

Research Article

การศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายใต้มุมเอียง
และอัตราการเติมสารทำงานที่แตกต่างกันโดยวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ

Experimental Investigation of the Heat Transfer Performance of a Two-Phase
Closed Thermosyphon under Different Inclination Angles and Filling Ratios
Using Dimensionless Analysis

กิตติพล ขาวงาม^{1*} และ พันธุ์เทพ คำพอง²

Kittipon Khaongam^{1*} and Phantep Khampong²

^{1*}สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรมการเชื่อม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

²ครูผู้ช่วย, โรงเรียนประจักษ์ศิลปาคาร สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาอุดรธานี

^{1*}Department of Welding Technical Education, Faculty of Technical Education,

Rajamangala University of Technology Isan, Khon kaen Campus

² Assistant Teacher, Prachaksilpakarn School, The Secondary Educational Service Area Office Udonthani

*Corresponding author. E-mail: kittipon.khaongam@hotmail.com

Received: May 29, 2026

Revised: June 22, 2026

Accepted: June 26, 2026

Available online: June 28, 2026

APA Citation:

Khaongam, K., & Khampong, P. . (2026). Experimental Investigation of the Heat Transfer Performance of a Two-Phase Closed Thermosyphon under Different Inclination Angles and Filling Ratios Using Dimensionless Analysis. *Journal of Industrial Technology Buriram Rajabhat University*, 8(1), 29–56. <https://doi.org/10.14456/brujit.2026.3>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ซึ่งที่ผ่านมาแทบไม่มีการศึกษาปัจจัยทั้งสองร่วมกันอย่างละเอียดการทดลองได้ทดสอบ มุมเอียง 15°, 20° และ 25° จากแนวระนาบ อัตราการเติมสารทำงานเอทานอล ภายในส่วนให้ความร้อน 60%, 70% และ 80% ของปริมาตร การทดลองใช้ท่อทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm และความยาวรวม 450 mm แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนให้ความร้อน 150 mm ส่วนอะเดียแบติก และส่วนระบายความร้อน อุณหภูมิของไหลร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบอยู่ที่ 55, 65 และ 85 °C ในขณะที่น้ำเย็นควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 20 °C ประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความต้านทานทางความร้อน และกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในระบบมีการวิเคราะห์ข้อมูลผ่านตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ เลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) เลขเรย์ลี (Rayleigh

number) และเลขจาคอบ (Jakob number) พบว่า ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน มีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ที่มุมเอียง 20° ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน 70% ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวระบบมีค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนสูงกว่าสภาวะอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับทฤษฎีเกี่ยวกับการเดือดและการไหลพาความร้อนตามธรรมชาติที่เป็นที่ยอมรับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่ามุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานมีอิทธิพลอย่างชัดเจนต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ข้อมูลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานระบบกู้คืนความร้อนในอนาคต

คำสำคัญ: ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน สมรรถนะการถ่ายเทความร้อน อัตราการเติมสารทำงาน มุมเอียงของท่อ ตัวแปรไร้มิติ

Abstract

The primary purpose of this paper is to find the interaction between the inclination angle and filling ratio on the performance of a two-phase closed thermosyphon as both two parameters are rarely studied together in detail so far. The tests were conducted at an inclination angle of 15° , 20° and 25° from horizontal plane and filling ratios of 60%, 70% and 80% of the evaporator volume by ethanol. A copper tube with a diameter of 22 mm and a total length of 450 mm was used in the experiment; the tube was divided into three parts; 150 mm heating section, an adiabatic section, and a cooling section. The hot fluid inlet temperatures were 55, 65 and 85°C and the cooling water was held at 20°C constant. The results of the two-phase closed thermosyphon performance were evaluated based on the recovered heat transfer rate, thermal resistance, and by a second evaluation from the heat transfer inside the machine. To understand the figures the Nusselt number, Rayleigh number and Jakob number were used as dimensionless parameters. Based on the experimental results, it is found that the two-phase closed thermosyphon with 70% filling ratio and inclined at 20° gives the highest heat transfer performance. The thermal resistance was the lowest under these conditions, and the heat transfer was the highest amongst other conditions tested and the theory of boiling and natural convection was in good agreement. Clearly from this study, both the inclination angle and the filling ratio influence a lot the heat transfer efficiency within the two-phase closed thermosyphon. The data obtained will be useful for further design and implementation of the waste heat recovery systems.

Keywords: Two-Phase Closed Thermosyphon, Heat Transfer Performance, Filling Ratio, Inclination Angle, Dimensionless Parameters

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน Ghahremani et al. [1] ได้ชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนและการกู้คืนความร้อนทิ้งจากกระบวนการอุตสาหกรรมเป็นสิ่งสำคัญในงานวิศวกรรมพลังงานสมัยใหม่ เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมมีส่วนการใช้พลังงานความร้อนในระดับสูงและมีศักยภาพในการกู้คืนพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมอีกเป็นจำนวนมาก ดังที่รายงานในงานวิจัยของ Malleswararao et al. [2], Forman et al. [3] และ Lomonaco et al. [4] การพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนประสิทธิภาพสูงจึงมีบทบาทสำคัญต่อการลดการใช้พลังงานขั้นต้น เพิ่มประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสากล ดังที่กล่าวไว้ใน Sichamnan et al. [5] เทอร์โมไซฟอนพื้นที่หน้าตัดกลมแบบปิดสองสถานะ (Two-Phase Closed Thermosyphon, TPCT) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนแบบพาสซีฟที่สามารถลำเลียงพลังงานผ่านกลไกการระเหยและการควบแน่นของสารทำงาน อาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นตัวขับเคลื่อนไม่ต้องใช้พลังงานภายนอกโครงสร้างแบบไม่มีไส้ดูดซับ (wickless structure) ทำให้มีความเรียบง่ายแข็งแรง และให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำตามที่อธิบายไว้ใน Faghri [6] ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว Kang et al. [7] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ TPCT อย่างแพร่หลายในระบบกู้คืนความร้อนทิ้ง ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ และระบบควบคุมอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมรวมถึง Sae-Jung et al. [8] และ Rittidech et al. [9] ได้ศึกษาประยุกต์ใช้ในระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในบริบทของประเทศไทยและ Jengsooksawat et al. [10] ได้พัฒนาระบบลู่วัสดุเทอร์โมไซฟอนร่วมกับห้องไอ (vapour chamber) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน วรรณกรรมที่ผ่านมาส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับปัจจัยเชิงกลสองประการหลัก ได้แก่ อัตราการเติมสารทำงาน (filling ratio) และมุมเอียงของท่อ (inclination angle) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อรูปแบบการไหลสองสถานะและประสิทธิภาพการเปลี่ยนสถานะภายในระบบ ในด้านอัตราการเติมสารทำงาน Mutalikdesai และ Kate [11] รายงานว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ระดับที่รักษาสมดุลระหว่างปริมาตรของเหลวและไอ เพื่อหลีกเลี่ยงทั้งสภาวะแห้ง (dry-out) ที่ส่วนทำระเหยและการสะสมของของเหลวมากเกินไปจนเกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขัง (flooding) ซึ่งเพิ่มความต้านทานทางความร้อน Shabgard et al. [12] พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมความร้อนชั่วขณะภายใต้อัตราการเติมที่แตกต่างกัน และพบว่าค่า optimal filling ratio ไม่ใช่ค่าคงที่แต่ขึ้นอยู่กับภาวะความร้อนและขนาดของท่อ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ Lin et al. [13] ศึกษาผลของสภาพการเปียกผิว (surface wettability) ต่อ TPCT ด้วยวิธีเชิงตัวเลข ในขณะที่ Ghaffari et al. [14] พบว่าในระบบระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ อัตราการเติมที่ต่ำมากอาจให้ค่าความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุดในบางสภาวะ ซึ่งแตกต่างจากแนวคิดทั่วไป แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของระบบขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการใช้งานเป็นสำคัญ ในด้านมุมเอียงของท่อ Lataoui et al. [15] ศึกษา TPCT ในระบบเครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดสุญญากาศและพบว่ามุมเอียงที่เหมาะสมไม่ได้มีค่าคงที่แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการทำงาน สอดคล้องกับผลงานของ Khaongam และ Srihajong [16] ที่ศึกษาผลของการปรับมุมเอียงของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น พบว่าสามารถเพิ่มค่า heat flux และลดค่าความต้านทานทางความร้อนได้ Solomon et al. [17] ยืนยันด้วยวิธีเชิงตัวเลขว่ามุม

เอียงมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลสองสถานะและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแม้จะมีความพยายามในการศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงหรืออัตราการเติมสารทำงานในลักษณะแยกส่วน (isolated parameters) กล่าวคือ งานที่ศึกษามุมเอียงมักกำหนดอัตราการเติมให้คงที่ในขณะที่งานที่ศึกษาอัตราการเติมมักกำหนดมุมเอียงให้ตายตัว [11-17] ซึ่งทำให้ไม่สามารถจับปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองได้ส่งผลให้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของพารามิเตอร์เหล่านี้ภายใต้สภาวะการทำงานจริงที่อาจมีความผันผวนนั้นยังไม่สมบูรณ์นอกเหนือจากพารามิเตอร์เชิงกลแล้ว การวิเคราะห์สมรรถนะของ TPCT ผ่านตัวแปรไร้มิติ (dimensionless parameters) เป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยให้เข้าใจกลไกทางฟิสิกส์ได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเนื่องจากตัวแปรเหล่านี้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบที่มีความหมายเชิงกายภาพและสามารถเปรียบเทียบกันได้ในสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวแปรไร้มิติ 3 ตัว ได้แก่ Nusselt Number (Nu), Rayleigh Number (Ra) และ Jakob Number (Ja) เนื่องจากตัวแปรทั้งสามนี้ครอบคลุมกลไกหลักของการถ่ายเทความร้อนภายใน TPCT ประกอบด้วย การพาความร้อน (convection), แรงลอยตัวที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (buoyancy-driven flow) และการเปลี่ยนสถานะของสารทำงาน (phase change) ตามลำดับ โดย Nusselt Number (Nu) เป็นอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนต่อการนำความร้อนผ่านชั้นสารทำงานที่อยู่ผนังในบริบทของ TPCT ค่า Nu ที่สูงหมายถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอและของเหลวภายในท่อช่วยพาความร้อนออกจากผิวผนังได้ดีกว่าการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ค่า Nu จึงช่วยให้ทราบว่าสภาวะการทำงานนั้น ๆ ส่งเสริมหรือลดทอนการพาความร้อนภายในระบบอย่างไร Gedik [18] พบว่าค่า Nu ของ TPCT เพิ่มขึ้นตามอัตราการถ่ายเทความร้อนและมีค่าสูงสุดที่มุมเอียงเหมาะสม ขณะที่ Zhang et al. [19] ใช้วิธีเชิงตัวเลขเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับสภาวะการทำงานในท่ออุณหภูมิสูง Rayleigh Number (Ra) เป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายความสมดุลระหว่างแรงลอยตัว (buoyancy force) กับแรงหนืด (viscous force) และการแพร่กระจายความร้อน (thermal diffusion) ค่า Ra ที่สูงหมายถึงแรงลอยตัวมีอิทธิพลเหนือแรงหนืดและแรงต้านการนำความร้อน ส่งผลให้เกิดการไหลแบบพาความร้อนตามธรรมชาติ (natural convection) ที่รุนแรง Chami และ Zoughaib [20] อธิบายว่า Ra เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงแรงขับเคลื่อนหลักของ TPCT คือ แรงโน้มถ่วงและความแตกต่างของอุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารทำงานโดยไม่ต้องใช้พลังงานภายนอก ดังนั้น การวิเคราะห์ Ra จึงช่วยให้เข้าใจว่าแรงลอยตัวมีมากเพียงพอที่จะทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ดีหรือไม่ โดยเฉพาะเมื่อมุมเอียงเปลี่ยนไปแรงโน้มถ่วงที่กระทำในแนวแกนท่อจะเปลี่ยนแปลง ส่งผลโดยตรงต่อค่า Ra และด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อรูปแบบการไหลและประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ส่วน Jakob Number (Ja) เป็นอัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัส (sensible heat) ที่ใช้ในการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารทำงาน กับความร้อนแฝง (latent heat) ที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะค่า Ja ที่สูงแสดงว่าพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ถูกใช้ไปในการเพิ่มอุณหภูมิของสารทำงานมากกว่าการเปลี่ยนสถานะ ในทางกลับกันหากค่า Ja ต่ำ แสดงว่าพลังงานความร้อนถูกใช้ไปกับการเปลี่ยนสถานะเป็นหลัก ซึ่งเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูงในการลำเลียงความร้อน Xu et al. [21] และ Cai et al. [22]

ใช้ Ja ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะของ TPCT และพบว่า Ja มีความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนและความเสถียรของระบบการวิเคราะห์ค่าร่วมระหว่าง Ja กับอัตราการถ่ายเทความร้อนจะช่วยให้เราสามารถระบุได้ว่าสภาวะการทำงานใดที่ส่งเสริมการเปลี่ยนสถานะได้ดีที่สุดความท้าทายสำคัญอีกประการหนึ่งในการพัฒนาระบบ TPCT คือการจัดการกับความไม่เสถียรของการไหลสองสถานะซึ่งอาจนำไปสู่ปรากฏการณ์แห้งหรือการไหลย้อนกลับที่ไม่สมบูรณ์ Perinba Selvin Raj et al. [23] ได้เสนอการออกแบบเทอร์โมไซฟอนแบบรูปที่มีช่องไอคู่และช่องของเหลวเดี่ยว พร้อมห้องขดเชยเพื่อลดความไม่เสถียรของการไหล Mana et al. [24] พบว่าเทอร์โมไซฟอนแบบรูปที่มีช่องไอคู่ช่วยเพิ่มความเร็วของการไหลของไอและส่งเสริมการควบแน่นที่รวดเร็วยิ่งขึ้น He et al. [25] วิเคราะห์ลักษณะความไม่เสถียรของรูปเทอร์โมไซฟอนในช่วงอัตราการเดินที่กว้างและพบว่าความไม่เสถียรเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในช่วงอัตราการเดินที่ต่ำและสูงเกินไปขณะที่ Smith et al. [26] ศึกษาผลของมุมคดและอัตราการเดินต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนและพบว่ารูปแบบการไหลมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เชิงเรขาคณิต นอกจากนี้ Rukruang et al. [27] ได้ศึกษาขีดจำกัดและศักยภาพของเทอร์โมไซฟอนแบบช่องขนาดเล็กหลายช่องสำหรับการระบายความร้อนด้วยอากาศในด้านการปรับปรุงพื้นผิวและการระบายความร้อนอิเล็กทรอนิกส์ Larimi et al. [28] พัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบพื้นผิวแบบ Multi-Scale Electroplated Porous (MuSEP) ซึ่งสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบเดือด Vincent et al. [29] พัฒนารูปแบบการทำนายความต้านทานความร้อนของ TPCT แบ่งความต้านทานรวมออกเป็นสามองค์ประกอบย่อยเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด ซึ่ง Ghaffari et al. [30] นำไปประยุกต์ใช้เพื่อผลักดันขีดจำกัดของการระบายความร้อนด้วยอากาศสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์กำลังสูงในด้านการพัฒนาวิธีการออกแบบสมัยใหม่ Wansasueb et al. [31] ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนและความแตกต่างของอุณหภูมิรวมของท่อความร้อน ขณะที่ Wang et al. [32] พัฒนาความสัมพันธ์เชิงประจักษ์สำหรับการทำนายฟลักซ์ความร้อนของ TPCT พิจารณาตัวแปรไร้มิติที่ครอบคลุมกลไกการถ่ายเทความร้อนสองสถานะ นอกจากนี้ Khaongam et al. [33] ได้ศึกษารูปแบบการไหลภายในเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่เน้นส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหยซึ่งสร้างจากแก้ว และ Pipatpaiboon et al. [34] ได้นำเสนอวิธีการลดการสูญเสียความร้อนในส่วนอะเดียแบติก TPCT แม้ว่างานวิจัยข้างต้นจะให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับสมรรถนะของ TPCT ภายใต้สภาวะการทำงานที่หลากหลายแต่เมื่อพิจารณาอย่างเป็นระบบแล้วพบว่ามีข้อจำกัดและช่องว่างทางความรู้ที่สำคัญ ประการแรก วรรณกรรมส่วนใหญ่ยังคงวิเคราะห์อิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเดินสารทำงานในลักษณะแยกส่วน (isolated parameter studies) ซึ่งไม่สามารถจับปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองได้ ส่งผลให้องค์ความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกันของพารามิเตอร์เหล่านี้ภายใต้สภาวะการทำงานจริงซึ่งมีความผันผวนนั้นยังคงไม่สมบูรณ์ [11-17], [35-39] งานวิจัยที่ศึกษาผลรวมอย่างเป็นระบบยังมีจำนวนจำกัด และยังไม่มีการนำเสนอขอบเขตการทำงานที่เหมาะสม (optimal operating envelope) ที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ของทั้งสองพารามิเตอร์ ประการที่สอง แม้งานวิจัยบางชิ้นจะใช้ตัวแปรไร้มิติในการวิเคราะห์สมรรถนะ [32], [18-20] แต่ยังไม่มีการเชื่อมโยงเชิงระบบระหว่างพารามิเตอร์เชิงกลที่

ปรับเปลี่ยนได้ (มุมเอียงและอัตราการเติม) กับกลไกทางฟิสิกส์ที่ถูกควบคุมโดยตัวแปรไร้มิติ (Nu, Ra, Ja) ภายในชุดการทดลองเดียวกันกล่าว คือยังขาดการศึกษาเชิงปริมาณที่อธิบายว่าเมื่อเปลี่ยนมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน ค่า Nu, Ra และ Ja เปลี่ยนแปลงไปอย่างไรและ การเปลี่ยนแปลงนั้นสอดคล้องกับพฤติกรรมการเดือดและการไหลแบบสองสถานะภายในท่อหรือไม่ซึ่งเป็นองค์ความรู้สำคัญในการออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดบนพื้นฐานเชิงกลไก ประการที่สาม งานวิจัยที่ผ่านมาแนะนำให้เสนอเพียงสถานะที่ให้สมรรถนะสูงสุด (best point) โดยไม่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใดสถานะนั้นจึงดีที่สุดและสถานะใกล้เคียงมีพฤติกรรมแตกต่างกันอย่างไร [35], [40] ยังขาดการศึกษาที่วิเคราะห์เชิงลึกถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหล (flow pattern) ค่าการถ่ายเทความร้อนและเสถียรภาพของระบบในมิติของตัวแปรไร้มิติเพื่อสร้างขอบเขตการทำงานที่เหมาะสม (optimal operating map) ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพจากช่องว่างทางความรู้ดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีความแปลกใหม่ (Novelty) ที่แตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาอย่างชัดเจนในประเด็นสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ (1) การศึกษาปฏิสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เชิงกลแบบเต็มรูปแบบโดยออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (full factorial design) เพื่อศึกษาผลรวม (interaction effect) ของมุมเอียง 15° , 20° , 25° และอัตราการเติมสารทำงาน 60%, 70%, 80% ภายใต้ช่วงกำลังความร้อนที่แตกต่างกัน 55, 65, 85 °C ซึ่งครอบคลุมสภาวะการทำงานที่หลากหลายกว่าที่เคยมีรายงานมาก่อนทำให้สามารถจับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นและจุดเปลี่ยนผ่าน (transition points) ของระบบได้อย่างแม่นยำ (2) การวิเคราะห์เชิงกลไกด้วยตัวแปรไร้มิติสามตัวพร้อมกันงานวิจัยนี้ไม่ได้หยุดอยู่เพียงการรายงานค่าฟลักซ์ความร้อนหรือความต้านทานทางความร้อนเท่านั้นแต่นำเสนอการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu, Ra และ Ja อย่างเป็นระบบเพื่ออธิบายว่าแรงลอยตัว (Ra) ขับเคลื่อนการไหลอย่างไร การพาความร้อน (Nu) ตอบสนองต่อการไหลอย่างไรและการเปลี่ยนสถานะ (Ja) ได้รับผลกระทบจากพารามิเตอร์เชิงกลอย่างไร ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงระหว่างกลไกระดับจุลภาค (micro-scale phase change) กับสมรรถนะระดับมหภาค (macro-scale performance) ที่ไม่เคยมีรายงานอย่างเป็นระบบในงานวิจัยก่อนหน้านี้และ (3) การนำเสนอขอบเขตการทำงานที่เหมาะสมบนพื้นฐานทางฟิสิกส์ งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่นำเสนอสถานะที่ให้สมรรถนะสูงสุดเท่านั้นแต่ยังวิเคราะห์เชิงลึกว่าเหตุใดสภาวะดังกล่าวจึงเหมาะสมที่สุด อาศัยการตีความค่าตัวแปรไร้มิติควบคู่กับทฤษฎีการเดือดและการควบแน่นรวมถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลและเสถียรภาพของระบบซึ่งจะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ใช่เพียงการลองผิดลองถูก จากช่องว่างทางความรู้และความแปลกใหม่ที่นำเสนอดังกล่าวงานวิจัยชิ้นนี้จึงถูกออกแบบมาเพื่อศึกษาเชิงทดลองอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับผลรวมของมุมเอียงของท่อและอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อนของ TPCT ภายใต้ช่วงกำลังความร้อนที่กำหนด (สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อ 2.1) พร้อมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงตัวแปรไร้มิติ (Nu, Ra, Ja) เพื่ออธิบายกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทความร้อนอย่างครอบคลุมและระบุสภาวะการทำงานที่เหมาะสม (สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ข้อ 2.2) ผลการศึกษานี้คาดว่าจะช่วยเติมเต็มช่องว่างขององค์ความรู้ในด้านการออกแบบ TPCT ที่มีพื้นฐานเชิงกลไกและสนับสนุนการพัฒนาแนว

ทางการออกแบบสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบกักเก็บความร้อนทั้งระบบพลังงานความร้อนในภาคอุตสาหกรรมและระบบจัดการความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืนต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาผลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่กำหนด

2.2 เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนด้วยการวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers อธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อน ระบุสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

3. ขอบเขตของการวิจัย

3.1 วิจัยนี้จำกัดการศึกษาเฉพาะท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนชนิดท่อเดี่ยวที่ทำงานภายใต้แรงโน้มถ่วงผลิตจากท่อทองแดงผิวเรียบเป็นโครงสร้างหลัก

3.2 ใช้เอทานอลเป็นสารทำงานเพียงชนิดเดียว ไม่พิจารณาสารทำงานชนิดอื่น

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ มุมเอียงของท่อ 15° , 20° และ 25° จากแนวระดับ อัตราการเติมสารทำงาน 60%, 70% และ 80% ของปริมาตรส่วนทึบ

3.4 สมรรถนะของท่อความร้อนถูกประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าความต้านทานทางความร้อน

3.5 การทดลองใช้อุณหภูมิแหล่งความร้อนที่ 55, 65 และ 85 °C ร่วมกับน้ำเย็นอุณหภูมิคงที่ 20 °C ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวถูกเลือกให้สอดคล้องกับระบบกักเก็บความร้อนทั้งอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง 50-100 °C ในภาคอุตสาหกรรม [3-4] รวมถึงการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนในระบบพลังงานความร้อนแสงอาทิตย์ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิทำงานใกล้เคียงกัน [41] ตลอดจนเหมาะสมกับจุดเดือดของเอทานอล 78 °C เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

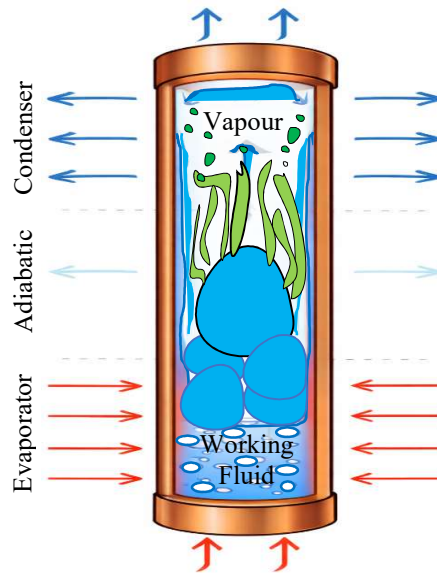
3.6 การวิเคราะห์ผลจำกัดเฉพาะสมรรถนะและตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob ไม่พิจารณาการจำลองเชิงตัวเลขหรือการทดสอบระดับอุตสาหกรรม

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทพลังงานความร้อนที่ใช้การไหลเวียนของสารทำงานในท่อปิดและการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไออาศัยแรงโน้มถ่วงเป็นแรงขับเคลื่อนหลักทำให้สามารถลำเลียงความร้อนจากบริเวณอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณอุณหภูมิต่ำได้โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์ทางกลหรือ

พลังงานภายนอกโครงสร้างภายในมี 3 บริเวณสำคัญ ส่วนควบแน่น ส่วนกันความร้อน และส่วนทำระเหย พลังงานความร้อนที่เข้าสู่ส่วนทำระเหยทำให้สารทำงานเดือดและเปลี่ยนเป็นไอจากนั้นไอจะเคลื่อนสู่ส่วนควบแน่นเพื่อปลดปล่อยพลังงานและกลับเป็นของเหลวก่อนที่จะไหลย้อนกลับลงสู่ส่วนทำระเหย ภายใต้อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเกิดวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพในทุกระบบปิด ลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างและหลักการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อน

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสามารถประเมินได้จากหลักสมดุลพลังงานของของไหลหล่อเย็นที่ไหลผ่านบริเวณส่วนทำระเหยหรือส่วนควบแน่น [42] ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของสมการต่อไปนี้ ดังสมการที่ 1

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

เมื่อ Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W) $\dot{m}$ = ปริมาณการไหลของมวลสารหล่อเย็นต่อหน่วยเวลา (kg/s) c_p = ความสามารถในการเก็บความร้อนของของไหล (J/kg·K) T_{out} = อุณหภูมิของไหลขณะไหลออกจากระบบ (K หรือ °C) T_{in} = อุณหภูมิของไหลก่อนเข้าสู่ระบบ (K หรือ °C)

4.3 ค่าความต้านทานทางความร้อน

ค่าความต้านทานทางความร้อนจากอุณหภูมิเฉลี่ยของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นงานวิจัยนี้นิยมค่าความต้านทานทางความร้อนในรูปของอุณหภูมิผืนท่อกและฟลักซ์ความร้อน [43] ซึ่งสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2

$$R_{th} = \frac{T_{w,e} - T_{w,c}}{Q} \quad (2)$$

เมื่อ R_{th} = ค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (K / W)
 $T_{w,e}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนทำระเหย (K หรือ °C) $T_{w,c}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนควบแน่น (K หรือ °C) Q = อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

4.4 อิทธิพลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน

มุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนมีผลต่อการไหลย้อนกลับของสารทำงานในสถานะของเหลวภายใต้แรงโน้มถ่วง ขณะที่อัตราการเติมสารทำงานส่งผลต่อพฤติกรรมการเดือดและการควบแน่นภายในท่อ อัตราการเติมสารทำงาน [44] สามารถนิยามได้ ดังสมการที่ 3

$$FR = \frac{V_f}{V_e} \quad (3)$$

เมื่อ FR = อัตราการเติมสารทำงาน (– หรือ %) V_f = ปริมาตรของสารทำงานที่เติมลงในท่อ (m³) V_e = ปริมาตรของส่วนทำระเหย (m³)

สำหรับปริมาตรของส่วนทำระเหยท่อทรงกระบอกหาได้จากสมการเรขาคณิต [45] ดังสมการที่ 4

$$V_e = \frac{\pi D_i^2}{4} L_e \quad (4)$$

เมื่อ D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m) L_e = ความยาวของส่วนทำระเหย (m)

4.5 การวิเคราะห์ตัวแปรไร้มิติ

เพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนและพฤติกรรมการเดือดภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนงานวิจัยนี้นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปของตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ Nusselt, Rayleigh และ Jakob Number

4.5.1 Nusselt Number (Nu) ในบริบทของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ค่า Nu ที่สูงหมายถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น เนื่องจากการพาความร้อนจากการเคลื่อนที่ของไอและของเหลวเหนือกว่าการนำความร้อนผ่านเนื้อวัสดุ [18] คำนวณได้จากสมการที่ 5

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

เมื่อ h = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W / m²·K) D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m) k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน (W / m·K)

4.5.2 Rayleigh Number (Ra) สำหรับท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนค่า Ra ที่สูงสะท้อนถึงอิทธิพลของแรงลอยตัวที่ขับเคลื่อนการไหลของไอขึ้นด้านบนและของเหลวไหลกลับลงด้านล่าง ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการหมุนเวียนของสารทำงานโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก [20] คำนวณได้จากสมการที่ 6

$$Ra = \frac{g\beta(T_w - T_{sat})D^3}{\nu\alpha} \quad (6)$$

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2) β = สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร ($1/K$) T_w = อุณหภูมิผนังท่อ (K) T_{sat} = อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงาน (K) ν = ความหนืดจลน์ (m^2/s) α = สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายความร้อน (m^2/s)

4.5.3 Jakob Number (Ja) บ่งชี้อัตราส่วนระหว่างความร้อนสัมผัสต่อความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ซึ่งใช้ประเมินพฤติกรรมการเดือดและการเปลี่ยนสถานะภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [19] คำนวณได้จากสมการที่ 7

$$Ja = \frac{Cp(T_w - T_{sat})}{h_{fg}} \quad (7)$$

เมื่อ Cp = ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kgK) h_{fg} = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (J/kg)

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty Propagation) เนื่องจาก Q คำนวณจาก 3 ตัวแปรที่วัดได้ ($\dot{m}, T_{c,out}, T_{c,in}$) ความไม่แน่นอนรวม W_Q จึงต้องคำนวณกระจายความคลาดเคลื่อนจากทุกตัวแปร [46] ตามสมการที่ 8

$$W_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} W_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{c,out}} W_{T_{c,out}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{c,in}} W_{T_{c,in}}\right)^2} \quad (8)$$

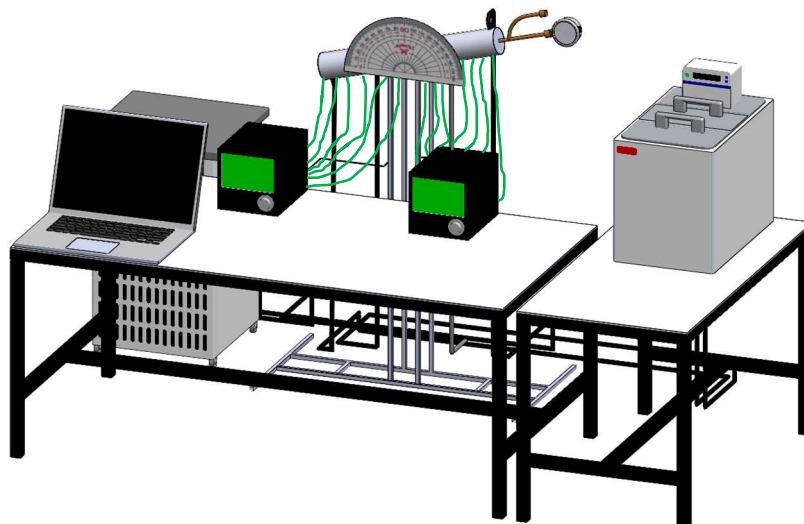
เมื่อ W_Q = ความไม่แน่นอนรวมของ (W), $W_{\dot{m}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอัตราการไหล kg/s $W_{T_{c,in}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิทางเข้า ($^{\circ}C$ หรือ K), $W_{T_{c,out}}$ = ความไม่แน่นอนของการวัดอุณหภูมิทางออก ($^{\circ}C$ หรือ K), $\frac{\partial Q}{\partial x_i}$ = สัมประสิทธิ์ความไวขึ้นกับตัวแปร x_i

การประเมินความไม่แน่นอนรวมเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัดใช้วิธีการ propagate uncertainty ตามทฤษฎีของ Kline และ McClintock (1953) พิจารณาจากความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดแต่ละชนิด ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

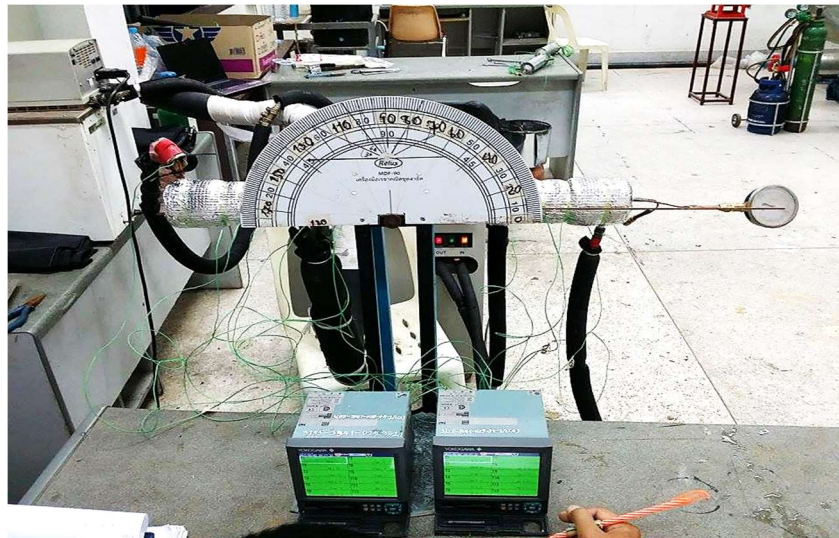
4.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

5. ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการศึกษานี้ผลิตจากท่อทองแดงผิวเรียบ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) ส่วนทำระเหย 2) ส่วนอะเดียแบติก และ 3) ส่วนควบแน่น ดังแสดงในภาพที่ 1 ชุดทดสอบการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วยแหล่งให้ความร้อนบริเวณส่วนทำระเหยใช้น้ำร้อน และระบายความร้อนบริเวณส่วนควบแน่นด้วยน้ำเย็นหมุนเวียน ดังแสดงในภาพที่ 2 การทดสอบในห้องแล็บ ภาพที่ 3 การวัดอุณหภูมิผนังท่อใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (accuracy $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เชื่อมต่อกับระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data logger, รุ่น DX1000, Yokogawa) ส่วนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นวัดด้วยโรตาริเตอร์ (ช่วง 0-5 L/min, accuracy $\pm 2\%$)



ภาพที่ 2 แผนภาพระบบการทดสอบแสดงตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิล และระบบควบคุมอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนและระบายความร้อน (TPCT)



ภาพที่ 3 ชุดทดสอบต่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนพร้อมระบบปรับมุมเอียง

5.2 การเตรียมสารทำงาน

ก่อนเริ่มการทดลองในแต่ละสภาวะ ได้ทำการดูต้ออากาศภายในท่อเทอร์โมไซฟอนออกด้วยปั๊มสุญญากาศ รุ่น RV3, Edwards เป็นเวลา 39 min เพื่อกำจัดแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ Non-condensable gas ออกจากระบบจากนั้นจึงทำการเติมสารทำงาน เอทานอล ความบริสุทธิ์ 99.9% อัตราส่วนร้อยละ 60, 70 และ 80 ของปริมาตรส่วนทำระเหย ตามลำดับ

5.3 วิธีการทดลอง

การทดลองถูกออกแบบเพื่อศึกษาอิทธิพลของมุมเอียง 15° , 20° และ 25° จากแนวระนาบ และอัตรา การเติมสารทำงานกำหนดให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าส่วนทำระเหยแปรผันในช่วง 55 , 65 และ 85°C เพิ่มขึ้น 10 ไป 20°C และควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นที่เข้าส่วนควบแน่นคงที่ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ตลอดการทดลองในแต่ละสภาวะการทดลองระบบจะถูกปล่อยให้ทำงานจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว Steady state พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ไม่เกิน $\pm 0.5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 18 min จากนั้นจึงทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้งในแต่ละเงื่อนไขเพื่อความน่าเชื่อถือ

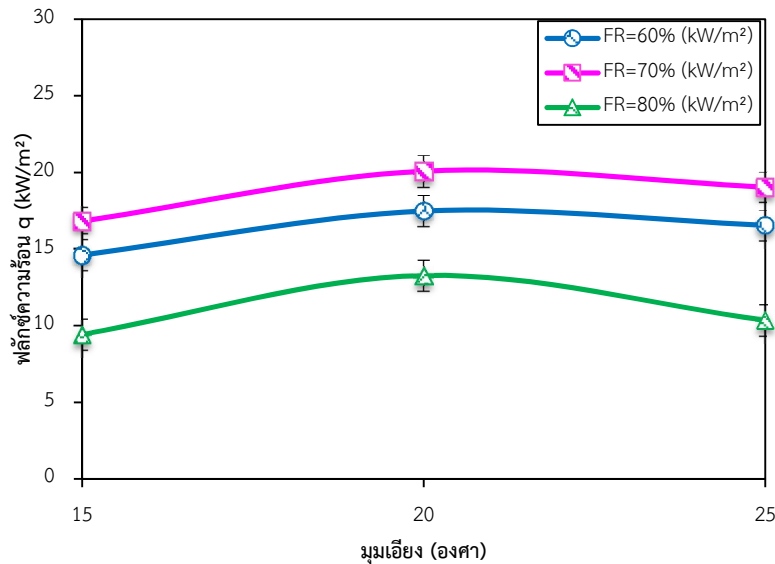
5.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่บันทึกได้ถูกนำมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) ที่ส่วนควบแน่นและส่วนทำระเหย ใช้สมการที่ (1) จากสมดุลพลังงานของของไหลหล่อเย็น ต่อด้วยคำนวณค่าความต้านทานทางความร้อน (R_{th}) จากสมการที่ (2) ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของผนังท่อในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเพื่ออธิบายกลไกการถ่ายเทความร้อนผลการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยแปรไร้มิติ Nusselt, Rayleigh และ Jakob คำนวณจากสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ สำหรับการประเมินความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของการวัด หลักการ propagate uncertainty ตามสมการที่ (8) พิจารณาความคลาดเคลื่อนอุปกรณ์เทอร์โมคัปเปิล $\pm 0.5^\circ\text{C}$ และโรตاميเตอร์ $\pm 2\%$ เป็นหลัก

6. ผลการทดลอง

6.1 ผลของมุมเอียงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนถูกคำนวณจากสมการสมดุลพลังงาน และนำมาวิเคราะห์ผลของมุมเอียงของท่อภายใต้อัตราการเดินสารทำงานที่แตกต่างกันผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อและอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 4



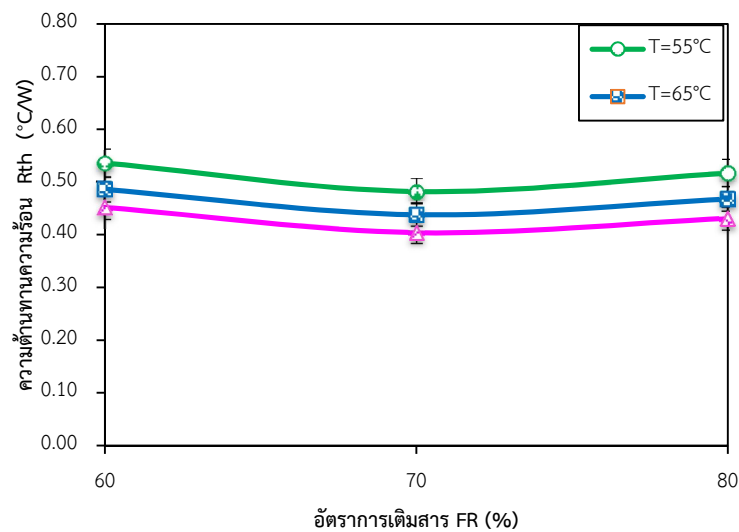
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการเดินสารทำงาน 60%, 70% และ 80%

จากภาพที่ 4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามุมเอียงส่งผลต่อพฤติกรรมของระบบ เปลี่ยนไปสังเกตได้จากแนวโน้มของฟลักซ์ความร้อนที่เปลี่ยนแปลงตามองศาการเอียง ดังนี้ ที่มุมเอียง 15° การกระจายตัวของของเหลวบนผิวท่อที่มีแนวโน้มสะสมเป็นฟิล์มหนาในบริเวณส่วนควบแน่น ทำให้การนำและการเปลี่ยนสถานะถูกจำกัดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการคืบตัวของของเหลวยังมีแรงขับเคลื่อนไม่เพียงพอ ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ความร้อนอยู่ในระดับต่ำเพียง 9.5-16.8 kW/m² ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการเดินสาร ซึ่งสะท้อนถึงความหน่วงของการไหลเวียนและรูปแบบการไหลที่มีความคงตัวต่ำ [35] เมื่อปรับมุมเอียงเป็น 20° การเคลื่อนที่ของไอและการไหลย้อนกลับของของเหลวเข้าสู่ภาวะสมดุลที่สุดทำให้การก่อตัวของฟิล์มบางและการควบแน่นบนผนังเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ พร้อมกับการไหลแบบลามินาร์ที่มีเสถียรภาพสูง ช่วยลดการสะสมของของเหลวส่วนเกินและสนับสนุนการพาความร้อนที่ต่อเนื่องส่งผลให้ฟลักซ์ความร้อนพุ่งสูงสุด [36] อย่างมีนัยสำคัญ ค่าอยู่ที่ 13.5-19.56 kW/m² สูงสุดที่ FR=70% ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นประมาณ 15-25% เมื่อเทียบกับมุม 15° แสดงว่าประสิทธิภาพของการระเหยต่อการควบแน่นถูกยกระดับสูงสุดและอัตราการถ่ายเทความร้อนเกิดค่ามากที่สุดในกลุ่มการทดสอบทั้งหมด [37] ส่วนที่มุมเอียง 25° แม้แรงลอยตัวของไอจะเพิ่มสูงขึ้นตามมุมที่ชันขึ้นแต่การไหลของไอในช่องทางแคบเริ่มเกิดความปั่นป่วนมากขึ้นจนเกิดการสั่นสะเทือนของอุณหภูมิและ

ช่วงของการแห้งเป็นบางช่วงเป็นผลมาจากการรบกวนของอินเตอร์เฟสระหว่างไอและของเหลวส่งผลให้พลังความร้อนลดลงมาอยู่ที่ 10.2-18.8 kW/m² กลไกการเปลี่ยนสถานะและการลำเลียงพลังงานขาดความเสถียรลง แม้ค่าเฉลี่ยการถ่ายเทความร้อนอาจยังคงสูงกว่ากรณี 15° แต่ไม่สามารถรักษาสสมรรถนะในระดับที่สม่ำเสมอได้เช่นเดียวกับมุม 20° ที่เหมาะสมที่สุด [38], [39]

6.2 ค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

ค่าความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนถูกเลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุด คือ มุมเอียง 20° นำมาคำนวณจากอัตราส่วนของผลต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 5



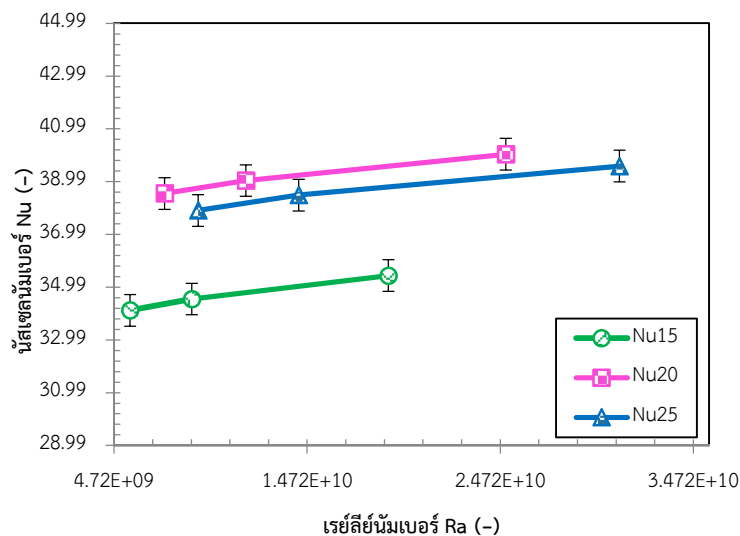
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานทางความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเดินสารทำงานต่างกัน

จากภาพที่ 5 ภายใต้สภาวะมุมเอียง 20° ปริมาณสารทำงานภายในท่อมีผลต่อค่าความต้านทานความร้อนรวมในลักษณะที่ไม่เป็นสัดส่วนเชิงเส้นระบบแสดงสมรรถนะสูงสุดที่ FR 70% ให้ความต้านทานความร้อนรวมต่ำสุด [40] อยู่ที่ประมาณ 0.50 °C/W เมื่ออุณหภูมิแหล่งความร้อน $T_e=55^\circ\text{C}$ ลดลงต่อเนื่องเป็น 0.44 /W และ 0.40 °C/W สำหรับสภาวะ $T_e=65^\circ\text{C}$ และ $T_e=85^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับพฤติกรรมของการไหลของไอและของเหลวที่เสถียรที่สุดเนื่องจากปริมาณสารทำงาน FR 70% เอื้อต่อการเกิดฟิล์มบางระเหยและการไหลกลับของคอนเดนเสท อาศัยแรงโน้มถ่วงได้อย่างมีประสิทธิภาพในทางตรงกันข้าม [47] การลดปริมาณสารทำงานลงเหลือ FR 60% ส่งผลให้ความต้านทานความร้อนรวมขยับสูงขึ้นเป็น 0.52, 0.49 และ 0.45 °C/W ตามระดับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เป็นเครื่องยืนยันถึงสภาวะที่ขาดแคลนของเหลวหล่อเลี้ยงผิวระเหยที่รบกวนความต่อเนื่องของวงจรการไหล [48] ส่วนการเพิ่มอัตราส่วนการเติมเป็น FR 80% นั้น แม้จะมีมวลของเหลวมากขึ้นแต่กลับทำให้ค่า R_{total} เพิ่มขึ้นเล็กน้อยไปอยู่ที่ 0.51, 0.47 และ 0.43 °C/W สำหรับสภาวะอุณหภูมิเดียวกันปรากฏการณ์ดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดเชิงกลเนื่องจากปริมาณของเหลวที่มาก

เกินไปอาจเริ่มเกิดขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลของไอหรือก่อให้เกิดปรากฏการณ์ท่วมเริ่มต้น (incipient flooding) ซึ่งลดทอนประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบสองสถานะ [49] นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนยังช่วยลดความต้านทานความร้อนรวมได้อย่างสม่ำเสมอ [50] ในทุกช่วง FR เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานที่สูงขึ้นเร่งอัตราการเปลี่ยนสถานะและลดแรงต้านทานพลวัตของระบบจึงสรุปได้ว่าที่มุมเอียง 20° สภาวะ FR 70% ถือเป็นจุดสมดุลทางกายภาพและเชิงกลที่ส่งเสริมรูปแบบการไหลแบบหมุนเวียนปิดให้สมบูรณ์ที่สุดส่งผลให้ระบบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนบรรลุสมรรถนะทางความร้อนสูงสุดภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้

6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยตัวแปรไร้มิติ

กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนอย่างเป็นระบบเลขนัสเซลล์ (Nusselt number, Nu) เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนสัมพันธ์กับการนำความร้อน ค่า Nu ที่สูงขึ้นส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นจากการเคลื่อนที่ของของไหล ส่วนเลขเรย์ลี (Rayleigh number, Ra) บ่งบอกถึงอัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวต่อแรงหนืดและแรงแพร่ความร้อน ค่า Ra ที่สูงหมายถึงแรงลอยตัวมีอิทธิพลเหนือกว่าก่อให้เกิดการไหลแบบพาความร้อนตามธรรมชาติที่รุนแรงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 6



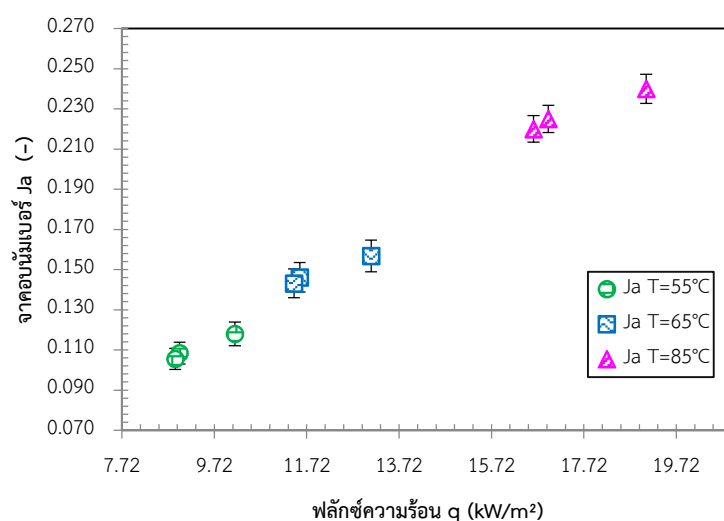
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวน Nusselt และ Rayleigh ภายใต้มุมเอียงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 6 จากความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์ลีและเลขนัสเซลล์ พบว่าค่าเลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นระบบตามเลขเรย์ลีที่สูงขึ้นในช่วง 4.72×10^9 ถึง 3.47×10^{10} มุมเอียง 20° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุดอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับมุมอื่นซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายผ่านกลไกเชิงลึกของรูปแบบการไหลสองสถานะเชิงพลวัตทางกายภาพ มุมเอียง 20° สร้างองค์ประกอบแรงโน้มถ่วงในแนวแกนท่อที่

เหมาะสมที่สุดในการรักษาสมดุลระหว่างการไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นก่อให้เกิดรูปแบบการไหลแบบแอนนูลาร์ที่เสถียร [51] ส่งผลให้ค่า Nu 20 อยู่ในช่วง 38.9-39.9 ซึ่งสูงกว่าค่า Nu 15 ที่ประมาณ 33.9-35.0 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมุมเอียง 15° มีความชันน้อยเกินไปจนเกิดการขัดตัวของของเหลวและความต้านทานการนำความร้อนผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้นในทางกลับกัน ที่มุมเอียง 25° แม้แรงโน้มถ่วงจะดึงของเหลวกลับได้ดีขึ้นแต่กลับเกิดแรงเฉือนจากการไหลสวนทางที่รุนแรงขึ้นจนรบกวนความต่อเนื่องของชั้นฟิล์ม [52] ทำให้ค่า Nu 25 อยู่ที่ประมาณ 37.9-38.9 ซึ่งต่ำกว่ามุมเอียง 20° อยู่ประมาณ 2-3 หน่วย สอดคล้องกับพฤติกรรมเชิงกลที่ระบบ มุมเอียง 20° มีเสถียรภาพทางพลศาสตร์สูงสุด วงจรการไหลเวียนสารทำงานดำเนินไปอย่างต่อเนื่องไม่เกิดการสั่นพ้องหรือการสูญเสียพลังงานจากความปั่นป่วนภายในท่อ [26] นอกจากนี้ สมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานยังตอบสนองเชิงบวกต่อสภาวะดังกล่าว เมื่อ Ra เพิ่มขึ้นสู่ค่า 2.47×10^{10} อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดลดลงและแรงตึงผิวปรับตัว เอื้อให้การแตกตัวของฟองไอและการควบแน่นเกิดได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น [53] ดังนั้นการกำหนดมุมเอียง 20° จึงไม่เพียงแต่ยกระดับค่า Nu สูงสุดเชิงปริมาณแต่ยังเป็นการออกแบบเชิงกลศาสตร์ของไหลที่ประสานรูปแบบการไหลสองสถานะสมบัติของสารและแรงขับเคลื่อนทางความร้อนเข้าด้วยกันอย่างลงตัวซึ่งแตกต่างจากสมมติฐานดั้งเดิมที่ว่าสมรรถนะจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความชันของท่อ

6.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนสถานะด้วยเลขจacob

เพื่ออธิบายอิทธิพลของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะในทางกายภาพ เลขจacob (Ja) ที่เพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ความร้อนบ่งชี้ว่าสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นไอนี้อาจเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลวกลไกนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนเนื่องจากกระบวนการระเหยและควบแน่นเป็นหัวใจหลักในการลำเลียงความร้อนจากส่วนที่ระเหยไปยังส่วนควบแน่น แสดงไว้ในภาพที่ 7

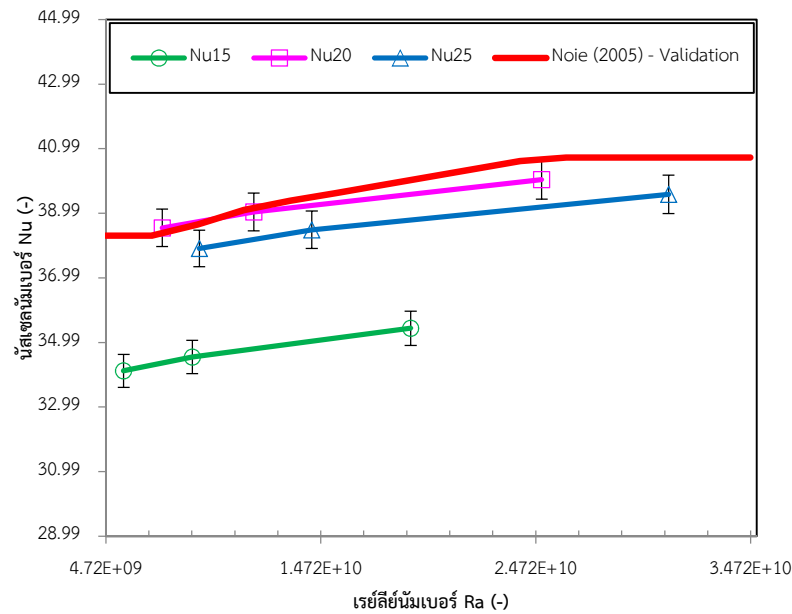


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Jakob Number และอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไฮฟอนที่อัตราการเดินสารทำงานและมุมเอียงที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนและค่า Jakob Number ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความเด่นของการเปลี่ยนสถานะระหว่างของเหลวและไอภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [21] พบว่าเมื่อ ฟลักซ์ความร้อน (q) เพิ่มขึ้น ค่า Jakob Number มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกเงื่อนไข อุณหภูมิที่อุณหภูมิแหล่งความร้อน 55°C แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีเขียว ค่า Ja เริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 0.108 เมื่อ $q=8.65\text{ kW/m}^2$ และเพิ่มขึ้นเป็น 0.117 ที่ฟลักซ์ความร้อน $q=9.83\text{ kW/m}^2$ แสดงถึงสภาวะที่กระบวนการระเหยเริ่มเกิดขึ้นแต่ยังมีแรงขับเคลื่อนจำกัดเมื่อเพิ่มอุณหภูมิแหล่งความร้อนเป็น 65°C (สัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีฟ้า) พบว่าในช่วงฟลักซ์ความร้อน $q=11.58\text{--}13.61\text{ kW/m}^2$ ค่า Jakob Number ขยับสูงขึ้นอยู่ในช่วง 0.142-0.159 ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพการนำพลังงานความร้อนไปใช้ในการเปลี่ยนสถานะที่ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ [54] เฉพาะในกรณีที่อัตราการเติมสารทำงาน 70% ซึ่งให้ค่า Ja สูงที่สุดในกลุ่มอุณหภูมินี้ บ่งบอกถึงการมีปริมาตรสารทำงานที่เหมาะสมต่อการเกิดฟิล์มระเหยบางและการจัดรูปแบบการไหลที่เปิดพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยกลไกการเปลี่ยนสถานะได้สูงสุดที่อุณหภูมิแหล่งความร้อนสูงสุด 85°C (สัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีชมพู) เมื่อฟลักซ์ความร้อนเพิ่มสู่ช่วง $q=16.47\text{--}17.29\text{ kW/m}^2$ ค่า Jakob Number พุ่งสูงขึ้นอย่างชัดเจนอยู่ในช่วง 0.218-0.226 และเมื่อฟลักซ์ความร้อนสูงสุดที่ $q=19.56\text{ kW/m}^2$ ค่า Ja สูงสุดถึง 0.243 [55] ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้สมบูรณ์ที่สุดเมื่อติดตั้งท่อทำมุมเอียง 20° เนื่องจากองศาความชันดังกล่าวสร้างองค์ประกอบแรงโน้มถ่วงในแนวแกนที่เหมาะสมพอดีช่วยดึงของเหลวควบแน่นไหลกลับสู่ส่วนระเหยได้ทันเวลาไม่เกิดแรงต้านการไหลสวนทางที่รุนแรงเหมือนมุมที่ชันกว่าหรือการขัดตัวของของเหลวเหมือนมุมที่ราบกว่าพฤติกรรมเชิงกลและการไหลสองสถานะดังกล่าวสอดคล้องกับสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของสารทำงานที่ความหนืดลดลงและแรงตึงผิวปรับตัวเอื้อต่อการแตกตัวของฟองไอ [22] การประสานกันระหว่าง มุมเอียง 20° และ FR 70% จึงไม่เพียงแต่ยกระดับ Jakob Number จาก 0.108 สู่ 0.243 ตามการเพิ่มฟลักซ์ความร้อนเท่านั้นแต่ยังสร้างวงจรการไหลเวียนที่สมดุลลดการสูญเสียพลังงานจากการปั่นป่วนภายในท่อและรักษาเสถียรภาพของการระเหยควบแน่นไว้ได้อย่างต่อเนื่องทำให้ระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนตอบสนองต่อการทำความร้อนได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงสุดเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมความร้อนที่ต้องการความแม่นยำและเสถียรภาพในระยะยาว

6.5 การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดลอง

การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการทดลองงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ทำนายได้จากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ (empirical correlation) ของ Noie (2005) [56] เป็นงานวิจัยที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในด้านท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ผลการเปรียบเทียบ แสดงไว้ในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองกับค่าจากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของ Noie [56]

จากภาพที่ 8 พบว่าค่าเลขนัสเซิลต์ของทุกลมุ่เอียงเพิ่มขึ้นตามเลขเรย์ลีย์ที่สูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความต่างอุณหภูมิระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นช่วยเร่งการไหลเวียนของสารทำงานภายในระบบ ส่งผลให้กระบวนการเดือดและการควบแน่นเกิดขึ้นอย่างเข้มข้นมากขึ้นผลลัพธ์ดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับที่ Rahma et al. [57] รายงานจากการจำลองการไหลภายในท่อการเพิ่มความเข้มข้นของการเปลี่ยนสถานะส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องผ่านการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของไอภายในท่อแม่แนวโน้มจะใกล้เคียงกับสมการเชิงประจักษ์ของ Noie [56] แต่ระดับความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและค่าทำนายแตกต่างกันตามมุมเอียงที่ใช้สำหรับมุมเอียง 20° ค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากสมการของ Noie [56] มากที่สุด Aragones et al. [58] ได้เสนอว่าเงื่อนไขการทำงานที่ให้ค่าความต้านทานความร้อนต่ำที่สุดมักเกิดขึ้นในช่วงที่การไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นสามารถรักษาสสมดุลได้อย่างเหมาะสมข้อสังเกตนี้ได้รับการสนับสนุนเพิ่มเติมจากผลการศึกษาของ Gyuchang Kim และ Jaeseon Lee [59] พบว่าประสิทธิภาพของท่อขึ้นอยู่กับการสามารถในการส่งกลับของเหลว (liquid replenishment) เนื่องจากการคงสภาพการเปียกของผิวแลกเปลี่ยนความร้อนช่วยลดความต้านทานความร้อนและเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในระบบ ดังนั้นการที่มุมเอียง 20° ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับสมการของ Noie [56] มากที่สุดจึงอาจเกิดจากการที่การไหลสองสถานะยังคงมีเสถียรภาพและไม่ถูกรบกวนจากแรงเฉือนมากเกินไปเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 25° ค่าเลขนัสเซิลต์ยังคงอยู่ในระดับสูงแต่เริ่มเบี่ยงเบนจากค่าทำนายของ Noie [56] เล็กน้อย งานของ Yuxin Ma และคณะ [60] พบมุมเอียงเป็นหนึ่งในตัวแปรหลักที่ควบคุมสมรรถนะของท่อและมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของ flow pattern ภายในระบบขณะที่การศึกษาของ Yichuan He et al. [25] วิเคราะห์ลักษณะความไม่

เสถียรของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนแบบลูป พบว่าการเพิ่มแรงขับเคลื่อนการไหลอาจนำไปสู่ความผันผวนของความดันและการรบกวนของผิวสัมผัสระหว่างไอและของเหลวปัจจัยเหล่านี้มีแนวโน้มทำให้ฟิล์มของเหลวบริเวณผนังท่อสูญเสียความต่อเนื่องบางส่วนส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับสถานะที่เหมาะสมที่สุดในทางตรงกันข้าม มุมเอียง 15° ให้ค่าเลขนัสเซิลต์ต่ำที่สุดตลอดช่วงเลขเรย์ลีที่ศึกษา อาจเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดของการไหลกลับของของเหลวควบแน่น Zhoutuo Tan et al. [40] การทำงานของเทอร์โมไซฟอนขึ้นอยู่กับอัตราการไหลกลับของของเหลวควบแน่นภายใต้แรงโน้มถ่วงเมื่อกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์การกระจายตัวของสารทำงานภายในระบบจะไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่าความต้านทานความร้อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Nirmal Kumar Balaguru et al. [61] มุมเอียงมีผลต่อเส้นทางไหลกลับและค่าความต้านทานความร้อนของท่อ เนื่องจากแรงโน้มถ่วงเป็นกลไกหลัก เมื่อลดมุมเอียงเหลือ 15° แรงโน้มถ่วงตามแนวแกนท่ออาจไม่เพียงพอระบายของเหลวควบแน่นทำให้ฟิล์มของเหลวหนาขึ้นและค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงสำหรับความน่าเชื่อถือของข้อมูลค่าความไม่แน่นอนถูกคำนวณตามหลัก Propagation of Uncertainty พิจารณาความคลาดเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลและโรตารีเตอร์ Zhu Li et al. [62] ชี้ให้เห็นการแพร่กระจายของความไม่แน่นอนจากตัวแปรต้นสามารถส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของพารามิเตอร์การถ่ายเทความร้อนได้ หากไม่ได้รับการประเมินอย่างเหมาะสมในงานวิจัยนี้ค่าความไม่แน่นอนสูงสุดของเลขนัสเซิลต์มีค่า $\pm 7.1\%$ ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองด้านการถ่ายเทความร้อนส่งผลให้ข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ของ Noie [56]

7. อภิปรายผลการวิจัย

7.1 ผลของมุมเอียงต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน พบว่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมก่อนลดลง มุมเอียง 20° ให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากแรงโน้มถ่วงช่วยส่งเสริมการไหลกลับของสารทำงานในสถานะของเหลวจากส่วนควบแน่นกลับสู่ส่วนที่ระเหยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่มุมเอียง 15° ซึ่งมีความชันน้อยเกินไป ทำให้การไหลกลับของของเหลวไม่คล่องตัวและเกิดการสะสมของฟิล์มของเหลว ส่วนมุมเอียง 25° เมื่อชันขึ้นแม้จะช่วยให้อะไรไหลกลับได้ดีแต่กลับทำให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลของไอและแรงเฉือนระหว่างสถานะเพิ่มขึ้นส่งผลให้สมรรถนะลดลงปรากฏการณ์นี้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Wang et al. [35] ที่รายงานว่ามุมเอียงที่เหมาะสมที่สุดขึ้นอยู่กับสถานะการทำงานและสมบัติของสารทำงาน

7.2 ผลของอัตราการเติมสารทำงาน พบว่าการบรรจุสารทำงาน FR 70% ช่วยให้ระบบถ่ายเทความร้อนได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากมีปริมาณของเหลวเพียงพอต่อการเกิดการระเหยและการควบแน่นอย่างต่อเนื่องรักษาสมดุลระหว่างปริมาตรของเหลวและไอดีอย่างเหมาะสมหากปริมาณสารทำงานน้อยเกินไป (FR 60%) ผิวส่วนที่ระเหยมีแนวโน้มเกิดสถานะแห้ง (dry-out) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลงในทางตรงกันข้ามการเติมสารทำงานมากเกินไป (FR 80%) ทำให้เกิดปรากฏการณ์น้ำท่วมขังเริ่มต้น (incipient flooding) กีดขวางพื้นที่หน้าตัดการไหลของไอและลดทอนประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบสอง

สถานะ ผลลัพธ์นี้ให้ผลที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Robinson et al. [49] ที่ศึกษาผลของอัตราการเติมสารทำงานในเทอร์โมไซฟอนขนาดเล็ก

7.3 การวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ พบว่า Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers มีแนวโน้มของค่าตัวแปรดังกล่าวเป็นไปตามกลไกการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนร่วมกับการเปลี่ยนสถานะค่าจำนวน Nusselt เพิ่มขึ้นตามอัตราการถ่ายเทความร้อนขณะที่จำนวน Rayleigh บ่งบอกถึงอิทธิพลของแรงลอยตัวต่อการไหลภายในท่อและจำนวน Jakob แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานการวิเคราะห์นี้ยืนยันว่ามุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมกันในการออกแบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน

8. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงานต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน ประเมินจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าความต้านทานทางความร้อน และการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิติ เช่น Nusselt, Rayleigh และ Jakob numbers พบว่า มุมเอียงของท่อมีผลต่อสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น สมรรถนะจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เหมาะสมที่มุมเอียง 20° ก่อนจะลดลงเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้นเป็น 25° ที่มุมเอียง 20° ระบบให้ค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุดและให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากเป็นมุมที่สร้างสมดุลระหว่างการไหลขึ้นของไอและการไหลกลับของของเหลวควบแน่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับอัตราการเติมสารทำงานพบว่าค่าที่เหมาะสมคือ FR 70% ให้ความต้านทานความร้อนต่ำที่สุด เมื่อเติมสารทำงานน้อยเกินไป (FR 60%) จะเกิดสถานะแห้งที่ผิวส่วนท้ายระเหย ส่วนการเติมมากเกินไป (FR 80%) จะเกิดปรากฏการณ์ท่วมที่ลดทอนประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนผลการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรไร้มิตียืนยันว่าสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด คือ มุมเอียง 20° ร่วมกับอัตราการเติมสารทำงาน 70% ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (ฟลักซ์ความร้อน 19.56 kW/m^2) และค่าความต้านทานทางความร้อนต่ำที่สุด ($0.40\text{-}0.50 \text{ }^\circ\text{C/W}$) สำหรับการวิเคราะห์เชิงกลไกด้วยตัวแปรไร้มิติ พบว่า เลข Nusselt มีค่าสูงสุดที่มุมเอียง 20° ($Nu = 38.9\text{-}39.9$) สอดคล้องกับเลข Rayleigh ที่แสดงถึงแรงลอยตัวที่เหมาะสมในการขับเคลื่อนการไหลเวียนของสารทำงาน ($Ra = 2.47 \times 10^{10}$) ขณะที่เลข Jakob มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ความร้อน ($Ja = 0.108\text{-}0.243$) ยืนยันว่าในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดพลังงานความร้อนถูกใช้ไปกับการเปลี่ยนสถานะอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดผลการศึกษานี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับการประยุกต์ใช้งานด้านการกู้คืนความร้อนทั้งในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การศึกษาจำกัดเฉพาะท่อทองแดงผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm ใช้สารทำงานเอทานอลชนิดเดียว ช่วงอุณหภูมิแหล่งความร้อน $55\text{-}85 \text{ }^\circ\text{C}$ ดังนั้น ผลการศึกษานี้สามารถขยายผลสู่การศึกษาสารทำงานทางเลือก โครงสร้างท่อที่มีพื้นผิวปรับปรุง และสภาวะการทำงานที่หลากหลายขึ้นในอนาคต

9. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลของชนิดสารทำงานที่แตกต่างกัน รวมถึงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความยาวในแต่ละช่วงของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ การศึกษาเชิงตัวเลขรวมกับการทดลองจะช่วยให้เข้าใจกลไกการไหลและการถ่ายเทความร้อนภายในท่อได้อย่างละเอียดมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยท่อความร้อนและออกแบบอุปกรณ์ทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งได้กรุณาอนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น และบทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คำแถลงบทบาทและส่วนร่วมของผู้เขียน

กิตติพล ขาวงาม : การกำหนดแนวคิดการวิจัย การออกแบบระเบียบวิธีวิจัย การดำเนินการทดลอง เก็บรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณและตัวแปรไร้มิติ การเขียนต้นฉบับบทความ การกำกับดูแลทิศทางการวิจัย และการบริหารจัดการโครงการวิจัย

พันธุ์เทพ คำพอง : การเตรียมภาพประกอบ และแผนภาพจำลองชุดการทดลอง ผู้เขียนทุกคนได้อ่านและอนุมัติต้นฉบับบทความฉบับสุดท้าย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ghahremani, A., Maleknezhad, A., & Shafii, M. B. (2026). Design and performance of a hybrid thermosyphon heat pipe for simultaneous heat transfer and energy harvesting. *Results in Engineering*, 110748. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.110748>
- [2] Malleswararao, K., Bürger, I., Mejia, A. C., Kim, S. T., & Linder, M. (2026). Innovative approaches to waste heat recovery: Coupling high temperature vapour compression heat pumps with salt hydrate thermochemical systems. *Applied Energy*, 405, 127229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.127229>
- [3] Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>
- [4] Lomonaco, G., Borreani, W., Bruzzone, M., Chersola, D., Firpo, G., Osipenko, M., Saracco, P. (2018). Initial thermal-hydraulic assessment by OpenFOAM and FLUENT of a subcritical irradiation facility. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.03.003>

- [5] Sichamnan, S., Pipatpaiboon, N., Chaiwongsa, P., Onsalung, N., Intarachaisri, K., Thongdaeng, S., Chaithongsri, A. (2026). Experimental investigation of triangular transversely corrugated tubes for solar air collectors under low solar irradiance. *Solar Compass*, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.solcom.2026.100165>
- [6] Faghri, A. (2014). Heat pipes: Review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1). <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
- [7] Kang, S., Lee, S., & Lee, J. (2025). Performance enhancement of two-phase closed thermosyphon with threaded evaporator surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 164, 108939. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108939>
- [8] Sae-Jung, P., Krittayanawach, T., Deedom, P., & Limmeechokchai, B. (2015). An experimental study of thermo-syphon solar water heater in Thailand. *Energy Procedia*, 79, 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.516>
- [9] Rittidech, S., Donmaung, A., & Kumsombut, K. (2009). Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV). *Renewable Energy*, 34(10), 2234–2238. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.021>
- [10] Jengsooksawat, S., Rittidech, S., & Booddachan, K. (2014). Loop thermosyphon with vapour chamber: A thermodynamic study. *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 487191. <https://doi.org/10.1155/2014/487191>
- [11] Mutalikdesai, S., & Kate, A. (2020). Experimental investigation of an aluminium thermosyphon at normal operating conditions. *Journal of Thermal Engineering*, 6(5), 724–735. <https://doi.org/10.18186/thermal.797291>
- [12] Shabgard, H., Xiao, B., Faghri, A., Gupta, R., & Weissman, W. (2014). Thermal characteristics of a closed thermosyphon under various filling conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.053>
- [13] Lin, C.-W., Hsu, H.-Y., & Kumar, R. (2024). Numerical investigation of surface wettability effect on two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 247, 123125. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123125>
- [14] Ghaffari, O., Al Sayed, C., Vincent, M., Grenier, F., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2022). Study of the impact of the airflow and filling ratio on the thermal performances of a two-phase immersion cooling prototype. In *2022 21st IEEE Intersociety Conference*

- on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm).
<https://doi.org/10.1109/iTherm54085.2022.9899558>
- [15] Lataoui, Z., Benselama, A. M., & Jemni, A. (2025). Heat transfer characteristics of thermosyphons used in vacuum water heaters. *Fluids*, 10(8), 199. <https://doi.org/10.3390/fluids10080199>
- [16] Khaongam, K., & Srihajong, N. (2015). Heat transfer characteristics of thermo-syphon: Case study of modifying inclination angle of evaporator and condenser sections. *Food Agricultural Sciences and Technology*, 1(2), 57–62. <https://doi.org/10.14456/randk.2015.9>
- [17] Solomon, A. B., Daniel, V. A., Ramachandran, K., Pillai, B., Singh, R. R., Sharifpur, M., & Meyer, J. (2017). Performance enhancement of a two-phase closed thermosiphon with a thin porous copper coating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.02.001>
- [18] Gedik, E. (2016). Experimental investigation of the thermal performance of a two-phase closed thermosiphon at different operating conditions. *Energy and Buildings*, 127, 1096–1107. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.066>
- [19] Zhang, H., Zhang, Z., Yang, L., & Li, Y. (2025). Numerical investigation on thermal efficiency and resistance of high-temperature thermosiphons using dimensionless method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106391. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106391>
- [20] Chami, N., & Zoughaib, A. (2010). Modeling natural convection in a pitched thermosiphon system in building roofs and experimental validation using particle image velocimetry. *Energy and Buildings*, 42(8), 1267–1274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.019>
- [21] Xu, H., Guo, X., Yang, S., Tang, F., Zhang, B., & Wang, K. (2025). Influence of height difference on thermal performance and flow stability of loop thermosiphon equipped with vertically placed flat evaporator for IGBT module cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 218, 110124. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2025.110124>
- [22] Cai, Y., Liu, Z., Lu, J., Li, Y., Tang, D., & Hu, C. (2026). Establishment of momentum model and analysis of heat transfer performance for two-phase loop thermosiphon. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 259, 128344. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128344>
- [23] Perinba Selvin Raj, J. A., Asirvatham, L. G., Angeline, A. A., Rakshith, B. L., Bose, J. R., Manova, S., Wongwises, S. (2025). Mitigation of flow instabilities in multiport minichannel

- thermosyphon through a modified loop design with separate vapor-liquid paths. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106495. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106495>
- [24] Mana, V. V., Asirvatham, L. G., Manova, S., Appadurai, A. A., Kumar, J. P., Leunanonchai, W., & Wongwises, S. (2025). Experimental investigation on the heat transfer performance of a loop thermosyphon with dual vapor lines. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 106074. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106074>
- [25] He, Y., Hao, T., Makhatha, M. E., Feng, Y., & Qiu, L. (2026). Heat transfer and instability characteristics of a two-phase thermosyphon loop with wide range of filling ratios. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 174, 110938. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110938>
- [26] Smith, K., Siedel, S., Robinson, A. J., & Kempers, R. (2016). The effects of bend angle and fill ratio on the performance of a naturally aspirated thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 101, 455–467. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.024>
- [27] Rukruang, A., Kaew-On, J., Wongwises, S., & Wang, C.-C. (2025). Experimental optimization and performance limits of a multiport minichannel thermosyphon for air-cooled applications. *Applied Thermal Engineering*, 127540. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127540>
- [28] Larimi, Y. N., Ghaffari, O., Ganjali, A., Al Sayed, C., Grenier, F., Jasmin, S., ... Sylvestre, J. (2022). Multi-scale electroplated porous coating for immersion cooling of electronics. In *2022 21st IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*. <https://doi.org/10.1109/itherm54085.2022.9899660>
- [29] Vincent, M., Ghaffari, O., Larimi, Y. N., Grenier, F., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2024). Experimental investigation of the thermal resistance of advanced two-phase thermosyphon heatsinks. *Journal of Cleaner Production*, 238, 122108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.157>
- [30] Ghaffari, O., Vincent, M., Grenier, F., Larimi, Y., Jasmin, S., Fréchette, L., & Sylvestre, J. (2023). Pushing the limits of air cooling with novel two-phase prototypes for high power microprocessors. In *2023 22nd IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (iTherm)*. <https://doi.org/10.1109/itherm55368.2023.10177612>

- [31] Wansasueb, K., Promthaisong, P., Bubphachot, B., Pattiya, A., Chompookham, T., Rittidech, S., & Siriwan, N. (2024). Applied machine learning: Performance prediction of heat pipe with mesh wick. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, 105307. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105307>
- [32] Wang, Y., Ma, K., Liu, Y., Sun, J., & Huang, L. (2026). Experimental and empirical correlation study on the heat transfer characteristics of gravity heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 170, 110028. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110028>
- [33] Khaongam, K., Chompookham, T., & Parametthanuwat, T. (2025). Internal flow pattern of the condenser section that affects the heat transfer characteristics of rectangular two-phase closed thermosyphon. *Case Studies in Thermal Engineering*, 72, 106246. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106246>
- [34] Pipatpaiboon, N., Thongdang, S., & Rittidech, S. (2016). Reducing heat loss in the adiabatic section of a two-phase closed thermosyphon (TPCT) using acrylic tube. *King Mongkut's University of Technology North Bangkok International Journal of Applied Science and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.14416/j.ijast.2016.06.001>
- [35] Wang, Y., Wang, X., Wang, J., Liu, Y., & Chen, J. (2023). Heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon with different inclination angles based on the core-tube monitoring. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102738. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102738>
- [36] Tian, J. A., Xu, Z., Chen, K., Gan, H., Liu, C., Zhao, J., & Rao, Z. (2026). Classic yet vibrant heat transfer device—gravity heat pipe: A review from working mechanism to application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 238, 117073. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.117073>
- [37] Ma, Y., Lin, Y., Qi, G., Li, X., & Jiang, F. (2026). Effect of inclination angle and particle size on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110269. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110269>
- [38] Jiang, F., Lin, Y., Liu, Y., Qi, G., Li, H., Li, X., ... Li, X. (2022). Effect of inclination angle on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon containing SiC particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 197, 123361. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123361>

- [39] Yilgor, I., & Shi, S. (2025). Operational characteristics and oscillatory phenomena in two-phase closed thermosyphons. *Applied Thermal Engineering*, 265, 125401. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125401>
- [40] Tan, Z., Zhang, Z., Chu, W., & Wang, Q. (2026). Investigation on heat and mass transfer mechanism within a thermosyphon fin under multiple power distributions. *Applied Thermal Engineering*, 130715. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130715>
- [41] Thongdang, S., Ding, Y., Parametthanuwat, T., Mondragón, R., & Sichamnan, S. (2026). Thermal and exergy efficiency analysis of a corrugated thermosyphon water heater integrated with an evacuated tube solar collector using TiO₂ nanofluid. *Next Energy*, 12, 100691. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100691>
- [42] Xu, H., Guo, X., Liu, Z., Yang, S., Zhang, B., & Tian, S. (2026). Hydrodynamic coupling in vertical flat-plate loop thermosyphons: The critical role of riser confinement on operational stability and heat transfer limits. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 263, 128711. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128711>
- [43] Lu, X., Liu, J., Tong, X., Dai, R., Xiao, Y., & Deng, J. (2025). Experimental investigation on thermal performance of gravity heat pipe with different pipe configurations. *Case Studies in Thermal Engineering*, 65, 105695. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105695>
- [44] Gou, X., Li, G., Zhang, R., Jian, C., Zhang, Q., Li, B., & Dong, Q. (2021). Critical and optimal inclination angles of two-phase closed thermosyphon under different operating conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121540. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121540>
- [45] Siriwan, N., Chompookham, T., Ding, Y., & Rittidech, S. (2017). Heat transfer predictions for helical oscillating heat pipe heat exchanger: Transient condition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(7), 3553–3562. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0642-y>
- [46] Paramatthanuwat, T., Boothaisong, S., Rittidech, S., & Booddachan, K. (2010). Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon using deionized water mixed with silver nano. *Heat and Mass Transfer*, 46(3), 281–285. <https://doi.org/10.1007/s00231-009-0565-y>
- [47] Zhang, T., Yan, Z., Wang, L., Zheng, W., Su, Y., & Zheng, R. (2021). Droplet entrainment within the evaporator to the suitable volume-filling ratio of a vertical two-phase closed

- thermosyphon. *International Journal of Thermal Sciences*, 159, 106576. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106576>
- [48] Zhang, W., Cheng, K., Lu, J., Chen, H., & Zhang, Y. (2026). The influence of cooling temperature on the thermal-dynamic performance of wettability-driven pulsating heat pipes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110701. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.110701>
- [49] Robinson, A. J., Smith, K., Hughes, T., & Filippeschi, S. (2020). Heat and mass transfer for a small diameter thermosyphon with low fill ratio. *International Journal of Thermofluids*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2019.100010>
- [50] Khaongam, K., Srihajong, N., Seahang, K., & Pratoomchat, P. (2014). Thermal performance of closed-loop oscillating heat pipes with check valves using AgNO₃/distilled water nanofluids. In *The 6th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI 2014)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33101.74728>
- [51] Kim, I. G., Kim, K. M., Jeong, Y. S., & Bang, I. C. (2017). Flow visualization and heat transfer performance of annular thermosyphon heat pipe. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1456–1468. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.116>
- [52] Schreiber, M., Wits, W. W., & te Riele, G. J. (2016). Numerical and experimental investigation of a counter-current two-phase thermosyphon with cascading pools. *Applied Thermal Engineering*, 99, 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.095>
- [53] Geetha, A., Rabhi, A., Van Wyk, S., Andersson, M., & Akkus, Y. (2026). Numerical stability assessment of 2D and 3D VOF-based modeling of pulsating heat pipe loops: Influence of physical assumptions and numerical parameters. *Applied Thermal Engineering*, 131097. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131097>
- [54] Yang, S., Guo, X., Xu, H., Tang, F., Zhang, B., & Zhang, Y. (2025). Experimental studies on the heat transfer characteristics and instability of a loop thermosyphon with a vertical flat evaporator for IGBT heat dissipation. *Applied Thermal Engineering*, 264, 125524. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125524>
- [55] Shelton, M. J., Suresh, S., & Singh, V. K. (2025). Experimental analysis and optimization of two-phase flexible water thermosyphons with corrugated adiabatic sections. *Applied Thermal Engineering*, 128659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128659>

- [56] Noie, S. (2005). Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*, 25(4), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.06.019>
- [57] Rahma, A. G., Abadassi, F., Ghenaim, A., François, P., Hoarau, Y., Funfschilling, D., & Marouf, A. (2026). Thermal and flow pattern analysis under confinement and vapor superficial velocity conditions in a two-phase closed thermosiphon: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 265, 128849. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128849>
- [58] Aragones, D. I., Warsinger, D. M., & Weibel, J. (2026). Mapping the saturated regime operating envelope of a two-phase closed loop thermosyphon for minimum thermal resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 261, 128509. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128509>
- [59] Kim, G., & Lee, J. (2026). Balancing bubble dynamics and liquid replenishment in a two-phase closed thermosyphon via geometrically tuned bi-philic evaporator surfaces. *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130727>
- [60] Ma, Y., Lin, Y., Qi, G., Li, X., & Jiang, F. (2026). Effect of inclination angle and particle size on the thermal performance of a three-phase closed thermosyphon. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 172, 110269. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110269>
- [61] Balaguru, N. K., Suresh, S., Shelton, M. J., Krishnan, S. A., & Singh, V. K. (2026). Thermal characterization of bendable water filled two-phase thermosyphons under variable fill ratios and bending angles. *Applied Thermal Engineering*, 131228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131228>
- [62] Zhu, L., Zhao, Y., & Wu, F. (2026). A key condition quotient method for heat conduction conditional uncertainty propagation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 171, 110207. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.110207>