Dissertation Title	Mathematical Model of Evacuated Tube Solar Water Heater with Thermosyphon	
Author	Mr. Chaiwat Wannagosit	
Degree	Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)	
Advisory Committee	Assoc. Prof. Dr. Phrut Sakulchangsatjatai	Advisor
	Prof. Dr. Pradit Terdtoon	Co-advisor
	Asst. Prof. Dr. Niti Kammuang-lue	Co-advisor

ABSTRACT

This research aims to develop the mathematical models of evacuated tube solar water heater system with thermosyphon by using Explicit Finite Difference Method (EFDM) and thermal resistance method to investigate the thermal efficiency at different thermosyphon dimensions and number of evacuated tube from the best themoeconomics analysis. Then, the mathematical model results are validated by the experimental results. Finally, the mathematical model result is compared with the electric water heater using the economics analysis.

From a study of the effect dimensions of thermosyphon, the evaporator section length and the condenser section length are made varied. Explicit Finite Difference Method is employed for the modeling of the solar hot water system based on Thailand's climatic data of Chiang Mai province. The solar radiation and ambient air temperature on February 27, 2014 during 9:00 a.m. to 4:00 p.m. are used as the input data of system modeling program. It is found that the length of evaporator section is increased while temperature of evaporator, condenser, and water outlet at storage tank are nearly constant and increased non-significant. As a result, length of the evaporator section reaches 1700 mm since the maximum length of evaporator has an area to obtain the highest thermal energy from inner evacuated tube. For the condenser section length, it is found that length of condenser section is increased, the evaporator temperature is nearly constant while the condenser temperature is increased and water outlet temperature is decreased. Therefore, the water outlet temperature is decreased because of the water

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

volume in manifold is increased by the condenser length. For this reason, the suitable condenser length is occurred in the range of 50-100 mm. Moreover, the effect of number of evacuated tube and the thermosyphon diameter on the net saving are also investigated. These parameters are considered at the temperature of hot water over 65^{o}C. It is found that the maximum value of heat rate of water is obtained from 8 evacuated tubes, 15.88 mm (1/2 inch) of evaporator diameter, and 22.22 mm (3/4 inch) of condenser diameter. The solar water heater system is obtained reaches the maximum net saving at 98,078 Baht. Thus, the evacuated tube solar water heater system at optimal parameters is constructed and tested for the prototype of the system.

For the experiment, the solar water heater system consists of 8 evacuated tubes and the water storage tank volume of 100 liters. The solar water heater system is tilted at 18^{o} from horizontal and facing to south. The experiments are carried out from 8:00 a.m. to 4:00 p.m. during August to October, 2016 on a partly cloudy day and a clear sky day under the climatic conditions of Chiang Mai province, Thailand.

In order to validate the mathematical models, the solar radiation, ambient air temperature and wind velocity of the experiment data on August 18, 2016 for a partly cloudy day condition and a clear sky day condition on October 14, 2016 during 8:00 a.m. to 4:00 p.m. are inputted to the mathematical models for predicting the results of the solar water heater system. It is found that the mathematical models results can be used to predict the temperatures, heat transfer rate and thermal efficiency which shown in good agreement with the experimental results and previous research. That is to say, the experimental results and the mathematical models results show that the thermal efficiency are 58.28% of the experiment, 60.11% of the EFDM and 60.67% of the thermal resistance method for a clear sky day condition while the thermal efficiency of a partly cloudy day condition are 31.73%, 32.57% and 41.69% of the experiment, EFDM and thermal resistance method, respectively. Furthermore, the maximum temperature of hot water occurred at 4:00 p.m. which 65.25^{o}C of the experiment, 71.66^{o}C of EFDM and 75.58^{o}C of the thermal resistance method for a clear sky day condition. Conversely, for a partly cloudy day condition, the maximum temperatures of hot water are 52.45^{o}C, 55.04^{o}C, and 58.00^{o}C for the experiment, the EFDM, and the thermal resistance method, respectively.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

In terms of economics analysis, the experiment result on October 14, 2016 is used for calculating the water heat rate by converting the heat energy compared to the electricity consumption of electric hot water heater. The operation of electric water heater is 6.8 hours/day and the electric consumption at 1 kWh. As a result, the average electric cost for producing hot water considering electric rates is equal to 3.35 Baht/kWh, referred to Provincial Electricity Authority of Thailand. It is also found that the simple payback period of the evacuated tube solar water heater system is 3 years and 11 months. The net present value is positive at 23,312.13 Baht which indicates the solar water heater system earnings generated by investment exceed the anticipated costs. Therefore, the Internal Rate of Return is a discount rate that makes the NPV of all cash flows from a solar water heater equal to zero. It is shown that the Internal Rate of Return is calculated at 22.35%. It means that interest rate of investment cash flow is lower than an IRR, so the evacuated tube solar water heater will be beneficial for the investments.

Keywords: Evacuated tube, solar water heater, thermosyphon, mathematical model.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หัวข้อดุษฎีนิพนธ์	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศกับเทอร์โมไซฟอน	
ผู้เขียน	นายชัยวัฒน์ วรรณโกษิตย์	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	
คณะกรรมการที่ปรึกษา	รศ. ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
	ศ. ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
	ผศ. ดร.นิติ คำเมืองลือ	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนแสง อาทิตย์ท่อแก้วสุญญากาศแบบท่อเทอร์โมไซฟอน โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Explicit Finite Difference Method : EFDM) และวิธีตัวต้านทานความร้อน (Thermal resistance method) เพื่อศึกษาผลของมิติของท่อเทอร์โมไซฟอนและจำนวนท่อแก้วสุญญากาศโดยอาศัยการวิเคราะห์เศรษฐ์ศาสตร์พลศาสตร์ความร้อน (Thermoeconomics analysis) เมื่อได้ขนาดของท่อเทอร์โมไซฟอนและจำนวนท่อแก้วที่เหมาะสมจะถูกนำไปสร้างชุดทดลองต้นแบบ สำหรับทดสอบและผลที่ได้จากการทดสอบสามารถใช้เพื่อปรับปรุงความแม่นยำสำหรับการออกแบบของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ท่อแก้วสุญญากาศแบบท่อเทอร์โมไซฟอน นอกจากนี้ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ท่อแก้วสุญญากาศแบบท่อเทอร์โมไซฟอนจะนำมาใช้วิเคราะห์ทางเศรษฐ์ศาสตร์เปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า

จากการศึกษาผลของมิติของท่อเทอร์โมไซฟอนและจำนวนท่อแก้วสุญญากาศ โดยใช้วิธีผลต่างสืบเนื่อง ในการจำลองใช้ค่ารังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมในวันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2558 ระหว่างเวลา 9:00 น. ถึง 16:00 น. ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า เมื่อความยาวของส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น อุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกถังเก็บน้ำร้อน อุณหภูมิส่วนควบแน่นและอุณหภูมิส่วนทำระเหยค่อนข้างคงที่ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นความยาวส่วนทำระเหยที่เหมาะสมคือ 1,700 มิลิเมตร นอกจากนี้ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำการศึกษาผลของความยาวส่วนควบแน่น พบว่า เมื่อความยาวของส่วนความแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของส่วนทำระเหยคงที่ในขณะที่อุณหภูมิของส่วนควบแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวของส่วนควบแน่น แต่เนื่องจากเมื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ความยาวของส่วนควบแน่นเพิ่มขึ้นมีผลต่อการเพิ่มปริมาตรน้ำของท่อรวมจึงเป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนลดลง และความยาวที่เหมาะสมของส่วนความแน่นอยู่ในช่วง 50-100 มิลิเมตร สำหรับผลของจำนวนท่อแก้วสุญญากาศและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเทอร์โมไซฟอน เงื่อนไขสำหรับการพิจารณาจะกำหนดให้น้ำร้อนที่ถังเก็บต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส และอาศัยการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ความร้อนของการประหยัดสุทธิ (Net saving) ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าจำนวนท่อแก้วสุญญากาศ ขนาดส่วนทำระเหยและส่วนความควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอนที่เหมาะสม ที่มีค่าการประหยัดสุทธิและอัตราความร้อนสูงสุด คือ จำนวนท่อแก้วสุญญากาศ จำนวน 8 ท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนทำระเหยเป็น 15.88 มิลิเมตร หรือ 1/2 นิ้ว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนควบแน่นเป็น 22.22 มิลิเมตร หรือ 3/4 นิ้ว โดยตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าการประหยัดสุทธิเป็น 98,078 บาท ผลของตัวแปรที่เหมาะสมจะนำไปสร้างชุดทดลองต้นแบบเพื่อทำการทดสอบ

สำหรับชุดการทดลองระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ท่อแก้วสุญญากาศแบบท่อเทอร์โมไซฟอน ประกอบด้วย จำนวนท่อแก้วสุญญากาศและท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 8 ท่อ ถังเก็บน้ำร้อนขนาด 100 ลิตร โดยท่อแก้วสุญญากาศจะติดตั้งบนฐานรองรับที่ทำมุมเอียง 18 องศากับแนวระนาบ และฐานรองรับและท่อแก้วสุญญากาศจะหันไปทางทิศใต้ การทดสอบจะเริ่มตั้งแต่ 8:00 น. ถึง 16:00 น. ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงตุลาคม 2559 ภายใต้สภาพอากาศของจังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย

เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ท่อแก้วสุญญากาศ ค่ารังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและค่าเฉลี่ยความเร็วลมจากการทดลองในวันที่ 18 สิงหาคม 2559 จะเป็นตัวแทนของวันที่ท้องฟ้ามีเมฆ และในวันที่ 14 ตุลาคม 2559 จะเป็นตัวแทนของวันที่ท้องฟ้าโปร่งใส โดยทำการทดลองในช่วงเวลา 8:00 น. ถึง 16:00 น. ผลจากการทดลองและผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถคำนวณอุณหภูมิต่างๆ อัตราการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพทางความร้อน มีผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองและสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดง ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบเครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ดังนี้ ผลที่ได้จากการทดลองเป็น 52.28% ผลที่ได้จากแบบจำลองโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเป็น 60.11% และวิธีตัวต้านทานความร้อนเป็น 60.67% สำหรับเงื่อนไขของวันที่ท้องฟ้าโปร่งใส สำหรับวันที่ท้องฟ้ามีเมฆ ผลที่ได้จากการทดลองเป็น 31.73% ผลที่ได้จากแบบจำลองโดยวิธีผลต่างสืบเนื่องเป็น 32.57% และวิธีตัวต้านทานความร้อนเป็น 41.69% นอกจากนี่อุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนทั้งจากการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 2 วิธี เกิดขึ้นที่เวลา 16:00 น. สำหรับทั้ง 2 เงื่อนไขของสภาพอากาศโดยที่วันที่ท้องฟ้าโปร่งใส อุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนจากการทดลองเป็น 62.25 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สำหรับอุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนจากแบบจำลองเป็น 71.66 องศาเซลเซียส ของวิธีผลต่างแบบสืบเนื่องและ 75.58 องศาเซลเซียส ของวิธีตัวต้านทานความร้อน สำหรับวันที่ท้องฟ้ามีเมฆอุณหภูมิสูงสุดของน้ำร้อนเป็น 52.45 องศาเซลเซียส ของการทดลอง 55.04 องศาเซลเซียส ของวิธีผลต่างแบบสืบเนื่องและ 58.00 องศาเซลเซียส ของวิธีตัวต้านทานความร้อน

สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จะใช้ผลจากกาทดลองในวันที่ 14 ตุลาคม 2559 เพื่อคำนวณค่าพลังงานความร้อนเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้า ระบบทำน้ำร้อนแบบไฟฟ้าจะใช้เวลาทำงานประมาณ 6.8 ชั่วโมง ที่การ ใช้พลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง และค่าไฟฟ้าเฉลี่ยต่อ 1 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงพิจารณาที่ 3.35 บาท โดยอ้างอิงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐ์ศาสตร์พบว่า ระบบทำน้ำร้อนท่อแก้วสุญญากาศแบบท่อเทอร์โมไซฟอนมีระยะเวลาคืนทุนที่ 3 ปี 11 เดือน มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 23,312.13 บาท หรือเมื่อพิจารณาอัตราผลตอบแทนภายในให้ผลตอบแทนการลงทุนที่ 22.35%

คำสำคัญ: ท่อแก้วสุญญากาศ เครื่องทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ท่อเทอร์โมไซฟอน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved