

การเพิ่มสมรรถนะของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดด้วยส่วนผสมของน้ำกับเอทานอล

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ¹ และ ธนาพล สุขชนะ^{1*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ต.พันดรา อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

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

อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 18 สิงหาคม 2564

แก้ไข : 23 ธันวาคม 2565

ตอบรับ : 25 ธันวาคม 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.27

คำสำคัญ :

หม้อน้ำ / เทอร์โมไซฟอน / เอทานอล / สมรรถนะ / อัตราส่วนผสม

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของส่วนผสมของเอทานอลในน้ำกลั่นที่ใช้เป็นสารทำงานในหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด เพื่อศึกษาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนที่สัมพันธ์กับอัตราส่วนผสมของเอทานอล โดยอีวาโปเรเตอร์มีปริมาตรเท่ากับ 95% ของปริมาตรทั้งระบบ ท่อไอระเหยและท่อของเหลวไหลกลับเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm ทดลองด้วยอัตราส่วนผสมของเอทานอลกับน้ำกลั่นในช่วง 10–90% โดยปริมาตร และด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 50–300 kW/m² คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำ อุณหภูมิทางเข้าคงที่เท่ากับ 25°C ที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ จากผลการทดลอง พบว่า อัตราส่วนผสมของเอทานอลที่ 40% เพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนในช่วง ฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 200 kW/m² อย่างไรก็ตาม เมื่ออัตราส่วนผสมของเอทานอลสูงกว่า 40% การเพิ่มขึ้นของสมรรถนะลดลงเมื่ออัตราส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น

Performance Enhancement of a Close-loop Thermosyphon Boiler via the use of Water-ethanol Mixtures

Anuwat Bumrungkij¹ and Thanaphol Sukchana^{1*}

Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Hantra, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

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

Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture.

Article Info

Article History:

Received: August 18, 2021

Revised: December 23, 2022

Accepted: December 25, 2022

DOI : [10.14456/kmuttrd.2022.27](https://doi.org/10.14456/kmuttrd.2022.27)

Keywords : Boiler /

Thermosyphon / Ethanol /

Performance / Mixing Ratio

Abstract

The present study investigated the effect of mixing ratio of ethanol in distilled water, which was used as the mixed working fluid in a closed-loop thermosyphon boiler (CLTSB). The objective was to evaluate the heat transfer performance in relation to the ethanol mixing ratio. The evaporator of the CLTSB has a volume of 95 percent of the total system volume. A vapor line and liquid return line are made of copper tubes, with an internal diameter of 20 mm. Ethanol-distilled water mixture ratio was varied in the range of 10-90%; constant heat flux in the range of 50–300 kW/m² was tested. The water-cooled condenser, operated at a constant inlet temperature of 25 °C and a constant mass flow rate, was used. The results showed that the ethanol mixing ratio of 40% helped increase the heat transfer performance when the value of heat flux was lower than 200 kW/m². In contrast, when the ethanol mixing ratio was higher than 40%, the enhancement effect was lower with increasing mixing ratio.

1. บทนำ

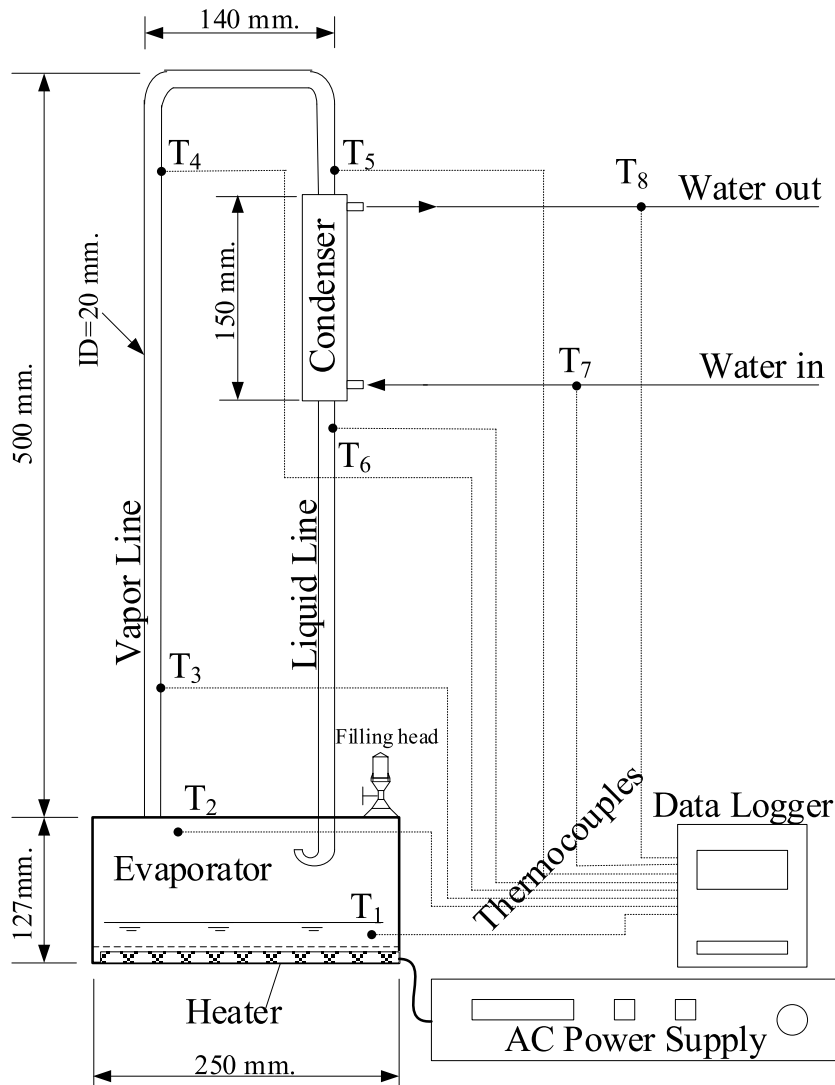
เทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งอาศัยการเปลี่ยนสถานะหรือการเดือดของสารทำงานที่อยู่ภายในท่อปลายปิดทั้งสองด้าน ด้านหนึ่งรับพลังงานความร้อนจากภายนอกและถ่ายโอนความร้อนด้วยการเปลี่ยนสถานะไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของท่อ จากนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม แล้วเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวไหลกลับมายังแหล่งความร้อนโดยอาศัยผนังท่อและแรงโน้มถ่วง จากงานวิจัยออกแบบสร้าง ทดสอบ และพัฒนาหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนของ Sukchcna [1] Jaiboonma และ Sukchana [2] พบว่า หม้อน้ำระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศสามารถถ่ายโอนความร้อนโดยการไหลเวียนของสารทำงานเป็นวงจรได้ด้วยแรงดันไอและแรงโน้มถ่วง เช่นเดียวกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร จึงให้ชื่อว่าหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอน โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนไปใช้งาน และพบว่าปริมาณการเติมน้ำที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7–10% ของปริมาตรทั้งระบบ ในขณะที่เดียวกัน ยังพบว่า เมื่อใช้สารทำงานเป็นเอทานอลและอะซิโตน จะมีผลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อน้ำแตกต่างกันที่อุณหภูมิเดียวกัน สำหรับการศึกษาทางวิจัยที่เกี่ยวกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน เช่น Chegade และคณะ [3] พบว่า อัตราการเติมน้ำที่ทำให้มีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนที่ดีที่สุดอยู่ในช่วง 7–10% ของปริมาตรทั้งหมด ต่อมา Aghel และคณะ [4] พบว่า การเติมน้ำที่ปริมาณ 75% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ ส่งผลให้สมรรถนะเพิ่มสูงขึ้นอีก 17% ในปีเดียวกันนั้น Jafari และคณะ [5] พบว่า ที่อัตราการเติม 16% มีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนน้อยที่สุด หลังจากนั้น Lataoui และ Jemni [6] พบว่า ปริมาณการเติมเท่ากับ 20% ของปริมาตรทั้งหมด เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมไซฟอนที่ทำด้วยท่อสแตนเลส ในช่วงเวลาเดียวกันนั้น Naresh และ Balaji [7-8] พบว่าครีบบนคอนเดนเซอร์ช่วยเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้เฉลี่ย 17% โดยการเติมน้ำเป็นสารทำงานด้วยปริมาณเท่ากับ 50% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ ในปีต่อมา Kima และคณะ [9] พบว่าอัตราการเติมน้ำเท่ากับ 50% ของปริมาตรอีวาโปเรเตอร์ เป็นอัตราการเติมที่เหมาะสมโดยมีค่าความต้านทาน

ความร้อนรวมต่ำสุดเมื่อมีการติดตั้งในแนวเอียง จากงานวิจัย [1–9] จะเห็นได้ว่าการเติมน้ำเป็นสารทำงานในระบบปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 7–30% ของปริมาตรระบบ นอกจากงานวิจัยที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในระบบแล้ว ยังมีการวิจัยเพื่อเพิ่มสมรรถนะด้วยสารทำงานที่ต่างชนิดกันออกไป เช่น เอทานอล เมทานอล อะซิโตน หรือสารทำความเย็นชนิดต่าง ๆ ซึ่งพบว่าสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงานต่างชนิดกันจะมีผลต่อปริมาณการเติมและสมรรถนะของอุปกรณ์ที่แตกต่างกันไปด้วย รวมถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานตามความเหมาะสมที่แตกต่างกัน สำหรับเอทานอล เป็นสารทำงานอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสถานะเป็นของเหลวที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิมีต่ำกว่าน้ำ หาได้ง่าย ผสมเข้ากับน้ำได้ดี และสามารถบรรจุใส่ในระบบได้ง่ายเช่นเดียวกับน้ำ โดยมีงานวิจัยที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอน ดังเช่น Chen และ Yang [10] Gedik [11] พบว่า เมื่อใช้เอทานอลเป็นสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนจะมีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนดีกว่าน้ำโดยเมื่อมีฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิต่ำ Kannan และ Kamatchi [12] พบว่าเทอร์โมไซฟอนที่ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานจะมีสมรรถนะสูงกว่าน้ำเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 50% ในช่วงฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิเท่าเช่นกัน

จากการทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจร ซึ่งเป็นหลักการถ่ายโอนความร้อนแบบเดียวกับหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดที่ทำการทดลอง พบว่า การใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้นจะให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีเมื่ออุณหภูมิทำงานและฟลักซ์ความร้อนสูง [1–9] ในขณะที่เอทานอลนั้นจะทำให้มีสมรรถนะสูงเมื่ออุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนต่ำกว่าน้ำ เมื่อใช้งานแบบผสมจะทำให้สมบัติด้านความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนจำเพาะเปลี่ยนไปสามารถใช้งานกับแหล่งความร้อนเดิมโดยมีอุณหภูมิมีตัวลดลง [10–12] การผสมเข้ากันได้ดีระหว่างเอทานอลกับน้ำเป็นสมบัติที่ดีสำหรับการเลือกเป็นสารทำงานนอกจากนี้สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่ความดันบรรยากาศของน้ำและเอทานอลมีความแตกต่างกัน จึงเหมาะที่จะใช้เป็นส่วนผสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด แต่ควรต้องศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนผสมต่อสมรรถนะในด้านอุณหภูมิมีตัว และสมรรถนะในรูปแบบ

แบบของค่าความต้านทานความร้อนโดยรวม เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นหม้อน้ำในการถ่ายโอนพลังงานความร้อนให้สามารถใช้งานได้ในระยะไกลเช่นเดียวกับหม้อน้ำทั่วไป

ซึ่งจะมีประโยชน์มากกว่าการใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้กับอุปกรณ์ต่างๆ โดยจะเน้นศึกษาที่อุณหภูมิอิ่มตัวไม่เกิน 120°C เป็นหลัก



รูปที่ 1 ไดอะแกรมหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรถัด

2. การทดลอง

2.1 อุปกรณ์ทดลองและเครื่องมือวัด

หม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรถัดรูปที่ 1 เป็นชุดทดลองปรับปรุงแล้วจาก [1-2] ซึ่งมีหม้อน้ำ (Evaporator) เป็นทรงกระบอกด้วยปริมาตรความจุทั้งระบบได้เท่ากับ 3,200 cc โดย

ท่อนำไอระเหยและของเหลวเป็นท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ID) ขยายเพิ่มขึ้นจากเดิม 13.84 mm เป็น 20.00 mm เท่ากันตลอด ภายในหม้อน้ำหรือฮีทเอ็กซ์เชนเจอร์มีท่อทองแดงขนาด 12.7 mm สำหรับสอดฮีทเตอร์ไฟฟ้าโดยไม่ให้สัมผัสผิวกวของเหลวโดยตรงเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยน

ขนาดของฮีตเตอร์ได้สะดวก ในขณะที่คอนเดนเซอร์ (Condenser) ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิทางเข้าเฉลี่ย 25°C โดยการควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบการทำน้ำเย็น (Chiller) และสามารถปรับอัตราการไหลสูงสุดได้ 15 l/min ควบคุมอัตราการไหลได้ด้วยวาล์วปรับอัตราการไหล (Flow Control Valve) และวาล์วลดความดัน (By Pass Valve) ตรวจสอบอัตราการไหลด้วยวิธีการตวงและชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขเทียบกับเวลาเป็นอัตราการไหลเชิงมวล อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ วัดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดย T1 และ T2 เป็นการวัดอุณหภูมิของเหลวและอุณหภูมิไอน้ำเพื่อนำมาเฉลี่ยเป็นค่าอุณหภูมิอิมิตัวของสารทำงาน จุดวัดอุณหภูมิ T3, T4, T5 และ T6 เป็นการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ผิวด้านนอกของท่อทองแดงเพื่อใช้สำหรับสังเกตพฤติกรรมการทำงานและสภาวะคงตัวในการทดลองร่วมกับการบันทึกผลการทดลอง สำหรับอุณหภูมิ T7 และ T8 เป็นการติดตั้งปลายสายเทอร์โมคัปเปิลให้สัมผัสกับน้ำหล่อเย็นโดยตรงเพื่อ

นำผลต่างของอุณหภูมิมาคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สามารถถ่ายโอนได้ และใช้เป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนเดนเซอร์ในการคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบ เครื่องมือวัดที่สำคัญในวัดผลการทดลองประกอบด้วยสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เท่ากับ $\pm 0.1\%$ ร่วมกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL820 ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.05\%$ สำหรับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็นวัดด้วยการตวงและชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบตัวเลขรุ่น BL-01 ที่มีย่านการวัด 3,000 g มีความละเอียดในการอ่านค่าได้ต่ำสุดเท่ากับ 1g และมีค่าความคลาดเคลื่อนของมวล $\pm 1\%$ การให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าวัดด้วยเครื่องวัดกำลังไฟฟ้าด้วยแบบตัวเลขยี่ห้อ HIOKI รุ่น PW3360-20 ซึ่งมีย่านการวัดกระแส 50 A โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดเฉลี่ย 0.4% ซึ่งสามารถคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดในการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์จากการวัดในการทดลอง

Parameter	Maximum Uncertainty
Temperature	$\pm 0.11\%$
Cooling water mass flow rate	$\pm 1.67 \times 10^{-4}$ kg/s
Heat flux	± 0.12 kW/m ² (12W)

2.2 เงื่อนไขการทดลอง

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มสมรรถนะของหม้อน้ำวงจรปิดด้วยอัตราส่วนผสมของน้ำกลั่นกับเอทานอลที่เหมาะสมกับฟลักซ์ความร้อนที่ทำงานภายใต้สภาวะสูญญากาศ เพื่อประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานต่อไป เนื่องจากมีปริมาณของอีวาโปเรเตอร์มากกว่า 95% ของปริมาณทั้งระบบ จะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้สูงโดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เริ่มการทดลองด้วยการทดสอบหาอัตราการเติมน้ำ 100% และ เอทานอล 100% ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยปริมาณ 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ

12% ด้วยฟลักซ์ความร้อนสูงสุดในการทดลอง เพื่อเลือกใช้อัตราการเติมน้ำสารทำงานแบบผสมโดยการพิจารณาค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดตามคำแนะนำของ [11] กรณีที่ใช้สารทำงานแตกต่างกันควรปรับเงื่อนไขในการใช้งานให้เหมาะสมแตกต่างกัน หลังจากได้อัตราการเติมน้ำสารทำงานที่เหมาะสมแล้ว จึงทดลองโดยการเติมด้วยส่วนผสมของเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% (กำหนดเป็นเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 100% เพื่อง่ายต่อการคิดอัตราส่วนผสม) โดยมีความเข้มข้นในการผสมเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90% ของปริมาณสารทำงานที่เติมในระบบ ทดสอบ

ด้วยพลังความร้อนคงที่เท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250, และ 300 kW/m² ในขณะที่คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิทางเข้าคงที่ 25°C และกำหนดอัตราการไหลเชิงมวลคงที่เท่ากับ 1000 g/min (16.66×10⁻³ kg/s)

2.3 การคำนวณผลการทดลอง

เริ่มจากการตรวจสอบปริมาณการเติมสารทำงานที่น้อยที่สุด 5% ว่าสามารถใช้กับโหลดความร้อนที่ใช้ในการทดลองสูงสุด 300 kW/m² ได้หรือไม่ด้วยสมการที่ (1) (boiling limit, Q_{boil}) [1, 13–15] เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสารทำงานในระบบจะไม่เกิดการแห้ง (Dry-out) โดยโหลดความร้อนจากฮีตเตอร์ (PE) คำนวณได้ด้วยสมการที่ (2) และคำนวณเป็นพลังความร้อนของระบบ (q) ได้จากสมการที่ (3) โดยพื้นที่ผิว (S) เป็นพื้นที่ผิวของท่อทองแดงสำหรับสอตฮีตเตอร์เข้าในหม้อน้ำ พิจารณาค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ต่ำสุดด้วยสมการที่ (4) [1-2] โดยใช้ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนได้ในส่วนของคอนเดนเซอร์ (Q_{cond}) คำนวณได้จากสมการที่ (5) และผลต่างของอุณหภูมิ (Q_{cond}) จากสมการที่ (6) และประเมินสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อน้ำวงจรปิด (T_{per}) ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสมการที่ (7) จากเปอร์เซ็นต์ของอุณหภูมิมืดตัวที่แตกต่างกันเมื่อถ่ายโอนความร้อนภายใต้สภาวะเดียวกันด้วยสารทำงานที่แตกต่างกัน

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

$$P_E = VI \quad (2)$$

$$q = \frac{P_E}{S} \quad (3)$$

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

$$Q_{cond} = \dot{m}c_p(T_8-T_7) \quad (5)$$

$$\Delta T = [T_1 - \frac{T_7+T_8}{2}] \quad (6)$$

$$T_{per} = [\frac{T_W - T_A}{T_W}] 100 \quad (7)$$

โดยที่

Q_{boil} คือปริมาณความร้อนสูงสุดที่ให้กับระบบได้ โดยไม่เกิดการ Dry-out (W)

h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)

S คือพื้นที่ผิวท่อสำหรับสอตฮีตเตอร์ในการให้ความร้อน (m²)

ρ_v, ρ_l คือความหนาแน่นของไอและของเหลว (kg/m³)

σ คือแรงตึงผิวของของไหล (N/m)

g คืออัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

P_E คือปริมาณความร้อนจากฮีตเตอร์ (W)

V คือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Volt)

I คือกระแสไฟฟ้า (Ampere)

q คือพลังความร้อน (kW/m²)

Z คือความต้านทานความร้อนรวม (°C/W)

ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิไอน้ำไปเรเตอร์กับคอนเดนเซอร์ (°C)

Q_{cond} คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนให้กับน้ำหล่อเย็นบริเวณคอนเดนเซอร์ (W)

\dot{m} คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)

c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg.°C)

T_8-T_7 คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (°C)

T_1 คืออุณหภูมิมืดตัวของสารทำงาน (°C)

$\frac{T_7+T_8}{2}$ คืออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำหล่อเย็น (°C)

T_W คืออุณหภูมิมืดตัวของสารทำงานที่เป็นน้ำกลั่น (°C)

T_A คืออุณหภูมิมืดตัวของสารทำงานที่มีส่วนผสมของเอทานอล (°C)

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

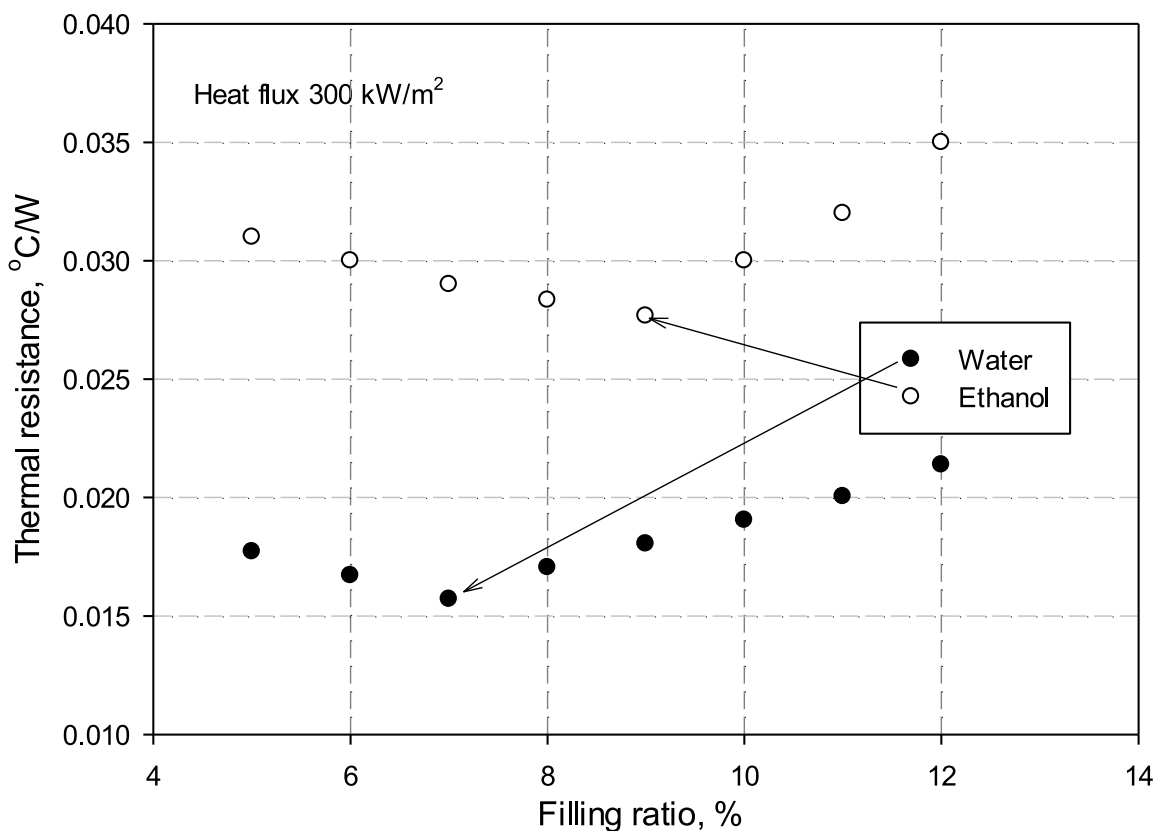
ในการทดสอบการเพิ่มสมรรถนะของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดเริ่มจากการตรวจสอบขีดจำกัดการเดือดด้วยสมการที่ (1) ของเอทานอลด้วยปริมาณการเติมต่ำสุด 5% (160cc) ของปริมาตรความจุ เนื่องจากเอทานอลมีค่าความจุความร้อนจำเพาะน้อยกว่านี้ พบว่าสามารถใช้กับปริมาณความร้อนได้ถึง 11,200 W ซึ่งในการทดลองจริงนั้นใช้ความร้อนสูงสุดเพียง 3,000 W (300 kW/m²) ซึ่งใช้ต่ำกว่าปริมาณ

ความร้อนที่คำนวณได้ 3.73 เท่า เพื่อป้องกันการเดือดระเหย เป็นไอหมด (Dry-out) ของของเหลวภายในอ่างของเหลวเดือดของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอน แล้วจึงทำการทดสอบอัตราการเติมที่เหมาะสมใหม่จากนั้นจะใช้อัตราการเติมที่ได้เป็นอัตราการเติมสารทำงานแบบผสมในการทดลอง ด้วยส่วนผสมของเอทานอลและฟลักซ์ความร้อนตามเงื่อนไขในการทดลอง โดยใช้อุณหภูมิอิ่มตัวและค่าความต้านทานความร้อนรวมเป็นค่าบังคับสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด

3.1 การทดสอบอัตราการเติมสารทำงาน

การทดลองเพื่อหาอัตราการเติมที่เหมาะสมด้วยอัตราการเติม 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12% ของปริมาตรความจุรวมของระบบ ทดสอบด้วยโหลดความร้อนคงที่เท่ากับ 300 kW/m² ผลการทดลองในรูปที่ 2 แสดงเป็นความสัมพันธ์ของ

อัตราการเติมกับค่าความต้านทานความร้อน (Z) ที่คำนวณได้ด้วยสมการที่ (4) กับอัตราการเติมน้ำและเอทานอลโดยยังไม่ผสมกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าอัตราการเติมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานความร้อน โดยพบว่าค่า Z ของน้ำต่ำสุดเมื่ออัตราการเติมเท่ากับ 7% เมื่อเปลี่ยนสารทำงานเป็นเอทานอลพบว่าค่า Z ต่ำที่สุดเมื่ออัตราการเติมเท่ากับ 9% เนื่องจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้านค่าความจุความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิอิ่มตัวที่ต่างกักรวมถึงค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และความหนาแน่น ซึ่งในการทดลองครั้งนี้เลือกใช้ค่าเฉลี่ยอัตราการเติมของสารทำงานทั้ง 2 ชนิดเนื่องจากใช้ผสมกันในการทดลองโดยเลือกใช้อัตราการเติมสารทำงานแบบผสมเท่ากับ 8% ของปริมาตรรวมของระบบ (256cc)

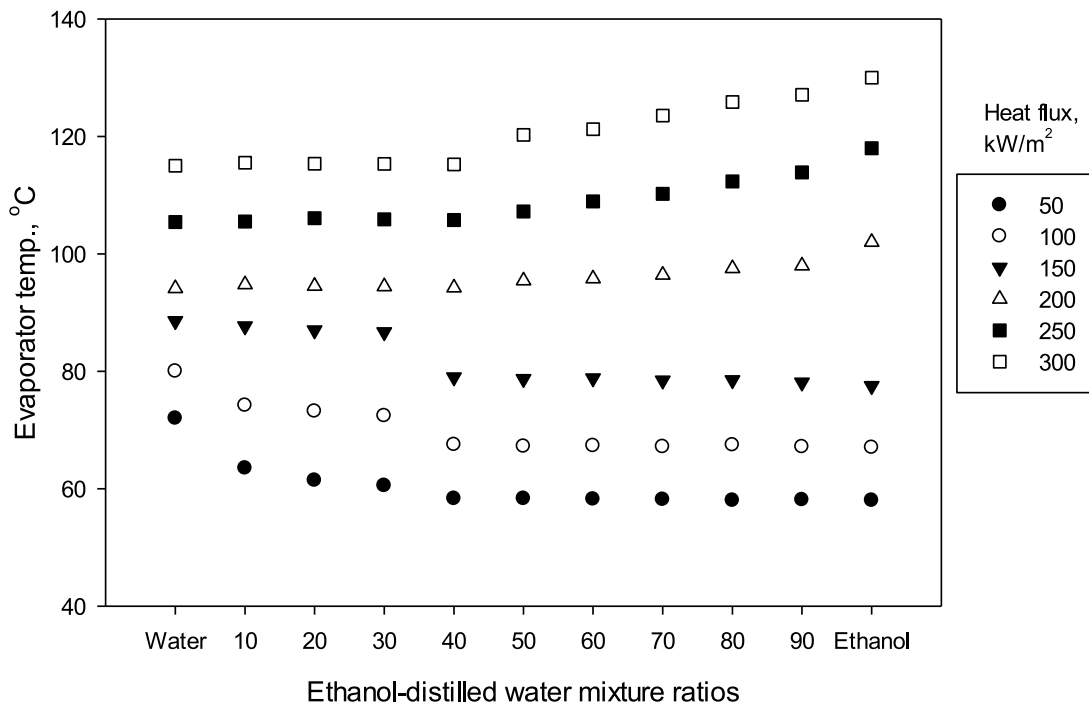


รูปที่ 2 การตรวจสอบปริมาณการเติมที่เหมาะสมด้วยค่าความต้านทานความร้อน

3.2 ความเข้มข้นของเอทานอลต่ออุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงาน

รูปที่ 3 เป็นการทดสอบอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานแบบผสมของเอทานอลกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นของเอทานอลโดยปริมาตรเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 และ 90% ทดสอบด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 50-300 kW/m² จากรูปจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของส่วนผสมเอทานอลมีผลต่ออุณหภูมิอิ่มตัวที่ลดลง และมีแนวโน้มอุณหภูมิอิ่มตัวที่ลดลงมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูงด้วยฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 150 kW/m² และช่วงที่อุณหภูมิไม่เกิน 85°C แสดงให้เห็นว่าสารทำงานแบบผสมมีค่าความจุความร้อนที่ลดลง จึงสามารถเดือดและระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าน้ำปกติโดยเฉพาะในระบบที่เป็นสุญญากาศเอทานอลจะใช้ในการถ่ายโอนความร้อนแบบเดือดระเหยได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 50-80°C [6, 10-12] เมื่อพิจารณาด้วย

ฟลักซ์ความร้อนที่มากกว่า 150 kW/m² จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นสูงของเอทานอลมีผลต่ออุณหภูมิอิ่มตัวที่สูงขึ้นมากกว่าน้ำบริสุทธิ์ แสดงว่าในระบบมีอัตราการกลายเป็นไอสูงและส่งผลให้ความดันภายในระบบนั้นสูงกว่าบรรยากาศเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนที่เพิ่มขึ้น ค่าความจุความร้อนที่ลดต่ำลงเนื่องจากความเข้มข้นของเอทานอลที่เพิ่มขึ้น รวมถึงอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศของเอทานอลมีเพียง 78.37°C ซึ่งมีค่าต่ำกว่าน้ำบริสุทธิ์ จึงส่งผลให้ความดันอิ่มตัวในระบบเพิ่มขึ้นตามอัตราการกลายเป็นไอของสารทำงาน ซึ่งอุณหภูมิอิ่มตัวและความดันอิ่มตัวของสารทำงานนั้นจะมีความสัมพันธ์กันโดยตรงด้วยสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำงาน ประกอบกับการถ่ายโอนความร้อนแบบเดือดระเหยโดยใช้น้ำเป็นสารทำงานนั้นจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนได้ดีเมื่ออุณหภูมิอิ่มตัวสูงกว่า 70°C [4, 12]

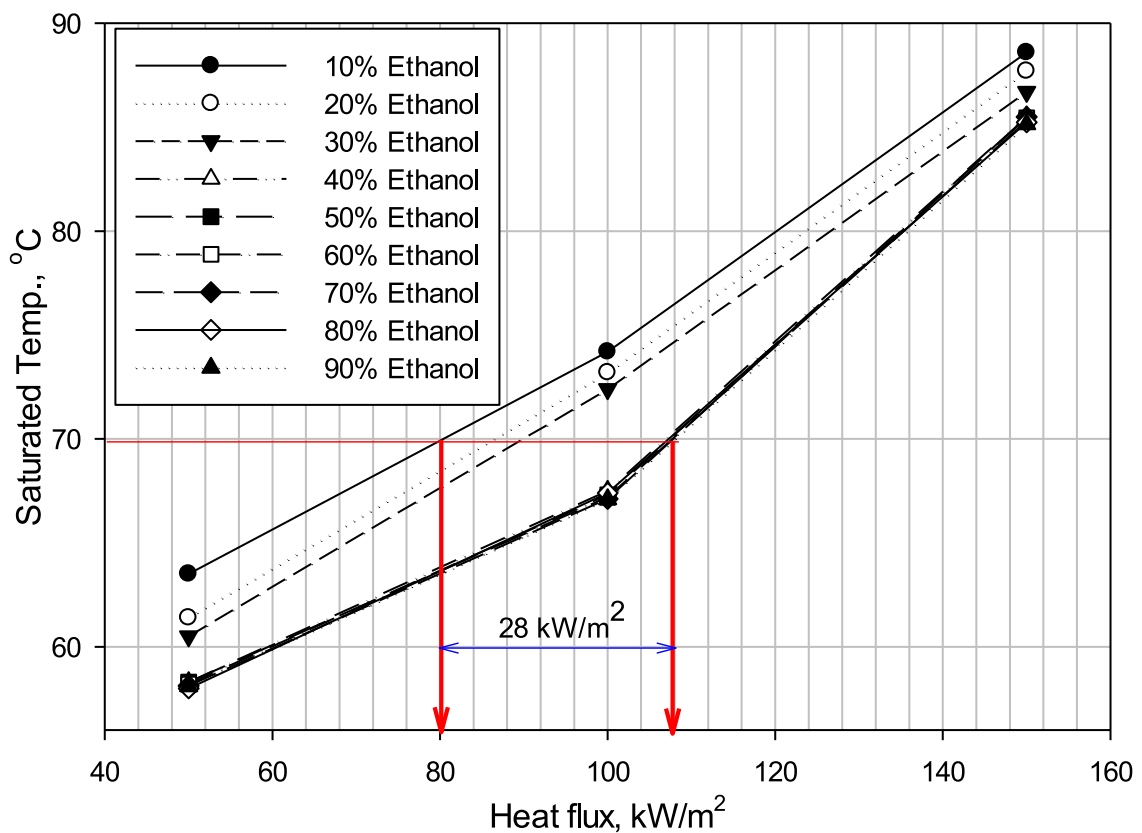


รูปที่ 3 อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลแตกต่างกัน

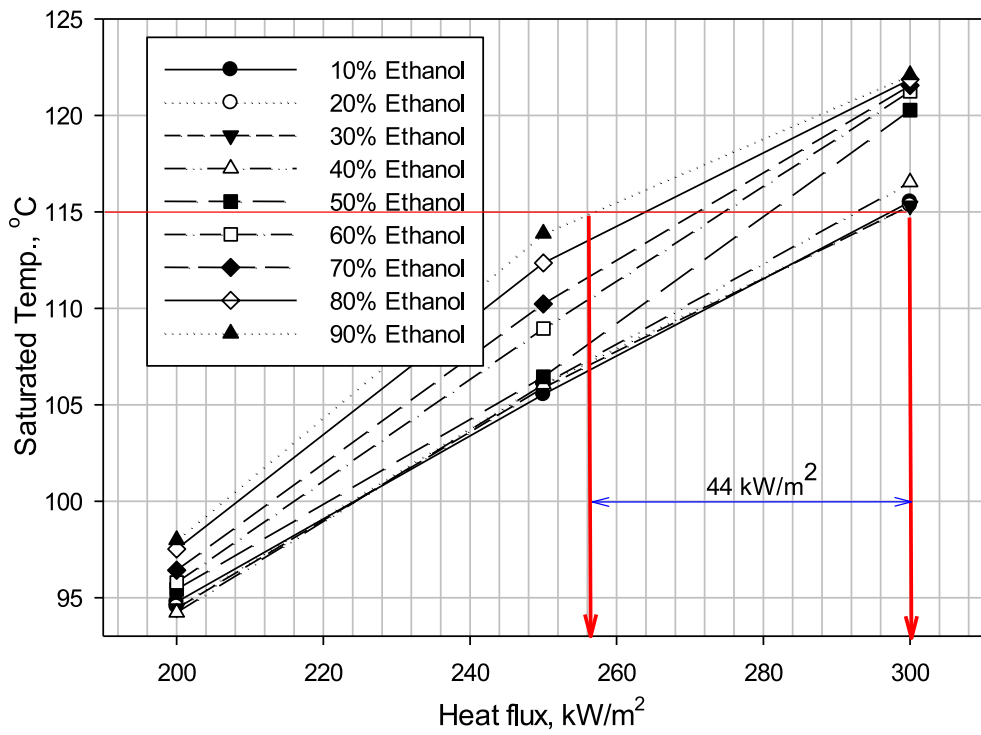
3.3 ผลความเข้มข้นเอทานอลต่อฟลักซ์ความร้อน

เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับฟลักซ์ความร้อนด้วยอุณหภูมิอิ่มตัวตามความเข้มข้นของเอทานอลที่ต่างกันดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าในช่วงอุณหภูมิอิ่มตัวไม่เกิน 90°C สารทำงานที่มีความเข้มข้นของเอทานอลตั้งแต่ 40% ขึ้นไป จะสามารถรับฟลักซ์ความร้อนได้สูงกว่าที่ความเข้มข้น 10% ประมาณ 28 kW/m² เมื่ออุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 70°C ซึ่งเป็นผลจากความหนาแน่นของสารทำงานที่ลดลงประกอบกับอุณหภูมิอิ่มตัวของเอทานอลที่ต่ำกว่าน้ำ และปริมาณของเอทานอลที่ผสมอยู่มีมากเพียงพอกับฟลักซ์ความร้อนที่ได้รับ จึงทำให้สารทำงานสามารถรับฟลักซ์ความร้อนได้สูงขึ้นที่อุณหภูมิอิ่มตัวเดียวกัน และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอิ่มตัวสูงกว่า 90°C ซึ่งมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำกลั่นที่ความ

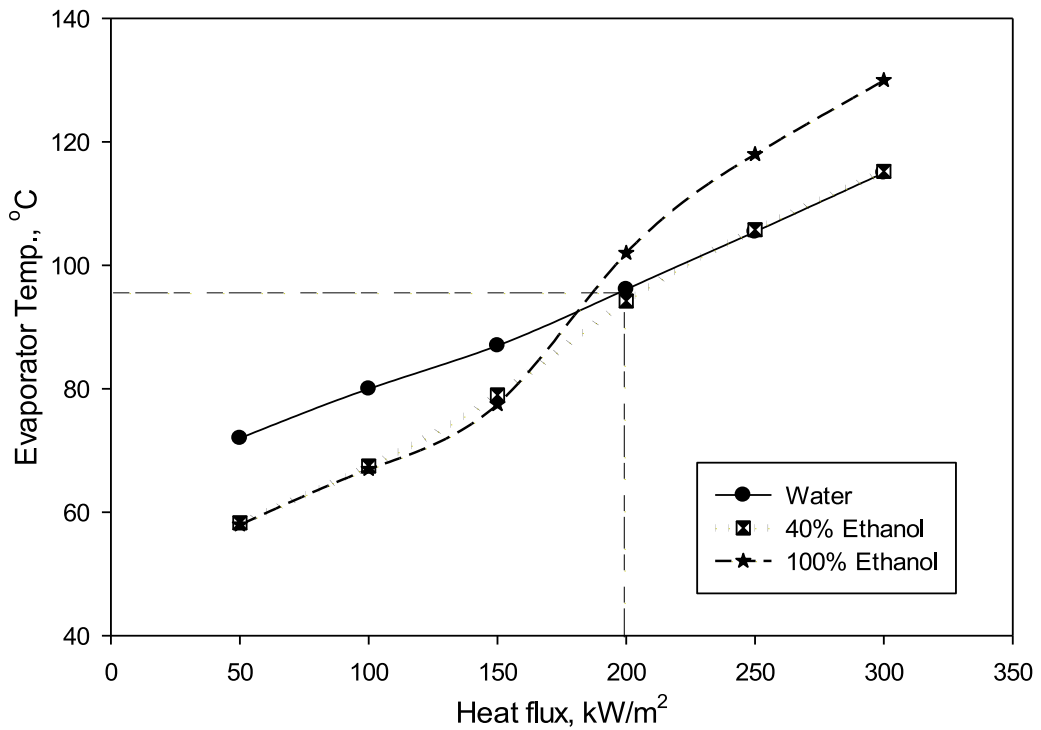
ดันบรรยากาศปกติ ดังรูปที่ 5 จะพบว่าสารทำงานที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่า 40% นั้นสามารถรับฟลักซ์ความร้อนได้ลดต่ำลง เนื่องจากความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ลดลงจากอัตราส่วนผสมที่มากขึ้นของเอทานอล จึงทำให้มีอัตราการระเหยสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิและความดันอิ่มตัวที่เพิ่มขึ้นด้วยฟลักซ์ความร้อนเดียวกันในระบบ และเป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศของเอทานอล จึงมีผลกระทบต่อความหนาแน่นและอัตราการไหลกลับที่ลดลงของส่วนผสมที่เป็นเอทานอล เมื่อพิจารณาฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 300 kW/m² จะเห็นได้ว่าสารทำงานที่มีส่วนผสมเป็นเอทานอล 10% มีอุณหภูมิอิ่มตัวเพียง 115°C และสามารถรับฟลักซ์ความร้อนได้สูงกว่าสารทำงานที่มีส่วนผสมเป็นเอทานอล 90% ถึง 44 kW/m² ที่อุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 115°C เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4 ผลต่างฟลักซ์ความร้อนที่รับได้ด้วยอุณหภูมิอิ่มตัวต่ำกว่า 90°C



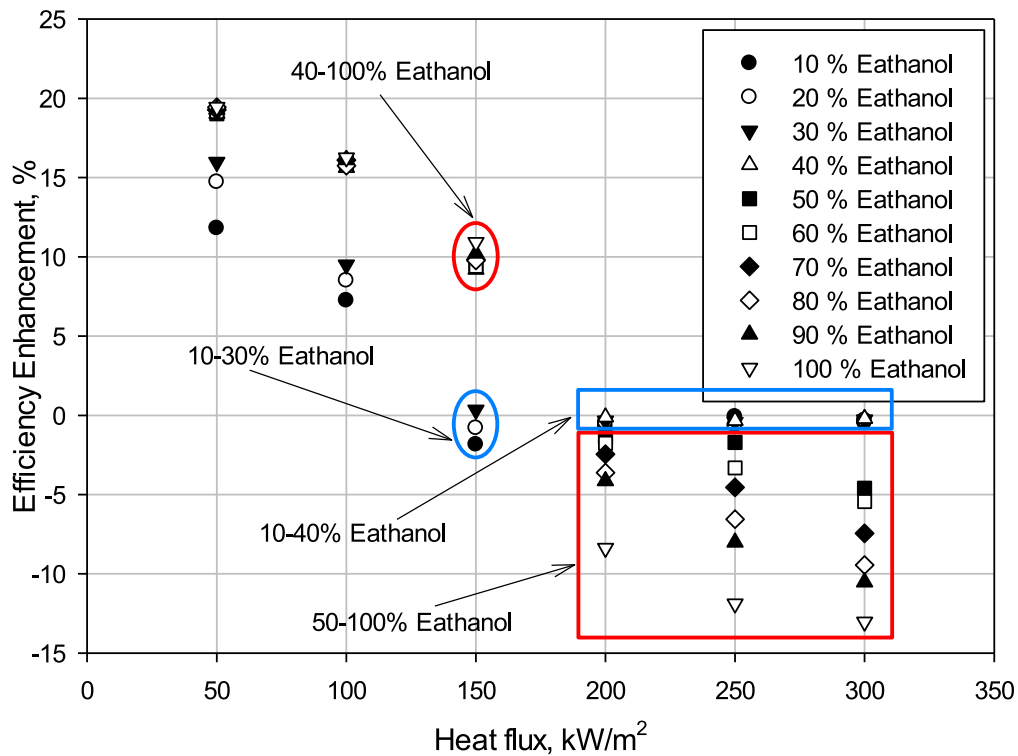
รูปที่ 5 ผลต่างฟลักซ์ความร้อนที่รับได้ด้วยอุณหภูมิอิ่มตัวสูงกว่า 90°C



รูปที่ 6 อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงานเมื่อความเข้มข้นของเอทานอล 40%

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่าหากทดลองกับฟลักซ์ความร้อนในช่วงไม่เกิน 200 kW/m^2 จะได้ความเข้มข้นส่วนผสมของเอทานอลที่พอเหมาะเท่ากับ 40% ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิอิมิตัวต่ำกว่าน้ำกลั่น และไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิอิมิตัวเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงกว่า 200 kW/m^2 ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะได้อัตราส่วนผสมของเอทานอลที่พอเหมาะทั้งฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิของไออิมิตัวสำหรับหม้อน้ำ

เทอร์โมไซฟอนวงจรปิดที่ทำการทดลอง โดยส่วนผสมของเอทานอลจะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนในช่วงอุณหภูมิอิมิตัวไม่เกิน 95°C และไม่ทำให้สมรรถนะลดลงเมื่ออุณหภูมิอิมิตัวสูงกว่า 95°C ซึ่งเป็นความเข้มข้นของส่วนผสมที่ให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนด้านอุณหภูมิได้ดีในทุกๆ ฟลักซ์ความร้อนที่ทำการทดลอง



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นด้วยความเข้มข้นของเอทานอล

3.4 ความเข้มข้นเอทานอลต่อสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนด้านอุณหภูมิอิมิตัว

จากการทดลองด้วยฟลักซ์ความร้อนที่แตกต่างกันด้วยอัตราส่วนผสมของเอทานอลที่แตกต่างกัน ย่อมมีผลให้ความสามารถหรือสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนได้แตกต่างกันด้วยสมบัติที่เปลี่ยนไปของสารทำงาน ดังรูปที่ 7 พิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนด้วยเปอร์เซ็นต์อุณหภูมิอิมิตัวของสารทำงานที่เป็นน้ำกลั่นในการทดลอง (T_w) กับอุณหภูมิอิมิตัวของสารทำงานที่มีเอทานอล

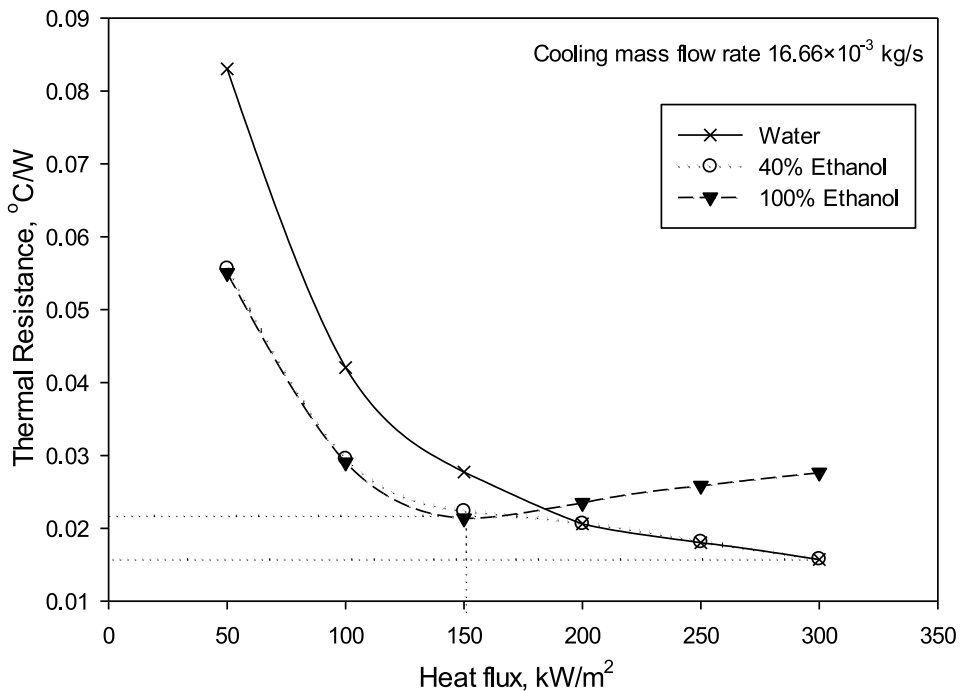
เป็นส่วนผสม (TA) ที่แตกต่างกันเมื่อได้รับฟลักซ์ความร้อนเท่ากัน ด้วยสมการที่ (7) โดยหลักในการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ 100% เท่ากัน ถึงแม้ว่าสารทำงานจะต่างกันก็ตาม ดังนั้นผลแตกต่างของอุณหภูมิอิมิตัวจึงสามารถพิจารณาเป็นสมรรถนะได้อีกตัวแปรหนึ่ง ตามลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของเทอร์โมไซฟอน จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าสารทำงานที่มีความเข้มข้นของเอทานอลตั้งแต่ 40% ขึ้นไปจะสามารถช่วยให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนด้าน

อุณหภูมิอิ่มตัวเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 19% เมื่อฟลักซ์ความร้อนเท่ากับ 50 kW/m² และจะลดลงเมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น จนถึงเปอรเซ็นต์ต่ำกว่าน้ำกลั่นเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงกว่า 200 kW/m² โดยเฉพาะสารทำงานที่มีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่า 40% เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 และ 3.3

3.5 ผลความเข้มข้นเอทานอลต่อค่าความต้านทานความร้อนรวม

สมรรถนะของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถพิจารณาได้ด้วยค่าความต้านทานความร้อนรวม (Z) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (4) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานสำหรับการถ่ายโอนความร้อนและใช้

พิจารณาสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนอย่างหนึ่งของเทอร์โมไซฟอน [13-15] เทียบกับ ฟลักซ์ความร้อนที่ทำการทดลองดังรูปที่ 8 พบว่าค่า Z ของสารทำงานที่เป็นเอทานอล 100% มีค่าต่ำสุดด้วยฟลักซ์ความร้อน 150 kW/m² และพบว่าค่า Z ของสารทำงานที่มีส่วนผสมเป็นเอทานอล 40% กับสารทำงานที่เป็นน้ำกลั่น 100% มีค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อได้รับฟลักซ์ความร้อนตั้งแต่ 200 kW/m² ขึ้นไป และยังคงมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากน้ำสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าเอทานอล เมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอิ่มตัวที่ความดันบรรยากาศ [1-2] ในขณะที่ส่วนผสมเอทานอล 40% ช่วยให้ค่า Z มีค่าใกล้เคียงกับค่า Z ของสารทำงานที่เป็นเอทานอล 100% เมื่อฟลักซ์ความร้อนต่ำกว่า 200 kW/m²



รูปที่ 8 ค่าความต้านทานความร้อนรวมของหม้อไอน้ำเทอร์โมไซฟอน

4. สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิด ภายใต้สภาวะสุญญากาศด้วยสารทำงานที่เป็นส่วนผสมระหว่างน้ำกลั่นกับเอทานอล จากการทดลองพบว่า

1. ส่วนผสมของเอทานอลที่ให้ผลการทดลองได้ดีที่สุดเท่ากับ 40% โดยปริมาตร ช่วยทำให้สมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงของฟลักซ์ความร้อนไม่เกิน 200 kW/m²

2. สามารถเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดได้ 19% ที่ฟลักซ์ความร้อน 50 kW/m² ด้วยอุณหภูมิอิ่มตัวเท่ากับ 58°C

3. มีสมรรถนะเท่ากับน้ำกลั่น 100% เมื่อ ฟลักซ์ความร้อนสูงกว่า 200 kW/m² และพบว่ามีค่า Z ต่ำสุดเท่ากับ 0.0158 °C/W ด้วยฟลักซ์ความร้อน 300 kW/m² และยังคงมีแนวโน้มที่ต่ำลงได้อีกเมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิอิ่มตัวยังไม่เกิน 120°C

4. จากผลการทดลองที่ได้การใส่สารทำงานแบบผสมนั้น เป็นอีกหนึ่งวิธีในการเพิ่มสมรรถนะของหม้อน้ำเทอร์โมไซฟอนวงจรปิดหรือเทอร์โมไซฟอนชนิดวงจรมีส่วนรับความร้อนขนาดใหญ่ ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีสมรรถนะในการถ่ายโอนความร้อนในช่วงของฟลักซ์ความร้อนที่กว้างขึ้น และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้นเช่นเดียวกันกับหม้อน้ำที่สามารถถ่ายโอนความร้อนไปในระยะไกลได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนส่งเสริมงานวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

6. เอกสารอ้างอิง

1. Sukchana, T., 2020, "Design, Construction and Testing of a Horizontal Thermosyphon Boiler," *KMUTT Research and Development Journal*, 43 (1), pp. 67-78. (In Thai).

2. Jaiboonma, C. and Sukchana, T., 2020, "Optimum Water Filling Ratio for a Closed Loop Ther-

mosyphon with Evaporator as a Boiler," *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 39 (2), pp. 645-652. (In Thai).

3. Chehade, A.A., Louahlia-Gualous, H., Le Masson, S., Victor, I. and Abouzahab-Damaj, N., 2014, "Experimental investigation of Thermosyphon Loop Thermal Performance," *Energy Conversion and Management*, 84, pp. 671-680.

4. Aghel, B., Rahimi, M. and Almasi, S., 2017, "Heat Transfer Enhancement of Two-phase Closed Thermosyphon using a Novel Cross-flow Condenser," *Heat Mass Transfer*, 53, pp. 765-773.

5. Jafari, D., Marco, P.Di., Filippeschi, S. and Franco, A., 2017, "An experimental Investigation on the Evaporation and Condensation Heat Transfer of Two-phase Closed Thermosyphons," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 88, pp. 111-123.

6. Lataoui, Z. and Jemni, A., 2017, "Experimental Investigation of a Stainless Steel Two-phase Closed Thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, 121, pp. 721-727.

7. Naresh, Y. and Balaji, C., 2017, "Experimental Investigations of Heat Transfer from an Internally Finned Two Phase Closed Thermosyphon," *Applied Thermal Engineering*, 112, pp. 1658-1666.

8. 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.

9. Kima, Y., Shina, D.H., Kima, J.S., Youb, S.M. and Leea, J., 2018, "Boiling and Condensation Heat Transfer of Inclined Two-phase Closed Thermosyphon with Various Filling Ratios," *Applied Thermal Engineering*, 145, pp. 328-342.

10. Chen S. and Yang J., 2016, "Loop Thermosyphon Performance Study for Solar Cells Cooling," *Energy Conversion and Management*, 121, pp. 297-304.
11. Gedik E., 2016, "Experimental Investigation of the Thermal Performance of a Two-phase Closed Thermosyphon at Different Operating Conditions Engine," *Energy and Buildings*, 127, pp. 1096-1107.
12. Kannan, K. and Kamatchi, R., 2020, "Augmented Heat Transfer by Hybrid Thermosyphon Assisted Thermal Energy Storage System for Electronic Cooling," *Journal of Energy Storage*, 27, pp. 1-10.
13. Sukchana, T. and 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, pp. 527-535.
14. Long, Z.Q. and Zhang, P., 2012, "Impact of Cooling Condition and Filling Ratio on Heat Transfer Limit of Cryogenic Thermosyphon," *Cryogenics*, 52 (1), pp. 66-76.
15. Long, Z.Q. and Zhang, P., 2013, "Heat Transfer Characteristics of Thermosyphon with N₂-Ar Binary Mixture Working Fluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, pp. 204-215.