Thesis Title Performance Limit of Closed-Loop Pulsating Heat Pipe

Author Mr. Niti Kammuang-lue

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Prof. Dr. Pradit Terdtoon	Chairperson
Asst.Prof. Dr. Patrapon Kamonpet	Member
Asst.Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan	Member

ABSTRACT

The objectives of this study are as follows: to study the heat transfer characteristics of a closed-loop pulsating heat pipe (CLPHP) at maximum heat flux state (MHF state); to study the internal flow patterns of a closed-loop pulsating heat pipe at maximum heat flux state, at which the heat pipe cannot transfer heat properly; and finally to analyze the study results together in order to establish a mathematical model predicting the maximum heat flux and the maximum heat flux state of the closed-loop pulsating heat pipe. The study was divided into two parts. First, a quantitative experiment, with the tested CLPHP made of a long copper capillary tube, which focused on the precise heat flux at any operational state. Second, a qualitative experiment, with the tested CLPHP made of a long transparent high temperature glass capillary tube, which focused on the phenomena inside the tube at any operational state. Variables such as evaporator section length, number of meandering turns, internal diameter and working fluid type were experimentally varied. It can be concluded from the study that the CLPHP reaches the MHF state due to dry-out of the liquid film at the evaporator section. However, this occurs due to different causes according to an orientation of the CLPHP. In a case of a vertical CLPHP, the dry-out occurs because the vapour velocity is higher than the critical value, thus the heat transfer mechanism consequently changes from counter-current slug-train to co-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

current annular flow. In the case of a horizontal CLPHP, the dry-out occurs because the lower surface tension at high temperature associates with the gravitational force domination, thus, the internal flow pattern changes from slug-train to stratified flow. In addition, it was found that, although the above mentioned variables do not affect to the cause of the MHF state, they do affect the performance limit of the CLPHP. When number of meandering turns, the internal diameter or the latent heat of evaporation increases, the maximum heat flux increases. On the contrary, when the evaporator section length increases, the maximum heat flux decreases. Both parts of the study can be analyzed together in order to establish the mathematical model in a correlation form to predict the maximum heat flux of the vertical and horizontal CLPHP as follows:

$$Ku_{max,90} = 6.2490\left(CGV\right)^{0.3377}\left(\frac{L_e}{D_i}\right)^{-0.9051}\left(\frac{L_t}{L_e}\right)^{-0.2607}$$

and

$$Ku_{max,0} = 0.004849\left(Bo\right)^{0.5696}\left(Ja\right)^{-0.1396}\left(\frac{L_e}{D_i}\right)^{-1.5341}\left(\frac{L_t}{L_e}\right)^{1.3733}$$

respectively.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ผู้เขียน นายนิติ คำเมืองลือ

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศ.ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล ประธานกรรมการ
ผศ.ดร. ภัทราพร กมลเพ็ชร กรรมการ
ผศ.ดร. ธีระพงษ์ ว่องรัตนะไพศาล กรรมการ

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่สภาวะความหนาแน่นความร้อนสูงสุด ตลอดจนศึกษารูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่สภาวะความหนาแน่นความร้อนสูงสุดซึ่งทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบไม่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยปรกติ นอกจากนี้ยังนำผลที่ได้รับจากการศึกษาดังกล่าวมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนายค่าความหนาแน่นความร้อนสูงสุดและสภาวะความหนาแน่นความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยแบ่งการศึกษาเชิงการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการทดลองเชิงปริมาณโดยใช้ท่อคาปิลลารี่ทองแดง และศึกษาค่าความหนาแน่นความร้อนที่สภาวะต่างๆ อย่างแม่นยำ ส่วนที่สองคือการทดลองเชิงคุณภาพ โดยใช้ท่อคาปิลลารี่แก้วทนความร้อน และศึกษาปรากฏการณ์ภายในท่อที่สภาวะต่างๆ ทำการแปรเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน และชนิดสารทำงาน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า สภาวะความหนาแน่นความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเกิดขึ้นเนื่องจากการแห้งของฟิล์มของเหลวที่ส่วนทำระเหย โดยมีสาเหตุที่ต่างกันไปตามแนวการวางตัวของท่อ กรณีท่อความร้อนวางตัวในแนวดิ่ง การแห้งเกิดขึ้นจากความเร็วฟองไอสูงจนเกินค่าวิกฤตค่าหนึ่ง ทำให้กลไกการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนจากการไหลแบบก้อนสวนทางไปเป็นการไหลแบบวงแหวนร่วมทิศทาง ส่วนกรณีท่อความร้อนวางตัวในแนวนอน การแห้งเกิดจากแรงตึงผิวลดลงที่อุณหภูมิสูงประกอบกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่มีบทบาทมาก ทำให้รูปแบบการไหลภายในเปลี่ยนจากการไหลแบบก้อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ไปเป็นการไหลแบบแยกชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าแม้ตัวแปรดังกล่าวจะไม่ส่งผลต่อสาเหตุการเกิดสภาวะความหนาแน่นความร้อนสูงสุด แต่ก็ส่งผลต่อขีดจำกัดสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ คือเมื่อจำนวนโค้งเลี้ยว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน หรือค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนสูงสุดเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความยาวส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นความร้อนสูงสุดลดลง จากผลการศึกษาทั้งสองส่วนสามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการทำนายค่าความหนาแน่นความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่วางตัวในแนวดิ่งและแนวนอนดังสมการ

$$\mathrm{Ku}_{\max,90} = 6.2490\left(\mathrm{CGV}\right)^{0.3377}\left(\frac{\mathrm{L_e}}{\mathrm{D_i}}\right)^{-0.9051}\left(\frac{\mathrm{L_t}}{\mathrm{L_e}}\right)^{-0.2607}$$

และ

$$\mathrm{Ku}_{\max,0} = 0.004849\left(\mathrm{Bo}\right)^{0.5696}\left(\mathrm{Ja}\right)^{-0.1396}\left(\frac{\mathrm{L_e}}{\mathrm{D_i}}\right)^{-1.5341}\left(\frac{\mathrm{L_t}}{\mathrm{L_e}}\right)^{1.3733}$$

ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved