

ผลกระทบของอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อหน้าไอร่เหยต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Effect of the length to inner diameter ratio of vapor tube on the performance of a vacuum closed loop thermosyphon

สรารวุฒิ สิริเกษมสุข¹, ธนาพล สุขชนะ^{1*}

Sarawut Sirikasemsuk¹, Thanaphol Sukchana^{1*}

Received: 8 February 2022 ; Revised: 3 March 2022 ; Accepted: 23 March 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบขนาดของท่อหน้าไอร่เหยที่มีผลต่อสมรรถนะในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะโดยรวมของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด โดยเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดทำด้วยท่อทองแดงทรงกระบอกมีปริมาตรความจุ 3000 ซีซี เติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานในปริมาณ 10% (300 ซีซี) ของปริมาตรความจุ ต้มน้ำด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 530, 1085, 1640, 2210 2780 และ 3350 W ทดสอบกับท่อหน้าไอร่เหยที่ทำด้วยท่อทองแดงชนิด L (Type L) 7 ขนาด ตามมาตรฐาน ASTM B88 โดยมีความยาวส่วนการทดสอบคงที่เท่ากับ 400 mm คิดเป็นอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (L/d) เท่ากับ 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 และ 17.50 ทดลองโดยภายในเทอร์โมไซฟอนอยู่ภายใต้สภาวะเริ่มต้นเป็นสุญญากาศ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิคงที่ 25°C และอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 1 kg/min ผลการทดลองพบว่าค่า L/d มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดเมื่อให้ความร้อนในปริมาณคงที่อุณหภูมิอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อ L/d มากกว่า 20 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงเมื่อ L/d ลดลง โดยค่าความต้านทานความร้อนรวมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.0343°C/W เมื่อปริมาณความร้อนเท่ากับ 2780 W ด้วย L/d เท่ากับ 17.50

คำสำคัญ: ไอน้ำ เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัด อุณหภูมิอิ่มตัว สภาวะสุญญากาศ การควบคุมอุณหภูมิ

Abstract

The effect of steam pipe size on the performance of closed loop thermosyphon under vacuum condition was studied to determine the relationship of heat load to pipe size affecting the saturation temperature and overall performance of the boiler. A closed loop thermosyphon was made of cylindrical copper pipes with a capacity of 3000 cc. Distilled water was used as the working fluid at 10% (300 cc) of capacity volume. The water was boiled by electric heaters of 530, 1085, 1640, 2210, 2780 and 3350 W. The steam pipes for testing were made of type L copper pipes of 7 sizes in accordance with ASTM B88 STD with a test section length of 400 mm. Length to the inside diameter (L/d) of pipe was in the ratio of 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 and 17.50. The boiler was under vacuum initial condition in the experiment, the water cooled condenser had a constant temperature of 25°C and constant flow rate of 1 kg/min. The results showed that the L/d value had an effect on the closed loop thermosyphon performance and when heated at a constant volume, the saturation temperature increased with the L/d and was greater than 20. The total thermal resistance was also decreased with a decrease in L/d . The lowest total thermal resistance of 0.0343°C/W was when the heat load content was 2780 W with L/d of 17.50.

Keywords: steam, close loop thermosyphon, saturated temperature, vacuum condition, temperature controlling

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

* ติดต่อ: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th

¹ Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Tambon Hantra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000 Thailand

* Corresponding author: e-mail: ton0019@hotmail.com, thanaphol.s@rmutsb.ac.th

บทนำ

น้ำเป็นสารทำงานที่สามารถถ่ายโอนความร้อนไปใช้งานได้ด้วยการเปลี่ยนสถานะด้วยการรับความร้อนจนเป็นไอน้ำ และสามารถเคลื่อนที่ไปด้วยความดันไอโดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกในการขับเคลื่อน สำหรับเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดทั่วไปมักสร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์ระบายความร้อน หากใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อยู่ภายในระบบ น้ำจะทำหน้าที่รับและถ่ายโอนความร้อนด้วยการเดือดระเหยและความดันไอลอยเวียนเป็นวงจรอยู่ภายในระบบปิด จากการศึกษาทางานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน เทอร์โมไซฟอนขนาดจิ๋วรวมถึงการประยุกต์ใช้งานสำหรับงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ของ (Aghel *et al.*, 2017 ; Jafari *et al.*, 2017 ; Lataoui & Jemni, 2017 ; Naresh & Balaji, 2017 ; Kim *et al.*, 2018) ผลการศึกษาโดยสรุปพบว่าปริมาณการเติมน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 - 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย (ฮีวาโปรเรเตอร์) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะในการออกแบบ โดยพิจารณาจากความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด นอกจากอัตราการเติมน้ำที่เหมาะสมแล้วยังพบว่าการออกแบบคอนเดนเซอร์แบบไหลขวา (Aghel *et al.*, 2017) และครีบบภายในคอนเดนเซอร์ (Kim *et al.*, 2018) ช่วยเพิ่มสมรรถนะได้ 10-17% นอกจากนี้ (Kiseev & Sazhin, 2019) ได้ทดสอบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่มีส่วนทำระเหยรูปทรงเป็นหม้อต้มโดยใช้สารทำงานหลักเป็นน้ำกลั่น ซึ่งรูปแบบของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดนั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันจึงมั่นใจได้ว่าจะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้เช่นเดียวกัน ในส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทอร์โมไซฟอนและการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทยนั้นพบว่า (Dangton *et al.*, 2018) ได้ออกแบบสร้างหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนกำเนิดไอน้ำเร็ว สามารถใช้ในการผลิตไอน้ำได้รวดเร็วกว่าเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาและแบบท่อไฟ โดยใช้เทคนิคการพ่นน้ำให้เป็นฝอยละอองด้วยหัวฉีด (Cansee, 2020) พบว่าการผลิตไอน้ำสำหรับนึ่งก้อนเชื้อเห็ดด้วยเทอร์โมไซฟอนที่มีท่อรับความร้อนด้านล่างและท่อรับความร้อนบริเวณปล่องไฟ มีประสิทธิภาพในการผลิตไอน้ำและประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าแบบไม่มีท่อรับความร้อนบริเวณปล่องไฟ ก้อนเห็ดนี้ (Sa-adchom *et al.*, 2013) ได้ประยุกต์ใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดอุณหภูมิ 120-140°C เพื่ออบแห้งเนื้อปลาบดแผ่นซึ่งพบว่าอุณหภูมิของไอน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการลดลงของความชื้น ต่อมา (Nuthong & Uengkimbuan, 2014) ได้ศึกษาการอบพริกไทยด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 120-160°C ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันกับ (Sa-adchom *et al.*, 2013) จากงานวิจัยในอดีตจะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้ไอน้ำในการอบแห้งเป็นการใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100°C โดยตรง ซึ่งการใช้ไอน้ำโดยตรงนั้นมีความอันตรายมีความซับซ้อนใน

การควบคุมระบบการทำงานและสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถึงแม้ว่าจะสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายก็ตาม

การศึกษาวิจัยผลกระทบของขนาดท่อนำไอระเหยนี้เป็นงานวิจัยต่อยอดจากงานวิจัยของ (Sukchana, 2020 ; Jaiboonma and Sukchana, 2022) ที่ได้ออกแบบสร้างระบบการไหลเวียนของไอน้ำที่ระเหยและของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนในระบบปิดที่มีส่วนการทำระเหยเป็นหม้อต้ม พร้อมทั้งได้ศึกษาหาปริมาณการเติมสารทำงานที่เป็น น้ำ เอทานอล และแอซิโตน ที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นสารทำงาน ในการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาทดสอบตัวแปรขนาดของท่อนำไอระเหยที่จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด ในรูปแบบของอุณหภูมิมีตัวและค่าความต้านทานความร้อนรวม นอกจากการทดสอบตัวแปรขนาดของท่อนำไอระเหยที่เหมาะสมแล้ว ยังมีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้งานเพื่อการออกแบบระบบการอบแห้งแบบสัมผัสผนังท่อโดยตรง และอบแห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C ไปใช้งานได้ เนื่องจากระบบเป็นแบบปิดอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ จะช่วยให้ประหยัดพลังงานและใช้ได้กับแหล่งพลังงานได้หลากหลายยิ่งขึ้น เช่น เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนทิ้งจากกระบวนการผลิต เป็นต้น

การทดลอง

1. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ทดลองเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดดัง Figure 1 ประกอบด้วย ส่วนการทำระเหย (Evaporator) ทำด้วยท่อทองแดงหนา 3 mm ขนาดความจุ 3,000 cc มีฮีทเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V สำหรับให้ความร้อนในการทดลอง โดยมีท่อสำหรับสอดใส่เพื่อไม่ให้สัมผัสกับน้ำโดยตรงและสามารถเปลี่ยนขนาดกำลังของฮีทเตอร์ได้สะดวกในการทดลอง ติดตั้งท่อนำไอระเหย (Vapor line) และท่อของเหลวไหลกลับ (Liquid line) เป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 25.4 mm (1 นิ้ว) ให้อยู่ในแนวตั้ง (90°) โดยต่อให้เป็นระบบปิด มีข้อต่อ (Fitting) สำหรับการปรับเปลี่ยนขนาดของท่อนำไอระเหยในการทดลอง มีความยาว 400 mm ซึ่งท่อนำไอระเหยในการทดลองเป็นท่อทองแดงชนิด L (Type L) ตามมาตรฐานของ ASTM B88 ดัง Table 1 โดยคิดเป็นขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (Inner diameter, ID) จากขนาดมาตรฐาน (Standard size) ลบด้วยสองเท่าของความหนามาตรฐานของท่อทองแดง Type L ในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดจะมีอุปกรณ์ควบแน่น (Condenser) เป็นแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ เพื่อให้เกิดการระเหยและ

การควบคุมเป็นวงจรอยู่ภายใต้ระบบปิดที่เป็นสุญญากาศ โดยน้ำเย็นจะถูกส่งมาจากชุดทำน้ำเย็น (Cold water unit) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ($\pm 0.2^{\circ}\text{C}$) ได้ตลอดการทดลอง

Table 1 The ratio of inner diameter to the length of the seam pipe (ASTM B88)

Standard size (mm)	ID (d), (mm)	L/d
6.35	4.83	82.82
9.53	8.01	49.94
12.70	10.92	36.63
15.88	13.84	28.90
19.05	16.91	23.65
22.23	19.95	20.05
25.40	22.86	17.50

2. เครื่องมือวัดและการวัด

ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น และปริมาณความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้า และมีค่าความไม่แน่นอนสูงสุด (Uncertainty) ของพารามิเตอร์ที่ได้จากเครื่องมือวัดดัง Table 3 โดยวัดอุณหภูมิด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเท่ากับ (Error) $\pm 0.1\%$ ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบตัวเลข (Data logger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL820 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.05\%$ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น วัดด้วยวิธีการตวง และชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขรุ่น BL-01 ที่มีย่านการวัดสูงสุด 3,000 g และมีค่าความละเอียด 1 กรัม ในส่วนของปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบตัวเลขยี่ห้อ MASTECH รุ่น M9805G ซึ่งมีย่านการวัดกระแส 200 แอมแปร์ แล้วคำนวณเป็นกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้าด้วยสมการที่ (1) ซึ่งได้ค่าในการวัดและคำนวณดัง Table 2

Table 2 The heater power test values

Power according (W)	Power test (W)
500	530
1000	1085
1500	1640
2000	2210
2500	2780
3000	3350

Table 3 The uncertainty of the parameters from the measurements in the experiment

Parameters	Maximum uncertainties
Temperature	$\pm 0.14^{\circ}\text{C}$
Cooling water mass flow rate	$\pm 0.166 \text{ g/s}$
Heat load	$\pm 4.02\%$

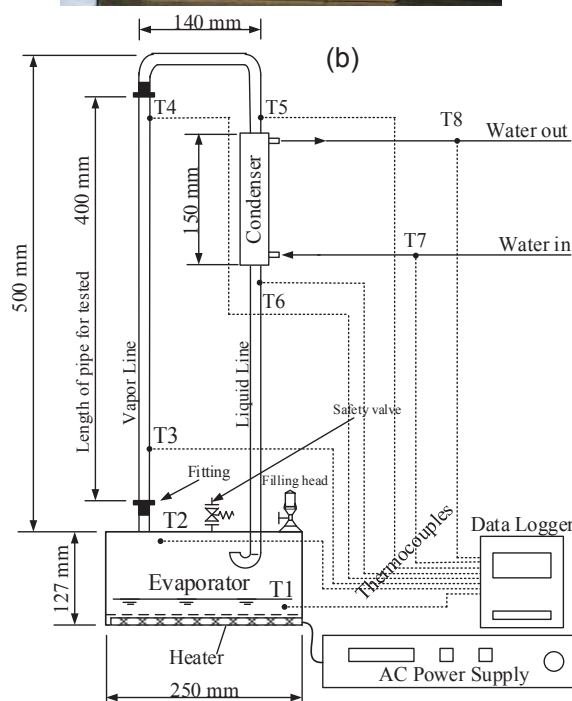


Figure 1 (a) A vacuum closed loop thermosyphon for tested (b) Experimental equipment diagram

3. การวัดอุณหภูมิ

ในการวัดอุณหภูมินั้นวัดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดย T1 เป็นการวัดอุณหภูมิของของเหลวอิมิตัวโดยมีหัววัด (Probe) สัมผัสกับของเหลว และ T2 วัดอุณหภูมิของไออิมิตัวเพื่อตรวจสอบการเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะทำให้ทราบว่ามีปริมาณน้ำที่เติมในระบบนั้นเพียงพอหรือไม่ จุดวัดอุณหภูมิ T3, T4, T5 และ T6 เป็นการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวด้านนอกของท่อทองแดง เพื่อใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการไหลของไอน้ำ ซึ่งจุดวัด T3, T4 และ T5 ใช้สังเกตการเคลื่อนที่ของไอน้ำภายในท่อไอระเหย จุดวัด T6 ใช้สังเกตการควบแน่นไอน้ำเป็นของเหลว และสังเกตสภาวะคงตัวของระบบการถ่ายโอนความร้อนเมื่ออุณหภูมิ T1-T8 คงที่ทั้งหมด ก่อนบันทึกผลการทดลอง สำหรับจุดวัดอุณหภูมิ T7 และ T8 เป็นการติดตั้งให้ส่วนปลายของเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นโดยตรงเพื่อใช้ผลต่างอุณหภูมิ ($\Delta T = T8 - T7$) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนความร้อนจากการเดือดไปยังคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (2)

4. เงื่อนไขในการทดลอง

การทดลองเป็นการหาความสัมพันธ์ของปริมาณความร้อนและขนาดของท่อไอระเหยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด ทั้งอุณหภูมิอิมิตัว ความดันอิมิตัว และค่าความต้านทานความร้อนรวมของการถ่ายโอนความร้อน โดยใช้ Vacuum compressor รุ่น VE125N ทำระบบของเทอร์โมไซฟอนให้เป็นสุญญากาศ ซึ่งได้แรงดันสุญญากาศในระบบตอนเริ่มต้นครั้งแรกเท่ากับ 2 kPa จากนั้นเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานด้วยปริมาตร 300 ซีซี หรือเท่ากับความจุ 10% ของปริมาตรเทอร์โมไซฟอน (Sukchana, 2020) แล้วปิดระบบให้อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ทดลองโดยให้ความร้อนแบบคงที่ (Heat load) ด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ 530, 1085, 1640, 2210, 2780 และ 3350 W ไอน้ำจะไหลผ่านท่อไอระเหยที่มีช่วงทดสอบยาว 400 mm และมีขนาดดัง Table 1 จะได้อัตราส่วน L/d ที่ใช้ในการทดลอง เท่ากับ 82.82, 49.94, 36.63, 28.90, 23.65, 20.05 และ 17.50 คอนเดนเซอร์หล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ 25°C ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) เท่ากับ 16.66×10^{-3} kg/s โดยการทดลองในแต่ละเงื่อนไขนั้นจะทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง แล้วตัดผลการทดลองที่มีค่าอุณหภูมิอิมิตัวสูงสุดและต่ำสุดออก จะเหลือผลที่ได้จากการทดลองจำนวน 3 ครั้ง จากนั้นนำมาเฉลี่ยเป็นผลการทดลองและนำเสนอเป็นผลในการวิจัย

5. การคำนวณผลการทดลอง

ในการคำนวณผลที่ได้จากการทดลองตามเงื่อนไขการทดลองนั้น สามารถคำนวณโดยเริ่มจากการตรวจสอบ

กำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (P_E) ที่ใช้เป็นแหล่งความร้อนด้วยสมการที่ (1) (Sukchana, 2020) โดยการวัดแรงเคลื่อน (V) และกระแสไฟฟ้า (I) ทั้งนี้ไม่รวมพลังงานจาก Vacuum compressor เนื่องจากเป็นการทำสุญญากาศเพียงครั้งเดียวในช่วงการเติมสารทำงาน และสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนจากฮีวาโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ (Q_{cond}) ด้วยสมการที่ (2) (Sukchana, 2020) โดยใช้ผลต่างอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ($T8 - T7$) จากนั้นตรวจสอบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของชุดเทอร์โมไซฟอน (η_{th}) ด้วยสมการที่ (3) (Sukchana, 2020) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนได้ต่อปริมาณความร้อนที่ให้ โดยไม่พิจารณากำลังไฟฟ้าสำหรับหมุนเวียนของน้ำหล่อเย็น เนื่องจากการตรวจสอบการป้องกันการสูญเสียความร้อนเพื่อปรับปรุงก่อนทดลองจริง และสุดท้ายคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (R) ด้วยสมการที่ (4) (Kiseev & Sazhin, 2019) เพื่อประโยชน์ในการออกแบบสร้างหรือประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่มีลักษณะเดียวกันกับอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง โดยใช้ผลต่างของอุณหภูมิที่เป็นค่าเฉลี่ยดังสมการที่ (5)

$$P_E = VI \quad (1)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}c_p(T8 - T7) \quad (2)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{cond}}{P_E} \times 100 \quad (3)$$

$$R = \frac{\Delta T}{Q_{cond}} \quad (4)$$

$$\Delta T = [T1 - \frac{T7 - T8}{2}] \quad (5)$$

โดยที่ คือกำลังของฮีตเตอร์ไฟฟ้า (W) V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ (Volt), I คือกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ (Ampere), Q_{cond} คือปริมาณความร้อนที่ได้จากการหล่อเย็น (W), \dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (kg/s), C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg°C), ($T8 - T7$) คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°C), η_{th} คือประสิทธิภาพความร้อนของชุดทดลอง (%), R คือค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (°C/W), ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิฮีวาโปรเตอร์กับอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ (°C), $T1$ คืออุณหภูมิของฮีวาโปรเตอร์ (°C) และ $\frac{T8 - T7}{2}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ (°C)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากเงื่อนไขในการทดลองที่ประกอบด้วยท่อนำไอระเหยทั้งหมด 7 ขนาด และการให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า 6 ระดับ ทดลองกับน้ำหล่อเย็นด้วยอุณหภูมิและอัตราการไหลแบบคงที่ ทำการทดลองโดยในระบบเป็นสุญญากาศเพื่อให้เกิดไออิ่มตัวและสามารถนำเอาพลังงานความร้อนไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศเนื่องจากน้ำจะสามารถระเหยเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะสุญญากาศเริ่มการทดลองโดยการทดสอบการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดและประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์ทดลอง ตรวจสอบการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมจากประสิทธิภาพในการหุ้มฉนวนของอุปกรณ์ทดลอง เมื่อตรวจสอบพร้อมทั้งปรับปรุงการหุ้มฉนวนแล้วจึงทำการทดลองตามเงื่อนไขต่างๆ ดังผลการทดลองต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของวงจรถอร์โมไซฟอน

เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานเป็นวงจรถอร์โมไซฟอนในระบบปิด และการหุ้มฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนของเทอร์โมไซฟอนวงจรถอร์โมไซฟอน โดยปริมาณความร้อนที่ให้อยู่ในช่วง 530-3350 W และมีขนาดท่อนำไอระเหยที่มี L/d เท่ากับ 17.50 (ขนาดท่อ 25.4 mm หรือ 1 นิ้ว) คำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนไปยังคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (2) เปรียบเทียบเป็นประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนด้วยสมการที่ (3) ดัง Figure 2 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทดลองมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 97.28% แสดงให้เห็นว่าน้ำภายในเทอร์โมไซฟอนวงจรถอร์โมไซฟอนเกิดการระเหยและควบแน่นเป็นวัฏจักรอยู่ภายในได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งการหุ้มฉนวนนั้นสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมของอุปกรณ์ในการทดลองเชิงวิศวกรรมทางความร้อน (Sukchana and Pratinthong, 2017 ; Sukchana, 2020) โดยสามารถถ่ายโอนความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์ได้ไม่น้อยกว่า 90% ในขณะที่เดียวกันพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อจุดเดือดของสารทำงานเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนมากขึ้นตามจุดเดือดที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งการทดลองเป็นแบบอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นคงที่ซึ่งคอนเดนเซอร์จะมีข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยนความร้อน

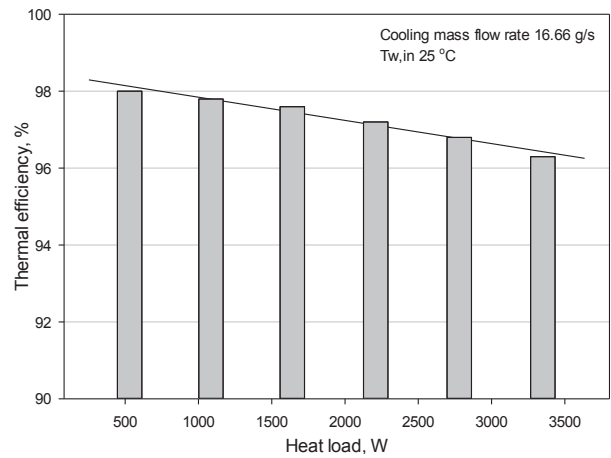


Figure 2 Thermal efficiency of experimental equipment

2. อุณหภูมิอิ่มตัวภายใต้สุญญากาศในระบบปิด

การทดลองเพื่อตรวจสอบอุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดดังรูปที่ 3 ของน้ำในเทอร์โมไซฟอนวงจรถอร์โมไซฟอนภายใต้สุญญากาศในเงื่อนไขเช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1 เพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบหลังทำการปรับเปลี่ยนขนาดท่อนำไอระเหยตามเงื่อนไขการทดลอง จะเห็นได้ว่าเมื่อในระบบของเทอร์โมไซฟอนเป็นสุญญากาศน้ำสามารถเดือดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าการต้มน้ำที่ความดันบรรยากาศ (Sukchana, 2020 ; Jaiboonma & Sukchana, 2022) ซึ่งจะสามารถถ่ายโอนความร้อนไปยังคอนเดนเซอร์เพื่อนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และพบว่าอุณหภูมิอิ่มตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของไอระเหยเพิ่มมากขึ้นภายในปริมาตรคงที่ของเทอร์โมไซฟอนจึงเป็นผลทำให้ความดันภายในเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นของไอน้ำที่ระเหย จึงส่งผลให้อุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์โดยตรงกับความดันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามหลักทางเทอร์โมไดนามิกส์

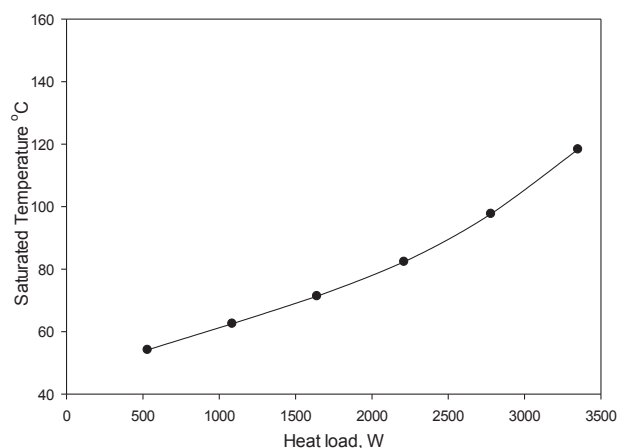


Figure 3 Saturation temperature under vacuum condition with L/d ratio of vapor tube of 17

3. ขนาด L/d ของท่อนำไอระเหยต่ออุณหภูมิอิ่มตัว

ผลกระทบจาก L/d ของท่อนำไอระเหยต่ออุณหภูมิอิ่มตัวเมื่อปริมาณความร้อนในการทดลองสูงสุด 3350 W ดัง Figure 4 จะเห็นได้ว่าในขณะที่ปริมาณความร้อนคงที่ เมื่อ L/d ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความต้านทานการไหลของไอน้ำเพิ่มขึ้นในท่อที่มีขนาดของพื้นที่ภาคตัดเล็กซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความดัน จึงส่งผลให้ความดันภายในระบบปิดเพิ่มมากขึ้น โดยความดันที่เพิ่มขึ้นในระบบนั้นจะมีความสัมพันธ์กันทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยตรงกับอุณหภูมิอิ่มตัวหรือจุดเดือดของน้ำเช่นเดียวกับผลการทดลองจากหัวข้อ 3.2 ในขณะเดียวกันนั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า L/d ลดลงมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำลดลงเมื่อได้รับปริมาณความร้อนเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อนำไอระเหยโดยมีความยาวคงที่เท่าเดิมเพื่อกำหนดให้มีค่า L/d เพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นจะสามารถประยุกต์ใช้ในการกำหนดหรือควบคุมอุณหภูมิของไออิ่มตัวสำหรับเทอร์โมไซฟอนวงจรมืดเมื่อได้รับปริมาณความร้อนแบบคงที่ได้ หรือสามารถกำหนดขนาดของท่อขั้นต่ำที่จะช่วยให้ไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของไออิ่มตัวของสารทำงานได้ ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่า ค่า L/d จะเริ่มส่งผลต่ออุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานในระบบให้เพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีค่าอัตราส่วนมากกว่า 20

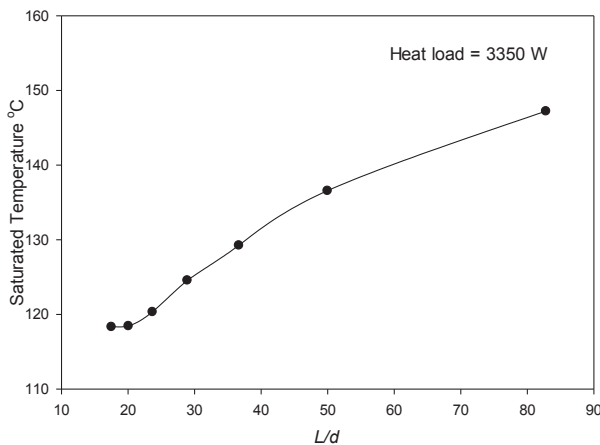


Figure 4 Effect from L/d ratio on the Saturation temperature with heat load of 3350 W

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของขนาดท่อนำไอระเหยในรูปของ L/d กับอุณหภูมิอิ่มตัวเมื่อได้รับปริมาณความร้อนที่ต่างกันดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าหากกำหนดอุณหภูมิไออิ่มตัวที่ต้องการจะสามารถเลือกใช้ L/d ของท่อ

นำไอระเหยและปริมาณความร้อนที่เหมาะสมได้จากกราฟผลการทดลอง เช่น หากต้องการอุณหภูมิของไออิ่มตัวไม่เกิน 80°C ด้วยปริมาณความร้อน 2210 W จะพบว่าขนาด L/d ของท่อนำไอระเหยต้องไม่เกินกว่า 23.65 หรือถ้าต้องการอุณหภูมิไออิ่มตัวเกินกว่า 80°C ด้วยปริมาณความร้อนเดียวกัน จะสามารถทำได้ด้วยการเพิ่ม L/d ให้มากกว่า 23.65 นอกจากนี้ยังพบว่า L/d ของท่อนำไอระเหยไม่เกิน 20.05 จะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิอิ่มตัวน้ำในช่วงของปริมาณความร้อนที่ทำการทดลอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นปรากฏการณ์ในการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่มีข้อจำกัดในการแลกเปลี่ยนความร้อนของคอนเดนเซอร์ในการทดลองแบบคงที่ ซึ่งมีสิ่งที่แตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนทั่วไปคือการเกิดไอน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C และสามารถนำเอาความร้อนไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ เหมาะแก่การประยุกต์ใช้ในงานอบแห้งหรือการฆ่าเชื้อด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100°C โดยการอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนไปใช้งานเนื่องจากเทอร์โมไซฟอนเป็นระบบปิด และสามารถควบคุมหรือกำหนดอุณหภูมิของไออิ่มตัวได้ด้วยการเลือกใช้ขนาดของ L/d ที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ใช้งาน

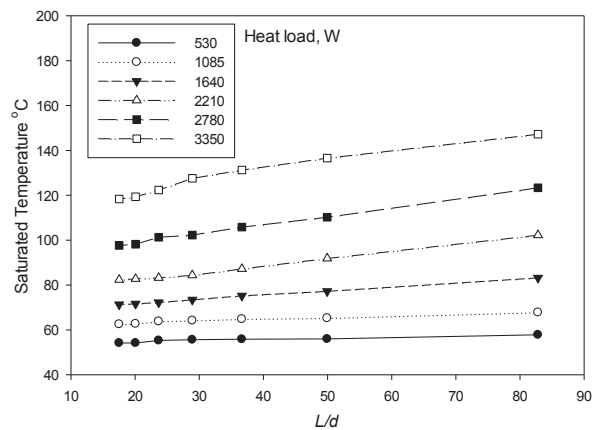


Figure 5 Relationship of L/d ratio of the vapor tube on saturation temperature with heat load is different

4. ความสัมพันธ์ของ L/d อุณหภูมิอิ่มตัว และปริมาณความร้อน โดยวิธีการประมาณค่า

ความสัมพันธ์ของตัวแปรจากการทดลองทั้ง 3 ตัวแปร โดยมีปริมาณความร้อนกับขนาดของ L/d เป็นตัวแปรต้น และอุณหภูมิของน้ำไออิ่มตัวในระบบสุญญากาศเป็นตัวแปรตาม ดัง Figure 6

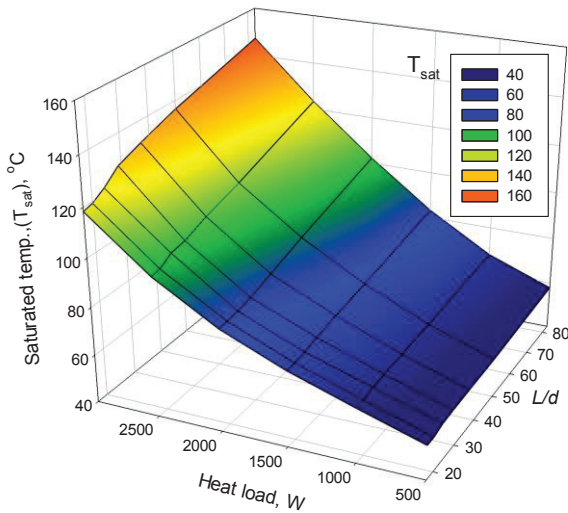


Figure 6 3D Relationship of L/d ratio of the vapor tube on saturation temperature with heat load of a close loop thermosyphon

จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอิ่มตัวมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับปริมาณความร้อนและขนาดของ L/d ซึ่ง

สามารถสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย (3D, Paraboloid equation) เพื่อใช้ในการประมาณค่าของตัวแปร อุณหภูมิอิ่มตัว ปริมาณความร้อน และค่า L/d ที่ต้องการเลือกใช้ได้ดังสมการที่ (6) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.98 โดยกำหนดตัวแปรต้นอย่างน้อย 2 ตัวแปร เพื่อคำนวณหาตัวแปรที่ต้องการ และเมื่อทดสอบสมการโดยการคำนวณแล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองดัง Figure (7) จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่คำนวณได้จากสมการนั้นมีผลต่างจากการทดลองมากขึ้นเมื่อค่า L/d เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อปริมาณความร้อนสูงขึ้นจะมีผลทำให้ผลต่างของอุณหภูมิอิ่มตัวมากขึ้นเช่นกัน โดยพบว่ามีความผิดพลาด (Error) อยู่ในช่วง 0.14-28.02% ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดสูงเมื่อได้รับปริมาณความร้อนสูงและค่า L/d สูง

$$T_{sat} = 42.489 + (0.3196L/d) + (0.0032Q) + (-0.0008(\frac{L}{d})^2) + ((7.2951 \times 10^{-6})Q^2) \quad (6)$$

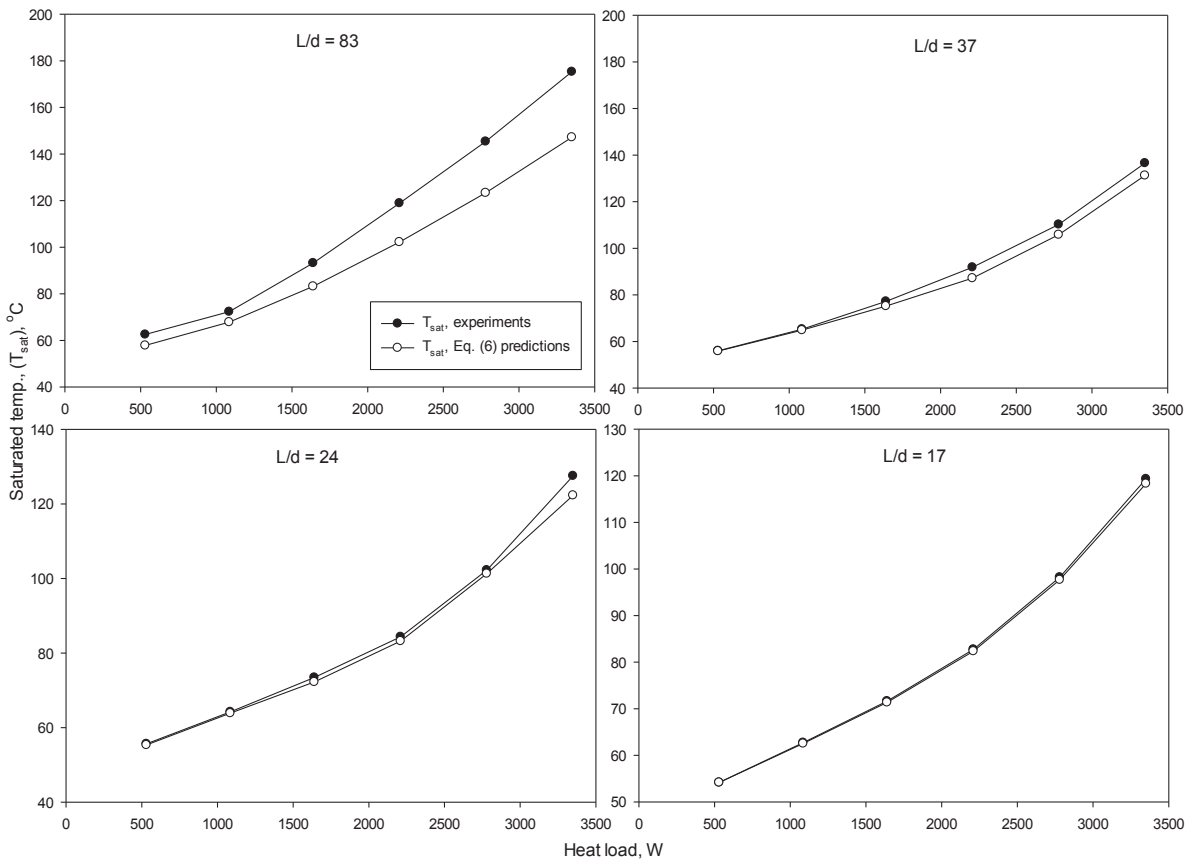


Figure 7 Compare the saturation temperature from experimental results with mathematical model calculations

5. ค่าความต้านทานความร้อนรวม

หลักการการทำงานของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นต้องอาศัยการไหลกลับของของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกันกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร จึงสามารถพิจารณาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนระบบปิดในรูปของค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ (R) ด้วยสมการที่ (4-5) ซึ่งเป็นคุณลักษณะในการถ่ายโอนความร้อนอย่างหนึ่งของเทอร์โมไซฟอน เพื่อให้สามารถใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ปริมาณความร้อนที่เหมาะสมกับอุณหภูมิอิ่มตัวที่ต้องการในการออกแบบสร้าง โดยจะได้ค่าความต้านทานความร้อนรวมดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลง ในขณะที่เดียวกันพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมจะเพิ่มมากขึ้นด้วยค่า L/d ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความร้อนที่ได้รับเท่ากันในการทดลองพบว่าค่าความต้านทานความร้อนรวมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ $0.0343^{\circ}\text{C}/\text{W}$ เมื่อท่อไอระเหยมีค่า L/d เท่ากับ 17.50 ด้วยปริมาณความร้อนที่ให้เท่ากับ 2780 W

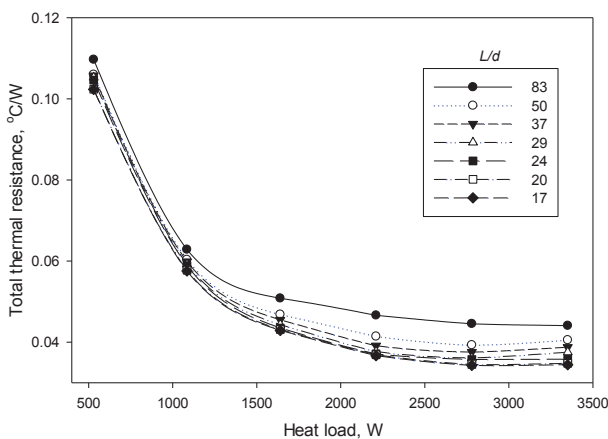


Figure 8 Relationship of total thermal resistance and heat load with L/d ratio is different

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาทดลองผลกระทบจากขนาดของท่อไอระเหยต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในรูปแบบอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน หรือ L/d ด้วยปริมาณความร้อนแบบคงที่ 6 ระดับ ขนาดของ L/d 7 ขนาด ทดลองโดยภายในเทอร์โมไซฟอนอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ และของเหลวควบแน่นไหลกลับด้วยแรงโน้มถ่วง ผลการทดลองพบว่าขนาดของ L/d และปริมาณความร้อนที่ให้ มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนทั้งในด้านอุณหภูมิอิ่มตัว และค่าความต้านทานความร้อนรวมของ

ระบบ โดย L/d ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิอิ่มตัวเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานความร้อนรวมลดลงเมื่อขนาดของ L/d ลดลง เมื่อปริมาณความร้อนคงที่ ในขณะที่อุณหภูมิอิ่มตัวแปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนเมื่อขนาดของ L/d คงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า R ต่ำสุดสำหรับ L/d ทุกขนาดเมื่อปริมาณความร้อนที่ให้เท่ากับ 2780 W และยังพบอีกว่าเมื่อขนาดของ L/d น้อยกว่า 20.05 จะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิอิ่มตัวและค่าความต้านทานความร้อนรวม จากผลการทดลองที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในการเลือกขนาดท่อและปริมาณความร้อนที่เหมาะสมกับอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำที่ต้องการสำหรับสร้างเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถประหยัดพลังงานได้เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนด้วยการเดือดภายใต้ระบบที่เป็นสุญญากาศ โดยขนาดของ L/d นั้นสามารถใช้เป็นตัวแปรในการกำหนดอุณหภูมิอิ่มตัวของไอน้ำได้เมื่อปริมาณความร้อนมีค่าคงที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

- Aghel, B., Rahimi, M. & Almasi, S. (2017). Heat transfer enhancement of two-phase closed thermosyphon using a novel cross-flow condenser. *Heat Mass Transfer*, 53, 765-773.
- Cansee, S. (2020). Effected heat pipe and chimney to performance of boiler for steamed mushroom bag. *Prawarun Agr. J*, 17(1), 89-98.
- Dangton, W., Boothaisong, S. & Sangiamsuk, S. (2018). The Thermosyphon boiler prototype for fast generate vapor. *proceeding in the 14th Mahasarakham university research conference* (pp. 399-408). Mahasarakham University.
- Jafari, D., Marco, P.Di., Filippeschi, S. & Franco, A. (2017). An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, 111-123.
- Jaiboonma, C. & Sukchana, T. (2022). The heat transfer performance of a close loop thermosyphon boiler. *The Journal of KMUTNB*, 32(1), 108-117. (In Thai).

- Kiseev, V. & Sazhin, O. (2019). Heat transfer enhancement in a loop thermosyphon using nanoparticles/water nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 557-564.
- Kim, Y., Shina, D.H., Kim, J.S., Youb, S.M. & Leea, J. (2018). Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios. *Applied Thermal Engineering*, 145, 328-342.
- Lataoui, Z. & Jemni, A. (2017). Experimental investigation of a stainless steel two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 121, 721-727.
- Naresh, Y. & Balaji, C. (2017). Experimental investigations of heat transfer from an internally finned two phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 112, 1658-1666.
- Nuthong, O. & Uengkimbuan, N. (2014). Study on drying behavior of pepper using superheated steam drying. *Burapha Science Journal*, special issue, 340-347. (In Thai).
- Sa-adchom, P., Swasdisevi, T., Thomthong, T., Rattanapanya, P. & Soponronnarit, S. (2013). Drying of Ground Fish Slices Using Superheated Steam. *RMUTP Research Journal*, 7(2), 74-86. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Design, construction and testing of a horizontal thermosyphon boiler. *KMUTT Research and Development Journal*, 43(1), 67-78. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Optimum water filling ratio for a closed loop thermosyphon with evaporator as a boiler. *J Sci Technol MSU*, 39(2), 645-652. (In Thai).
- Sukchana, T. (2020). Study of heat transfer performance of a loop thermosyphon using an environment-friendly refrigerant as a working fluid. *The Journal of KMUTNB*, 30(2), 199-208. (In Thai).
- Sukchana, T. & Pratinthong, N. (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.