

ผลกระทบของอัตราการเติมต่อแรงดันและจุดเดือดของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรแบบหม้อต้ม

Effect of filling ratio on pressure and saturated temperature of a boiling type of loop thermosyphon

เวทรินทร์ อธิจิระสิงห์^{1*} และ ปฏิวัติ คมวชิรกุล²

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

*ติดต่อ: visessingh@gmail.com

บทคัดย่อ

การทดลองการเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานด้วยอัตราการเติมที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลกระทบต่อแรงดันและจุดเดือดของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรแบบหม้อต้ม โดยเทอร์โมไซฟอนทำด้วยท่อทองแดงประกอบด้วยหม้อต้ม ท่อนำไอระเหยออกจากหม้อต้มและท่อนำของเหลวกลับเข้าหม้อต้มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 13.84 mm โดยปริมาตรรวมทั้งระบบ 3,020 cm³ ทำการทดลองในแนวตั้งด้วยอัตราการเติมน้ำกลั่นเท่ากับ 8, 10, 12, 15, 18 และ 20% ของปริมาตรระบบ ในขณะที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิทางเข้าคงที่เฉลี่ย 25°C และให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า 220V แบบโหลดความร้อนคงที่ในช่วง 200, 400 และ 600W วัดจุดเดือดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และวัดแรงดันไอน้ำขณะเดือดด้วยเครื่องวัดแรงดันแบบตัวเลข ผลการทดลองพบว่าโหลดความร้อน อัตราการเติม และจุดเดือดมีความสัมพันธ์กัน โดยแต่ละค่าของโหลดความร้อนจะเหมาะสมกับอัตราการเติมเพียง 1 อัตราการเติม ซึ่งพิจารณาจากอัตราการเติมที่มีจุดเดือดต่ำสุดเมื่อโหลดความร้อนคงที่

คำหลัก: เทอร์โมไซฟอน, อัตราการเติม, แรงดัน, จุดเดือด, หม้อต้ม

Abstract

The experiment on water filled as the working fluid with different filling ratios, is for the study of the effect on pressure and boiling point of type loop Thermosyphon. It is made of copper pipes and consisting of a boiler and vapor line. These pipes lead vapor out and return back to the boiler with inner diameter size of 13.84 mm. The total volume of the whole unit is 3,020 cm³ the experiment is in the vertical orientation with the filling ratio of 8, 10, 12, 15, 18 and 20% of the total volume. The condenser cooling with cold water has a constant inlet temperature of 25°C, and boiler heating of 220V electrical heater has a constant heat load of 200, 400 and 600W. The measurement of the saturated temperature with the K type of thermocouple and measurement of the vapor pressure can be read with digital pressure gauge. The results showed that the heat load, filling ratios and boiling point have a significant relationship. Each of the heat load suitable with one filling ratio, which is determined by the filling rate with the lowest boiling point when the heat load is constant.

Keywords: thermosyphon, filling ratio, pressure, saturated temperature, boiler

1. บทนำ

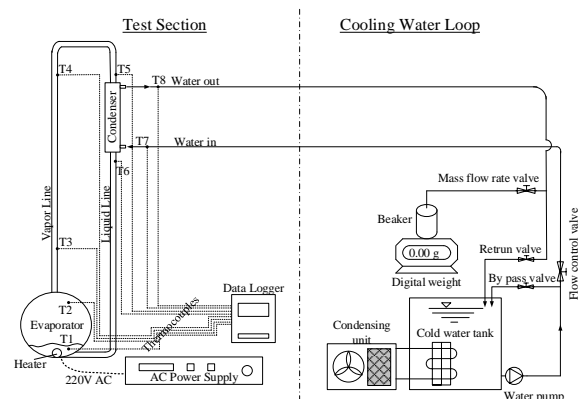
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์ที่สามารถออกแบบสร้างได้ง่าย มีสมรรถนะในการทำงานได้ดีกับแหล่งความร้อนหลากหลายรูปแบบ และสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการแลกเปลี่ยนหรือถ่ายโอนความร้อนได้หลากหลายลักษณะ เทอร์โมไซฟอน จึงเป็นท่อความร้อนอีกชนิดหนึ่งที่น่าิยมใช้ เนื่องจากสามารถออกแบบสร้างได้ง่าย ซึ่งมีรูปแบบหลักเป็นชนิดท่อเดี่ยวและชนิดวงจรรวม แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องอาศัยแรงโน้มถ่วงในการไหลกลับของของเหลวหลังมีการกลั่นตัว สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวม ซึ่งมีผู้วิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องดังเช่น รูปแบบและสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวม Dobriansky [1] นำเสนอการออกแบบเพื่อให้เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมแบบของเหลวไหลขึ้นเอาชนะแรงโน้มถ่วงด้วยแรงดันของไอระเหย ขณะที่ Franco and Filippeschi [2] ได้ทำการทดสอบผลกระทบขนาดของอีวาโปเรเตอร์ที่มีผลต่อแรงขับของไอระเหยโดยใช้สารทำความเย็น FC72 เป็นสารทำงาน นอกจากนี้มีการปรับปรุงแบบให้เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมสามารถถ่ายโอนความร้อนได้มากขึ้น โดยการออกแบบให้อีวาโปเรเตอร์เป็นแบบตัวยูสามารถรับความร้อนได้สองด้านและคอนเดนเซอร์แบบตัวยูสามารถระบายความร้อนได้สองด้าน ได้ทำการทดลองโดย Azad et al.[3] ในส่วนของสารทำงานนั้นพบว่าผู้วิจัยแต่ละท่านมีการใช้สารทำงานที่แตกต่างกันออกไป เช่น น้ำกลั่น เอทานอล เมทานอล อะซีโตน R11, R-134a, R22, R404A, R410A, R32, n-pentane, ไนโตรเจน และสารอื่นๆ ซึ่งสารทำงานต่างชนิดกันจะมีจุดเดือดที่แตกต่างกันรวมทั้งปริมาณการเติมก็จะแตกต่างกันไปด้วย ทั้งนี้อัตราการเติมสารทำงานนั้นนอกจากชนิดของสารทำงานแล้วปริมาณความร้อนที่ต้องการถ่ายเทหรืออุณหภูมิที่ต้องการควบคุม ก็มีผลต่ออัตราการเติมสารทำงานเช่นกัน สำหรับงานวิจัย

นี้สารทำงานที่ใช้เป็นน้ำบริสุทธิ์ จากการศึกษาของงานวิจัยที่ใช้ น้ำเป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนพบว่า วารุเวช วงษ์ไสย์ [4] ได้ทดลองด้วยปริมาณการเติมน้ำเป็นสารทำงาน 75% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมได้ดีที่สุดด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 19.05 มิลลิเมตร ต่อมา วิริยะ แฉงทน [5] พบว่าการเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน 30% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ เป็นอัตราการเติมที่ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุดสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานขณะเกิดการเอียงของท่อ ซึ่งมุมเอียงมีผลต่อการไหลกลับของสารทำงานที่ควบแน่นได้เร็วขึ้นจึงมีผลทำให้ปริมาณการเติมของน้ำกลั่นลดลง ในทำนองเดียวกัน ศิริษา เจ็งสุขสวัสดิ์ [6] พบว่าอัตราส่วนการเติมที่ดีที่สุดสำหรับน้ำกลั่นคือ 20% ของปริมาตรถ่วงไอ สำหรับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรวมที่มีการติดตั้งถ่วงไอ สำหรับอัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานโดยเป็นอัตราส่วนของปริมาตรท่อทั้งหมดได้ทดลองโดย Chehade et al. [7] ซึ่งผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานที่ดีที่สุดอยู่ระหว่าง 7% ถึง 10% ของปริมาตรระบบเทอร์โมไซฟอน Ma et al. [8, 9] ได้ทดลองเทอร์โมไซฟอนที่มี hydrocarbon และ refrigerants เป็นสารทำงาน ผลการทดลองพบว่าสารทำความเย็น R134a และ R245fa ให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าสารทำงานอื่นที่ใช้ในการทดลองดังเช่น R601, R245fa, R600a, R1234ze, R152a, R245fa/R152a, และ สาร R601/R245fa นอกจากนี้ Naresh and Balaji [10] ได้ทดสอบและยืนยันว่าเทอร์โมไซฟอนที่เติมด้วย R134a มีสมรรถนะสูงกว่าใช้น้ำเป็นสารทำงานในช่วงอุณหภูมิต่ำ Gorecki [11] ทดสอบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำความเย็น R134a, R404A และ R407C เป็นสารทำงานพบว่าสารทำงานต่างชนิดกันจะมีอัตราการเติมที่เหมาะสมแตกต่างกันโดย R134a และ R404A จะให้ประสิทธิภาพ

ในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีที่อัตราการเติม 10% ในขณะที่ R407C จะมีอัตราการเติมที่เหมาะสมเท่ากับ 30% โดย Dobriansky and Wojcik [12] ได้รวบรวมผลงานวิจัยเทอร์โมไซฟอนที่ใช้น้ำและสารทำความเย็นเป็นสารทำงานสรุปไว้ว่ากลุ่มสารทำงานที่เป็นสารทำความเย็นจะให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าน้ำในช่วงอุณหภูมิทำงาน 30–100°C

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถังในด้าน การพัฒนารูปแบบ ชนิดและอัตราการเติมสารทำงานของสารทำงานภายในท่อ และการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ พบว่าเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถังได้มีการพัฒนารูปแบบเพื่อเพิ่มสมรรถนะอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการติดตั้งกล่องไอที่ส่งผลให้สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น ปริมาณการเติมน้ำเป็นสารทำงานเฉลี่ยประมาณ 7 – 20% ของปริมาตรระบบ และประมาณ 20% สำหรับในด้านการประยุกต์ใช้งานนั้นมีการประยุกต์ใช้ในหลายรูปแบบ โดยเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถังสามารถถ่ายโอนความร้อนได้สม่ำเสมอและรักษาระดับอุณหภูมิได้คงที่โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ในการควบคุม การวิจัยครั้งนี้เป็นการสร้างและทดสอบเทอร์โมไซฟอนที่ออกแบบให้เป็นหม้อต้มโดยมีท่อนำไอระเหยและท่อนำของเหลวเป็นท่อปลายเปิดอยู่ในหม้อต้ม เพื่อศึกษาการทำงานและอัตราการเติมน้ำเป็นสารทำงานที่เหมาะสม

ละเอียดได้ถึง 0.01g มีย่านการวัด 1000g ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน 1% เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถังแบบหม้อต้มมีรายละเอียดดังรูปที่ 2 โดยหม้อต้มทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 123 mm ท่อนำไอระเหยและท่อนำของเหลวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 13.84 mm ทำให้มีปริมาตรรวมทั้งระบบ 3,020 cm³ ในส่วนของฮีวาโปรเตอร์ให้ความร้อนด้วยฮีทเตอร์ไฟฟ้า 220V วัดอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 0.1% ส่วนของคอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำและวัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออกเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้

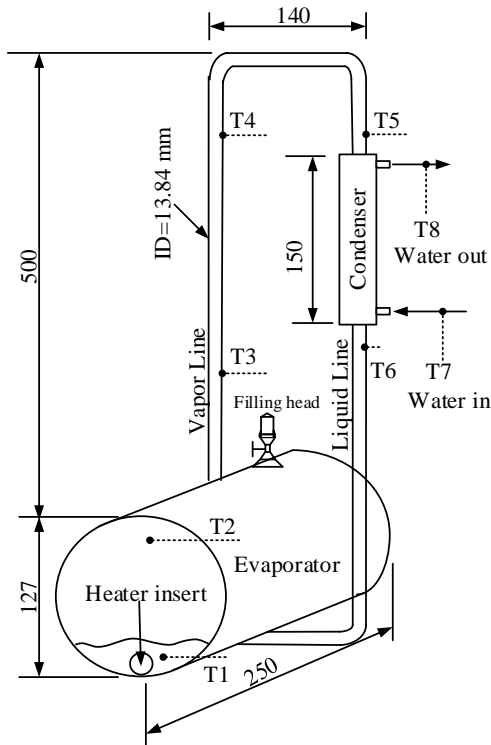


รูปที่ 1 ไดอะแกรมอุปกรณ์ทดลอง

2. การทดลอง

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยส่วนทำน้ำเย็นและส่วนการทดสอบ ในส่วนของการทำน้ำเย็นนั้นเป็นระบบทำความเย็นโดยมีถังน้ำเย็นขนาด 150L และสามารถควบคุมให้อุณหภูมิน้ำคงที่ได้ด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ ส่งจ่ายน้ำเย็นจากถังไปยังส่วนการทดสอบ ป้อนน้ำที่มีอัตราการไหลสูงสุด 15 l/min ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเย็นโดยการปรับวาล์ว และวัดอัตราการไหลเชิงมวลด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขที่สามารถอ่านค่า



รูปที่ 2 เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรแบบหม้อต้ม

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

ทำการทดลองโดยให้ท่ออยู่ในแนวตั้งด้วยอัตราการเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานเท่ากับ 8, 10, 12, 15, 18 และ 20% ของปริมาตรระบบ ซึ่งเป็นอัตราการเติมเฉลี่ยที่อยู่ในช่วงของการเติมน้ำเป็นสารทำงานจากงานวิจัยที่ผ่านมา ในขณะที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็น อุณหภูมิทางเข้าคองที่เฉลี่ย 25°C ด้วยอัตราการไหลคองที่เฉลี่ยเท่ากับ $340 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ($5.67 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$) และให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 220V แบบโหลดความร้อนคองที่ในช่วง 200, 400 และ 600W ควบคุมแรงดันด้วย Voltage Regulator ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 ความสัมพันธ์ของจุดเดือดและแรงดัน

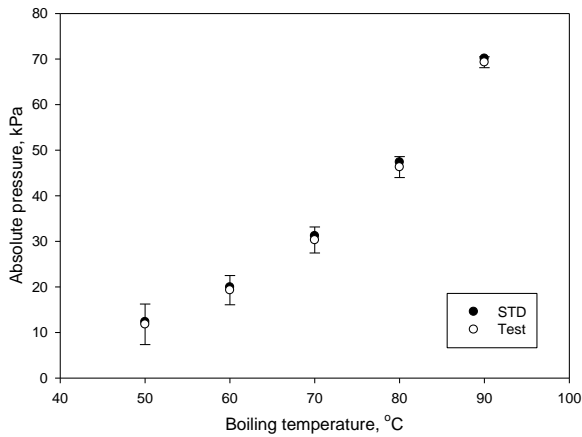
เป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของจุดเดือดและแรงดันที่เกิดขึ้นภายในหม้อต้ม โดยใช้อัตราการเติมน้ำเท่ากับ 15% [7] ทดสอบด้วยฮีตเตอร์ขนาด 1200W

กำหนดอุณหภูมิในการทดลองคองที่เท่ากับ 50, 60, 70, 80 และ 90°C ทำให้ระบบเป็นสภาวะอากาศด้วยเครื่องทำสภาวะอากาศ และใช้เครื่องมือวัดสภาวะอากาศแบบตัวเลขวามีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 1\%$ ดังรูปที่ 3 ซึ่งจะแสดงผลเป็นค่าลบ แล้วจึงให้ความร้อนจนอุณหภูมิในระบบคองที่ ผลการทดลองดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าแรงดันอิ่มตัวของน้ำภายในหม้อต้มแปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบแรงดันอิ่มตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ได้จากการทดลองกับค่ามาตรฐาน (STD) จากตารางสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของน้ำดังตารางที่ 1 พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเพียง 3.21% ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องมือวัดสภาวะอากาศอ่านเป็นค่าจำนวนเต็ม และอาจเป็นผลมาจากการทำสภาวะอากาศไม่สมบูรณ์ 100% ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม เพราะฉะนั้นในการทดลองเราสามารถวัดเพียงค่าใดค่าหนึ่งซึ่งจะเป็นอุณหภูมิหรือแรงดันก็จะสามารถเทียบหาค่าที่สัมพันธ์กันได้จากตารางค่ามาตรฐาน



$$P_{abs} = 101.3 - 72 = 29.3 \text{ kPa}$$

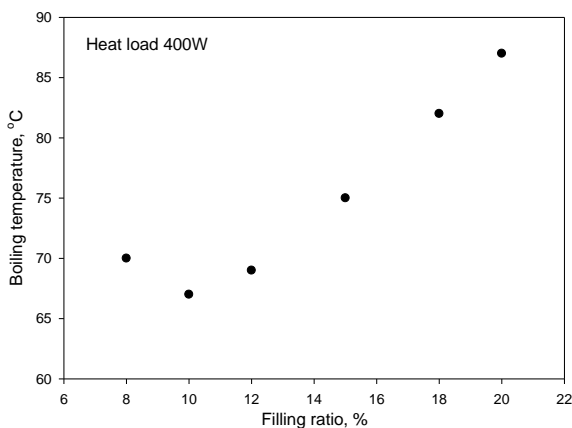
รูปที่ 3 หน้าจอเครื่องวัดสภาวะอากาศในการทดลอง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของจุดเดือดและแรงดัน

ตารางที่ 1 ค่าแรงดันมาตรฐานกับค่าจากการทดลอง

Temp. °C	P _{abs} , STD kPa	P _{abs} , Actual kPa	% Error
50	12.349	12.3	0.40
60	19.940	19.3	3.21
70	31.190	30.3	2.85
80	47.390	46.3	2.30
90	70.140	69.3	1.20



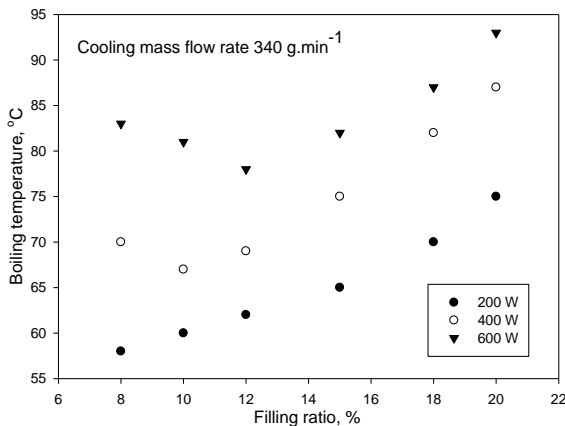
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของจุดเดือดและอัตราการเติมที่
โหลดความร้อนคงที่ 400W

จากรูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของจุดเดือดและอัตราการเติม โดยให้ความร้อนคงที่ 400W ทดสอบกับทุกอัตราการเติมคือ 8, 10, 12, 15, 18 และ 20% จากรูปจะเห็นได้ว่าจุดเดือดของน้ำภายในระบบต่ำสุดที่อัตราการเติมเท่ากับ 10% และเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการเติมมากขึ้น ซึ่งอัตราการเติมสารทำงานนั้นจะมีผลโดยตรงกับปริมาตรช่องว่างที่เหลือในระบบที่ลดลงเมื่อเกิดไอในอัตราที่คงที่เนื่องจากโหลดความร้อนคงที่จะส่งผลให้แรงดันภายในเพิ่มขึ้นจุดเดือดของสารทำงานจึงเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดัน เมื่อพิจารณาที่อัตราการเติม 8% พบว่ามีจุดเดือดสูงกว่าที่อัตราการเติม 10% ซึ่งอาจเป็นอัตราการเติมที่น้อยเกินไปสำหรับปริมาตรของระบบและโหลดความร้อน ทำให้มีช่องว่างสำหรับไอระเหยมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อแรงดันภายในให้สูงมากขึ้นเช่นกัน

3.3 ผลของอัตราการเติมกับโหลดความร้อน

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของจุดเดือดและอัตราการเติมที่แปรผันกับโหลดความร้อน โดยพิจารณาจุดเดือดของสารทำงานที่ต่ำสุด จากผลการทดลองพบว่าจุดเดือดของสารทำงานสูงขึ้นเมื่อโหลดความร้อนที่ให้มากขึ้น และพบว่าโหลดความร้อนต่างกันเหมาะสมกับอัตราการเติมสารทำงานที่แตกต่างกัน โดยโหลดความร้อน 200W มีจุดเดือดต่ำสุดที่อัตราการเติม 8% ส่วนโหลดความร้อน 400W มีจุดเดือดต่ำสุดที่อัตราการเติม 10% และส่วนโหลดความร้อน 600W มีจุดเดือดต่ำสุดที่อัตราการเติม 12% ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่แตกต่างจากเทอร์โมไซฟอนทั่วไปเนื่องจากปริมาตรส่วนใหญ่เป็นปริมาตรของหม้อต้มหรืออิวาโปรเรเตอร์ (1% = ปริมาตรการเติมเพิ่มขึ้น 30.2 cc) จึงเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2

3.2 ผลของอัตราการเติมต่อจุดเดือด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของจุดเดือดและอัตราการเติมที่แปรผันกับโพลดความร้อน

4. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบหม้อต้ม โดยการเติมน้ำกลั่นเป็นสารทำงานในอัตราการเติมต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อสมรรถนะโดยพิจารณาแรงดันและจุดเดือด ซึ่งมีปริมาตรรวมทั้งระบบ $3,020 \text{ cm}^3$ และปริมาตรส่วนใหญ่มากกว่า 90% เป็นปริมาตรในส่วนของหม้อต้มหรือที่เรียกกันว่าอีวาโพเรเตอร์ ซึ่งเป็นเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมีความแตกต่างจากแบบทั่วไปซึ่งท่อไอและท่อของเหลวไหลต่อเนื่องกัน แต่เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบหม้อต้มมีลักษณะการเดือดเป็นอ่าง ท่อไอและท่อของเหลวเป็นท่อปลายเปิดอยู่ในอ่างเดียวกันในขณะที่ทั้งระบบเป็นระบบปิด จากผลการทดลองพบว่าอัตราการเติมไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันของระบบและจุดเดือดของของเหลว เนื่องจากปริมาณในการเติมต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระบบเพียง 1% นั้นมีปริมาณสูง นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเติมที่แตกต่างกันมีความเหมาะสมต่อโพลดความร้อนที่ได้รับแตกต่างกัน ซึ่งการออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรรูปแบบหม้อต้มนั้นควรจะต้องคำนึงถึงโพลดความร้อนเป็นตัวแปรหลัก

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dobriansky, Y. (2011). Concepts of self-acting circulation loops for downward heat transfer (reverse thermosiphons), *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 414–425.
- [2] Franco, A., Filippeschi, S. (2010). Experimental analysis of heat and mass transfer in small dimension two-phase loop thermosiphons, *Heat Pipe Science and Technology and International Journal*, Vol. 1 (2), pp. 163–182.
- [3] Azad, A.K. Sarkar, S.K. Feroz, C. M. Alam, M.M. (2010). An experimental study of two-phase looped thermosyphon, *Proceedings of MARTEC 2010 The International Conference on Marine Technology*, 11-12 December 2010, BUET, Dhaka, Bangladesh.
- [4] วารุเวช วงษ์ไสย์ (2554). อิทธิพลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ สัดส่วนการเติมและชนิดของสารทำงานต่อสมรรถนะทางความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบ, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] วิริยะ แฉงทน (2555). คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนชนิดวงรอบขนาดเล็ก, วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [6] ศิระษา เจ็งสุขสวัสดิ์ (2555). คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบวงรอบที่ติดตั้งร่วมกับกล่องไอ. วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [7] Chehade, A.A., Louahlia-Gualous, H., Le Masson, S., Victor, I., Abouzahab-Damaj, N., (2014). Experimental investigation of thermosyphon loop thermal performance. *Energy Convers. Manag.*, Vol. 84, 671–680.



- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Gorecki, G. (2018). Investigation of two-phase thermosyphon performance filled with modern HFC refrigerants, *Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 2131–2143.
- [12] 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.