



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้

เทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา

โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร

กุมภาพันธ์ 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้

เทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจริญพร เลิศสถิตธนกร

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

การศึกษาสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา

บทคัดย่อ

ในการศึกษาสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลานี้ แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่หนึ่งของโครงการนี้ ได้สร้างและทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประกอบด้วยแผ่นปิดที่ทำจากกระจก ช่องว่างอากาศ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เครื่องระบายความร้อนแบบครีบูปส์เหล็ยมพื้นผิว และตัวรวมรังสีอาทิตย์ ตัวรวมรังสีติดตั้งอยู่ที่ด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก) รังสีอาทิตย์ตรงและรังสีกระจายทำความร้อนให้แผ่นดูดกลืน เป็นเหตุให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล เกิดการผลิตไฟฟ้าจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล ความร้อนเพียงส่วนน้อยจากรังสีอาทิตย์ที่แปลงเป็นไฟฟ้า ขณะที่ความร้อนส่วนใหญ่เพิ่มอุณหภูมิให้กับแผ่นดูดกลืนรังสี อากาศแวดล้อมไหลไหลเข้าเครื่องระบายความร้อนที่ติดตั้งในช่องด้านล่างและได้รับความร้อนจากเครื่องระบายความร้อน จากนั้นอากาศร้อนจะไหลขึ้นไปยังช่องด้านบนเพื่อรับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสี เป็นการปรับปรุงให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น พบว่ามุมตัวรวมรังสีที่เหมาะสมคือที่มุม 60° ซึ่งให้ค่าความร้อนและกำลังไฟฟ้าสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวรวมรังสีอย่างมีนัยสำคัญ

ส่วนที่สองทำการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก การวิเคราะห์พลังงานใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ และการวิเคราะห์เอกเซอร์จีใช้กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราอากาศไหลของอากาศเพิ่มขึ้น ขณะที่กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานขึ้นกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 22.8°C ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2.13 W และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 6.17% ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 7.4% และ 8.4% ตามลำดับ

ส่วนที่สามทำการวิเคราะห์สมรรถนะและเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โม-

เล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยแผ่นปิดที่ทำจากกระจก ช่องว่างอากาศ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เซอร์โมอิเล็กทริก โมดูล เครื่องระบายความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน และถังเก็บน้ำร้อน จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบเท่ากับ 74.9% และ 77.3% ตามลำดับ ที่ อัตราการไหลน้ำ 0.33 kg/s ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น 27.1°C สามารถผลิต กำลังไฟฟ้าได้ 3.6 W การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อน ไฟฟ้าเซอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหลน้ำ 0.33 kg/s ให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดและอัตราการ ผลตอบแทนภายใน (IRR) สูงสุด

ส่วนสุดท้ายได้ทำการสร้างและทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อน ไฟฟ้าเซอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 1.03 W และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.38% ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น ของเซอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 12°C ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 43.3% ที่อัตราการไหล ของน้ำเท่ากับ 0.24 kg/s

Performance study of hybrid thermoelectric solar collector with compound parabolic concentrator

Abstract

The hybrid thermoelectric solar collectors are investigated in this study, which divide in four main parts as follow:

First, a hybrid TE solar air collector with flat-plate reflectors has been developed and tested. The TE solar collector was composed of transparent glass, air gap, an absorber plate, thermoelectric modules, rectangular fin heat sink and two flat plate reflectors. The flat plate reflectors were placed on two sides of the TE solar collector (east and west directions). The direct and reflect incident solar radiations heat up the absorber plate so that a temperature difference is created between the thermoelectric modules that generate a direct current. Only a small part of the absorbed solar radiation is converted to electricity, while the rest increases the temperature of the absorber plate. The ambient air flows through the heat sink located in the lower channel to gain heat. The heated air then flows to the upper channel where it receives additional heating from the absorber plate. Improvements to the thermal energy and electrical power outputs of the system can be achieved by the use of the double pass collector system with reflector and TE technology. It was found that the optimum position of the reflectors is 60° , which gave significantly higher thermal energy and electrical power outputs over the TE solar collector without reflectors.

Second, Analysis of energy and exergy has been performed for a double-pass thermoelectric solar air collector. Energy analysis, which is based on the first law of thermodynamics, and exergy analysis, which is based on the second law, were applied for evaluation of the system efficiency. It was observed that the thermal efficiency increases as the air flow rate increases. Meanwhile, the electrical power output and the conversion efficiency depended on the temperature difference between the hot and cold side of the TE modules. At a temperature difference of 22.8°C , the unit achieved a power output of 2.13 W and the conversion efficiency of 6.17%. The exergy efficiency varies from a minimum of 7.4% to a maximum of 8.4%, respectively.

Third, performances and economic analyses of a hybrid thermoelectric (TE) solar water heater have been studied. The hybrid TE solar water heater was composed of transparent glass, air gap, an absorber plate, thermoelectric modules, water cooled heat sinks and storage water tank.. The experiment shows that the thermal and overall efficiencies increase as the water flow rate increases. The maximum and overall efficiencies were 74.9 and 77.3%, respectively, at the water flow rate of 0.33 kg/s. At a temperature difference of 27.1^oC, the unit achieved a power output of 3.6 W. Moreover, economic analysis indicates that the payback period of the hybrid TE solar water heater operates at the water flow rate of 0.33 kg/s is shorter and higher IRR.

Finally, a hybrid TE solar air collector with flat-plate reflectors has been developed and tested. Results shows that the maximum power output of 1.03 W and the electrical-power generation efficiency of 0.38% were obtained when the temperature difference was 12^oC. Meanwhile, the thermal efficiency increases as the water flow rate increases. The maximum thermal efficiency was 43.3% corresponding to the water flow rate of 0.24 kg/s.

สรุปโครงการ (Executive Summary)

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลาเป็นระบบที่ผลิตความร้อนและไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน อาศัยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนที่ให้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาทั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ผลิตอากาศร้อนและน้ำร้อน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์จะได้รับทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย เพื่อให้แผ่นดูดกลืนรังสีร้อน จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารทำงาน โดยจะแปรผันตามอัตราการไหล เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมจะเพิ่มขึ้นด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ค่อนข้างจะสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบโดยทั่วไป เนื่องจากเมื่อสารทำงานได้รับความร้อนจากเครื่องระบายความร้อนที่ระบายความร้อนออกจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแล้ว จะไหลขึ้นมารับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์อีกครั้งหนึ่ง จึงทำให้ความร้อนที่สารทำงานได้รับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่กำลังไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจะแปรผันตามผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็น ได้ทำการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมอิเล็กทริก พบว่าที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 22.8°C ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2.13 W และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 6.17% ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 7.4% และ 8.4% ตามลำดับ

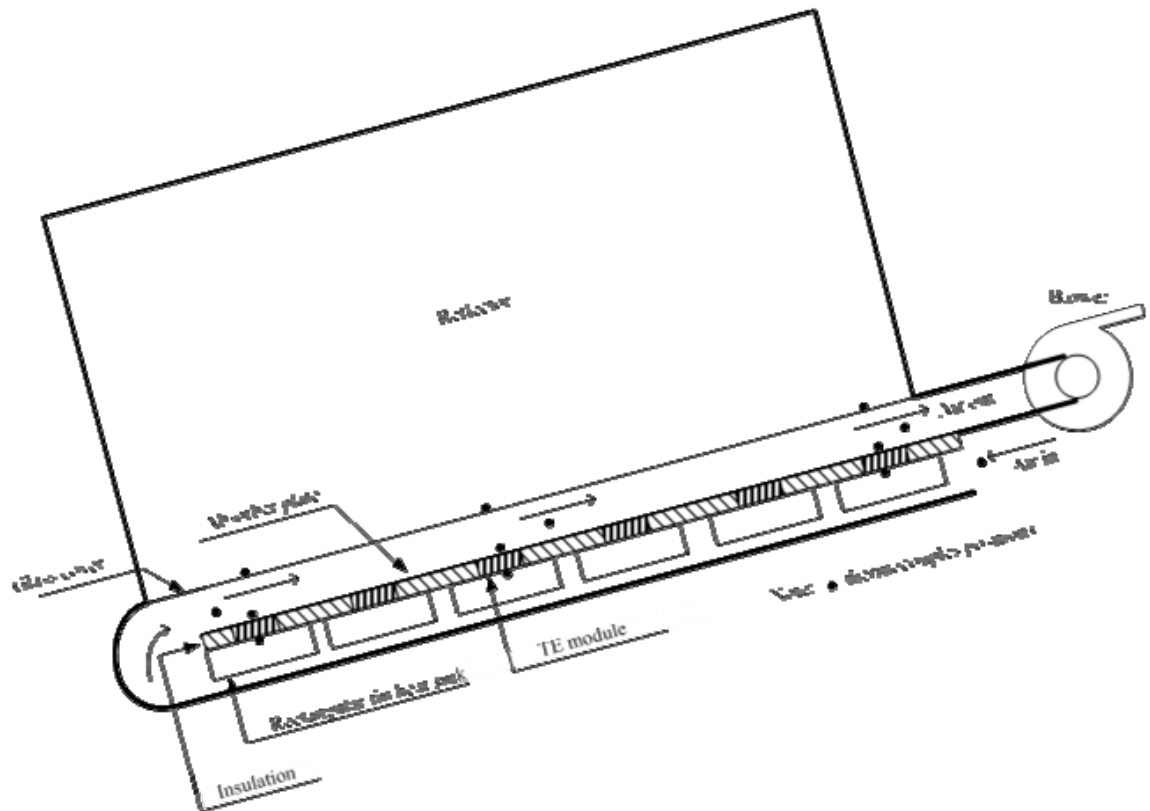
สุดท้ายได้ทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่อัตราการไหลน้ำ 0.33 kg/s ให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุดและอัตราการผลตอบแทนภายใน (IRR) สูงสุด

การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับ ตัวรวมรังสีอาทิตย์

การแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจคือการใช้เทอร์โมอิเล็กทริก โดยนำมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งมีลักษณะเป็นระบบผสม (Hybrid system) กล่าวคือเป็นระบบที่ให้ทั้งความร้อนและไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน อย่างไรก็ตามหากต้องการให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถผลิตความร้อนและไฟฟ้าได้มากขึ้น ทำได้โดยการติดตั้งสะท้อนหรือตัวรวมรังสีอาทิตย์ เพื่อเพิ่มปริมาณรังสีอาทิตย์ให้ตกลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์ โดยทำการหามุมของตัวรวมรังสีที่ดีที่สุด เพื่อให้เกิดการรวมรังสีอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีประกอบด้วย แผ่นเปิดที่ทำจากกระจก ช่องว่างอากาศ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นเหล็กสังกะสีหนา 2.5 mm ด้วยสีดำ เครื่องระบายความร้อนแบบครีบริดจ์สี่เหลี่ยมผืนผ้า ติดตั้งอยู่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาด กว้าง 1 m และ ยาว 1.5 m พื้นที่ช่องรับแสงมีขนาด 1.5 m^2 ช่องว่างอากาศมีความสูง 0.11 m พื้นที่อากาศไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาด 0.11 m^2 แสดงดังรูปที่ 1 ในการศึกษานี้ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดทำความเย็น โมเดล TEC1-12708 (China) จำนวน 24 โมดูล ต่อกันแบบอนุกรม แถวละ 6 โมดูล จำนวน 4 แถว แต่ละโมดูลมีความกว้างและยาวด้านละ 4 cm เครื่องระบายความร้อนแบบแบบครีบริดจ์สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความหนา 4.5 mm ยาว 120 mm และสูงจากฐาน 40 mm ระยะห่างระหว่างครีบริดจ์เท่ากับ 7 mm มีพัดลมแบบหอยโข่ง 1 ตัวทำหน้าที่ในการดูดอากาศผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ตัวรวมรังสีอาทิตย์ทำจากแผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์ มีขนาดยาว 1.5 m และกว้าง 1 m ติดอยู่ด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ทิศตะวันออกและทิศตะวันตก) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์วางหันไปทางทิศใต้ เอียงทำมุม 16° กับแนวนอน ซึ่งเหมาะสมกับสภาพทางภูมิศาสตร์ของจังหวัดมหาสารคาม ($16^\circ 14' \text{N}$, $103^\circ 15' \text{E}$) ภาพถ่ายของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสี แสดงดังรูปที่ 2 นอกจากนั้นยังได้สร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่ไม่มีตัวรวมรังสีอีกเครื่องหนึ่ง เพื่อใช้ทดลองเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์



รูปที่ 2 ภาพถ่ายตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสีอาทิตย์

การวิเคราะห์

ความร้อน (Q_t) จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณจาก

$$Q_t = mC_p(T_{aco} - T_{amb}) \quad (1)$$

เมื่อ C_p คือความร้อนจำเพาะของอากาศ

m คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

T_{amb} , T_{aco} คืออุณหภูมิอากาศเข้าและออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

กำลังไฟฟ้า (P) ที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณจาก

$$P = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2)$$

เมื่อ I_{mp} คือกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้

V_{mp} คือแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_t) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณจาก

$$\eta_t = \frac{Q_t}{A_a G} \quad (3)$$

เมื่อ A_a คือพื้นที่แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์

G คือรังสีอาทิตย์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η_e) ของเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณจาก

$$\eta_e = \eta_c \frac{M - I}{M + \frac{T_c}{T_h}} \quad (4)$$

เมื่อ $M = \sqrt{I + ZT_m}$, $T_m = 0.5(T_h + T_c)$

T_h , T_c คืออุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

Z คือ Figure of merit ของวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มีค่าเท่ากับ $1.6 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$

ประสิทธิภาพคาร์โนต์ คำนวณจาก $\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h}$

ประสิทธิภาพรวม (η_o) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก คำนวณจาก

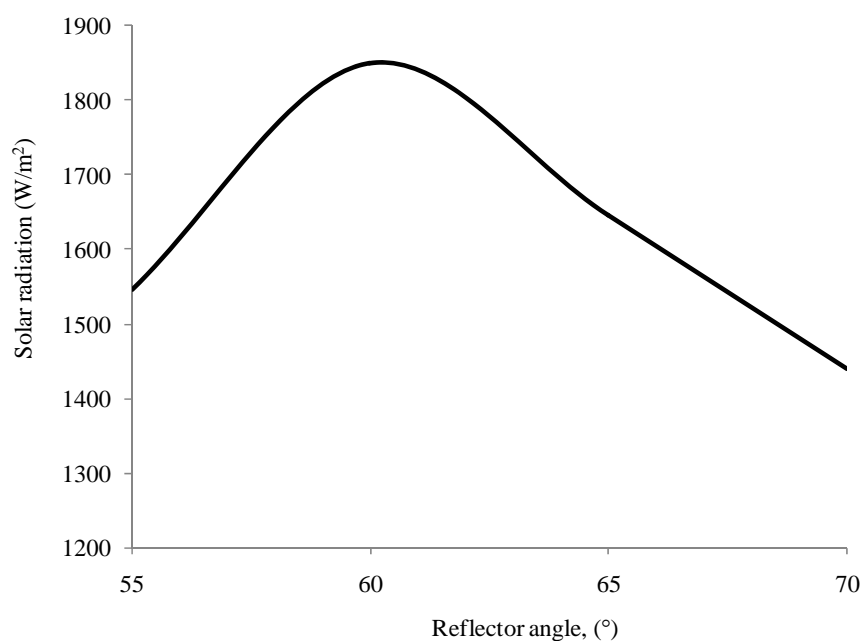
$$\eta_o = \eta_t + \frac{\eta_e}{\eta_{\text{power}}} \quad (5)$$

เมื่อ η_{power} คือประสิทธิภาพโรงไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 38%

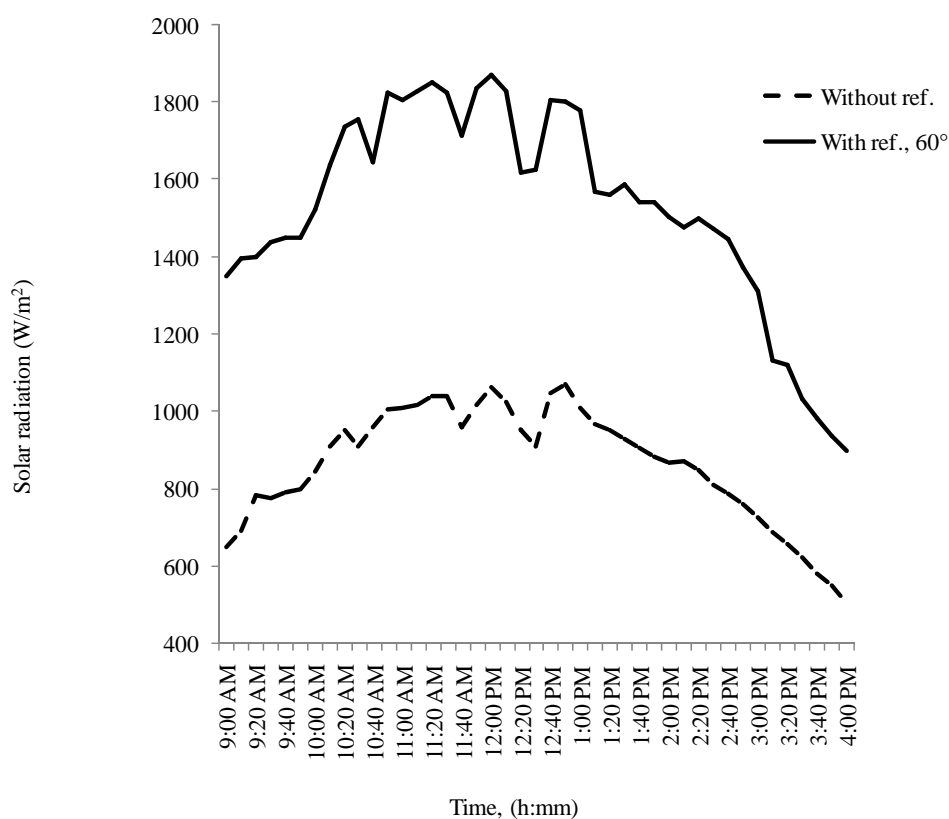
ผลการทดลอง

การทดลองหาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับตัวรวมรังสี ได้ทำการลงช่วง เดือนธันวาคม 2552 ถึง มกราคม 2553

การทดสอบหามุมตัวรวมรังสีทำได้โดยการปรับมุม 4 ตำแหน่ง ได้แก่มุม 55° 60° 65° และ 70° จากแนวนอน รูปที่ 3 แสดงค่ารังสีอาทิตย์ที่วัดได้จากการปรับมุมตัวรวมรังสีอาทิตย์ พบว่ามุมตัวรวมรังสีที่ให้ค่ารังสีอาทิตย์สูงสุดคือมุม 60° ได้ค่ารังสีอาทิตย์สูงถึง 1850 W/m^2 อย่างไรก็ตามทุกมุมที่ทดสอบนี้ให้ค่ารังสีอาทิตย์สูงกว่า กรณีที่ไม่มีตัวรวมรังสี จากการวัดเปรียบเทียบรังสีอาทิตย์ที่มุมตัวรวมรังสี 60° กับกรณีไม่มีตัวรวมรังสี พบว่าการใช้ตัวรวมรังสีช่วยให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ได้รับรังสีอาทิตย์มากกว่า กรณีไม่มีตัวรวมรังสีถึง 1.7 เท่า แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 ผลกระทบจากการปรับมุมตัวรวมรังสีอาทิตย์



รูปที่ 4 เปรียบเทียบรังสีอาทิตย์ที่วัดได้กรณีไม่มีตัวรวมรังสีอาทิตย์กับกรณีมีตัวรวมรังสีอาทิตย์

ที่มุม 60°

พลังงานความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสีแสดงในตารางที่ 1 ทั้งพลังงานความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่มุมตัวรวมรังสี 60° โดยได้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 3.68 W ที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกเท่ากับ 41°C ได้กระแสลัดวงจรเท่ากับ 0.272 A และความดันไฟฟ้าเปิดวงจรเท่ากับ 13.53 V กำลังไฟฟ้าที่ได้นี้สูงกว่ากรณีไม่มีตัวรวมรังสีอาทิตย์ถึง 150% ในขณะที่ความร้อนที่ได้สูงสุดเท่ากับ 2081.2 W ซึ่งสูงกว่ากรณีไม่มีตัวรวมรังสีอาทิตย์ประมาณ 72%

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และประสิทธิภาพรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสีแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมกรณีไม่มีตัวรวมรังสีสูงกว่ามีตัวรวมรังสี อย่างไรก็ตาม กำลังงานความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงกว่า ขณะที่ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกรณีติดตั้งตัวรวมรังสีสูงกว่ากรณีไม่ติดตั้งตัวรวมรังสีทุกมุม

ตารางที่ 1 ความร้อน กำลังไฟฟ้า และผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

$\theta (^{\circ})$	Q_t (W)	P (W)	T_h-T_c (K)
55	1622.3	2.3	40.3
60	2081.2	3.6	50.6
65	1776.6	3.1	44.8
70	1295.4	1.7	26.5
Without reflectors	1205.5	1.2	23.2

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และประสิทธิภาพรวม

$\theta (^{\circ})$	η_{th} (%)	η_e (%)	η_o (%)
55	70.2	1.2	73.5
60	75.1	1.5	79.2
65	72.4	1.4	76.2
70	68.5	0.8	70.6
Without reflectors	80.1	0.7	81.8

สรุป

ในการศึกษานี้ได้แสดงถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีและไม่มีตัวรวมรังสี และหามุมตัวรวมรังสีที่เหมาะสมเพื่อให้ได้รังสีอาทิตย์สูงสุด จากการทดลองพบว่ามุมตัวรวมรังสีที่เหมาะสมที่สุดคือ 60° จากแนวนอน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพรวมกรณีไม่มีตัวรวมรังสีสูงกว่ามีตัวรวมรังสี อย่างไรก็ตามพลังงานความร้อนและกำลังไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งตัวรวมรังสีอาทิตย์ช่วยเพิ่มทั้งความร้อนและไฟฟ้าจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก

การวิเคราะห์

เอกเซอร์จีอุณหภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ คำนวณจาก

$$Ex_{th} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}}\right) Q_{th} \quad (6)$$

เมื่อ T_{abs} คืออุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์

กำลังไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกเป็นรูปแบบหนึ่งของเอกเซอร์จี ดังนั้นเอกเซอร์จีรวมของระบบเท่ากับ

$$Ex_{tot} = Ex_{th} + P \quad (7)$$

เอกเซอร์จีของการแผ่รังสีอาทิตย์ คำนวณจาก

$$Ex_{sol} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) GA_a \quad (8)$$

ประสิทธิภาพเอกเซอร์จี หาได้จาก

$$\psi = \frac{Ex_{tot}}{Ex_{sol}} \times 100 \quad (9)$$

ผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 3 แสดงถึงค่าเอกเซอร์จีอุณหภาพ เอกเซอร์จีรวม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก พบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของอากาศ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึง 75% ที่อัตราการไหล 0.088 kg/s หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่า 80.3% ที่อัตราการไหล 0.123 kg/s ในขณะที่ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีค่าสูงสุด 8.4% และต่ำสุด 7.4% ที่อัตราการไหลอากาศ 0.123 kg/s และ 0.054 kg/s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นอย่างมาก นั้นหมายความว่าปริมาณ

พลังงานที่ควรแปลงเป็นงานมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน

ตารางที่ 3 เอกเซอร์จีอุณหภูมิ เอกเซอร์จีรวม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพเอกเซอร์จี

Air flow rate (kg/s)	Ex_{th} (W)	Ex_{tot} (W)	η_{th} (%)	ψ (%)
0.054	86.3	88.4	67.0	7.4
0.088	92.5	94.5	78.5	8.1
0.123	94.0	96.2	80.3	8.4

สรุป

การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถสรุปได้ดังนี้

- พลังงานและเอกเซอร์จีของระบบมีความแตกต่างกันอย่างมาก ประสิทธิภาพพลังงานสูงกว่าประสิทธิภาพเอกเซอร์จี
- การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลอากาศมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพเอกเซอร์จี ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประสิทธิภาพเอกเซอร์จีมีค่าสูงสุดเท่ากับ 80.3% และ 8.4% ตามลำดับ

การวิเคราะห์สมรรถนะและการศึกษาเศรษฐศาสตร์ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้า เทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อน

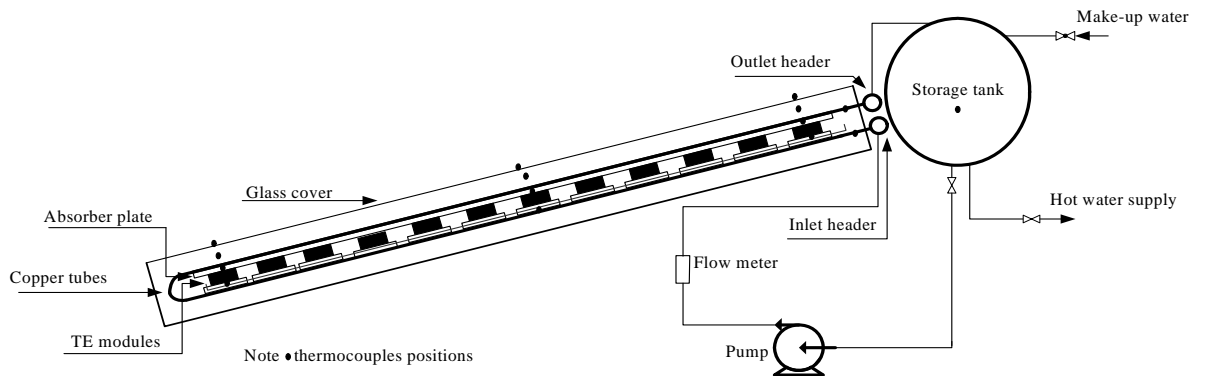
การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกมีราคาสูงกว่า การผลิตไฟฟ้าด้วยระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตามหากนำการผลิตไฟฟ้าด้วยเทอร์โมอิเล็กทริกมารวมเข้ากับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อาจทำให้ระยะเวลาการคืนทุนลดลงได้ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงนำเทอร์โมอิเล็กทริกมาผลิตไฟฟ้าร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้สำหรับผลิตน้ำร้อน การใช้น้ำร้อนในปัจจุบัน หากเป็นอาคารพักอาศัยมักใช้ เครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า สำหรับใช้อาบ หรือซักล้างเสื้อผ้าบางชนิดเป็นต้น การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาผลิตน้ำร้อน ย่อมก่อให้เกิดประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เป็นการรักษาสภาวะแวดล้อมอีกทางหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกประกอบด้วยแผ่นปิดที่ทำจากกระจก ช่องว่างอากาศ แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ทำจากแผ่นเหล็กสังกะสีหนา 2.5 mm ด้วยสีดำ เครื่องระบายความร้อนแบบครีบริปส์เหล็ยผืนผ้า ติดตั้งอยู่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีขนาด กว้าง 1 m และ ยาว 1.5 m พื้นที่ช่องรับแสงมีขนาด 1.5 m^2 ช่องว่างอากาศมีความสูง 0.11 m แสดงดังรูปที่ 5 ในการศึกษาที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดทำความเย็น โมเดล TEC1-12708 (China) จำนวน 48 โมดูล แถวละ 12 โมดูล จำนวน 4 แถว ในแถวเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละโมดูลต่อกันแบบอนุกรม การต่อกันระหว่างแถวเป็นแบบขนาน เทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละโมดูลมีความกว้างและยาวด้านละ 4 cm เครื่องระบายความร้อนแบบแบบครีบริปส์เหล็ยผืนผ้ามีขนาด $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ทำจากทองแดง ที่ด้านล่างเชื่อมต่อทองแดงเพื่อให้ น้ำไหลผ่านแผ่นทองแดง มีปั๊มจำนวน 1 ตัวทำหน้าที่ในการหมุนเวียนน้ำในระบบ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์วางหันไปทางทิศใต้ เอียงทำมุม 16° กับแนวนอน ซึ่งเหมาะสมกับสภาพทางภูมิศาสตร์ของจังหวัดมหาสารคาม ($16^\circ 14' \text{N}$, $103^\circ 15' \text{E}$)

น้ำไหลจากถังเก็บเข้าสู่เครื่องระบายความร้อนและรับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อน้ำไหลออกจากเครื่องระบายความร้อนแล้ว จะไหลขึ้นไปด้านบนของแผ่นดูดกลืนรังสีเพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ดังนั้นน้ำที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูง จากนั้นน้ำจะไหลของไปในถังเก็บแล้วนำมาหมุนเวียนในระบบอีก จนมีอุณหภูมิ 40°C จึงนำออกจากระบบ และนำน้ำใหม่ ซึ่งเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้หมุนเวียนในระบบ เนื่องจากได้รับความร้อนจากการระบายของเทอร์โมอิเล็กทริก จากแนวความคิดนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น

ในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แสดงดังรูปที่ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ ความเข้มรังสีอาทิตย์วัดโดยใช้พารานอมิเตอร์อัตราการไหลของอากาศวัดโดยใช้ฮอทวายแอนนิโมมิเตอร์ กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าวัดโดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ได้ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 9 มิถุนายน ถึง 5 มิถุนายน

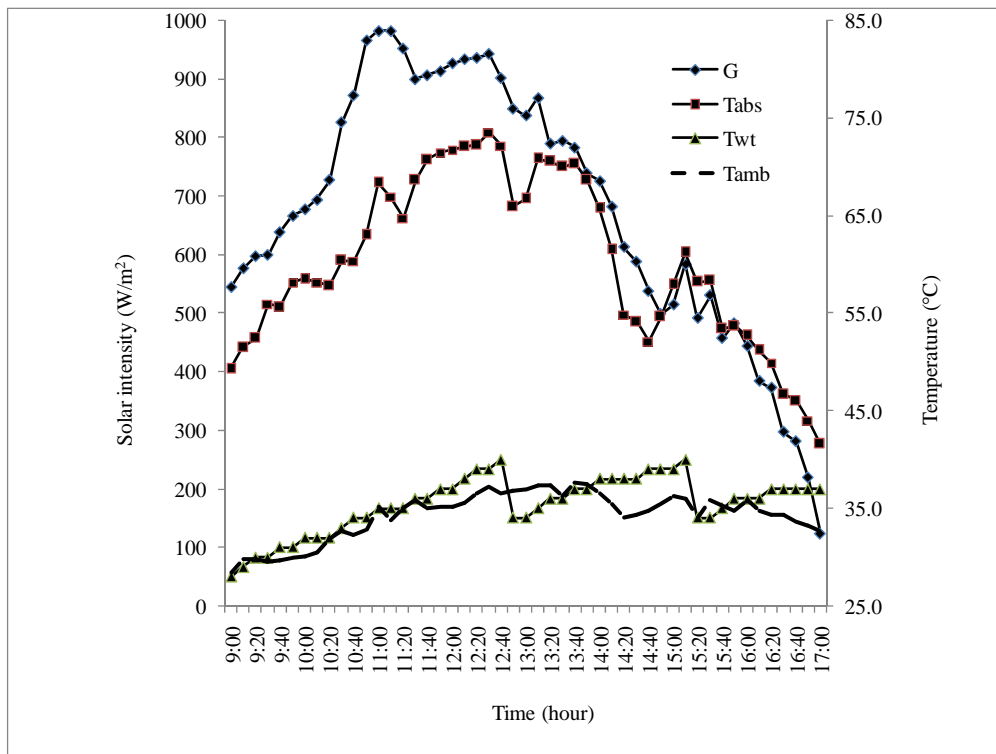


รูปที่ 5 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อนและตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

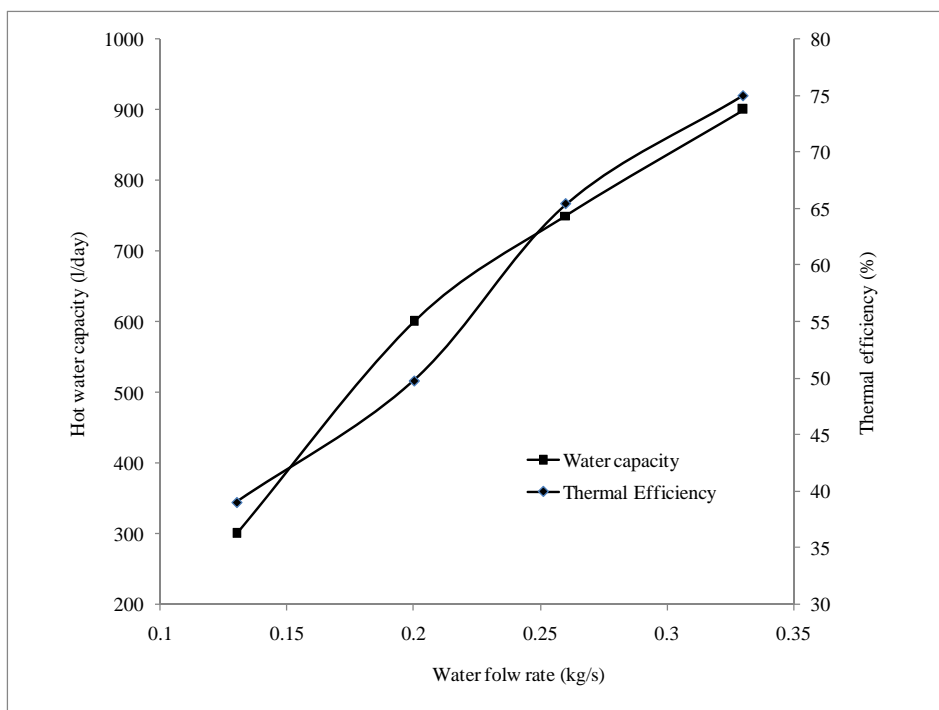
ผลการทดลอง

การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{amb}) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บ (T_{wt}) และแผ่นดูดกลืนรังสี (T_{abs}) ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.2 kg/s แสดงดังรูปที่ 6 อากาศแวดล้อมเปลี่ยนแปลงจาก 29.3 เป็น 36.9°C อุณหภูมิน้ำในถังเก็บเพิ่มขึ้นถึง 40°C จำนวน 3 ครั้ง ในช่วงเวลาทดลอง ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 750 ลิตรต่อวัน แผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 52.1 เป็น 79°C ที่เวลา 12.50 น. และความเข้มรังสีอาทิตย์ 986.3 W/m^2

ผลกระทบจากอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงดังรูปที่ 7 จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมาก เมื่ออัตราการไหลเพิ่ม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดคือ 74.9% ที่อัตราการไหล 0.33 kg/s ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ก็ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเช่นกัน เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตเพิ่มขึ้น จาก 300 ถึง 900 ลิตรต่อวัน แสดงดังรูปที่ 22

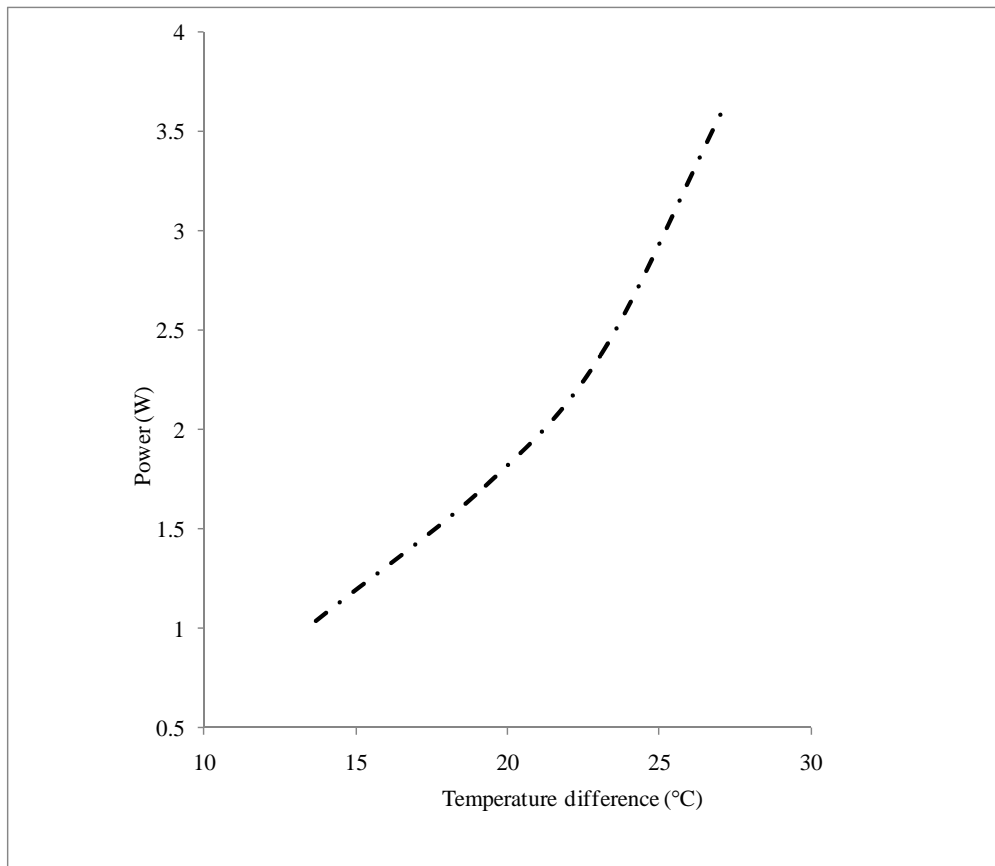


รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บ และ
อุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลา



รูปที่ 7 ผลของอัตราการไหลน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณน้ำร้อนที่
ผลิตได้

รูปที่ 8 แสดงกำลังไฟฟ้าเทียบกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟสูงสุดคือ 3.6 W ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 27.1°C แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 5.36 V และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.67 A



รูปที่ 8 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เทียบกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก สำหรับผลิตน้ำร้อนที่ทำการศึกษได้แก่การวิเคราะห์ต้นทุน การหาระยะเวลาการคืนทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน ตารางที่ 4 แสดงต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อน ต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์รวมถึงชุดระบายความร้อนด้วยน้ำเป็นเงิน 24,704 บาท ต้นทุนของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการสั่งซื้อ ในการศึกษานี้ได้ซื้อ

จำนวน 100 โมดูล ราคา 132 บาทต่อโมดูล รวมเป็นต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อนทั้งสิ้น 31,040 บาท

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

Item	Water flow rate (kg/s)			
	0.13	0.2	0.26	0.33
First cost (Baht)	31040	31040	31040	31040
Life cycle (years)	15	15	15	15
Pump power (W)	37.5	55	62	70
Electrical cost (Baht/year)	189	277	312	352
Energy saving (Baht/year)	2003.89	4095.98	5150.74	6201.78

Note: 1 USD \approx 35 Baht

อัตราผลตอบแทนภายในและระยะเวลาการคืนทุนเป็นการคำนวณหาต้นทุนที่ประหยัดได้เมื่อใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อน อัตราผลตอบแทนภายในคือ อัตราการลดลงที่ทำให้ต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อนมีค่าเท่ากับการประหยัดพลังงาน อัตราผลตอบแทนภายในคำนวณจาก

$$\text{First cost} = \text{Annual energy saving} \times \text{SPWF} (i, n) \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ } \text{SPWF} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

SPWF คือ series present worth factor

i คือดอกเบี้ย, %

n คืออายุการใช้งาน, ปี

การประหยัดพลังงานรายปี = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทำน้ำร้อน + พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จาก

เทอร์โมอิเล็กทริก – พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับปั๊มน้ำ

ระยะเวลาคืนทุนคือระยะเวลาที่มูลค่าการลงทุนเท่ากับมูลค่าการประหยัดพลังงาน

ในการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนได้ตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. ระยะเวลานำมาคำนวณใช้ 210 วันต่อปี (ไม่คิดช่วงฤดูฝน)
2. พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ย 2.5 Wh
3. อัตราดอกเบี้ย 6%
4. ราคาไฟฟ้า 3 บาทต่อ kWh

ตารางที่ 5 แสดงการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ที่การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำ 4 ค่า พบว่าอัตราการไหลของน้ำสูงสุดให้ระยะเวลาคืนทุนสั้นที่สุด และอัตราผลตอบแทนภายในสูงสุด กล่าวคือที่อัตราการไหลของน้ำ 0.33 kg/s ให้ระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน 18.52%

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์

Item	Water flow rate (kg/s)			
	0.13	0.2	0.26	0.33
Payback period (years)	45.5	10.4	7.7	6.1
IRR (%)	0	10.52	14.51	18.52

สรุป

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสำหรับผลิตน้ำร้อนสามารถผลิตไฟฟ้าได้ 3.6 W ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 27.1°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดคือ

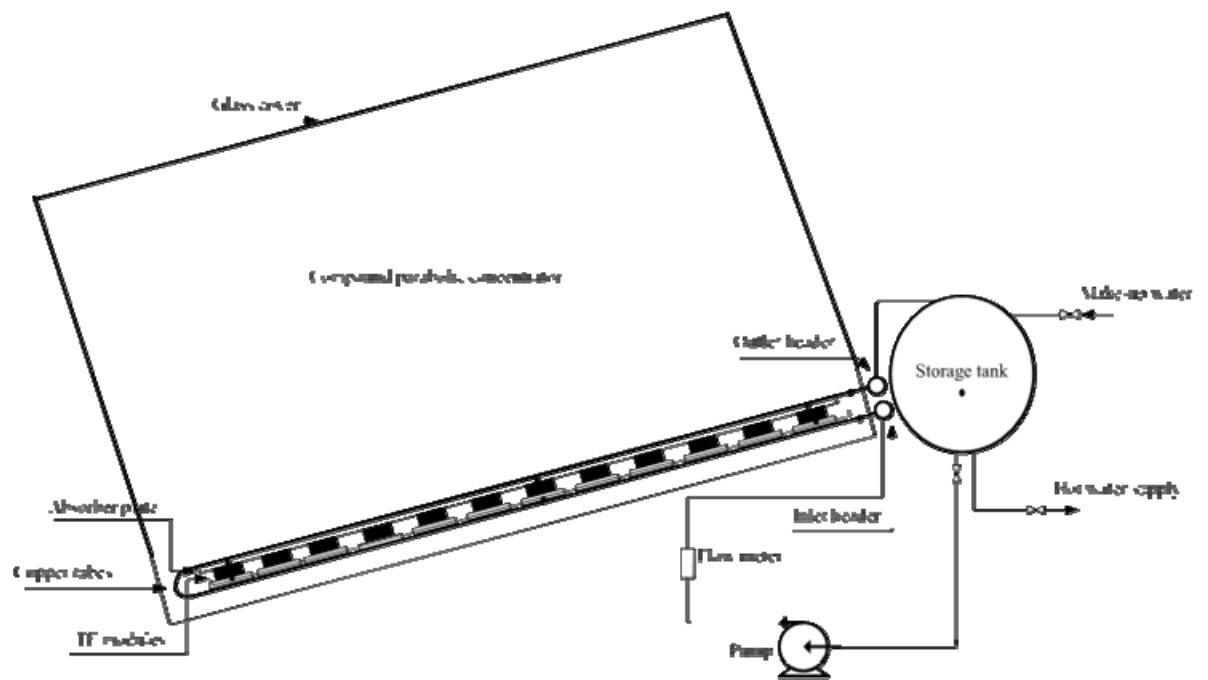
74.9% ที่อัตราการไหล 0.33 kg/s สามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C ได้ 900 ลิตรต่อวัน มีระยะเวลาคืนทุน 6.1 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน 18.52%

การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อใช้ในการผลิตน้ำร้อนและไฟฟ้านั้น ยังคงมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ หลักการหนึ่งที่น่าสนใจ คือการใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลา เพื่อช่วยรวมรังสีอาทิตย์ให้ตกลงบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้มากขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือช่วยเพิ่มความร้อนและไฟฟ้าที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกผลิตได้นั่นเอง

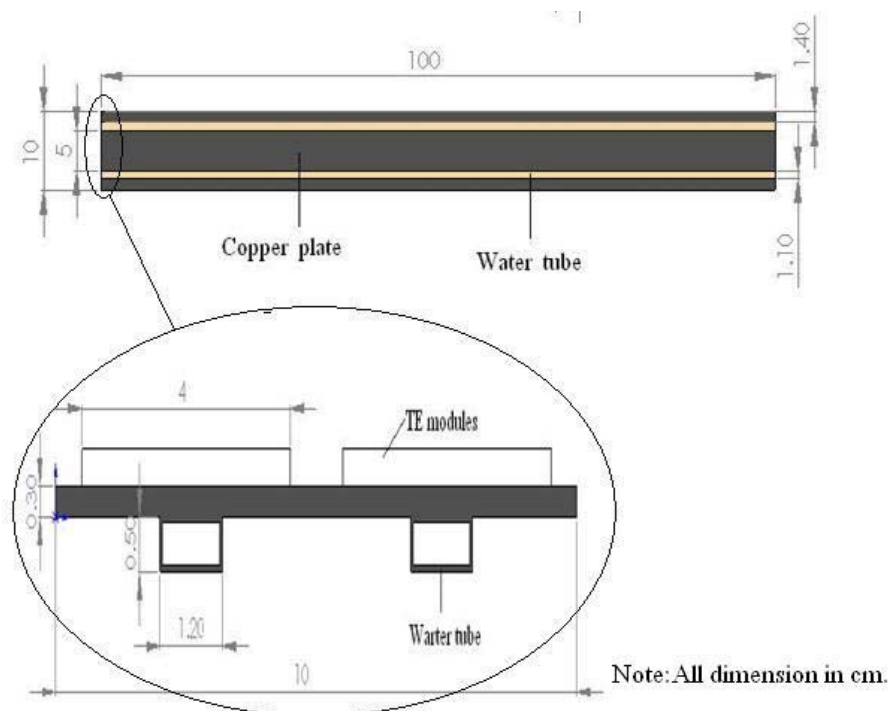
อุปกรณ์และวิธีทดลอง

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกร่วมกับตัวรวมรังสีพาราโบลา แสดงดังรูปที่ 9 ตัวรวมรังสีมีอัตราส่วนตัวรวมรังสี (Concentration ratio, CR) เท่ากับ 1.82 เป็นรูปพาราโบลา ทำจากแผ่นอลูมิเนียมฟลอยด์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสี เท่ากับ 0.86 แผ่นดูดกลืนรังสีมีความหนา 2 mm ทำจากทองแดง ทาด้วยสีดำ ในการศึกษาที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกชนิดทำความเย็นโมเดล TEC1-12708 (China) จำนวน 20 โมดูล แกวละ 10 โมดูล จำนวน 2 แถว ในแถวเทอร์โมอิเล็กทริกแต่ละโมดูลต่อกันแบบอนุกรม เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดอยู่ที่ด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกทำจากทองแดงมีขนาด กว้าง 0.1 m และยาว 1 m ติดท่อทองแดงไว้ที่ด้านล่าง เพื่อให้ น้ำระบายความร้อนไหลผ่าน แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 9 ระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกพร้อมกับตัวรวมรังสี

พาราโบลา



รูปที่ 10 การติดตั้งเทอร์โมอิเล็กทริกบนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

น้ำไหลจากถังเก็บเข้าสู่เครื่องระบายความร้อนและรับความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริก เมื่อน้ำไหลออกจากเครื่องระบายความร้อนแล้ว จะไหลขึ้นไปด้านบนของแผ่นดูดกลืนรังสีเพื่อรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ดังนั้นน้ำที่ออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูง จากนั้นน้ำจะไหลของไปในถังเก็บแล้วนำมาหมุนเวียนในระบบอีก จนมีอุณหภูมิ 40°C จึงนำออกจากระบบ และนำน้ำใหม่ ซึ่งเป็นน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำมาใช้หมุนเวียนในระบบ เนื่องจากได้รับความร้อนจากการระบายของเทอร์โมอิเล็กทริก จากแนวความคิดนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น

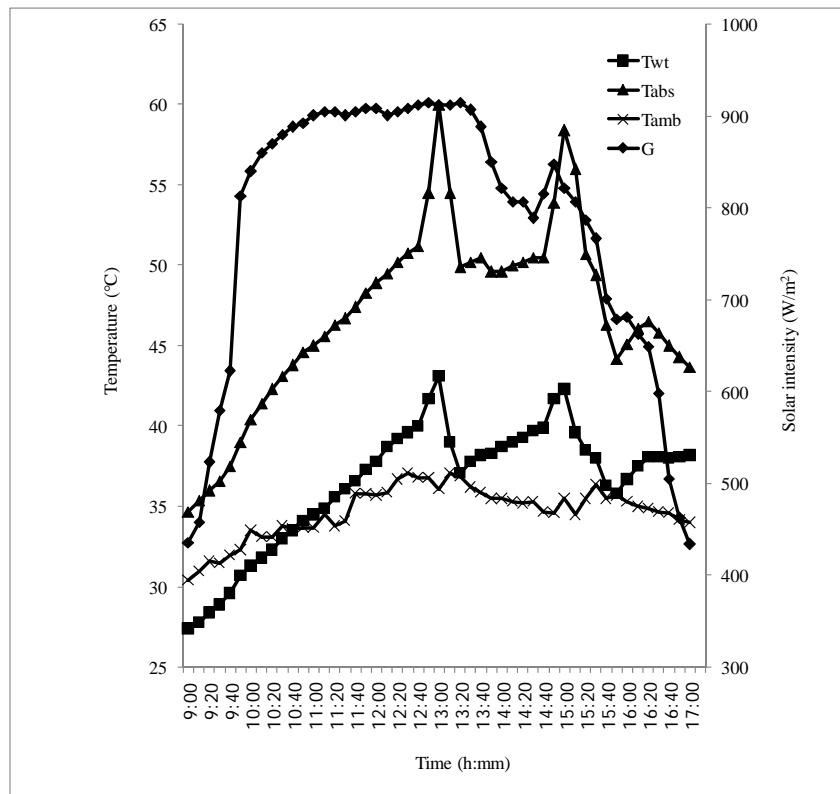
ในการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แสดงดังรูปที่ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ ความเข้มรังสีอาทิตย์วัดโดยใช้พารานอมิเตอร์อัตราการไหลของอากาศวัดโดยใช้ฮอตวายแอนนิโมมิเตอร์ กระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้าวัดโดยใช้เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า ได้ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 9 มิถุนายน ถึง 5 มิถุนายน

ผลการทดลอง

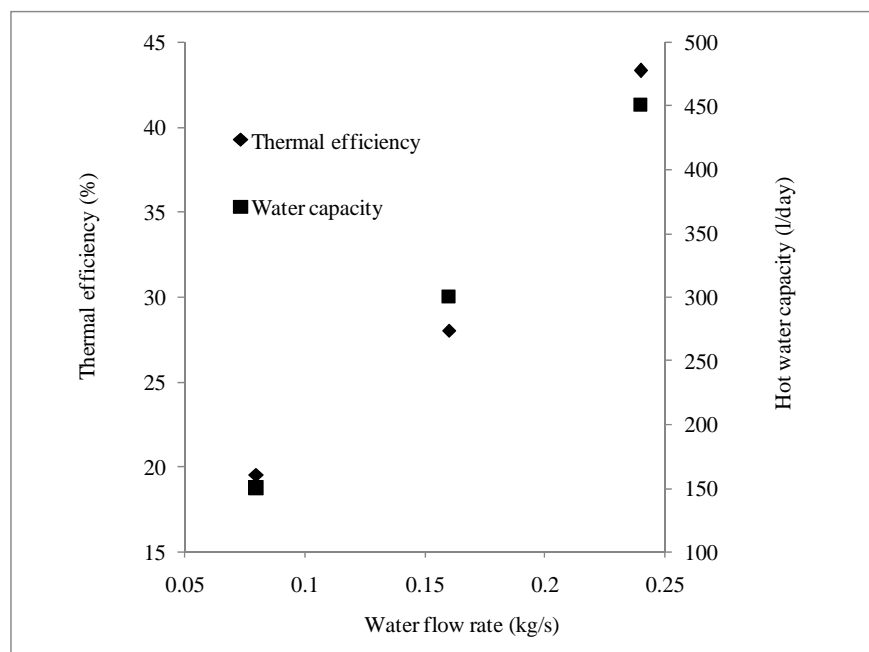
การเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีอาทิตย์ (G) อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Tamb) อุณหภูมิน้ำในถังเก็บ (Twt) และแผ่นดูดกลืนรังสี (Tabs) ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.16 kg/s แสดงดังรูปที่ 11 อุณหภูมิน้ำในถังเก็บเพิ่มขึ้นถึง 40°C จำนวน 2 ครั้งในช่วงเวลาทดลอง ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้ 750 ลิตรต่อวัน แผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 34.7 เป็น 60.5°C ที่เวลา 13.00 น. และความเข้มรังสีอาทิตย์ 912 W/m^2

ผลกระทบจากอัตราการไหลน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนแสดงดังรูปที่ 12 จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนอย่างมาก เมื่ออัตราการไหลเพิ่ม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดคือ 43.3% ที่อัตราการไหล 0.24 kg/s ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ก็ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเช่นกัน เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตเพิ่มขึ้น จาก 150 ถึง 450 ลิตรต่อวัน แสดงดังรูปที่ 12

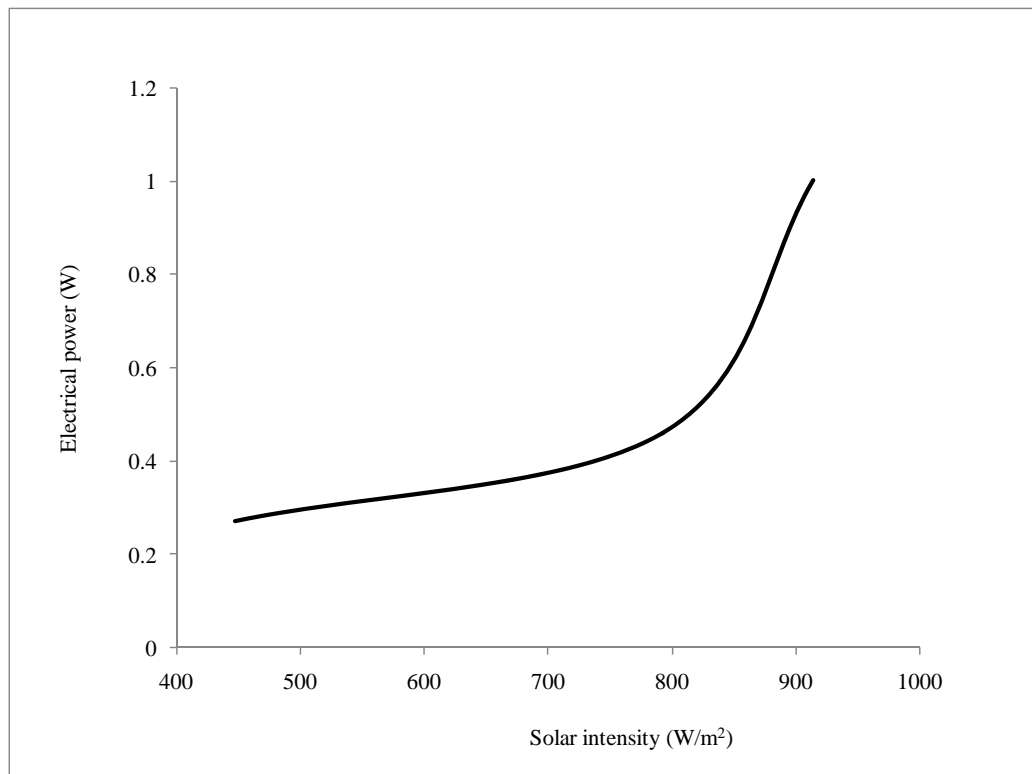
รูปที่ 13 แสดงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้กับรังสีอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้ความเข้มรังสีอาทิตย์สูง



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม อุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บ และ
อุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เทียบกับเวลา

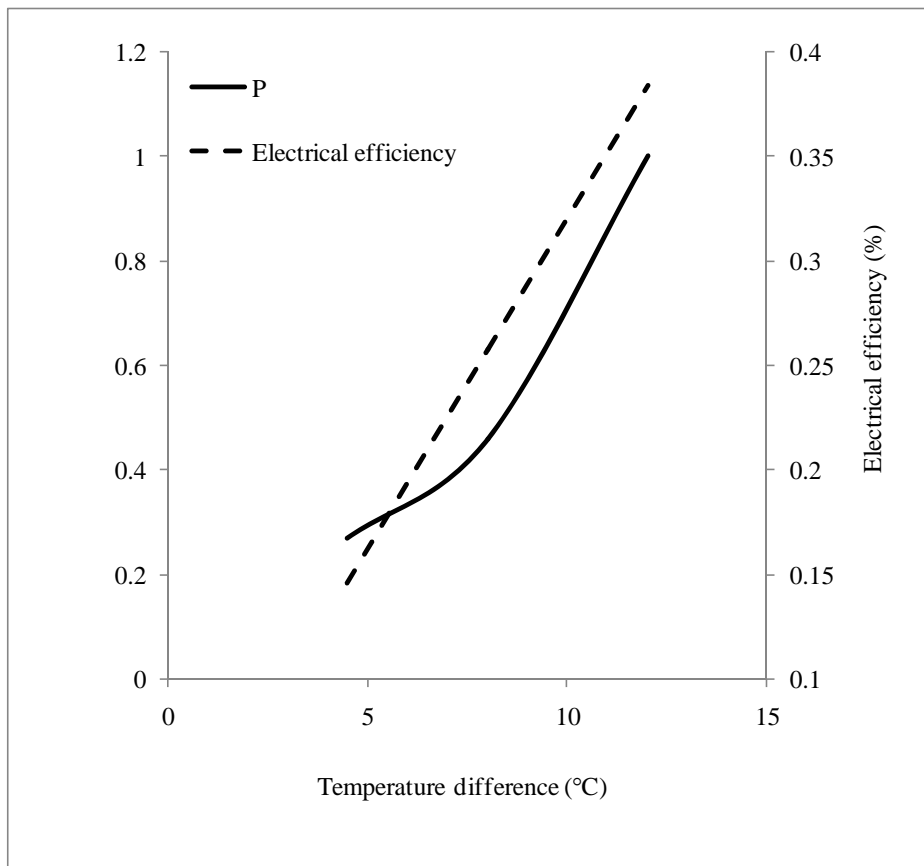


รูปที่ 12 ผลของอัตราการไหลน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณน้ำร้อนที่
ผลิตได้



รูปที่ 13 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เทียบกับรังสีอาทิตย์

รูปที่ 14 แสดงกำลังไฟฟ้าเทียบกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น ค่ากำลังไฟสูงสุดคือ 1.03 W ที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก 12°C แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 6.88 V และกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.15 A ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.38%



รูปที่ 14 กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าเทียบกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริก

สรุป

แนวความคิดการใช้ตัวรวมรังสีอาทิตย์แบบพาราโบลาพร้อมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก ได้สร้างและทดลองแล้ว พบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ได้ต่ำเนื่องจากแผ่นดูดกลืนรังสีมีขนาดเล็กเกินไป ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบผสมความร้อนไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริกสามารถผลิตน้ำร้อนที่ 40°C ได้ 450 ลิตรต่อวัน ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.24 kg/s

Output ที่ได้จากการโครงการ

- **International journals**
- **Lertsatitthanakorn, C.**, Therdyothin A. and Soponronnarit S., 2010, Performances analyses and economic evaluation of a hybrid thermoelectric solar water heater, Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part A, Journal of Power and Energy, Vol. 224, pp. 621-627. (Impact factor = 0.655)
- **Lertsatitthanakorn, C.**, Rungsiyopas M., Therdyothin A. and Soponronnarit S., 2012, Performances study of a double-pass thermoelectric solar air collector with flat-plate reflectors, Journal of Electronic Materials, inpress. (Impact factor = 1.421)
- **Lertsatitthanakorn, C.**, Khasee N. and Bubphachot B. 2012, Energy and exergy analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector, International Journal of Exergy, accepted (Impact factor = 1.088)

ภาคผนวก

Performance analyses and economic evaluation of a hybrid thermoelectric solar water heater

C Lertsatitthanakorn^{1*}, A Therdyothin², and S Soponronnarit²

¹Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khantawichai, Thailand

²School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

The manuscript was received on 21 December 2009 and was accepted after revision for publication on 26 March 2010.

DOI: 10.1243/09576509JPE944

Abstract: Performance and economic analyses of a hybrid thermoelectric (TE) solar water heater have been studied. The hybrid TE solar water heater was composed of transparent glass, air gap, an absorber plate, TE modules, water-cooled heat sinks, and storage water tank. The incident solar radiation heats up the absorber plate creating a temperature difference between the TE modules that generate a direct current. Only a small part of the absorbed solar radiation is converted to electricity, while the rest increases the temperature of the absorber plate. The water flows through each heat sink located under the TE modules to gain heat. The heated water then flows to the upper section of the absorber plate where it receives additional heating from the absorber plate. Improvements to the thermal and overall efficiency of the system can be achieved by the use of the double-pass collector system and TE technology. The experiment shows that the thermal and overall efficiencies increase as the water flowrate increases. The maximum and overall efficiencies were 74.9 per cent and 77.3 per cent, respectively, at the water flowrate of 0.33 kg/s. Meanwhile, the electrical-power output and the electrical-power generation efficiency depended on the temperature difference between the hot and cold sides of the TE modules. At a temperature difference of 27.1 °C, the unit achieved a power output of 3.6W and the electrical-power generation efficiency of 0.87 per cent. Moreover, economic analysis indicates that the payback period of the hybrid TE solar water heater operating at the water flowrate of 0.33 kg/s is shorter and yields a higher internal rate of return.

Keywords: thermal efficiency, electrical-power generation efficiency, overall efficiency, internal rate of return, payback period

1 INTRODUCTION

Direct electricity generation from solar radiation through thermoelectric (TE) is more expensive than conventional power generation. To overcome this problem, if TE modules can be combined with a solar thermal collector, the increased energy yield per unit collector area is able to shorten the economical payback period. Such TE hybrid products are considered to be more promising than the separated side-by-side installations. Research activities on TE solar collectors

and hot water systems have been ongoing for the past decades. For example, Chen [1] derived a thermodynamic analysis of solar-driven TE power generator based on a well-insulated flat plate collector. A thermodynamic model including four irreversibilities is used to investigate the optimum performance of a solar-driven TE generator. The example discussed by Chen is based on an extremely well-insulated flat plate collector, which, in practice, may be difficult to achieve. Rockendorf *et al.* [2] constructed the prototype of a solar TE water heater. The hot side of TE module was heated by solar hot water. Meanwhile, the heat was released at the cold side of the TE module via a heat sink. Three vacuum tubes with heat pipes, each with a 0.1 m² absorber area and water as the heat pipe medium, were connected via a specially designed heat exchanger to a fluid circuit acting as a heat sink. Test

*Corresponding author: Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Mahasarakham University, Khantawichai, Mahasarakham 44150, Thailand.
email: freeconvect@hotmail.com

result showed that the electrical efficiency reached a maximum value of 1.1 per cent of the incoming solar radiation, which is about 2.8 per cent of the transferred heat. Khedari *et al.* [3] investigated the performance of a hybrid domestic hot water system. The water was heated by a solar collector, then it flowed to and received heat from the hot side of TE modules, while the cold side was used to cool a room. It was found that the system can heat up 120 l of water to 50 °C within 2 h. The maximum coefficient of performance was 3.12. Lenoir *et al.* [4] presented a series of mathematical models based on the optimal control theory to assess the electric performance of a skutterudites-based solar TE generator as a function of sun-spacecraft distance, and optimized its design parameters (such as dimension, weight, and so on) when operating at a distance of 0.45 au from the sun, for 400 W electrical output power and for a required load voltage of 30 direct current voltage (VDC). The simulation results indicated that the skutterudites-based solar TE generator offered attractive performance features as a primary or an auxiliary power source for spacecraft in near-sun missions. Maneewan *et al.* [5] studied a TE roof solar collector (TE-RSC) to reduce roof heat gain and improve indoor thermal comfort. Maneewan's TE-RSC combined the advantages of a roof solar collector and TE modules to act as a power generator. The electric current produced by the TE modules was used to run a fan for cooling the modules and improve the indoor thermal conditions. The subsequent simulation results, using a real-house configuration, showed that a TE-RSC unit with a 0.0525 m² surface area could generate about 1.2 W under solar radiation intensity of about 800 W/m² and at ambient temperatures varying between 30 and 35 °C. The induced air change rate varied between 20 and 45 ACH (number of air changes per hour), and the corresponding ceiling heat flux reduction was about 3–5 W/m². The electrical conversion efficiency of the proposed TE-RSC system is 1–4 per cent. Lertsatitthanakorn *et al.* [6] investigated experimentally the thermal and electrical performances of a double-pass TE solar air collector. The

results showed that the thermal efficiency increases as the air flowrate increases. Meanwhile, the electrical-power output and the conversion efficiency depended on the temperature difference between the hot and cold sides of the TE modules. At a temperature difference of 22.8 °C, the unit achieved a power output of 2.13 W.

The aim of present investigation is to evaluate the performance and economics of a hybrid TE solar water heater. The performance and economics have been evaluated for various water flowrates under outdoor climatic conditions of Mahasarakham, Thailand.

2 EXPERIMENTAL SET-UP

The schematic view of the TE solar collector is shown in Fig. 1. The TE solar collector was composed of a glass cover, an air gap, a galvanized iron plate, and TE modules, with the hot side attached directly to the back side of the galvanized iron plate acting as an absorber and a water-cooled heat sink directly attached to the cold side of the TE modules. The space between the TE modules, absorber, and heat sink was insulated using a closed-cell elastomeric thermal insulator (thermal conductivity = 0.039 W/m K). The collector was 0.8 m wide, 1.2 m long, with an aperture area of 0.96 m². The absorbing surface of the collector was made of galvanized iron, 2.5 mm thick, painted with dull black. Forty-eight TE cooling (model TEC1-12708, China) modules made of bismuth telluride-based alloys were used. Each module had an area of 4 × 4 cm². Twelve TE modules were connected in series and arranged in four rows, and each row connected in parallel. To cool the modules, a two-stage double-pass water flow system was designed. In the first stage, water from the storage tank flows through two copper tubes to the inlet of the TE module's heat sinks. Each heat sink is a squared 0.05 m × 0.05 m copper plate onto which each TE module is mounted. In the second stage, the two copper tubes run from the outlet of the heat sinks to the surface of the absorber plate. The two copper

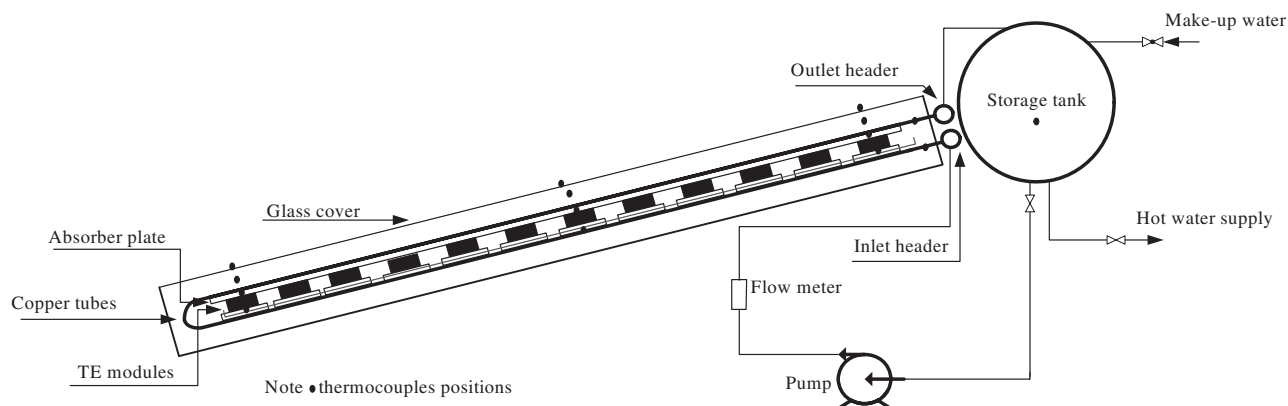


Fig. 1 A schematic diagram of the hybrid TE solar water heater

tubes are soldered to the absorber plate. A water pump was used to circulate the water from the water storage tank to the header and on through the TE solar collector. The total volume of water in the storage tank is 150 l. The collector is connected to the storage tank through the inlet tube in the lower header and the outlet tube in the upper header. Back-up water can also be introduced in the tank at the upper section. A small outlet at the bottom of the tank can be used for drainage. The collector was oriented to south and tilted so as to adjust an angle of 16° from horizontal, which was considered suitable for the geographical location of Mahasarakham, Thailand (16°14'N, 103°15'E) [7].

Water from the storage tank enters the heat sink and captures the released heat from the cold side of the TE modules. Next, it enters the front side of the absorber plate, where it is further heated by the absorber plate. The water temperature at the outlet of the collector is high because it is using the recycled water from the heat sink. This concept was to improve the thermal efficiency of the flat plate collector and obtain electrical power from the TE as well. Water at the outlet of the collector enters the storage tank and continues to feed to the heat sink until the water temperature in the tank reaches 40 °C (high water temperature has an effect on electrical-power generation by the TE modules); the pump is turned off and the water is drained out of the system. Fresh water is used to refill the tank, and then the pump is started again.

The collector was instrumented with T-type (accuracy $\pm 0.5^\circ\text{C}$) thermocouples for the glass cover, the flowing water, the water in the tank, the surface of absorber plate, and heat sink as shown in Fig. 1. The thermocouple, which measured the ambient temperature, was kept in a shelter to protect the sensor from direct sunlight. A pyranometer (Kipp & Zonen model CM 11, accuracy $\pm 10\text{ W/m}^2$) was used to measure the incident solar radiation. The water flowrate was measured by a flow meter (Nitro model Z-4003, accuracy ± 4 per cent) at the collector inlet. The output current and voltage were measured with a multi-meter (Fluke model 189, accuracy VDC ± 0.025 per cent, A (ampere) ± 0.5 per cent). The experiments were performed during March–April 2009. Experimentation started at 9 a.m. and ended at 5 p.m.

3 ANALYSIS

The thermal output Q_{th} and electrical output P of the TE solar collector are calculated from the measured data as follows

$$Q_{\text{th}} = mC_p(T_{\text{wo}} - T_{\text{wi}}) \quad (1)$$

$$P = I_{\text{mp}}V_{\text{mp}} \quad (2)$$

where C_p is the specific heat at the average water temperature, m is the water mass flowrate, and T_{wo} and T_{wi} are the water temperature at the outlet and inlet of the solar collector, respectively. I_{mp} and V_{mp} are the maximum current and maximum voltage of the TE modules at a matched load.

The performance of a TE solar collector can be described by a combination of efficiency terms. The basic ones are the thermal efficiency η_{th} and the electrical-power generation efficiency η_{e} , which are calculated based on the following definition

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{th}}}{A_a G} \quad (3)$$

where A_a is the aperture area of absorber plate and G is the incident solar intensity.

Vorobiev *et al.* [8], Peterson [9], and Miller *et al.* [10] suggested that the electrical-power generation efficiency is as follows

$$\eta_{\text{e}} = \eta_{\text{c}} \frac{M - 1}{M + (T_{\text{c}}/T_{\text{h}})} \quad (4)$$

where $M = \sqrt{1 + ZT_{\text{m}}}$ in which $T_{\text{m}} = 0.5(T_{\text{h}} + T_{\text{c}})$. T_{h} and T_{c} are the hot- and cold-side temperatures of TE module, respectively. T_{m} is the average temperature. Z is the figure of merit of the TE material ($Z = 1.6 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

Note that ZT_{m} is a characteristic parameter of the TE element and essentially governs its internal conversion efficiency. It is well known that the value of Z can have strong variations in temperature. In this study, in order to gain insight into the optimal collector operating temperatures, the value of Z is assumed to be constant. Although this may be an oversimplification of the actual situation, it provides tractable solutions for the solar collector temperature and operating efficiency of the TE element [9].

η_{c} is the Carnot efficiency

$$\eta_{\text{c}} = \frac{T_{\text{h}} - T_{\text{c}}}{T_{\text{h}}}$$

It is given that electrical energy is higher in grade than thermal energy. Therefore, Ji *et al.* [11] used the overall efficiency η_{o} for a hybrid solar system as

$$\eta_{\text{o}} = \eta_{\text{th}} + \frac{\eta_{\text{e}}}{\eta_{\text{power}}} \quad (5)$$

where η_{power} , often assigned a value of 38 per cent, is the electrical-power generation efficiency of a conventional thermal power plant.

4 RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 Thermal performance analysis

The variation of incident solar intensity (G), ambient temperature (T_{amb}), water temperature in the storage

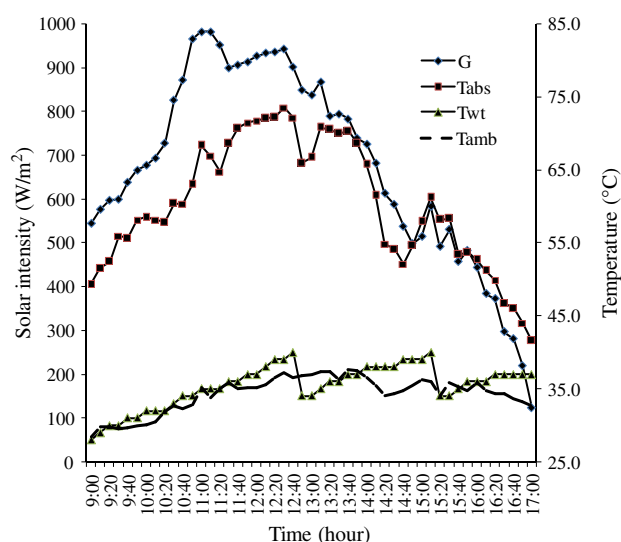


Fig. 2 Variations of incident solar radiation, ambient temperature, absorber plate temperature, and water temperature in the storage tank (water flowrate of 0.13 kg/s, 6 April 2009)

tank (T_{wt}), and the absorber plate temperature (T_{abs}) for water flowrate of 0.13 kg/s are shown in Fig. 2. The variation of ambient air temperature varied from 28.4 to 37.6 $^{\circ}\text{C}$. The water temperature in the tank reaches 40 $^{\circ}\text{C}$ two times during the tested period, which gives the hot water capacity of 300 l/day. The absorber plate temperature increases from 49.3 to 73.5 $^{\circ}\text{C}$ at 12:30 p.m. corresponding to the solar intensity of 941 W/m^2 .

The effect of increasing the water flowrate on the thermal efficiency is presented in Fig. 3. It can be seen that the thermal efficiency is strongly dependent on the water flowrate. It is due to the fact that as mass flowrate increases, the withdrawal of heat also increases, which causes the increase in thermal

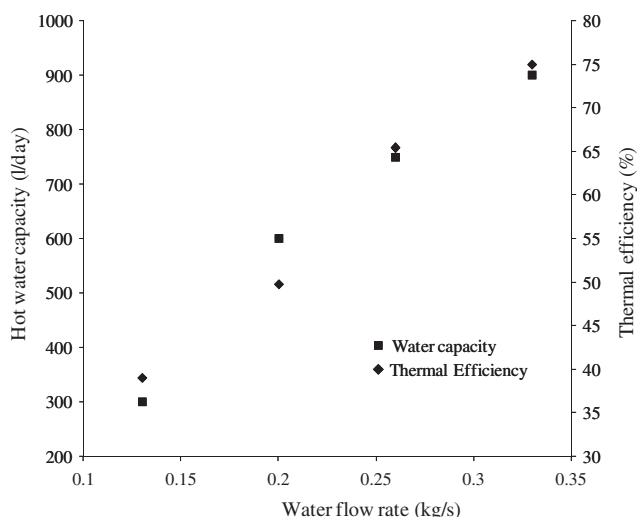


Fig. 3 Effect of water flowrate on maximum thermal efficiency and hot water capacity

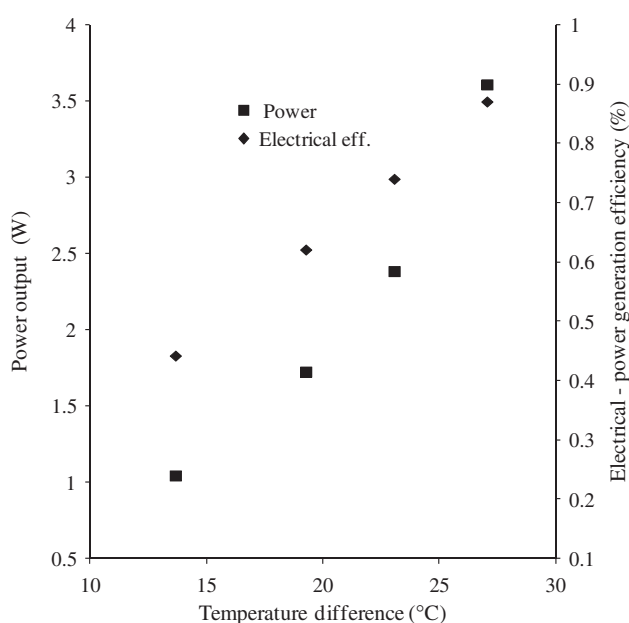


Fig. 4 Variations of power output and electrical-power generation efficiency with temperature difference

efficiency [12]. The maximum thermal efficiency was 74.9 per cent corresponding to the water flowrate of 0.33 kg/s. Consequently, the hot water capacity increases as the water flowrate increases and varies between 300 and 900 l/day, as also shown in Fig. 3.

4.2 Electrical and overall performance analyses

Figure 4 presents the output power and the electrical-power generation efficiency as a function of temperature difference between the hot and cold sides of the TE modules. It is apparent that the power and efficiency continued to increase as the temperature difference increased. The maximum power and electrical-power generation efficiency are 3.6 W and 0.87 per cent, respectively, at a temperature difference of 27.1 $^{\circ}\text{C}$. The open-circuit voltage and short-circuit current are 5.36 V and 0.67 A, respectively. Figure 5 illustrates the variation of power output and solar intensity. The hybrid TE solar water heater generation of electricity increased rapidly. As mentioned above, this is due to the rapid increase of temperature difference between the hot and cold sides. The effect of water flowrate on the overall efficiency is presented in Figure 6. It can be observed that the overall efficiency increases as the water flowrate increases. Overall and thermal efficiencies are similar, as shown in Figs 3 and 6. The maximum overall efficiency is 77.3 per cent at the water flowrate of 0.33 kg/s. The overall efficiency is slightly higher than the thermal efficiency because about 40–75 per cent of the energy available from the solar TE collector is converted to thermal energy, and less than 1 per cent to electrical energy.

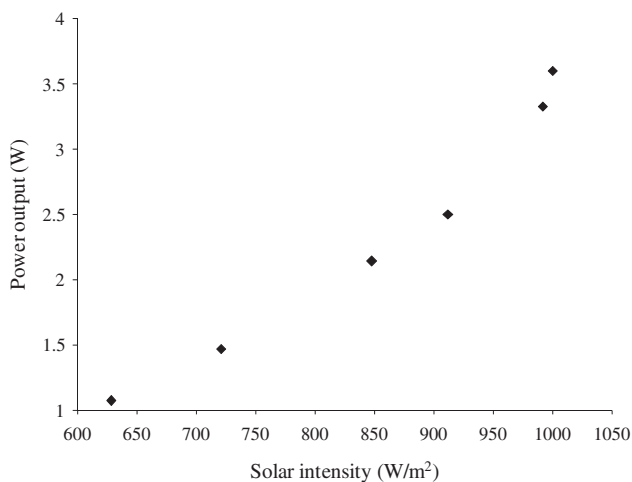


Fig. 5 Variation of power output with solar intensity difference

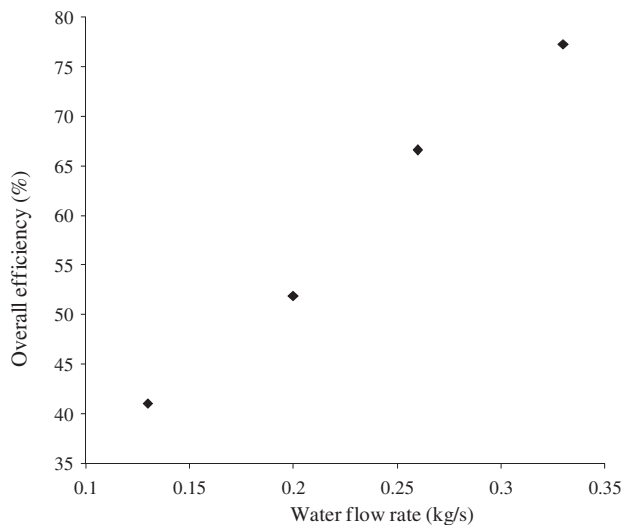


Fig. 6 Effect of water flowrate on overall efficiency

Therefore, the electrical gains are much smaller than the thermal gains.

4.3 Economic evaluation

In this section, cost analysis of the TE solar water heater is evaluated and payback period and internal rate of return (IRR) are employed to assess the electrical energy savings using the TE solar water heater. Table 1 shows the cost analysis of the TE solar water heater at various water flowrates. The costs of the solar water heater including the water-cooled heat sink were 24 704 Baht. The cost of TE modules depends on ordered volume. In this study, 100 TE modules were ordered; the price of TE modules was 132 Baht per module. Therefore, the cost of the TE solar water heater was 31 040 Baht.

IRR and payback period are employed to determine the cost saving by using the TE solar water heater. The

Table 1 Conditions for economic evaluation

Item	Water flowrate (kg/s)			
	0.13	0.2	0.26	0.33
First cost (Baht)	31 040	31 040	31 040	31 040
Life cycle (years)	15	15	15	15
Pump power (W)	37.5	55	62	70
Electrical cost (Baht/year)	189	277	312	352
Energy saving (Baht/year)	2003.89	4095.98	5150.74	6201.78

1 USD \approx 33.5 Baht.

IRR is defined as the discount rate that makes the cost of the TE solar water heater equal to the saving. The IRR is then evaluated as follows [13]

$$\text{First cost} = \text{Annual energy saving} \times \text{SPWF}(i, n) \quad (6)$$

where

$$\text{SPWF} = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

SPWF is called series present worth factor, n is the useful life, and i is the discount rate, which is the IRR.

Annual energy saving

= electrical energy for heated water

+ electrical energy produced by the TE

– electrical energy consumed by the pump

The payback period is defined as the investment of time required for a saving of an investment to equal the cost of the TE solar water heater.

In general, three different seasons in Thailand can be recognized as follows: the summer season is about 4 months long, from February to May; the rainy season occurs from June to October; and the winter season occurs from November to January [14]. Therefore, it is assumed that the TE solar water heater is operated during summer and winter seasons; the operating time was 8 h a day and 210 days a year. It was assumed that the average electrical energy produced by the TE solar water heater is 2.5 Wh. During 2009, the interest rate of the Thai bank was approximately 6 per cent and the average electrical cost was 3 Baht/kWh. Table 2 shows

Table 2 Economic evaluation of the TE solar water heater

Item	Water flowrate (kg/s)			
	0.13	0.2	0.26	0.33
Payback period (years)	45.5	10.4	7.7	6.1
IRR (%)	0	10.52	14.51	18.52

an economic evaluation of the TE solar water heater at various water flowrates. It is noted that for the higher water flowrate there is a faster payback period and higher IRR. It could be found that the payback period and IRR based on the water flowrate of 0.33 kg/s are 6.1 years and 18.52 per cent, respectively. Therefore, higher water flowrate, higher potential to use the TE solar water heater is obtained.

5 CONCLUSIONS

From this work, it could be concluded as follows.

1. There is a high potential for using the TE solar water heater. It was found that the TE solar water heater generates electrical power of 3.6W at a temperature difference of 27.1 °C. This generated power is enough to run a small radio or a low-power incandescent light bulb. The maximum thermal and overall efficiencies were 74.9 per cent and 77.3 per cent, respectively, at the water flowrate of 0.33 kg/s.
2. The thermal and overall efficiencies increase with increasing water flowrate.
3. The unit can produce the maximum hot water capacity of 900l/day at the hot water temperature of 40 °C and the water flowrate of 0.33 kg/s.
4. The higher water flowrate results in a faster payback period and higher IRR. At the highest water flowrate used in this study (0.33 kg/s) the payback period and the IRR of the TE solar water heater is 6.1 years and 18.52 per cent, respectively.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provided by the Thailand Research Fund (TRF), Mahasarakham University, and the Commission on Higher Education of the Ministry of Education. Experimental help by Wichapon Saenwang, Supanee Wongprajun, Phuwanat Roopngam, and Ruttapon Wandee is highly appreciated.

© Authors 2010

REFERENCES

- 1 **Chen, J.** Thermodynamic analysis of a solar-driven thermoelectric generator. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**, 2717–2721.
- 2 **Rockendorf, G., Sillmann, R., Podlowski, L., and Litzenburger, B.** PV-hybrid and thermoelectric collectors. *Sol. Energy*, 1999, **67**, 227–237.
- 3 **Khedari, J., Maneewan, S., Pratinthong, N., Chimchavee, W., and Hirrunlabh, J.** Domestic hot water system combining solar and waste heat from thermoelectric air-conditioner. *Int. J. Ambient Energy*, 2001, **22**, 19–28.

- 4 **Lenoir, B., Dauscher, A., Poinas, P., Scherrer, H., and Vikhor, L.** Electrical performance of skutterudites solar thermoelectric generators. *Appl. Therm. Eng.*, 2003, **23**, 1407–1415.
- 5 **Maneewan, S., Khedari, J., Zeghmatti, B., Hirrunlabh, J., and Eakburanawat, J.** Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. *Renew. Energy*, 2004, **29**, 743–752.
- 6 **Lertsatitthanakorn, C., Khasee, N., Atthajariyakul, S., Soponronnarit, S., Therdyothin, A., and Suzuki, R. O.** Performance analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2008, **92**, 1105–1109.
- 7 **Pattanasethanon, S., Lertsatitthanakorn, C., Atthajariyakul, S., and Soponronnarit, S.** An accuracy assessment of an empirical sine model, a novel sine model and an artificial neural network model for forecasting illuminance/irradiance on horizontal plane of all sky types at Mahasarakham, Thailand. *Energy Convers. Manage.*, 2008, **49**, 1999–2005.
- 8 **Vorobiev, Y., Gonzalez-Hernandez, J., Vorobiev, P., and Bulat, L.** Thermal- photovoltaic solar hybrid system for efficiency solar energy conversion. *Sol. Energy*, 2006, **80**, 170–176.
- 9 **Peterson, B. R.** The maximum power operating point for a combustion-driven thermoelectric converter with heat recirculation. *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 2007, **129**, 1106–1113.
- 10 **Miller, W. E., Hendricks, J. T., and Peterson, B. R.** Modeling energy recovery using thermoelectric conversion integrated with an organic Rankine bottoming cycle. *J. Electron. Mater.*, 2009, **38**, 1206–1213.
- 11 **Ji, J., Lu, J. P., Chow, T. T., He, W., and Pei, G.** A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Appl. Energy*, 2007, **84**, 222–237.
- 12 **Tiwari, A. and Sodha, M. S.** Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: experimental validation of theoretical model. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2007, **91**, 17–28.
- 13 **Blank, L. T. and Tarquin, A. J.** *Engineering economy*, 4th edition, 1998 (McGraw-Hill Companies, Inc., Singapore).
- 14 **Khedari, J., Sangprajak, A., and Hirunlabh, J.** Thailand climatic zones. *Renew. Energy*, 2002, **25**, 267–280.

APPENDIX

Notations

A_a	aperture area of absorber plate (m ²)
C_p	specific heat at the average water temperature (J/kg °C)
G	incident solar intensity (W/m ²)
i	discount rate (dimensionless)
I_{mp}	maximum current of the TE modules at a matched load (A)
m	water mass flowrate (kg/s)
n	useful life (years)
P	electrical output (W)

Q_{th}	thermal output (W)	V_{mp}	maximum voltage of the TE modules at a matched load (V)
SPWF	series present worth factor (dimensionless)		
T_c	cold-side temperature of TE module (°C)	η_c	Carnot efficiency (dimensionless)
T_h	hot-side temperature of TE module (°C)	η_e	electrical-power generation efficiency (per cent)
T_m	average temperature between hot and cold side of TE module (°C)	η_o	overall efficiency (per cent)
T_{wi}	water temperature at the inlet of the solar collector (°C)	η_{power}	electrical-power generation efficiency of a conventional thermal power plant (per cent)
T_{wo}	water temperature at the outlet of the solar collector (°C)	η_{th}	thermal efficiency (per cent)

Performance Study of a Double-Pass Thermoelectric Solar Air Collector with Flat-Plate Reflectors

**C. Lertsatitthanakorn, M. Rungsiyopas,
A. Therdyothin & S. Saponronnarit**

Journal of Electronic Materials

ISSN 0361-5235

Journal of Elec Materi

DOI 10.1007/s11664-011-1838-z



Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by TMS. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your work, please use the accepted author's version for posting to your own website or your institution's repository. You may further deposit the accepted author's version on a funder's repository at a funder's request, provided it is not made publicly available until 12 months after publication.

Performance Study of a Double-Pass Thermoelectric Solar Air Collector with Flat-Plate Reflectors

C. LERTSATITTHANAKORN,^{1,4} M. RUNGSIYOPAS,² A. THERDYOTHIN,³
and S. SOPONRONNARIT³

1.—Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khantawichai, Mahasarakham 44150, Thailand. 2.—Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Burapha University, 169 Long-Hard Bangsaen Road, Saensuk, Muang, Chonburi 20131, Thailand. 3.—School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140, Thailand. 4.—e-mail: freeconvect@hotmail.com

In this paper the results of the influence of flat-plate reflectors made of aluminum foil on the performance of a double-pass thermoelectric (TE) solar air collector are presented. The proposed TE solar collector with reflectors was composed of transparent glass, an air gap, an absorber plate, TE modules, a rectangular fin heat sink, and two flat-plate reflectors. The flat-plate reflectors were placed on two sides of the TE solar collector (east and west directions). The TE solar collector was installed on a one-axis sun-tracking system to obtain high solar radiation. Direct and reflected incident solar radiation heats up the absorber plate so that a temperature difference is created across the TE modules to generate a direct current. Only a small part of the absorbed solar radiation is converted to electricity, while the rest increases the temperature of the absorber plate. Ambient air flows through the heat sink located in the lower channel to gain heat. The heated air then flows to the upper channel, where it receives additional heating from the absorber plate. Improvements to the thermal energy and electrical power outputs of the system can be achieved by the use of the double-pass collector system with reflectors and TE technology. It was found that the optimum position of the reflectors is 60°, which gave significantly higher thermal energy and electrical power outputs compared with the TE solar collector without reflectors.

Key words: Electrical power, thermal energy, solar radiation, optimum position of reflectors

INTRODUCTION

Solar energy absorbed by a solar collector can be used for several applications, including heating and ventilation, drying, refrigeration, power generation, etc. Compared with other forms of energy, solar energy is renewable and environmentally friendly.¹ Generally, there are two ways of converting solar energy directly to electrical energy through the use of energy materials: photovoltaic (PV) technology and thermoelectric (TE) technology. The former has been put into wide use, while the latter remains a challenging research topic for scientists. TE generators

convert thermal energy directly to electrical power via the Seebeck effect; that is, when a temperature difference is created across a TE device and an external load is properly connected, a direct-current (DC) voltage develops in the TE elements and electrical current flows through the load. TE generators offer a number of advantages over standard DC power sources such as batteries and rotating machines; they are relatively silent in operation, highly reliable, environmentally friendly, and maintenance free. TE generators share the major characteristics of PV systems, their advantages being the possibility of generating electricity continually while providing heat and operating at significantly reduced cost. A number of simulations as

(Received June 15, 2011; accepted November 29, 2011)

well as experimental studies have been reported on solar-driven TE power generators. Chen² derived a thermodynamic analysis of a solar-driven TE power generator based on a well-insulated flat-plate collector. A thermodynamic model including four irreversibilities was used to investigate the optimum performance of a solar-driven TE generator. The example discussed by Chen is based on an extremely well-insulated flat-plate collector, which, in practice, may be difficult to achieve. Gunter³ constructed a prototype solar TE water heater. The hot side of the TE module was heated by solar hot water. Meanwhile, heat was released at the cold side of the TE module to a heat sink. Three vacuum tubes with heat pipes, each with 0.1 m^2 absorber area and using water as the heat pipe medium, were connected via a specially designed heat exchanger to a fluid circuit acting as a heat sink. Test results showed that the electrical efficiency reached a maximum value of 1.1% of incoming solar radiation, corresponding to approximately 2.8% of transferred heat. Scherrer et al.⁴ presented a series of mathematical models based on optimal control theory to assess the electric performance of a skutterudite-based solar TE generator as a function of sun-spacecraft distance, and optimized its design parameters (such as dimensions, weight, etc.) when operating at a distance of 0.45 a.u. from the sun, for 400 W electrical output power and required load voltage of 30 VCD. The simulation results indicated that the skutterudite-based solar TE generator offered attractive performance features as a primary or auxiliary power source for spacecraft in near-sun missions. Maneewan et al.⁵ studied a TE roof solar collector (TE-RSC) to reduce roof heat gain and improve indoor thermal comfort. Maneewan's TE-RSC combined the advantages of a roof solar collector and a TE to act as a power generator. The electric current produced by the TE modules was used to run a fan to cool the modules and improve the indoor thermal conditions. Subsequent simulation results, using a real house configuration, showed that a TE-RSC unit with 0.0525 m^2 surface area could generate about 1.2 W under solar radiation intensity of about 800 W/m^2 at ambient temperatures varying between 30°C and 35°C . The induced air change rate varied between 20 and 45 air changes per hour (ACH), and the corresponding ceiling heat transfer rate reduction was about 3 W/m^2 to 5 W/m^2 . The electrical conversion efficiency of the proposed TE-RSC system is 1% to 4%. Kraemer et al.⁶ presented a high-performance flat-panel solar TE generator by using high thermal concentration (the area of the absorber plate divided by the cross-sectional area of the TE elements). Its efficiency was 7 to 8 times higher than a conventional solar TE generator. From literature reviews, solar TE generators can convert a few percent of all incoming solar radiation into electricity.^{3,5} More than 90% of solar radiation incident on a TE is reflected or converted into thermal energy. To

increase the electrical and thermal output of TE solar collectors, reflectors are used to concentrate solar radiation onto the surface of the collector; for example, Kostic et al.⁷ studied a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with reflectors to increase the electrical and thermal output of the PV/T collector. For the optimal position of the reflectors, the PV/T with reflectors generated about 8% more electrical power and 25% more thermal energy than the PV/T without reflectors. In the present paper, the influence of the position of the reflectors on the thermal energy and electrical power of a TE solar collector is investigated.

SYSTEM DESCRIPTION AND EXPERIMENTAL PROCEDURES

To investigate and compare the performance of the TE solar collector, two identical TE solar collectors were built. One was mounted on a base with fixed position, whereas the other was integrated with flat-plate reflectors (east and west directions) and mounted on a one-axis tracking base. A schematic view of the TE solar collector with reflectors is shown in Fig. 1. The TE solar collector was composed of a glass cover, an air gap, a galvanized iron plate, and the TE modules. The hot side of the TE modules was attached directly to the back side of the galvanized iron plate, which acted as an absorber. A rectangular fin heat sink was directly attached to the cold side of the TE modules. The space between the TE modules, absorber, and heat sink was insulated using a closed-cell elastomeric thermal insulator (thermal conductivity 0.039 W/mK). The collector was 1 m wide and 1.5 m long, with aperture area of 1.5 m^2 . It had a 0.11 m flow duct height (air gap), leading to a flow area of 0.11 m^2 . The absorbing surface in the collector was made of 2.5-mm-thick galvanized iron, painted dull black. Twenty-four TE cooling modules (model TEC1-12708; Thermonamic Electronics, China) made of bismuth telluride-based alloys were used. Each module had area of $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$. The TE modules were connected in series and arranged in four rows of six TE modules each. The rectangular fin heat sink on the cold side was made of aluminum. The fins were 4.5 mm thick and 120 mm long in the horizontal direction, with height of 40 mm from the base and fin spacing of 7 mm. The heat sink had thermal resistance of 0.112°C/W (conduction and convection resistance). The method of calculating the thermal resistance of the heat sink can be found in Cengel.⁸ Hence, the heat sink can be designed on the basis of the heat sink technology available in the local market. A centrifugal blower was used to circulate air through the rectangular fin heat sink and the collector. In this study, the air mass flow rate was fixed at 0.08 kg/s , consuming electrical power of 88.5 W. The collector was oriented to the south and tilted to an angle of 16° from the horizontal, which was considered suitable for

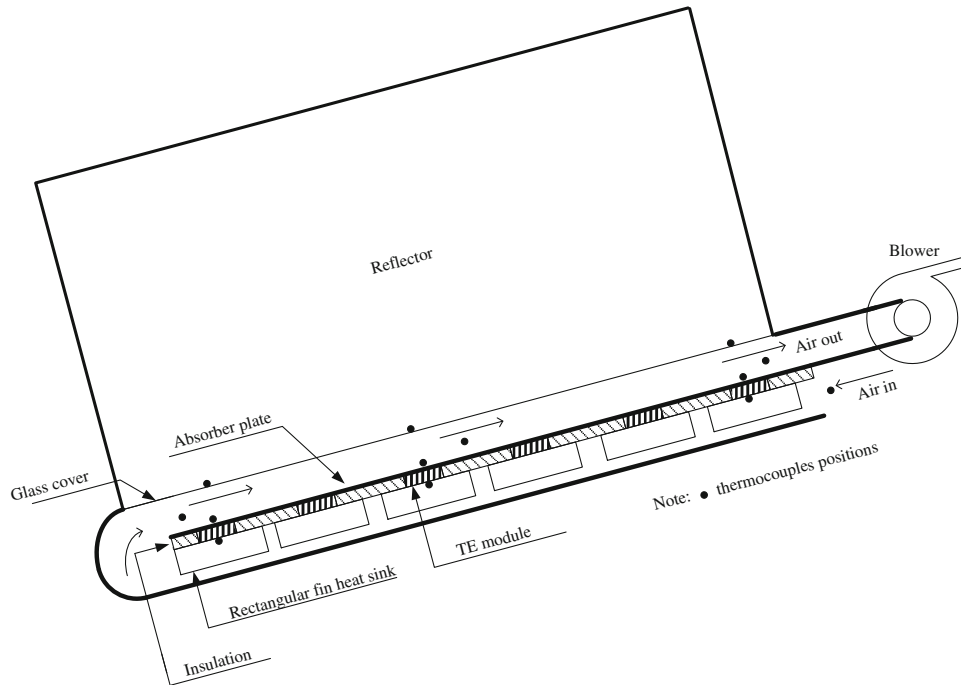


Fig. 1. Schematic diagram of the TE solar collector with reflectors.

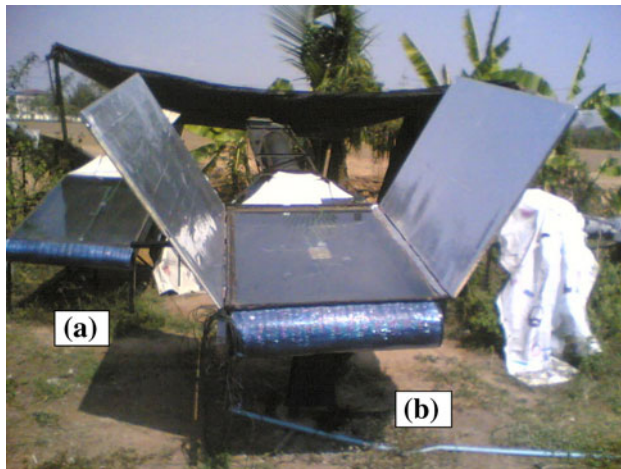


Fig. 2. TE solar collector (a) without and (b) with reflectors.

the geographical location of Mahasarakham, Thailand ($16^{\circ}14'N$, $103^{\circ}15'E$).⁹ A pictorial view of (a) the TE solar collector without reflectors and (b) the TE solar collector with reflectors used in this study is shown in Fig. 2. For the TE solar collector with reflectors and mounted on the one-axis tracking base, two aluminum foil reflectors with dimensions of $1.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ were mounted on the TE solar collector with changeable position (θ) in relation to the TE solar collector. Sun tracking was done manually. Kiatgamochai and Chamni¹⁰ suggested that the reflector angle should be more than 45° . To determine the optimum reflector angle, the reflector angle was varied from 55° to 70° .

Ambient air enters the lower channel and captures heat released from the heat sink located at the

cold side of the TE modules. Next it enters the upper channel, where it is further heated by the absorber plate. The air temperature at the outlet of the collector is high because it uses air recycled from the lower channel. However, the temperature of the TE solar collector should be highest for increasing both the thermal energy and electrical power output. Therefore, the reflectors were used to concentrate solar radiation onto the TE solar collector.

The collector was instrumented with T-type thermocouples (accuracy $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) for the glass cover, the flowing air, the absorber plate surface, and the heat sink as shown in Fig. 1. The thermocouple that measured the ambient temperature was kept in a shelter to protect the sensor from direct sunlight. Two pyranometers (Kipp & Zonen model CM 11, accuracy $\pm 10\text{ W/m}^2$) were used to measure the solar radiation incident on the fixed and tracking systems. The air flow rate was calculated from the air velocity, measured by a hot-wire anemometer (Testo model 445, accuracy $\pm 0.03\text{ m/s}$) at the collector outlet and the known duct area. The output current and voltage were measured with a multimeter (Fluke model 189, accuracy $\text{VDC} \pm 0.025\%$, $A \pm 0.5\%$). Experimentation started at 9 a.m. and ended at 4 p.m.

CALCULATION METHODS

The thermal energy (Q_t) generated by the TE solar collector was calculated as

$$Q_t = mC_p(T_{\text{aco}} - T_{\text{amb}}), \quad (1)$$

where C_p is the specific heat at the average air temperature, m is the air mass flow rate, and T_{aco}

and T_{amb} are the air temperatures at the collector outlet and in ambient, respectively.

The electrical output of the TE solar collector (P) was calculated from the measured data as

$$P = I_{\text{mp}} \cdot V_{\text{mp}}, \quad (2)$$

where I_{mp} is the maximum current of the TE modules at matched load and V_{mp} is the maximum voltage of the TE modules at matched load.

The thermal efficiency of the TE solar collector was calculated from the relation

$$\eta_t = \frac{Q_t}{A_a G}, \quad (3)$$

where A_a is the absorber plate aperture area and G is the incident solar radiation.

Vorobiev et al.,¹¹ Peterson,¹² and Miller et al.¹³ suggested that the conversion efficiency is

$$\eta_e = \eta_c \frac{M - 1}{M + \frac{T_c}{T_h}}, \quad (4)$$

where $M = \sqrt{1 + ZT_m}$, in which $T_m = 0.5(T_h + T_c)$; T_h and T_c are the hot- and cold-side temperatures of the TE module, respectively; T_m is the average temperature; Z is the figure of merit of the TE material ($Z = 1.6 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$).¹³

Note that ZT_m is a characteristic parameter of the TE element and essentially governs its internal conversion efficiency. It is well known that the value of Z can vary strongly with temperature. In this study, to gain insight into the optimal collector operating temperatures, the value of Z was assumed to be constant. Although this may be an oversimplification of the actual situation, it provides tractable solutions for the solar collector temperature and operating efficiency of the TE element.¹²

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h},$$

where η_c is the Carnot efficiency.

It is a given that electrical energy is higher in grade than thermal energy. Therefore, Ji et al.¹⁴ used the overall efficiency η_o for a hybrid solar system as

$$\eta_o = \eta_t + \eta_e / \eta_{\text{power}}, \quad (5)$$

where η_{power} , often assigned a value of 38%, is the electrical power generation efficiency of a conventional thermal power plant.

RESULTS AND DISCUSSION

Testing of the performance of the TE solar collector with and without reflectors was performed during December 2009 and January 2010. Data reported here were selected for days with relatively

similar ambient conditions that permitted us to make a subjective comparison.

Effect of Reflector Angle on Solar Radiation Intensity, Thermal Energy, and Electrical Power Output

In this study, the reflector angle was adjusted manually to four positions (θ), namely 55° , 60° , 65° , and 70° from the horizontal plane. Results for the total solar radiation intensity on the TE solar collector surface measured during the sun peak depending on the position of the reflectors are shown in Fig. 3. Based on the measurement results, the optimum position of the reflectors was 60° , giving solar intensity of 1850 W/m^2 . However, all positions of the reflectors in this study gave solar intensity higher than that of the collector without reflectors. The relative increase in solar radiation intensity generated by the TE solar collector with the reflectors in optimal position in relation to the TE solar collector without reflectors for this day was approximately 1.7, as shown in Fig. 4.

The thermal energy and electrical power output of the TE solar collector with and without reflectors are presented in Table 1. Both thermal energy and electrical power output reached their highest values for the optimum reflector angle of 60° . The maximum power was 3.68 W for temperature difference of 41°C . The open-circuit voltage and short-circuit current were 13.53 V and 272 mA, respectively. The maximum power at reflector angle of 60° was higher than that without reflectors by 150%. The power was proportional to the product of the square of the temperature difference and the square of the Seebeck coefficient, and here as the temperature difference increased, this term primarily determined the power output. The maximum thermal energy was 2081.2 W, which was higher than operating without reflectors by about 72.6%.

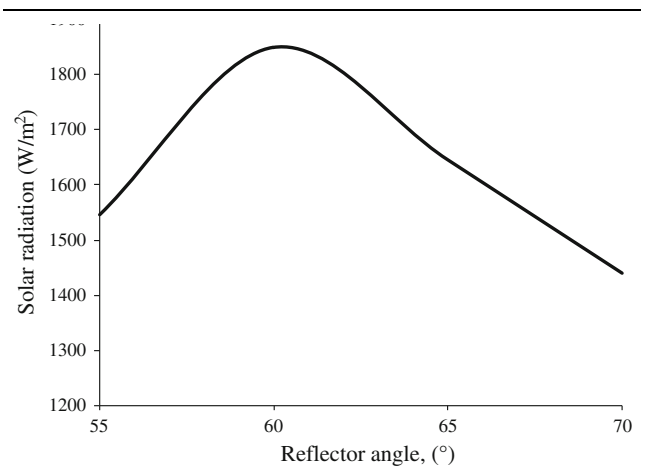


Fig. 3. Change in solar radiation depending on the position of the reflectors.

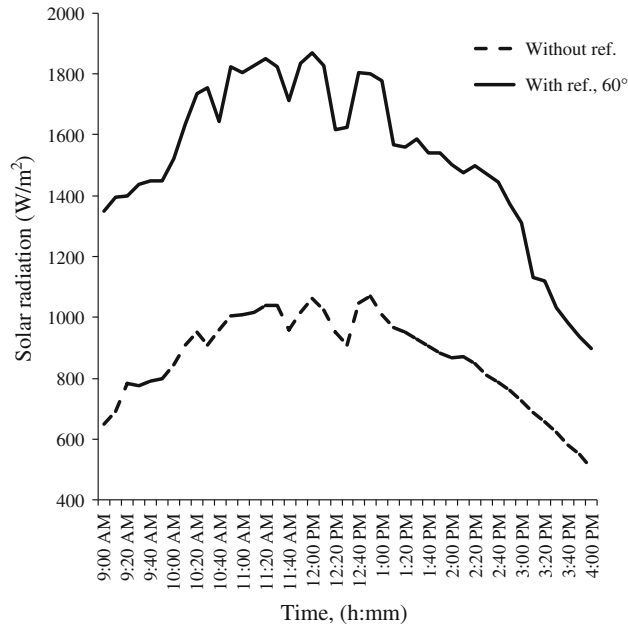


Fig. 4. Change in solar radiation during the day: without reflectors, and with reflectors in optimal position.

Table 1. Thermal energy, electrical power, and temperature difference between the hot and cold sides of the TE modules of the TE solar collector with and without reflectors

θ (°)	Q_t (W)	P (W)	$T_h - T_c$ (K)
55	1622.3	2.3	40.3
60	2081.2	3.6	50.6
65	1776.6	3.1	44.8
70	1295.4	1.7	26.5
Without reflectors	1205.5	1.2	23.2

Effect of Reflector Angle on Thermal Conversion and Overall Efficiency

The test results for different efficiencies of the TE solar collector without reflectors and with reflectors in optimal position are presented in Table 2. The thermal and overall efficiencies of the TE solar collector with reflectors were lower than without the reflectors, but the thermal energy and electrical power outputs generated by the former were significantly higher, as discussed above. Meanwhile, the conversion efficiency of the TE solar collector with reflectors was higher than without reflectors.

CONCLUSIONS

In this paper, a TE solar collector with and without reflectors is considered. The optimal position of the reflectors was determined experimentally

Table 2. Thermal efficiency, conversion efficiency, and overall efficiency of the TE solar collector with and without reflectors

θ (°)	η_{th} (%)	η_e (%)	η_o (%)
55	70.2	1.2	73.5
60	75.1	1.5	79.2
65	72.4	1.4	76.2
70	68.5	0.8	70.6
Without reflectors	80.1	0.7	81.8

to maximize the concentration of solar intensity. Experimental measurements indicated the optimal angle of the reflectors to be 60° from horizontal. The thermal and overall efficiencies of the TE solar collector with reflectors were lower than without the reflectors, but the thermal and electrical power generated by the former were significantly higher. These results show the positive effect of the reflectors for increasing both the thermal and electrical power output from the TE solar collector.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support provide by the Thailand Research Fund (TRF), the Commission on Higher Education of the Ministry of Education, and Mahasarakham University. Experimental help by Mr. Arthit Peanngam and Miss Tippawan Prasongsuk is highly appreciated.

REFERENCES

1. E. Monhsemi-Languri, H. Taherian, R. Mosoodi, and J.R. Reisel, *Therm. Sci.* 13, 205 (2009).
2. J. Chen, *J. Appl. Phys.* 79, 2717 (1996).
3. R. Gunter, *Sol. Energy* 67, 227 (1999).
4. H. Scherrer, L. Vikhor, B. Lenior, A. Dauscher, and P. Poinas, *J. Power Sources* 115, 141 (2003).
5. S. Maneewan, J. Hirrunlabh, J. Khedari, B. Zeghmami, and S. Teekasap, *Sol. Energy* 78, 495 (2005).
6. D. Kraemer, B. Poudel, H.P. Feng, J.C. Caylor, B. Yu, X. Yan, Y. Ma, X. Wang, D. Wang, A. Muto, K. McEnaney, M. Chiesa, Z. Ren, and G. Chen, *Nat. Mater.* 10, 532 (2011).
7. Lj.T. Kostic, T.M. Pavlovic, and Z.T. Pavlovic, *Appl. Energy* 87, 3023 (2010).
8. Y.A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. (New York: McGraw-Hill, 2003).
9. S. Pattanasethanon, C. Lertsatitthanakorn, S. Atthajariyakun, and S. Soponronnarit, *Energy Convers. Manag.* 49, 1999 (2008).
10. S. Kiatgamolchai and E. Chamni, *Sol. Energy* 82, 111 (2008).
11. Y. Vorobiev, J. Gonzalez-Hernandez, P. Vorobiev, and L. Bulat, *Sol. Energy* 80, 170 (2006).
12. B.R. Peterson, *Trans. ASME J. Eng. Gas Turbine Power* 129, 1106 (2007).
13. W.E. Miller, J.T. Hendricks, and B.R. Peterson, *J. Electron. Mater.* 38, 1206 (2009).
14. J. Ji, J.P. Lu, T.T. Chow, W. He, and G. Pei, *Appl. Energy* 84, 222 (2007).

Energy and exergy analysis of a double-pass thermoelectric solar air collector

C. Lertsatitthanakorn*, N. Khasee, B. Bubphachot,

Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Khantawichai, Mahasarakham 44150, Thailand

Abstract

Analysis of energy and exergy has been performed for a double-pass thermoelectric (TE) solar air collector. The TE solar collector was composed of transparent glass, air gap, an absorber plate, thermoelectric modules and a rectangular fin heat sink. The incident solar radiation heats up the absorber plate so that a temperature difference is created between the thermoelectric modules that generate a direct current. Only a small part of the absorbed solar radiation is converted to electricity, while the rest increases the temperature of the absorber plate. The ambient air flows through the heat sink located in the lower channel to gain heat. The heated air then flows to the upper channel where it receives additional heating from the absorber plate. Energy analysis, which is based on the first law of thermodynamics, and exergy analysis, which is based on the second law, were applied for evaluation of the system efficiency. It was observed that the thermal efficiency increases as the air flow rate increases. Meanwhile, the electrical power output and the conversion efficiency depended on the temperature difference between the hot and cold side of the TE modules. At a temperature difference of 22.8°C, the unit achieved a power output of 2.13 W and the conversion efficiency of 6.17%. The exergy efficiency varies from a minimum of 7.4% to a maximum of 8.4%, respectively.

Keywords: Thermoelectric; Solar air collector; Power output; Conversion efficiency; Thermal efficiency; Overall Efficiency; Thermodynamics

* E-mail: freeconvect@hotmail.com

1. Introduction

Hybrid systems for solar (renewable) energy utilization have attracted considerable attention from scientists and engineers during the last decade because of their higher efficiency and stability of performance in comparison to individual solar device. Among the different hybrid systems, the photovoltaic-thermal (PVT) systems have been widely used [1]. The heat accumulated in the solar cells is recovered in the form of low temperature thermal energy, resulting in improvements in the electrical conversion efficiency of PV modules. Over the last few years, different PVT systems, based on air and water as heat carrying fluid, have been studied, developed and reported in literature. As an example, Kalogirou [2] studied experimentally an unglazed hybrid PVT system under the force mode of operation for climatic conditions of Cyprus. He observed an increase in the mean annual efficiency of a PV solar system from 2.8% to 7.7% with a thermal efficiency of 49%. Hagazy [3] and Sopian et al. [4] investigated a glazed PVT air system for a single and double pass air heater for space heating and drying purposes. They have also developed a thermal model of each system. Thermal energy for the glazed PVT system is increased with lower electrical efficiency due to high operating temperature. However, there is another technology for combined electrical and thermal energies namely: thermoelectric (TE) technology. The term TE refers to solar thermal collectors that use TE devices as an integral part of the absorber plate. The system generates both thermal and electrical energy simultaneously. **Basically, TE power generation is a solid state means of converting heat flow directly into electrical power via the Seebeck effect [5].** The use of a TE converter for electrical power generation has conventionally followed the basic arrangement shown in Figure. 1. A TE module consists of several N & P pellets connected electrically in series and thermally in parallel sandwiched between two ceramic plates (hot and cold substrates in Figure. 1). The bottom plate is bounded to a heat sink and the load is supplied with the proper polarity. The heat, which emanates from the source, flows through the top surface of the TE module. Electrical power is derived from the movement of electrical carriers brought on by heat flow through the TE pellets. Holes or positive carriers move to the heat sink side of the P-type pellet resulting in a net negative charge at the heat sink side of the N-type pellet. High temperature energy sources have historically been utilized because of the inherent higher efficiency at high temperature differences. However, there are many low level energy sources plentiful in nature that are candidates for TE conversion such as solar energy, steam and various forms of waste heat [6]. TE modules normally designed for cooling are the best choice for these applications because they are manufactured from materials of highest efficiency at these normal temperatures. As such, they represent the highest efficiency devices possible for use as thermoelectric power generators for low intensity energy sources. Generally, the cost of the thermoelectric cooling modules is lower than the cost of power modules which increases the commercial competitiveness of this method of generating power [7].

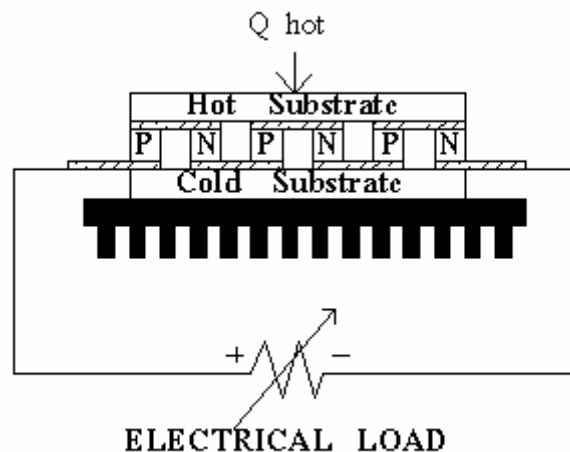


Figure 1 Thermoelectric module in power generation mode

A number of simulations as well as experimental studies have been reported on solar-driven TE power generators. Chen [8] derived a thermodynamic analysis of a solar-driven TE power generator based on a well-insulated flat plate collector. A thermodynamic model including four irreversibilities is used to investigate the optimum performance of

a solar-driven TE generator. The example discussed by Chen is based on an extremely well-insulated flat plate collector, which, in practice, may be difficult to achieve. Gunter et al. [9] constructed a prototype of a solar thermoelectric water heater. The hot side of TE module was heated by solar hot water. Meanwhile, the heat was released at the cold side of TE module via a heat sink. Three vacuum-tubes with heat pipes, each with a 0.1 m^2 absorber area and with water as the heat pipe medium, were connected via a specially designed heat exchanger to a fluid circuit acting as a heat sink. Test result showed that the electrical efficiency reached a maximum value of 1.1% of the incoming solar radiation, which is around 2.8% of the transferred heat. To assess the performance of a double-pass thermoelectric solar air collector, the value of electricity versus the heat from the collector is important. The performance of a double-pass thermoelectric solar air collector can be evaluated in terms of energy efficiency and exergy efficiency. Thermodynamic analysis is an effective means to obtain precise and valuable information about energy efficiency and losses due to irreversibilities in real situations. The current tendency in the design of real processes is the minimization of entropy production, looking forwards to designing systems that are economical and thermodynamically optimal. The tools commonly used in solar engineering are still based on only the first law of thermodynamics. The first law is only concerned with the conversion of energy and gives no information on how, where and how much the system performance is energy degraded. In other words, energy-based criteria do not account for the quality of energy, expressed as exergy. Exergy-based criteria are appropriate as they account better for use of energy resources and give much better guidance for system improvement [10]. Exergy of a thermodynamic system is the maximum theoretical useful work obtainable as the system is brought into complete thermodynamic equilibrium with the environment. There is little work carried out for exergy analysis of the hybrid systems. For example, Josi and Tiwari [11] briefly carried out energy and exergy analysis of a PVT air collector and reported that an instantaneous energy and exergy efficiency of the PVT air heater varies between 55-65 and 12-15%, respectively. **This paper presents analysis of energy and exergy efficiencies of a double-pass TE solar air collector. An experimental set-up described in the next section, is constructed and tested under the tropical climate of Mahasarakham, Thailand. The efficiencies of the double-pass TE solar air collector are determined from the experimental measurements.**

2. Description of the TE solar collector and experimental methodology

The schematic view of the TE solar collector is shown in Figure 2. The TE solar collector was composed of a glass cover, air gap, galvanized iron plate and TE modules (compounds based on bismuth-telluride) with their hot side attached directly to the back side of the galvanized iron plate which acted as an absorber, and a rectangular fin heat sink directly attached to the cold side of the TE modules. The space between the TE modules, absorber and heat sink was insulated using a closed cell elastomeric thermal insulator (thermal conductivity = 0.039 W/mK). The collector was 1 m wide, 1.5 m long, with an aperture area of 1.5 m^2 . It also had a 0.11 m flow duct height (air gap), leading to a flow area of 0.11 m^2 . The absorbing surface in the collector was made of galvanized iron, 2.5 mm thick, painted with dull black. Twenty four TE cooling (model TEC1—12708, China) modules made of bismuth telluride based alloys were used. Each module had an area of $4 \times 4 \text{ cm}^2$. The TE modules were connected in series and arranged in 4 rows with 6 TE modules in each row. The rectangular fin heat sink on the cold side was made of aluminum. The fins were 4.5 mm thick; 120 mm long in the horizontal direction and had a height of 40 mm from the base with a fin space of 7 mm. A centrifugal blower was used to circulate the air through the rectangular fin heat sink and the collector. The collector was oriented to south and tilted so as to adjust an angle of 16° from horizontal, which was considered suitable for the geographical location of Mahasarakham, Thailand ($16^\circ 14' \text{N}$, $103^\circ 15' \text{E}$) [12]. Ambient air enters the lower channel and captures released heat from the heat sink located at the cold side of TE modules. Next it enters the upper channel where it is further heated by the absorber plate. The air temperature at the outlet of the collector is at a high temperature because it is using the recycled air **from** the lower channel. This concept was to improve the thermal efficiency of the flat plate collector and obtain electrical power from the TE as well.

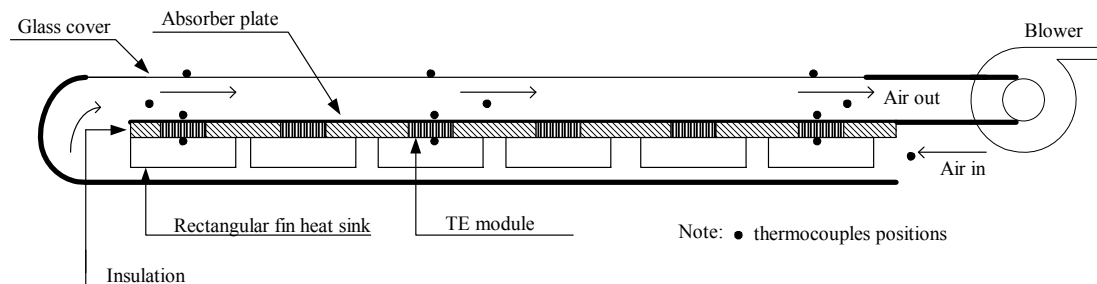


Figure 2. A schematic diagram of the TE solar air collector

The collector was instrumented with T-type (accuracy $\pm 0.5^\circ\text{C}$) thermocouples for the glass cover, the flowing air, the surface of absorber plate and heat sink as shown in Figure 2. The thermocouple, which measured the ambient temperature, was kept in a shelter to protect the sensor from direct sunlight. A pnyanometer (Kipp & Zonen model CM 11 accuracy $\pm 10 \text{ W/m}^2$) was used to measure the incident solar radiation. The air flow rate was calculated from the air velocity, measured by a hot wire anemometer (Testo model 445, accuracy $\pm 0.03 \text{ m/s}$) at the collector outlet, and the known duct area. The output current and voltage were measured with a multi-meter (Fluke model 189, accuracy VDC $\pm 0.025\%$, A $\pm 0.5\%$). The experiments were performed during June 2007. Experimentation started at 9 a.m. and ended at 5 p.m.

3. Analysis

3.1 Energy analysis

The thermal output Q_{th} and electrical output P of the TE solar collector are calculated from the measured data as follows:

$$Q_{th} = \dot{m}C_p(T_{aco} - T_{amb}) \quad (1)$$

$$P = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2)$$

where C_p is the specific heat at the average air temperature, \dot{m} is the air mass flow rate, T_{aco} and T_{amb} are the air temperature at the outlet of collector and ambient temperature, respectively. I_{mp} and V_{mp} are the maximum current and voltage of the TE modules at a matched load.

The performance of a TE solar collector can be described by a combination of efficiency terms. The basic ones are the thermal efficiency η_{th} and the conversion efficiency η_c are calculated based on the following definition:

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{A_a G} \times 100 \quad (3)$$

$$\eta_c = \frac{P}{A_{TE} G} \times 100 \quad (4)$$

where A_a is the aperture area of absorber plate, A_{TE} is the area of TE modules and G is the incident solar radiation. The total efficiency η_o is commonly used to assess the overall performance

$$\eta_o = \frac{(Q_{th} + P - P_b)}{A_a G} \times 100 \quad (5)$$

where P_b is blower power

3.2 Exergy analysis

The thermal exergy of the system (Ex_{th}) can be calculated from the following expression given by [13]

$$Ex_{th} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{abs}}\right) Q_{th} \quad (6)$$

where T_{abs} is the absorber plate temperature.

As the electrical output of the TE solar collector is a form of exergy [14], the total exergy of the TE solar collector (Ex_{tot}) is obtained by summing Equations (2) and (6)

$$Ex_{tot} = Ex_{th} + P \quad (7)$$

To evaluate the exergy efficiency of the TE solar collector, therefore, we need the exergy of the total solar radiation. The TE solar collector is affected by direct and indirect component of solar radiation, the magnitude of which depends on Carnot limitations and atmospheric effects. The exergy of solar radiation (Ex_{sol}) can be evaluated approximately from [15],

$$Ex_{sol} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) GA_a \quad (8)$$

Here, it represents the exergy of heat delivered from the interior of the sun to the surface of the TE solar collector. As a result, the exergy efficiency (ψ) could be represented as

$$\psi = \frac{Ex_{tot}}{Ex_{sol}} \times 100 \quad (9)$$

4. Results and discussion

The effect of increasing the air mass flow rate on the absorber plate (T_{abs}), cover plate (T_{cov}) and air temperature of the outlet of the collector (T_{aco}) is presented in Figure 3.

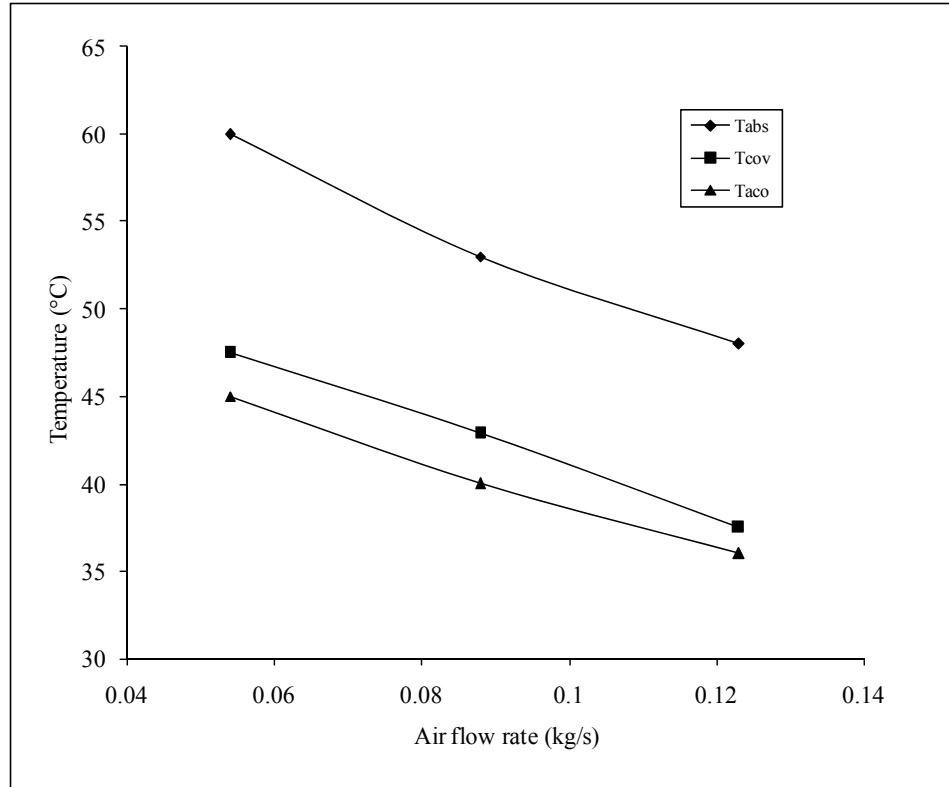


Figure 3. Effect of air flow rate on the temperature of absorber plate and cover plate and air temperature of the outlet of the collector (Incident solar radiation of 950.7 W/m²)

It is apparent, as expected, that as the air mass flow rate increases the air temperature at the outlet of the collector decreases. Further, for high air mass flow rates, the collector operating temperature would be lower, resulting in lower heat losses and subsequently, higher thermal efficiency as shown in Table 1..

Table 1. Effect of air flow rate on thermal exergy (Ex_{th}), total exergy (Ex_{tot}), thermal efficiency (η_{th}) and exergy efficiency (ψ)

Air flow rate (kg/s)	Ex_{th} (W)	Ex_{tot} (W)	η_{th} (%)	ψ (%)
0.054	86.3	88.4	67.0	7.4
0.088	92.5	94.5	78.5	8.1
0.123	94.0	96.2	80.3	8.4

It can be seen that the thermal efficiency of the air collector is strongly dependent on the air flow rate. The **thermal** efficiency increased **quickly up to 78.5% in 0.088 kg/s** and **after that it tended to increase gradually**. The

maximum thermal efficiency was 80.3% corresponding to the air flow rate of 0.123 kg/s and incident solar radiation of 950.7 W/m². **Table 1 also shows the behavior of the thermal exergy, total exergy and exergy efficiency as a function of the air flow rate, it is presented to a range of operational condition where the thermal exergy, total exergy and exergy efficiency take a global maximum value.** The exergy efficiency varies from a maximum of 8.4% to a minimum of 7.4% at air flow rate of 0.123 kg/s and 0.054 kg/s, respectively. The exergy efficiency was significantly lower than the energy efficiency. It means that the amount of energy that could be converted to useful work is very low in relation to energy converted from solar to thermal [16].

Figure 4 presents the output power and conversion efficiency, as a function of temperature difference between hot and cold sides of the TE modules.

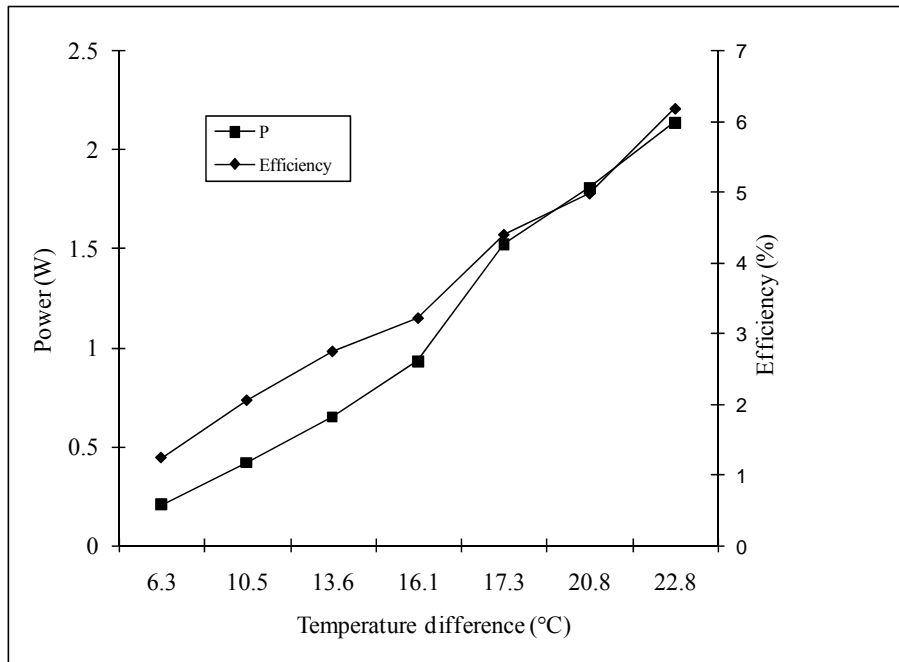


Figure 4. Variation of power output and conversion efficiency with temperature difference

It is apparent that the power and efficiency continued to increase as the temperature difference increased. The maximum power and conversion efficiency are 2.13 W and 6.17%, respectively at a temperature difference of 22.8°C. The open-circuit voltage and the short-circuit current are 10.05 V and 212.56 mA, respectively.

Effect of air flow rate on conversion and overall efficiencies has been shown in Figure 5.

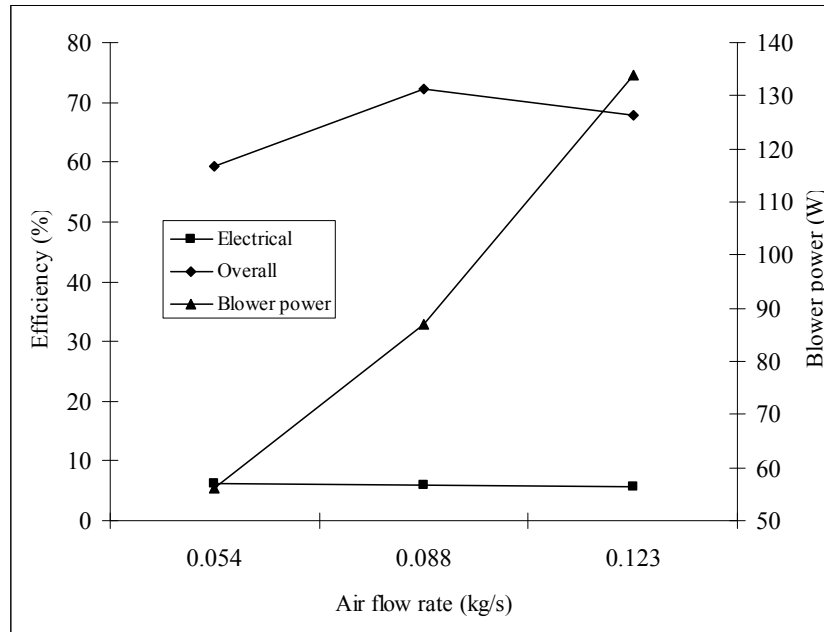


Figure 5. Effect of air flow rate on overall and conversion efficiencies and blower power.

The conversion efficiency slightly decreases with increases of air flow rate, **because the temperature of the absorber plate decreased as the air flow rate increased (Figure 3)**. Generally, the overall efficiency increases with an increase in air flow rate; it attains a maximum value and then decreases with a further increase in air flow rate. This is attributed to the sharp increase in blower power with increasing air flow rate.

5. Conclusions

Energy and exergy analyses for a double-pass thermoelectric solar air collector were performed during testing period. From the experimental study and calculations the following conclusion can be drawn.

- (1) There is a significant difference between the results of energy and exergy. The energy efficiency is higher than that of exergy efficiency. The obtained experimental data and calculations clearly show that exergy efficiency of the TE solar collector is very low.
- (2) By increasing the air flow rate, the thermal and exergy efficiencies increase. The maximum thermal and exergy efficiencies were 80.3% and 8.4%, respectively.
- (3) The electrical power output and the conversion efficiency depended on the temperature difference between the hot and cold side of the TE modules. At a temperature difference of 22.8°C, the unit achieved a power output of 2.13 W and the conversion efficiency of 6.17%.

Finally, the possibility of using a reflector to improve both thermal and electrical power output of the double-pass thermoelectric solar air collector is an interesting topic for further development.

Acknowledgements

The first author gratefully acknowledges the financial support by the Thailand Research Fund (TRF), the Commission on Higher Education of the Ministry of Education and Mahasarakham University.

References

- [1] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, Th., Souliotis, M., Tanoulis, P., "Hybrid photovoltaic/thermal solar systems" Sol. Energy. 72, 217-234 (2002).
- [2] Kalogirou, S.A., "Use of TRNSYS for modeling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus" Renew. Energy. 23, 247-260 (2001).

- [3] Hegazy, A.A., "Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors" *Energy Convers. Manage.* 41, 861-881 (2000).
- [4] Sopin, K., Liu, H.T., Kakac, S., Veziroglu, T.N., "Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying" *Energy Convers. Manage.* 41, 353-365 (2000).
- [5] Bell, L.E., "Cooling, heating, generating and recovering waste heat with thermoelectric systems" *Science*. 321, 1457-1461 (2008).
- [6] Min, G., Rowe, D.M., "Optimization of thermoelectric module geometry for waste heat electric power generation" *J Power Sources*. 38, 253-259 (1992).
- [7] Lertsatitthanakorn, C., Srisuwan, W., Thanachayanont, C., Vorasigha, A., Maneewan, S., "Comparative investigation of thermoelectric power and cooling modules" *Exp. Tech.* 35, 33-36 (2011).
- [8] Chen, J., "Thermodynamic analysis of a solar-driven thermoelectric generator" *Appl. Phys.* 79, 2717-2721 (1996).
- [9] Gunter, R., "PV-hybrid and thermoelectric collectors". *Sol. Energy*. 67, 227-237 (1999).
- [10] Lior, N., Zhang, N., "Energy, exergy, and second law performance criteria" *Energy*. 32, 281-296 (2007).
- [11] Joshi, A.S., Tiwari, A., "Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic- thermal (PV/T) air collector" *Rew Energy*. 32, 2223-2341 (2007).
- [12] Pattanasethanon, S., Lertsatitthanakorn, C., Atthajariyakun, S., Soponronnarit, S., "An accuracy assessment of an empirical sine model, a novel sine model and an artificial neural network model for forecasting illuminance/irradiance on horizontal plane of all sky types at Mahasarakham, Thailand" *Energy Convers. Manage.* 49, 1999-2005 (2008).
- [13] Joshi, A.S., Dincer, I., Reddy, I.D., "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems" *Sol Energy*. 83, 1139-1149 (2009).
- [14] Raman, V., Tiwari, G.N., "A comparison study of energy and exergy performance of a hybrid photovoltaic double-pass and single-pass air collector" *Inter. J. Ener Research*. 33, 605-617 (2009).
- [15] Sahin, A.D., Dincer, I., Rosen, M.A., "Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems" *Sol. Ener. Mat. Sol. Cells*. 91, 153-159 (2007).
- [16] Navarrete-Gonzalez, J.J., Cervantes-de Gortari, J.G., "Exergy analysis of a rockbed thermal storage system" *Int. J. Exergy*. 5, 18-30 (2008).

Nomenclature

A_a Aperture area of absorber plate (m^2)
 A_{TE} Area of TE modules (m^2)
 C_p Specific heat at the average air temperature (J/kgK)
 Ex Exergy (W)
 G Incident solar radiation (W/m^2)
 I_{mp} Maximum current of the TE modules at a matched load. (mA)
 \dot{m} is the air mass flow rate (kg/s)
 P Electrical power output (W)
 Q Thermal output (W)
 T temperature ($^{\circ}C$ or K)
 TE Thermoelectric
 V_{mp} Maximum voltage of the TE modules at a matched load (V)

Greek letters

ψ exergy efficiency (%)
 η efficiency (%)

Subscripts

abs absorber plate
 aco air at the outlet of collector
 amb ambient
 sol solar
 sun sun
 th thermal
 tot total