

<http://journal.rmutp.ac.th/>

การศึกษาเชิงทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้ท่อความร้อนแบบแบน

อนรรัตน์ เทวตา และ ยุทธนา ศรีอุดม*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
41 ถนนพหลโยธิน ตำบลไม้งาม อำเภอเมือง จังหวัดตาก 63000

รับบทความ 5 มกราคม 2561; ตอรับบทความ 28 พฤษภาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับทดสอบเป็นแบบโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 80 วัตต์ ซึ่งจะมีการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แบบ คือ แบบที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน(HP1) แบบที่ 2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอล(HP2) เป็นสารทำงาน และ แบบที่ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) ซึ่งการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากผลการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน มีค่าเท่ากับ 52.9 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพ เท่ากับร้อยละ 9.3 ส่วนแผงที่ทำการติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน มีอุณหภูมิที่ผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 50.7 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพ ร้อยละ 10.2 และแผงที่ทำการติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน มีอุณหภูมิผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 49.2 องศาเซลเซียส และมีประสิทธิภาพ ร้อยละ 11.8 ซึ่งการทดสอบ จะเห็นได้ว่า การติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

คำสำคัญ : การเพิ่มประสิทธิภาพ, แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ท่อความร้อนแบบแบน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +669 5636 9747, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: yuttana.sriudom@gmail.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

An Experimental Study on Increasing Efficiency of Solar Cell Modules by Flat Heat Pipe Cooling

Anurat Tewata and Yuttana Sriudom*

Faculty of Engineering, University Rajamangala University of Technology Lanna
41 Paholayothin Road, Mai Ngam, Mueang, Tak, 63000

Received 5 January 2018; Accepted 28 May 2018

Abstract

The purpose of this research was to improve the efficiency of solar cell modules by cooling with heat pipes. The test set consisted of three 80 watt solar modules that were made of mono-crystalline. The first module did not install heat pipes, while the second module installed heat pipes using ethanol as the working fluid and the third module installed heat pipes using R-11 as working fluid. Solar radiation intensity, electrical energy produced by the solar modules, and temperature of the solar modules were recorded. The results showed that the average temperature of the first solar cell module was 52.9 °C and the efficiency was 9.3%, in the case of not install heat pipes on solar module. For the units with heat pipes, it was found that unit with ethanol heat pipe had an average temperature of 50.7 °C and efficiency at 10.2%, whereas the unit using R-11 heat pipe had an average temperature at 49.2 °C and efficiency at 11.8%. From the experiments, it was concluded that the installation of heat pipes could increase the efficiency of solar cell modules.

Keywords : Increasing Efficiency; Solar Cell Module; Flat Heat Pipe

* Corresponding Author. Tel.: +669 5636 9747 E-mail Address: yuttana.sriudom@gmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานในประเทศเป็นอย่างมาก ซึ่งในแต่ละปีนั้นจะต้องใช้งบประมาณหลายหมื่นล้านบาทที่สูญเสียไปกับค่าเชื้อเพลิงที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ และมีแนวโน้มว่าค่าใช้จ่ายจะสูงขึ้นทุกปี คณะผู้จัดทำได้เห็นว่าการแสวงหาพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติมาใช้อาจเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าและประหยัดกว่าการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่หมดไปเรื่อยๆ ดังนั้นการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุดโดยอาศัยสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เพื่อที่จะมาใช้เป็นแหล่งพลังงานเพิ่มเติมจากพลังงานแหล่งอื่นๆ ที่จะหมดไปในอนาคต พลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีปริมาณมหาศาลและไม่มีวันหมดไปจากโลก และไม่ทำให้เกิดมลภาวะสำหรับประเทศไทยซึ่งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรของโลกได้รับพลังงานแสงอาทิตย์มากกว่าประเทศแถบอื่นๆ เช่น แถบยุโรป และแถบอเมริกา และยังมีแสงอาทิตย์อยู่ตลอดทั้งปีซึ่งสามารถนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างจริงจัง จะสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงได้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ อีกทั้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานสะอาด ไม่เสียค่าใช้จ่ายใด ๆ ในการนำพลังงานนั้นมาใช้งาน แต่การนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้านั้นยังพบปัญหาในการใช้งานเนื่องจากเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับรังสีอินฟราเรดจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์เกิดความร้อนขึ้นบริเวณพื้นผิวที่รับแสงและสะสมความร้อนภายในโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งโดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่อ้างอิงจากผู้ผลิตจะมีอุณหภูมิทำงานอยู่ที่ 25 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 25 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง โดยจะลดลงประมาณร้อยละ 0.4 สำหรับทุก 1 องศาเซลเซียสที่สูงขึ้น ดังนั้น ที่อุณหภูมิทำงานจริงประมาณ 50 – 60

องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลง ประมาณร้อยละ 10 – 15 Kiatsiriroat [1] จากปัจจัยดังกล่าว ทำให้มีนักวิจัยหลายท่าน ได้ทำการศึกษา ค้นคว้าและทำการวิจัยเพื่อหาแนวทางลดอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์โดยการนำเทคนิคต่าง ๆ มาใช้ในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วย Phuengkum [2] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยระบบหล่อเย็น พบว่า ที่อุณหภูมิของแผงอ้างอิงใกล้เคียงกันของแต่ละเงื่อนไข ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 4.24×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ให้ผลดีที่สุด ซึ่งทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 21.05 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.51 ให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.35 ส่วนระบบหล่อเย็นด้วยแผ่นครีบทาให้ลดลง 9.19 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.28 ให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.02 Bhulla [3] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยเทคนิคการลดอุณหภูมิด้วยการใช้น้ำในระบบระบายความร้อนสำหรับการลดอุณหภูมิในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยได้ทำการทดสอบระบบระบายความร้อน 2 แบบ คือ แบบพ่นบนผิวหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์และแบบน้ำหยดบนผิวหน้าแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดย พบว่า ในทุกการทดสอบนั้นน้ำสามารถลดอุณหภูมิในการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี การทดสอบแบบพ่นน้ำและแบบน้ำหยดบนผิวหน้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีความสามารถในการลดอุณหภูมิโดยเฉลี่ยร้อยละ 30.1 และ 39.9 ตามลำดับ ส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น โดยเฉลี่ยร้อยละ 8.6 และ 12.6 ตามลำดับ Yonsatitkul [4] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์โดยระบายความร้อนด้วยท่อทำ ความเย็นแบบท่อทองแดงร่วมกับแผ่นเพลเทียร์ พบว่า ใน ช่วงเวลา 12.20 น. ที่มีความเข้มแสงอาทิตย์เท่ากับ 642 วัตต์ต่อตารางเมตร มีค่า

กำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ ที่ติดตั้งท่อทองแดงระบายความร้อนเท่ากับ 40.74 วัตต์ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ 49.7 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพเท่ากับ ร้อยละ 19.65 และแผงโซลาร์เซลล์มาตรฐาน มีค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 36.86 วัตต์ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแผงโซลาร์เซลล์เท่ากับ 50.3 องศาเซลเซียส และประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 16.95 แสดงว่าการติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยท่อทองแดงรูปทรงกลมมีกำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของแผงโซลาร์เซลล์สูงกว่าแผงโซลาร์เซลล์แบบมาตรฐานเท่ากับ ร้อยละ 2.7 จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมามีเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีหลายวิธีการมากในการนำมาช่วยระบายความร้อน โดยท่อความร้อนก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังเช่น กรณีตัวอย่าง ของ Sichamnan [5] ได้ทำการศึกษาเชิงทดสอบการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดง พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนติดตั้งวัสดุ พูนแบบตาข่ายทองแดง สามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดีกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนโดยเฉลี่ยร้อยละ 9.21 Gang [6] ได้ทำการออกแบบและสร้างท่อความร้อนที่ใช้ในการระบายความร้อนให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยใช้ท่อความร้อนทำมาจากท่อทองแดงที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน โดยที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เป็นแบบ Single Crystalline Silicon ทำการทดลองโดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง โดยพบว่า แบบจำลองสามารถทำนายผลได้เป็นที่น่าพอใจ ความร้อนรายวันและประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของระบบเป็นร้อยละ 41.9 และ 9.4 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าเฉลี่ยทางความร้อนและไฟฟ้าที่ได้คือ 276.9 และ 62.3 วัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ และประสิทธิภาพรวมของระบบร้อยละ 6.8 Gang [7] ได้ทำการวิเคราะห์เกี่ยวกับการผลิตน้ำร้อนและ

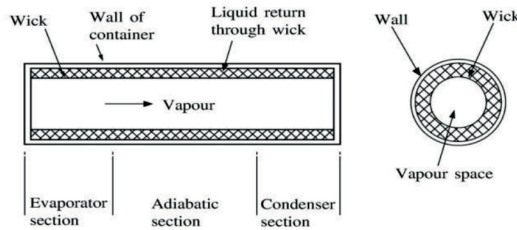
ไฟฟ้าสำหรับบ้านพักอาศัยเป็นรายปี โดยใช้ท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยประยุกต์ใช้ในพื้นที่ 3 สภาวะภูมิอากาศในประเทศจีน ได้แก่ ฮองกง ลาซา และปักกิ่ง โดยพบว่า พลังงานความร้อนและไฟฟ้าที่ได้จากระบบหลักขึ้นอยู่กับความเข้มของรังสีอาทิตย์ในพื้นที่ สำหรับระบบที่มีอุปกรณ์เสริมด้านความร้อน เมื่อถูกใช้ในฮองกง ลาซา และปักกิ่ง ความร้อนรายปีจะเท่ากับ 1,665.05 - 1,872.22 2,939.67 - 3,328.25 และ 2,111.07 - 2,352.95 เมกกะจูลต่อตารางเมตร ตามลำดับ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้รายปี เท่ากับ 261.32 - 264.98 462.14 - 466.10 และ 322.84 - 328.15 เมกกะจูลต่อตารางเมตร

ดังนั้น การศึกษาวิธีการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบแบน สำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อีกทั้งการลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุดต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ทฤษฎีท่อความร้อน (Heat Pipe)

1.1 ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่สามารถในการนำความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว โดยมีลักษณะเป็นท่อปลายปิดทั้ง 2 ด้าน ภายในจะทำให้เป็นสุญญากาศและบรรจุสารทำงานและวัสดุพูนไว้ โดยสารทำงานทำหน้าที่รับความร้อนจากส่วนทำระเหยแล้วไประบายความร้อนกับส่วนควบแน่นแล้วกลั่นตัวเป็นของเหลวไหลกลับมายังส่วนทำระเหยอีกครั้ง โดยอาศัยวัสดุพูนที่มีแรงคาปิลลารีช่วยในการดึงเอาสารทำงานที่กลั่นตัวให้ไหลกลับมายังส่วนทำระเหย ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบของท่อความร้อน (Heat Pipe)
Rittidech [8]

1.2 คุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเมื่อให้ความร้อนเข้าไปยังส่วนทำระเหย สารทำงานที่รับความร้อนจะเกิดการเดือดและเคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและเกิดการถ่ายเทความร้อนทำให้เกิดการควบแน่น ในการหาค่าการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่น หรือสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าความร้อนของอากาศที่มารับความร้อนในส่วนควบแน่นคำนวณจากสมการที่ (1) Sriudom [9] โดยในส่วนควบแน่นจะติดตั้งพัดลมเป่าอากาศที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ผ่านส่วนควบแน่น แล้ววัดค่าอุณหภูมิทั้งขาเข้า (อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) และขาออกของอากาศที่ส่วนควบแน่น จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณโดยใช้สมการ ดังต่อไปนี้

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (1)$$

โดยที่

Q คือ ค่าความร้อนของอากาศในส่วนควบแน่น (W)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg-K)

ΔT คือ ผลต่างอุณหภูมิของอากาศขาออกและขาเข้าที่ส่วนควบแน่น (°C)

เมื่อ

$$\dot{m} = \rho v A \quad (2)$$

โดย

ρ คือ ค่าความหนาแน่น (kg/m³)

v คือ ค่าความเร็วของสารทำงาน (m/s)

A คือ ค่าพื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน (m²)

การคำนวณประสิทธิภาพ (η) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ (3)

$$\eta = (IV)/(AG) \quad (3)$$

การคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังสมการที่ (4)

$$P = IV \quad (4)$$

โดยที่

P คือ กำลังไฟฟ้า (Watts)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

V คือ แรงดันไฟฟ้า (Volt)

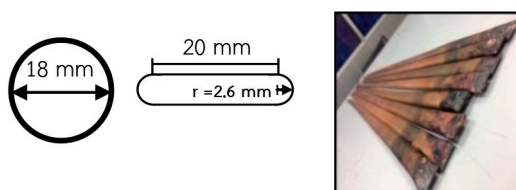
G คือ ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m²)

A คือ พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (m²)

1.3 อุปกรณ์ และขั้นตอนการทดสอบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบ และสร้างชุดทดลอง โดยแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ 1. ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) 2. ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน (HP2) และ 3 ชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) โดยช่วงเวลาในการทดสอบระหว่างวันที่ 1 - 30 ธันวาคม 2560 และอุปกรณ์ในการทดสอบ ประกอบไปด้วย

1.3.1 ท่อความร้อน ทำจากท่อทองแดง มีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 18 มิลลิเมตร นำมา ปีบให้มีขนาด 20 มิลลิเมตร และมีรัศมี 2.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ภายในติดตั้งวัสดุพูนแบบตาข่ายทองแดง ขนาด 100 Mesh ดังแสดงในรูปที่ 3 บรรจุสารทำงานประกอบด้วย เอทานอล และ สารทำความเย็น R-11 โดยเติมสารทำงาน ร้อยละ 40 โดยปริมาตรรวมของส่วนทำระเหย ซึ่งผู้วิจัยอ้างอิงการเติมสารทำงาน Kraisinghirun [10] ได้ทำการทดลองสมรรถนะเชิงอุณหภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน โดยทดลองปรับอัตราส่วนการเติม ที่ร้อยละ 30, 40, 50, 60 และ 70 โดยผลการทดสอบที่ อัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 40 จะให้ผลที่ดีที่สุด



รูปที่ 2 ท่อความร้อนแบบแบน



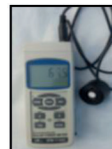
รูปที่ 3 วัสดุพูนแบบตาข่าย

1.3.2 สายเทอร์โมคัปเปิลยี่ห้อ OMEGA ชนิด K แม่นยำ $\pm 1^\circ\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 สายเทอร์โมคัปเปิลยี่ห้อ OMEGA ชนิด K

1.3.3 เครื่องวัดความเข้มแสงยี่ห้อ SPM-1116SD ช่วงการวัด 0.0 ถึง 2,000.0 วัตต์ต่อตารางเมตร ความแม่นยำ ± 10 วัตต์ต่อตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องวัดความเข้มแสง (Pyranometer)

1.3.4 เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ Wisco รุ่น DL 2200 ขนาด 8 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 องศาเซลเซียส ถึง 1,300 องศาเซลเซียส มีความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data-logger)

1.3.5 ตัวขยายสัญญาณ Analog Expansion Module EX24 ขนาด 16 Channels Analog Input มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -250 องศาเซลเซียส ถึง 1,300 องศาเซลเซียส มีความแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 Analog Expansion Module

1.3.6 มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ GW instek GDM-394/396 ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 มัลติมิเตอร์

1.3.7 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า LEONICS รุ่น APOLLO S-120A แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 12 โวลต์ดีซี แรงดันไฟฟ้าขาออก 220 โวลต์ดีซี 1 เฟส ความถี่ไฟฟ้า 50 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า

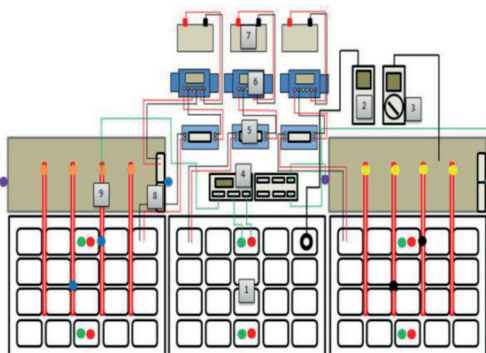
1.3.8 แบตเตอรี่ สำหรับการทดสอบ ขนาด 12 โวลต์ – 20 แอมแปร์ชั่วโมง

1.3.9 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Mono-crystalline Module ขนาด 80 วัตต์) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 18.0 โวลต์ กระแสสูงสุด 2.23 แอมแปร์ แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์

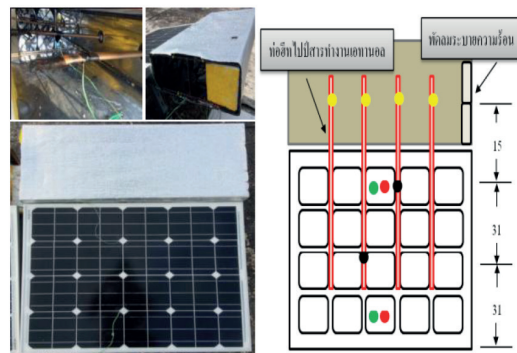
1.4 ไดอะแกรมสำหรับติดตั้งอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดและเก็บข้อมูลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 11 และ รูปที่ 12



รูปที่ 11 ผังการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับการทดสอบ

รายการ	สี	รายการ
1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์	●	ตำแหน่งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลบนแผง
2. เครื่องวัดความเข้มแสง	●	ตำแหน่งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลใต้แผง
3. ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ	●	การติดตั้งความร้อนโดยใช้สารทำงานเอทานอล (Ethanol)
4. เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	●	การติดตั้งความร้อนโดยใช้สารทำงาน R-11
5. วัดอุณหภูมิ	●	ตำแหน่งลมเข้า
6. เครื่องควบคุมการชาร์จ	●	ตำแหน่งลมออก
7. แบตเตอรี่	●	
8. พัดลมระบายความร้อน	●	
9. ท่อความร้อน	●	



รูปที่ 12 การติดตั้งท่อความร้อนและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของชุดทดสอบ

1.5 การเลือกใช้สารทำงานภายในท่อความร้อน โดยผู้วิจัยได้ทำการเลือกสารที่นำมาใช้เป็นสารทำงานภายในท่อความร้อน ได้แก่ เอทานอล และ สารทำความเย็น R-11 ดังแสดงในตารางที่ 1 เนื่องจากสารทำงานทั้งสองชนิดมีช่วงอุณหภูมิการทำงานใกล้เคียงกันและทำงานได้ดีที่อุณหภูมิในการระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งสารทำงานทั้งสองชนิดหาได้ง่าย และมีราคาค่อนข้างถูก

ตารางที่ 2 สารทำงานภายในท่อความร้อน John Wiley [11]

สารทำงาน	จุดเดือด(°C)	อุณหภูมิใช้งาน (°C)
Helium	-269	-271 ถึง -269
Nitrogen	-196	-203 ถึง -160
Ammonia	-33	-60 ถึง 100
R- 11	24	- 40 ถึง 120
Pentane	28	-20 ถึง 120
Ethanol	78	0 ถึง 130

ขั้นตอนการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการจัดทำชุดทดสอบ 3 ชุด ได้แก่ 1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) 2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน (HP2) และ 3. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) โดยทดสอบในช่วงวันที่ 1 - 30 ธันวาคม พ.ศ.2559 ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการเลือกวันที่มีอากาศปลอดโปร่งมีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวันนั้นคือวันที่ 18 ธันวาคม 2559 มาใช้เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ข้อมูลในการทดสอบ ช่วงเวลาการเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 09.00 - 16.00 น. โดยทำการทดสอบที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ซึ่งข้อมูลทำการบันทึก ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มแสง ความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 วินาที โดยมีขั้นตอนในการทดสอบ ดังต่อไปนี้

1. ทำการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ก่อนติดตั้งท่อความร้อนเพื่อหาประสิทธิภาพแผง โดยแบ่งแผงออกเป็น 3 ชุด ประกอบด้วย แผงที่ 1 (S1) แผงที่ 2 (S2) และ แผงที่ 3 (S3) โดยทำการทดสอบ จำนวน 3 วัน แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณหาประสิทธิภาพแผง

2. ทำการติดตั้งท่อความร้อนเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามขนาดที่ออกแบบไว้ โดยแบ่งชุดทดสอบออกเป็น 3 ชุด ประกอบไปด้วย 1. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) 2. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน (HP2) และ 3. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงาน (HP3)

3. ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ และอุปกรณ์ในการตรวจวัดเข้ากับชุดทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยทำการบันทึกอุณหภูมิอุณหภูมิ ความเข้มแสง และ กำลังไฟฟ้า ทุก ๆ 5 วินาที และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

4. การวิเคราะห์ข้อมูล หลังจากที่ได้ทำการทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูล จะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ประกอบไปด้วย

4.1 คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ตามสมการที่ (1) - (2)

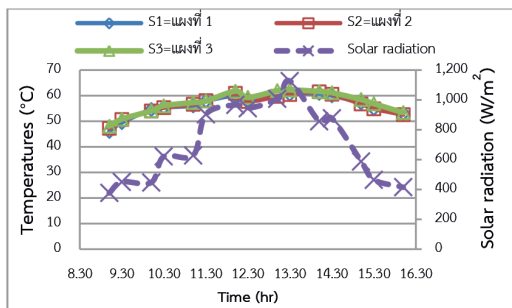
4.2 คำนวณหาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ตามสมการที่ (3) - (4)

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษา ทดลองและวิจัยผลเพื่อหาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน (HP2) และ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูล และคำนวณหาประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผลจากการทดสอบ ประกอบไปด้วย

3.1 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน ประกอบไปด้วย

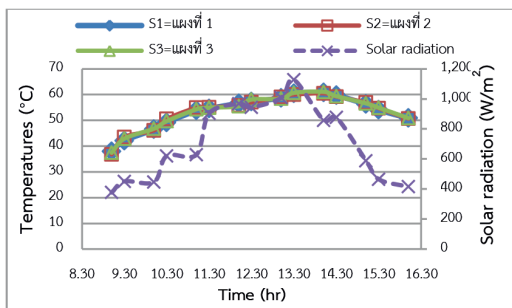
3.1.1 ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิได้แผงของทั้ง 3 แผง กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง อุณหภูมิได้แผง และช่วงเวลาในการทดสอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน

จากรูปที่ 13 พบว่า อุณหภูมิได้แผงจะผันแปรตามความเข้มแสงโดยเมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิได้แผงมีค่าเพิ่มขึ้น การที่อุณหภูมิได้แผงมีค่าสูงขึ้นนั้นเนื่องจากการสะสมความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเห็นได้จากช่วงเวลา 9.00 น. อุณหภูมิได้แผงจะมีค่าต่ำ และจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความเข้มแสงสูงสุด เท่ากับ 1,127 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อเวลา 13.30 น. และมีค่าความเข้มแสงเฉลี่ยตลอดทั้งวัน เท่ากับ 711.8 วัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนอุณหภูมิได้แผงสูงสุด เท่ากับ 61.1 องศาเซลเซียส เมื่อเวลา 14.00 น. และมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยได้แผงเฉลี่ย เท่ากับ 50.4 องศาเซลเซียส

3.1.2 ผลของความเข้มแสงและอุณหภูมิบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 แผง กรณีที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 14

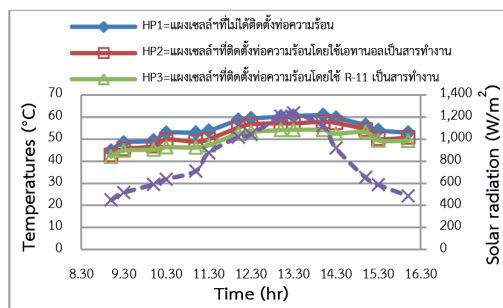


รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง อุณหภูมิบนแผง และช่วงเวลาในการทดสอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน

จากรูปที่ 14 พบว่า อุณหภูมิบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะผันแปรตามความเข้มแสงโดยเมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิบนแผงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับอุณหภูมิได้แผง โดยการที่อุณหภูมิบนแผงมีค่าสูงขึ้นนั้นเนื่องจากการสะสมความร้อนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยค่าความเข้มแสงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,127 วัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อเวลา 13.30 น. และมีค่าความเข้มแสงเฉลี่ยตลอดทั้งวัน เท่ากับ 711.8 วัตต์ต่อตารางเมตร ส่วนอุณหภูมิบนแผงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 62.3 องศาเซลเซียส เมื่อเวลา 13.30 น. และมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนแผง เท่ากับ 53.4 องศาเซลเซียส

3.2 ผลการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อน

3.2.1 ผลของความเข้มแสง และอุณหภูมิได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ของทั้ง 3 ชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 15

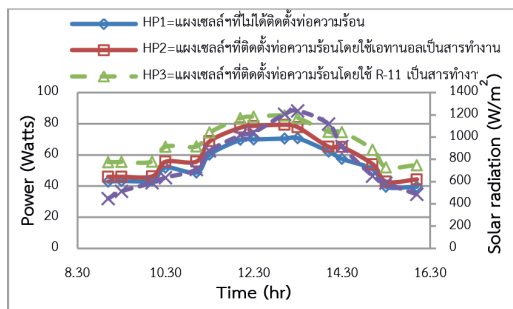


รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง อุณหภูมิได้แผง และช่วงเวลาในการทดสอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนและติดตั้งท่อความร้อน

จากรูปที่ 15 พบว่า ชุดทดสอบทั้ง 3 ชุดทดสอบมีแนวโน้มอุณหภูมิได้แผงที่เหมือนกันคือเมื่อความเข้มแสงมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิได้แผงมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยอุณหภูมิได้แผงเฉลี่ยของชุดทดสอบ HP1 HP2 และ HP3 มีค่าเท่ากับ 54.9, 51.9 และ 49.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีอุณหภูมิได้แผงสูงสุดของชุดทดสอบ HP1 HP2 และ HP3 มีค่าเท่ากับ

60.8, 57.9 และ 53.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการติดตั้งท่อความร้อนเข้ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีอุณหภูมิที่ลดลงเนื่องจากท่อความร้อนดึงเอาความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง โดยท่อความร้อนที่ใช้สารที่ใช้งาน R-11 (ชุดทดสอบ HP3) สามารถดึงความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุดเนื่องจากสารทำความเย็น R-11 มีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารทำงานเอทานอล ทำให้เมื่อสารทำความเย็น R-11 ได้รับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเดือดกลายเป็นไอที่ส่วนที่ระเหยและเคลื่อนที่มาระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้เร็วกว่าสารทำงานเอทานอล จึงทำให้ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-11 ระบายความร้อนได้เร็วและดีกว่าสารทำงานเอทานอลนั่นเอง

3.2.2 ผลของการทดสอบกำลังไฟฟ้าของชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 16

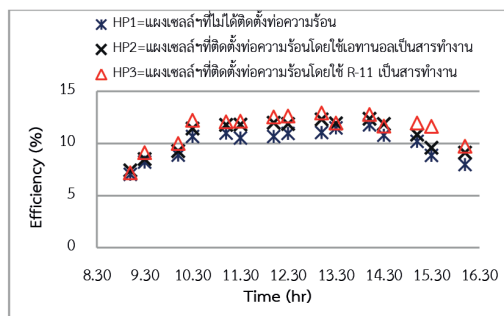


รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกำลังไฟฟ้า และช่วงเวลาที่ใช้ในการทดสอบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน และติดตั้งท่อความร้อน

จากรูปที่ 16 พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ เมื่อค่าความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะส่งผลให้ค่าพลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

หรือลดลงตามไปด้วย ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าโดยเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ HP1, HP2 และ HP3 มีค่าเท่ากับ 54.7, 60.2 และ 68.5 วัตต์ ตามลำดับ โดยค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ HP1, HP2 และ HP3 มีค่าเท่ากับ 70.7, 79.3 และ 85.4 วัตต์ ตามลำดับ โดยจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงานจะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตไฟฟ้าได้สูงสุด รองลงมาคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนจะผลิตไฟฟ้าได้ต่ำสุด

3.2.3 ผลของการทดสอบประสิทธิภาพชุดทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงผลของประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ 17 พบว่า ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แผง มีแนวโน้มที่เหมือนกัน ซึ่งค่าประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ HP1, HP2 และ HP3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.3, 10.2 และ 11.8 ตามลำดับ โดยผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อทำการติดตั้งท่อความร้อนเพื่อระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงาน จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน

ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด

4. สรุป

จากผลการศึกษาแนวทางการเพิ่มสมรรถนะของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการทดสอบในเดือนธันวาคม 2559 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้สำหรับทดสอบเป็นแบบโมโนคริสตัลไลน์ ขนาด 80 วัตต์ และ ซึ่งจะทำการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ 3 แบบ คือ แบบที่ 1 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) แบบที่ 2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอล(HP2) เป็นสารทำงาน และ แบบที่ 3 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) ซึ่งการทดสอบจะทำการเก็บข้อมูลความเข้มแสงอาทิตย์ กำลังไฟฟ้า และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดสอบ พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (HP1) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้เอทานอลเป็นสารทำงาน (HP2) และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R-11 เป็นสารทำงาน (HP3) มีค่าเท่ากับ 52.8, 50.6 และ 49.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแผงทดสอบ (HP3) สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้สูงสุด รองลงมาคือ แผงทดสอบ (HP2) ส่วนแผงทดสอบ (HP1) ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนจะมีการถ่ายเทความร้อนออกจากแผงเซลล์ได้ต่ำสุด และ ประสิทธิภาพเฉลี่ยของแผงทดสอบ (HP1) แผงทดสอบ (HP2) และ แผงทดสอบ (HP3) มีค่าเท่ากับร้อยละ 9.3, 10.2 และ 11.8 โดยแผงที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สาร R-11 เป็นสารทำงาน จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือแผงที่ติดตั้งท่อความร้อนโดยใช้สารเอทานอลเป็นสารทำงาน ส่วนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน จะให้

ประสิทธิภาพต่ำสุด จากการที่สารทำงาน R-11 สามารถระบายความร้อนและให้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้นเนื่องจากสารทำความเย็น R-11 มีจุดเดือดที่ต่ำกว่าสารทำงานเอทานอล ทำให้เมื่อสารทำความเย็น R-11 ได้รับความร้อนจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะเดือดกลายเป็นไอที่ส่วนทำระเหยและเคลื่อนที่มาระบายความร้อนที่ส่วนควบแน่นได้เร็วกว่าสารทำงานเอทานอล จึงทำให้ท่อความร้อนที่ใช้สารทำงาน R-11 ระบายความร้อนได้เร็วและดีกว่าสารทำงานเอทานอลนั่นเอง โดยสรุปแล้วเมื่อทำการติดตั้งท่อความร้อนสำหรับระบายความร้อนออกจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะสามารถลดอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลงได้และส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้งบประมาณสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Kiatsiriroat. (2016, April 14). National Science and Technology Development Agency (NSTDA). [Online]. Available: <http://www.clinictech.most.go.th/online/techlist/attachFile/20172251157371.pdf>
- [2] N. Phuengkum, "Increasing Performance of Solar Cell Panels by Cooling System," M.S. thesis, Dept. Science in Physics., Prince of Songkla Univ., Songkla, 2008.
- [3] P. Bhulla, C. Lertsatittanakorn and N.

- Suwaphat, "The Improvement of Photovoltaic Module Efficiency using Temperature Reduction Techniques," *SWU Engineering Journal*, vol. 8, pp. 1-10, 2013.
- [4] T. Yonsatitkul, A. Paedwong and B. Moranok, "A Study of the Efficiency of Performance in Solar Cell Panels by Copper Tube and Peltier for Cooling System," in *Proceeding of 1st national Forum on Creative Innovation The King's Philosophy for Sustainable Development*, Roi Et Rajabhat University, Roi Et, 2017, pp. 386-391.
- [5] S. Sichamnan, T. Chompocam and S. Rittidech, "Efficiency Enhancement of Solar Panels using Copper Mesh Wick Heat Pipe," *UBU Engineering Journal*, vol. 9, pp. 11-22, Jan. 2016.
- [6] P. Gang, F. Huide, Z. Tao and J. Jie, "A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system," *Solar energy*, vol. 85, pp. 911-921, May 2011.
- [7] P. Gang, F. Huide, J. Jie, C. Tin-tai, and Z. Tao, "Annual analysis of heat pipe PV/T systems for domestic hot water and electricity production," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 8-21, Dec. 2012.
- [8] S. Rittidech. *Heat Pipe Technology*, 2nd ed. Mahasarakham: Mahasarakham University Library Press, 2012.
- [9] Y. Sriudom, S. Rittidech, and T. Chompookham, "The Helical Oscillating Heat Pipe: Flow Pattern Behaviour Study," *Advances in Mechanical Engineering*, vol.7, pp. 1-11, Jan. 1, 2015.
- [10] V. Kraisanghirun and T. Sunthornchainaksang, "Experimental on the thermal performance of thermosyphon heat exchanger," *Engineering Journal of Siam University*, vol. 29, pp. 28 – 36, 2014.
- [11] M. Kutz, *Mechanical Engineers' Handbook: Energy and Power*, 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.