



## คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น

นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์<sup>1\*</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ต.พังโคน อ.พังโคน จ.สกลนคร 47160

สัมพันธ์ ฤทธิเดช<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

และ ธีรญา ประเมษฐานวัฒน์<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี ต.เนินหอม อ.เมือง

จ.ปทุมธานี 25230

### บทคัดย่อ

บทความนี้ทำการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น (OHPs) ซึ่งท่อความร้อนแบบสั้นนั้นแบ่งออกเป็น 3 ชนิดดังนี้ ท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (CEOHP), ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (CLOHP) และ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (CLOHP/CV) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ เป็นข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นทั้ง 3 ชนิดถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ถึงการทำงาน โดยทำการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ หรือ พลังความร้อน ( $W/m^2$ ) ที่สภาวะการทำงานในช่วงอุณหภูมิปกติโดยเปรียบเทียบผลของมุมเอียงการทำงาน และสารทำงานต่างๆ จากการศึกษาเปรียบเทียบผลการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นในอดีต โดยเปรียบเทียบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D) พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่ใกล้เคียงกับการคำนวณทางทฤษฎีจะให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ความยาวที่เท่ากันทั้ง 3 ส่วน ( $L_1$ ,  $L_2$  และ  $L_3$ ) ที่สั้นลงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น เพราะระยะทางในการถ่ายเทความร้อนสั้น การสูญเสียระหว่างการถ่ายเทความร้อนมีน้อย การทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นที่สภาวะการทำงานในแนวระดับพบว่า ท่อความร้อนแบบ CLOHP/CV สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุดในจำนวนท่อความร้อนแบบสั้นทั้งสามชนิด อย่างไรก็ตามผลของสารทำงานที่มีต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นพบว่า เมื่ออุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ ที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

**คำสำคัญ :** การถ่ายเทความร้อน / ท่อความร้อนแบบสั้น / สมรรถนะทางความร้อน

\* Corresponding author E-mail: pipatpaiboon@hotmail.com

1 อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

2 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

3 อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการออกแบบและผลิตเครื่องจักรกล คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรมเกษตร

## Heat Transfer Characteristics of Oscillating Heat Pipes

Namphon Pipatpaiboon<sup>1\*</sup>

Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus, Phangkhon, Sakon Nakhon 47160

Sampan Rittidech<sup>2</sup>

Maharakham University, Khamriang, Kantarawichai, Maharakham 44150

and Thanya Paramatthanuwat<sup>3</sup>

King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi Campus, Noenhom,

Mueang, Prachinburi 25230

### Abstract

This article investigates the heat flux characteristics of oscillating heat pipes (OHPs). The oscillating heat pipes have 3 types as follows: closed end oscillating heat pipe (CEOHP), closed looped oscillating heat pipe (CLOHP) and closed looped oscillating heat pipe with check valves (CLOHP/CV). The analysis was performed on the existing experimental data in the literature. The heat transfer characteristics of all types of oscillating heat pipes were compared and analyzed. The OHPs were compared in terms of the heat flux ( $W/m^2$ ) at normal operation; the effects of the angle of inclination and the use of different working fluids were evaluated. Based on the analysis results, it was found that the inner diameter ( $D_i$ ) should be closed to the theoretically recommended value if the highest heat transfer effectiveness is to obtain. The decreased section lengths ( $L_e$ ,  $L_a$  and  $L_c$ ) of OHPs increase the heat flux because the distance for heat transfer is shorter; heat loss would also be less. The horizontal operation mode of CLOHP/CV exhibits maximum heat flux. The working fluids effect on the heat flux is significant, which is in accordance to the heat transfer theory.

**Keywords :** Heat flux / Oscillating heat pipe / Thermal performance

\* Corresponding author E-mail: pipatpaiboon@hotmail.com

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Design and Production Technology of Agricultural Industrial Machinery, Faculty of Technology and Management.

## 1. บทนำ

บทความนี้นำเสนอคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น 3 ชนิด เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีต เกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อน และกลไกการทำงานภายในของท่อความร้อนแบบสั่นทั้ง 3 ชนิด ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่กล่าวถึงท่อความร้อนแบบสั่น (OHPs) เป็นจำนวนมาก แต่เป็นการแยกย่อยทำการศึกษแยกออกเป็น 3 ชนิดหลัก คือ ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed end oscillating heat pipe: CEOHP), ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed loop oscillating heat pipe: CLOHP) และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (Closed loop oscillating heat pipe with check valves: CLOHP/CV) ซึ่งการศึกษาท่อความร้อนแบบสั่นทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น จะเป็นการศึกษาเชิงเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแต่ละชนิด โดยการเปรียบเทียบตัวแปรเดียวกัน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D), ความยาวส่วนทำระเหย ( $L_v$ ), สารทำงาน (Working fluids), มุมเอียงการทำงาน (Angle of inclination) และตัวแปรอื่นๆ ดังนั้นบทความนี้ จึงรวบรวมผลการศึกษจากบทความวิจัยในอดีต ที่ได้รับการยอมรับ โดยเอาผลการศึกษาวิจัยของท่อความร้อนแต่ละชนิดที่แยกย่อยอยู่มาเปรียบเทียบ ซึ่งให้เห็นถึงคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดต่างๆ ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัย และการประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนในอนาคต เช่น การนำไปประยุกต์ใช้งานในการถ่ายเทความร้อนอุตสาหกรรม การระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การนำประยุกต์ใช้งานสำหรับรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในกระบวนการทำน้ำร้อน และมีการนำท่อชนิดอื่นหรืออุปกรณ์ชนิดอื่นมาทดแทน แต่ยังคงอาศัยหลักการทำงานและหลักการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน [1], [2]

## 2. ท่อความร้อนแบบสั่น

### (Oscillating heat pipe; OHPs)

ท่อความร้อนแบบสั่น (OHPs) เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งถ่ายความร้อน หรือถ่ายเทความร้อน จากแหล่งความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน โดยท่อความร้อนแบบสั่นสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เองโดยไม่ต้องการแหล่งพลังงานป้อนให้กับท่อความร้อนแบบสั่น เพื่อให้ท่อสามารถถ่ายเทความร้อนได้ สาเหตุที่ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงาน เช่น พลังงานไฟฟ้าป้อนให้ระบบของท่อความร้อนแบบสั่นนั้น เพราะท่อความร้อนแบบสั่นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก แสดงรายละเอียดในรูปที่ 1. คือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) มีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในตำแหน่งหรือพื้นที่ของแหล่งความร้อน (Heat source) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (condenser section) มีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในส่วนที่ต้องการรับความร้อน (Heat sink) โดยท่อความร้อนแบบสั่นจะสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ด้วยตัวเองทันทีเมื่อส่วนทำระเหยอยู่ในแหล่งความร้อน แล้วสารทำงานภายในท่อจะเกิดการเดือด และการเคลื่อนที่ขึ้นลงอย่างรวดเร็วไปมาระหว่าง แหล่งความร้อน และแหล่งรับความร้อน ซึ่งความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปตรงตำแหน่งแหล่งรับความร้อนโดยจะมีของไหลจำพวกน้ำ ของเหลวอื่นๆ หรือ อากาศ เป็นต้น มารับความร้อนออกไปจากผิวท่อเพื่อนำความร้อนไปใช้งาน โดยท่อความร้อนแบบสั่นนี้จะเป็นท่อขนาดเล็ก (Capillary tube) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (1) และท่อความร้อนแบบสั่นจะเป็นท่อระบบปิด บรรจุด้วยสารทำงานและเป็นสุญญากาศเพื่อวัตถุประสงค์ในการช่วยให้สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในท่อมีจุดเดือดต่ำลง ช่วยให้การเดือดของสารทำงานเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว [1]

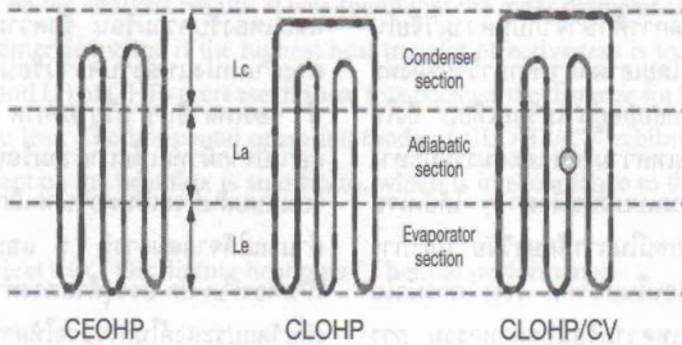
$$D_1 \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (1)$$

ถ้า  $D_1 < D_{lm}$  แรงตึงผิวของสารทำงานจะส่งผลให้เกิดแท่งของเหลว (Liquid plugs) กระจายอยู่โดยทั่วตามแนวแกนท่อความร้อนแบบสั่น

ถ้า  $D_i > D_m$  แรงตึงผิวของสารทำงานจะลดลง และ สารทำงานจะรวมตัวกันที่ด้านล่างของท่อตามแรงโน้มถ่วงของโลก และ ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบสั่นของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งสรุปได้ว่าท่อความร้อนใดๆ ที่ออกแบบด้วยวิธีการคำนวณจากสมการ (1) และใช้สมบัติของสารทำงานที่อุณหภูมิทำงาน (ผลรวมของอุณหภูมิส่วนทำ าระเหยกับส่วนควบแน่นหารด้วยสอง)ที่จะนำท่อความร้อนไปใช้งานนั้น หากเลือกใช้ท่อที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ ขนาดที่คำนวณได้จากสมการที่ (1) จะเรียกว่าชุดท่อ ความร้อนแบบสั่น แต่ในกรณีที่ใช้ใช้งานขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กึ่งกลางท่อที่มีขนาดมากกว่าค่าที่คำนวณได้ ท่อความ ร้อนนั้นๆ จะไม่จัดอยู่ในกลุ่มหรือชนิดของท่อความร้อน แบบสั่น

ลักษณะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นเหมือน กับการนำท่อความร้อนแบบสองสถานะ (Two phase closed thermosyphon) มาเชื่อมต่อกันหลายๆ อัน [4], [5] ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งกลุ่มหลักเป็น 3 ชนิด [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 แบบแรกท่อความร้อนแบบสั่นปลาย ปิด (Closed end oscillating heat pipe; CEOHP) มี

ลักษณะเป็นท่อโลหะขนาดเล็กขดกลับไปกลับมามีปลายท่อ ทั้งสองด้านไม่เชื่อมต่อกัน แบบที่สองท่อความร้อนแบบสั่น วงรอบ (Closed loop oscillating heat pipe; CLOHP) มีลักษณะเป็นท่อโลหะขนาดเล็กขดกลับไปกลับมามีปลายท่อ ทั้งสองด้านเชื่อมต่อกันเป็นวงรอบ และ แบบที่สามท่อ ความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (Closed loop oscillating heat pipe with check valves; CLOHP/CV) โดยมีลักษณะเป็นท่อโลหะขนาดเล็ก ขด กลับไปกลับมามีปลายท่อทั้งสองด้านเชื่อมต่อกันเป็นวงรอบ และติดตั้งวาล์วกันกลับ (Check valves) ไว้ตรงตำแหน่ง ส่วนกันความร้อน สำหรับควบคุมทิศทางการไหลของสาร ทำงานภายในท่อ ขณะท่อทำงานให้มีทิศทางการไหลไป ในทิศทางเดียวกัน และสาเหตุในการติดตั้งวาล์วกันกลับ ไว้ตรงตำแหน่งส่วนกันความร้อนนั้น มีสาเหตุ คือ เป็น ส่วนที่มีการเคลื่อนที่และถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน ภายในท่อเป็นหลัก เมื่อเทียบกับส่วนทำระเหยและส่วน ควบแน่น เป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสาร ทำงานมากกว่าการเคลื่อนที่



รูปที่ 1 ท่อความร้อนแบบสั่น (OHPs) 3 ชนิด

### 3. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น (OHPs)

จากงานวิจัยในอดีตให้สมมุติฐานในการศึกษาวิจัยว่า ความร้อนจากส่วนทำระเหยจะถ่ายเทความร้อนผ่านส่วน กันความร้อนมายังส่วนควบแน่นโดยไม่มีการสูญเสียความ ร้อน เมื่อท่อความร้อนแบบสั่นทั้ง 3 ชนิดดังแสดงในรูปที่ 1 รับความร้อนจากแหล่งความร้อนโดยพื้นที่การรับความ ร้อนทั้งหมดของท่อความร้อนแบบสั่นคือส่วนทำระเหย

สารทำงานที่บรรจุอยู่ในท่อเกิดการเดือด และเกิดการ เคลื่อนที่ขึ้นภายในท่อในรูปแบบการสั่น (Oscillating) เมื่อ สารทำงานภายในท่อเกิดการเดือดสารทำงานจะเกิดการ เปลี่ยนแปลงจากแท่งของเหลว (Liquid slug) สลับกับ ฟองไอ (Vapour) จะเกิดการเคลื่อนที่พาความร้อนจาก ส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น เมื่อสารทำงานภายใน ท่อที่เปลี่ยนสถานะจากก้อนของเหลวเป็นฟองไอ เคลื่อนที่ ไปยังส่วนควบแน่นและถ่ายเทความร้อนเป็นที่เรียบร้อย



ฟองไอของสารทำงานภายในท่อจะเกิดการควบแน่นและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลวและไหลกลับมายังส่วนทำระเหยอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) อัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบาย ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) [3], [6]

$$Q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

$$q = \frac{Q}{\pi D_o L_c n} \quad (3)$$

ดังนั้น ค่าการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) ของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสลับที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานั้นมีข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่น ขนาดท่อความร้อนแบบสลับที่ไม่เท่ากัน (เส้นผ่านศูนย์กลาง, ขนาดความยาวรวม) โดยวิธีพิจารณาจะเริ่มจากนำข้อมูลการทดลองมาคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนซึ่งมีหน่วยเป็น วัตต์ (W) จากนั้นพิจารณาพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนของข้อมูลการทดลองซึ่งมีขนาดชุดแลกเปลี่ยนความร้อน หรือ พื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนไม่เท่ากัน จำเป็นต้องคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนของชุดทดลอง ซึ่งมีหน่วยเป็น วัตต์/ตารางเมตร ( $W/m^2$ ) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสลับทั้งสามชนิดของแต่ละการทดลองได้ โดยทำการอภิปรายผลในหัวข้อที่ 4

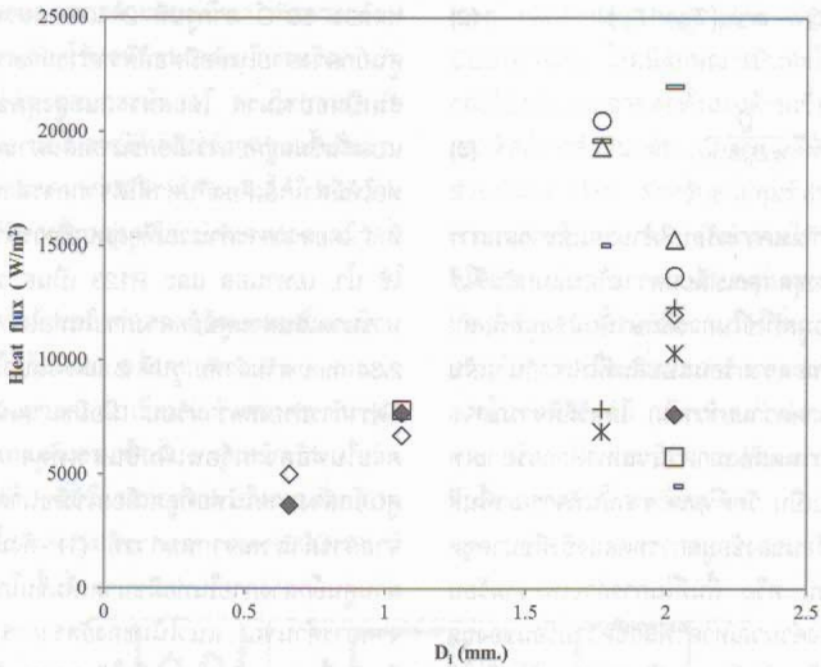
#### 4. อภิปรายผล

##### 4.1 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสลับ (OHPs)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ถูกพิจารณาเป็นอันดับแรกคือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D) เพราะเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อของท่อความร้อนแบบสลับ เป็นตัวแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ของสารทำงานภายในท่อ ดังแสดงในความสัมพันธ์จากสมการที่ 1 จากรูปที่ 2 แสดงผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสลับ ทำการเปรียบเทียบโดยนำผลการทดลองจากงานวิจัย

ที่ผ่านมาในอดีต ทำการเปรียบเทียบโดยเปรียบเทียบผลการทดลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 0.66, 1.06, 1.77 และ 2.03 mm เมื่อใช้ R123, เอทานอล และน้ำ เป็นสารทำงาน ความยาวส่วน ส่วนทำระเหยส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น มีค่าเท่ากันคือ 50 mm อุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสลับขณะทำการทดลอง  $50^{\circ}C$  จากรูปที่ 2 แสดงผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมี่ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนแบบสลับเป็นอย่างมาก โดยสมรรถนะสูงสุดของท่อความร้อนแบบสลับขึ้นอยู่กับทางเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 1 โดยจากการคำนวณที่อุณหภูมิการทำงาน  $50^{\circ}C$  เมื่อใช้น้ำ, เอทานอล และ R123 เป็นสารทำงาน คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อได้ 5.29, 7.65 และ 2.34 mm ตามลำดับ รูปที่ 2 แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของอัตราการถ่ายเทความร้อน เมื่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนเพิ่มขึ้นสาเหตุจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่ถูกเลือกใช้มีขนาดน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (1) ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อมี่ขนาดเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ แนวโน้มของอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงเพิ่มขึ้นตาม พิจารณาเมื่อใช้ R123 เป็นสารทำงานท่อความร้อนแบบ CLOHP [10] มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบ CEOHP [3] ถึง 49.97%, ท่อความร้อนแบบสลับชนิด CLOHP/CV [9] มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบ CLOHP/CV ถึง 69.54% ซึ่งเป็นผลจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ และรูปแบบของการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อขณะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกล่าวคือ ท่อความร้อนแบบ CEOHP จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อที่ไม่แน่นอน และต่อเนื่องมีการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาสั้นๆ ในส่วนของท่อความร้อนแบบสลับชนิด CLOHP จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ๆ ต่อเนื่องเพิ่มมากขึ้น และท่อความร้อนแบบสลับชนิด CLOHP/CV จะมีรูปแบบการเคลื่อนที่ๆ ต่อเนื่อง และมีทิศทางที่แน่นอนสม่ำเสมอ จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา

- ◆ Rittidech 2003 (CEOHP), R123
- ▲ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), R123
- ✕ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), ethanol
- Rittidech 2007 (CLOHP/CV), R123
- Rittidech 2007 (CLOHP/CV), Water
- Rittidech 2003 (CEOHP), ethanol
- ✕ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), R123
- Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), Water
- + Rittidech 2007 (CLOHP/CV), ethanol
- ◇ Sakulchangsattajai 2004 (CLOHP), R123



รูปที่ 2 ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (Di) ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด

4.2 ผลของความยาวส่วนทำระเหย (L<sub>e</sub>) ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs)

การทดลองโดยปกติของท่อความร้อนแบบสันในอดีตที่ผ่านมาจะกำหนดความยาวของส่วนทำระเหย (L<sub>e</sub>), ส่วนกันความร้อน (L<sub>i</sub>), และส่วนควบแน่น (L<sub>c</sub>) ให้มีความยาวเท่ากันทั้งสามส่วนเพราะง่ายต่อการเปรียบเทียบและพิจารณา บทความนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะนำผลการทดลองที่ผ่านมาในอดีตโดยเปรียบเทียบความยาวของส่วนทำระเหย (L<sub>e</sub>) ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด รูปที่ 3 ได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยในอดีตที่มีการทดลองเปรียบเทียบในตัวแปรที่สนใจในการศึกษาคือ การทดลองท่อความร้อนแบบสันที่มีความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 mm โดยใช้ น้ำ,

เอทานอล และ R123 เป็นสารทำงาน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อที่ทำจากท่อทองแดง 2.03 mm อุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสัน 60°C โดยผลการทดลองทั้งหมดได้จากงานวิจัยในอดีตที่เป็นที่ยอมรับ [7], [9] และ [10] จากรูปที่ 3 แสดงผลจากการศึกษาเมื่อความยาวของส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลจากความยาวของส่วนทำระเหยส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อ จากแหล่งความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อนมีระยะทางเพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงและยังมีโอกาสเกิดการสูญเสียความร้อน (Heat loss) ที่ส่วนกันความร้อนได้สูงเมื่อมีระยะทางในการส่งถ่ายความร้อนเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนของ

สารทำงานภายในท่อในระยะทางที่สั้น ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็วและเกิดการสูญเสียความร้อนเพียงเล็กน้อย ทำให้ความยาวของส่วนทำระเหยที่มีระยะ

ทางสั้น ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นได้สูงกว่าส่วนทำระเหย ที่มีระยะทางที่มีความยาวมากกว่า

◇ Katpradit 2005 (CEOHP) R123

□ Katpradit 2005 (CEOHP), Ethanol

△ Katpradit 2005 (CEOHP), Water

× Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), R123

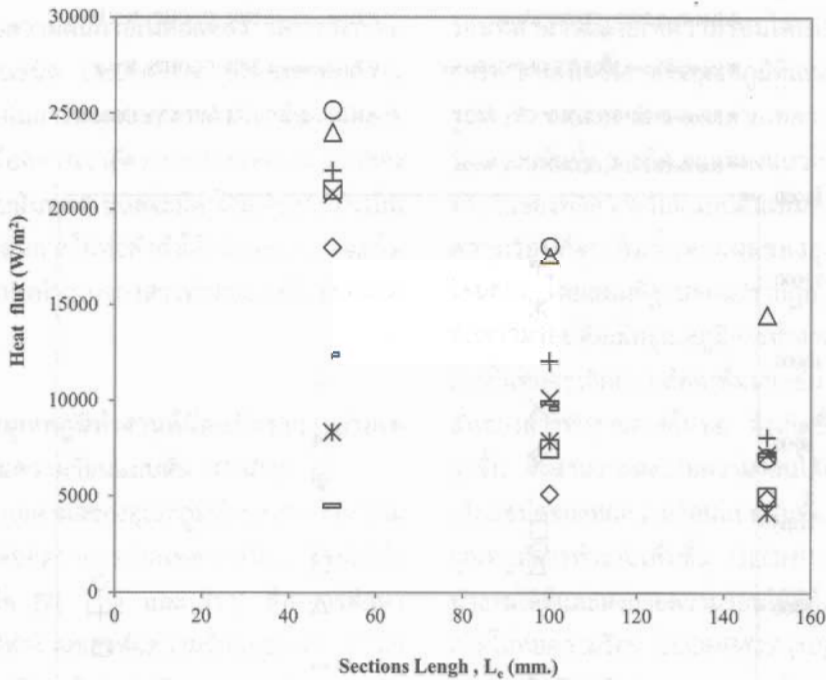
\* Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), Ethanol

○ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), Water

+ Rittidech 2007 (CLOHP/CV), R123

- Rittidech 2007 (CLOHP/CV), Ethanol

▬ Rittidech 2007 (CLOHP/CV), Water

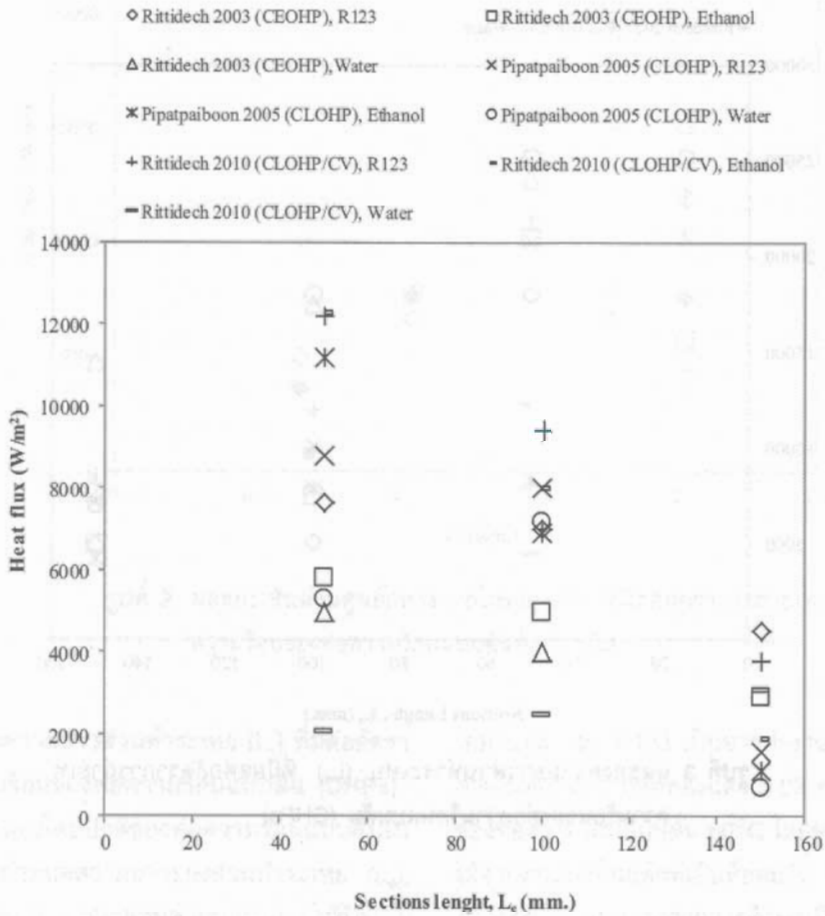


รูปที่ 3 ผลของความยาวส่วนทำระเหย ( $L_c$ ) ที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้น (OHPs)

**4.3 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs) ที่สภาวะการทำงานในแนวระดับ (Horizontal mode)**

จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาทำให้สรุปได้ว่า โดยทั่วไปท่อความร้อนแบบสันสามารถทำงานได้ดีที่สภาวะการทำงานในแนวตั้ง (Vertical mode) หมายถึง อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงการทำงานเพิ่มขึ้น เพราะสารทำงาน

ภายในท่อเมื่อถ่ายเทความร้อนแล้วเกิดการควบแน่นของฟองไอของสารทำงาน จะไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยได้อย่างรวดเร็วเมื่อมุมเอียงการทำงานมีค่ามากหรืออยู่ในแนวตั้ง แต่เมื่อมุมเอียงการทำงานของท่อความร้อนแบบสัน มีค่าลดลงหรือเอียงเข้าใกล้แนวระดับ สารทำงานภายในท่อที่เป็นของเหลวที่เกิดการควบแน่นแล้วไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยจะไหลได้ช้าลง เป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลง



**รูปที่ 4** อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันที่สภาวะการทำงานที่แนวระดับ (Horizontal mode)

คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน ที่สภาวะการทำงานในแนวระดับแสดงในรูปที่ 4 โดยได้รวบรวมผลการวิจัยในอดีตที่ผ่านมาเป็นที่ยอมรับ [3], [8] และ [10] ที่ทำการทดลองในเงื่อนไขการทดลองที่ต้องการศึกษานำมาเปรียบเทียบ โดยตัวแปร

ที่สนใจและนำมาเปรียบเทียบกันคือ ความยาวส่วนทำระเหย 50, 100 และ 150 mm ใช้ น้ำ, เอทานอล และ R123 เป็นสารทำงาน ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 2.03 mm อุณหภูมิทำงาน 50°C และมุมเอียงขณะทำการทดสอบ 0° ที่สภาวะการทำงาน



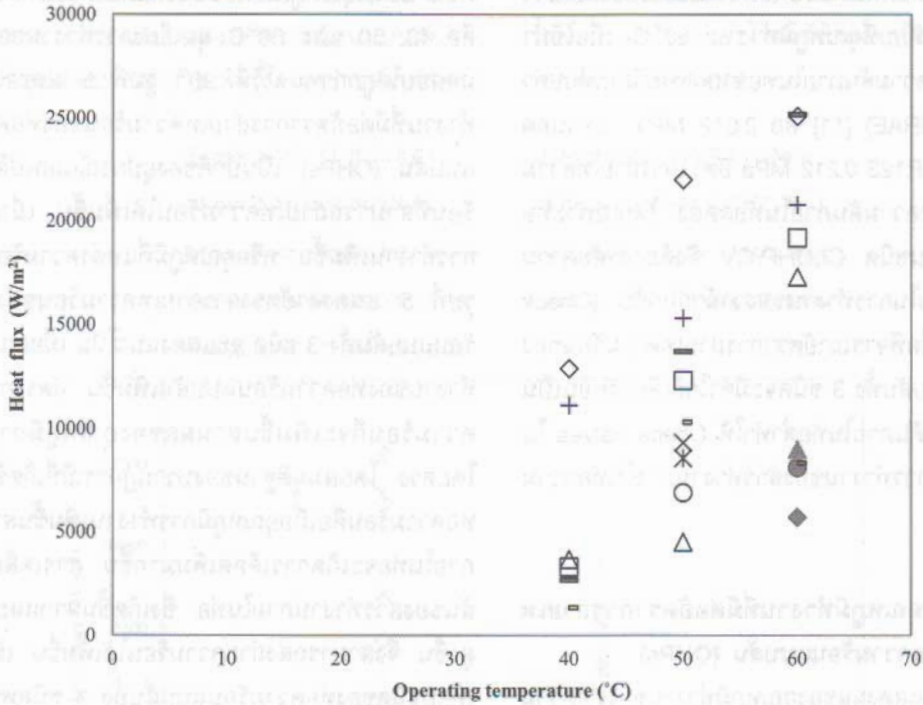
ในแนวระดับของท่อความร้อนแบบสันชนิด CLOHP/CV [8] แสดงอัตราการถ่ายเทสูงสุดเมื่อใช้ R123 และ เอทานอลเป็นสารทำงานมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงถึง  $12,200 \text{ W/m}^2$  พิจารณาเมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงานอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันกลับลดลงและมีนัยสำคัญกับความดันภายในท่อความร้อนแบบสันกล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิทำงาน  $50^\circ\text{C}$  เมื่อใช้น้ำเป็นสารทำงาน ความดันภายในท่อจากการเปรียบเทียบค่ามาตรฐาน (ASHRAE) [11] คือ  $0.012 \text{ MPa}$ , เอทานอล  $0.32 \text{ MPa}$  และ R123  $0.212 \text{ MPa}$  อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อความดันภายในท่อลดลง โดยเฉพาะท่อความร้อนแบบสันชนิด CLOHP/CV ซึ่งต้องอาศัยความดันภายในท่อช่วยในการทำงานของวาล์วกันกลับ (Check valves; CV) เมื่อพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกันอันเป็นสาเหตุจากความดันภายในท่อต่ำทำให้ Check valves ไม่สามารถควบคุมการทำงานของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสันได้

#### 4.4 ผลของอุณหภูมิทำงานที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs)

รูปที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสันที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยได้นำผลการวิจัยในอดีต [7], [10] และ [11] ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสัน นำมารวบรวม และเปรียบเทียบคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด มาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการทำงาน ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด อุณหภูมิทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่นำมาอ้างอิงหมายถึง (อุณหภูมิส่วนท่าระเหย+อุณหภูมิของส่วนควบแน่น)/2 [12], [13] โดยงานวิจัยในอดีต การศึกษาและสามารถนำมาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิทำงานที่มีต่ออัตราการ

ถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิดได้นั้นมีการศึกษาตัวแปร คือ ความยาวส่วนท่าระเหย  $50 \text{ mm}$  ใช้ น้ำ, เอทานอล และ R123 เป็นสารทำงานใช้ในการทดลอง ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ  $2.03$  ใช้เป็นท่อสำหรับทำสร้างเป็นท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด อุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนที่สนใจศึกษา คือ  $40, 50$  และ  $60^\circ\text{C}$  มุมเอียงการทำงานขณะทำการทดสอบได้ถูกกำหนดไว้ที่  $90^\circ$  รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิทำงานที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs) เป็นปกติของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น หรืออุณหภูมิที่แหล่งความร้อนเพิ่มขึ้น รูปที่ 5 แสดงค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิด จะแสดงแนวโน้ม เมื่ออุณหภูมิการทำงานของท่อความร้อนแบบสันเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นตามผลของอุณหภูมิการทำงานโดยตรง โดยสมมุติฐานของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อนคือเมื่ออุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้นสารทำงานภายในท่อจะเกิดการเดือดเพิ่มมากขึ้น การเคลื่อนที่แบบสันของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งเกิดขึ้นมากและมีความถี่สูงขึ้น จึงสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชนิดของท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 ชนิดพบว่า เมื่ออุณหภูมิการทำงานเพิ่มขึ้น CLOHP/CV [10] สามารถทำงานได้ดีและส่งถ่ายความร้อนได้ดีที่สุด เพราะความดันภายในท่อความร้อน CLOHP/CV [10] เพิ่มขึ้นการทำงานของวาล์วกันกลับ จะสามารถทำงานได้ดีและควบคุมทิศทางการไหลได้อย่างต่อเนื่อง CLOHP/CV แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อใช้ R123 เป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทำงาน  $60^\circ\text{C}$  โดยสามารถส่งถ่ายความร้อนได้สูงถึง  $25,080 \text{ W/m}^2$  และ CLOHP [10] แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดเมื่อใช้ เอทานอล เป็นสารทำงานที่อุณหภูมิทำงาน  $40^\circ\text{C}$  สามารถส่งถ่ายความร้อนได้เพียง  $1,340 \text{ W/m}^2$

- ◆ Katpradit 2005 (CEOHP), R123
- ▲ Katpradit 2005 (CEOHP), Water
- ✖ Rittidech 2002 (CEOHP), Ethanol
- Rittidech 2002 (CEOHP), Water
- + Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), R123
- Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), Water
- Pipatpaiboon 2005 (CLOHP/CV), Ethanol
- Katpradit 2005 (CEOHP), Ethanol
- ✖ Rittidech 2002 (CEOHP), R123
- Rittidech 2002 (CEOHP), Water
- Pipatpaiboon 2005 (CLOHP), Ethanol
- ◇ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP/CV), R123
- △ Pipatpaiboon 2005 (CLOHP/CV), Water



รูปที่ 5 แสดงผลของอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสันที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน

**5. สรุปผลการศึกษา**

จากผลการศึกษา ข้อมูลผลการวิจัยในอดีตที่ผ่านมา นำมาเปรียบเทียบสามารถสรุปคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs) ทั้ง 3 ชนิด เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้งานท่อความร้อนแบบสัน ทั้ง 3 ชนิดให้เหมาะสมกับการใช้งานในอนาคต

- การเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนแบบสันควรมีค่าใกล้เคียงกับขนาดท่อที่คำนวณได้จากสมการ (1) ซึ่งจะส่งผลต่อการคงอยู่ของสารทำงานภายในท่อในรูปแบบแท่งของเหลว สลับกับฟองไอ และรูปแบบการเคลื่อนที่แบบสันของสารทำงานภายในท่อขณะทำงาน และให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

- ความยาวของส่วนทำระเหย ( $L_v$ ) อีกนัยหนึ่งหมายถึงถึงความยาวของส่วนกักความร้อน ( $L_c$ ) และ ส่วนควบแน่น ( $L_c$ ) ด้วยนั้น เมื่อมีขนาดความยาวสันลงอัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น อันเป็นสาเหตุจากระยะทางในการถ่ายเทความร้อนสั้นลง จึงสามารถถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และเกิดการสูญเสียน้อยระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่มีระยะทางในการถ่ายเทความร้อนที่ยาวกว่า
- ที่สภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันในแนวระดับ (Horizontal mode) หรือตำแหน่งการทำงานที่มีมุมเอียงการทำงานน้อยหรือใกล้เคียงกับแนวระดับ ควรเลือกใช้ท่อความร้อนแบบสันชนิด CLOHP/CV ใช้งาน ซึ่งสามารถส่งถ่ายความร้อน

ได้ดีและเหมาะสมต่อการใช้งานมากกว่าท่อความร้อนแบบสันชนิดอื่นๆ

- อุดหนุนภูมิการทำงานของท่อความร้อนแบบสัน (OHPs) ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มขึ้นในทุกชนิดท่อความร้อนแบบสัน การเลือกใช้ท่อความร้อนสามารถเลือกใช้งานท่อได้ทุกชนิด แต่ท่อที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดคือท่อความร้อนแบบสันชนิด CLOHP/CV
- การเลือกใช้สารทำงานให้เหมาะสมกับท่อควรพิจารณาจากคุณสมบัติการทำงานของท่อความร้อนแบบสัน คือ ผลรวมของอุณหภูมิของส่วนทำระเหย และอุณหภูมิของส่วนควบแน่นหารด้วยสอง เมื่อได้อุณหภูมิทำงานแล้ว พิจารณาเลือกสารทำงานจากช่วงอุณหภูมิทำงานของสารทำงานที่ครอบคลุมอุณหภูมิทำงานของท่อความร้อนแบบสันที่คำนวณได้ จึงจะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสันมีประสิทธิภาพสูงสุด และเหมาะสมกับการทำงานนั้นๆ
- การใช้งานท่อความร้อนแบบสันเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และพื้นที่การทำงานจำกัด ซึ่งท่อความร้อนแบบฮีตไปป์ หรือ เทอร์โมไซฟอน นั้นมีขนาดใหญ่และไม่เหมาะสม แต่ในทางตรงกันข้าม ฮีตไปป์ หรือ เทอร์โมไซฟอน นั้นข้อดีคือราคาถูก สร้างและใช้งานง่าย
- การใช้งานท่อความร้อนแบบสันเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก และพื้นที่การทำงานจำกัด

## 6. รายการสัญลักษณ์

$C_p$	ค่าความร้อนจำเพาะของสาร	J/kg.°C
$D_i$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทดสอบ	mm
$D_{im}$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเล็กที่สุดที่ได้จากการคำนวณ	mm
$D_o$	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทดสอบ	mm
$g$	ความเร่งเนื่องแรงโน้มถ่วง	m/s <sup>2</sup>
$L$	ความยาว	m
$L_e$	ความยาวส่วนทำระเหย	mm
$L_a$	ความยาวส่วนกันความร้อน	mm

$L_c$	ความยาวส่วนควบแน่น	mm
$m$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
$n$	จำนวนวงรอบของท่อความร้อน	-
$\Delta P$	ความแตกต่างของความดันในแนวแกนของท่อความร้อน	Pa
$\Delta P'$	ความแตกต่างของความดันในแนวรัศมีของท่อความร้อน	Pa
$Q$	ค่าการถ่ายเทความร้อน	W
$q$	ค่าฟลักซ์การถ่ายเทความร้อน	W/m <sup>2</sup>
$T_{in}$	อุณหภูมิขาเข้าที่ส่วนควบแน่น	°C
$T_{out}$	อุณหภูมิขาออกที่ส่วนควบแน่น	°C
$T_{evap}$	อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย	°C
$T_{cont}$	อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น	°C
$\rho$	ความหนาแน่น	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	แรงตึงผิว	N/m

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ห้องวิจัยระบบทางความร้อน คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160 และห้องวิจัยท่อความร้อนและออกแบบเครื่องมือทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

## 8. เอกสารอ้างอิง

1. Hirunlabh, J., Chantawong, P., and Khedari, J., 2000, "A simple-low cost solar water heater for Thailand", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 23, pp. 109-120 (In Thai).
2. Akachi, H., Polasek, F., Stulc, P., 1996, "Pulsating heat pipes", *Proceedings of the Fifth International Heat Pipe Symposium*, Melbourne, Australia, pp.208-217. ISBN 0-08-042842-8.
3. Rittidech S., Terdtoon P., Murakami M., Kamonpet P., Jompakdee W., 2003, "Correlation to Predict Heat Transfer Characteristics of a Close-End Oscillating Heat Pipe at Normal Operating

Condition", *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, No. 4, pp. 497-510.

4. Karimi G., Culham J.R., 2004, "Review and Assessment of Pulsating Heat Pipe Mechanism for High Heat Flux Electronic Cooling", *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, pp. 52-58.

5. Sakulchangsattajai P., Terdtoon, P., Wongratanaphisan, T., Kamonpet, P., and Murakami M., 2004, "Operation modeling of closed-end and closed-loop oscillating heat pipes at normal operating condition", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 7, pp. 995-1008.

6. Paramatthanuwat, T., Boothaisong, S., Rittidech, S., and Booddachan, K., 2010, "Heat Transfer Characteristics of a Phase Closed Thermosyphon Using De Ionized Water Mixed with Silver Nano", *Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp 281-285.

7. Katpradit, T., Wongratanaphisan, P., Terdtoon, P., Kamonpet, P., Polchai A., and Akbarzadeh, A., 2005, "Correlation to predict heat transfer characteristics of a closed end oscillating heat pipe critical state", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, No. 14-15, pp. 2138-2151.

8. Rittidech, S., Pipatpaiboon, N., and Thong-

daeng, S., 2010, "Thermal performance of horizontal closed-loop oscillating heat-pipe with check valves", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24 No.2, pp. 545-550.

9. Rittidech, S., Pipatpaiboon, N., and Terdtoon, P., 2007, "Heat transfer characteristics of a closed-loop oscillating heat-pipe with check valves", *Applied Energy*, Vol. 84, No. 5, pp. 565-577.

10. Pipatpaiboon, N., 2005, Correlation for predicting heat transfer of a closed-looped oscillating heat-pipe with check valves (CLOHP/CVs), Master thesis, Energy Technology, Faculty of Engineering of Mahasarakham University. (In Thai)

11. Rittidech, S., 2002, Heat transfer characteristics of closed-end oscillating heat pipe. Doctor of philosophy in mechanical engineering thesis, Graduate School Chiang Mai University. (In Thai)

12. Parsons, R., 1993, ASHRAE, Fundamentals Handbook: SI Edition.

13. Yunus, A. C., 2004, Heat Transfer A Practical Approach, Second Edition In SI Units, McGraw-Hill.