



## การเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิของหลังคารับรังสีอาทิตย์ หลังคาระบายอากาศ และ หลังคาสเปรย์น้ำ

ณัฐวุฒิ วิชัย และนินนาท ราชประดิษฐ์\*

### Comparison of roof temperature reduction between roof solar collector, ventilation roof and water spray roof

Natthawut Wichai and Ninnart Rachapradit\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ65000 พิษณุโลก.

Department of Mechanical of Engineering Naresuan University, Phitsanulok 65000

\*Corresponding author: ninnart@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการระบายความร้อนจากหลังคาโดยพิจารณาจากอุณหภูมิของหลังคา ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาหลังคาลดความร้อนสามแบบ คือหลังคารับรังสีอาทิตย์ (Roof Solar Collector; RSC) หลังคาระบายอากาศ (Ventilation Roof; VR) ที่มีการระบายอากาศด้วยพัดลม และ หลังคาสเปรย์น้ำ (Water Spray Roof; WS) ที่มีการใช้น้ำระบายความร้อนที่ผิวหลังคา ซึ่งจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าบนผิวหลังคาของหลังคา RSC มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าหลังคา VR โดยเฉลี่ยประมาณ 0.97 °C และสูงกว่าหลังคา WSR โดยเฉลี่ยประมาณ 15.62 °C และอุณหภูมิที่ใต้ฝ้าเพดานของหลังคา RSC มีอุณหภูมิสูงกว่าหลังคา VR โดยเฉลี่ยประมาณ 0.98 °C และสูงกว่าหลังคา WSR โดยเฉลี่ยประมาณ 2.33 °C จะเห็นได้ว่าที่ผิวหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำนั้นสามารถลดอุณหภูมิลงได้มากที่สุดเนื่องจากมีผลมาจากการระบายความร้อนโดยการพาความร้อนโดยอากาศร่วมกับการถ่ายเทความร้อนด้วยการระเหยน้ำจากผิวด้านบนของหลังคาทำให้ลดการสะสมของความร้อน ส่วนหลังคาที่มีการระบายอากาศนั้นเมื่อเทียบกับหลังคารับรังสีอาทิตย์สามารถลดอุณหภูมิได้มากขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะมีการพาความร้อนภายในช่องของหลังคามากขึ้น

คำสำคัญ: การลดอุณหภูมิหลังคา หลังคารับรังสีอาทิตย์ หลังคาระบายอากาศ หลังคาสเปรย์น้ำ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อุณหภูมิหลังคา

#### Abstract

This paper works on the comparison of roof cooling system with considering the roof temperature reduction by using the mathematical models for studying three types of roof cooling system such as: the roof solar collector (RSC), the ventilation roof (VR) that is the roof cooling system with fan, and the water spray roof (WSR) that is the roof cooling system using water spraying on the roof surface. From the numerical simulation using the mathematical models, it was found that the mean temperature of the roof surface of the RSC was higher than that of the VR about 0.97 °C, and that of the WSR about 15.62 °C. The temperature under the ceiling of the RSC was higher than that of the VR about 0.98 °C, and that of the WSR about 2.33 °C. It could be seen that the WSR presented the maximum reduction of the roof surface temperature due to the heat transfer with the heat convection and the evaporative cooling on the upper surface of the roof affecting the decrease of the heat accumulation. When the VR compared with the RSC, it showed more effective of the reduction of the roof surface temperature because



of the more the mass flow rate of air the more the heat transfer by the convection inside the air gap. This comparison of math models is able to be useful for choosing the proper roof.

**Keywords:** roof temperature reduction, roof solar collector, water spray roof, ventilation roof, mathematical models, roof temperature

## 1. ที่มาและความสำคัญ

จากสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันนั้นมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงตลอดปีและมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ [1] จึงส่งผลกระทบต่ออาคารและบ้านพักอาศัยทำให้มีการสะสมของปริมาณความร้อนในหลังคามากขึ้นและเกิดการส่งผ่านความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารบ้านพักอาศัย ทำให้ภายในอาคารบ้านพักอาศัยมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากอาคารบ้านพักอาศัยในปัจจุบันมีการเปิดระบบปรับอากาศตลอดวันอยู่แล้ว เมื่ออุณหภูมิภายในอาคารสูงขึ้นจึงส่งผลกระทบต่ออัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าที่สูงมากขึ้นตามไปด้วย [2] ดังนั้นการหาแนวทางการลดความร้อนจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากพิจารณาในส่วนของบ้านพักอาศัยทั่วไปจะพบว่าหลังคาเป็นส่วนที่รับสะสมความร้อนและถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ตัวบ้านมากที่สุด เพราะเป็นส่วนที่รับความร้อนจากรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ยาวนานที่สุดและมีพื้นที่รับรังสีมากที่สุด [3] เนื่องจากประเทศไทยได้รับปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์สูงตลอดปี และจัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหลาย ๆ ประเทศ

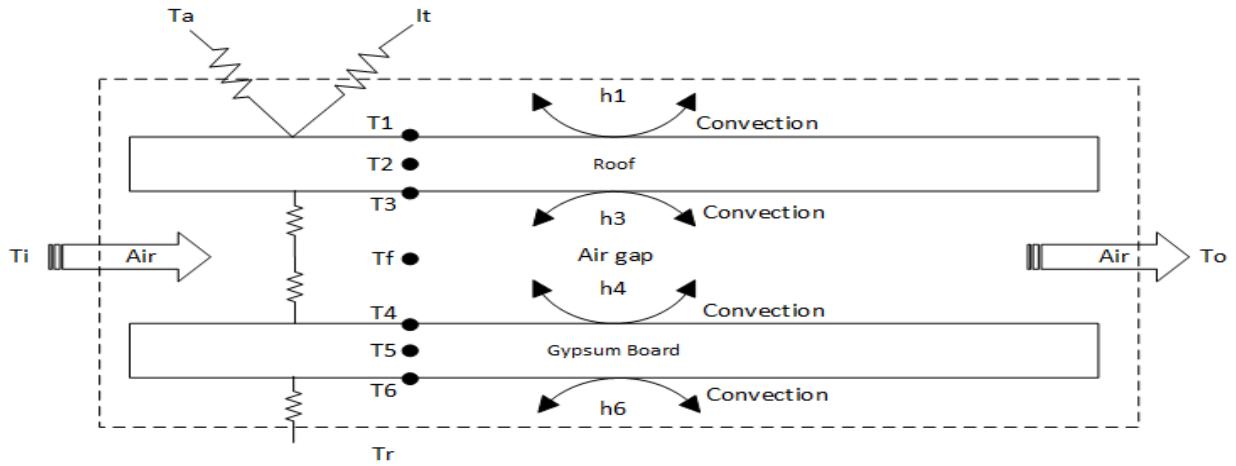
การลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาเข้าสู่ตัวอาคารมีหลายวิธี ทั้งการเลือกใช้วัสดุที่มีความเป็นฉนวนกันความร้อนและวัสดุที่มีประสิทธิภาพการแผ่รังสีความร้อนต่ำ [4] การเลือกใช้สีก็มีผลกับการสะท้อนความร้อนของหลังคา [5] นอกจากนี้มีแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจคือการใช้วิธีการ ถ่ายเทความร้อนโดยวิธีทางธรรมชาติ (Passive cooling) กับหลังคา ซึ่งตามหลักการจะลดความร้อนเข้าสู่ตัวอาคารและเพิ่มความสบายแก่ผู้อยู่อาศัยอีกทางหนึ่งด้วย [6] และการลดความร้อนจากหลังคาด้วยวิธีการใช้หลักการปล่องระบายอากาศแสงอาทิตย์ (Solar Chimney; SC) ซึ่งหลักการ SC นั้นสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่นการประยุกต์ใช้กับผนัง หลังคา การประยุกต์ใช้กับผนังจะเรียกว่าช่องผนังระบายอากาศ (Trombe Wall) แต่เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับหลังคาจึงเรียกว่าหลังคาบั้งรังสีอาทิตย์ (Roof Solar Collector; RSC) [7] ซึ่งหลักการของ RSC นั้นจะอาศัยแรงลอยตัวของอากาศ เมื่อรับความร้อนเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของอากาศในช่องหลังคา นอกจากวิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น การประยุกต์ใช้อากาศและน้ำมาช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากหลังคานั้นก็เป็นแนวทางที่ทำได้ง่าย [8] มีการนำหลังคา มาประยุกต์ใช้กับการระบายความร้อนจากหลังคาด้วยอากาศและน้ำ เช่น หลังคาระบายอากาศ (Ventilation Roof ; VR) ซึ่งหลักการคือการเพิ่มอัตราการระบายอากาศในช่องว่างเพื่อให้เกิดการพาความร้อนจากภายในหลังคาออกสู่ภายนอกมากขึ้น และหลังคาสเปรย์น้ำ (Water Spray Roof; WSR) ซึ่งหลักการคือการลดอุณหภูมิบนผิวหลังคาโดยการระเหยน้ำ และยังมีงานวิจัยที่ช่องที่เคยมีการทำมาแล้ว เช่นงานวิจัยของ Lee at al. [9] ได้กล่าวถึงการใช้ลมในการเพิ่มการระบายอากาศในช่องว่างสามารถลดการสะสมความร้อนได้มากกว่าการระบายอากาศแบบธรรมชาติ

งานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการลดความร้อนบนหลังคา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC มาเปรียบเทียบกับทดลองจริงที่มีการใช้หลังคา RSC โดยอ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [10] และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับหลังคา VR และหลังคา WSR โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อเปรียบเทียบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของหลังคาทั้งสามแบบดังนี้ แบบแรกทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของหลังคา RSC แบบที่สองทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของหลังคา VR แบบที่สามทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของหลังคา WSR โดยหลังคาที่ใช้ศึกษามีวัสดุที่ใช้ทำหลังคาเป็นกระเบื้องคอนกรีต โดยผู้วิจัยสนใจสร้างแบบจำลองมาเพื่อใช้ทำนายค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ และเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาร่วมกับการทดลองในขั้นต่อไป

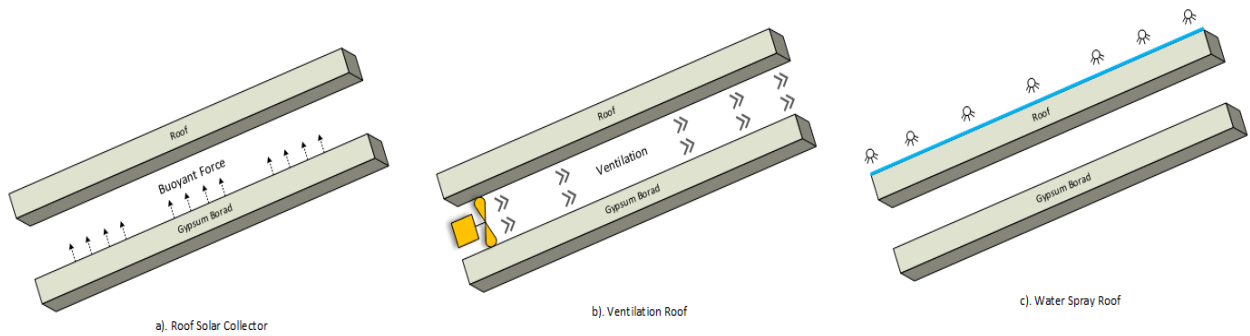


## 2. วิธีการดำเนินงาน

รูปแบบของหลังคาที่ใช้ในงานวิจัยทั้ง 3 แบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบหลังคาใช้พื้นฐานของสมการสมดุลพลังงานของแต่ละส่วนของหลังคา พิจารณาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติตามแนวตั้งฉากกับหลังคา โดยแยกการพิจารณาในส่วนของกระเบื้องคอนกรีต ช่องว่างอากาศและฝ้าเพดาน โดยการวิเคราะห์สภาวะการถ่ายเทความร้อนสำหรับสภาวะไม่สม่ำเสมอ และแบ่ง node ตามรูป 2.1 จากสมการแสดงสมดุลพลังงานทั้งหมดสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite-Difference method) แบบเอ็กซ์พลิซิที (Explicit method) เพื่อใช้ทำนายค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ และอัตราการไหลของอากาศของหลังคาในแต่ละช่วงเวลา



รูป 2.1 แสดงการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของหลังคา



รูป 2.2 แสดงรูปแบบหลังคา a). Roof Solar Collector b). Ventilation Roof c). Water Spray Roof

สมการสมดุลพลังงานของแผ่นกระเบื้องคอนกรีต ที่ตำแหน่ง  $X_m = 0$  บนผิวของวัสดุผนังหลังคาแผ่นกระเบื้องคอนกรีต โดยที่สัญลักษณ์กำกับล่าง  $m$  หมายถึง กระเบื้องคอนกรีต



$$\alpha I t + h_1(T_a - T_1) + \varepsilon_m \sigma_m (T_a^4 - T_1^4) + k_m \frac{(\partial T_m)}{(\partial x_m)} = \rho_m C_m \frac{(\Delta x_m)}{2} \frac{(\partial T_1)}{\partial t} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $k_m \frac{(\partial T_m)}{(\partial x_m)} = k_m \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x_m}$

ที่ตำแหน่ง  $0 < X_m < d_m$  ภายในเนื้อของวัสดุผนังหลังคาแผ่นกระเบื้องคอนกรีต

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_m \frac{\partial T_m}{\partial x}) + g' = \rho_m C_m (\frac{\partial T_m(x,t)}{\partial t}) \quad (2.2)$$

โดยที่  $g' = 0$  และ  $k_m = \text{constant}$

$$\frac{\partial T_m(x,t)}{\partial t} = \alpha_m \frac{(\partial^2 T_m)}{(\partial x^2)} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\alpha_m = \frac{k_m}{\rho_m C_m}$

ที่ตำแหน่ง  $X_m = d_m$  ผิวด้านล่างของวัสดุผนังหลังคาแผ่นกระเบื้องคอนกรีต

$$h_3(T_f - T_3) + \sigma \frac{(T_4^4 - T_3^4)}{(\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1)} + k_m \frac{(\partial T_m)}{(\partial x_m)} = \rho_m C_m \frac{(\Delta x_m)}{2} \frac{(\partial T_3)}{\partial t} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $T_f = \frac{T_0 + T_i}{2}$

สมการแสดงสมดุลพลังงานในส่วนอากาศในช่องว่างระหว่างแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ไฟเบอร์กับฝ้าเพดานสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$h_3(T_3 - T_f) + h_4(T_4 - T_f) + \frac{\dot{m}_a}{A} C_p (T_i - T_o) = 0 \quad (2.5)$$

อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศภายในช่องว่างระหว่างแผ่นกระเบื้องซีเมนต์ไฟเบอร์กับฝ้าเพดาน

$$\dot{m}_a = \rho_a \text{Gap} W \bar{V} \quad (2.6)$$

สมการความเร็วเฉลี่ยของอากาศภายในช่องหลังคารับรังสีอาทิตย์ระหว่างแผ่นกระเบื้องคอนกรีตกับแผ่นยิปซัมบอร์ด โดยอ้างอิงจากโครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ผนัง Trombe Wall แบบดัดแปลงเพื่อการระบายอากาศตามธรรมชาติภายในบ้านพักอาศัย” [11],[12]



$$\bar{V} = C_d Gap W \left[ gH \sin \theta \frac{(T_o - T_i)}{T_i} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

สมการคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศภายในช่องหลังคา RSC เนื่องจากแรงลอยตัว (Air flow due to stack effect)

$$Q_s = C_d Gap W \left[ gH \sin \theta \frac{(T_o - T_i)}{T_i} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

สมการสมดุลพลังงานของแผ่นยิปซัมบอร์ด สามารถเขียนได้ดังนี้

ที่ตำแหน่ง  $X_g = 0$  บนผิวของวัสดุแผ่นยิปซัมบอร์ด โดยที่สัญลักษณ์กำกับล่าง  $g$  หมายถึง แผ่นยิปซัมบอร์ด

$$h_3(T_f - T_4) + \sigma \frac{(T_4^4 - T_3^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1\right)} + k_g \frac{(\partial T_g)}{(\partial x_g)} = \rho_g C_g \frac{(\Delta x_g)}{2} \frac{(\partial T_4)}{\partial t} \quad (2.9)$$

ที่ตำแหน่ง  $0 < X_g < d_g$  ภายในเนื้อของวัสดุแผ่นยิปซัมบอร์ด

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + g' = \rho_g C_g \left( \frac{\partial T_g(x,t)}{\partial t} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่  $g' = 0$  และ  $k_g = \text{constant}$

$$\frac{\partial T_g(x,t)}{\partial t} = \alpha_g \frac{(\partial^2 T_g)}{(\partial x^2)} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\alpha_g = \frac{k_g}{\rho_g C_g}$

ที่ตำแหน่ง  $X_g = d_g$  ผิวด้านล่างของวัสดุแผ่นยิปซัมบอร์ด

$$h_6(T_r - T_6) + \epsilon_g \sigma (T_r^4 - T_6^4) + k_g \frac{(\partial T_g)}{(\partial x_g)} = \rho_g C_g \frac{(\Delta x_g)}{2} \frac{(\partial T_6)}{\partial t} \quad (2.12)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องซีแพคโมเนียซึ่งขึ้นอยู่กับการพาความร้อนโดยลมซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์จากสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$h_1 = 3.0 + 7.4\sqrt{V} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $V =$  ความเร็วลมเฉลี่ยอากาศแวดล้อมของแต่ละวันโดยมีค่าประมาณ 2 m/s



สำหรับกรณีของหลังคา WSR สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตซึ่งที่ขึ้นอยู่กับการระเหยโดยน้ำ (evaporation) และพาความร้อนโดยน้ำ (outside convection) [13] ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์จากสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

การคำนวณสัมประสิทธิ์พาความร้อนโดยน้ำ (outside convection) มีรายละเอียดดังนี้

$$h_o = \frac{(T_1 - T_a)}{Q_{conv, outside}} \quad (2.14)$$

$$h_o = \frac{Nu.k}{L} \quad (2.15)$$

$$Nu = 0.037(Re^{0.8} \cdot Pr^{0.333}) \quad (2.16)$$

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (2.17)$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การระเหยโดยน้ำ (evaporation) มีรายละเอียดดังนี้

$$Q_{evap} = 0.013h_e(P_w - \gamma P_a) \quad (2.18)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตกับอากาศในช่องว่างอากาศ ( $h_3$ ) ประมาณมีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผิวด้านบนแผ่นยิปซัมบอร์ดกับอากาศในช่องว่างอากาศ ( $h_4$ ) นั้นสามารถใช้ความสัมพันธ์ของ Nusselt Number (Nu) แบบ Free Convection คำนวณได้ดังนี้

$$h_3 = \frac{Nu k_f}{D_h} \quad (2.19)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (2.20)$$

$$Nu = 1 + \left\{ 0.071(Gr.Pr)^{1/3} \left[ \frac{H}{D_h} \right]^{-1/9} - 1 \right\} \sin \theta \quad (2.21)$$

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.22)$$

$$P = 2(W + Gap) \quad (2.23)$$

ตัวเลขกราชอฟ (Grashof Number,  $Gr$ ) คือสัดส่วนของแรงลอยตัวและแรงจากความหนืดที่กระทำต่อของไหลตัวเลขกราชอฟเป็นตัวเลขไร้มิติหรือไร้มิติ โดยการพาความร้อนแบบต่าง ๆ [14]



$$Gr = \frac{g \beta' \Delta T H^3}{\nu^2} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $\beta' = \frac{1}{T_f}$

สำหรับค่า Re ของการพาความร้อนภายในช่องว่างอากาศสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Re = Gr Pr \quad (2.25)$$

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวด้านล่างของแผ่นยิบซัมบอร์ด สามารถหาได้จากสมการ

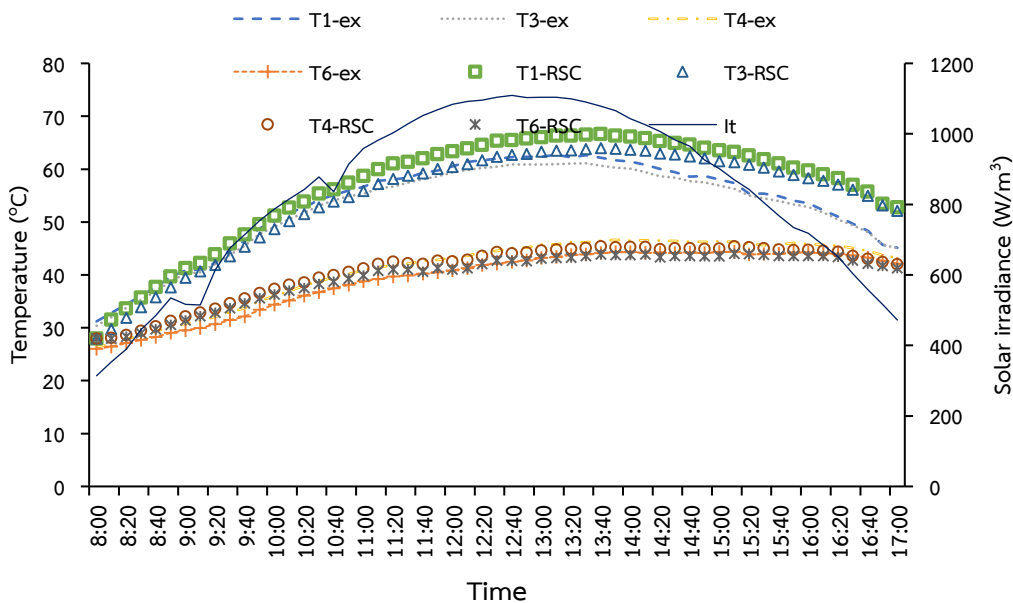
$$h_6 = 1.42 [\sin \theta (T_6 - T_r) / H]^{0.25} \quad (2.26)$$

### 3. วิเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเริ่มพิจารณาจากผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับผลจากการทดลองที่ผ่านมา [10, 11] สำหรับหลังคา RSC และ หลังคา WSR ตามลำดับ และสำหรับการเปรียบเทียบอุณหภูมิของหลังคาทั้ง 3.1 รูปแบบในช่วงท้ายจะใช้ข้อมูลอ้างอิงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแวดล้อมและค่าความเข้มแสงอาทิตย์จากข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยเดิมข้างต้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลังคา RSC เทียบกับผลจากการทดลอง

เปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC



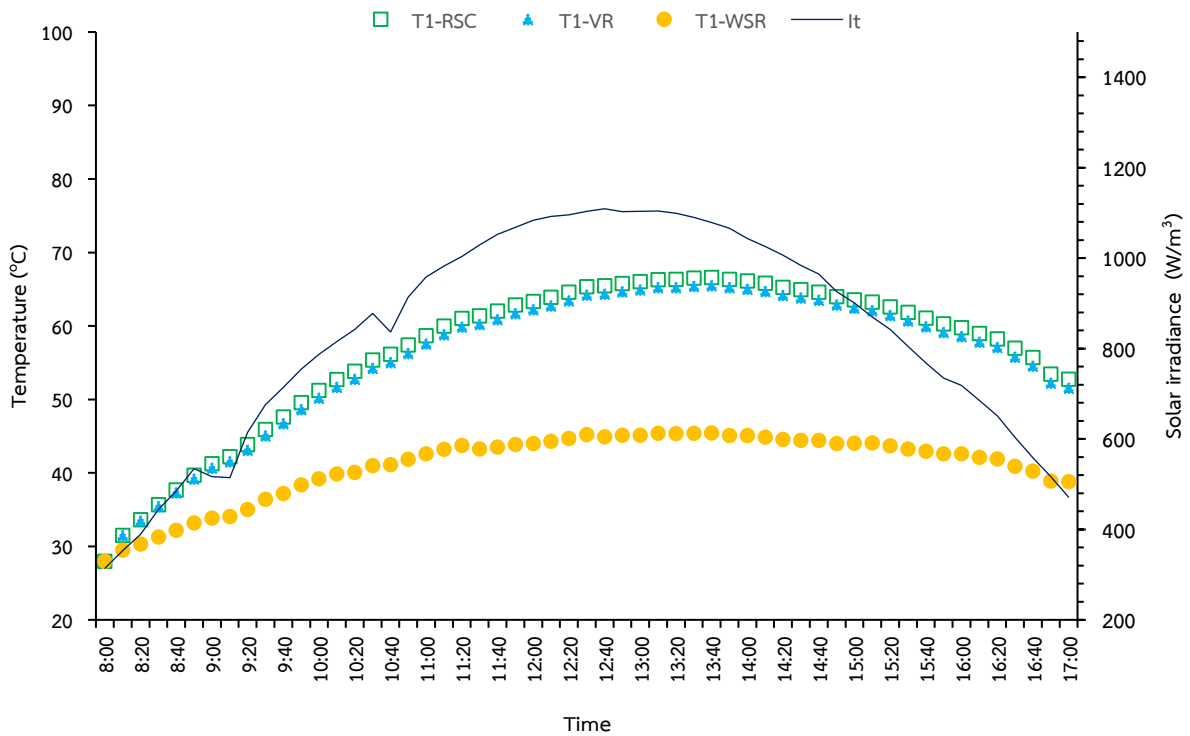
รูป 3.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC เทียบกับผลจากการทดลอง



จากรูปที่ 3.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC เทียบกับผลจากการทดลองตั้งแต่เวลา 8:00 – 17:00 น. โดยใช้ข้อมูลค่าอุณหภูมิอากาศและความเข้มแสงอาทิตย์ของวันที่ทำการทดลองจริง ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์จะอ่านจากแกนพหุติภูมิ และค่าอุณหภูมิจะอ่านจากแกนปฐมภูมิ สังเกตได้ว่าค่าของอุณหภูมินั้นจะสูงขึ้นตามค่าความเข้มแสงอาทิตย์ เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์ลดอุณหภูมิก็จะลดลงไปด้วย เนื่องจากการทดลองจริงนั้นมียอดต่อของช่องหลังคาซึ่งอาจจะทำให้มีการรั่วของอากาศเกิดขึ้น แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นเราจำลองว่าหลังคานั้นไม่มีรอยรั่ว จึงทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ลดลงค่าอุณหภูมิจะลดต่ำกว่าแบบทดสอบจริง จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวหลังคาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC มีอุณหภูมิสูงกว่าแบบทดสอบจริงของหลังคา (โดยเฉลี่ยประมาณ 3.35 °C) และที่ผิวใต้ฝ้าเพดานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC มีอุณหภูมิสูงกว่าแบบทดสอบจริงของหลังคา (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.46 °C) ซึ่งเป็นผลมาจากสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวด้านบนของกระเบื้องคอนกรีตโดยเฉลี่ย ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็จะขึ้นกับความเร็วลมเฉลี่ยอากาศแวดล้อม โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ค่าความเร็วลมที่ประมาณ 2 m/s<sup>2</sup> เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับในแต่ละจุดก็จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีความใกล้เคียงกัน

### 3.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิมบนผิวหลังคาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC, VR, WRS

เปรียบเทียบอุณหภูมิมบนผิวหลังคาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC, VR, WRS



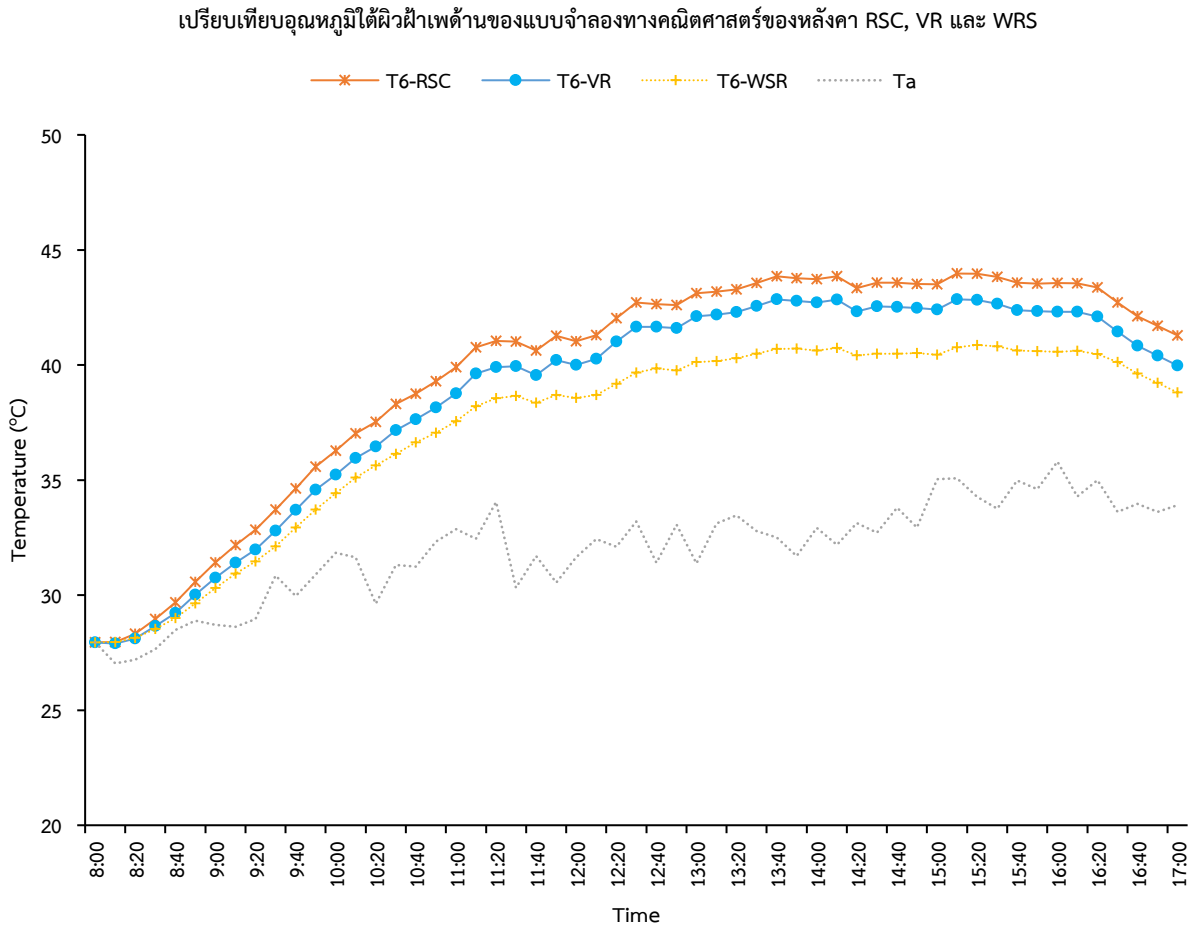
รูป 3.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิมบนผิวหลังคาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC, VR, WRS

การเปรียบเทียบอุณหภูมิของผิวหลังคาในแต่ละรูปแบบ แสดงได้ตามรูป 3.2 โดยมีเฉพาะข้อมูลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวของหลังคา RSC มีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยประมาณ 56.61 °C สูงกว่าหลังคา VR เล็กน้อย (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.97 °C) และสูงกว่าหลังคา WRS (โดยเฉลี่ยประมาณ 15.62 °C) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ผิวหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำสามารถลดอุณหภูมิลงได้ดีกว่าหลังคาชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผิวด้านบนของแผ่นกระเบื้องคอนกรีตที่มีการสเปรย์น้ำมีการระบายความร้อนด้วยทั้งจากการถ่ายเทความร้อนโดยที่ผิวน้ำและอากาศและการพาความร้อนจากการระเหยของน้ำ (outside convection)





### 3.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิใต้ผิวฝ้าเพดานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC, VR และ WRS



รูป 3.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิใต้ผิวฝ้าเพดานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC, VR และ WRS

ซึ่งจากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยใต้ฝ้าเพดานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC มีอุณหภูมิประมาณ 39.65 °C ซึ่งสูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา VR เล็กน้อย (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.98 °C) และสูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา WRS (โดยเฉลี่ยประมาณ 2.33 °C) ซึ่งหลังคาที่มีการระบายอากาศมากขึ้นจะสามารถลดอุณหภูมิได้มากขึ้นเนื่องจากจะมีการพาความร้อนในช่องระบายอากาศ (Air gap) มีอากาศภายนอกที่เย็นกว่ามาแทนที่อากาศภายใน ความร้อนที่สะสมในช่องระบายอากาศ ก็จะถูกพาออกสู่ข้างนอกมากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิใต้ฝ้าเพดานของหลังคา VR มีอุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่นำมาระบาย และหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำจะเห็นได้ว่าการลดอุณหภูมิได้มากที่สุด เนื่องจากที่ผิวด้านบนของหลังคามีการลดการสะสมของความร้อนได้มากซึ่งก็จะทำให้อุณหภูมิลดลงตามไปด้วย

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอุณหภูมิของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC เปรียบเทียบกับหลังคาที่มีการทดสอบจริง พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันซึ่งก็ทำให้สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหลังคา RSC นี้ไปประยุกต์ใช้กับหลังคาที่มีการระบายอากาศ (VR) และหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำ (WRS) ได้ ซึ่งจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และนำแบบจำลองทั้งสามแบบมาเปรียบเทียบอุณหภูมิที่สนใจจะพบว่า



อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวหลังคาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC สูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา VR เล็กน้อย (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.97 °C) และสูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา WSR (โดยเฉลี่ยประมาณ 15.62 °C) ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ผิวหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำนั้นสามารถลดอุณหภูมิลงได้เยอะมากเนื่องจากมีผลมาจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการลดความร้อนโดยการระเหยน้ำระหว่างน้ำกับอากาศ และอุณหภูมิเฉลี่ยใต้ฝ้าเพดานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา RSC สูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา VR เล็กน้อย (โดยเฉลี่ยประมาณ 0.98 °C) และสูงกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หลังคา WSR (โดยเฉลี่ยประมาณ 2.33 °C) ซึ่งหลังคาที่มีการระบายอากาศมากขึ้นจะสามารถลดอุณหภูมิได้มากขึ้นเนื่องจากจะมีการพาความร้อนในช่องระบายอากาศ (Air gap) ซึ่งมีอากาศภายนอกที่เย็นกว่ามาแทนที่อากาศภายใน ความร้อนที่สะสมในช่องระบายอากาศก็จะถูกพาออกสู่ข้างนอกมากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิใต้ฝ้าเพดานของหลังคา VR มีอุณหภูมิลดลงจากอุณหภูมิอากาศภายนอกที่นำมาระบาย และหลังคาที่มีการสเปรย์น้ำจะเห็นได้ว่าการลดอุณหภูมิได้มากที่สุด เนื่องจากที่ผิวด้านบนของหลังคามีการลดการสะสมของความร้อนได้มากซึ่งก็จะทำให้อุณหภูมิลดลงตามไปด้วย

จากผลจากแบบจำลองข้างต้นแม้ว่าจะมีผลแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นแนวโน้มของการลดอุณหภูมิของหลังคาทั้ง 3 รูปแบบได้พอสมควรแต่อย่างไรก็ตามยังขาดข้อมูลการทดลองจริง มีเพียงข้อมูลของการทดลองในสภาวะจริงของหลังคา RSC เท่านั้นยังขาดข้อมูลการทดลองของหลังคา VR และหลังคา WSR ในสภาวะเดียวกันรวมถึงผลกระทบจากความชื้นของอากาศ ซึ่งยังมีความจำเป็นต้องทดลองเพิ่มเติม ซึ่งปัจจุบันคณะผู้ทำวิจัยอยู่ในช่วงระหว่างการทำกรวิจัยทดสอบเปรียบเทียบหลังคา 3 รูปแบบดังกล่าว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้รูปแบบการลดความร้อนให้เหมาะสมกับหลังคาจริงต่อไป

สัญลักษณ์ คำย่อ และ ดรรชนีล่าง

$It$	ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ( $W/m^2.K$ )
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวนวัตกรรม ( $W/m^2.K$ )
$k$	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $W/m.K$ )
$\epsilon$	ค่าการแผ่รังสีของวัตถุเทา มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเทากับวัตถุดำเมื่อมีอุณหภูมิเท่า ๆ กัน
$\sigma$	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8}$ ( $W/m^2.K^4$ )
$T_a$	อุณหภูมิอากาศ (°C)
$T_i$	อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C)
$T_o$	อุณหภูมิอากาศทางออก (°C)
$T_r$	อุณหภูมิภายในห้อง (°C)
$T$	อุณหภูมิที่ผิวนวัตกรรม (°C)
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
$C_m$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (specific heat capacity, $J/kg.K$ )
$\alpha$	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อน
$\theta$	ค่ามุมเอียงหลังคารับรังสีอาทิตย์กับแนวระดับ (°)
$A$	พื้นที่ ( $m^2$ )
$C_d$	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของช่องเปิด
$C_p$	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $J/kg.K$ )
$d$	ความหนา (cm)
$g$	ความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )



$g'$	แหล่งพลังงานในตัวกลาง
$G$	แผ่นยิปซัมบอร์ด
$H$	ความยาวของหลังคาปรับรังสีอาทิตย์เท่ากับ (m)
$L$	ความยาวของปล่อง ระบายรังสีอาทิตย์ (m)
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
$t$	เวลา (s)
$V$	ความเร็วของอากาศ (m/s)
$v$	ความหนืดคินแมติก ( $m/s^2$ )
$W$	ความกว้างของหลังคาบ้านปรับรังสีอาทิตย์ (m)
$X$	ระยะตามแนวตั้งฉากกับหลังคา (m)
$\gamma$	ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)
$h_e$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากน้ำบนแผ่นไปยังอากาศแวดล้อม
$P_w$	Partial pressure of air (Pa)
$P_a$	Partial pressure of Water vapor (Pa)
Pr	Prandtl Number
Re	Reynolds Number
$Gap$	ขนาดช่องว่างอากาศ ( $m^2$ )
$Q_{evap}$	สัมประสิทธิ์การระเหยโดยน้ำ (evaporative)
$Q_{conv, outside}$	สัมประสิทธิ์พาความร้อนโดยน้ำ (outside convection)
$Q_s$	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$m$	กระเบื้องคอนกรีต
$g$	แผ่นยิปซัมบอร์ด
$ex$	ผลจากการทดลองจริง
1–6	ตำแหน่งของ node ตามรูป 2.1

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Sangchan Limjirakan, "Assessment of Extreme Weather Events and Hotspot Areas of Thailand," Report in Thailand 2553.
- [2] Somchai Maneewan, "Economical comparative analysis between houses built using common," *C. EGAT J.*, vol. 2, pp. 36–45, 2003.
- [3] K. M. Al-Obaidi, "Passive cooling techniques through reflective," *Front. Archit. Res.*, vol. 3, pp. 283–297, 2014.
- [4] M. Caren, "Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs," *Energy Build.*, vol. 40, pp. 445–451, 2008.
- [5] C. Ferrari, A. Libbra, F. M. Cernuschi, L. De Maria, S. Marchionna, M. Barozzi, C. Siligardi, and A. Muscio, "A composite cool colored tile for sloped roofs with high 'equivalent' solar reflectance," *Energy and Buildings*, vol. 114. pp. 221–226, 2016.
- [6] T. Chenvidyakarn, "Review Article: Passive Design for Thermal Comfort in Hot Humid Climates," *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, vol. 5, no. 1. pp. 1–28, 2007.



- [7] X. Q. Zhai, Z. P. Song, and R. Z. Wang, “A review for the applications of solar chimneys in buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 8. pp. 3757–3767, 2011.
- [8] S. Wanphen and K. Nagano, “Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect,” *Building and Environment*, vol. 44, no. 2. pp. 338–351, 2009.
- [9] S. Lee, S. H. Park, M. S. Yeo, and K. W. Kim, “An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof,” *Building and Environment*, vol. 44, no. 7. pp. 1431–1439, 2009.
- [10] นายจักรพงษ์ เรืองศรีจันทร์, “Case study of heat reduction in roof by solar cell,” มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก, 2016.
- [11] N. Rachapradit, “Roof Heat Reduction with Side Opening Roof Solar Collector,” *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา*, vol. 7, no. 1, pp. 33–44, 2013.
- [12] เจริญพร เลิศสถิตธนกร. “โครงการวิจัยชุดการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ผนัง Trome Wall แบบดัดแปลงเพื่อการระบายอากาศตามธรรมชาติภายในบ้านพักอาศัย.กรุงเทพฯ” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540
- [13] A. Carrasco, “EVALUATION OF A DIRECT EVAPORATIVE,” Report in Texas A&M University, 1987.
- [14] เหมราช วงศ์คำตัน, “การปรับปรุงสมรรถนะการระบายอากาศของหลังคารับรังสีอาทิตย์ โดยใช้ระบบเซลล์แสงอาทิตย์,” *วิทยานิพนธ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2551.