

สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบเปิดภายใน THE HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF AN INTERNAL OPEN LOOP THERMOSYPHON

ธนาพล สุขชนะ*

*Thanaphol Sukchana**

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi.

**Corresponding author, e-mail: ton0019@hotmail.com*

Received: September 13, 2018; **Revised:** November 28, 2018; **Accepted:** January 28, 2019

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองการทำงานของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบเปิดภายในเพื่อศึกษาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนในรูปของค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) และอัตราส่วนของความร้อนที่ถ่ายโอนได้ (Q/Q_{90}) โดยออกแบบสร้างให้ส่วนปลายของท่อไอระเหยและของเหลวอยู่ภายในอีวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ซึ่งส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอนทั้งหมดทำด้วยท่อทองแดง เติมนสารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงานในระบบด้วยปริมาณการเติมเท่ากับ 0.8, 1.0 และ $1.2V_E$ ทดลองด้วยโหลดความร้อนคงที่ในช่วง 50–200W คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิทางเข้าคงที่ 25°C และอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 400 g/min ทดสอบผลกระทบของมุมเอียงในช่วง $0-90^\circ$ โดยเทียบกับแนวนอน จากผลการทดลองพบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ทดลองสามารถถ่ายเทความร้อนได้ทั้งในแนวนอนและแนวตั้งซึ่งในแนวนอนนั้นมีสมรรถนะต่ำกว่าแนวตั้งเฉลี่ยประมาณ 15% โดยมีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดเท่ากับ 0.135 K/W ด้วยโหลดความร้อนเท่ากับ 175W ในขณะที่ปริมาณการเติม R-134a ที่เหมาะสมนั้นเท่ากับปริมาณความจุของอีวาโปเรเตอร์ ($1.0V_E$)

คำสำคัญ: เทอร์โมไซฟอน มุมเอียง ท่อความร้อน แนวนอน R-134a

Abstract

This research study is an internal open loop thermosyphon test for the study of heat transfer performance total thermal resistance (Z) and ratio of heat transfer (Q/Q_{90}). The thermosyphon design, the end of tube of the vapor and liquid line are inside the evaporator and the condenser section with all components of the thermosyphon made of copper tubes. R-134a refrigerant is use as the working fluid with filling ratios of 0.8, 1.0, and $1.2V_E$. Experiment with constant heat load in the range of 50W to 200W.

The condenser cooled by cold water with constant inlet temperature is 25°C and the constant flow rate of 400 g/min. Effect of tilt angle between 0° to 90° of pipe examined in comparison with the horizontal orientation. The results showed that the experimental thermosyphon was able to transfer heat in horizontal and vertical plan, which the performance of horizontal is lower than the vertical average of about 15%. The smallest total thermal resistance was 0.135 K/W with a heat load of 175W while the best of R-134a was equal to the capacity of the evaporator ($1.0V_E$).

Keywords: Thermosyphon, Tilt angle, Heat pipe, Horizontal, R-134a

บทนำ

ท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนไปยังบริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว และท่อความร้อนก็ยังสามารถทำงานได้แม้ผลต่างของอุณหภูมิมีไม่มากนัก โดยท่อความร้อนนั้นสามารถที่จะนำไปประยุกต์ในการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายโอนความร้อนได้หลากหลาย รวมถึงการพัฒนาารูปแบบของท่อระบายความร้อนมากขึ้นในปัจจุบัน ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นท่อความร้อนอีกชนิดหนึ่งที่ยอมรับใช้เนื่องจากสามารถออกแบบสร้างได้ง่ายซึ่งมีรูปแบบหลักเป็นชนิดท่อเดี่ยวและชนิดวงจร แต่ข้อจำกัดหลักของท่อความร้อนชนิดนี้คือ ต้องอาศัยแรงโน้มถ่วงในการไหลกลับของของเหลวหลังมีการกลั่นตัว และสามารถที่จะถ่ายโอนความร้อนในแนวนอนได้ยาก แต่ก็ยังมีนักวิจัยอีกหลายท่านออกแบบให้สามารถเอาชนะข้อจำกัดบางอย่างได้ และมีการออกแบบประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ เช่น Dobriansky [1] ได้รวบรวมและนำเสนองานวิจัยที่มีการออกแบบให้เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรโดยใช้ของเหลวไหลขึ้นสามารถเอาชนะแรงโน้มถ่วงด้วยแรงดันของไอระเหยได้ Hagens et al. [2] ทดสอบการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยเติม R-134a เป็นสารทำงานสามารถใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแทนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบน้ำเย็นได้ Jouhara and Ezzuddin [3] ทดสอบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรโดยใช้สารทำงานเป็น R-134a ซึ่งได้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดเท่ากับ 0.048 K/W ที่ฟลักซ์ความร้อนมีค่าเท่ากับ 9.36 kW/m² Sukchana and Pratinthong [4-5] พบว่าฟลักซ์ความร้อนที่เหมาะสมของ R-134a เฉลี่ยประมาณ 18–23 kW/m² และ 25–28 kW/m² สำหรับเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยวและแบบวงจร Franco and Filippeschi [6] พบว่าขนาดของอิวาโปเรเตอร์ไม่มีผลต่อแรงขับของไอระเหย Chiapero et al. [7] ได้ศึกษาทดสอบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการเดือด ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทาน และรูปแบบการไหลของสารทำความเย็น R-134a ด้วยอุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 34°C ซึ่งผลการทดสอบรูปแบบการไหลที่ได้เหมือนกับ Flow pattern map มาตรฐาน Grooten, and Geld. [8] พบว่า อัตราการเติม R-134a และมุมเอียงของท่อ มีผลกระทบต่อ อุณหภูมิอิ่มตัว แรงดันตกคร่อม และสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน Ali Chehade et al. [9] สร้างแบบจำลองในการระบายความร้อนให้แก่ตู้อุปกรณ์ไฟฟ้าแบบปิดด้วยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร Juliarudorf [10] ทดสอบการสกัดเอาความร้อนจากใต้พื้นดินด้วยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรใช้ CO₂ เป็นสารทำงานโดยมีคอมเพรสเซอร์ Randeep Singh et al. [11] ได้ศึกษาวิจัยโดยใช้ท่อความร้อนแบบวงจรสำหรับระบายความร้อนซีพียูคอมพิวเตอร์ สามารถถ่ายโอนความร้อนได้สูงสุด 70W Pastukhov et al. [12] ได้พัฒนาและทำการทดสอบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรสำหรับระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากงานวิจัยต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีสมรรถนะในการทำงานแตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สารทำงาน วัสดุท่อ ขนาดท่อ รูปแบบในการสร้าง นอกจากการพัฒนาสมรรถนะแล้วยังได้มีการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายอุปกรณ์ด้วยกันเช่น [4-5] เป็นเทอร์โม

ไซฟอนที่มีส่วนของอะเดียแบติกสามารถติดตั้งได้ง่ายได้แบบไม่คงรูปและสามารถปรับให้เข้ากับช่องว่างได้ง่าย แต่ยังไม่พบการพัฒนาารูปแบบของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรให้มีรูปแบบเป็นชุดคล้ายกับเทอร์โมไซฟอนชนิดท่อเดี่ยวเพื่อความสะดวกในการติดตั้งใช้งาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรในรูปแบบเป็นชุด โดยมีท่อนำไอระเหยและท่อนำของเหลวเข้าและออกทางด้านเดียวกันทั้งส่วนอีวาโปเรเตอร์และส่วนคอนเดนเซอร์ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงจรแบบเปิดภายในชั้น เพื่อทดสอบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนทั้งแนวตั้ง แนวเอียง และแนวนอนโดยใช้สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน

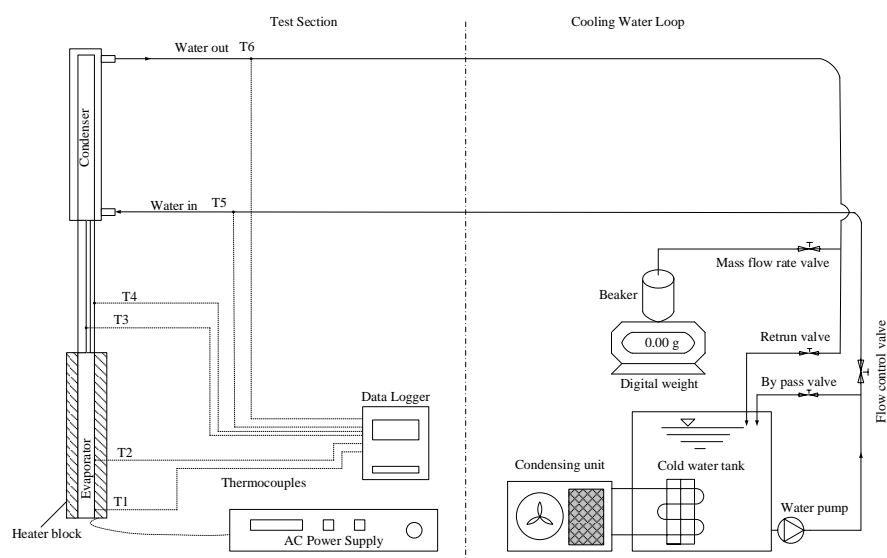
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เพื่อพัฒนารูปแบบของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่มีลักษณะเป็นชุดคล้ายกับแบบท่อเดี่ยว เพื่อความสะดวกในการประยุกต์ใช้งาน และเพื่อทดสอบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ทั้งแนวตั้ง แนวเอียง และแนวนอน

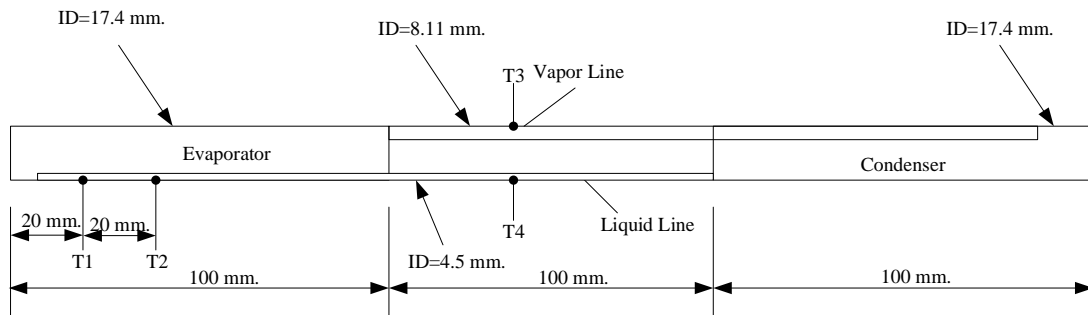
วิธีดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์ทดลอง

ภาพที่ 1 อุปกรณ์ในการทดลองประกอบด้วยส่วนทำน้ำเย็นและส่วนการทดสอบ ซึ่งในส่วนของการทำน้ำเย็นนั้นเป็นระบบปิดที่ประกอบด้วยระบบทำความเย็น R-22 โดยมีขดท่อทองแดงจุ่มอยู่ในถังน้ำเย็นขนาด 150L และสามารถควบคุมอุณหภูมิของน้ำให้คงที่ได้ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ โดยมีปั๊มน้ำทำหน้าที่ส่งน้ำเย็นจากถังไปยังส่วนการทดสอบ (Test section) และไหลกลับมายังถังทำน้ำเย็นอีกครั้ง ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นด้วยวาล์วปรับอัตราการไหล (Flow control valve) และตรวจสอบอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็นด้วยเครื่องซึ่งมวลแบบตัวเลขที่มีความละเอียด 1g ส่วนการทดสอบเป็นเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบกะทัดรัด ทำด้วยท่อทองแดงที่มีขนาดในส่วนต่าง ๆ ดังภาพที่ 2 ให้ความร้อนแบบไหลคงที่ แก้อีวาโปเรเตอร์ด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 220V ในลักษณะทรงกระบอกยาว 100 mm (Heater block) โดยรอบส่วนของอีวาโปเรเตอร์



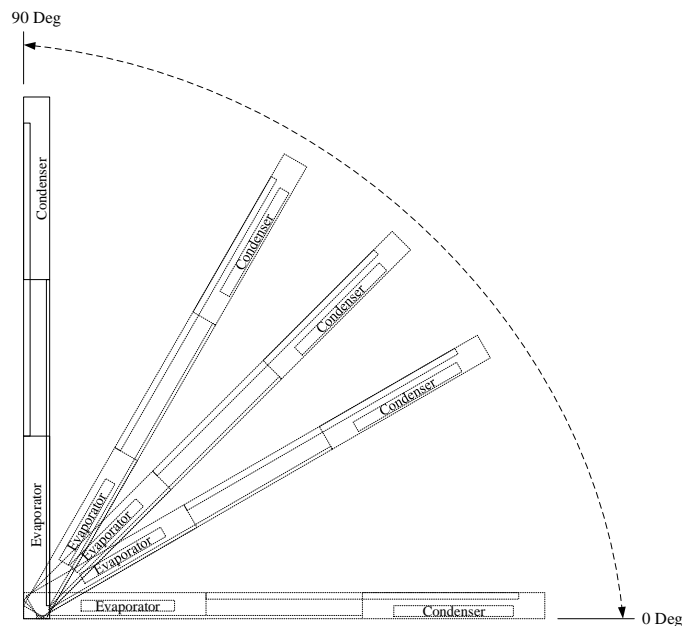
ภาพที่ 1 วงจรการทดลองเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบกะทัดรัด



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบและขนาดของเทอร์โมไซฟอน

เงื่อนไขการทดลอง

ใช้สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงานในท่อเทอร์โมไซฟอน ด้วยปริมาณการเติมเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2 เท่าของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ (V_E) โดยเป็นการเติมสารทำงานด้วยวิธีการอัดไอตามวิธีการของ Sukchana and Pratinthong [13] ซึ่งคำนวณเป็นมวลของของเหลวตามปริมาตรที่ต้องการเติม ทดลองโดยการให้โหลดความร้อนแบบคงที่เท่ากับ 50, 75, 100, 125, 150, 175 และ 200W ในขณะที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนออกด้วยน้ำเย็น โดยมีอุณหภูมิทางเข้าคงที่ 25°C ด้วยอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 400 g/min ทดสอบผลกระทบของมุมเอียงด้วยการเอียงมุมเท่ากับ 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90° เทียบกับแนวราบ ดังภาพที่ 3 โดยวัดอุณหภูมิผิวท่อที่ตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% และบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% ซึ่งเครื่องชั่งมวลแบบตัวเลขนั้นมีพิสัยการวัดสูงสุดได้ 1000g โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน 1% และวัดกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบตัวเลขมีพิสัยการวัดสูงสุดได้ 6000W โดยมีค่าความละเอียดที่สามารถอ่านได้เท่ากับ 1W และมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1%



ภาพที่ 3 ลักษณะการเอียงท่อในการทดลอง

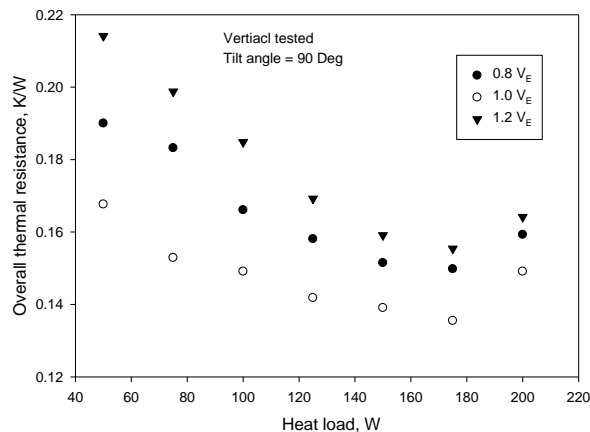
ผลการวิจัย

อัตราการเติมสารทำงานและไหลลดความร้อนที่เหมาะสม

ในการทดสอบใช้สารทำความเย็น R-134a ด้วยปริมาณการเติมเท่ากับ 0.8, 1.0 และ 1.2V_E เป็นการทดสอบเพื่อหาปริมาณการเติมสารทำงานและไหลลดความร้อนที่เหมาะสม โดยการทดสอบในแนวตั้งหรือมุมเท่ากับ 90° ให้ไหลลดความร้อนในช่วง 50–200W และพิจารณาปริมาณการเติมสารทำงานที่เหมาะสมด้วยค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ที่ต่ำสุด ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 1 [11] จากภาพที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อไหลลดความร้อนสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานความร้อนลดลง และเริ่มสูงขึ้นเมื่อไหลลดความร้อนมากกว่า 175W โดยพบว่าที่ปริมาณการเติมสารทำงานเท่ากับ 1.0V_E มีผลทำให้ค่าความต้านทานรวมของท่อความร้อนต่ำสุด ซึ่งเป็นผลมาจากผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอีวาโปเรเตอร์กับคอนเดนเซอร์ ($\bar{T}_e - \bar{T}_c$) ที่ต่ำกว่าปริมาณการเติมอื่น ๆ ทั้งนี้จุดเดือดของสารทำงานเป็นความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์กับแรงดันของสารทำงาน โดยที่ปริมาณการเติม 0.8 และ 1.2V_E จะมีพื้นที่ว่างสำหรับไอที่มากกว่าและน้อยกว่าที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 1.0V_E เมื่อมีไอระเหยเกิดขึ้นในพื้นที่ว่างสำหรับไอที่แตกต่างกันไปมีผลทำให้แรงดันของระบบสูงกว่าปริมาณการเติมเท่ากับ 1.0V_E ซึ่งจะช่วยให้จุดเดือด (\bar{T}_e) สูงตามไปด้วย จึงทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ที่คำนวณได้สูงกว่าที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 1.0V_E เนื่องจากผลต่างของ ($\bar{T}_e - \bar{T}_c$) สูงกว่านั่นเอง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ไหลลดความร้อนเท่ากับ 175W มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดในทุก ๆ อัตราการเติม แสดงให้เห็นว่าที่ไหลลดความร้อน 175W เป็นไหลลดความร้อนที่เหมาะสมกับสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็น R-134a สำหรับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบเปิดภายในที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการแสดงผลการทดลองต่อไปในงานวิจัยนี้จะเป็นผลการทดลองของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบเปิดภายในที่เติมสารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงานด้วยปริมาณการเติมเท่ากับ 1.0V_E โดยมวลของของเหลวตามปริมาตรของอีวาโปเรเตอร์

$$Z = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{Q_{in}} \quad (1)$$

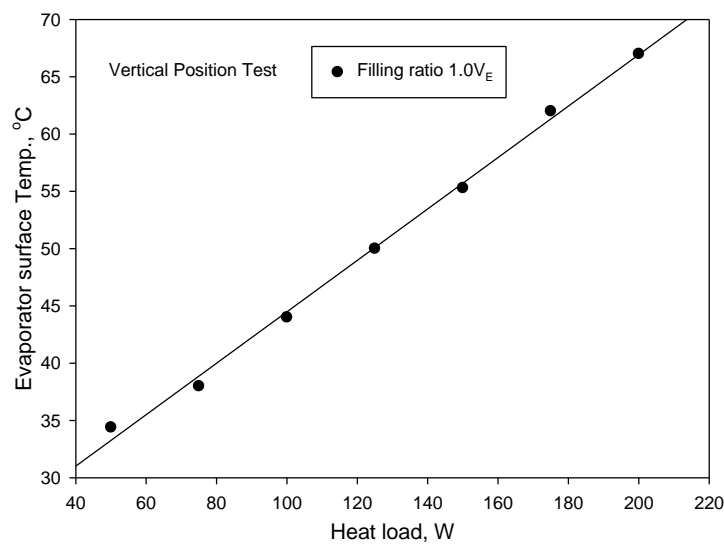
โดยที่ Z คือ ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน (K/W), \bar{T}_e คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของอีวาโปเรเตอร์ (K), \bar{T}_c คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ (K) และ Q_{in} ค่าความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอีวาโปเรเตอร์ (W)



ภาพที่ 4 ค่าความต้านทานความร้อนรวมเมื่อปริมาณการเติมสารทำงานแตกต่างกัน

ผลของโหลดความร้อนจุดเดือดสารทำงาน

จุดเดือดของสารทำงานสำหรับการทดลองในครั้งนี้จะถือว่ามีความเท่ากันกับอุณหภูมิผิวอิวาโปเรเตอร์ที่วัดได้ เนื่องจากท่อที่ใช้เป็นท่อทองแดงผนังบาง ซึ่งการวัดอุณหภูมิภายในโดยตรงสามารถทำได้ยากและเสี่ยงต่อการรั่วไหลของสารทำงานที่อยู่ภายใน จากอุณหภูมิผิวอิวาโปเรเตอร์ในภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเมื่อโหลดความร้อนเพิ่มขึ้นในลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถูกสร้างขึ้นสามารถถ่ายโอนความร้อนได้อย่างต่อเนื่องและปริมาณการเติมของสารทำงานนั้นเพียงพอและไม่มีการเหือดแห้ง (Dry out) ภายในอิวาโปเรเตอร์ รวมทั้งอุปกรณ์ที่มีผลต่อจุดเดือดของสารทำงานนั้นมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าที่โหลดความร้อน 200W มีผลทำให้ R-134a มีจุดเดือดเฉลี่ยเพียง 70°C ทั้งนี้หากเกิดการเหือดแห้งขึ้นจะสามารถสังเกตได้จากอุณหภูมิของอิวาโปเรเตอร์ที่ไม่คงที่และมักจะสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของ R-134a ซึ่งมีค่าเท่ากับ 101.1°C

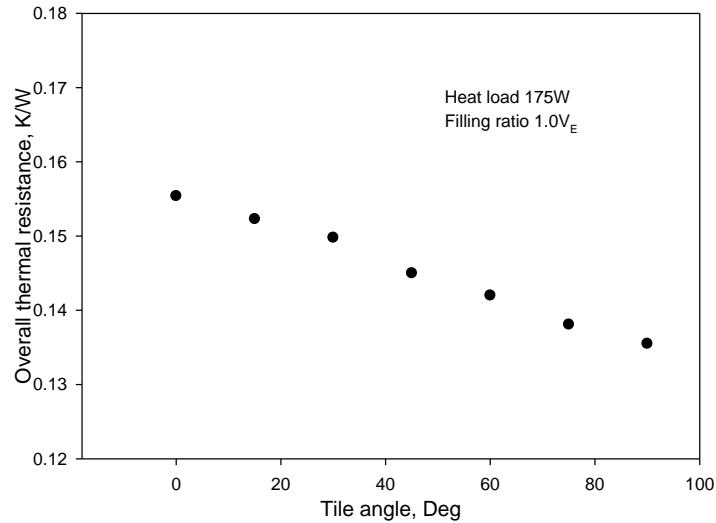


ภาพที่ 5 อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของอิวาโปเรเตอร์เมื่อโหลดความร้อนแตกต่างกัน

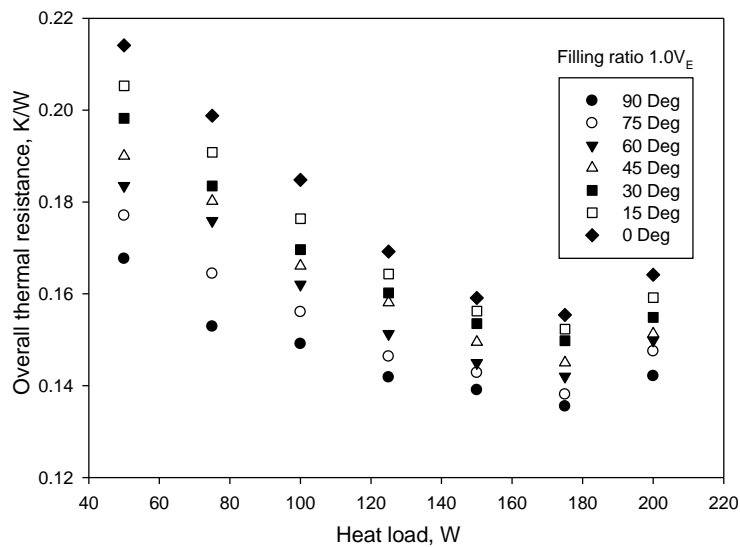
ผลของมุมเอียงต่อสมรรถนะถ่ายโอนความร้อน

การทดลองผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อน ทำการทดลองด้วยมุมเอียงจากแนวนอนถึงแนวตั้ง (0-90°) และโหลดความร้อนในช่วง 50-200W ในภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าเมื่อโหลดความร้อนคงที่มุมเอียงที่เพิ่มขึ้นของท่อความร้อนมีผลต่อค่าความต้านทานความร้อนรวมที่ลดลง โดยเป็นผลมาจากแรงในการไหลกลับของของเหลวที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงเพิ่มขึ้น Zhang et al. [14] ซึ่งจะแตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนทั่วไปที่มักจะมีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดอยู่ในช่วงของมุมเอียงเฉลี่ย 40-60° [15-17] เมื่อพิจารณาภาพที่ 7 พบว่าเมื่อโหลดความร้อนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงในทุก ๆ มุมเอียงและเริ่มมีค่าสูงขึ้นเมื่อโหลดความร้อนมากกว่า 175W เช่นเดียวกับกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 จากการทดลองผลของมุมเอียงต่อสมรรถนะถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถูกแบบเปิดภายใน พบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดลองสามารถถ่ายโอนความร้อนในแนวนอน (0°) ได้เช่นเดียวกับแนวตั้งโดยอาศัยแรงดันไอเป็นตัวขับเคลื่อนสารทำงานให้หมุนเวียนในระบบ แต่พบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมสูงกว่าแนวตั้งเฉลี่ย 0.02 K/W เนื่องจากการเคลื่อนที่ของสารทำงานที่เป็นไอและของเหลวต้องอาศัยแรงดันที่เกิดขึ้นจากการเดือดเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวนอน ซึ่งจะแตกต่างจากแนวตั้งโดยไอของสารทำงานนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยแรงลอยตัวและของเหลวสามารถไหลกลับได้ด้วยแรงโน้มถ่วง จึงเป็นผลทำให้การถ่ายโอนความร้อนในแนวนอน

มีจุดเดือดของสารทำงานสูงกว่าแนวตั้ง และทำให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมของการถ่ายโอนความร้อน
 แนวนอนสูงกว่าแนวตั้ง



ภาพที่ 6 ค่าความต้านทานความร้อนเมื่อมุมเอียงแตกต่างกันด้วยโหลดความร้อนคงที่ 175W



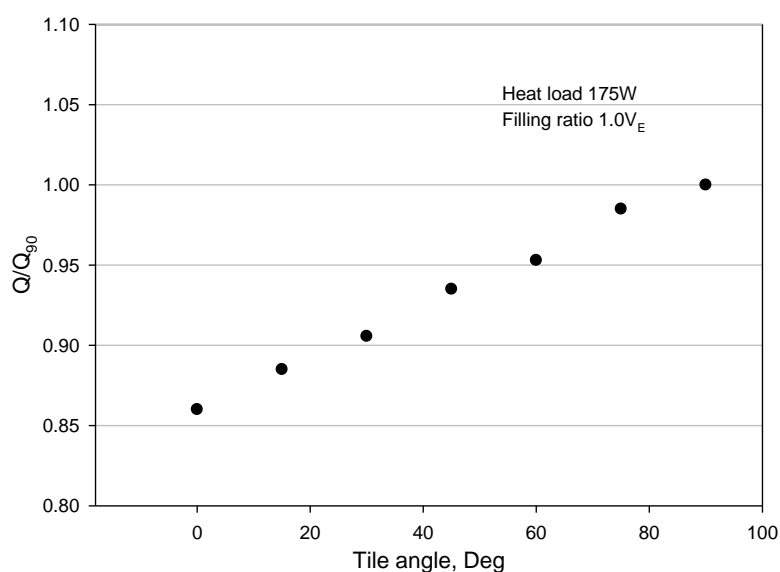
ภาพที่ 7 ค่าความต้านทานความร้อนรวมเมื่อมุมเอียงและโหลดความร้อนแตกต่างกัน

สมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนที่มุมเอียงในการทดลองต่างกันด้วยโหลดความร้อนเท่ากับ 175W โดยสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนที่มุมเอียงต่าง ๆ จะเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วน (Q/Q_{90}) [18] ระหว่างค่าความร้อน ที่คำนวณได้จากส่วนคอนเดนเซอร์ที่มุมเอียงต่าง ๆ (Q) กับค่าความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้ของท่อความร้อนเมื่ออยู่ในแนวตั้ง (Q_{90}) โดยที่ Q และ Q_{90} สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 2 จากภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนสูงขึ้นเมื่อมีมุมเอียงมากขึ้นจนมีค่าสูงสุด

ในแนวตั้ง แสดงให้เห็นว่าการเอียงตั้งขึ้นของเทอร์โมไซฟอนนั้นมีผลต่อการลดลงของค่าความต้านทานในการไหลของของไหลในระบบ จึงทำให้มีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้นตามมุมในแนวตั้ง

$$Q = \dot{m}c_p(T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (2)$$

โดยที่ Q คือ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากส่วนคอนเดนเซอร์ (W), \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), c_p คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg.K), $T_{w,in}$ และ $T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าและขาออก (K)



ภาพที่ 8 สมรรถนะของท่อความร้อนเมื่อมุมเอียงแตกต่างกันด้วยโหลดความร้อน 175W

สรุปและอภิปรายผล

เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมอบเปิดภายในที่สร้างขึ้น โดยออกแบบให้มีท่อนำไอระเหยไปยังคอนเดนเซอร์ และท่อนำของเหลวไหลกลับไปยังอีวาโปเรเตอร์ ประกอบเป็นชุดเดียวกันเพื่อให้มีขนาดเล็กลงและสะดวกในการติดตั้งสำหรับการใช้งานจริง ทดลองโดยการเติมสารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน ผลการทดลองพบว่าเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมอบเปิดภายในที่สร้างขึ้นสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ในทุก ๆ มุมเอียง รวมทั้งแนวนอน ซึ่งในแนวนอนนั้นมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนต่ำกว่าแนวตั้งเฉลี่ยประมาณ 15% นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการเติมสารทำงานที่เหมาะสมเท่ากับปริมาตรบรรจุของอีวาโปเรเตอร์ในขณะที่ความยาวของอีวาโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์เท่ากัน (เมื่อเอียงแนวนอนแล้วจะได้ปริมาตรของสารทำงานประมาณครึ่งหนึ่งของระบบ) โดยมีค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดเท่ากับ 0.135 K/W ด้วยโหลดความร้อนเท่ากับ 175W สำหรับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมอบเปิดภายในที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Dobriansky. (2011). Concepts of self-acting circulation loops for downward heat transfer (reversethermosiphons). *Energy Conversion and Management*. 52, 414-425.

- [2] H. Hagens, F.L.A. Ganzevles, C.W.M. van der Geld, M.H.M. GrootenH. Milanez, M.B.H. (2007). Air heat exchangers with long heat pipes: Experiments and predictions. *Applied Thermal Engineering*. 27, 2426-2434.
- [3] H. Jouhara, H. Ezzuddin. (2013). Thermal performance characteristics of a wraparound loop heat pipe (WLHP) charged with R-134A. *Energy*. 61, 128-138.
- [4] T. Sukchana, N. Pratinthong. (2016). A two-phase closed thermosyphon with an adiabatic section using a flexible hose and R-134a filling. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 77, 317-326.
- [5] T. Sukchana, N. Pratinthong. (2017). Effect of bending position on heat transfer performance of R-134a two-phase close loop thermosyphon with an adiabatic section using flexible hoses. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 114, 527-535.
- [6] A. Franco, S. Filippeschi. (2010). Experimental analysis of heat and mass transfer in small dimension two-phase loop thermosyphons. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*. 1 (2), 163-182.
- [7] E. Manavela Chiapero, M. Fernandino, C.A. Dorao. (2014). Experimental results on boiling heat transfer coefficient, frictional pressure drop and flow patterns for R-134a at a saturation temperature of 34°C. *international journal of refrigeration*. 40, 317-327.
- [8] Grooten, M.H.M., Geld, C.W.M. (2009). Predicting heat transfer in long, R-134a filled thermosyphons. *ASME Journal of Heat Transfer*. 131, 1-9.
- [9] Ali Chehade, A.A., Louahlia-Gualous, H., Le Masson, S., Victor, I., Abouzahab-Damaj, N. (2014). Experimental investigation of thermosyphon loop thermal performance. *Energy Conversion and Management*. 84, 671-680.
- [10] J. Rudorf. (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.
- [11] R. Singh, A. Akbarzadeh, M. Mochizuki. (2007). Miniature Loop Heat Pipe with Flat Evaporator for Cooling Computer CPU. *IEEE transactions on components and packaging technologies*. 30, (1).
- [12] Vladimir G. Pastukhov, Yury F. Maydanik, Valery I. Dmitrin. (2010). Evelopment and investigation of a cooler for electronics on the basis of two-phase loop thermosyphons. *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*. 1(1), 47-57.
- [13] T. Sukchana, N. Pratinthong. (2012). A technique of heat pipe filling with R-134a. in *Proc. 10th Eco-energy and Materials Sci. and Eng. Symposium Conf.* Ubon ratchathani, Thailand, December 5-8, 2012.
- [14] Zhang, P., Wang, B., Shi, W., Li, X. (2015). Experimental investigation on two-phase thermosyphon loop with partially liquid-filled downcomer. *Applied Energy*. 160, 10-17.
- [15] K.S. Ong, Md. Haider-E-lahi. (2003). Performance of R-134a-filled thermosiphon. *Applied Thermal Engineering*. 23, 2373-2381.
- [16] P. Naphon, P. Assadamongkol, T. Borirak. (2008). Experimental investigation of titanium nanofluids on the heat pipe thermal efficiency, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*. 35, 1316-1319.

- [17] P. Naphon, D. Thongkum, P. Assadamongkol. (2009). Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant–nanoparticles mixtures. *J. Energy Convers. Manage.* 50, 772-776.
- [18] T. Payakaruk, P. Terdtoon, S. Ritthidech. (2000). Correlations to predict heat transfer characteristics of an inclined closed two-phase thermosyphon at normal operating conditions, *Appl. Therm. Eng.* 20, 781-790.