

การสกัดพลังงานความร้อนจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน
ด้วยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมืด

The Split Type Air-Conditioner Waste Heat Recovery with a
Open-Loop Thermosyphon Heat Exchanger

ธนาพล สุขชนะ

ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการถ่ายโอนความร้อน
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยปทุมธานี จ.ปทุมธานี 12000
*ติดต่อ: E-mail: Ton0019@hotmail.com., Tel.: +66-2975-6999; fax: +66-2979-6728.

บทคัดย่อ

ความร้อนที่ถูกทิ้งออกไปจากระบบปรับอากาศ นอกจากจะไม่มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังมีผลกระทบต่อบรรยากาศโลกอีกด้วย การสกัดพลังงานความร้อนออกบางส่วนจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้และยังช่วยลดผลกระทบต่อบรรยากาศโลกให้น้อยลง งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาการสกัดพลังงานความร้อนที่ถูกระบายทิ้งจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมืด (Open-Loop Thermosyphon Heat Exchanger, OLTHE) ด้วยการเก็บกักพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปแบบของน้ำอุ่น โดย OLTHE ทำจากท่อทองแดงติดครีบอลูมิเนียมแบบแผ่น ถังน้ำทำด้วยสแตนเลสหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ทดสอบด้วยความร้อนทิ้งในส่วนของคนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วนขนาด 5.273 kW จากผลการทดลองพบว่า OLTHE สามารถทำงานได้ด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วง และความดันแตกต่างเนื่องจากอุณหภูมิ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในระบบเท่ากับ 4 K.kg/min และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ OLTHE เท่ากับ 23.63%

คำหลัก: เทอร์โมไซฟอน, ระบบปรับอากาศ, เครื่องทำน้ำอุ่น, สิ่งแวดล้อม, โลกร้อน

Abstract

The waste heat from air-condition system it will be effects to the environmental and global warming. The waste heat recovery device it also can be reduced the impact on the environmental and global warming. This paper presents the experimental study of the waste heat recovery with the open-loop thermosyphon heat exchanger (OLTHE), with the thermal energy storage in the hot water. OLTHE is made from copper tube with aluminum fins; the open loop thermosyphon tank is fabricated from stainless steel and covered with insulation. The OLTHE is tested with the waste heat from 5.273 kW of condenser of split type air-condition system. The results show that the OLTHE can be working on thermosyphon and gravitation theory. It was found that the rate of water temperature change was 4 K.kg/min and 23.63% of the thermal efficiency of OLTHE.

Keywords: Thermosyphon, Air-Condition, Water heater, Environment, Global warming

ETM-135

1. บทนำ

พลังงานความร้อนที่ เกิดจากระบบการทำงานของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งเป็นระบบการทำงานที่ ทำหน้าที่นำเอาพลังงานความร้อน จากภายในห้องปรับอากาศออกไปทิ้งสู่บรรยากาศ โดยพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่ระบายความร้อนออกจากกระบวนการทำงานของคอนเดนเซอร์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงเฉลี่ยประมาณ 45-55 °C และมีปริมาณความร้อนที่ถูกทิ้งเป็นไปตามขนาดของเครื่องปรับอากาศ ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิที่สูงและปริมาณพลังงานความร้อนมากพอที่จะสกัดเอาพลังงานความร้อน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์อย่างใดอย่างหนึ่ง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสกัดความร้อนในแหล่งความร้อนต่างๆ พบว่ามีการสกัดพลังงานดังกล่าว ด้วยหลักการของท่อความร้อนหรือการถ่ายโอนความร้อน โดยการเดือดของสารทำงาน รวมทั้งการถ่ายโอนความร้อน โดยสารทำงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ซึ่งอาศัยหลักการของแรงโน้มถ่วงหรือที่เรียกกันว่า การถ่ายโอนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ดังงานวิจัยต่างๆ เช่น [1] ได้ศึกษาทดลองการสกัดพลังงานความร้อน จากบ่อน้ำที่สะสมความร้อนมาจากแสงอาทิตย์ ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน โดยพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถทำงานด้วยแรงโน้มถ่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงถึง 43% โดยประสิทธิภาพที่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศ, [2] ได้ศึกษาทดลองเทอร์โมไซฟอนแบบวงจร สำหรับให้ความร้อนกับถังยางมะตอย โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำ จากผลการทดสอบพบว่า เทอร์โมไซฟอนแบบวงจรสามารถส่งความร้อนให้แก่ถังยางมะตอยได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนโดยตรงจากไอน้ำ, [3] ได้ศึกษาวิจัยการสกัดพลังงานความร้อนจากพื้นดิน ด้วยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรเพื่อสกัดนำเอาพลังงานความร้อนจากใต้พื้นดินลึก 50 m พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำเอาพลังงานความร้อนจากใต้พื้นดินขึ้นมา ด้วยเทอร์โมไซฟอนแบบวงจร, [4] ได้ทดสอบผลของแรงโน้มถ่วงต่อสมรรถนะของท่อความร้อน ในการสกัดพลังงานความ

ร้อนจากแสงอาทิตย์ ผลการทดสอบพบว่าแรงโน้มถ่วงมีผลต่อสมรรถนะ ของกระบวนการสกัดพลังงานความร้อน, [5] ได้ศึกษาทดลองประสิทธิภาพการทำงานของท่อความร้อนที่ใช้ในการสกัดความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการทำน้ำอุ่น ผลการทดสอบพบว่าท่อความร้อนมีประสิทธิภาพในการสกัดพลังงานความร้อนได้สูงถึง 76%, [6] ได้ทดสอบสมรรถนะของท่อความร้อนแบบมีวิกต์ ที่มีรูปทรงเรขาคณิตแตกต่างกันกับแผ่นทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ซึ่งพบว่ารูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ, [7] ได้ศึกษาโดยวิธีการทดลองในการทำน้ำอุ่น ด้วยถังเทอร์โมไซฟอนแบบเปิด ผลการทดสอบพบว่าระบบการทำน้ำอุ่นสามารถทำงานได้ด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วง จากผลงานวิจัยที่ได้ศึกษาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน มีความสามารถในการสกัดเอาพลังงานความร้อน จากแหล่งความร้อนต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพถึงแม้ว่าอุณหภูมิไม่สูงก็ตาม สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทดสอบการทำงาน และหาประสิทธิภาพอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบเปิด สำหรับสกัดพลังงานความร้อนที่ทิ้งออกจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน แล้วเก็บกักพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปของน้ำอุ่น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 ระบบการทำน้ำอุ่น

การสกัดพลังงานความร้อนที่ทิ้งออกจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบเปิดดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นระบบการแลกเปลี่ยนและเก็บกักพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปของน้ำอุ่น โดยการสกัดพลังงานความร้อนจากคอนเดนเซอร์แบบใช้อากาศระบายความร้อนออกจากระบบ (Air Condition Section) แล้วถ่ายโอนความร้อนให้กับน้ำในระบบเก็บกักความร้อน (Heat Recovery Section) ที่เป็นท่อเทอร์โมไซฟอนชนิด

ETM-135

วงจรแบบเปิด โดยที่น้ำในถังเก็บสามารถไหลเวียนได้ด้วยแรงโน้มถ่วงเมื่อน้ำในระบบมีอุณหภูมิแตกต่างกัน

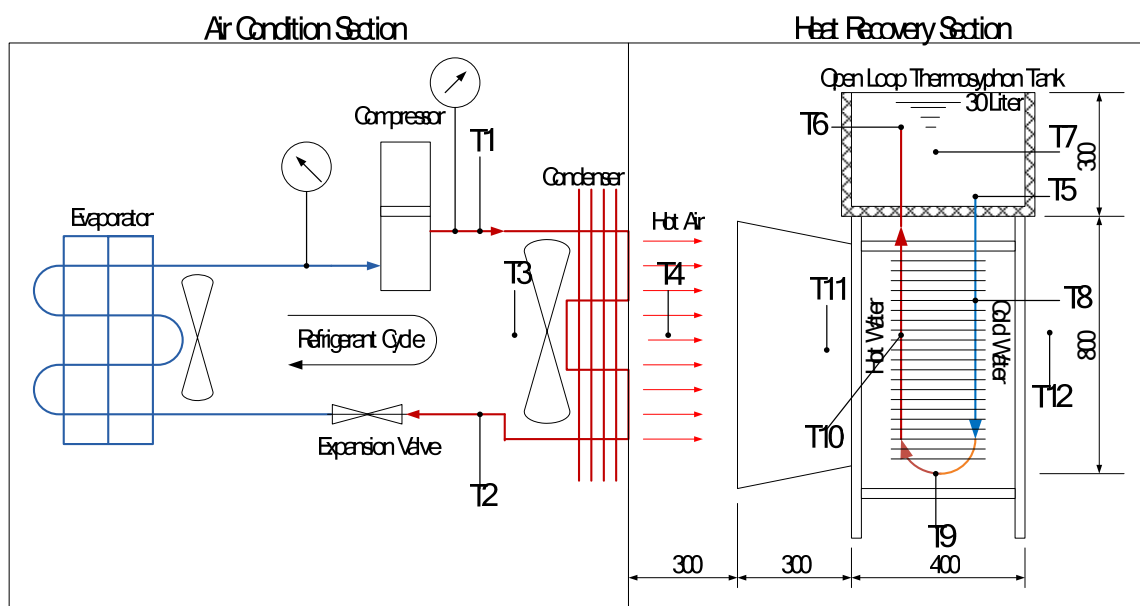
ในส่วนของระบบเก็บกักความร้อนประกอบด้วยถังน้ำสแตนเลสที่มีความจุน้ำ 45 liter หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนหนา 25 mm ท่อเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบเปิดทำจากท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 8 mm ไค้งเป็นตัวยูจำนวน 16 ท่อ มีช่วงแลกเปลี่ยนความร้อนยาว 1,200 mm ประกอบกับครีบอลูมิเนียมแบบแผ่นระยะพิต 2 mm ระยะความสูงระหว่างผิวน้ำกับทางเข้าของน้ำเย็นในระบบ เท่ากับ 300 mm ระยะความสูงระหว่างผิวน้ำกับทางของน้ำอุ่นเท่ากับ 50 mm ทางบังคับอากาศร้อนที่เข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มีรูปร่างเป็นพีระมิดยอดตัดตัดลึก 300 mm ขนาดทางเข้าและทางออก (กว้าง x สูง) เท่ากับ 500 x 800 และ 400 x 700 mm ตามลำดับ

2.2 การทดลองและเงื่อนไขการทดลอง

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน ที่ใช้กับบ้านเรือนทั่วไปส่วนใหญ่จะมีอยู่ 3 ขนาด คือ 9,000 BTU/h, 12,000 BTU/h และ 18,000 BTU/h ในการทดสอบครั้งนี้ใช้ทดสอบกับเครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 BTU/h (5.273 kW) โดยกำหนดให้เครื่องปรับอากาศทำงานต่อเนื่องติดต่อกัน 5 ชั่วโมง จำนวน 5 ครั้ง เพื่อ

ความน่าเชื่อถือได้ของผลการทดลองแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาค่าพลังงานในส่วนต่างๆ โดยมีปริมาตรน้ำในระบบเท่ากับ 42 liter ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยระยะห่างตามรูปที่ 1 แล้วนำผลที่ได้มาพิจารณาค่าประสิทธิภาพและสมรรถนะของอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิต่างๆ ของการทดลองมีจำนวน 12 จุด (T1-T12) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ T1 เป็นอุณหภูมิของสารทำความเย็น R22 บริเวณทางเข้าคอนเดนเซอร์, T2 เป็นอุณหภูมิของสารทำความเย็น R22 บริเวณทางออกจากคอนเดนเซอร์ (ทั้ง T1 และ T2 วัดที่บริเวณผิวด้านนอกของท่อทองแดง), T3 และ T4 เป็นอุณหภูมิเข้าและออกของอากาศ สำหรับระบายความร้อนให้กับสารทำความเย็น, T5 และ T6 เป็นอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำจากท่อเทอร์โมไซฟอน, T7 เป็นอุณหภูมิน้ำบริเวณจุดกึ่งกลางของถังเก็บน้ำ, T8, T9 และ T10 เป็นอุณหภูมิมิบริเวณผิวด้านนอกท่อเทอร์โมไซฟอน และ T11 และ T12 เป็นอุณหภูมิกอากาศร้อนจากคอนเดนเซอร์บริเวณทางเข้าและทางออกของส่วนแลกเปลี่ยนความร้อน

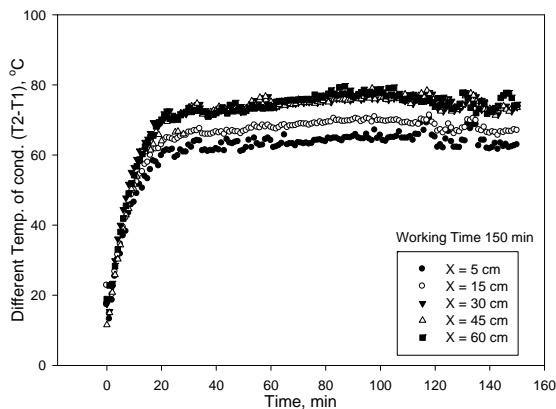


ETM-135

รูปที่ 1 ไดอะแกรมวงจรในการทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบเปิด

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การทดสอบเพื่อหาระยะห่างน้อยสุด ในการติดตั้งระบบเก็บกักความร้อนที่เหมาะสมดังรูปที่ 2 โดยการวิเคราะห์จากผลต่าง ของอุณหภูมิสารทำความเย็นที่บริเวณทางเข้าและออกของคอนเดนเซอร์ ด้วยสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น ทดสอบโดยติดตั้งให้ปากทางเข้าของอากาศ ของระบบเก็บกักความร้อนห่างจากคอนเดนเซอร์เท่ากับ 5, 15, 30, 45 และ 60 cm จากรูปจะเห็นได้ว่าผลต่างของอุณหภูมิ (T2-T1) มีค่าคงที่เมื่อระยะห่างปากทางเข้าของอากาศ ของระบบเก็บกักความร้อนห่างจากคอนเดนเซอร์ ตั้งแต่ 30 cm ขึ้นไป ซึ่งเป็นระยะห่างน้อยสุดที่ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์ โดยที่มาตรฐานในการติดตั้งระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน ได้กำหนดให้ทางออกในการระบายอากาศของคอนเดนเซอร์ ต้องอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางอย่างน้อย 60 cm สำหรับผนังทึบ จึงจะไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ ในการระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์

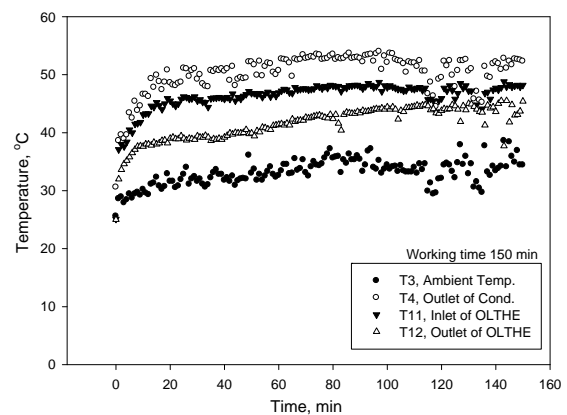


รูปที่ 2 ผลต่างอุณหภูมิการทำงานของคอนเดนเซอร์

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศ ในการแลกเปลี่ยนความร้อน บริเวณคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศ (T3 และ T4) และที่บริเวณ OLTHE (T11 และ T12) โดยใช้เวลาในการทดสอบ 300 min

แต่นำมาแสดงให้เห็นเพียงช่วง 150 min เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 min โดยพบว่าอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนของคอนเดนเซอร์ และ OLTHE เฉลี่ยเท่ากับ 10-15°C และ 3-5°C ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณเป็นอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสมการที่ 1 ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.86 kW และ 1.24 kW ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ OLTHE มีน้อยเนื่องด้วยระยะห่างในการติดตั้ง และการไม่บังคับอากาศร้อนที่ออกจากคอนเดนเซอร์ให้เข้าสู่ OLTHE ทั้งหมด ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบปรับอากาศ

$$q_{air} = \dot{m}_{air} c_{air} (T_{air,out} - T_{air,in}) \quad (1)$$



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศบริเวณคอนเดนเซอร์ และ OLTHE

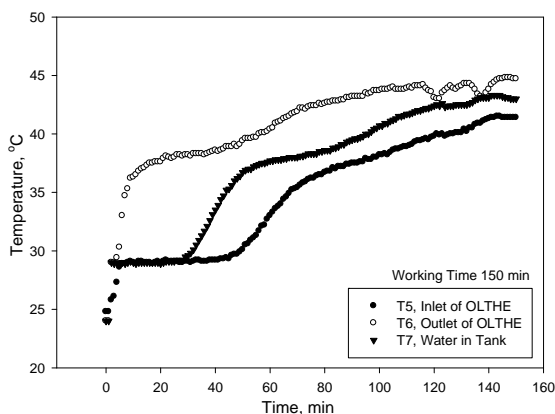
รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำภายในถึง (T5, T6 และ T7) เมื่อเวลาผ่านไป 150 min จะเห็นได้ว่าน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของอากาศสูงขึ้น และเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้น แสดงว่า OLTHE สามารถใช้เป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และกักเก็บพลังงานความร้อนที่ทิ้งออกจากระบบปรับอากาศ ในรูปแบบของน้ำอุ่นได้

ETM-135

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำในระบบ สามารถไหลเวียนด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วง ตามหลักการของเทอร์โมไสไซฟอน ซึ่งพบว่าอุณหภูมิของน้ำภายในถังเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 15°C เมื่อเวลาผ่านไป 150 min สามารถคำนวณเป็นอัตราการรับความร้อนของน้ำได้ด้วยสมการที่ 2 ซึ่งจะได้อัตราการรับความร้อนเท่ากับ 0.293 kW และเมื่อคำนวณด้วยสมการที่ 3 จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ OLTHE และระบบเก็บกักความร้อนเท่ากับ 23.63% และ 6.03% ตามลำดับ

$$q_w = \dot{m}_w c_w \left(\frac{\Delta T5 + \Delta T6 + \Delta T7}{3} \right) \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{q_w}{q_{air}} \times 100 \quad (3)$$

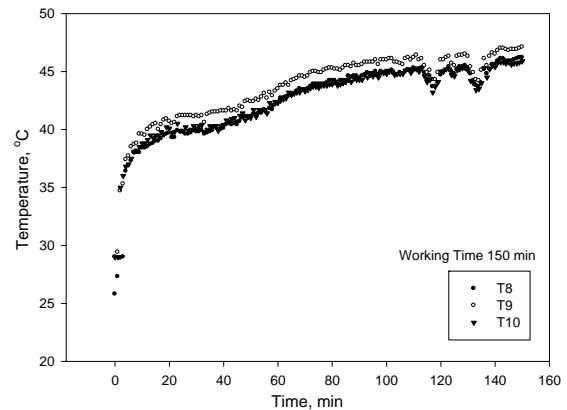


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวของ OLTHE (T8, T9 และ T10) ดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าอุณหภูมิผิว OLTHE สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิอากาศและเวลาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า มีการสะสมความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นที่บริเวณ OLTHE ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักที่สำคัญคือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วมดังสมการที่ 4 ซึ่งเป็นตัวแปรหลักสำหรับการ

ออกแบบในการใช้งานได้จริง ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

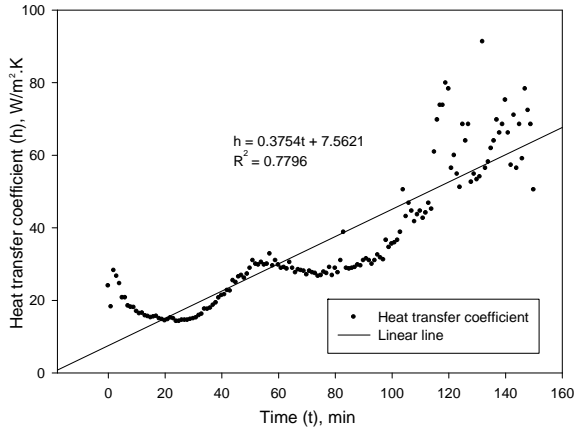
$$q_{ave} = hA(T_{s,ave} - T_{air,ave}) \quad (4)$$



รูปที่ 5 อุณหภูมิผิวของ OLTHE

เมื่อพิจารณาผลการทดลองในส่วนของ OLTHE จะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วม ระหว่างน้ำและอากาศร้อนดังรูปที่ 6 จากรูปจะเห็นได้ว่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วมของ OLTHE เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากระบบในการแลกเปลี่ยนความร้อน ยังไม่เข้าสู่จุดสมดุลความร้อน ซึ่งในความเป็นจริงนั้นการทำงานของระบบปรับอากาศจะทำงานเพียงช่วงเวลาสั้นๆ เพราะฉะนั้นการทำงานของระบบเก็บกักความร้อน จะไม่มีโอกาสเข้าถึงจุดสมดุลความร้อน ซึ่งสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วมของ OLTHE ด้วยเงื่อนไขของเวลาได้ดังนี้ $h = 0.3754t + 7.5621$ โดยมีค่าระดับความเชื่อมั่นเป็น 77.96%

ETM-135



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วมของ OLTHE

4. สรุป

การทดสอบ การสกัดพลังงานความร้อนที่ทิ้งออกจากระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน ด้วยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมและเก็บกักพลังงานความร้อน ให้อยู่ในรูปของน้ำอุ่น จากผลการทดสอบพบว่า OLTHE สามารถทำงานได้ด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วง โดยน้ำอุ่นที่ได้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 40°C ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ OLTHE เท่ากับ 23.63% ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนร่วม ขึ้นอยู่กับเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 35 W/m².K โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิของน้ำในระบบต่อมวลของน้ำ และเวลาเท่ากับ 4 K.kg/min ทั้งนี้ยังอยู่ระหว่างการทดสอบกับเครื่องปรับอากาศขนาด 9,000 BTU/h และ 12,000 BTU/h เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบเก็บกักความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างจริงใจ ต่อห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีการถ่ายโอนความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี สำหรับการสนับสนุนทางการเงิน เทคโนโลยี และความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคต่างๆ จนทำให้การศึกษาวิจัยในครั้งนี้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

6. รายการสัญลักษณ์

6.1 สัญลักษณ์

- A พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน (m²)
- c ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg.K)
- h สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m².K)
- \dot{m} อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
- q อัตราความร้อน, พลังงาน (W, kW)
- T อุณหภูมิ (°C, K)
- η_{th} ประสิทธิภาพเชิงความร้อน
- Δ ผลต่าง

6.2 สัญลักษณ์ตัวห้อย

- air* อากาศ
- ave* ค่าเฉลี่ย
- in* ทางเข้า
- out* ทางออก
- s* บริเวณผิว
- w* น้ำ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Tundee, P. Terdtoon, P. Sakulchangsattajai, R. Singh and A. Akbarzadeh. (2010). Heat extraction from salinity-gradient solar ponds using heat pipe heat exchangers. *Solar Energy*, vol 84, 2010, pp. 1706–1716.
- [2] . H. Milanez and M.B.H. Mantelli. (2006). A Loop Thermosyphon for Asphalt Tank Heating, Thesis paper of Department of Mechanical Engineering Federal University of Santa Catarina.
- [3] J. Rudolf. (2008). Thermosiphon Loops for Heat Extraction from the Ground, Study Project Energy Technology School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration.
- [4] M.S. Elmosbahi, A.W. Dahmouni, C. Kerkeni, A.A. Guizani and S. Ben Nasrallah. (2012). An experimental investigation on the gravity assisted

ETM-135

solar heat pipe under the climatic conditions of Tunisia, *Energy Conversion and Management*, vol. xx, pp. xxx–xxx.

[5] S. Rittidech, A. Donmaung and K. Kumsombut. (2009). Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV). *Renewable Energy*, vol. 34, 2009, pp. 2234–2238.

[6] H.M.S. Hussein, H.H. El-Ghetany, S.A. Nada. (2006). Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipe cross sections geometries and filling ratios. *Energy Conversion and Management*, vol. 47, 2006, pp. 1539-1549.

[7] ธนาพล สุขชนะ (2557). การศึกษาเชิงทดลองการทำน้ำอุ่น ด้วยถังเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรแบบเปิด, *การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติครั้งที่ 15*, โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จังหวัดอยุธยา, 2-4 เมษายน 2557.