



สมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด

ชัยยันต์ ใจบุญมา และ ธนาพล สุขชนะ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3570 9101 อีเมล: thanaphols@rmutsb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.011

รับเมื่อ 13 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 24 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 16 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 22 มีนาคม 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

หม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัด การวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีฮีวโปเรเตอร์เป็นหม้อต้ม และมีปริมาตรมากกว่า 95% ของปริมาตรรวมทั้งหมด โดยใช้น้ำ เอทานอล และแอสีโทน เป็นสารทำงาน หม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดทำด้วยวัสดุทองแดงทั้งระบบมีปริมาตรช่องว่างรวมทั้งหมดเท่ากับ 3.14×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร ทำการทดสอบสมรรถนะแบบควบคุมฟลักซ์ความร้อนให้คงที่ในช่วง 50–120 กิโลวัตต์/ตารางเมตร คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิ และอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ ผลการทดลองพบว่า สารทำงานต่างชนิดกันมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนแตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาด้วยค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) จะพบว่า แอสีโทนจะให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าเอทานอล และน้ำเมื่อฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร นอกจากนี้ยังพบว่า น้ำจะให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าแอสีโทนและเอทานอลเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงกว่า 90 กิโลวัตต์/ตารางเมตร

คำสำคัญ: หม้อต้ม เทอร์โมไซฟอน สมรรถนะ เอทานอล แร่งโน้มถ่วง



The Heat Transfer Performance of a Close Loop Thermosyphon Boiler

Chaiyun Jaiboonma and Thanaphol Sukchana*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi Huntra, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 3570 9101, E-mail: thanaphol.s@rmutsb.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.03.011.

Received 13 May 2020; Revised 24 June 2020; Accepted 16 July 2020; Published online: 22 March 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Closed loop thermosyphon boiler (CLTSB) is a heat exchanger that operates the same as the closed loop thermosyphon. This research aims to compare the performance of heat exchange with evaporator as a boiler and volume more than 95 percent of the total volume by using water ethanol and acetone as the working fluid. CLTSB made from copper material with the whole system has a total space volume of $3.14 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. The performance tests were performed using constant heat flux in the range of $50\text{--}120 \text{ kW/m}^2$ and condenser cooled by water with the constant temperature and mass flow rate. The results showed that the different working fluid affected the heat transfer performance differently. When considering the total thermal resistance (Z), it was found that the acetone gives a higher heat transfer performance than ethanol and water when the heat flux is below 80 kW/m^2 . In addition, it was found that the water gives a higher heat transfer performance than those of acetone and ethanol when the heat flux is higher than 90 kW/m^2 .

Keywords: Boiler, Thermosyphon, Performance, Ethanol, Gravity



1. บทนำ

หม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดทำงานโดยมีการระเหยของสารทำงานที่อยู่ภายใน และควบแน่นไหลกลับมายังแหล่งรับความร้อนด้วยแรงโน้มถ่วง และความดันไอน้ำภายในระบบ ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดทั่วไป เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถประยุกต์ใช้งานทั้งในการระบายความร้อน และนำความร้อนไปใช้งาน จากงานวิจัยการออกแบบสร้างและทดสอบหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนแวนอนของ ธนาพล [1] โดยใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานพบว่า หม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีตั้งเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดทั่วไป แต่สามารถรับปริมาณความร้อนที่มากขึ้นได้เนื่องจากมีอีวาโปเรเตอร์ขนาดใหญ่ สำหรับงานวิจัยสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนนั้น มีการวิจัยและตีพิมพ์กันอย่างต่อเนื่องโดยเฉพาะที่ใช้ น้ำ เอทานอล และสารแอซีโตน เป็นสารทำงาน ดังเช่น Aghel และคณะ [2] ได้ทดลองเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงานด้วยอัตราการเติม 75% และสามารถเพิ่มสมรรถนะได้ 10–17% ด้วยคอนเดนเซอร์แบบไหลขวาง Jafari และคณะ [3] ศึกษาการระเหย และการควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ น้ำ เป็นสารทำงานด้วยอัตราการเติมในช่วง 8–100% พบว่า อัตราการเติม 16% มีผลดีต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด Lataoui และ Jemni [4] ได้ศึกษาทดสอบสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วยวัสดุเป็นท่อสแตนเลสและพบว่า ปริมาณการเติมน้ำเป็นสารทำงานเท่ากับ 20% เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสม ในปีเดียวกัน Naresh และ Balaji [5] ได้ทดสอบการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนได้ 17% ด้วยครีบบนคอนเดนเซอร์ซึ่งใช้น้ำเป็นสารทำงานด้วยอัตราการเติม 50% ในปีต่อมา Kim และคณะ [6] ได้ศึกษาทดสอบสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนที่มีการติดตั้งแนวเอียงด้วยอัตราการเติมน้ำในช่วง 25–100% ซึ่งพบว่า อัตราการเติมเท่ากับ 50% ให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด Chen และ Yang [7] ประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดเพื่อระบายความร้อนให้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยพบว่า สารทำงานแอซีโตนมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าน้ำ 7 เท่า Gedik

[8] พบว่า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน ซึ่งในการทดลองนั้น ได้ใช้ น้ำ เอทานอล และเอทิลีนไกลคอล เป็นสารทำงาน นอกจากสารทำงานที่นิยมใช้ทั่วไปยังมีการใช้สารทำความเย็นเป็นสารทำงานและมีสมรรถนะที่แตกต่างกันด้วยรูปร่างของเทอร์โมไซฟอน เช่น ธนาพล และวินัส [9] พบว่า ตำแหน่งอีวาโปเรเตอร์ และคอนเดนเซอร์ที่อยู่ในแนวตั้งมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดกว่าแนวอื่นซึ่งใช้ R-134a เป็นสารทำงาน ธนาพล [10], [11] ทดสอบสมรรถนะเทอร์โมไซฟอนทั้งชนิดวงจรถัดและชนิดท่อเดี่ยวที่มีลักษณะเป็นท่อยาว และใช้สารทำความเย็น R134a, R32, R404a, R407A และ R410 โดยพบว่า อุณหภูมิวิกฤตของสารทำความเย็นมีผลกระทบต่อขีดจำกัดอุณหภูมิสูงสุดและสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน ธนาพล และนริส [12] พบว่า เทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรถัดโดยมี R134a เป็นสารทำงานมีสมรรถนะสูงสุดเมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 28.2 กิโลวัตต์ต/ตารางเมตร Tong และคณะ [13], [14] ได้สรุปไว้ว่า ภาระทางความร้อนนั้นจะต้องสัมพันธ์กับขนาดของเทอร์โมไซฟอนโดยเฉพาะส่วนของอีวาโปเรเตอร์ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้ R744 เป็นสารทำงาน และยังพบอีกว่าเทอร์โมไซฟอนจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมตนเอง เมื่อใช้อีวาโปเรเตอร์แบบขนานนั้นจะต้องมีภาระความร้อนที่ใกล้เคียงหรือเท่ากัน

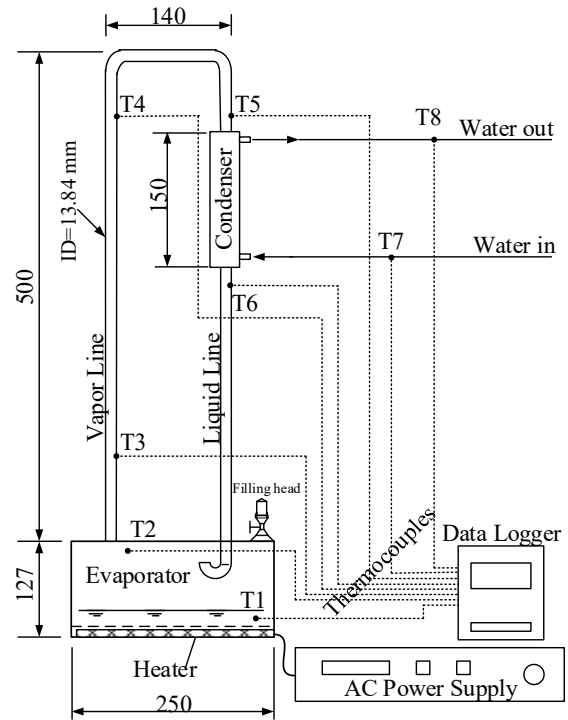
จากงานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศนั้น แสดงให้เห็นว่ามีตัวแปรหลักที่มีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน เช่น รูปร่างหรือรูปร่างเทอร์โมไซฟอน การเลือกสารทำงานที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อน การออกแบบส่วนของการระบายความร้อนที่เหมาะสม จากงานวิจัยที่ผ่านมามักจะพบว่า เมื่อมีการสร้างเทอร์โมไซฟอนรูปแบบใหม่หรือเปลี่ยนสารทำงานใหม่นั้นจะต้องมีการทดสอบสมรรถนะ และหาอัตราการเติมที่เหมาะสมกับภาระทางความร้อนที่ต้องการใช้งาน การศึกษาวิจัยสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดครั้งนี้เป็นการต่อยอดจากงานวิจัย [1] ที่มีการออกแบบหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดจนสามารถใช้ใน

การถ่ายโอนความร้อนได้เหมือนกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร ซึ่งในครั้งนี้เป็นทดสอบสมรรถนะของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดโดยใช้น้ำ เอทานอล และแอสีโตน เป็นสารทำงานเพื่อหาเงื่อนไขในการใช้งานที่เหมาะสมของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

หม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดดังรูปที่ 1 [1] ประกอบด้วยฮีว้าโปรเตอร์ทำด้วยท่อทองแดงที่มีขนาดมีปริมาตรความจุได้เท่ากับ 2,970 ลบ.ซม. ท่อน้ำไอระเหย และท่อน้ำของเหลวกลับมีขนาดเท่ากันตลอดทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ID) 13.84 มม. ความยาวรวมส่วนโค้งเท่ากับ 1,150 มม. รวมเป็นปริมาตรความจุของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดประมาณ 3,140 ลบ.ซม. ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าแบบแท่งกลมสอดเข้าภายในท่อทองแดงที่อยู่ภายในฮีว้าโปรเตอร์ และควบคุมปริมาณการให้ความร้อนโดยการปรับแรงเคลื่อนของไฟฟ้า (AC Power Supply) ในขณะที่คอนเดนเซอร์ (Condenser) ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นด้วยระบบการทำน้ำเย็น (Chiller) ซึ่งมีปั๊มน้ำสามารถปรับอัตราการไหลเชิงมวลสูงสุดได้เท่ากับ 0.25 กก./วินาที วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดย T1 เป็นการวัดอุณหภูมิของของเหลว และ T2 วัดอุณหภูมิของไอเพื่อนำมาเฉลี่ยเป็นค่าอุณหภูมิของฮีว้าโปรเตอร์หรือจุดเดือดของสารทำงาน จุดวัดอุณหภูมิ T3, T4, T5 และ T6 เป็นการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวด้านนอกของท่อทองแดงเพื่อใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการทำงานของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดในสภาวะคงตัวร่วมกับการบันทึกผลการทดลอง สำหรับจุดวัดอุณหภูมิ T7 และ T8 เป็นการติดตั้งให้ส่วนปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับน้ำหล่อเย็นโดยตรงเพื่อนำผลต่างอุณหภูมิมาคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้จากฮีว้าโปรเตอร์ไปยังคอนเดนเซอร์ รวมทั้งเฉลี่ยเป็นอุณหภูมิในการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอน



รูปที่ 1 โดอะแกรมการทดลองหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด

วงจรปิด ทั้งนี้ มีการหุ้มฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อนให้กับส่วนประกอบหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดทุกชิ้นส่วน เครื่องมือวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการทดลองประกอบด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดเท่ากับ (Error) $\pm 0.1\%$ ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิแบบตัวเลข (Data Logger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL820 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.05\%$ ทำให้มีค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์อุณหภูมิในการทดลองสูงสุดเท่ากับ $\pm 0.14\%$ วัดอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็นด้วยการตวงและชั่งเทียบกับเวลาด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลข รุ่น BL-01 ที่มีย่านการวัดสูงสุด 3,000 กรัม และมีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1 กรัม จากอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ในการทดลอง จะทำให้มีค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์อัตราการไหลเชิงมวลสูงสุดเท่ากับ $\pm 0.166 \times 10^{-3}$ กก./วินาที และวัดปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าแบบตัวเลขยี่ห้อ MASTECH รุ่น M9805G ซึ่งมีย่าน



การวัดกระแส 200 แอมแปร์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 2% ซึ่งจะทำให้มีค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ภาระทางความร้อนสูงสุดเท่ากับ ± 24.0 วัตต์ (2.4 กิโลวัตต์/ตารางเมตร)

2.2 เจ็อนไขในการทดลอง

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเป็นการทดสอบสมรรถนะของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดภายใต้ระบบที่เป็นสภาวะปกติ โดยใช้ น้ำ เอทานอล และแอซีโตน ที่มีสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังตารางที่ 1 [18] เป็นสารทำงานเพื่อหาความเหมาะสมด้านฟลักซ์ความร้อนของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด ที่ใช้ในการทดลองสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมต่อไป ด้วยอัตราการเพิ่มสารทำงานในการทดลองเท่ากับ 3 ชนิดเท่ากับ 7% ของปริมาตรเทอร์โมไซฟอนจากผลการวิจัยของ Chegade และคณะ [15] หรือคิดเป็นปริมาตรของสารทำงานเท่ากับ 220 ลบ.ซม. โดยเป็นการทดลองแบบควบคุมฟลักซ์ความร้อน (q) ให้คงที่ในช่วง 50–120 กิโลวัตต์/ตารางเมตร (500–1,200 วัตต์) คอนเดนเซอร์หล่อเย็นด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ 25 °ซ ด้วยอัตราการไหลเชิงมวล (m) เท่ากับ 16.66×10^{-3} กก./วินาที

ตารางที่ 1 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง 25 °ซ

Properties	Water	Ethanol	Acetone
Boiling point, °C	99.2	78.3	56.2
Latent heat, kJ/kg	2257	853	514.8
Specific heat, kJ/kg.K	4.18	2.40	2.35
Liquid density, kg/m ³	998.5	791	790
Surface tension, N/m	0.0728	0.0227	0.0237
Thermal conductivity, W/m.K	0.599	0.172	0.171
Dynamic viscosity, Pa s	0.00088	0.00113	0.00031

2.3 การคำนวณผลการทดลอง

ในการคำนวณผลการทดลองนั้นจะเริ่มจากการคำนวณขีดจำกัดการเดือดของสารทำงานนั้นๆ (Boiling Limit; q_{boil})

เพื่อตรวจสอบว่าปริมาณการเติมของสารทำงานสามารถใช้กับฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดลองได้หรือไม่ โดยสมการในการคำนวณนั้นมีผู้วิจัยหลายท่านได้แนะนำไว้ เช่น Zhang [16], [17] แต่พบว่า สมการที่ (1) [12] ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานสำหรับสารทำงานที่เป็นของเหลวทั่วไปเมื่อคำนวณแล้วได้ค่า q_{boil} ต่ำที่สุด จึงเลือกใช้เป็นสมการในการตรวจสอบขีดจำกัดการเดือดของสารทำงานในการทดลอง หลังจากบรรจุสารทำงาน และประกอบชุดทดลองแล้วจะทำการทดสอบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด (η_{th}) ด้วยสมการที่ (2) โดยปริมาณความร้อนในส่วนของคนเดนเซอร์ (Q_{cond}) นั้น คำนวณได้ด้วยสมการที่ (3) ในขณะที่ค่าของฟลักซ์ความร้อน (q) นั้น คำนวณได้จากสมการที่ (4) โดย Q_{evap} ได้จากการวัดเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า โดยมีพื้นที่ผิวการให้ความร้อน (s) ตามสมการที่ (5) เท่ากับพื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลวกับทองแดงสำหรับสออดีเทอร์โมที่ติดตั้งอยู่ภายในฮีวโปเรเตอร์ สำหรับสมรรถนะของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดนั้นจะพิจารณาในรูปแบบของค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ดังสมการที่ (6) และ (7) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ในการออกแบบพัฒนา หรือประยุกต์ใช้งานได้ต่อไป

$$q_{boil} = 0.12h_{fg} Sp_v^{0.5} [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{0.25} \quad (1)$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_{cond}}{Q_{evap}} \quad (2)$$

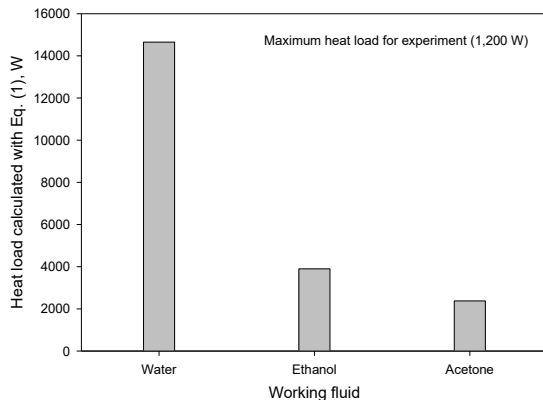
$$Q_{cond} = \dot{m}c_p(T8 - T7) \quad (3)$$

$$q = \frac{Q_{evap}}{S} \quad (4)$$

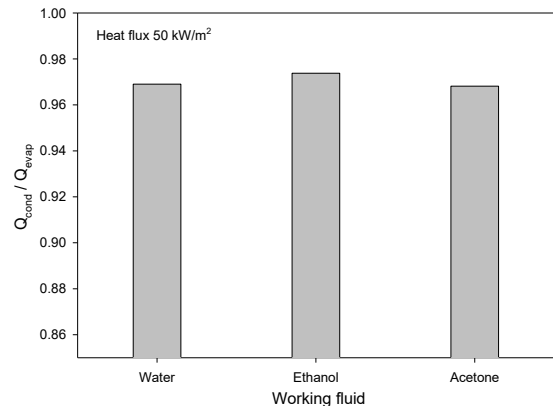
$$s = \pi dL \quad (5)$$

$$Z = \frac{\Delta T}{Q_{cond}} \quad (6)$$

$$\Delta T = \left[\frac{T1+T2}{2} - \frac{T7+T8}{2} \right] \quad (7)$$



รูปที่ 2 ปริมาณความร้อนที่ใช้ได้ในการทดลองสำหรับอัตราการเติม 7% ของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของชุดอุปกรณ์ทดลอง

โดยที่ g คือ อัตราแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (กิโลจูล/กก.), s คือ พื้นที่ผิวสัมผัสของของเหลวของทองแดงสำหรับสออดีเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ภายในอิวาโปรเรเตอร์ (ตารางเมตร), d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อสำหรับสออดีเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ภายในอิวาโปรเรเตอร์ (เมตร), L คือ ความยาวของท่อสำหรับสออดีเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ภายในอิวาโปรเรเตอร์ (เมตร), ρ_v, ρ_l คือ ความหนาแน่นของไอและของของเหลว (กก./ลูกบาศก์เมตร), σ คือ แรงตึงผิวของของไหล (นิวตัน/เมตร), \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (กก./วินาที), c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (กิโลจูล/กก.°ซ), $(T8 - T7)$ คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°ซ), ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิอิวาโปรเรเตอร์กับคอนเดนเซอร์

3. ผลการทดลอง

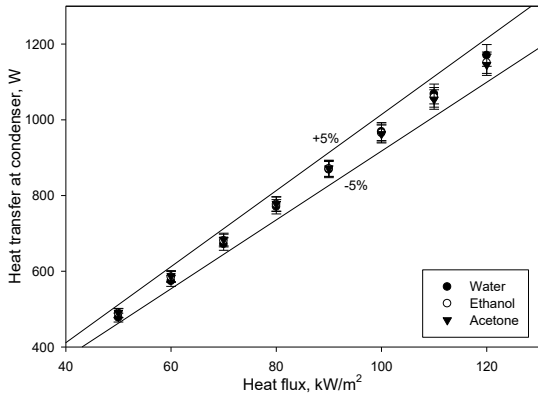
3.1 ชีตจำกัดการเดือด

การตรวจสอบชีตจำกัดการเดือดดังรูปที่ 2 โดยการคำนวณด้วยสมการที่ (1) เพื่อตรวจสอบให้มั่นใจว่าอัตราการเติมของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด นั้น สามารถที่จะใช้กับฟลักซ์ความร้อนในการทดลองโดยไม่เกิดการเหือดแห้ง (Dry-out) ขึ้นภายในอิวาโปรเรเตอร์ จากรูปจะเห็นว่าน้ำสามารถใช้กับฟลักซ์ความร้อนได้สูงสุด 12.21 เท่าของฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง รองลงมาเป็นเอทานอล 3.24 เท่า

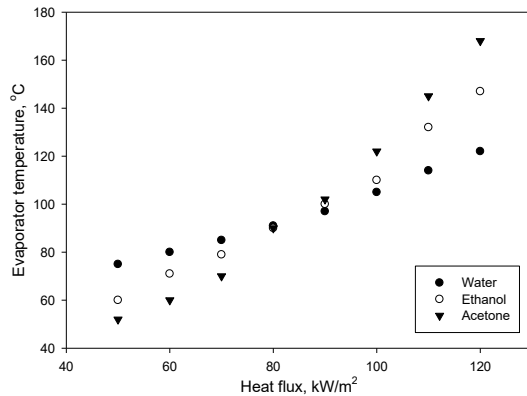
และแอซีโตน 1.98 เท่า ทั้งนี้ เป็นผลจากความแตกต่างสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด โดยเฉพาะค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent Heat) และค่าความหนาแน่น (Liquid Density) ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณความร้อนสูงสุดในการทดลองต่ำกว่าขีดจำกัดการเดือดที่สามารถใช้ได้ด้วยอัตราการเติมสารทำงาน 7% จึงมั่นใจได้ว่าการทดลองนั้นจะไม่มีการ Dry-out เกิดขึ้นภายในอิวาโปรเรเตอร์เมื่อทำการทดลอง

3.2 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทดลอง

เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการหุ้มฉนวนกันความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดที่ใช้ในการทดลองด้วยสมการที่ (2) ดังรูปที่ 3 โดยทำการทดสอบด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 50 กิโลวัตต์/ตารางเมตร และคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทได้ด้วยสมการที่ (3) เทียบกับฟลักซ์ความร้อนที่ให้ จะเห็นได้ว่า η_{th} ของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดเฉลี่ย 97% โดยสารทำงานที่แตกต่างกัน ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์ทดลอง แสดงว่าการหุ้มฉนวนของอุปกรณ์ทดลองนั้นสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนได้เป็นอย่างดี และอยู่ในเกณฑ์ที่ดีของการทดลองทางวิศวกรรม โดยไม่ส่งผลการวิเคราะห์ที่คุณลักษณะและสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4 ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนได้เมื่อควบคุมการให้ความร้อนที่ค่าต่างๆ



รูปที่ 5 อุณหภูมิไอวาโปรเตอร์เมื่อควบคุมการให้ความร้อนที่ค่าต่างๆ

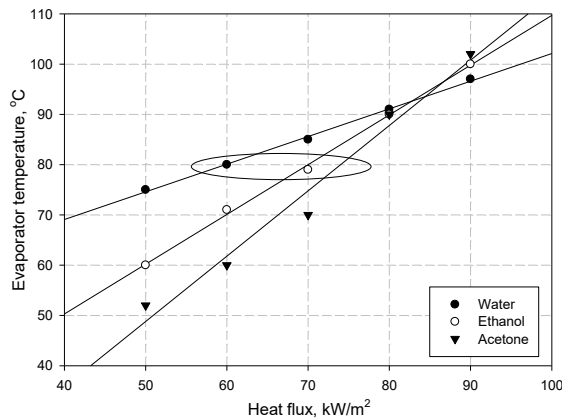
3.3 การถ่ายโอนความร้อน

รูปที่ 4 เป็นการทดลองโดยการควบคุมฟลักซ์ความร้อนให้คงที่แล้วตรวจสอบความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนที่บริเวณคอนเดนเซอร์ด้วยสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่าสารทำงานทั้ง 3 ชนิด มีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนไม่แตกต่างกันในแต่ละฟลักซ์ความร้อน แสดงให้เห็นว่าสารทำงานที่บรรจุภายในเกิดการเดือด และพาความร้อนไปแลกเปลี่ยนให้กับน้ำหล่อเย็นบริเวณคอนเดนเซอร์ได้ดีทั้ง 3 ชนิด โดยมีผลแตกต่างกันอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของไอวาโปรเตอร์โดยควบคุมการให้ความร้อนที่ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่าฟลักซ์ความร้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออุณหภูมิของไอวาโปรเตอร์ที่สูงขึ้น โดยเอซีโตนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเอทานอล และน้ำในช่วงที่เมื่อฟลักซ์ความร้อนต่ำกว่า 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง [7] ที่พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่มีสารทำงานเป็นเอซีโตนสูงกว่าเอทานอล และน้ำแต่เมื่อเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงกว่า 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร พบว่า อุณหภูมิของไอวาโปรเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีสารทำงานในระบบเป็นสารเอซีโตน และเอทานอล แต่สารทำงานที่เป็นน้ำนั้น อุณหภูมิของไอวาโปรเตอร์ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบคงที่ ทั้งนี้เป็นผลมาจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้านอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่มีค่าสูงกว่าเอทานอล และเอซีโตน

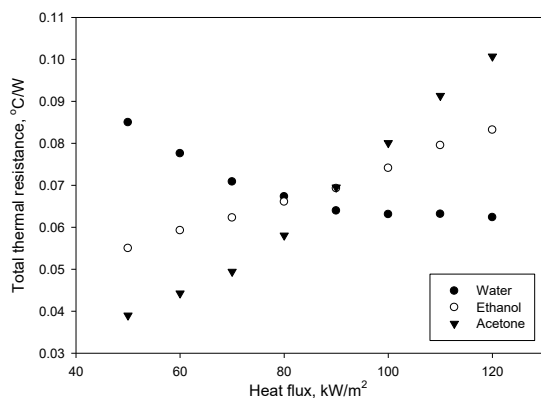
หากพิจารณาพฤติกรรมของการถ่ายโอนความร้อนในช่วงการให้ฟลักซ์ความร้อนดังรูปที่ 6 พบว่า แอซีโตนและเอทานอล จะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีในช่วงของอุณหภูมิต่ำกว่า 80 °ซ และเริ่มเปลี่ยนเป็นด้อยกว่าน้ำในช่วงอุณหภูมิ 90–100 °ซ นอกจากนี้หากพิจารณาเส้นในแนวนอนอุณหภูมิ 80 °ซ จะพบว่า มีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 60, 70 และ 75 กิโลวัตต์/ตารางเมตร สำหรับน้ำ เอทานอล และเอซีโตน ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังตารางที่ 1 ด้านอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานที่ความดันบรรยากาศปกติที่มีค่าเท่ากับ 56.2, 78.3 และ 99.2 °ซ สำหรับเอซีโตน เอทานอล และน้ำตามลำดับ โดยผลการทดลองนี้ได้สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ [7], Kannan และ Kamatchi [18], Lataoui และ Jemni [19] และ Naresh และ Balaji [20], [21] ที่สรุปได้ว่าถึงแม้ในระบบจะเป็นสุญญากาศก็ตาม สารทำงานนั้นจะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีในช่วงอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศปกติของสารทำงานนั้นๆ

3.4 ค่าความต้านทานความร้อนรวม

เมื่อพิจารณาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดด้วยค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ดังรูปที่ 7 ซึ่งคำนวณได้โดยสมการที่ (6) และใช้ผลต่างของอุณหภูมิตามสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่าเมื่อ



รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในอีวาโปเรเตอร์เมื่อควบคุมการให้ความร้อนต่ำกว่า 90 กิโลวัตต์/ตารางเมตร



รูปที่ 7 ค่าความต้านทานความร้อนรวมเมื่อควบคุมการให้ความร้อนที่ค่าต่างๆ

ใช้สารทำงานเป็นน้ำนั้นค่า Z จะยังคงมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องแม้ว่าฟลักซ์ความร้อนจะสูงถึง 120 กิโลวัตต์/ตารางเมตรก็ตาม แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนที่ดีขึ้น ในทางกลับกันเมื่อใช้สารทำงานภายในเป็นเอซีโตนและเอทานอลพบว่า ค่า Z มีแนวโน้มสูงขึ้นตามฟลักซ์ความร้อนที่ให้ตั้งแต่เริ่มการทดลอง (50 กิโลวัตต์/ตารางเมตร) แต่ยังคงต่ำกว่าสารทำงานที่เป็นน้ำในขณะที่รับฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ทั้งนี้ เป็นผลจากอุณหภูมิของอีวาโปเรเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงโดยได้รับผลกระทบจากสมบัติด้านอุณหภูมิมืดตัว ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ

และอุณหภูมิวิกฤตของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด ที่แตกต่างกัน โดยผลการวิจัยที่ผ่านมาของ [18], [20], [21] พบว่า การใช้เอซีโตน และเอทานอลเป็นสารทำงานในเทอร์โมไซพอนนั้น จะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนสูงนั้น (ค่า Z ต่ำ) เมื่อใช้งานกับฟลักซ์ความร้อนที่อยู่ในช่วง 30–40 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ซึ่งต่ำกว่าค่าต่ำสุดของฟลักซ์ความร้อนควบคุมที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้

4. สรุป

การทดสอบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซพอนวงจรถัด โดยพิจารณาจากค่าความต้านทานความร้อนรวม เป็นการทดสอบโดยใช้สารเอซีโตน เอทานอล และน้ำเป็นสารทำงาน บรรจุด้วยปริมาณ 7% ของปริมาตรรวมของระบบ เป็นการทดสอบแบบควบคุมฟลักซ์ความร้อนให้คงที่ ผลการทดลองพบว่า สารทำงานต่างชนิดกันมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อต้มเทอร์โมไซพอนวงจรถัดที่แตกต่างกัน โดยพบว่า สารเอซีโตนนั้น จะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าเอทานอล และน้ำเมื่อฟลักซ์ความร้อนควบคุมไม่เกิน 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร สำหรับเอทานอลเมื่อเทียบกับน้ำก็จะมีสมรรถนะสูงกว่าน้ำในช่วงฟลักซ์ความร้อนเดียวกันกับเอซีโตนแต่ด้อยกว่าเอซีโตน และพบว่า ค่า Z ต่ำสุดของสารเอซีโตน และเอทานอลไม่อยู่ในช่วงของฟลักซ์ความร้อนที่ใช้ในการทดลอง (จากแนวโน้มของกราฟ) แต่ค่า Z ที่คำนวณได้นั้น ยังคงต่ำกว่าค่า Z ของน้ำ เมื่อฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยมีค่า Z เมื่อฟลักซ์ความร้อน 80 กิโลวัตต์/ตารางเมตร นั้นเท่ากับ 0.058, 0.066 และ 0.067 °ซ/วัตต์ สำหรับสารเอซีโตน เอทานอล และน้ำ ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Sukchana, "Design, construction and testing of a horizontal thermosyphon boiler," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 43, no. 1, pp. 67–78, 2020 (in Thai).
- [2] B. Aghel, M. Rahimi, and S. Almasi, "Heat



- transfer enhancement of two-phase closed thermosyphon using a novel cross-flow condenser,” *Heat Mass Transfer*, vol. 53, pp. 765–773, 2017.
- [3] D. Jafari, P. Marco, S. Filippeschi, and A. Franco, “An experimental investigation on the evaporation and condensation heat transfer of two-phase closed thermosyphons,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 88, pp. 111–123, 2017.
- [4] Z. Lataoui and A. Jemni, “Experimental investigation of a stainless steel two-phase closed thermosyphon,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 721–727, 2017.
- [5] Y. Naresh and C. Balaji, “Experimental investigations of heat transfer from an internally finned two phase closed thermosyphon,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1658–1666, 2017.
- [6] Y. Kim, D.H. Shina, J.S. Kim, S.M. Youb, and J. Leea, “Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 145, pp. 328–342, 2018.
- [7] S. Chen and J. Yang, “Loop thermosyphon performance study for solar cells cooling,” *Energy Conversion and Management*, vol. 121, pp. 297–304, 2016.
- [8] E. Gedik, “Experimental investigation of the thermal performance of atwo-phase closed thermosyphon at different operating conditions,” *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 1096–1107, 2016.
- [9] T. Sukchana and V. Thadniam, “Effect of position of evaporator and condenser on heat transfer performance of R-134a loop thermosyphon,” *UBU Engineering Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 25–33, 2019 (in Thai).
- [10] T. Sukchana, “Heat transfer performance of a single-pipe thermosyphon with adiabatic length of 7.5Le employing environmentally friendly refrigerant as a working fluid,” *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 42, no. 4, pp. 345–388, 2019 (in Thai).
- [11] T. Sukchana, “Study of heat transfer performance of a loop thermosyphon using an environment-friendly refrigerants as a working fluid,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 2, pp. 199–208, 2020 (in Thai).
- [12] T. Sukchana and N. Pratinthong, “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*, vol. 114, pp. 527–535, 2017.
- [13] Z. Tong, X. H. Liu, and Y. Jiang, “Three typical operating states of an R744 two-phase thermosyphon loop,” *Applied Energy*, vol. 206, pp. 181–192, 2017.
- [14] Z. Tong, X. H. Liu, and Y. Jiang, “Experimental study of the self-regulating performance of an R744 two-phase thermosyphon loop,” *Applied Energy*, vol. 186, pp. 1–12, 2017.
- [15] A.A. Chehade, H. Louahlia-Gualous, S. Le Masson, I. Victor, and N. Abouzahab-Damaj, “Experimental investigation of thermosyphon loop thermal performance,” *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 671–680, 2014.
- [16] Z. Q. Long and P. Zhang, “Impact of cooling condition and filling ratio on heat transfer limit of



- cryogenic thermosyphon,” *Cryogenics*, vol. 52, pp. 66–76, 2012.
- [17] Z. Q. Long and P. Zhang, “Heat transfer characteristics of thermosyphon with N₂-Ar binary mixture working fluid,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 63, pp. 204–215, 2013.
- [18] K. G. Kannan and R. Kamatchi, “Augmented heat transfer by hybrid thermosyphon assisted thermal energy storage system for electronic cooling,” *Journal of Energy Storage*, vol. 27, pp. 1–10, 2020.
- [19] L. Zied and J. Abdelmajid, “Experimental investigation of a stainless steel two-phase closed thermosyphon,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 721–727, 2017.
- [20] Y. Naresh and C. Balaji, “Thermal performance of an internally finned two phase closed thermosyphon with refrigerant R134a: A combined experimental and numerical study,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 126, pp. 281–293, 2018.
- [21] Y. Naresh and C. Balaji, “Experimental investigations of heat transfer from an internally finned two phase closed thermosyphon,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 112, pp. 1658–1666, 2017.