

# อิทธิพลของรูปแบบการไหลเวียนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ภายในแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมแบบสองชั้น

## Influence of air flow patterns on the heat transfer coefficients of the double pass photovoltaic/thermal (PV/T) collector

วิบูลย์ อันพิมพา,<sup>1</sup> นิติศักดิ์ ปาสาจะ,<sup>2</sup> อนุสรณ์ แสงประจักษ์<sup>2</sup>

Wibool Anpimpa,<sup>1</sup> Nitisak Pasaja,<sup>2</sup> Arnusorn Seangprajak<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม เป็นแผงที่ผลิตทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกันในอุปกรณ์เดียว เป็นการผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์สุริยะและเทคโนโลยีการผลิตพลังงานความร้อนของแผงรับรังสีอาทิตย์ เพื่อการเพิ่มสมรรถนะการทำงานของแผงให้สูงขึ้น จึงได้มีการพัฒนาเป็นแบบสองชั้นและเพิ่มครีบบระบายความร้อนไว้ใต้แผงเซลล์ ใช้อากาศไหลเวียนรอบแผงเพื่อระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์สุริยะแล้วนำความร้อนที่ได้ไปใช้ประโยชน์ งานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบการไหลเวียนอากาศรอบแผงเป็น 7 รูปแบบแล้วทำการศึกษาผลของรูปแบบการไหลเวียนอากาศต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม จากการศึกษพบว่า การไหลเวียนอากาศแบบที่ 3 คือไหลขึ้นช่องบนแล้วไหลเวียนลงช่องล่างของแผง เป็นแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสูงสุด ในขณะที่แบบที่ 5 คือไหลลงช่องล่างก่อนแล้วเวียนขึ้นช่องบน มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าแบบอื่นๆ

**คำสำคัญ:** แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม, รูปแบบการไหลเวียนอากาศ, สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

### Abstract

The photovoltaic/thermal solar collector, sometime known as the hybrid solar collector generates both thermal and electrical energies simultaneously. A double pass photovoltaic/thermal module has been developed and tested. Improvements the total efficiency of the system can be achieved by the use of a double-pass system and fins. Air which used as heat removing fluid is forced to flow through an upper and lower channel of the module. A steady state closed form solution to determine energy balance equation. The experiments are studied the effect of seven air flow pattern on the collector. The heat transfer coefficients of convection and radiation can be determined from experimental data. The highest average convective heat transfer coefficient are obtained from pattern 3 which air flow up on upper channel then flow down on lower channel. While the

<sup>1</sup> นิสิตปริญญาโท, <sup>2</sup> อาจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

<sup>1</sup> Graduate student, <sup>2</sup> Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham, 44150 Thailand

\* Corresponding author: Wibool Anpimpa, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Mahasarakham, 44150 Thailand.

highest average radiation heat transfer coefficient are obtained from pattern 5 which air flow down on lower channel then flow up on upper channel.

**Keywords:** photovoltaic/thermal, PV/T air, Air flow pattern, heat transfer coefficient

## บทนำ

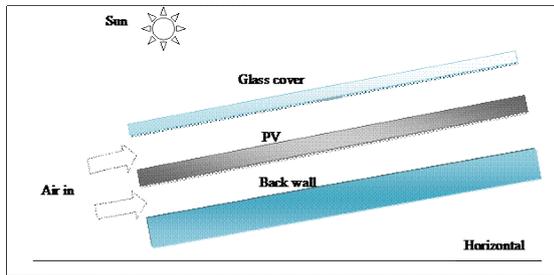
การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของพลังงานไฟฟ้าโดยใช้แผงเซลล์สุริยะ (Photovoltaic module) เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้น กระแสไฟฟ้าวงจรปิด ( $I_{sc}$ ) และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) ของแผงเซลล์สุริยะ จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของแผงเซลล์สุริยะ โดยกระแสไฟฟ้าวงจรปิด จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกับความเข้มแสงอาทิตย์ ส่วนแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิแผงเซลล์สุริยะเพิ่มขึ้น สาเหตุหลักของปัญหาในการใช้งานเซลล์สุริยะคือ เมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์สุริยะ เซลล์สุริยะสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 12-15 % เท่านั้น พลังงานส่วนที่เหลือกว่า 85 % จะสะสมอยู่ในรูปความร้อนบนแผงเซลล์ เมื่อเซลล์สุริยะมีอุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็จะต่ำลง เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์สุริยะที่ได้ น้อยกว่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่แผงสามารถผลิตได้เป็นอย่างมาก<sup>1</sup> จากรายงานการวิจัย<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าแผงเซลล์สุริยะที่ใช้งานในช่วงอุณหภูมิแผง 55-65 °C จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงจากผู้ผลิตระบุไว้ 22-25 % ในขณะที่การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปของความร้อน จะใช้แผงรับรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ซึ่งทำหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อนเท่านั้น โดยมีหลักการทำงานคือใช้ช่องไหล เช่นน้ำหรืออากาศ ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ แล้วนำพลังงานความร้อนไปใช้ในรูปของน้ำร้อนหรืออากาศร้อน การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีของแผงเซลล์สุริยะกับแผงรับรังสีอาทิตย์เข้าด้วยกัน เรียกว่า แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Photovoltaic/thermal collector, PV/T collector)<sup>3</sup> ซึ่ง

เป็นรูปแบบของการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น สามารถผลิตได้ทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนออกมาพร้อมกัน โดยใช้พื้นที่รับรังสีอาทิตย์เท่าเดิม ซึ่งทำได้โดยการดัดแปลงแผงเซลล์สุริยะจากแบบเดิม ให้มีช่องไหลเวียนของไหลในการแลกเปลี่ยนความร้อนออกจากแผงเซลล์สุริยะ ทำให้อุณหภูมิแผงเซลล์ลดลง ส่งผลดีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่วนความร้อนที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกทางหนึ่ง จึงทำให้แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม มีประสิทธิภาพสูงกว่าแผงรับรังสีหรือแผงเซลล์สุริยะปกติ สำหรับแบบที่ใช้อากาศเป็นสารทำงาน เรียกว่า PV/T air collector ส่วนแบบที่มีการเพิ่มช่องกระจกด้านบนแล้วให้อากาศไหลเวียนแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งด้านบนและด้านล่างของแผงเซลล์เรียกว่าการไหลเวียนแบบสองชั้น (Double pass) ซึ่งจะช่วยให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น<sup>4</sup> การดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์จึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรก เนื่องจากยิ่งดึงความร้อนออกจากแผงได้มาก อุณหภูมิของเซลล์สุริยะก็จะไม่สูงเกินไป ส่งผลดีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่วนความร้อนที่ดึงออกจากแผงก็จะได้ปริมาณพลังงานความร้อนมากขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานรวมของระบบก็จะมากขึ้นด้วย

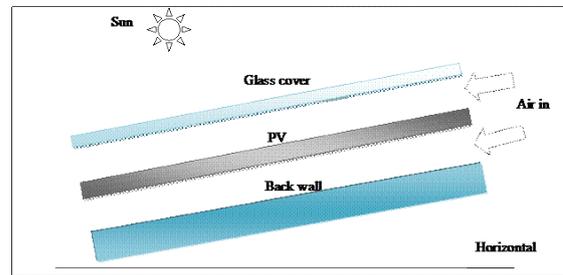
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและปรับปรุงแผง PV/T air แบบ Double pass โดยการเพิ่มช่องไหลเวียนอากาศด้านบนและติดครีบริบายความร้อนที่ช่องใต้แผง ปรับปรุงช่องอากาศให้สามารถปรับรูปแบบการไหลเวียนอากาศรอบแผงได้หลายรูปแบบ ทำการติดตั้งลักษณะเอียงแผงให้อยู่ในลักษณะการใช้งานจริง แล้วศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลเวียนอากาศรอบแผง จำนวน 7 รูปแบบ โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในรูปแบบต่างๆ ตลอดจนวิเคราะห์ถึงค่าอื่นๆ ที่ได้จาก

## Nomenclature

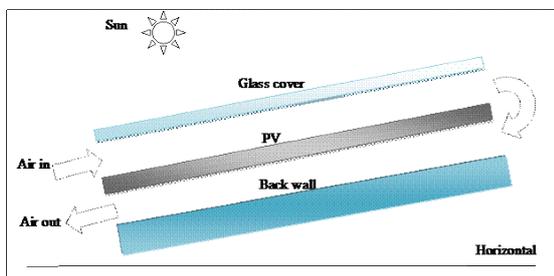
$\alpha_g, \alpha_{pv}$	ค่าการส่องผ่านของกระจกและแผงเซลล์สุริยะ ตามลำดับ
$\tau_g, \tau_{pv}$	ค่าการดูดกลืนรังสีของกระจกและแผงเซลล์สุริยะ ตามลำดับ
$G$	ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ( $W.m^{-2}$ )
$P$	ค่า packing factor หรืออัตราส่วนพื้นที่ของเซลล์สุริยะต่อพื้นที่รับแสงทั้งหมด
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ( $kg.s^{-1}$ )
$C_p$	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ( $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$A_{pv}$	พื้นที่รับแสงอาทิตย์ ( $m^2$ )
$A_{int}$	พื้นที่ของผนังล่างใต้แผงเซลล์สุริยะ ส่วนที่ไม่มีครีบริบายความร้อน ( $m^2$ )
$N$	จำนวนครีบริบายความร้อน
$H_1, H_2$	ความสูงของครีบริบายความร้อน (m)
$L_{fin}$	ความยาวของครีบริบายความร้อน (m)
$\sigma$	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-1}$
$\varepsilon$	ค่าการแผ่รังสี
$\kappa$	ค่าการนำความร้อน ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$L$	ระยะห่างระหว่างแผ่นราบสองแผ่นขนานกัน (m)
$Nu$	ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number)
$Ra$	ตัวเลขเรย์เลห์ (Rayleigh number)
$Pr$	ตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl number)
$\beta$	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ( $K^{-1}$ )
$\nu$	ความหนืดจลน์ ( $m^2.s^{-1}$ )
$g$	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m.s^{-2}$ )
$U_b$	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของผนังล่าง ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$\kappa_b$	ค่าการนำความร้อนของผนังล่าง ( $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ )
$L_b$	ความหนาของผนังล่าง (m)
$T_{pv}$	อุณหภูมิแผงเซลล์สุริยะ ( $^{\circ}C$ )
$T_g, T_a$	อุณหภูมิกระจกครอบแผงและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ตามลำดับ ( $^{\circ}C$ )
$T_{f1}, T_{f2}$	อุณหภูมิอากาศในแผงช่องบนและช่องล่าง ตามลำดับ ( $^{\circ}C$ )
$T_{bw}, T_{fin}$	อุณหภูมิผนังล่างของแผงและอุณหภูมิครีบริบายความร้อน ตามลำดับ ( $^{\circ}C$ )
$h_{r,pv-g}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างเซลล์สุริยะกับกระจกครอบแผง ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{r,g-a}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างกระจกครอบแผงกับอากาศแวดล้อม ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{r,pv-bw}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างเซลล์สุริยะกับผนังล่าง ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{c,pv-f1}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างเซลล์สุริยะกับอากาศช่องบน ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{c,g-f1}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างกระจกครอบแผงกับอากาศช่องบน ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{c,pv-f2}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างเซลล์สุริยะกับอากาศช่องล่าง ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_{c,bw-f2}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างผนังล่างกับอากาศช่องล่าง ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$h_w$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนออกจากกระจกครอบแผงโดยลมธรรมชาติ ( $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$ )
$\eta_{pv}$	ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า



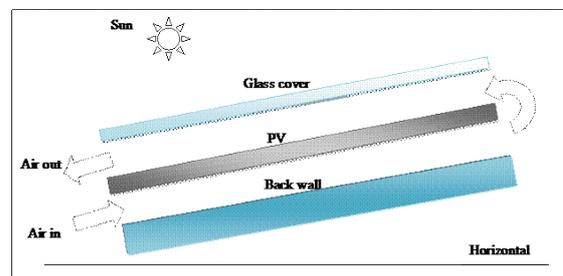
(a) Pattern 1 (Double flow up)



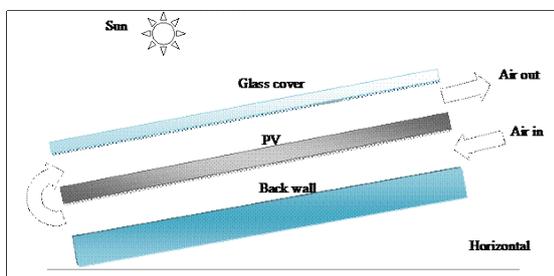
(b) Pattern 2 (Double flow down)



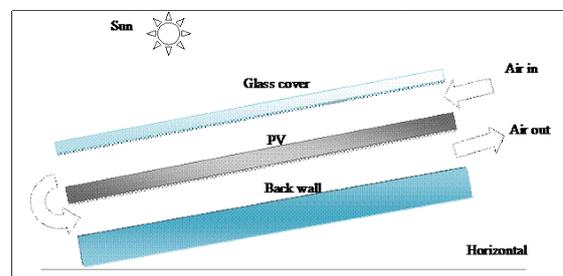
(c) Pattern 3 (Up on top then down on bottom)



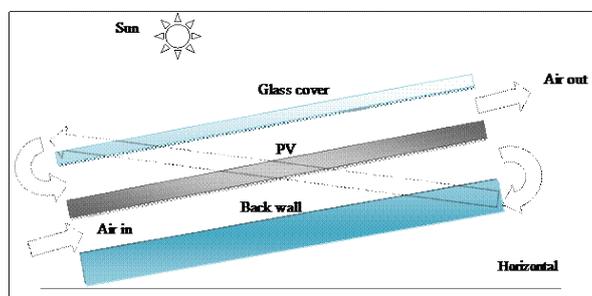
(d) Pattern 4 (Up on bottom then down on top)



(e) Pattern 5 (Down on bottom then up on top)



(f) Pattern 6 (Down on top then up on bottom)



(g) Pattern 7 (Up on bottom then up on top)

Fig. 1 (a-g) Air flow pattern on double pass PV/T air collector

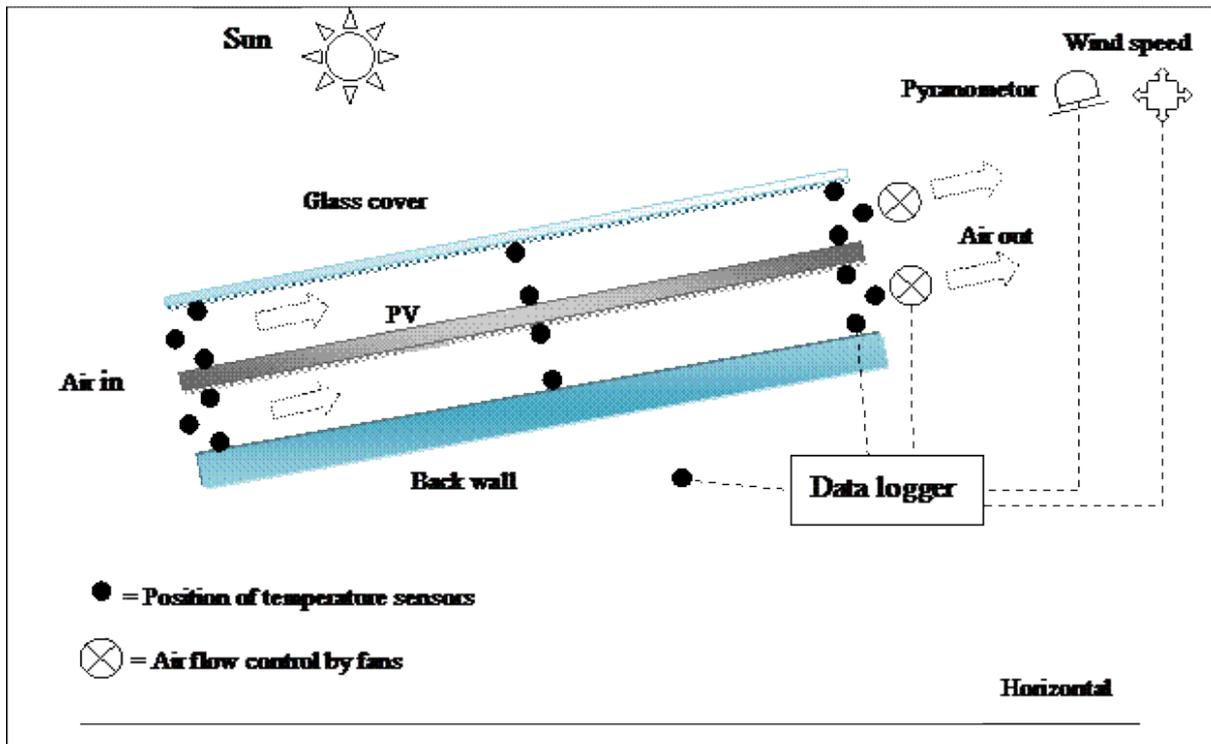


Fig. 2 Experimental setups of the double pass PV/T air collector

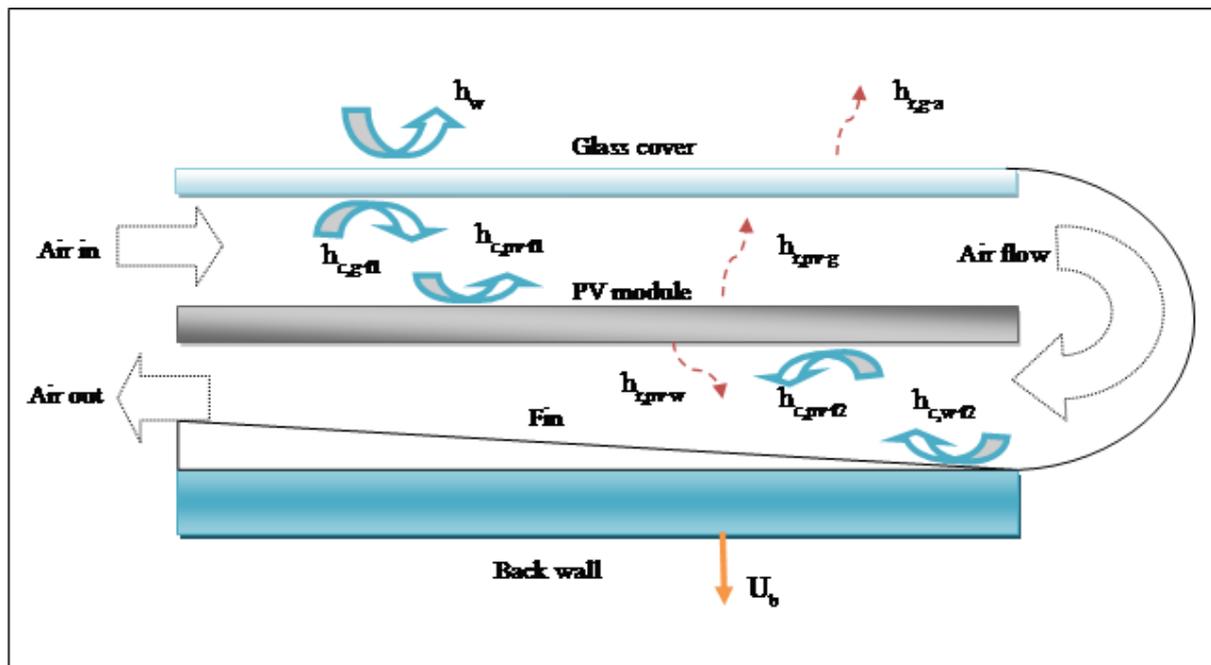


Fig. 3 Schematics of the double pass PV/T air collector with heat transfer coefficients

การทดลอง เพื่อหารูปแบบการไหลเวียนอากาศที่ดีที่สุด ที่ส่งผลต่อการทำงานของแผง ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปวิเคราะห์และทำนายสมรรถนะเชิงความร้อนจากแผง หรือเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ ได้ต่อไป

## เนื้อหา

### การออกแบบและติดตั้ง

งานวิจัยนี้ใช้แผงเซลล์สุริยะชนิดผลึกกรวมซิลิกอน (Polycrystalline silicon) จำนวน 2 แผง ต่อกันในแนวยาว สร้างช่องไหลเวียนอากาศตามแนวยาวของแผง โดยช่องบนเป็นกระจกใสครอบแผง ระยะห่างระหว่างกระจกกับแผงเซลล์สุริยะ 10 cm ส่วนช่องล่างเป็นฉนวนกันความร้อน มีระยะห่าง 10 cm เช่นเดียวกัน จากนั้นออกแบบให้สามารถปรับรูปแบบการไหลเวียนอากาศครอบแผงจำนวน 7 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1) ไหลช่องบนและช่องล่างพร้อมกันในทิศขึ้น (Fig. 1a) รูปแบบที่ 2) ไหลช่องบนและช่องล่างพร้อมกันในทิศลง (Fig. 1b) รูปแบบที่ 3) ไหลขึ้นช่องบนแล้วลงช่องล่าง (Fig. 1c) รูปแบบที่ 4) ไหลขึ้นในช่องล่างแล้วลงในช่องบน (Fig. 1d) รูปแบบที่ 5) ไหลลงในช่องล่างก่อนแล้วไหลขึ้นช่องบน (Fig. 1e) รูปแบบที่ 6) ไหลลงในช่องบนแล้วไหลขึ้นในช่องล่าง (Fig. 1f) รูปแบบที่ 7) ไหลขึ้นช่องล่างแล้วไหลขึ้นในช่องบน (Fig. 1g)

ในการทดลอง จะทำการติดตั้งแผงในลักษณะเอียงแผงแบบการใช้งานจริง กำหนดอัตราการไหลอากาศเข้าแผง  $0.025 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลดัง Fig. 2 บันทึกข้อมูลอุณหภูมิแผงเซลล์สุริยะ กระจกครอบแผง ผงด้านล่าง อากาศแวดล้อม อากาศเข้าและออกแผง ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ตลอดจนจนกระแสไฟฟ้าวงจรปิดและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ทุกๆ ครั้งชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 9.00 นาฬิกา ถึงเวลา 16.00 นาฬิกา

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Fig. 3 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในแผง PV/T air แบบ Double pass

สมดุลพลังงานในแต่ละส่วนของแผง<sup>4, 5, 7, 8</sup> วิเคราะห์ได้ดังนี้

**กระจกครอบแผง (Glass cover):** สมดุลพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากพลังงานที่กระจกครอบแผงได้รับจากรังสีแสงอาทิตย์รวมกับที่ได้รับจากการแผ่รังสีระหว่างแผงเซลล์สุริยะกับกระจกครอบแผง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ถ่ายเทออกจากกระจกในรูปของการแผ่รังสีของกระจกครอบแผงสู่สิ่งแวดล้อม การพาความร้อนระหว่างกระจกกับสิ่งแวดล้อม และการพาความร้อนระหว่างกระจกกับอากาศที่ไหลในช่องบน ดังสมการ (1)

$$\alpha_g G + h_{r,pv-g}(T_{pv} - T_g) = h_{r,g-a}(T_g - T_a) + h_w(T_g - T_a) + h_{c,g-f1}(T_g - T_{f1}) \quad (1)$$

### แผงเซลล์สุริยะ (Photovoltaic module):

สำหรับพลังงานที่แผงเซลล์ได้รับจะหาได้จาก พลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่ผ่านกระจกมาแล้วตกลงบนแผงเซลล์ ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกเซลล์สุริยะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูปพลังงานความร้อน กับพลังงานแสงอาทิตย์ส่วนที่ตกบนบริเวณส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ใช่เซลล์สุริยะ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ถ่ายเทออกจากแผงเซลล์ ได้แก่ การแผ่รังสีระหว่างแผงเซลล์กับกระจกครอบแผง การแผ่รังสีระหว่างแผงเซลล์กับผงคลัง การพาความร้อนระหว่างแผงเซลล์กับอากาศที่ไหลในช่องบนและช่องล่าง ดังสมการ (2)

$$\tau_g \alpha_{pv} PG(1 - \eta_{pv}) + \tau_g \alpha_{pv} G(1 - P) = h_{r,pv-g}(T_{pv} - T_g) + h_{r,pv-bw}(T_{pv} - T_{bw}) + h_{c,pv-f1}(T_{pv} - T_{f1}) + h_{c,pv-f2}(T_{pv} - T_{f2}) \quad (2)$$

**อากาศไหลเวียนในแผง (Air flow):** อากาศที่ไหลเวียนในแผง PV/T air แบบ Double pass จะได้รับความร้อนในรูปของการพาความร้อน โดยช่องบนจะได้รับความร้อนในรูปการพาความร้อนจากแผงเซลล์สุริยะและพาความร้อนจากกระจกครอบแผงให้กับอากาศที่ไหลผ่านในช่องด้านบน ดังสมการ (3)

$$\dot{m} C_p \left( \frac{dT_{f1}}{dx} \right) = A_{pv} h_{c,g-f1} (T_g - T_{f1}) +$$

$$A_{pv}h_{c,pv-f1}(T_{pv} - T_{f1}) \quad (3)$$

ช่องอากาศใต้แผงเซลล์ อากาศจะได้รับความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างแผงเซลล์กับอากาศที่ไหลผ่าน และการพาความร้อนระหว่างผนังล่างกับอากาศ รวมทั้งส่วนที่เป็นครีบเอียงกับอากาศ โดยจะมีสมการสมดุลพลังงานดังสมการ (4)

$$\begin{aligned} \dot{m} C_p \left( \frac{dT_{f2}}{dx} \right) &= A_{pv}h_{c,pv-f2}(T_{pv} - T_{f2}) \\ &+ A_{int}h_{c,bw-f2}(T_{bw} - T_{f2}) \\ &+ N \int_{z=0}^{z=H_1} 2h_{c,fin-f2}L_{fin}(T_{fin} - T_{f2})dz \\ &+ N \int_{z=H_1}^{z=H_2} 2h_{c,fin-f2} \frac{L_{fin}(Z - H_1)}{H_2 - H_1} (T_{fin} \\ &- T_{f2})dz \quad (4) \end{aligned}$$

ผนังล่างของแผง (Back wall): พลังงานที่ผนังล่างได้รับหาได้จากค่าการแผ่รังสีระหว่างแผงเซลล์สุริยะกับผนังล่าง โดยจะคิดเฉพาะบริเวณที่ไม่มีครีบระบายความร้อน ส่วนพลังงานที่ถ่ายเทออกจากผนังล่าง จะหาจากการสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อมในรูปการนำความร้อน การถ่ายเทให้กับอากาศที่ไหลในรูปการพาความร้อน และจากส่วนที่ถ่ายโอนให้กับครีบระบายความร้อน ดังสมการ (5)

$$\begin{aligned} A_{pv}h_{r,pv-bw}(T_{pv} - T_{bw}) &= A_{pv}U_b(T_{bw} - T_a) \\ &+ A_{pv}h_{c,w-f2}(T_{bw} - T_{f2}) + N(-\kappa A_{cf} \frac{dT_{fin}}{dz}) \quad (5) \end{aligned}$$

ในการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแผ่นกระจกกับแผงเซลล์สุริยะหรือแผงเซลล์สุริยะกับผนังล่างจะใช้สมการ

$$h_{r,1-2} = \frac{\sigma(T_1+T_2)(T_1^2+T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (6)$$

ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนของอากาศที่ไหลระหว่างกระจกกับแผง

เซลล์สุริยะ หรือแผงเซลล์สุริยะกับผนังล่าง จะหาจากวิธี Analytical math model<sup>5-8</sup> โดยใช้สมการ

$$h_c = \frac{\kappa}{L} Nu \quad (7)$$

โดย  $Nu$  หาจาก

$$\begin{aligned} Nu &= 1 \\ &+ 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ \left[ \left( \frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (8) \end{aligned}$$

โดยเครื่องหมาย + ที่มุมบนของวงเล็บหมายความว่าใช้เฉพาะค่าบวก และจะใช้ค่าศูนย์หากเทอมในวงเล็บมีค่าลบ และ

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T L^3 Pr}{\nu^2} \quad (9)$$

การสูญเสียความร้อนโดยการนำความร้อนของผนังล่างออกสู่สิ่งแวดล้อมทางด้านใต้แผง สามารถหาได้จาก

$$U_b = \frac{\kappa_b}{L_b} \quad (10)$$

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในช่องอากาศทั้งด้านบนและด้านล่างของแผง PV/T โดยใช้ข้อมูลจากผลการทดสอบที่สภาวะแวดล้อมจริง แล้วคำนวณตามสมการ (6), (7) และ (10) ได้ผลดัง Table 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลเวียนอากาศแบบที่ 3 เป็นแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสูงสุด ทั้งในช่องบน ( $h_{c,pv-g}$ ) และช่องล่าง ( $h_{c,pv-bw}$ ) โดยมีค่าอยู่ที่ 2.74 และ 4.16  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$  ตามลำดับ ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผงเซลล์สุริยะกับกระจก ( $h_{r,pv-g}$ ) จากผลการทดลอง พบว่าแบบที่ 5 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 5.32  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$  ในส่วนของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างกระจกกับสิ่งแวดล้อม ( $h_{r,g-a}$ ) แบบที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดคือแบบที่ 1 โดยมีค่าอยู่ที่ 5.98  $W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$  สำหรับค่าการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผงเซลล์

Table 1 The average heat transfer coefficient ( $Wm^{-2}C^{-1}$ )

Pattern of air flow	Top channel (PV module - glass cover)			Bottom channel (PV module – back wall)		
	$h_{c,pv-g}$	$h_{r,pv-g}$	$h_{r,g-a}$	$h_{c,pv-bw}$	$h_{r,pv-bw}$	$U_b$
Pattern 1	1.87	5.27	5.98	3.79	4.24	0.9
Pattern 2	2.30	4.80	5.65	3.29	4.01	0.9
Pattern 3	2.74	5.28	5.69	4.16	4.33	0.9
Pattern 4	2.61	5.09	5.60	3.86	4.27	0.9
Pattern 5	2.62	5.32	5.83	3.83	4.48	0.9
Pattern 6	2.27	5.12	5.80	3.54	4.24	0.9
Pattern 7	2.69	4.99	5.54	3.61	4.36	0.9

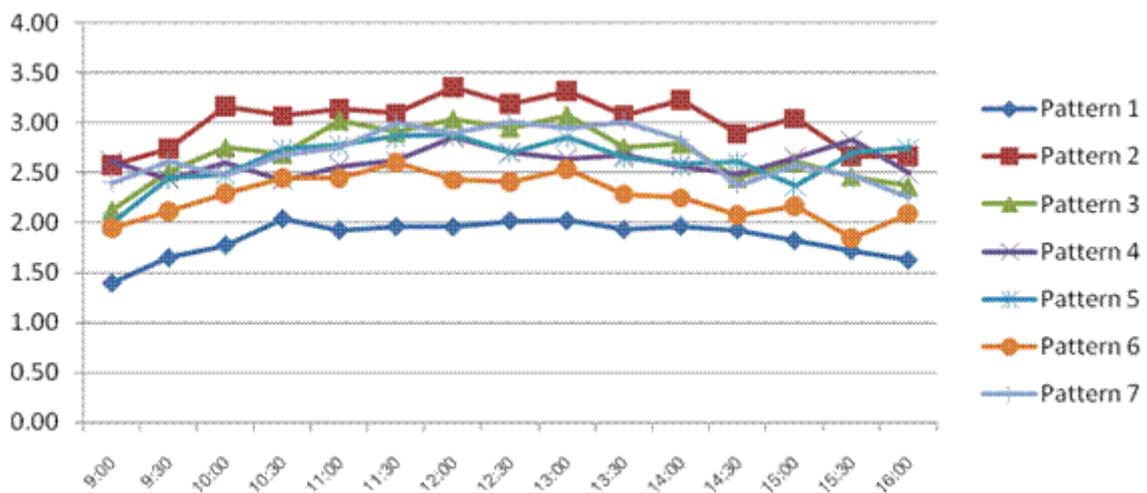


Fig. 4 The Convective heat transfer coefficient from top channel (PV module – glass cover),  $Wm^{-2}C^{-1}$

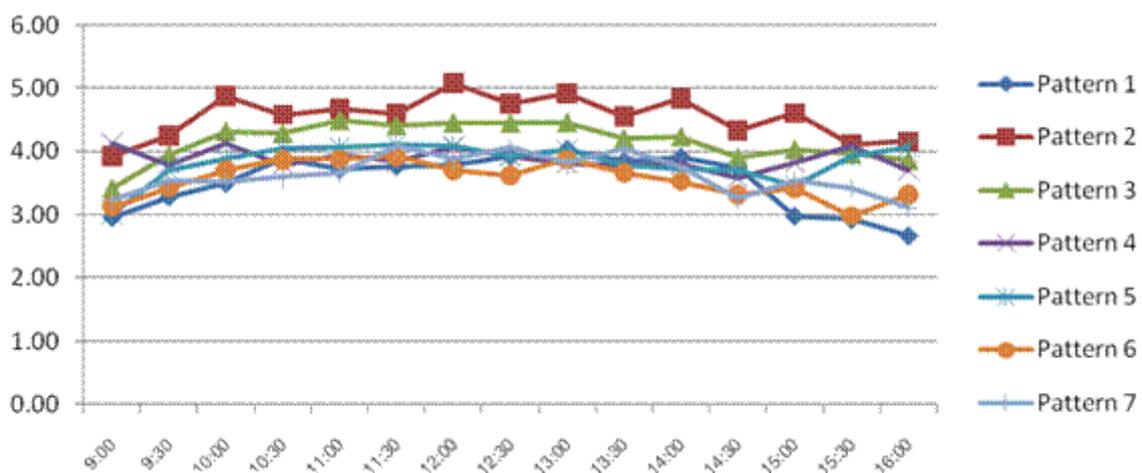
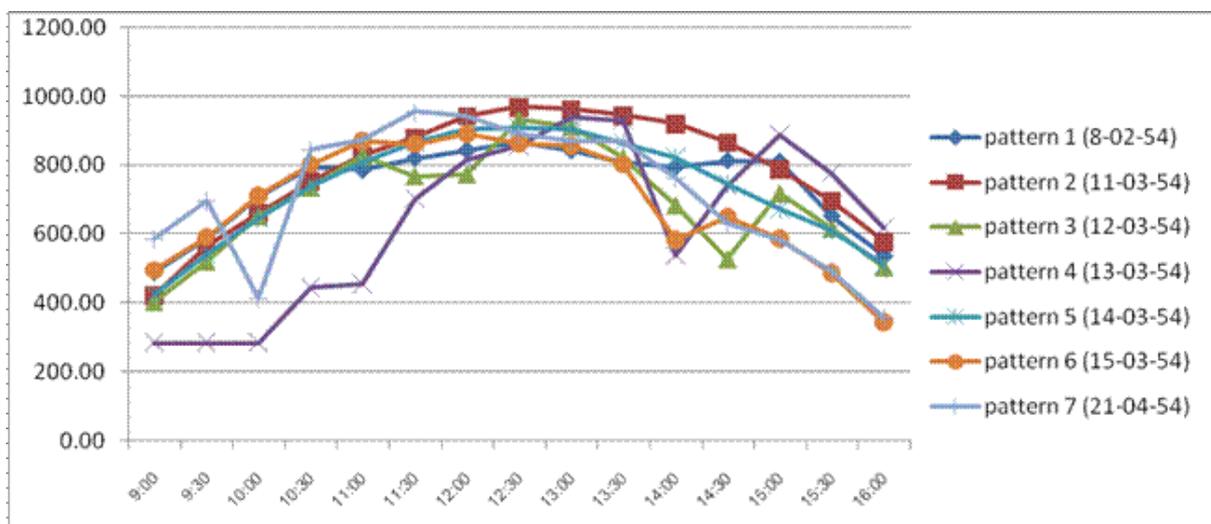
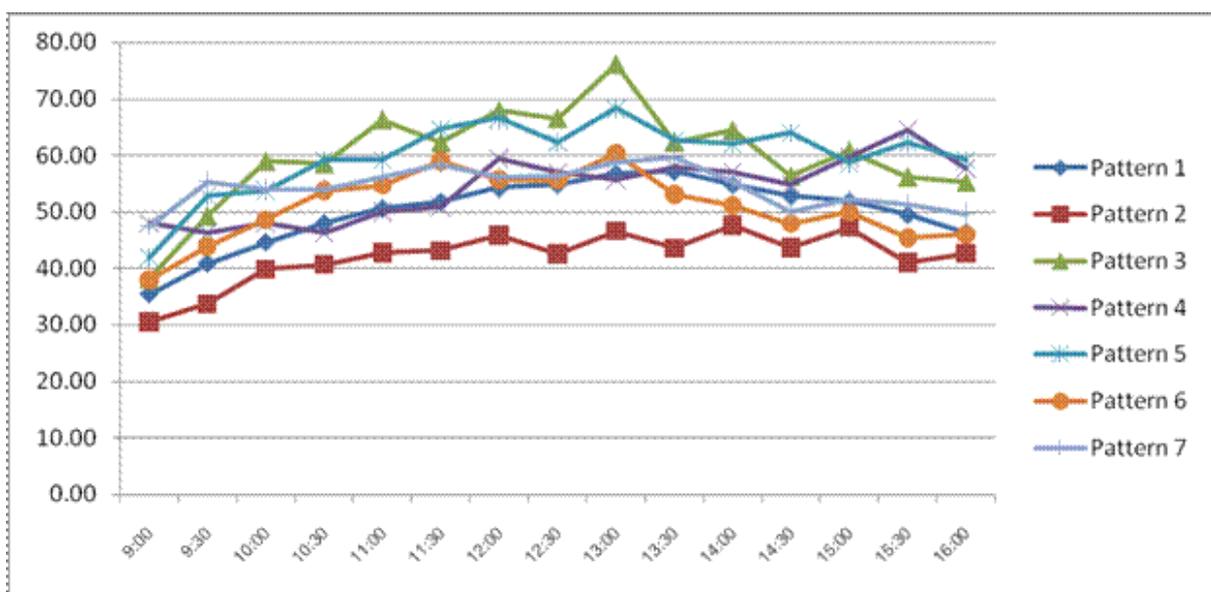


Fig. 5 The Convective heat transfer coefficient from bottom channel (PV module – back wall),  $Wm^{-2}C^{-1}$

Table 2 The average solar radiation, PV module, glass cover and back wall temperature of the experiment day

Pattern of air flow	$G_{av}$ ( $Wm^{-2}$ )	$T_{PV,av}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{g,av}$ ( $^{\circ}C$ )	$T_{bw,av}$ ( $^{\circ}C$ )
Pattern 1 (Double flow up)	744.04	49.97	30.26	34.65
Pattern 2 (Double flow down)	785.16	42.04	28.65	31.16
Pattern 3 (Up on top then down on bottom)	692.77	59.93	30.58	28.95
Pattern 4 (Up on bottom then down on top)	637.34	54.17	28.82	32.06
Pattern 5 (Down on bottom then up on top)	731.22	59.81	32.30	36.40
Pattern 6 (Down on top then up on bottom)	693.55	50.80	33.37	34.02
Pattern 7 (Up on bottom then up on top)	717.00	54.39	24.28	36.19

Fig. 6 Solar radiation of the experiment days ( $W/m^2$ )Fig. 7 PV module temperature of the experiment days ( $^{\circ}C$ )

สุริยะกับผนังล่าง ( $h_{r,pv-bw}$ ) พบว่าแบบที่ 5 มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่  $4.48 \text{ W.m}^{-2}.\text{C}^{-1}$  ส่วนการสูญเสียร้อนออกทางใต้แผง  $U_b$  ทั้งหมดจะมีค่าเท่ากัน จากการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลเวียนในช่องอากาศ พบว่าทุกรูปแบบการไหลเวียนอากาศ ให้ผลเหมือนกันคือช่องล่างจะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงกว่าช่องบน ดัง Fig. 4 และ Fig. 5 นอกจากนี้เมื่อพิจารณา Table 2, Fig. 6 และ Fig. 7 ซึ่งแสดงค่าความเข้มรังสีอาทิตย์, อุณหภูมิแผงเซลล์สุริยะ, อุณหภูมิกระจกครอบแผง และอุณหภูมิผนังล่างเฉลี่ยที่ทำการทดลองในแต่ละวัน พบว่า จะมีความแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบการไหลเวียนอากาศ ซึ่งเมื่อพิจารณาจะเห็นว่า การไหลเวียนอากาศแต่ละแบบที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต่างกันด้วย ยกตัวอย่างเช่น เปรียบเทียบการไหลเวียนอากาศในแบบที่ 3 (ไหลขึ้นช่องบนแล้วไหลลงช่องล่าง) กับแบบที่ 5 (ไหลลงช่องล่างก่อนแล้วไหลขึ้นช่องบน) จะพบว่าแบบที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศในแผงดีกว่าทั้งในช่องบนและช่องล่าง ก็จะส่งผลดีเมื่อต้องการพลังงานความร้อนหรืออากาศร้อน แต่ถ้าพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ระหว่างแผงเซลล์สุริยะกับกระจกครอบแผงและผนังล่างใน Table 1 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิแผงเซลล์สุริยะใน Table 2 จะพบว่าในวันที่ทำการทดลองแบบที่ 5 มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยสูงกว่า แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงเซลล์สุริยะต่ำกว่าแบบที่ 3 เล็กน้อย เนื่องจากมีการแผ่รังสีความร้อนออกจากแผงดีกว่า ซึ่งการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์สุริยะ ก็จะส่งผลดีต่อการทำงานของแผงเซลล์สุริยะในการผลิตไฟฟ้าด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยรวมทั้งช่องบนและช่องล่าง โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบที่ 3 กับแบบที่ 5 พบว่ามีค่าต่างกัน 7.14% ซึ่งเป็นตัวเลขที่มีนัยสำคัญ

## สรุป

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม ที่ติดตั้งในลักษณะเอียงแผงเหมือนการใช้งานจริง รูปแบบการไหลเวียนอากาศรอบแผงที่ต่างกัน มีผลทำให้ค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในแผงต่างกันด้วย โดยจากการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลเวียนอากาศทั้ง 7 แบบ พบว่าแบบที่ 3 เป็นแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการพาความร้อนของอากาศที่ไหลเวียนภายในแผงดีที่สุด ในขณะที่แบบที่ 5 เป็นแบบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนระหว่างแผงเซลล์สุริยะกับกระจกครอบแผงและผนังล่างที่ต่ำกว่า ซึ่งการดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์สุริยะจะไม่ได้อยู่ในรูปแบบใด ล้วนส่งผลดีต่อการทำงานของแผงเซลล์สุริยะ คือส่งผลดีต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์สุริยะ ในขณะที่การดึงความร้อนของอากาศที่ไหลเวียนในแผงที่ดี นอกจากจะช่วยส่งผลดีต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์สุริยะแล้ว ความร้อนที่ได้ในรูปของอากาศร้อน ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ได้อีกด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

1. Schirmer P. Experimental investigation of the performance of the solar tunnel dryer for drying banana. *Renewable Energy* 1996;7(2):119-29.
2. อนุสรณ์ แสงประจักษ์. อิทธิพลของอุณหภูมิแผง เซลล์ แสงอาทิตย์ที่สูงมากต่อค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตในประเทศไทย. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2550.
3. Charalambous PG, Maidment GG, Kalogirou SA, Yiakoumetti K. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A

- review. *Applied Thermal Engineering* 2007;27:275-86.
4. Sopian K, Liu HT, Kakac S, Veziroglu TN. Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems. *Energy Conversion and Management* 2000;41:353-65.
  5. Tonui JK, Tripanagnostopoulos Y. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy* 2007;81:498-511
  6. Tonui JK, Tripanagnostopoulos Y. Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation. *Solar Energy* 2008;82:1-12
  7. Florschuetz LW. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. *Solar Energy* 1979;22:361-66.
  8. Sopian K, Alghoul MA, Alfegi Ebrahim M, Sulaiman MY, Musa EA. Evaluation of double-pass solar collector with porous-nonporous media. *Renewable Energy* 2009;34:640-5