

การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบ

Study on Effectiveness of an Air-Pre Heater with Closed Loop Oscillating Flat Heat Pipe

วสันต์ ศรีเมือง และ ปรีชา ขันติโกมล

Wasan Srimuang and Preecha Khantikomol

ห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน

(Heat Pipe Heat Exchanger Research Laboratory)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 044-233073 ต่อ 3410 โทรสาร 044-233074

Email: wasan.sr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยเชิงทดลองนี้ได้ทำการตรวจหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบ ความยาวของทั้งส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของเครื่องอุ่นอากาศเท่ากันคือ 0.30 m ส่วนกันความร้อนยาวเท่ากับ 0.10 m ท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบถูกทำด้วยท่อทองแดงหน้าตัดกลมซึ่งถูกดัดเป็นซัดและบีบให้มีความแบน 2 mm ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นสารทำงานซึ่งเติม 50% ของปริมาตรภายในทั้งหมดของท่อความร้อน ชุดทดลองถูกสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศ อุณหภูมิของอากาศเย็นไหลเข้าสู่ส่วนควบแน่นมีค่าประมาณ 30°C ในขณะที่อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าสู่ส่วนทำระเหยถูกเปลี่ยนแปลงในช่วง 90–150°C ทั้งความเร็วของอากาศร้อนและเย็นที่ไหลผ่านเครื่องอุ่นอากาศถูกเปลี่ยนแปลงในช่วง 0.5–2.0 m/s ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าสู่ส่วนทำระเหยร่วมกับความเร็วต่ำๆ ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศมีค่าต่ำสุดเกิดขึ้นที่ความเร็วของอากาศร้อนเท่ากับอากาศเย็น

Abstract

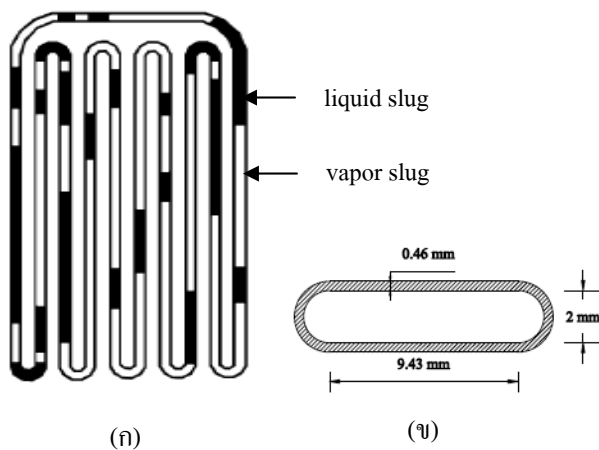
This experimental research has been carried out to investigate the effectiveness of air pre-heater with closed loop oscillating flat heat pipe (CLOFHP). The lengths of both the evaporator and condenser sections of the air pre-

heater were 0.30 m, and adiabatic section had a length of 0.10 m. The CLOFHP made from a copper tube with a circular cross section, which bent and pressed for a flat thickness of 2 mm. Distilled water was used as the working fluid with a fill ratio of 50% of the total internal volume. A test rig was constructed for a test of the effectiveness of an air pre-heater. The temperature of fresh-air inlet the condenser section was approximately 30°C while the hot-air temperature flow into the evaporator section was varied in the range of 90–150°C. Both of the hot and fresh air velocities across the air pre-heater were varied in the range of 0.5–2.0 m/s. The results found that, when the hot-air inlet-temperature increased with a lower velocity, the effectiveness of the air pre-heater also increased. Moreover, the minimum effectiveness occurs at the hot and fresh air velocity was equal.

1. บทนำ

ท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบ (CLOFHP) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดี ซึ่งได้รับการยอมรับว่าเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไป CLOFHP ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น ถ้าหากใช้ CLOFHP ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศสถานะบรรยากาศ โดยวิธีการดูดซับ

ความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง (heat source) เช่น ไอเสียร้อน แล้วคายความร้อนออกสู่แหล่งรับความร้อน (heat sink) เช่น อากาศอุณหภูมิต่ำ เรียกว่า **เครื่องอุ่นอากาศ** ข้อดีของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP ท่อความร้อนที่แตกต่างจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอื่นๆ ทั่วไป คือ ไม่ต้องใช้พลังงานกลเสริมในการทำงาน อุณหภูมิในการใช้งานมีช่วงกว้างและสามารถทำงานได้แม้ระหว่างอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนกับแหล่งรับความร้อนต่างกันไม่มากนัก ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าโลหะมาก และปัญหาในการบำรุงรักษามีน้อยเพราะ โครงสร้างไม่มีส่วนเคลื่อนไหว ลักษณะของ CLOFHP แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ท่อความร้อนชนิดล้นวงรอบ (CLOFHP)

CLOFHP ทำจากท่อที่มีหน้าตัดแบนและขดไปมา ดังรูปที่ 1ก ลักษณะของหน้าตัดท่อแสดงดังรูปที่ 1ข ขนาดหน้าตัดของท่อจะเล็กและแบนมากจนทำให้สารทำงานที่ถูกบรรจุอยู่ภายในมีสภาพเป็นก้อนไอ (vapor slug) และก้อนของเหลว (liquid slug) วางสลับกันได้เอง ท่อความร้อนแบบ CLOFHP จะทำงานได้เองหากส่วนทำระเหยสัมผัสกับแหล่งความร้อนสูง และส่วนควบแน่นสัมผัสกับแหล่งความร้อนต่ำ โดยขณะที่ CLOFHP ทำงานนั้น สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในจะเคลื่อนที่กลับไปมาระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น โดยเกิดจากการเปลี่ยนสถานะ

จากการสั่นและวิเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแยกออกได้เป็น 3 ประเด็นคือ ประเด็นแรกงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบสั่น (oscillating heat pipe, OHP) เพื่อเป็นเครื่องอุ่นอากาศ [1-2] ประเด็นที่สองเกี่ยวกับท่อความร้อนหน้าตัดแบน (flat heat pipe, FHP) [3-5] และประเด็นที่สามเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ท่อความร้อนเพื่อนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ [6-11] ซึ่งทั้งสามประเด็นข้างต้น ผู้เขียนได้ทำการวิเคราะห์และสรุปรายละเอียดพอสังเขปมานำเสนอ ดังนี้ การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนแบบ OHP เพื่อเป็นเครื่องอุ่นอากาศนั้น มีน้อยมากอาจเนื่องจากเป็นงานวิจัยใหม่ ซึ่งพบเพียง 2 งานวิจัยเท่านั้น มีดังนี้ P. Meena และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพ (effectiveness, $\mathcal{E}$) ของเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนชนิดล้นวงรอบติดตั้งลิ้นกั้นกลับ (closed loop oscillating heat pipe with check valve, CLOHP/CV) ซึ่งผลจากการศึกษาของเขาพบว่า ค่า $\mathcal{E}$ มีค่าเป็น 0.29-0.76 ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเร็วของอากาศร้อนที่ไหลเข้าส่วนทำระเหยของเครื่องอุ่นอากาศ S. Rittidech และคณะ [2] ได้ทดลองหา $\mathcal{E}$ ของเครื่องอุ่นอากาศแบบสั่นปลายปิด (closed end oscillating heat pipe, CEOHP) ผลการศึกษาของเขาสรุปได้ว่า $\mathcal{E}$ มีค่าเป็น 0.34-0.54 นอกจากจะขึ้นอยู่กับเหตุผลเช่นเดียวกันกับ [1] แล้ว ยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารทำงานอีกด้วย ซึ่งการใช้สารทำงานเป็น R123 ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้น้ำเป็นสารทำงาน สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบน (flat two phase closed thermosyphon, FTPCT) นั้น พบว่ามีการศึกษาอยู่บ้าง เช่น W. Srimuang และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะของ FTPCT เขาพบว่า ชนิดของสารทำงาน อัตราการเดินสาร ขนาดความแบน และอัตราส่วนสันตด มีผลอย่างยิ่งต่อสมรรถนะของ FTPCT ต่อมา P. Amatachaya และ W. Srimuang [4] ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดาหรือหน้าตัดกลม (conventional two phase closed thermosyphon, CTPCT) กับ FTPCT จากการศึกษาของเขาพบว่า FTPCT มีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่า CTPCT นอกจากนี้ S. H. Moon และคณะ [5] ได้

ทำการศึกษาสมรรถนะของท่อความร้อนหน้าตัดแบน (flat heat pipe, FHP) ขนาดเล็กสำหรับระบายความร้อนคอมพิวเตอร์ เขาได้ทำการบีบจากท่อหน้าตัดกลมให้พื้นที่หน้าตัดลดลงจากเดิมประมาณ 30% จากการทดลองเขาพบว่า FHP ซึ่งมีไส้วางกระจายและกลุ่มตรงกลางอยู่ด้านในท่อ มีสมรรถนะสูงกว่าแบบที่มีไส้ติดตั้งเป็นกลุ่มตรงกลางท่อ โดย FHP นี้ช่วยให้การระบายความร้อนคอมพิวเตอร์ดีขึ้นกว่าเดิมประมาณ 10% สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำเอาท่อความร้อนมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์นำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ นั้น พบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้ให้ความสนใจอย่างมาก เช่น S. H. Noie และ G. R. Majidian [6] ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT สำหรับห้องผ่าตัดในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง ชุดทดลองของเขาประกอบไปด้วยขดลวดความร้อนขนาด 1500 W และกำหนดความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT เท่ากับ 2.3 m/s จากงานวิจัยนี้เขาพบว่ามี $\varepsilon = 0.16$ ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ามีความค่อนข้างต่ำ เนื่องจาเงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิของแหล่งความร้อนสูงจ่ายให้ TPCT ต่ำมาก (15-55°C) ต่อมา F. Yang และคณะ [7] ได้นำเอา CTPCT ไปประยุกต์ใช้สำหรับนำเอาความร้อนที่ปล่อยทิ้งไปกับไอเสียกลับมาใช้สำหรับอุ่นอากาศให้กับห้องผู้โดยสารของรถโดยสาร เขาได้ทำการทดลองมีอุณหภูมิของไอเสียไหลผ่านส่วนทำระเหยอยู่ในช่วง 100-300°C จากการศึกษาเขาพบว่า CTPCT ของเขามี $\varepsilon = 0.28$ ต่อมา M. H. Habeebullah และคณะ [8] ได้รายงานผลการวิจัยจากการนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยวิธีการนำเอาส่วนทำระเหยของท่อความร้อนสวมครอบภายนอกท่อไอเสีย ในการทดลองของเขาได้กำหนดอุณหภูมิไอเสีย 300°C จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าสามารถนำความร้อนจากไอเสียมาใช้ใหม่ได้ 70 ถึง 93% ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ามีความสูงมาก นอกจากนี้ S. B. Riffat and G. Gan [9] ได้รายงานสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนโดยมีไส้ (wick heat pipe heat exchanger, HPHE) ที่ต่างกันสามชนิดที่ใช้สำหรับการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ในรายงานของเขา ค่าของ ε สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [1-2] และ

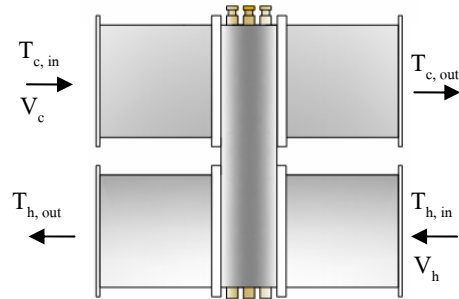
ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของครีและการจัดเรียงของท่อความร้อนด้วย ต่อมา S. H. Noie [10] ได้ทำการตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของ CTPCT สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับอากาศเย็น เขาได้ทดลองในเงื่อนไขดังนี้ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าส่วนทำระเหยคือ 100-250°C ในขณะที่ความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยเท่ากับ 18-72 kW และความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเป็น 0.5-5.5 m/s ผลการทดลองเขาพบว่า ε ของ CTPCT มีค่าเป็น 0.37-0.65 นอกจากนี้ S. H. Noie [10] ยังได้นำเสนอผลของการเพิ่มความเร็วอากาศร้อนที่ไหลเข้า CTPCT ทำให้ ε ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ [1-2, 9] ต่อมา A. R. Lukitubudi และคณะ [11] ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT เพื่อนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งไปกับไอเสียกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตเบเกอรี่ ซึ่งออกแบบให้ CTPCT ทำงานอยู่ในระดับอุณหภูมิปานกลาง (ต่ำกว่า 300°C) เขาได้ทดลองในสภาวะความเร็วของอากาศที่ไหลเข้า CTPCT เป็น 1.5-5 m/s และความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยเป็น 4-20 kW จากการทดลองของเขาพบว่า $0.18 \leq \varepsilon \leq 0.63$ และสามารถเพิ่มค่า ε จากการลดความเร็วอากาศร้อนที่ไหลเข้า TPCT ซึ่งผลดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [1-2, 9, 10] แต่ในการทดลองของ [11] จะแตกต่างกับการทดลองของ [10] คือ ในการทดลองของ [10] จะกำหนดให้ความเร็วของอากาศเย็นคงที่ 3 m/s ในขณะที่การทดลองของ [11] ทั้งความเร็วของอากาศร้อนและเย็นที่ไหลเข้า TPCT จะมีความเร็วเท่ากัน การจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้เขียนสังเกตพบว่า ε ของเครื่องอุ่นอากาศที่ทำจาก OHP [1-2] มีความสูงมากคือ $\varepsilon = 0.74$ ซึ่งในขณะเดียวกันมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งได้พัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของ FHP และ FTPCT ซึ่งพบว่า FTPCT [3-5] มีสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่า CTPCT ในขณะเดียวกันนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งได้ศึกษาการนำเอาความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยใช้ HPHE และ CTPCT ผลการศึกษาของ [6-11] พบว่า $\varepsilon = 0.65$ ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสนใจจากนักวิจัยหลายท่าน ดังนั้น ผู้เขียนจึงมีแนวความคิดในการ

พัฒนาเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP โดยการต่อยอดจากการวิเคราะห์ผลงานวิจัยของ [1-11] กล่าวก็นำเอาข้อดีของ FTPCT มารวมกับข้อดีของ CLOHP ซึ่งจัดเป็นวงจร (closed loop) แล้วประกอบกันเป็นเครื่องอุ่นอากาศแบบใหม่ เรียกว่าเครื่องอุ่นอากาศแบบท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดวงรอบ (CLOFHP air pre-heater) ซึ่งจะเหมาะกับการนำไปใช้สำหรับการนำเอาความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในประเด็นนี้ผู้เขียนยังไม่พบว่ามียุทธศาสตร์งานใดศึกษา

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ทดสอบหา ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP โดยมุ่งประเด็นไปที่ผลของอุณหภูมิของอากาศร้อน ($T_{h,in}$) ที่ไหลเข้าส่วนทำระเหย และผลของความเร็วของอากาศเย็น (V_c) ที่ไหลเข้าส่วนควบแน่น ที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศ ผู้เขียนคาดหวังว่าข้อมูลที่ได้อาจการศึกษาในครั้งนี้ จะมีประโยชน์อย่างมากต่อการออกแบบและการประยุกต์ใช้เครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP ในอนาคตต่อไป

2. ทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP ด้วยวิธี วิธี effectiveness – NTU

เครื่องอุ่นอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อนำเอา FHP มาดัดเป็นโค้งกลับไปมาและจัดให้เป็นแถวซึ่งวางอยู่ในตัวเครื่องคล้ายๆ กล้องสี่เหลี่ยม โดยมีแผ่นกั้นระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศร้อนและเย็นที่ไหลผ่านเครื่องนี้เกิดการไหลปนกัน นอกจากนี้แผ่นกั้นยังเป็นส่วนที่ช่วยยึดติดท่อความร้อนไว้กับโครงสร้างอีกด้วย สำหรับส่วนทำระเหยของท่อ CLOFHP นั้น จะเป็นด้านที่ให้อากาศร้อนไหลผ่าน และในขณะที่เดียวกันส่วนควบแน่นของ CLOFHP เป็นด้านที่ให้อากาศเย็นไหลผ่าน ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP แสดงดังรูปที่ 2 สำหรับสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP สามารถหาด้วยวิธี effectiveness – NTU โดยแสดงเป็นค่า ε ซึ่งจะมีค่าเป็น $0 \leq \varepsilon \leq 1$



รูปที่ 2 เครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP

ค่า ε นี้หาได้จากอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนจริง (Q_{act}) ต่อการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ (Q_{max}) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{Q_{act}}{Q_{max}} = \frac{\dot{m}_c (T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{min} (T_{h,in} - T_{c,in})} \quad (1)$$

โดย Q_{max} นี้จะเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี ดังนี้ กรณีแรก อุณหภูมิของอากาศเย็นที่ไหลออกจากเครื่องอุ่นอากาศ จะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นอากาศ ดังเช่น $T_{c,out} = T_{h,in}$ จะเกิดได้ในกรณี อัตราความจุความร้อนของอากาศเย็น ($C_c = (\dot{m}c_p)_c$) ต่ำกว่าอัตราความจุความร้อนของอากาศร้อน ($C_h = (\dot{m}c_p)_h$) หรือ $C_c < C_h$ แต่ถ้าหาก $C_h < C_c$ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลออกจากเครื่องอุ่นอากาศ จะเท่ากับอุณหภูมิของอากาศเย็นที่ไหลเข้าเครื่องอุ่นอากาศ ดังเช่น $T_{h,out} = T_{c,in}$ ดังนั้น Q_{max} หาได้จาก 2 กรณี ดังนี้

กรณี $C_c < C_h$;

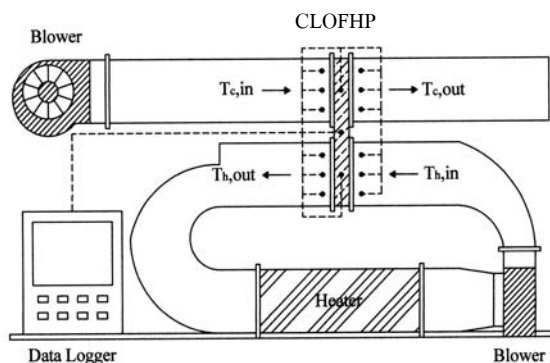
$$Q_{max} = C_c (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (2)$$

กรณี $C_h < C_c$;

$$Q_{max} = C_h (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (3)$$

3. ชุดทดลองสมรรถนะของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP

ชุดทดสอบหา ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP ที่ถูกสร้างขึ้นประกอบด้วย กล้องอากาศร้อน กล้องอากาศเย็น ซึ่งทำด้วยสังกะสี ขดลวดความร้อน เครื่องวัดอุณหภูมิของอากาศ และเครื่องบันทึกข้อมูล ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดการทดสอบหาประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศ

สำหรับกระบวนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการเปิดพัดลมให้อากาศสภาวะห้องทดสอบ ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 30°C ให้ไหลผ่านส่วนควบแน่น จากนั้นเปิดพัดลมและขดลวดความร้อนของวงจรอากาศร้อน ซึ่งอากาศร้อนนี้จะไหลผ่านส่วนทำระเหยของเครื่องอุ่นอากาศ สำหรับตัวแปรต่างๆ ในการทดสอบ มีดังนี้ V_c และ V_h เปลี่ยนแปลงในช่วง $0.5\text{--}2\text{ m/s}$ และ $T_{h,in}$ เปลี่ยนแปลงในช่วง 90 ถึง 150°C เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงทำการเก็บค่าอุณหภูมิของอากาศดังนี้ $T_{h,in}$, $T_{h,out}$, $T_{c,in}$ และ $T_{c,out}$ สำหรับความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องอุ่นอากาศนี้ ได้ทำการวัดสองตำแหน่ง ดังนี้ ความเร็วของอากาศร้อนที่ไหลเข้าส่วนทำระเหย (V_h) และความเร็วของอากาศเย็น (V_c) ที่ไหลเข้าส่วนควบแน่น หลังจากที่ได้ข้อมูลจากการวัดที่จุดดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ก็นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า ε โดยใช้สมการ (1) ต่อไป

4. ผลและการวิเคราะห์

ในการทดสอบหา ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP นี้ ผู้ทำวิจัยได้นำเสนอ 2 ประเด็น คือ ผลของ V_c ที่ไหลเข้าส่วน

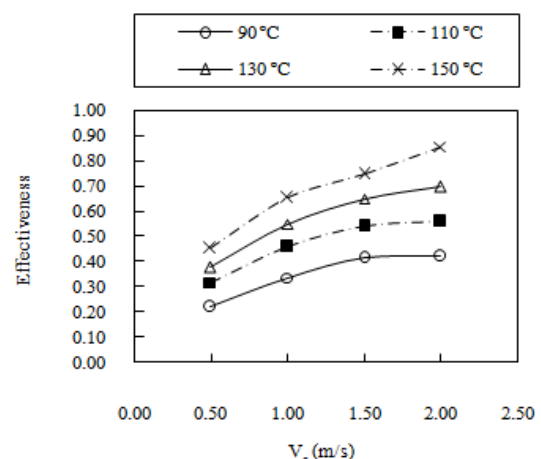
ควบแน่นที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศ และผลของ $T_{h,in}$ ที่ไหลเข้าส่วนทำระเหยที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ผลของ V_c ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศ

ในการทดสอบหา ε ของเครื่องอุ่นอากาศ ได้กำหนดพารามิเตอร์ในการทดลอง ดังนี้ ตัวแปรควบคุม คือ V_h และ $T_{c,in} \approx 30^{\circ}\text{C}$ สำหรับตัวแปรเปลี่ยนแปลง ได้แก่ $T_{h,in}$ คือ $90, 110, 130$ และ 150°C และ V_c คือ $0.5, 1, 1.5$ และ 2 m/s การทดลองแบ่งได้เป็น 4 กรณี ได้แก่ V_h เท่ากับ $0.5, 1, 1.5$ และ 2 m/s ตามลำดับ ผลของ V_c ที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศในกรณีต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กรณี $V_h = 0.5\text{ m/s}$

ในกรณี V_h ที่คือ 0.5 m/s โดยเปลี่ยน $T_{h,in} = 90, 110, 130$ และ 150°C และเปลี่ยน $V_c = 0.5, 1, 1.5$ และ 2 m/s ผลของความสัมพันธะระหว่าง ε ของเครื่องอุ่นอากาศกับ V_c ที่ไหลเข้าส่วนควบแน่น แสดงรูปที่ 4



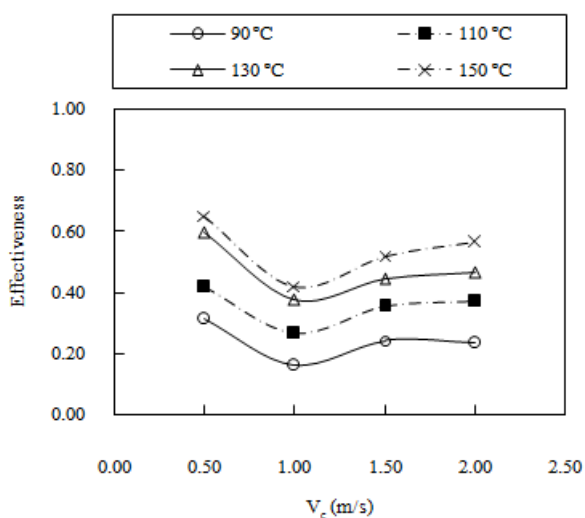
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับกรณี $V_h = 0.5\text{ m/s}$

เมื่อพิจารณา ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP พบว่า ε มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม V_c และหากพิจารณาที่ $V_h = 0.5\text{ m/s}$

พบว่า ε เพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$ ที่เพิ่มขึ้น ในการทดลองนี้ ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.22 ที่สภาวะ $T_{h,in} = 90^\circ\text{C}$ และ $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ เป็นเพราะว่าในเงื่อนไขนี้ $T_{h,in}$ ต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผลให้การเดือดของสารทำงานภายใน CLOFHP ดำเนินไปด้วย ส่วนกรณีที่ ε มีค่าสูงสุดจะพบที่สภาวะ $T_{h,in} = 150^\circ\text{C}$ และ $V_c = 2 \text{ m/s}$ ซึ่งจะมีค่า ε สูงสุดเท่ากับ 0.86 กรณีที่ ε เพิ่มขึ้นตาม V_c นั้นอาจจะมีสาเหตุมาจาก V_c เพิ่มขึ้นทำให้ความร้อนจริงที่ออกจากเครื่องอุ่นอากาศมากขึ้น นั่นเอง

2. กรณี $V_h = 1 \text{ m/s}$

ในกรณี $V_h = 1 \text{ m/s}$ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c ของเครื่องอุ่นอากาศแสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า ε มีค่าลดลงเมื่อ V_c เพิ่มขึ้นจาก $V_c = 0.5$ เป็น 1 m/s แต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ V_c ที่ไหลเข้าระบบมากยิ่งขึ้น ถ้าหากสังเกตผลที่ได้นี้จะได้จุดน่าสนใจว่า หาก $V_c = V_h = 1 \text{ m/s}$ ค่า ε ให้ค่าต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกันกับผลการทดลอง กรณี V_h คงที่เท่ากับ 0.5 m/s ในหัวข้อที่ผ่านมา กล่าวคือ กรณีดังกล่าว ε จะมีค่าต่ำสุดเมื่อ V_c เท่ากับ V_h อาจจะเป็นเพราะว่าเมื่อ $V_c = V_h$ แล้วส่งผลให้ C_{min} / C_{max} สูงสุด ซึ่งสอดคล้องตามหลักการของ ε -NTU



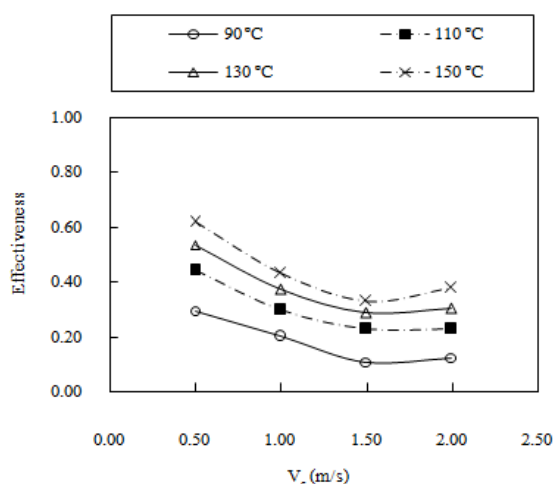
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับกรณี

$$V_h = 1 \text{ m/s}$$

ส่วนในการทดลองนี้ ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.16 ที่สภาวะ $T_{h,in} = 90^\circ\text{C}$ และ $V_c = 1 \text{ m/s}$ ส่วนกรณีที่ ε มีค่าสูงสุดจะพบที่สภาวะ $T_{h,in} = 150^\circ\text{C}$ และ $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ ซึ่งจะมีค่า ε สูงสุดเท่ากับ 0.65

3. กรณี $V_h = 1.5 \text{ m/s}$

ในการทดลองที่กรณี $V_h = 1.5 \text{ m/s}$ ก็ยังคงใช้เงื่อนไขที่สภาวะเดียวกันกับ กรณี $V_h = 0.5 \text{ m/s}$ หรือ $V_h = 1 \text{ m/s}$ ดังในหัวข้อที่ผ่านมา ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับ กรณี $V_h = 1.5 \text{ m/s}$ แสดงไว้ในรูปที่ 6



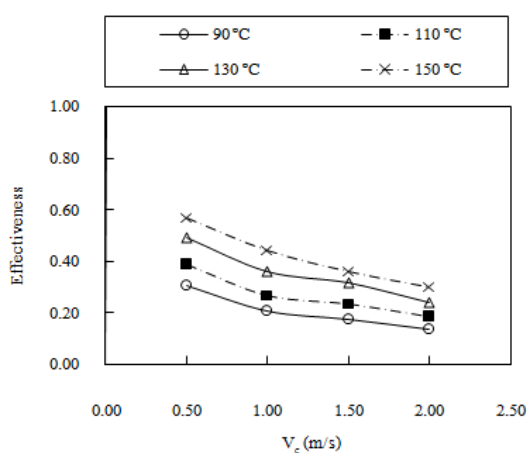
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับกรณี $V_h = 1.5 \text{ m/s}$

พบว่า ε มีค่าลดลง เมื่อ V_c เพิ่มขึ้นจาก $V_c = 0.5$ เป็น 1.5 m/s และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อ V_c ที่ไหลเข้าระบบเมื่อ V_c มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.5 เป็น 2 m/s นอกจากนี้หากพิจารณาที่ $V_h = 1.5 \text{ m/s}$ คงที่ ยังพบว่า ε มีค่าเพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$ ที่เพิ่มขึ้น หากพิจารณาค่า ε พบว่า จะมีค่าต่ำสุด เมื่อ $V_c = V_h$ ทุกสภาวะของ $T_{h,in}$ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกันกับผลการทดลองของทั้งสองหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้น ส่วนในการทดลองนี้ ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.11 ที่สภาวะ $T_{h,in} = 90^\circ\text{C}$ และ $V_c = 1.5 \text{ m/s}$

ส่วนกรณีที่ ε มีค่าสูงสุดจะพบที่สภาวะ $T_{h,in} = 150^\circ\text{C}$ และ $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ ซึ่งจะมีค่า ε สูงสุดเท่ากับ 0.62

4. กรณี $V_h = 2 \text{ m/s}$

ในการทดลองนี้กำหนด $T_{h,in}$ และ V_c เป็นเงื่อนไขที่สภาวะเดียวกันกับการทดลองในกรณี $V_h = 0.5, 1$ หรือ 1.5 m/s แต่ในการทดลองนี้ได้กำหนด $V_h = 2 \text{ m/s}$ รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับกรณี $V_h = 2 \text{ m/s}$ พบว่า ε มีแนวโน้มลดลงเมื่อ V_c ที่ไหลเข้าระบบมากยิ่งขึ้น ซึ่งยืนยันให้เห็นว่า หาก $V_c = V_h$ จะส่งผลทำให้ ε มีค่าต่ำสุด นอกจากนี้หากพิจารณาที่ V_c คงที่ พบว่า ε มีค่าเพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$ ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับผลการทดลองในหัวข้อที่ผ่านมา



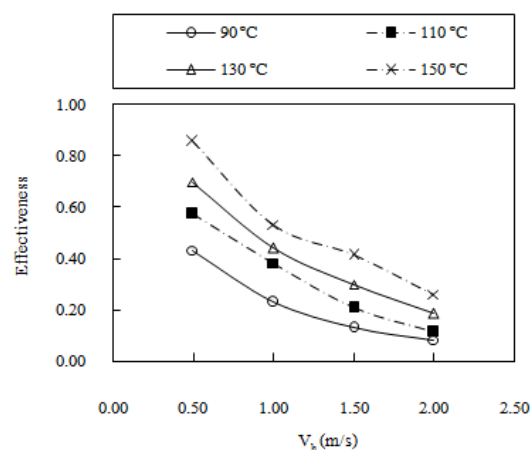
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_c สำหรับกรณี

$$V_h = 2 \text{ m/s}$$

ส่วนในการทดลองนี้ ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.14 ที่สภาวะ $T_{h,in} = 90^\circ\text{C}$ และ $V_c = 2 \text{ m/s}$ ส่วนกรณีที่ ε มีค่าสูงสุดจะพบที่สภาวะ $T_{h,in} = 150^\circ\text{C}$ และ $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ ซึ่งจะมีค่า ε สูงสุดเท่ากับ 0.57

4.2 ผลของ $T_{h,in}$ ที่มีต่อประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศ

ในการทดสอบหาผลของ $T_{h,in}$ ที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศ โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการทดลองเป็นตัวแปรควบคุม ได้แก่ $V_c = 2 \text{ m/s}$ และ $T_{c,in} \approx 30^\circ\text{C}$ สำหรับตัวแปรเปลี่ยนแปลง ได้แก่ $T_{h,in}$ คือ 90, 110, 130 และ 150°C , และ V_h คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 m/s ตามลำดับ ผลของ $T_{h,in}$ ที่มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP แสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่า ε มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$ เป็นเพราะว่าการเพิ่มขึ้นของ $T_{h,in}$ ส่งผลให้ความร้อนสามารถถ่ายเทเข้าสู่เครื่องอุ่นอากาศได้มากขึ้น โดยในการทดลองนี้พบว่า ε มีค่าสูงสุดที่สภาวะ $T_{h,in} = 150^\circ\text{C}$ และ $V_h = 2 \text{ m/s}$ ซึ่งจะมีค่า $\varepsilon = 0.86$



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า ε และ V_h สำหรับกรณี $V_c = 2 \text{ m/s}$

ส่วน ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.10 พบที่สภาวะ $T_{h,in} = 90^\circ\text{C}$ และ $V_h = 2 \text{ m/s}$ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกันกับผลการทดลองในกรณีที่ 1-4 ที่ผ่านมามา ดังนั้น สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดว่า ε เพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$

5. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอผลของ V_c และ $T_{h,in}$ มีต่อ ε ของเครื่องอุ่นอากาศแบบ CLOFHP จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ค่า V_h และ V_c มีผลอย่างยิ่งต่อ ε ซึ่ง ε จะมีค่าต่ำสุดที่สภาวะ $V_c = V_h$

2) ค่า ε เพิ่มขึ้นตาม $T_{h,in}$ และ ε จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ V_c ที่เข้าใกล้ V_h (กรณี $V_h > V_c$) หรือ ε จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ V_h (กรณี $V_c > V_h$)

3) จากการทดลองทั้งหมดพบว่า ค่า ε มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.86 ซึ่งพบในเงื่อนไขการทดลองดังนี้ V_h ต่ำสุด และ $T_{h,in}$ สูงสุด และพบว่า ε มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.10 ซึ่งพบในเงื่อนไขการทดลอง V_h สูงสุด และ $T_{h,in}$ ต่ำสุด

4) ถ้าต้องการให้ ε ของเครื่องอุ่นอากาศเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยเพิ่มค่า $T_{h,in}$ ร่วมกับลดค่า V_h ทั้งนี้ไม่ได้พิจารณาถึงการจัดเรียงท่อและการเพิ่มครีป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่สนับสนุนงบประมาณบางส่วนในการทำวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Meena, S. Rittidech and N.Poomsa-ad, "Application of closed-loop oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CV) air-pre-heater for reduced relative-humidity in drying systems" Applied Energy, Vol. 84, 2007, pp. 553–564.

[2] S. Rittidech, W. Dangeton and S. Soponronnarit, "Closed-ended oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer", Applied Energy, Vol. 81, 2005, pp. 198–208.

[3] W. Srimuang, S. Rittidech and B. Buphot, "Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT)", International journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 20, 2009, pp. 781-790.

[4] P. Amatachaya and W. Srimuang, "Comparative heat transfer characteristics of a flat two-phase closed thermosyphon (FTPCT) and a conventional two-phase closed thermosyphon (CTPCT)", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, 2010, pp. 293-298.

[5] S. H. Moon, G. Hwang, H. G. Yun, T. G. Choy and Y. I. Kang, "Improving thermal performance of miniature heat pipe for notebook PC cooling", Microelectron. Reliab., Vol. 42 No. 1, 2002, pp. 135–140.

[6] S. H. Noie and G. R Majidian, "Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for surgery room in hospitals", Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 14, 2000, pp. 1271-1282.

[7] F. Yang, X. Yuan and G. Lin, "Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas", Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 2003, pp. 367-372.

[8] M. H. Habeebullah, M. Akyurt, Y. S. H. Najjar and A. K. El-Kalay, "Experimental performance of a waste heat recovery and utilization system with a looped water in steel heat pipe", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, 1998, pp. 595-607.

[9] S. B. Riffat and G. Gan, "Determination of effectiveness of heat-pipe heat recovery for naturally-ventilated buildings", Applied Thermal Engineering, Vol. 18, 1998, pp. 121-130.

[10] S. H. Noie, "Investigated the thermal performance of an air to air thermosyphon heat exchanger", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, 2006, pp. 559-567.

[11] A. R. Lukitobudi, A. Akbarzadeh, A. W. Johnson and P. Hendy, "Design, construction and testing of a thermosyphon heat exchanger for medium temperature heat recovery in bakeries", Heat Recovery Systems. Vol. 15, No. 5, 1995, pp. 481-491.