# บทคัดย่อ

T 159884

โครงการวิจัยนี้ศึกษาขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe, CEOHP) ซึ่งเป็นสภาวะที่ CEOHP ไม่สามารถส่งผ่านความร้อนได้ในสภาพที่มีอุณหภูมิเท่ากันตลอด (Non-isothermal operation) หากใช้งาน CEOHP ที่อุณหภูมิส่วนรับความร้อนสูงกว่าขีดจำกัดนี้มากๆจะยังทำให้ความต้านทานความร้อนของ CEOHP สูงเกินไปความร้อนจะส่งผ่านได้น้อย และอาจเกิดความเสียหายที่ผนังท่อบรรจุได้ หากสามารถทำนายการเกิดสภาวะนี้ได้จะทำให้ใช้งาน CEOHP ได้อย่างปลอดภัย งานวิจัยแยกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นแรกเป็นการทำการทดลองเชิงปริมาณเพื่อหาผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อขีดจำกัดสมรรถนะนี้ เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อคาปิลลารีที่ใช้ทำ CEOHP ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว สารทำงาน มุมเอียง ฯลฯ ซึ่งเป็นการทดลองหาค่าความร้อนสูงสุดที่ CEOHP ส่งผ่านได้ก่อนที่จะเกิดการกระโดดของอุณหภูมิ ณ จุดใดจุดหนึ่งของส่วนทำระเหย โดยแปรค่าตัวแปรข้างต้นอย่างละ 3 ตัวแปร (กำหนดค่าตัวแปรหนึ่งๆอยู่ที่ค่าที่มีความสำคัญเสมอ) โดยมีจุดประสงค์ในการรวบรวมผลของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้อง แล้วนำมาสร้างเป็นสมการสหสัมพันธ์ที่จะใช้ทำนายการเกิดขีดจำกัดสมรรถนะของ CEOHP ผลการทดลองแสดงว่า ที่มุม 90 องศา ค่าอัตราส่วนสนทัด(Lc/d) จะมีผลกระทบต่อค่าความร้อนวิกฤตของ CEOHP เป็นอย่างมาก โดยที่ค่า Lc/d ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า ความร้อนวิกฤตลดลงอย่างต่อเนื่อง ตัวแปรทางเรขาคณิตซึ่งแสดงด้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง จะมีผลกระทบต่อค่าความร้อนวิกฤตของ CEOHP เป็นอย่างมาก โดยหากค่านี้เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนวิกฤตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้จะต้องไม่เกินค่าขนาดวิกฤตของท่อเอง คุณสมบัติของสารทำงานจะมีผลกระทบต่อค่าความร้อนวิกฤตของ CEOHP เป็นอย่างมาก จำนวนโค้งเลี้ยวจะมีผลกระทบต่อค่าความร้อนวิกฤตของ CEOHP โดยที่ค่าโค้งเลี้ยวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนวิกฤตลดลงอย่างช้าๆ เมื่อพิจารณาจากปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้องทำให้สามารถสร้างสมการสหสัมพันธ์ที่จะใช้ทำนายการเกิดขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดได้จากสมการ

$$Ku_{90} = 0.00133 \frac{1}{Bo^{0.645}} Pr^{2.958}\, Ja^{0.845} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.25} \right]^{7.630} \left( \frac{Le}{Di} \right)^{-1.003}$$

งานวิจัยขั้นที่สองเป็นการทดลองเชิงคุณภาพเพื่อ โดยจัดสร้างเครื่องมือทดลองเพื่อใช้ในการทดลองเชิงทัศน์เพื่อสังเกตปรากฏการณ์การไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดเพื่ออธิบายว่าเหตุใดจึงเกิดขีดจำกัดสมรรถนะนี้ขึ้น และสอดคล้องกับสมการสหสัมพันธ์ที่ได้สร้างขึ้นไว้หรือไม่ และได้ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อ

ให้ความร้อนกับท่อความร้อนแบบสั่นเพิ่มขึ้นพบว่า ความเร็วการเคลื่อนที่ของฟองไอเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ความยาวเฉลี่ยของฟองไอมีค่าลดลง รูปแบบการไหลภายในจะมีการเปลี่ยนแปลงจากไปจากรูปแบบการไหลแบบ slug flow เพียงอย่างเดียว ไปเป็นการไหลแบบ slug flow ที่มีการไหลแบบ bubble flow รวมอยู่ด้วย ความถี่ของการเคลื่อนตัวและแอมปลิจูดของการเคลื่อนตัวสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความร้อนที่ให้กับท่อความร้อนแบบสั่นเพิ่มขึ้นพบว่าปรากฏการณ์การท่วมเริ่มเกิดขึ้นตาม โดยที่ตำแหน่งที่เกิดปรากฏการณ์การท่วมนั้นจะอยู่ที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหยเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อท่อความร้อนได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นปรากฏการณ์การท่วมจะทำให้เกิดการแห้งขึ้น โดยจะเริ่มเกิดที่ตำแหน่งที่เกิดการท่วมแล้วขยายตัวลงมายังด้านล่างของส่วนทำระเหย ทำให้เกิดเป็น Dry patch และเห็นได้อย่างชัดเจน ค่าการส่งถ่ายความร้อนที่วัดได้นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเกิดการแห้งขึ้นอย่างถาวร โดยค่าการส่งถ่ายความร้อนเป็นเพียงแนวโน้มเท่านั้น เนื่องจากในการทดลองนั้นส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่นของชุดทดสอบท่อความร้อนไม่ได้หุ้มฉนวนไว้ เพราะว่าต้องการความชัดเจนในการดูปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อความร้อน และอุณหภูมิส่วนกันความร้อนนั้นไม่สามารถที่จะควบคุมให้คงที่ได้ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดลองต้องเพิ่มอุณหภูมิของท่อความร้อนจนถึงสภาวะวิกฤต สาเหตุของการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด เกิดจากปรากฏการณ์การท่วม โดยเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าส่วนทำระเหย เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองและสมการสหสัมพันธ์ พบว่าสอดคล้องกัน จึงยืนยันว่า สมการสหสัมพันธ์ที่ได้มานั้นถูกต้อง ท้ายสุดคณะผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์พื้นฐานเพื่อทำนายสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB โดยคาดหมายว่าจะสามารถสร้างแบบจำลองที่จะทำนายขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบนี้ได้ในโครงการระยะต่อไป

## Abstract

**TE 159884**

Performance limit, which is a state at which heat cannot be transferred with isothermal operation condition), of a closed-end oscillating heat pipe (CEOHP) has been thoroughly studied in this research. Utilizing the CEOHPs with temperature of evaporator section higher than this state certianly results in tremendous increase of thermal resistance and deterioration of CEOHP's container. Capability of prediction for such limit will be beneficial for all CEOHP designers and users. The research can be mainly divided into 2 parts: quantitative experiment and quanlitative experiment. The quantitative part focuses on systematic experiments of effects of all involved parameters, e.g. size of capillary tube, evaportor length, number of meandering turns, working fluid properties, inclination anlges etc., on the critical heat flux (Qc) of performance limit. After a long period of isothermal condition, the limit can be identified as the point just before the immediate jump of local temperature of evaporator section. Three values of each parameters are employed in the experiments with one of which must be a pivotal value. It is found from the experiments that, at vertical position, aspect ratio deeply affects Qc such that increasing the aspect ratio results in drastic decrease of Qc. Effect of capillary size is, the higher the capillary size, the dramatic increase of Qc can be reallized provided that it is less that the critical size of CEOHP. Working fluid properties also affect Qc. The higher the number of meandering turns, Qc slowly decreases. Taking care of all concerned parameters with the hypothesis of flooding phenomenon in mind, the correlation to predict such performance limit has been successfully established based on the dimensionless principle.

$$Ku_{90} = 0.00133 \frac{1}{Bo^{0.645}} Pr^{2.958} Ja^{0.845} \left[ 1 + \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.25} \right]^{7.630} \left( \frac{Le}{Di} \right)^{-1.003}$$

The latter part of this research aims to qualitatively study the effect of all concerned parameters on internal flow pattern of the CEOHP in order to explain why such limit occurs and prove validity of the achieved correlation. Internal phenomena at critical state are also clarified. From all obtained results, it could be concluded as follows; when more heat is supplied into CEOHP, mean velocity of vapor bubble movement increases, however, mean length of vapor bubble decreases. Internal flow pattern changes from only slug flow at isothermal condition to combination of slug flow with bubbly flow at critical state. The frequency of bubble movement with its amplitude increase resulting in higher heat flux. At higher heat flux, the flooding phenomenon intermittently occurs at the entrance of evaporator section. If more heat is supplied into the CEOHP, flooding permanently occurs with dryout at the point just below flooding phenomenon. The dryout will develop to dry patch expanding to the lower part of evaporator. Heat flux tends to decrease after dry patch is observed but it cannot be exactly monitored due to the insulation constraint of this qualitative experiment. Flooding is clearly identified as a cause of critical state in CEOHP. This supports the validity of established correlation which based on the flooding scenario. Finally the research team has proposed the basic mathematical model to predict heta transfer characteristics of the CEOHP based on the equations of conservation of mass, energy and momentum using the MATLAB program. The model to correctly predict the performance limit is also one of ultimate goal of our team to reach in very mear future.