ผลของรูปแบบการไหลแบบธรรมชาติกับการไหลแบบบังคับของน้ำต่อค่าประสิทธิภาพของแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง

Effects of natural flow and force flow patterns of water on efficiency of a semi-transparent photovoltaic thermal module

เอกภูมิ ใจศิริ[1], อนุสรณ์ แสงประจักษ์[2]
Akaphoom Jaisiri[1], Arnusorn Seangprajak[2]

Received: 13 aUGUST 2020 ; Revised: 17 November 2020 ; Accepted: 25 December 2020

บทคัดย่อ

แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent photovoltaic thermal module, SPVT) เป็นแผงที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า ความร้อน และให้แสงส่องสว่างด้านล่างไปพร้อมกัน เป็นการเพิ่มการประโยชน์ของรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่รับรังสีให้มากขึ้น บทความนี้นำเสนอการศึกษาการไหลเวียนน้ำแบบธรรมชาติ (passive flow) และแบบบังคับ (active flow) ที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ ในแผง SPVT ว่าส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของแผง SPVT อย่างไร ซึ่งทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบแผง SPVT ขนาด 100 W พื้นที่ 0.72 m^2 ณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยวัดค่าอุณหภูมิแผง อุณหภูมิน้ำ อุณหภูมิแวดล้อม ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และค่าคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ ทุก 15 นาที ผลการวิเคราะห์การทำงานของของแผง SPVT แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบบังคับสามารถควบคุมอุณหภูมิแผงได้ต่ำกว่าแบบธรรมชาติ โดยการไหลเวียนน้ำแบบบังคับที่อัตราไหล 0.02 kg/s ให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงที่สุด เท่ากับ 12.73% และให้ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพรวมสูงที่สุด เท่ากับ 49.36% และ 62.09% ตามลำดับ นอกจากนี้แผง SPVT ที่ทำการศึกษาให้ค่าความส่องสว่างช่วงกลางวันเพียงพอต่อการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป

คำสำคัญ: แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนชนิดกึ่งโปร่งแสง ประสิทธิภาพแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

The semi-transparent photovoltaic thermal module (SPVT) is a solar module that can generats electricity, heat and part of sun light through the module while operating, which is beneficial for improving of solar utilization per area of the module. This paper presents the effects of the natural and force flow patterns on the efficiency of the SPVT module. The 100 W SPVT module had an area of 0.72 m^2 and was designed, studied and experimented at Mahasarakham University. The solar module temperature, water temperature, ambient temperature, solar irradiation and electrical parameters were measured every 15 minutes. The analysis of results showes that the water with active flow pattern induces a module temperature lower than in the passive flow pattern. The active flow of water at 0.02 kg/s causes maximum electrical efficiency, thermal efficiency and overall efficiency of SPVT module by 12.37%, 49.36% and 62.09% respectively. Moreover, thedSPVT module provides sufficient illuminance for the general area during the day.

Keywords: Semi-Transparent Photovoltaic/Thermal module (SPVT), SPVT Efficiency, Solar cell

---

[1] นิสิตปริญญาโท, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
[1] Master degree student, Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.
[2] Assist. Prof., Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand.
* Corresponding author ; Arnusorn Seangprajak, Energy Research Unit, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University, Khantarawichai District, Mahasarakham 44150, Thailand. arnusorn.s@msu.ac.th, Tel: 043754322, Fax: 043754379

บทนำ

ประเทศไทยอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตร มีศักยภาพพลังงานรังสีอาทิตย์เฉลี่ยสูงถึง 18.0 MJ/m^2/day (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) พลังงานแสงอาทิตย์จึงได้รับการส่งเสริมจากภาครัฐและมีการใช้อย่างแพร่หลายในประเทศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พลังงาน, 2552) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic module, PV module) เป็นรูปแบบการใช้พลังงานทดแทนที่ได้รับความนิยมในประเทศ เนื่องจากต้นทุนที่ถูกลง เข้าถึงได้ง่ายขึ้น มีความสะดวกในการใช้งาน และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ดีเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดด้าน ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานที่มีค่าเพียง 6-20% (Dubey *et al*., 2013) และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิแผงสูงขึ้นเนื่องจากการสะสมความร้อนบนแผงขณะใช้งาน (Dubey *et al*., 2013)

การดึงเอาความร้อนสะสมบนแผงดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อนพร้อมกันกับการผลิตไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มศักยภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อพื้นที่รับแสง เรียกแผงที่ทำงานในลักษณะดังกล่าวว่า แผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (photovoltaic thermal module, PVT module) นิยมใช้น้ำและอากาศเป็นตัวกลางในการนำความร้อนออกจากแผง และแผง PVT โดยมากเซลล์ที่ใช้ผลิตจากผลึกซิลิคอน เนื่องจากให้สัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าต่อความร้อนออกมาได้มากกว่ากรณีของฟิล์มบางซิลิคอน

(Dubey *et al*., 2013) นอกจากการพยายามพัฒนาประสิทธิการเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีอาทิตย์ของแผง PV ให้สูงขึ้นโดยใช้หลักการของแผง PVT แล้ว ยังมีกลุ่มของนักวิจัยที่ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้แผง PV ที่ติดตั้งกับอาคารให้สามารถทำงานร่วมกับการปรับสภาวะความสบายอาคารอีกทางหนึ่งด้วย เรียกแผง PV ที่ปรับปรุงขึ้นเพื่องานลักษณะดังกล่าวว่าแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง (semi-transparent photovoltaic thermal module, SPVT module) โดยแผงจะสามารถผลิตไฟฟ้า ความร้อน และให้แสงส่องผ่านด้านล่างได้ด้วย ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเน้นไปที่การใช้อากาศนำเอาความร้อนออกจากแผงไปให้ความอบอุ่นภายในอาคาร (building integrated semi-transparent photovoltaic thermal, BISPVT) เช่น

Arjun Deo และคณะ (Deo *et al*., 2014) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองคาบของความร้อนในอากาศที่เกิดจากแผง BISPV/T โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์สำหรับการประเมินค่ารังสีและอุณหภูมิของอากาศจากแผง โดยการศึกษาดังกล่าวสามารถทำอุณหภูมิห้องสูงสุดได้เท่ากับ 44.6 °C

Firehun Taffesse และคณะ (Taffesse *et al*., 2015) ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำงานของแผง BISPVT ร่วมกับผนังแบบทรอมบ์ (trombe wall) เพื่อให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่องของผนังที่เหมาะสมควรมีขนาด 0.3-0.4 m

Ankita Gaur และคณะ (Gaur *et al*., 2016) ทำการตั้งแผง BISPVT เพื่อช่วยระบายอากาศในห้อง ผลการศึกษาของเขาแสดงให้เห็นว่าการใช้แผง BISPVT ช่วยให้อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศในห้องลดลง และทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของแผงเซลล์สูงขึ้น ดีกว่ากรณีของการใช้แผง PV ธรรมดาทุกกรณี

Aloys Matial และคณะ (Martial *et al*., 2015) ทำการศึกษาทดลองติดตั้งครีบระบายความร้อนในแผง BISPVT ซึ่งใช้อากาศเป็นตัวกลางในการระบายความร้อน มีพื้นที่ระบบรวม 36.45 m^2 โดยพบว่าระบบดังกล่าวสามารถผลิตความร้อนได้ 76.66 kWh/yr และมีประสิทธิภาพทางความร้อนรวมเท่ากับ 56.07%

Deepali Kamthania และ G. N. Tiwari (Kamthania & Tiwari, 2014) ทำการวิเคราะห์พลังงานในเทอมต่าง ๆ ที่ได้จากแผง SPVT ที่ใช้อากาศในการดึงความร้อนออกทั้งด้านหน้าและด้านหลัง (double pass) โดยใช้ใช้เซลล์ชนิดผลึกซิลิกอนและชนิด HIT เปรียบเทียบกัน โดยทำการต่อแผง 3 กรณี คือ แบบอนุกรม-ขนาน แบบขนาน และแบบอนุกรม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การต่อแผงแบบขนานเหมาะสำหรับการเน้นให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าสูงสุด ส่วนการต่อแบบอนุกรมเหมาะสำหรับการเน้นให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่า แผงที่ใช้เซลล์ชนิด HIT จะให้ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี ค่าการชดเชยการปลดปล่อยแก๊ส CO_2 สูงกว่ากรณีใช้ผลึกซิลิกอนธรรมดา

T.T. Chow และคณะ (Chow *et al*., 2009) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบ BIPV ที่ติดตั้งกับอาคารเพื่อการผลิตน้ำร้อน ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 37.5% และ 9.35% ต่อปีตามลำดับ โดยระบบที่ติดตั้งสามารถลดความร้อนเข้าออกอาคารได้ 38%

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับแผง SPVT นั้นเน้นไปที่การใช้อากาศในการระบายความร้อนและติดตั้งเพื่อใช้งานกับอาคาร มีเพียงงานวิจัยของ T.T. Chow เท่านั้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้น้ำ แต่แผงดังกล่าวยังไม่ใช่แผง SPVT ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและศึกษาแผง SPVT ที่เน้นใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากแผง โดยทำการออกแบบโครงสร้างและประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมาใหม่ ให้มีลักษณะเป็นกึ่งโปร่งแสงเพื่อให้แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่าน

ด้านล่างของแผงได้ และมีช่องให้น้ำสามารถไหลผ่านได้ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผงเพื่อระบายความร้อน โดยนำเอาแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่นชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนที่โครงสร้างเดิมมีแผ่นปิดด้านหลังเป็นโพลิเมอร์แผ่นบาง(tedlar) มีลักษณะทึบแสง โดยแผงที่ใช้มีขนาด 100 W นำมาประกอบเป็นแผง SPVT เพื่อศึกษาค่าอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ของแผง SPVT สูงที่สุด อีกทั้งทำการศึกษาอุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่ได้ต่อวัน และปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่แผง SPVT สามารถผลิตได้ และเพื่อทำการศึกษาค่าความส่องสว่างที่แผง SPVT สามารถทำได้ที่ระยะสูงจากพื้นถึงแผง 0.40, 1.50 และ 2.60 m ตามลำดับ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้น้ำมาช่วยในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสง สมการและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ประสิทธิภาพทางความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของแผง SPVT มีดังนี้

พลังงานรังสีอาทิตย์ที่แผง SPVT ได้รับประเมินหาได้จากสมการ

$$E = GA\,x\,dt \tag{1}$$

โดยที่ E คือพลังงานรังสีอาทิตย์(J), G คือความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), A คือพื้นที่รับแสงของแผง SPVT (m^2), คือช่วงเวลาที่แผงรับรังสีอาทิตย์ (s)

การหาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง SPVT ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ตามสมการที่ 2 และ 3 (Kumar & Rosen, 2010)

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{GA_c} \tag{2}$$

$$\eta_{el} = FF\left(\frac{V_{oc} I_{sc}}{GA_c}\right) \tag{3}$$

โดยที่ η_{el} คือประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (%), V_{OC}, V_m คือค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับ (V), I_{SC}, I_m คือ ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและกระแสไฟฟ้าสูงสุดตามลำดับ (A), G คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), A_C คือ พื้นที่รับแสงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2) และ FF คือค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (กำหนดที่ 0.8 สำหรับเซลล์จากซิลิคอน (Javed, 2014))

ค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT หาได้จากสมการที่ 4 (Badescu *et al*., 1997 ; Duffie & Beckman, 1991) โดยที่ η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT, Q_u คือ พลังงานความร้อนที่น้ำได้รับจากแผง SPVT (kJ), A_c คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m^2), G คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (kW/m^2), $\bar{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s), C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (kJ/kg $^{\circ}$C), ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำ ณ ตำแหน่งเข้าและออกจากแผง

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c G} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T dt}{A_c G dt} = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_c G} \tag{4}$$

นอกจากนี้ประสิทธิภาพทางความร้อนของแผง SPVT ยังสามารถหาได้จากสมการ 5 (Badescu *et al*., 1997) นั่นคือ

$$\eta_{th} = \frac{F_R\left[G(\tau\cdot\alpha) - U_L\left(T_{fi} - T_a\right)\right]}{G} \tag{5}$$

โดย U_L คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (W/m^2°C) t คือค่าการส่องผ่านด้านบนของแผ่นปิดด้านบน a คือค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดด้านบน T_{fi} คือค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผง ($^{\circ}$C) และ T_a คือค่าอุณหภูมิแวดล้อม ($^{\circ}$C) และ F_R คือแฟกเตอร์การดึงความร้อนของแผง ซึ่งหาได้จากสมการ

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p\left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c\left[G - U_L\left(T_{fi} - T_a\right)\right]} \tag{6}$$

T_{fo} คือ อุณหภูมิน้ำออกจากแผง ($^{\circ}$C)

ในส่วนของประสิทธิภาพรวม (η_0) นั้นหาได้จากสมการที่ 7 (Diwania *et al*., 2020) นั่นคือ

$$\eta_0 = \eta_{el} + \eta_{th} \tag{7}$$

วิธีการวิจัย

การออกแบบและสร้างชุดทดสอบแผง SPVT โดยใช้น้ำในการระบายความร้อน ได้ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบยืดหยุ่น ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอนขนาด กว้าง 540 mm ยาว

1,200 mm หนา 2 mm แผงมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 W ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 18 V และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด 5.6 A การออกแบบประกอบแผง และการทดสอบ แผง SPVT มีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ออกแบบแผง SPVT โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Mono crystalline ขนาด 100 W มาตัดแยกเซลล์แต่ละแถวออกจากกันแล้วนำมาประกอบเป็นแผง SPVT โดยด้านหน้าแผงเซลล์ใช้แผ่นกระจกหนา 3 mm ขนาดกว้าง 600 mm ยาว 1,200 mm ส่วนด้านหลังใช้แผ่นอะคริลิกหนา 2 mm ขนาดเท่ากับกระจกแผ่นหน้า มีช่องน้ำไหลเวียนผ่านเซลล์ทั้งด้านหลังและด้านหน้าแผงเซลล์ โดยใช้แผ่นอะคริลิกหนา 2 mm กว้าง 10 mm มากั้นแต่ละแถว โดยช่องกั้นห่างจากตัวแผ่นเซลล์ประมาณ 1 mm แผง SPVT ออกแบบให้ช่องน้ำเข้าและออกจะอยู่ด้านบน การไหลเวียนน้ำจะให้ผ่านไปแต่ละสตริง ดัง Figure 1 และ Figure 2

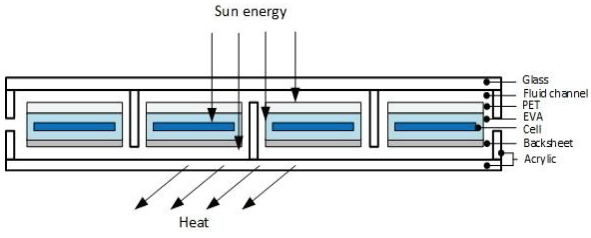
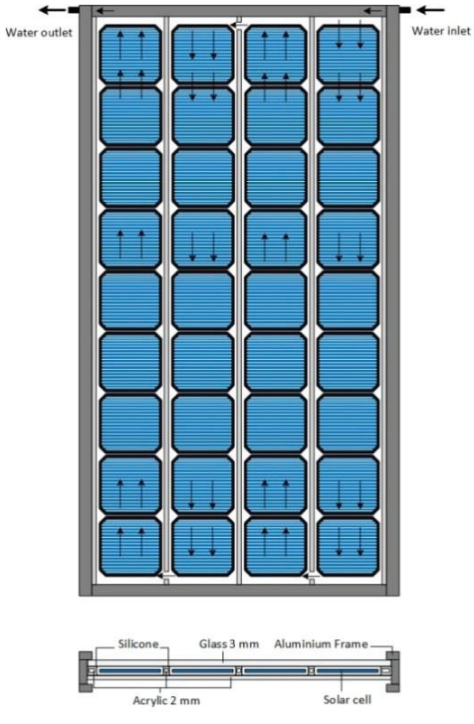
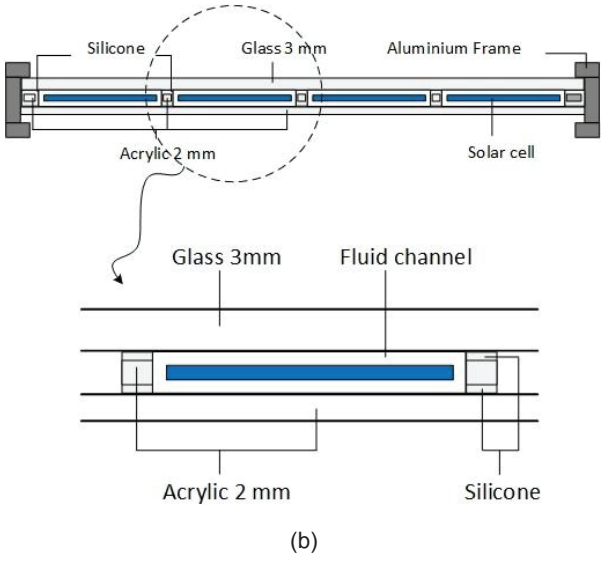


Figure 1 The cross-section SPVT module structure



(a)



(b)

Figure 2 (a) Fluid flow diagram in the SPVT module (b) Dimension details of the SPVT module

ช่องน้ำเข้า-ออกจากแผงทำจากอลูมิเนียมตัว U ขนาด 10 mm และกรอบแผงเซลล์ใช้อลูมิเนียมฉากหนา ขนาด 25 mm กับขนาด 20 mm ดัง Figure 3 ขนาดท่อส่งน้ำจากถังน้ำและถังเก็บน้ำใช้ท่อพีวีซีขนาด 1/2 in ท่อส่งน้ำเข้า-ออกจากแผงใช้ท่อทองแดงขนาด 3/8 in โดยด้านน้ำเข้าด้านบน 1 ช่อง และน้ำออกด้านบน 1 ช่อง การติดตั้งแผงทดสอบ SPVT แสดงไว้ใน Figure 4 และ Figure 5

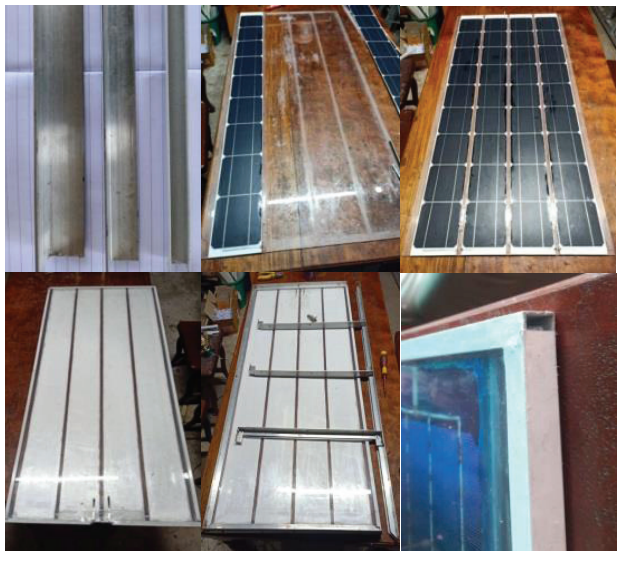
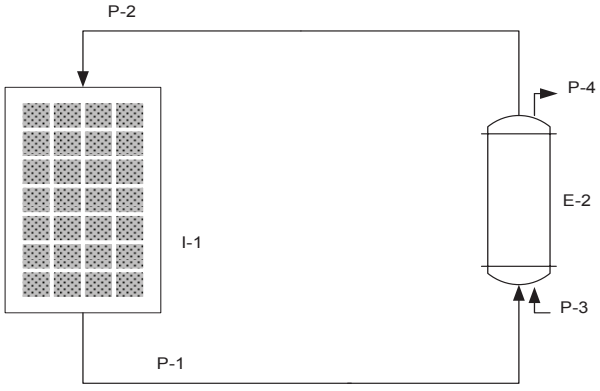
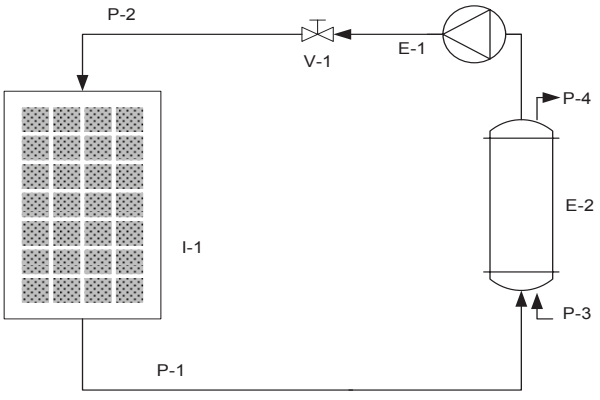


Figure 3 Construction details of the SPVT module



P-1 = water outlet SPVT
P-2 = water inlet SPVT
P-3 = water inlet storage tank
P-4 = water outlet storage tank
E-2 = storage tank
I-1 = SPVT module

Figure 4 The experimental setup diagram of the SPVT system (passive flow)



P-1 = water outlet SPVT
P-2 = water inlet SPVT
P-3 = water inlet storage tank
P-4 = water outlet storage tank
E-2 = storage tank
E-1 = pump
I-1 = SPVT module
V-1 = screw-down valve

Figure 5 The experimental setup diagram of the SPVT system (active flow)

โดยในการศึกษานี้ตัวแปรต้นได้แก่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) ค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแผง (T_{fi}) และค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) และค่าอัตราการไหล ส่วนตัวแปรตามที่ทำการวัดเพื่อนำไปสู่การหาค่าประสิทธิภาพต่าง ๆ ของแผงได้แก่ ค่าอุณหภูมิแผง อุณหภูมิน้ำออกจากแผง ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc})

2. ทำการทดลองและวัดค่าข้อมูลทางไฟฟ้าและความร้อน โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น Agilent 34970A Data acquisition & switching unit เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ใช้สายวัดอุณหภูมิเป็นสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเค (type K) ใช้เครื่องวัดความเข้มแสง Hukdeflux รุ่น LP02 มัลติมิเตอร์รุ่น seaward PV 150 ทำการทดลองเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 08.00 น.-16.30 น. บันทึกค่าทุก ๆ 15 นาที อัตราการไหลของน้ำที่ทำการทดลอง กรณีการไหลโดยธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 0.005 kg/s โดยเฉลี่ย ส่วนการไหลแบบบังคับ กำหนดการไหลในการทดสอบเท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.04 kg/s ทำการวัดอุณหภูมิน้ำเข้า-ออกแผงทดสอบ (T_{fi}, T_{fo}) อุณหภูมิแผงทดสอบ (T_{spvt}) อุณหภูมิแวดล้อม (T_a) ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) ค่าแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ในการทดสอบระบบทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิแผง (T_{spvt}) 6 ตำแหน่ง คือด้านบนและด้านล่างแผงอย่างละ 3 ตำแหน่ง (บน กลาง ล่าง) ส่วนค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าใช้มิเตอร์วัดจดบันทึกข้อมูล

3. ทำการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (multiple linear regression, MLR) เพื่อจำลองการทำงานของแผง SPVT โดยนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างสมการถดถอยแบบเส้นตรงหลายตัวแปร แล้วนำสมการที่ได้ไปประเมินการทำงานของแผง SPVT ที่ค่าอัตราการไหลต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไขของแสงและอุณหภูมิแวดล้อมเดียวกัน เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของอุณหภูมิต่าง ๆ และประสิทธิภาพที่ได้

4. ทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสงจากแผง SPVT โดยจำลองสภาพของหลังคาบ้านและทำการติดตั้งแผง SPVT ทำให้เป็นห้องปิดไม่ให้แสงภายนอกรบกวนโดยใช้ผ้าทึบคลุมปิดไว้ ตำแหน่งในการวัดค่าความส่องสว่างใต้แผง SPVT นั้นมี 3 จุด คือที่ระยะความสูงจากพื้น 0.40, 1.50 และ 2.60 m พร้อมทั้งติดตั้งเครื่องมือวัดความเข้มแสง อุณหภูมิแวดล้อมและอุณหภูมิภายในห้อง ดัง Figure 6 และ Figure 7

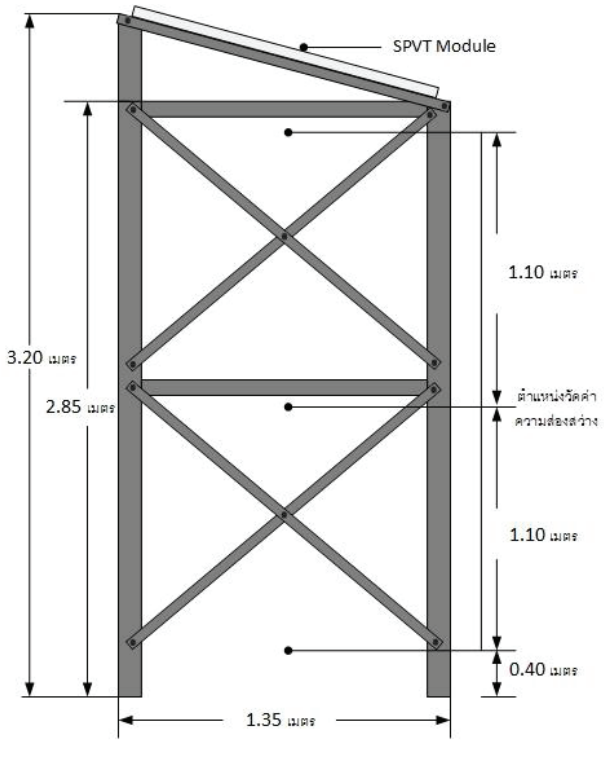


Figure 6 Design of measuring light transmittance

Figure 7 Photograph of measuring light transmittance

ผลการวิจัย

ข้อมูลจากการทดลองได้ถูกนำมาสร้างสมการถดถอยพหุคูณ โดยสมการที่ได้แสดงใน Table 1 ผลการประเมินอุณหภูมิแผง (T_{spvt}) ที่ได้จากการใช้น้ำไหลเวียนแบบธรรมชาติและไหลแบบบังคับที่อัตราการไหลต่างๆ ดังแสดงใน Figure 8 จากรูปจะเห็นได้ว่าการไหลของน้ำโดยธรรมชาติ (0.005 kg/s) ส่งผลให้อุณหภูมิแผง (T_{SPVT}) มีค่าสูงกว่าการไหลแบบบังคับทุกกรณี ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการผลิตไฟฟ้าของแผง แต่เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นการระบายความร้อนก็จะดีขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิแผงลดลง อย่างไรก็ดี อัตราการไหลที่สูงเกินไปก็ทำให้อุณหภูมิน้ำที่ได้มีค่าต่ำลง อีกทั้งไม่ได้ทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแผงเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด

Table 1 Multiple regression equations

Variable	Equation	R^2
T_{spvt}	= -3.541 + (0.00735 * G) + (0.758 * Twi) + (0.426 * Ta)-(200.713 * m)	0.90
T_{wo}	= -1.298 + (0.00402 * G) + (0.0576 * Twi) + (0.0457 * Ta) + (0.977 * Tspvt)-(96.968 * m)	0.96
V_{oc}	= 22.117 + (0.00184 * G)-(0.102 * Twi)-(0.0517 * Tspvt) + (0.0854 * Ta) + (9.560 * m)	0.73
I_{sc}	= 2.143 + (0.00530 * G) + (0.0574 * Twi)-(0.114 * Tspvt) + (0.00538 * Ta)-(4.674 * m)	0.93

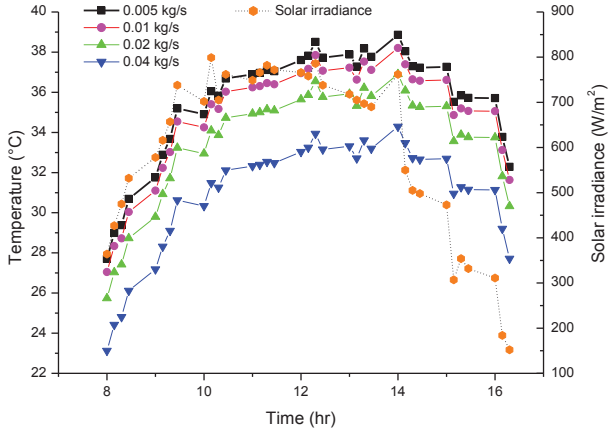


Figure 8 SPVT temperature towards water mass flow rate at solar irradiance

ในส่วนของการนำความร้อนออกจากแผง โดยในการใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้น การประเมินอุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผง SPVT ที่ค่าอัตราการไหลต่างๆ ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน ได้ผลดังแสดงใน Figure 9 จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไหลเวียนแบบธรรมชาติ (0.005 kg/s) ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิน้ำสูงที่สุดที่ 43.08 °C ที่เวลา 14.00 น. ความเข้มรังสีอาทิตย์เท่ากับ 769 W/m^2 โดยอุณหภูมิน้ำเข้าแผงทดสอบเท่ากับ 32.75 °C โดยได้ค่าเฉลี่ยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้า-น้ำออก (ΔT_f) ตลอดวันสูงสุดที่ 8.04 °C

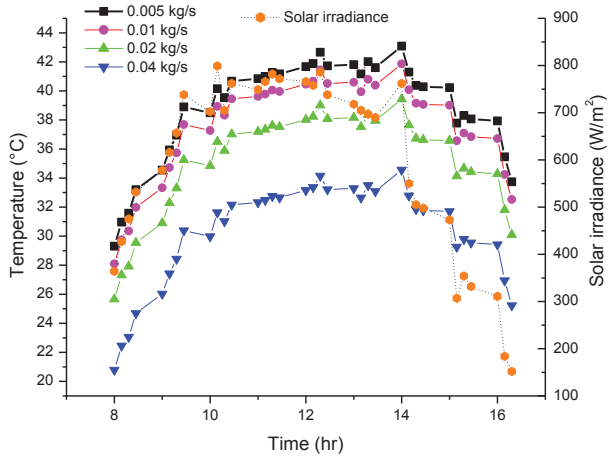


Figure 9 Outlet temperature towards water mass flow rate at solar irradiance

ในส่วนของค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ได้แสดงผลการศึกษาใน Figure 10 และ Figure 11 ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่าการไหลเวียนน้ำแบบบังคับให้ค่า V_{oc} และ I_{sc} สูงกว่าการไหลเวียนแบบธรรมชาติ โดยค่า V_{oc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหล ส่วนค่า I_{sc} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราการไหลตั้งแต่ 0.005 kg/s จนถึง 0.02 kg/s เมื่อเกินไปกว่านั้น I_{sc} จะแปรผกผันกับค่าอัตราการไหล เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิแผงลดต่ำลง (Figure 8) ส่งผลต่อพลังงานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่รอยต่อ P-N ซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรลดต่ำลงเล็กน้อย (Javed, 2014 ; เดชนิติธร อิ่มปรีดา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์, 2554) แต่อย่างไรก็ดีหากพิจารณาข้อมูลใน Figure 10-12 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของแรงดัน กระแสไฟฟ้า และค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่อัตราการไหลต่าง ๆ นั้นมีนัยสำคัญน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าที่ค่าอัตราการไหลที่สูงเกินไปนั้นส่งผลน้อยมากต่อการเพิ่มขึ้นของค่าทางไฟฟ้าของแผงเซลล์ โดยอัตราการไหลที่เหมาะสมทำให้เกิดความโดดเด่นที่ประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพรวมของแผง

จาก Figure 10 อัตราการไหลของน้ำที่ 0.04 kg/s จะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเฉลี่ยตลอดการทดลองสูงที่สุดที่ 21.58 V ที่ความเข้มแสงเฉลี่ย 592 W/m^2 ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรแสดงไว้ใน Figure 11 มีค่ากระแสสูงสุดเท่ากับ 4.29 A ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.02 kg/s ณ เวลา 10.15 น. ค่าความเข้มแสง 799 W/m^2 โดยที่อัตราการไหล 0.005 kg/s ให้ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่ำที่สุด

ผลการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและความร้อนของแผง SPVT โดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน แสดงใน Figure 12 และ Figure 13 ตามลำดับ ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเฉลี่ยสูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 12.73% ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.02 kg/s เช่นเดียวกับประสิทธิภาพทางความร้อนที่ให้ค่าเฉลี่ยสูงที่สุด 49.36% ที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน

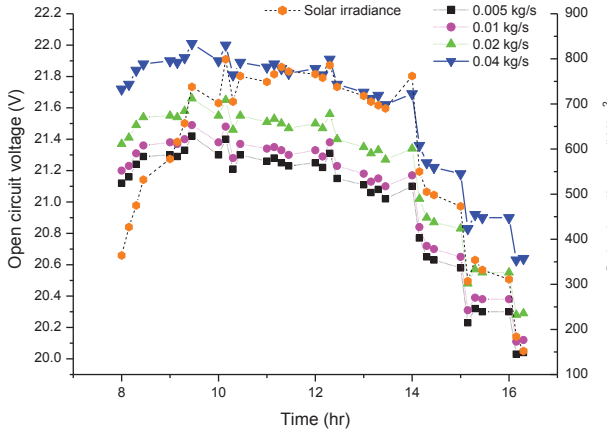


Figure 10 Open circuit voltage characteristic towards water mass flow rate at solar irradiance

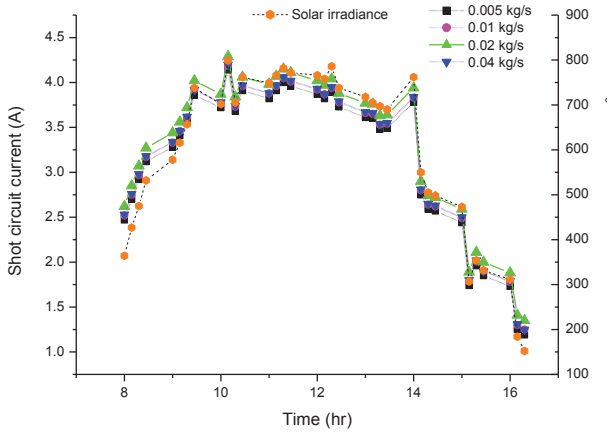


Figure 11 Short circuit current characteristic towards water mass flow rate at solar irradiance

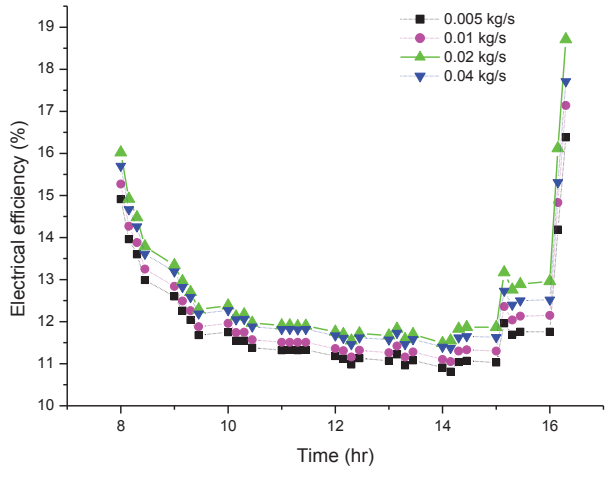


Figure 12 Electrical efficiency towards water mass flow rate

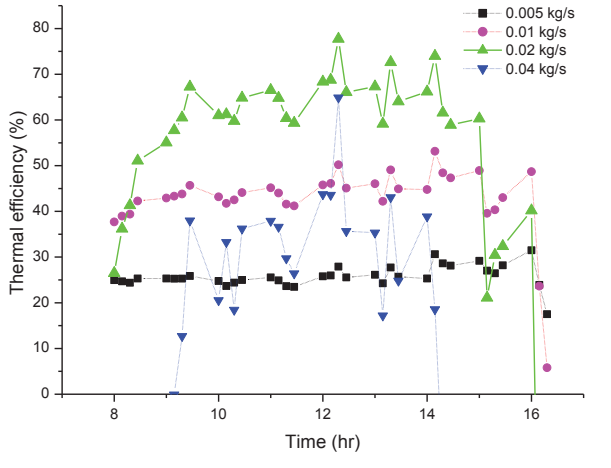


Figure 13 Thermal efficiency towards water mass flow rate

โดยเมื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพรวมของแผง SPVT พบว่า ค่าประสิทธิภาพรวม ณ เวลาใด ที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.02 kg/s มีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพรวมของแผงที่ใช้ค่าอัตราการไหลอื่นๆ รวมทั้งสูงกว่าที่ใช้การไหลเวียนแบบธรรมชาติอย่างชัดเจน ดัง Figure 14 โดยมีประสิทธิภาพรวมตั้งแต่เวลา 9:00-15:00 น. โดยเฉลี่ยเท่ากับ 74.75% สูงกว่าการใช้น้ำไหลเวียนแบบธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพรวมเพียง 27.5%

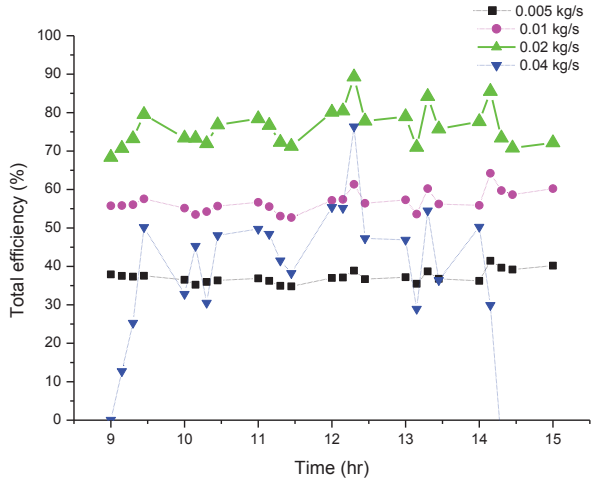


Figure 14 Total efficiency towards water mass flow rate

ส่วนการตรวจวัดค่าการส่องสว่างภายในห้องใต้แผง SPVT ตั้งแต่เวลา 8.00 น.-16.30 น. ที่ระยะความสูงจากพื้น 2.60, 1.50 และ 0.40 m ทำการทดลองวัดค่าเก็บข้อมูลแล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าการส่องสว่างดังแสดงตัวอย่างไว้ใน Table 2 โดยค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยหาได้จากอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์การส่องสว่าง (ปริมาณแสง) กับกำลังงานที่ทำให้เกิดฟลักซ์การส่องสว่าง (lm/W) จากผลการทดลองได้ค่าประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยอยู่ที่ 1.35% ระดับความสว่างที่ได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป (ณัฐวัฒน์ จิตศีล, 2562)

Table 2 Light transmittance

Time (hr)	$G_{avg.}$ (w/m^2)	Illuminance (E, (Lux))			Illuminance
		2.60 m	1.50 m	0.40 m	$E_{avg.}$ (Lux)
9.15	317	1,100	398	141	546
9.30	327	1,263	402	116	594
9.45	392	1,286	440	126	617
10.00	613	1,480	490	129	699
10.15	900	1,770	495	140	802
10.30	620	2,500	632	172	1,101
10.45	763	2,100	615	176	964
11.00	780	3,000	690	182	1,291
Average	**605**	**2,169**	**609**	**147**	**1,021**

สรุปผล

การศึกษารูปแบบการไหลเวียนของน้ำที่ต่างกันในแผงผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมชนิดกึ่งโปร่งแสง โดยใช้น้ำไหลผ่านด้านบนและด้านล่างของแผงเซลล์เพื่อถ่ายเทความร้อนออกจากแผงเซลล์ ซึ่งใช้รูปแบบการไหลเวียนแบบธรรมชาติ และรูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับที่อัตราการไหลต่างๆ กัน โดยทำการทดลองระบบและเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 08.00-16.30 นาฬิกาตั้งแต่เดือน ตุลาคม-พฤศจิกายน 2562 ที่มหาวิทยาลัยมหาสารคาม แล้วนำข้อมูลที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์แบบถดถอยเพื่อทำการวิเคราะห์ ค่าอุณหภูมิน้ำที่ได้ ค่ากำลังไฟฟ้าของแผงที่ผลิตได้ ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและทางความร้อนของแผง ภายใต้รูปแบบการไหลและค่าอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

ผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบธรรมชาติ ทำให้ความร้อนสะสมบนแผงถูกส่งผ่านออกไปได้น้อยกว่าแบบบังคับ ทำให้ได้ค่าอุณหภูมิน้ำออกจากแผง SPVT สูงกว่าในรูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับ อย่างไรก็ดี ด้วยค่าอัตราการไหลที่ต่ำที่สุดเพียง 0.005 kg/s โดยเฉลี่ย ทำให้รูปแบบการไหลเวียนแบบบังคับมีความโดดเด่นมากกว่าเมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพต่างๆ ของแผง SPVT ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบการไหลเวียนน้ำแบบบังคับที่ค่าอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.02 kg/s เป็นอัตราการไหลที่ให้ค่าประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ความร้อน และประสิทธิภาพรวมของแผง SPVT เฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 12.73% 49.36% และ 62.09% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพทางความร้อนและประสิทธิภาพรวมของแผงมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับแผง PVT ที่เคยมีผู้ทำการศึกษาไว้คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 50-68% (14) และ 60-80% (Radziemsk, 2019) ตาม

ลำดับ ในส่วนของค่าความส่องสว่างใต้แผง SPVT นั้น (Table 2) ที่ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย 605 W/m^2 ที่ความสูงจากพื้นถึงแผงที่ระยะ 2.60, 1.50 และ 0.40 m มีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 2,169, 609 และ 147 Lux ตามลำดับ ซึ่งค่าความส่องสว่างภายในห้องมีประสิทธิภาพการส่องผ่านเฉลี่ยที่ 1.35% ระดับความสว่างที่ได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในพื้นที่ทั่วไป แนวคิดของแผง SPVT ที่ทำการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์ชนิดอื่นๆ ได้ ทั้งนี้แนวทางการศึกษาต่ออาจเป็นรูปแบบของช่องแสงส่องผ่านที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ให้ตรงกับความต้องการของแสงที่แตกต่างกันออกไปหรือทำการศึกษาวิจัยเพื่อป้องกันการรั่วซึมของของไหลในแผงในระยะยาว จากการศึกษาจะเห็นได้ว่า แผง SPVT เป็นอุปกรณ์พลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่รับแสงได้มากขึ้น สามารถประยุกต์ใช้กับอาคารต่างๆ ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2559). *รายงานประจำปี 2559. กระทรวงพลังงาน*.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). *ศักยภาพรังสีรวมปี 2552.กระทรวงพลังงาน*.

ณัฐวัฒน์ จิตศีล. (2562). แนวทางการปรับปรุงแสงสว่างเพื่อความสมำเสมอในการส่องสว่างกรณี ศึกษาอาคารตลาดเชิงวัฒนธรรมองค์การบริหาร ส่วนตำบลพระธาตุอำเภอนาดูนจังหวัด มหาสารคาม. *วารสารสถาปัตยกรรม การออกแบบ และการก่อสร้าง, 1*(1), 65-76.

เดชนิติธร อิ่มปรีดา และ วันชัย ทรัพย์สิงห์. (2554). *แผงเซลล์แสงอาทิตย์จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบบทันเวลา*. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4. ลำปาง.

Badescu V, Landsberg PT, Devos A. (1997). Statistical thermodynamic foundation for photovoltaic and photothermal conversion III: application to hybrid solar converters. *J Appl. Phys., 81*, 3692-3699

Chow TT, Chan ALS, Fong KF, Lin Z, He W, Ji J. (2009). Annual performance of building-integrated photovoltaic/water-heating system for warm climate application. *Applied Energy, 86*(5), 689-696.

Deo A, Mishra GK, Tiwari GN. (2017). A thermal periodic theory and experimental validation of building integrated semi-transparent photovoltaic thermal (BiSPVT) system. *Solar Energy, 155*, 1021-1032.

Diwania S, Agrawal S, Siddiqui AS. (2020). Photovoltaic–thermal(PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *Int J Energy Environ Eng, 11*, 33–54.

Dubey S, Sarvaiya, JN, Seshadri B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world–a review. *Energy Procedia, 33*, 311-321.

Duffie J.A., Beckman W.A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes (2nd ed)*. john Wiley and Sons Inc..

Gaur A, Tiwari G.N., Ménézo C, Al-Helal I.M. (2016). Numerical and experimental studies on a Building integrated Semi-transparent Photovoltaic Thermal (BiSPVT) system: Model validation with a prototype test setup. *Energy conversion and management, 129*, 329-343.

Javed A. (2014). The Effect of Temperatures on the Silicon Solar Cell. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS), 9*, 305-308.

Kamthania D, Tiwari G.N. (2014). Energy metrics analysis of semi-transparent hybrid PVT double pass facade considering various silicon and non-silicon based PV module Hyphen is accepted. *Solar energy, 100*, 124-140.

Kumar R, Rosen M.A. (2011). Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins Appl. *Therm. Eng. 31*, 1402-1410.

Martial A, Akata EA, Njomo D, Agrawal B. (2015). Thermal Energy Optimization of Building Integrated Semi-Transparent Photovoltaic Thermal Systems. *International Journal of Renewable Energy Development, 4*(2).

Radziemsk E. (2019). Performance Analysis of a Photovoltaic-Thermal Integrated System. *International Journal of Photoenergy*.

Taffesse F, Verma A, Singh S, Tiwari G.N. (2016). Periodic modeling of semi-transparent photovoltaic thermal-trombe wall (SPVT-TW). *Solar Energy, 135*, 265-273.