ของฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภทภายใต้สภาวะคงตัว โดยใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้อง (Average Indoor Temperature) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการต้านทานการถ่ายเทความร้อน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องของฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภทภายใต้สภาวะคงตัว

จากรูปที่ 7 พบว่าประเภทของฟิล์มกรองแสงมีอิทธิพลต่อระดับอุณหภูมิภายในอาคารอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มใสกันความร้อนให้ค่าอุณหภูมิภายในสูงสุดประมาณ 35.6 °C ในขณะที่ฟิล์มเซรามิกให้ค่าอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 31.0 °C แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความแตกต่างของสมรรถนะการต้านทานความร้อนโดยรวมของวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขอุณหภูมิขอบเขตบริเวณผิวกระจกที่ได้จากการประเมินเบื้องต้น โดยฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูงจะสามารถลดทอนอิทธิพลทางความร้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่แพร่ผ่านเข้าสู่ตัวอาคารลดลง เมื่อพิจารณาลำดับของสมรรถนะ พบว่าฟิล์มเซรามิกมีแนวโน้มให้สมรรถนะในการลดความร้อนดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง รองลงมาคือ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มนิรภัย ฟิล์มเคลือบโลหะ และฟิล์มใสกันความร้อน ตามลำดับ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังสอดคล้องกับการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ ในหัวข้อที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพสูงจะช่วยลดความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ภายในห้อง ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิต่ำลงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์นี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัว ดังนั้น ผลลัพธ์จึงควรถูกตีความภายใต้ขอบเขตสมมติฐานของแบบจำลอง ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากสภาวะจริงหากมีการผนวกการพาความร้อน และการแผ่รังสีเข้ามาพิจารณาร่วมด้วย

5. การประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุน (Economic Evaluation and Payback Period Analysis)

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภท โดยพิจารณาภาระค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสำหรับการทำความเย็น (Annual Cooling Cost) ซึ่งคำนวณจากปริมาณความร้อนที่ต้องกำจัดออกจากอาคารตามผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข ภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารและการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปรับอากาศ โดยสามารถเขียนในรูปแบบสมการได้ดังสมการที่ (11) (Çengel, 2002)

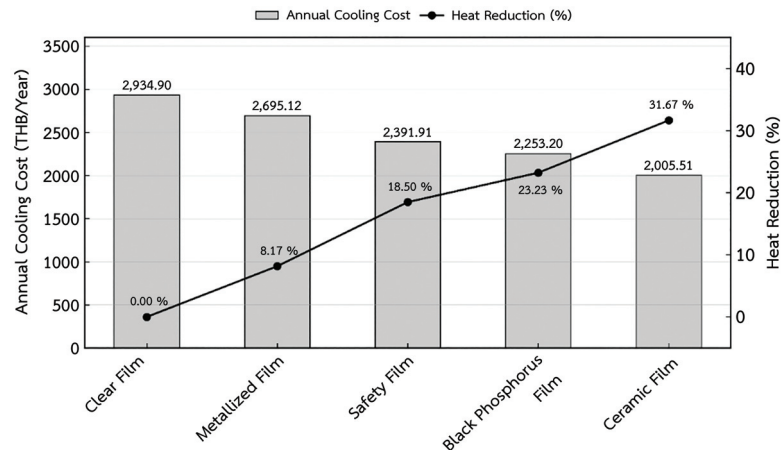
$$\text{Cooling Cost} = \frac{Q}{COP} \times t \times C_{elec} \quad (11)$$

โดยที่

Q	คือ	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (kW)
COP	คือ	ประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ
t	คือ	ชั่วโมงการใช้งาน (ชั่วโมง/ปี)
C_{elec}	คือ	อัตราค่าไฟฟ้า (บาท/kWh)

ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) คำนวณจากอัตราส่วนระหว่างต้นทุนการติดตั้งเริ่มต้นและผลประหยัดพลังงานที่ได้รับต่อปี ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานในงานวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Çengel, 2002) โดยสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (12)

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Initial Cost}}{\text{Annual Saving}} \quad (12)$$



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นรายปีและประสิทธิภาพการลดความร้อนของฟิล์มกรองแสงแต่ละประเภท

จากรูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงผกผัน (Inverse Relationship) อย่างชัดเจนระหว่างประสิทธิภาพการลดความร้อนและภาระค่าใช้จ่ายด้านการทำความเย็นรายปีของวัสดุฟิล์มกรองแสงทั้ง 5 ประเภท ข้อมูลบ่งชี้ว่า เมื่อวัสดุมีสมรรถนะในการสกัดกั้นความร้อนสูงขึ้น ภาระค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานจะลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยฟิล์มใสกั้นความร้อนมีภาระค่าใช้จ่ายสูงสุดอยู่ที่ 2,934.90 บาทต่อปี ในขณะที่ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสสามารถลดภาระค่าใช้จ่ายลงมาได้ตามลำดับของประสิทธิภาพการกั้นความร้อนที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ร้อยละ 8.17 18.50 และ 23.23 ตามลำดับ ข้อสังเกตที่สำคัญคือ ฟิล์มเซรามิกสามารถลดสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนได้ถึงร้อยละ 31.67 ส่งผลให้ภาระค่าใช้จ่ายรายปีลดลงไปอยู่ที่จุดต่ำสุดคือ 2,005.51 บาทต่อปี ผลลัพธ์ดังกล่าวยืนยันว่าการใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานความร้อนสูง มีนัยสำคัญต่อการลดทอนการใช้พลังงานของระบบปรับอากาศภายในอาคาร นอกเหนือจากการประเมินภาระค่าใช้จ่ายรายปีแล้ว ปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจเลือกใช้วัสดุเชิงวิศวกรรมคือ ผลประหยัดพลังงานสุทธิ (Net Energy Savings) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) ซึ่งได้สรุปผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และระยะเวลาคืนทุนของฟิล์มกรองแสง

ประเภทฟิล์มกรองแสง	อุณหภูมิผลลัพธ์ (°C)	ผลประหยัด (บาท/ปี)	ระยะเวลาคืนทุน (ปี)
ฟิล์มใสกั้นความร้อน	39.80	0.00	-
ฟิล์มเคลือบโลหะ 38.60	239.78	3.75	
ฟิล์มนิรภัย 37.07	542.99	4.14	
ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส	36.37	681.70	6.60
ฟิล์มเซรามิก 35.12	929.39	3.87	

จากตารางที่ 4 พบว่าฟิล์มเซรามิกประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 929.39 บาทต่อปี โดยทำให้อุณหภูมิผิวลดลงต่ำสุดที่ 35.12 °C และมีระยะเวลาคืนทุน 3.87 ปี ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมและคุ้มค่าเมื่อเทียบกับอายุการใช้งานของวัสดุ (ประมาณ 7 - 10 ปี) แม้ว่าฟิล์มเคลือบโลหะจะมีระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด (3.75 ปี) จากปัจจัยด้านต้นทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า แต่ให้ผลประหยัดพลังงานและการลดอุณหภูมิที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ขณะที่ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสแม้มีสมรรถนะทางความร้อนอยู่ในเกณฑ์ดี แต่มีระยะเวลาคืนทุนค่อนข้างยาวนาน (6.60 ปี) ซึ่งสะท้อนข้อจำกัดด้านต้นทุนของวัสดุ ในภาพรวมฟิล์มเซรามิกจึงแสดงศักยภาพด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในระยะยาวสูงที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง ทั้งนี้ผลการประเมินขึ้นอยู่กับสมมติฐานสำคัญที่ตั้งไว้ เช่น อัตราค่าไฟฟ้า ชั่วโมงการใช้งาน และประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ ดังนั้นผลลัพธ์ควรถูกตีความและนำไปประยุกต์ใช้ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนภายในอาคารภายใต้สภาวะคงตัว โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิแบบสองมิติ และเปรียบเทียบสมรรถนะของฟิล์มกรองแสงจำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ฟิล์มเคลือบโลหะ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัส ฟิล์มใสกันความร้อน ฟิล์มนิรภัย และฟิล์มเซรามิก ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ฟิล์มเซรามิกมีสมรรถนะในการลดอุณหภูมิภายในห้องได้ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขของแบบจำลอง รองลงมาคือ ฟิล์มแบล็กฟอสฟอรัสและฟิล์มนิรภัย โดยแนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับสมรรถนะการต้านทานความร้อนโดยรวมของวัสดุที่มีผลต่อการลดการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกในด้านแบบจำลองเชิงตัวเลขผลการเปรียบเทียบกับซอฟต์แวร์ COMSOL Multiphysics แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของแนวโน้มการกระจายอุณหภูมิอย่างชัดเจน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้สำหรับการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ซึ่งสะท้อนถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าฟิล์มเซรามิกมีความคุ้มค่าในการลงทุนสูงสุด โดยมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 3.87 ปี ทั้งนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับสมมติฐานของแบบจำลอง เช่น อัตราค่าไฟฟ้า และประสิทธิภาพของระบบปรับอากาศ นอกจากนี้ผลลัพธ์ยังสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการออกแบบอาคารเพื่อการอนุรักษ์พลังงานการลดการใช้พลังงานดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (SDG 13: Climate Action) (United Nations, 2017) โดยเฉพาะในบริบทของประเทศเขตร้อนที่มีความต้องการใช้พลังงานเพื่อการทำความเย็นสูง

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเติมเต็มช่องว่างทางวิชาการในด้านการเปรียบเทียบฟิล์มกรองแสงภายใต้แบบจำลองเชิงตัวเลขเดียวกัน และการเชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์กับการตัดสินใจเชิงเศรษฐศาสตร์ในบริบทภูมิอากาศเขตร้อน ในขณะเดียวกันแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะกลไกการนำความร้อนภายใต้สภาวะคงตัวและไม่ได้รวมผลของการพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในสภาวะจริง ดังนั้น ผลลัพธ์ควรถูกตีความภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว และควรมีการศึกษาต่อยอดเพื่อเพิ่มความแม่นยำและสมจริงของแบบจำลองในอนาคต โดยสรุปผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกใช้ฟิล์มกรองแสง เพื่อยกระดับประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารและสนับสนุนการพัฒนาอาคารอย่างยั่งยืน

ข้อจำกัดของงานวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้สามารถแสดงแนวโน้มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มกรองแสงได้อย่างชัดเจนภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตาม แบบจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์ยังมีข้อจำกัดสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่ การพิจารณาเฉพาะการนำความร้อนในสภาวะคงตัว โดยไม่รวมการพาความร้อนและการแผ่รังสีซึ่งมีอิทธิพลสูงในสภาพใช้งานจริง การแทนฟิล์มด้วยเงื่อนไขขอบเขตแทนการจำลองเป็นชั้นวัสดุจริง ทำให้ไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมภายในเชิงจุลภาคได้อย่างครบถ้วน และการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ที่อิงสมมติฐานค่าคงที่ ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพการใช้งานจริงของแต่ละอาคาร ดังนั้น ผลลัพธ์จึงเหมาะใช้เป็นแนวทางประเมินและเปรียบเทียบสมรรถนะในระดับ และควรพัฒนาต่อยอดด้วยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบหลายโหมด การจำลองเชิงสามมิติ และการทวนสอบด้วยข้อมูลภาคสนาม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสมจริงของแบบจำลองในอนาคต

References

- Bahadori-Jahromi, A., Rotimi, A., Mylona, A., Godfrey, P. and Cook, D. (2017). Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings. *Sustainability*, 9(5), <https://doi.org/10.3390/su9050731>

- Baskar, I. and Chellapandian, M. (2022). Experimental and Finite Element Analysis on the Developed Real-Time form Stable PCM-Based Roof System for Thermal Energy Storage Applications. *Energy and Buildings*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112514>
- Bathe, K.J. (1996). *Finite Element Procedures*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Callister, W.D., Jr. (2007). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (7thed). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Çengel, Y.A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach* (2nded). New York, NY: McGraw-Hill.
- Chen, Z. (2023). Finite Element Analysis on Heat Convection Effect on Air Temperature Distribution in a Heated Room. *Theoretical and Applied Natural Science*, 5, 482-489. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/5/20230291>
- Fleury, B., Abraham, E., De La Cruz, J.A., Chandrasekar, V.S., Senyuk, B., Liu, Q., Cherpak, V., Park, S., ten Hove, J.B. and Smalyukh, I.I. (2020). Aerogel from Sustainably Grown Bacterial Cellulose Pellicles as a Thermally Insulative Film for Building Envelopes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(30), 34115-34121. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c08879>
- Huang, H.-Y., Hu, W.-C., Chen, C.-K., Lin, T.-H., Lin, F.-Y., Cheng, C.-C., Su, T.-C. and Yu, P.-Y. (2024). Evaluation of the Effects of Window Films on the Indoor Environment and Air-Conditioning Electricity Consumption of Buildings. *Energies*, 17(6), <https://doi.org/10.3390/en17061388>
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6thed). John Wiley & Sons.
- Karim, M.A. (2025). Analytic Modeling to Study the Insolation Heat Gain of Semi Insulated Building in Hot Climate. *Academy Journal For Basic and Applied Sciences*, 7(1), 1-5. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15507447>
- Lampert, C.M. (1981). Heat Mirror Coatings for Energy Conserving Windows. *Solar Energy Materials*, 6(1), 1-41. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(81\)90058-1](https://doi.org/10.1016/0165-1633(81)90058-1)
- Luo, Z., Maassen, J., Deng, Y., Du, Y., Garrelts, R.P., Lundstrom, M.S., Ye, P.D. and Xu, X. (2015). Anisotropic In-Plane Thermal Conductivity Observed in Few-Layer Black Phosphorus. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9572>
- Mayer, R., Enache-Pommer, E., Parsons, G., Mazor, M., Hansbro, J., Lastovica, J., Buck, C. and Maurer, M. (2014). Finite Element Thermal Modeling and Correlation of Various Building Wall Assembly Systems. *Energy and Buildings*, 75, 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.034>
- Rawat, P. (2017). Performance Evaluation of Parabolic Solar Concentrator with Carbon Credit Assessment. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 4(11), 697-702. <https://www.jetir.org/papers/JETIR1711118.pdf>
- Reddy, J.N. (2019). *An Introduction to the Finite Element Method* (4thed). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Roache, P.J. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), 405-413. <https://doi.org/10.1115/1.2910291>
- Thai Meteorological Department. (2025). *Climate and Temperature Data Services*. <https://www.tmd.go.th/service/tmdData>

- United Nations. (2017). *Global Indicator Framework for the Sustainable Development Goals and Targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/71/313, Annex)*. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
- Valachova, D. and Skotnica, J. (2019). Using the Finite Element Method to Predict Heat Dissipation in a Timber Frame Building Construction. *Wood Research*, 64(5), 859-870. <https://www.woodresearch.sk/wr/201905/10.pdf>
- Zhou, H., Fransson, Å. and Olofsson, T. (2021). An Explicit Finite Element Method for Thermal Simulations of Buildings with Phase Change Materials. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196194>
- Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000). *The Finite Element Method* (5th ed., Vols. 1-3). Oxford, England: Butterworth-Heinemann.