

สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนท่อเดี่ยวที่มีส่วนอะเดียแบติกยาว $7.5L_e$ โดยใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นสารทำงาน

ธนาพล สุขชนะ*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

* Corresponding Author: ton0019@hotmail.com, thanaphols@rmutsb.ac.th

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 22 พฤษภาคม 2562

แก้ไข : 28 ตุลาคม 2562

ตอบรับ : 12 พฤศจิกายน 2562

คำสำคัญ :

สารทำความเย็น / สิ่งแวดล้อม /

เทอร์โมไซฟอน / จุดเดือด /

สมรรถนะ

การศึกษาเชิงทดลองในครั้งนี้กระทำขึ้นเพื่อทดสอบสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนแบบท่อเดี่ยวที่ใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นสารทำงาน ทั้งนี้ เทอร์โมไซฟอนทำด้วยท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 19.05 mm และมีส่วนอะเดียแบติกยาว $7.5L_e$ ใช้สารทำความเย็น R134a R32 R404a R407A และ R410 เป็นสารทำงาน โดยบรรจุสารทำความเย็นในอัตรา 20% ของปริมาตรระบบ ทำการทดลองในแนวตั้งตรง ทั้งแบบอุณหภูมิต่ำและภาวะความร้อนคงที่ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิทางเข้าและอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ จากผลการทดลอง พบว่า สารทำความเย็นต่างชนิดกันส่งผลให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนแตกต่างกัน โดยเฉพาะอุณหภูมิจุดเดือดของสารทำความเย็นนั้นมีผลกระทบต่อขีดจำกัดอุณหภูมิสูงสุดของการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนมีค่าเท่ากับ 0.132, 0.135, 0.140, 0.145 และ 0.146 K/W สำหรับสารทำงาน R32, R404A, R410A, R407C และ R134a ตามลำดับ

Heat Transfer Performance of a Single-Pipe Thermosyphon with Adiabatic Length of $7.5L_e$ Employing Environmentally Friendly Refrigerant as a Working Fluid

Thanaphol Sukchana*

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra District, Phranakhon Si Ayutthaya

* Corresponding Author: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th
Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: May 22, 2019

Revised: October 28, 2019

Accepted: November 12, 2019

Keywords:

Refrigerant / Environment /

Thermosyphon /

Boiling Point / Performance

The objective of this study was to investigate the performance of a single-pipe thermosyphon (TS) using an environmentally friendly refrigerant as a working fluid. TS is made of copper pipes with an outside diameter of 19.05 mm and has an adiabatic length of $7.5L_e$. Five refrigerants, namely, R134a, R32, R404a, R407C, and R410A, were tested as a working fluid with a filling ratio of 20% of the TS volume. The experiments were conducted with TS oriented vertically under either a constant temperature or constant heat flux condition. A condenser was cooled by cool water at a constant inlet temperature and mass flow rate. The results showed that different refrigerants affected differently the heat transfer performance of TS. In particular, the critical temperature of the refrigerants was noted to affect the maximum temperature limit of the heat transfer of TS. In addition, it was found that the total thermal resistance of TS was 0.132, 0.135, 0.140, 0.145 and 0.146 K/W when R32, R404A, R410A, R407C, and R134a were used, respectively.

1. บทนำ

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดท่อเดี่ยวเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้ในการถ่ายโอนความร้อนและการประยุกต์เพื่อใช้ในงานแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถออกแบบสร้างได้ง่ายต้นทุนต่ำ และมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายโอนความร้อนได้ดี ทั้งนี้ มีตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้เทอร์โมไซฟอนที่ขนาดเท่ากัน มีสมรรถนะแตกต่างกัน ซึ่งตัวแปรที่กล่าวถึงก็คือสารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในเพื่อทำหน้าที่ในการถ่ายโอนความร้อน โดยสารทำงานแต่ละชนิดนั้นจะมีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แตกต่างกัน จึงทำให้สมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนเปลี่ยนไปเมื่อสารทำงานต่างชนิดกัน จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนของนักวิจัยในอดีตดัง เช่น การเพิ่มสมรรถนะด้วยสารทำงานแบบผสมได้ทดลองโดย Naphon และคณะ [1, 2] ซึ่งใช้ผสม titanium ผสมกับ R11 เรียกชื่อเป็น titanium nanofluids ผลการทดลองพบว่าเทอร์โมไซฟอนสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 10% ต่อมา Smith และคณะ [3] ได้ทำการทดลองโดยใช้สนามไฟฟ้า (Electrohydrodynamic) เพื่อเพิ่มสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนพบว่าสมรรถนะเพิ่มขึ้น 40–70% หลังจากนั้น Gedik [4] พบว่าเทอร์โมไซฟอนอันเดียวกันแต่ใช้สารทำงานแตกต่างกันจะต้องปรับเงื่อนไขในการใช้งานให้เหมาะสมแตกต่างกันโดยเฉพาะอัตราการเติมสารทำงานและอัตราการไหลของการหล่อเย็น นอกจากการเพิ่มสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนแล้วยังมีการประยุกต์ใช้ ดังเช่น Ordaz-Flores [5] ได้ทดลองใช้เทอร์โมไซฟอนช่วยในการทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์แทนรูปแบบเดิม โดยใช้สารทำงานเป็น R134a, R410A และ acetone แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแสงอาทิตย์กับน้ำซึ่งพบว่าเทอร์โมไซฟอนสามารถทำน้ำร้อนได้ไม่ต่างจากระบบปกติแต่ยังติดปัญหาเรื่องของแรงดันและการติดตั้ง Hagens และคณะ [6] ได้ทดลองอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนด้วยอากาศโดยใช้ท่อความร้อนที่มีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงใช้สารทำความเย็น R134a เป็นสารทำงานและพบว่าสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีเมื่ออัตราการเติมสารทำงานอยู่ในช่วง 50–80% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ ต่อมา Grooten และ Geld [7] ศึกษาผลการเติม R134a ต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีความยาว

อยู่ในช่วง 1–3 m และมีอัตราส่วนความยาวของอีวาโปเรเตอร์อยู่ในช่วง 0.4–0.5 ของความยาวทั้งหมดโดยพบว่าอัตราการเติมสารทำงาน R134a ที่เหมาะสมในช่วง 30–62% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์จะเห็นได้ว่าสารทำความเย็นโดยเฉพาะ R134a ถูกนำมาใช้เป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนและทำการทดลองกันมากขึ้น ซึ่งต่อมา Yau และ Foo [8] ได้ทดลองการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่มีการหมุนเหวี่ยง โดยใช้ R134a, R22 และ R410A เป็นสารทำงาน ซึ่งพบว่าการทำงานของเทอร์โมไซฟอนภายใต้สภาวะดังกล่าวสารทำงานที่แตกต่างกันในการทดลองไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเทอร์โมไซฟอน หลังจากนั้น Solomon [9] พบว่า R600a และ R290 สามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอนได้ประมาณ 33% และลดค่าความต้านทานความร้อนรวมได้เฉลี่ย 20% ด้วยกัน ในขณะที่ R134a และ R410A ถูกใช้เป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนและทดสอบโดย Gedik และคณะ [10] และ Ong และคณะ [11] ซึ่งพบว่า R134a ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า R410A ในเวลาต่อมา Ma [12, 13] ได้ทำการทดลองเทอร์โมไซฟอนที่มีสารทำงานเป็น hydrocarbon และ refrigerants ผลการทดลองพบว่าสารทำความเย็น R134a และ R245fa ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าสารทำงานอื่นที่ใช้ในการทดลองดังเช่น R601, R245fa, R600a, R1234ze, R152a, R245fa/R152a, และสาร R601/R245fa นอกจากนี้ Naresh และ Balaji [14] ได้ทดสอบและยืนยันว่าเทอร์โมไซฟอนที่เติมด้วย R134a มีสมรรถนะสูงกว่าใช้น้ำเป็นสารทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ Gorecki [15] ทดสอบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำความเย็น R134a, R404A และ R407C เป็นสารทำงานพบว่าสารทำงานต่างชนิดกันจะมีอัตราการเติมที่เหมาะสมแตกต่างกันโดย R134a และ R404A จะให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีที่อัตราการเติม 10% ในขณะที่ R407C จะมีอัตราการเติมที่เหมาะสมของสารเท่ากับ 30% โดย Dobriansky และ Wojcik [16] ได้รวบรวมและเสนอผลงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำและสารทำความเย็นเป็นสารทำงานสรุปไว้ว่ากลุ่มสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นจะให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าน้ำในช่วงอุณหภูมิทำงาน 30–100°C สำหรับงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนในประเทศไทยนั้นได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในระดับพื้นฐานและการประยุกต์ใช้งานดังเช่น Wannapakhe [17] ได้รวบรวม

การประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนในงานต่างๆ ในประเทศไทย โดยสารทำงานที่พบมักเป็นน้ำกลั่นและบางงานวิจัยมีสารทำงานเป็นสารทำความเย็นเช่น R123, R22 และ R134a ต่อมา Srimuang และ Kokpimai [18] พบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบนเพิ่มขึ้นได้ด้วยการใช้ผงทองแดงกับน้ำเป็นสารทำงาน ซึ่งในปีเดียวกัน Siricharoenpanich และคณะ [19] เพิ่มประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศด้วยท่อความร้อนแบบวงรอบได้เฉลี่ยประมาณ 20% โดยใช้ R134a, R123 และ Ethanol เป็นสารทำงาน หลังจากนั้น Pipatpaiboon และคณะ [20] ได้ศึกษาคุณลักษณะของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบได้ข้อสรุปไว้ว่าการเลือกใช้สารทำงานให้เหมาะสมกับท่อควร พิจารณา อุณหภูมิเฉลี่ยการทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นพิจารณาเลือกสารทำงานจากช่วงอุณหภูมิทำงานของสารทำงานที่ครอบคลุมอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนจึงจะทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมกับการทำงานนั้นๆ ต่อจากนั้นในปี พ.ศ. 2561 Nakkaew และ Wongwises [21] ได้สรุปการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนในการเพิ่มสมรรถนะของระบบปรับอากาศ ด้วยการติดตั้งท่อความร้อนทำให้ระบบปรับอากาศมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น และการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง ด้วยการใช้ท่อความร้อนสำหรับลดความชื้น การนำความเย็นของอากาศที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ใหม่

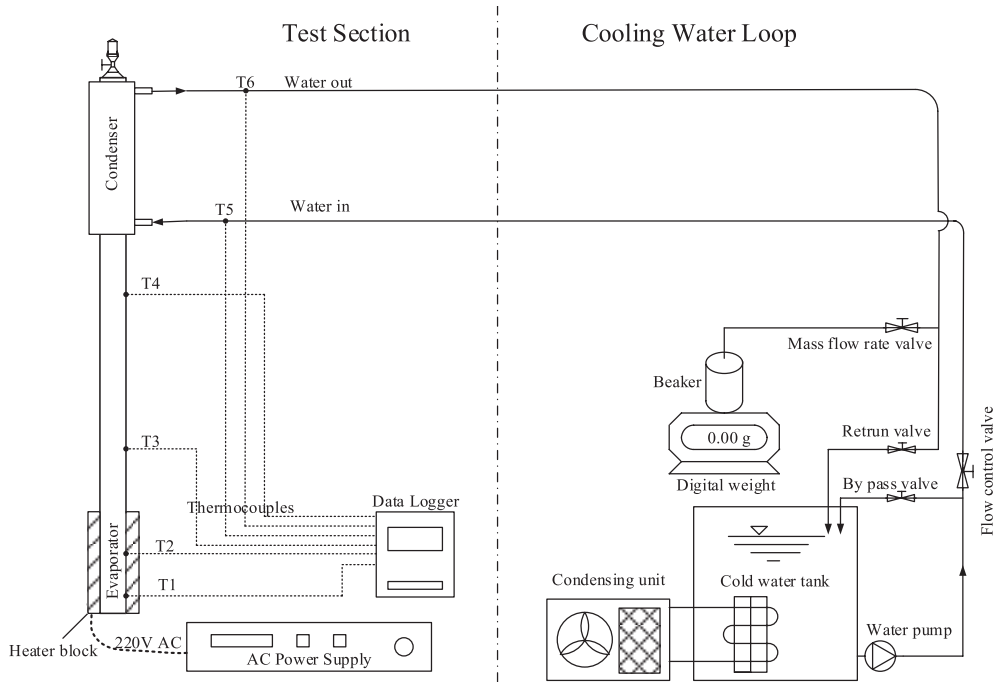
จากผลงานวิจัยต่างๆ ในอดีตนักวิจัยจำนวนมากที่ได้ทดสอบสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำความเย็นเป็นสารทำงาน โดยเฉพาะ R134a, R404A และ R407C ซึ่งมักจะพบผลสรุปว่า R134a ให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่า สำหรับการศึกษาวิจัยเชิงทดลองในครั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของสารทำความเย็นในกลุ่มที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่นิยมใช้และหาได้ง่ายในปัจจุบันประกอบด้วย R134a, R32, R404A, R407C และ R410A กับเทอร์โมไซฟอนที่มีช่วงความยาวของอะเดียแบติกยาวมากเป็น 7.5 เท่าของส่วนความยาวอิวาโปรเตอร์ (L_p) เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ออกแบบใช้งานสำหรับการถ่ายโอนความร้อนที่มีระยะห่างของ

จุดรับความร้อนและจุดระบายความร้อนที่มากกว่า ที่จะเลือกใช้สารทำความเย็นในกลุ่มที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเป็นสารทำงาน เช่น ตู้ MDB หรือสวิทช์บอร์ด (Main Distribution Board) ที่มักจะเกิดการสะสมความร้อนเนื่องจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า และเกิดการเสียหายหรือไฟไหม้เนื่องจากฉนวนละลายและการคลายตัวเนื่องจากความร้อนของสกรูจับยึด ซึ่งโดยปกติจะต้องควบคุมให้อุณหภูมิไม่เกิน 70°C

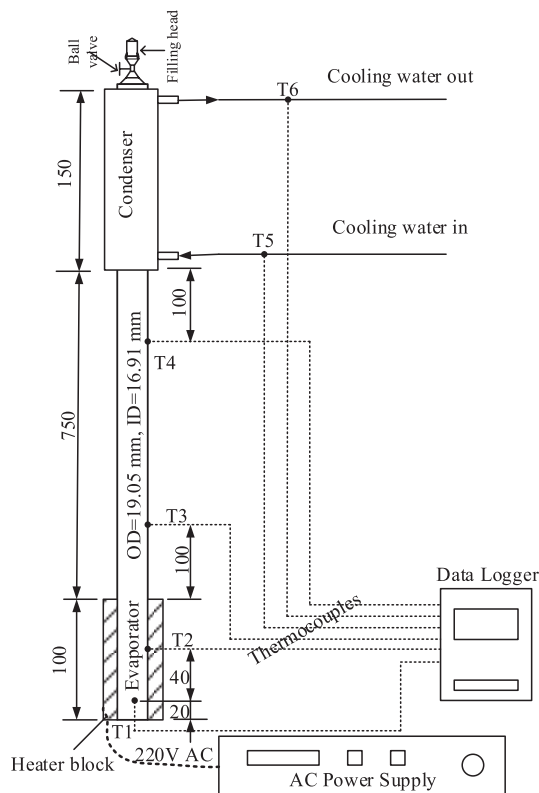
2. การทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งประกอบด้วย ส่วนทำน้ำเย็นและส่วนการทดสอบ โดยส่วนของการทำน้ำเย็นนั้นเป็นระบบปิดที่ประกอบด้วยระบบทำความเย็นโดยมีชุดท่อทองแดงจุ่มอยู่ในถังน้ำเย็นขนาด 150 L และสามารถควบคุมให้อุณหภูมิ น้ำค้างที่ได้ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ เมื่ออุณหภูมิ น้ำได้ตามที่ต้องการปั๊มน้ำจะทำหน้าที่ส่งน้ำเย็นจากถังไปยังส่วนการทดสอบ (Test section) และไหลกลับมายังถังเก็บ ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นสามารถควบคุมโดยการปรับวาล์วทางเข้าของส่วนการทดสอบและตรวจสอบอัตราการไหลเชิงมวลด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล สำหรับท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในการทดสอบทำด้วยท่อทองแดงที่มีขนาดดังรูปที่ 2 ในส่วนของอิวาโปรเตอร์ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 220 V ในลักษณะทรงกระบอกโดยรอบและวัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยติดตั้งภายนอกท่อเพื่อวัดอุณหภูมิผิวอิวาโปรเตอร์ 2 ตำแหน่ง (T1, T2) และอุณหภูมิผิวส่วนอะเดียแบติก 2 ตำแหน่ง (T3, T4) ด้วยระยะห่างดังรูปที่ 2 ในขณะที่คอนเดนเซอร์ประกอบอยู่ภายในห้องระบายความร้อนทรงกระบอกที่ระบายความร้อนด้วยน้ำและวัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออก (T5, T6) โดยสอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าสัมผัสกับน้ำโดยตรงเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 เทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดลอง

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่สร้างขึ้นมีความยาวในส่วนของอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ 100 mm คอนเดนเซอร์ 150 mm และส่วนอะเดีย-แบติกเท่ากับ 750 mm จะได้อัตราส่วนของส่วนอะเดีย-แบติกต่อส่วนของอีวาโปเรเตอร์เท่ากับ 7.5 ทำการทดลองโดยมี 2 เงื่อนไขหลักคือให้ความร้อนแบบอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90°C และเงื่อนไขที่สองคือให้ความร้อนแบบโหลดคงที่ เท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 250 W โดยคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิทางเข้าคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 25°C และอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 300 g/min เทอร์โมไซฟอนนั้นใช้สารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 5 ชนิดเป็นสารทำงานซึ่งประกอบด้วย R134a, R32, R404A, R407C และ R410A โดยมีปริมาณการเติมคิดเป็นของเหลวเท่ากับ 20% (0.2VT) ของปริมาตรระบบตามผลการวิจัยด้วยสารทำความเย็น R134a ของ Sukhana

และ Pratinthong [22] ซึ่งเป็นการทดลองสมรรถนะการทำงานของเทอร์โมไซฟอนที่มีส่วนของอะเดีย-แบติกยาวเท่ากับ $7.0 L_e$ ทำการบันทึกอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ในการวัดเท่ากับ 0.1% ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% โดยทำการทดลองที่เงื่อนไขเดียวกันจำนวน 3 รอบการทดลองแล้วนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณผลต่อไป อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็นใช้วิธีตวงพร้อมจับเวลาแล้วชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบดิจิตอลที่มีย่านการวัด 1,000 g และมีความละเอียดในการอ่านค่าได้ต่ำสุด 1 g และวัดกำลังไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดแบบดิจิตอลซึ่งมีย่านการวัด 6,000 W มีความละเอียดในการอ่านค่าได้ต่ำสุดเท่ากับ 1 W โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1% โดยค่า Error ของเครื่องมือวัดสามารถคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดค่าตัวแปรต่างๆ ในการทดลองได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดในการทดลอง

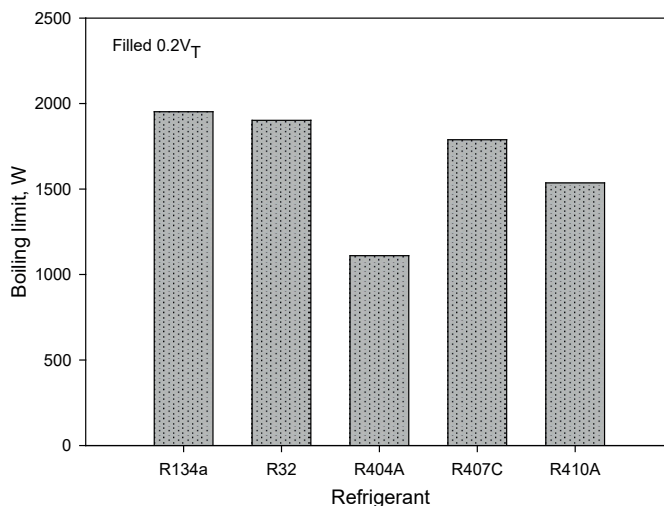
Parameters	Maximum uncertainties
Temperature	± 0.14 °C
Cooling water mass flow rate	± 3.0 g
Heat load	± 2.56 %

2.3 ขีดจำกัดการเดือด

จากอัตราการเติมสารทำงาน 20% ของปริมาตรระบบสามารถตรวจสอบโหลดความร้อนที่จะป้อนให้กับเทอร์โมไซฟอนสูงสุดได้ในเบื้องต้นจากการคำนวณด้วยสมการที่ (1) ตามทฤษฎีของ Reay และ Kew [23] (Boiling limit) โดยกำหนดให้ไอร่าเหยมีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับเงื่อนไขในการทดลองที่ 90°C และของเหลวควบแน่นอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับน้ำหล่อเย็นที่ 25°C ซึ่งใช้ค่าความร้อนแฝงและค่าความหนาแน่นของสารทำงานต่างๆ จากตารางสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังแสดงผลในรูปที่ 3 โดย R404A สามารถรับโหลดความร้อนได้ต่ำสุดประมาณ 1,000 W แต่ในการทดลองใช้โหลดความร้อนสูงสุด

250 W ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานได้ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าสารทำความเย็นแต่ละชนิดมีความสามารถในการรับโหลดความร้อนแตกต่างกันด้วยปริมาตรการเติมเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมบัติทางเทอร์โม-ไดนามิกส์ที่แตกต่างกันของสารทำความเย็น โดยเฉพาะค่าความจุความร้อนจำเพาะและค่าความร้อนแฝงจะมีผลโดยตรงกับโหลดความร้อนใช้งาน [15] เพราะฉะนั้นในการทดลองหรือการออกแบบใช้งานจริงนั้นจะต้องทราบโหลดความร้อนที่แน่นอนเพื่อการเติมสารทำงานที่เหมาะสมกับโหลดความร้อนที่ต้องการ

$$\dot{q} = 0.12L\rho_v \left[\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right]^{0.6} \quad (1)$$



รูปที่ 3 ขีดจำกัดการเดือดของสารทำความเย็นในการทดลองจากการคำนวณ

โดยที่ \dot{q} คือฟลักซ์ความร้อน (kW/m^2), L คือค่าความร้อนแฝง (kJ/kg), L คือค่าความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว (kg/m^3) และ ρ_l คือค่าความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะไอ (kg/m^3)

เท่ากับ 0.005 kg/s

$$Q = mc_p \Delta T \quad (2)$$

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การทดลองสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของสารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่ใช้เป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนแบบยาวที่มีส่วนอะเดียแบติกยาวกว่า $5.0 L_c$ นั้นทำการทดลองโดยมี 2 เงื่อนไขหลักคือทดลองแบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และทดลองแบบให้ไหลลดความร้อนคงที่ ซึ่งการเข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบนั้นสังเกตจากอุณหภูมิทั้ง 6 ตำแหน่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงโดยจะใช้เวลาการเข้าสู่สภาวะคงที่ในแต่ละเงื่อนไขของการทดลองประมาณ 30 นาที และปล่อยทิ้งไว้อีกประมาณ 30 นาทีจึงทำการบันทึกผลการทดลอง

3.1 ผลทดลองแบบอุณหภูมิคงที่

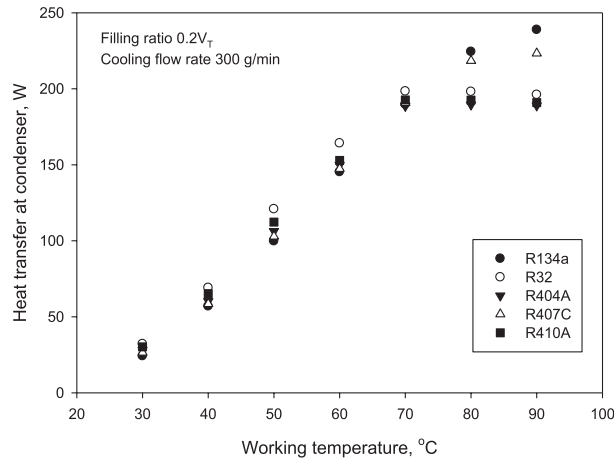
ในการทดลองด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิคงที่นั้นเป็นการทดลองโดยควบคุมให้อุณหภูมิผิวอิวาโปรเตอร์ (T_1) คงที่ 7 ระดับคือ 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90°C แล้วคำนวณความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนจากน้ำหล่อเย็นในส่วนของคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (2) [4, 10, 22] โดยน้ำหล่อเย็นมีอัตราการไหลคงที่ 300 g/min ซึ่งเป็นอัตราการไหลเชิงมวล

โดยที่ Q คือความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้จากอิวาโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ (W), m คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg.K) และ ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นเท่ากับ $T_6 - T_5$ (K)

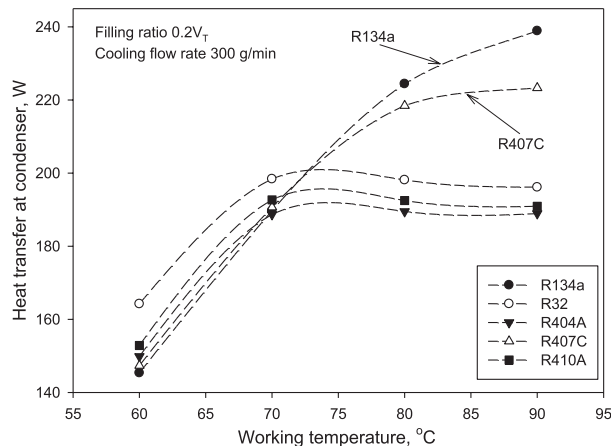
รูปที่ 4 เมื่ออุณหภูมิผิวอิวาโปรเตอร์คงที่ในแต่ละระดับจะเห็นว่าสารทำความเย็นที่ถูกบรรจุเป็นสารทำงานนั้นมีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนได้แตกต่างกันและสามารถถ่ายโอนความร้อนได้สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโดยพบว่าสารทำความเย็น R32 สามารถถ่ายโอนความร้อนได้สูงสุดรองลงมาเป็น R410A, R404A, R407C และ R134a ตามลำดับ เมื่อพิจารณาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้านแรงดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิคงที่จากตารางที่ 2 [24] ทั้งนี้ [15] ได้สรุปไว้ว่าสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานมีผลต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน จากการพิจารณาพบว่าแรงดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็นที่อุณหภูมิคงที่เดียวกันมีค่าไม่เท่ากันซึ่งแรงดันไออิ่มตัวของสารทำความเย็น R32 มีค่าสูงสุดในขณะที่แรงดันไอต่ำสุดที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นสารทำความเย็น R134a แสดงว่า

แรงดันไออิมตัวมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของสารทำความเย็น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Chiapero และคณะ [25] ซึ่งพบว่าแรงดันตกคร่อม (Pressure Drop) ในระบบมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนโดยแรงดันตกคร่อมจะทำให้แรงดันไออิมตัวลดลง ในขณะที่เคลื่อนที่เพื่อถ่ายโอนความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์จะเป็นผลทำให้ความเร็วในการทำงานลดลง นอกจากนี้ในรูปที่ 5 ยังพบอีกว่าเมื่ออุณหภูมิผิวสูงกว่า 70°C ความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนของ R32, R404A และ R410A ลดลงและไม่สามารถถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70°C เนื่องจากสารทำความเย็นทั้ง 3 ชนิดมีอุณหภูมิวิกฤตใกล้เคียงกับ 70°C จากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80°C สารทำความเย็น R407C จะไม่สามารถถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นได้

เนื่องจากอุณหภูมิวิกฤตเช่นกัน จะเหลือเพียงสารทำความเย็น R134a ที่ยังสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีที่อุณหภูมิ 80-90°C ซึ่งจากการทดลองแบบอุณหภูมิคงที่พบว่าแรงดันไออิมตัวของสารทำงานที่สูงกว่ามีผลทำให้เกิดการไหลเวียนในการถ่ายโอนความร้อนด้วยแรงดันตกคร่อมได้ดีกว่า [25] แต่พบว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานมีผลต่ออุณหภูมิสูงสุดหรือจุดเดือดที่มีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนไม่เกินอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานนั้นๆ เนื่องจากอุณหภูมิวิกฤตจะเป็นผลทำให้สารทำงานในระบบมีสถานะเป็นไอ 100% จึงไม่สามารถรับและถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นได้หรือเรียกว่าปรากฏการณ์สารทำงานแห้ง (Burn-out) [23] เกิดขึ้นภายในระบบเนื่องจากอุณหภูมิทำงานสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตนั่นเอง



รูปที่ 4 ขีดจำกัดการเดือดของสารทำความเย็นในการทดลองจากการคำนวณ



รูปที่ 5 พิจารณาความแตกต่างในช่วงอุณหภูมิ 60-90°C

ตารางที่ 2 Thermodynamic Properties with temperature constant of refrigerants

Temp. Operating, °C	Saturated pressure, kPa				
	R134a	R32	R404A	R407C	R410A
30	770.2	1927.5	1428.8	1359.9	1889.5
40	1016.6	2478.8	1829.8	1749.6	2426.0
50	1317.9	3141.2	2410.6	2216.4	3071.6
60	1681.8	3933.2	2885.1	2769.6	3842.6
70	2116.8	4876.8	3575.0	3419.3	4771.3
80	2633.2	-	-	4174.4	-
90	3244.2	-	-	-	-

3.2 ผลการทดลองแบบโหลดคงที่

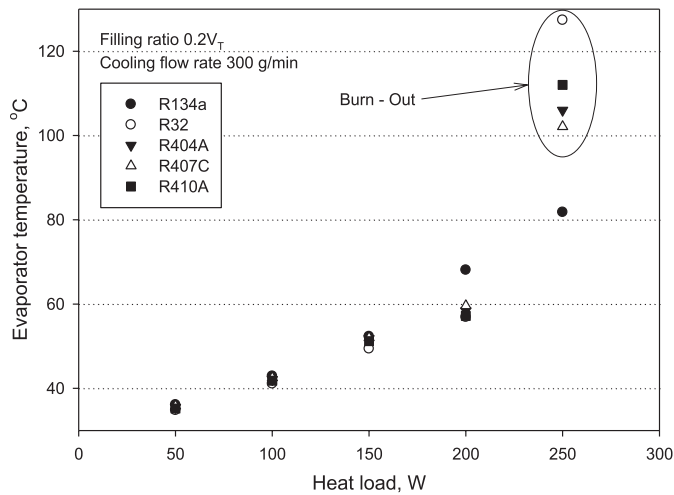
ในการทดลองด้วยเงื่อนไขโหลดความร้อนคงที่นั้น เป็นการทดลองโดยควบคุมด้วยการให้โหลดความร้อนแก่อิวาโปรเตอร์แบบคงที่ 5 ระดับคือ 50, 100, 150, 200 และ 250 W เพื่อสังเกตอุณหภูมิผิวอิวาโปรเตอร์ที่ถือว่าเป็นจุดเดือดของสารทำงานภายในเนื่องจากท่อทองแดงเป็นท่อผนังบางและประสิทธิภาพของระบบในการถ่ายโอนความร้อนจากอิวาโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ โดยควบคุมให้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็นคงที่เท่าเดิม รูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิผิวอิวาโปรเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อโหลดความร้อนสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการระเหยเป็นไอของสารทำงานที่เพิ่มขึ้นตามโหลดความร้อนที่ได้รับภายในปริมาตรที่จำกัดจึงทำให้เกิดแรงดันภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กันทั้งแรงดันและอุณหภูมิตามหลักเทอร์โมไดนามิกส์จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่เมื่ออัตราการเกิดไอและอัตราการควบแน่นสัมพันธ์กัน และเมื่อให้โหลดความร้อนเท่ากับ 250W แก่เทอร์โมไซฟอนที่มี R32, R404A, R407C และ R410A เป็นสารทำงานภายในพบว่าอุณหภูมิผิวของอิวาโปรเตอร์จะเพิ่มสูงมากกว่าอุณหภูมิวิกฤตในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นความร้อนที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Thermal runaway) เนื่องจากโหลดความร้อนที่โหลดเกินกว่าที่จะสามารถถ่ายโอนไปยังอิวาโปรเตอร์ได้จึงทำให้เกิดอุณหภูมิและแรงดันภายในระบบสูงเกินจุดวิกฤตจึงทำให้เกิดการ Burn-out ของสารทำงานและไม่สามารถถ่ายโอนความร้อนเพิ่มเติมได้นอกจากนี้

ยังพบว่าเมื่อโหลดความร้อนไม่เกิน 150W เทอร์โมไซฟอนที่มีสารทำความเย็น R32 และ R410A เป็นสารทำงานจะมีจุดเดือดต่ำกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่น เมื่อพิจารณาสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้านจุดเดือดในตารางที่ 3 [24] พบว่า R32 และ R410A มีจุดเดือดที่แรงดันบรรยากาศต่ำกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นที่ใช้ทดลอง แสดงว่าสารทำงานที่มีจุดเดือดที่แรงดันบรรยากาศต่ำกว่านั้นก็มีผลทำให้อุณหภูมิในการทำงานต่ำไปด้วยเมื่อนำมาใช้เป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอน

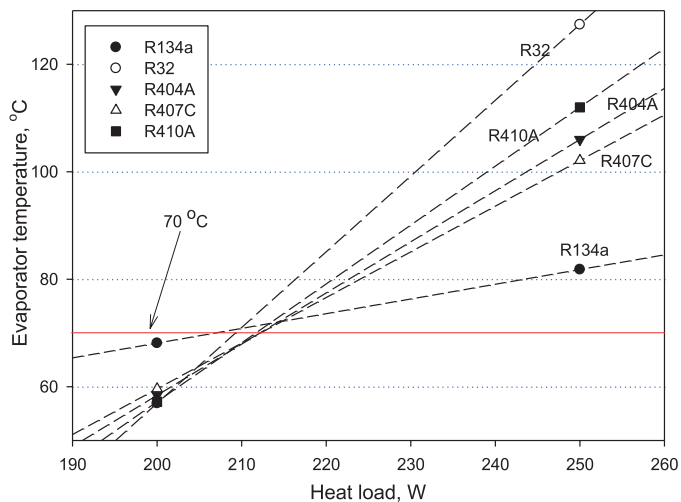
รูปที่ 7 พิจารณาช่วงโหลดความร้อนที่มีผลทำให้อุณหภูมิทำงานของระบบเข้าใกล้และสูงเกินอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งจะทำให้สารทำงานภายในอยู่ในสภาวะไอตรงและไม่เหมาะแก่การทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อน จากรูปจะเห็นได้ว่าสารทำความเย็นทั้ง 5 ชนิดที่ใช้ในการทดลองจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 70°C เมื่อโหลดความร้อนประมาณ 210W หรือประมาณ 35 kW/m² อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีค่ามาตรฐานอุณหภูมิเฉลี่ยไม่เกิน 70°C ซึ่งนำเสนอไว้ในการทดลองการระบายความร้อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของ Sardarabadi และคณะ [26] ในขณะเดียวกันพบว่าสารทำความเย็น R134a ยังคงมีเสถียรภาพในการถ่ายโอนความร้อนอย่างต่อเนื่องถึงแม้ว่าโหลดความร้อนจะสูงถึง 250 W หรือ 42 kW/m² เนื่องจากมีอุณหภูมิวิกฤตสูงถึง 101°C จึงมีขีดจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าสารทำความเย็นชนิดอื่นที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 3 Physical Properties of refrigerants

Refrigerant	Boiling Point At Atm., °C	Critical Temp., °C	Critical Pressure, kPa (abs)
R134a	-26.06	101.08	4063.3
R32	-51.65	78.11	5782.0
R404A	-46.45	72.07	3731.5
R407C	-43.63	86.03	4630.0
R410A	-51.44	71.36	4903.0



รูปที่ 6 อุณหภูมิผิววาล์วโปรเตอร์เมื่อโหลดความร้อนคงที่

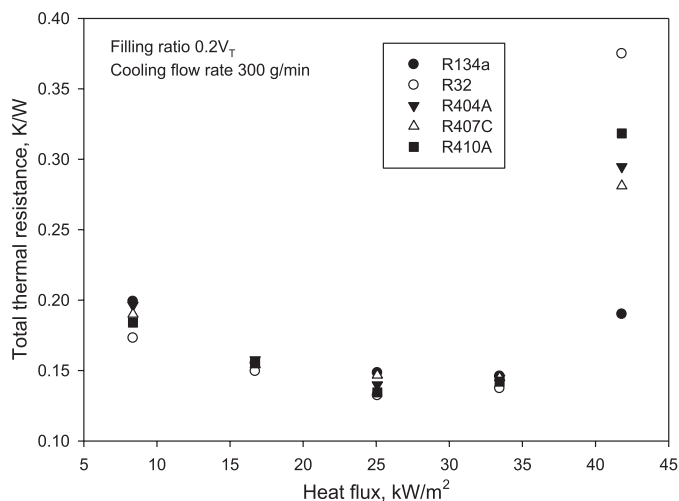


รูปที่ 7 พิจารณาความแตกต่างในช่วงโหลดความร้อน 200–250 W

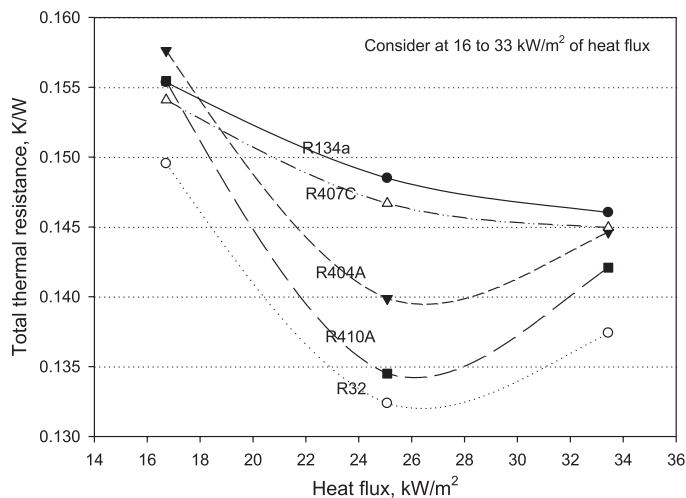
3.3 ค่าความต้านทานความร้อนรวม

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ของเทอร์โมไซฟอนที่ทดลองด้วยสารทำความเย็นที่ 5 ชนิด โดยการคำนวณด้วยสมการที่ (3) [4, 9, 10, 22] ดังรูปที่ 8 โดยโพลความร้อนที่ให้แก่อิวาโปเรเตอร์เปลี่ยนเป็นฟลักซ์ความร้อนด้วยสมการที่ (4) [22] เพื่อให้ง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน จากกราฟจะเห็นว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงเมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมจากนั้นค่าความต้านทานความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นซึ่งเป็นจุดที่ไม่เหมาะสมแก่การใช้งาน เพื่อให้เห็นความแตกต่างของสมรรถนะของสารทำความเย็นทั้ง 5 ชนิด จึงพิจารณาค่าความต้านทานความร้อนในช่วง ฟลักซ์

ความร้อนเท่ากับ 16–33 kW/m² ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าสารทำความเย็น R32 มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดอย่างชัดเจนเมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 25 kW/m² และเป็นฟลักซ์ความร้อนที่เหมาะสมหรือมีผลทำให้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดของสารทำความเย็น R32, R404A และ R410A ในขณะที่สารทำความเย็น R134a และ R407C มีค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดเมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 33 kW/m² สำหรับอัตราการเติมที่ใช้ในการทดลอง ซึ่ง [15] พบว่าสารทำความเย็นต่างชนิดกันจะเหมาะสมกับเทอร์โมไซฟอนด้วยอัตราการเติมที่แตกต่างกัน และ [11] พบว่าค่าความต้านทานความร้อนต่ำสุดขึ้นอยู่กับอัตราการเติมที่เหมาะสมด้วยเช่นกัน



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 9 พิจารณาความแตกต่างในช่วงฟลักซ์ความร้อน 16–33 kW/m²

$$Z = \frac{\Delta T}{Q_{in}} \quad (3) \quad \text{สามารถคำนวณหาได้โดยสมการที่ (5) [22] และนำเสนอไว้ในตารางที่ 4 เป็นความไม่แน่นอนของค่าความต้านทาน}$$

$$q = \frac{Q_{in}}{S_E} \quad (4) \quad \text{ความร้อนรวม (Z)}$$

โดยที่ Z คือค่าความต้านทานความร้อนรวม (K/W), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์กับคอนเดนเซอร์ (K), Q_{in} คือโหลดความร้อนที่ให้บริการอีวาโปเรเตอร์ (kW), q คือฟลักซ์ความร้อนของอีวาโปเรเตอร์ (kW/m²) และ S_E คือพื้นที่ผิวของอีวาโปเรเตอร์ (m²)

$$\frac{u(R)}{R} = \pm \left[\left(\frac{u(x_1)}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{u(x_n)}{x_n} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

โดยที่ R คือ ค่าที่ต้องการคำนวณจากการทดลอง, $u(R)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ R , x และ n คือ ตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของ R , $u(x, n)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของ R

3.4 การวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของผลการ

ทดลอง

ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการทดลอง

ตารางที่ 4 The uncertainties of the total thermal resistance

Heat flux (kW/m ²)	Uncertainty(%)
8.35	±5.83
16.71	±1.87
25.07	±0.76
33.43	±0.32
41.79	±0.12

4. สรุปผลการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบสมรรถนะของสารทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเมื่อนำมาใช้เป็นสารทำงานในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดท่อเดี่ยวประกอบด้วยสารทำความเย็น R134a, R32, R404A, R407C และ R410A จากผลการทดลองพบว่าสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ ทั้งแรงดันอิ่มตัว อุณหภูมิอิ่มตัวและจุดเดือดที่แรงดันบรรยากาศเป็นตัวแปรหลักต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของสารทำความเย็น [4, 11, 15] ดังเช่นสารทำงานที่มีจุดเดือดที่แรงดันบรรยากาศต่ำกว่าจะมีผลทำให้อุณหภูมิในการทำงานของระบบต่ำกว่าเมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากัน และพบอีกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานจะเป็นขีดจำกัดของอุณหภูมิสูงสุดในการถ่ายโอนความร้อนของสารทำความเย็น และจากการทดลองด้วยอัตรา

การเติม 0.2V_T พบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมของในเทอร์โมไซฟอนสำหรับ R32, R404A และ R410A มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.132, 0.135 และ 0.140 ด้วยฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 25 kW/m² ขณะที่ R134a และ R407C มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.146 และ 0.145 ด้วยฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 33 kW/m² ซึ่งสูงกว่างานวิจัย [22] ที่ใช้สารทำงาน R-134a โดยมีช่วงแอดเดียบะตึกยาว 7.0L_c ซึ่งเป็นท่อที่สามารถปรับโค้งงอได้เหมาะสมกับฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 23.7 kW/m² ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะและขนาดของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดลองรวมทั้งรูปแบบในการระบายความร้อนในส่วนของคอนเดนเซอร์

สำหรับการวิจัยต่อยอดหรือการนำผลการทดลองนี้ไปประยุกต์ใช้งานนั้น สามารถที่จะเลือกสารทำความเย็นชนิดใด

ก็ได้เป็นสารทำงานโดยพิจารณาจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ในเบื้องต้น ซึ่งควรจะต้องทดสอบหาอัตราการเติมที่เหมาะสมกับแหล่งความร้อน รูปแบบของท่อความร้อน รวมทั้งรูปแบบการระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพแตกต่างกันระหว่างน้ำกับอากาศ

5. เอกสารอ้างอิง

1. Naphon, P., Assadamongkol, P. and Borirak, T., 2008, "Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on the Heat Pipe Thermal Efficiency," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, pp. 1316–1319.
2. Naphon, P., Thongkum, D. and Assadamongkol, P., 2009, "Heat Pipe Efficiency Enhancement with Refrigerant–Nanoparticles Mixtures," *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 772–776.
3. Smith, K., Byrne, G., Kempers, R. and Robinson, A.J., 2016, "Electrohydrodynamic Augmentation of a Reflux Thermosyphon," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79, pp. 175–186.
4. Gedik, E., 2016, "Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon at Different Operating Conditions," *Energy and Buildings*, 127, pp. 1096–1107.
5. Ordaz-Flores, A., García-Valladares, O. and Gómez, V.H., 2011, "Experimental Characterisation and Technical Feasibility of a Closed Two-Phase vs a Conventional Solar Water Heating Thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, 31, pp. 1313–1322.
6. Hagens, H., Ganzevles, F.L.A., Van Der Geld, C.W.M. and Grooten, M.H.M., 2007, "Air Heat Exchangers with Long Heat Pipes: Experiments and Predictions," *Applied Thermal Engineering*, 27, pp. 2426–2434.
7. Grooten, M.H.M. and Geld, C.W.M., 2009, "Predicting Heat Transfer in Long, R-134a Filled Thermosyphons," *ASME Journal of Heat Transfer*, 131, pp. 1-9.
8. Yau, Y.H. and Foo, Y.C., 2011, "Comparative Study on Evaporator Heat Transfer Characteristics of Revolving Heat Pipes Filled with R134a, R22 and R410A," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, pp. 202–211.
9. Brusly Solomon, A., Roshan, R., Vincent, W., Karthikeyan, V.K. and Godson Asirvatham, L., 2015, "Heat Transfer Performance of an Anodized Two-Phase Closed Thermosyphon with Refrigerant as Working Fluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, pp. 521–529.
10. Gedik, E., Yilmaz, M. and Kurt, H., 2016, "Experimental Investigation on the Thermal Performance of Heat Recovery System with Gravity Assisted Heat Pipe Charged with R134a and R410A," *Applied Thermal Engineering*, 99, pp. 334–342.
11. Ong, K.S., Goh, G., Tshai, K.H. and Chin, W.M., 2016, "Thermal Resistance of a Thermosyphon Filled with R410A Operating at Low Evaporator Temperature," *Applied Thermal Engineering*, 106, pp. 1345–1351.
12. Ma, L., Shang, L., Zhong, D. and Ji, Z., 2017, "Experimental Investigation of a Two-Phase Closed Thermosyphon Charged with Hydrocarbon and Freon Refrigerants," *Applied Energy*, 207, pp. 665–673.
13. Ma, L., Shang, L., Zhong, D. and Ji, Z., 2017, "Experimental Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon Charged with Hydrocarbons and Freon Refrigerants for Renewable Energy Applications," *Energy Procedia*, 105, pp. 5147 – 5152.
14. Naresh, Y. and Balaji, C., 2018, "Thermal Performance of an Internally Finned Two Phase Closed Thermosyphon with Refrigerant R134a: A Combined Experimental and Numerical Study," *International Journal of Thermal Sciences*, 126, pp. 281–293.
15. Gorecki, G., 2018, "Investigation of Two-Phase Thermosyphon Performance Filled with Modern HFC

- Refrigerants,” *Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 2131–2143.
16. Dobriansky, Y. and Wojcik, R., 2019, “State of the Art Review of Conventional and Anti-Gravity Thermosyphons: Focus on Two Working Fluids,” *International Journal of Thermal Sciences*, 136, pp. 491–508.
17. Wannapakhe, S., 2012, “Heat Pipe and Thermosyphon Applications in Thailand,” *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 22 (3), pp. 689-702. (In Thai).
18. Srimuang, W. and Kokpimai, D., 2013, “Enhancement of Heat Transfer Efficiency of Flat Two Phase Closed Thermosyphon by Using Copper Nano Powder with Water as Working Fluid,” *Burapha Science Journal*, 18 (1), pp. 125–136. (In Thai).
19. Siricharoenpanich, A, Rittidech, S. and Bubphachot, B., 2013, “Performance Improvement of Air Conditioner by using Closed-loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves,” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 33 (3), pp. 294–299. (In Thai).
20. Pipatpaiboon, N., Rittidech, S. and Paramatthanuwat, T., 2013, “Heat Transfer Characteristics of Oscillating Heat Pipes,” *KMUTT Research and Development Journal*, 36 (2), pp. 259–270. (In Thai).
21. Nakkaew, S. and Wongwises, S., 2018, “Application of Heat Pipes to Enhance Performance of Air Conditioning System,” *KMUTT Research and Development Journal*, 41 (3), pp. 267–279. (In Thai).
22. Sukchana, T. and Pratinthong, N., 2016, “A Two-Phase Closed Thermosyphon with an Adiabatic Section Using a Flexible Hose and R-134a Filling,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 77, pp. 317–326.
23. Reay, D.A. and Kew, P.A., 2006, *Heat Pipes*, 5th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 377 p.
24. ASHRAE, 2005, *Thermophysical Properties of Refrigerants*.
25. Chiapero E.M., Fernandino, M. and Dorao, C.A., 2014. “Experimental Results on Boiling Heat Transfer Coefficient Frictional Pressure Drop and Flow Patterns for R134a at a Saturation Temperature of 34 °C,” *International Journal of Refrigeration*, 40, pp. 317-327.
26. Sardarabadi, H., Heris, S.Z., Ahmadpour, A. and Passandide-Fard, M., 2019, “Experimental Investigation of a Novel Type of Two-Phase Closed Thermosyphon Filled with Functionalized Carbon Nanotubes/Water Nanofluids for Electronic Cooling Application,” *Energy Conversion and Management*, 188, pp. 321-332.