ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246378

MRG5180325 ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ลักษณะเฉพาะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ : การปรับปรุงโครงสร้างและจำลองสภาพ

โดย

ดร.พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

กรกฎาคม 2553

b00 251188
246378
ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246378

สัญญาเลขที่ MRG5180325

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ลักษณะเฉพาะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ : การปรับปรุงโครงสร้างและจำลองสภาพ

ดร.พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ให้กับผู้วิจัย

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ศาสตราจารย์ ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล ที่ปรึกษาโครงการที่มอบความรู้และให้คำปรึกษาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ บุคลากรและนักศึกษา ห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน คณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ช่วยสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขออภัยในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และหวังว่ารายงานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจต่อไป

พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นายพฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

ตำแหน่ง อาจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์ (053) 944144 ต่อ 122 โทรสาร (053) 226014

E-mail: phrut@chaiangmai.ac.th

ที่ปรึกษาโครงการ

นายประดิษฐ์ เทอดทูล

ตำแหน่ง ศาสตราจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200

โทรศัพท์ (053) 944144 ต่อ 911 โทรสาร (053) 226014

E-mail: pradit@eng.cmu.ac.th

รหัสโครงการ MRG5180325

ชื่อโครงการ ลักษณะเฉพาะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ: การปรับปรุงโครงสร้างและจำลองสภาพ

ชื่อนักวิจัย ดร.พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

phrut@chaiangmai.ac.th

ระยะเวลาโครงการ 2 ปี ตั้งแต่ วันที่ 15 พฤษภาคม 2551 ถึง 14 พฤษภาคม 2553

บทคัดย่อ

246378

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองลักษณะเฉพาะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่สามารถควบคุมทิศทางการไหลได้ด้วยตัวมันเอง ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ถูกสร้างขึ้นจากท่อคาปิลารี่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 2 ค่า สลับไปมาตลอดความยาวของท่อความร้อน มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่คาดว่าจะมีผลต่อค่าการส่งถ่ายความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเลี้ยว ชนิดของสารทำงาน สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง และสัดส่วนความยาวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ ให้ความร้อนในส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ด้วยซิลิโคน และระบายความร้อนออกด้วยของผสม น้ำและเอทิลีนไกลคอน ในสัดส่วน 1:1 เก็บค่าอุณหภูมิที่ผิวท่อส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น เพื่อศึกษาทิศทางการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อน บันทึกอุณหภูมิและอัตราการไหลของของไหลหล่อเย็นขาเข้าและขาออกส่วนควบแน่นเพื่อคำนวณค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ เริ่มทำการทดลองโดยป้อนความร้อนให้กับส่วนทำระเหย แล้วทำการบันทึกอุณหภูมิทุกตำแหน่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สร้างขึ้นจากสมการควบคุมที่ประกอบด้วย กฎทรงมวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน มีการใส่เงื่อนไขที่ขอบและเงื่อนไขทางกายภาพที่อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา แบ่งของไหลภายในท่อความร้อนเป็น 3 ชนิด คือ ฟองไอ แท่งของเหลว และฟิล์มของเหลว ใช้สมมุติฐานที่ว่าความดันสูญเสียในช่วงโค้งเลี้ยวมีค่าน้อยมาก ของเหลวไม่อัดตัว และก๊าซมีพฤติกรรมเป็นก๊าซในอุดมคติ แก้สมการด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยวิธี Finite difference แบบ Explicit และ Implicit คำตอบที่ได้แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองไอและแท่งของเหลว และค่าการส่งถ่ายความร้อน

246378

จากการทดลองพบว่าสามารถควบคุมทิศทางการไหลของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงกว่าค่าการส่งถ่ายความร้อนท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ เมื่อค่าสัดส่วนความยาวลดลงค่าการส่งถ่ายความร้อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันสูญเสียภายในระบบจากจุดเชื่อมต่อและจำนวนจุดเชื่อมต่อลดลง เมื่อใช้สารทำงานเป็น R123 ท่อความร้อนที่มีสัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.2 ให้ค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 20.85 kW/m^2 เพิ่มขึ้นจากท่อความร้อนสัดส่วนความยาวเท่ากับ 1 ที่มีค่าการส่งถ่ายความร้อน 15.49 kW/m^2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอจะมีค่าการส่งถ่ายความร้อนสูงเมื่อใช้สารทำงานเป็น R123 จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงที่สุด ตามด้วยสารทำงาน เอธานอล และน้ำ ตามลำดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ไม่สม่ำเสมอนี้ทำให้สารทำงานภายในไหลเวียนในทิศทางเดียวโดยฟองไอเคลื่อนสู่ส่วนควบแน่นในท่อขนาดใหญ่และของเหลวควบแน่นไหลกลับส่วนทำระเหยในท่อขนาดเล็ก

ผลการคำนวณจากแบบจำลองพบว่า แบบจำลองสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของฟองไอและแท่งของเหลวสอดคล้องกับนิยามการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ พบแท่งของเหลวปริมาณมากที่ส่วนควบแน่น นอกจากนี้ ค่าการส่งถ่ายความร้อนจากแบบจำลองทำนายได้ดีพอใช้เมื่อเทียบกับข้อมูลการทดลอง คือมีค่าความแตกต่างประมาณ $\pm$ 32.49 เปอร์เซ็นต์

Project Code MRG5180325

Project Title Thermal Characteristics of a Closed-Loop Oscillating Heat Pipe: Configuration-Improved and Simulation

Investigator Dr.Phrut Sakulchangsatjatai

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University

phrut@chaiangmai.ac.th

Project Period 2 year from 15 May 2008 to 14 May 2010

Abstract

246378

The objective of this research is to experimental study in the heat transfer characteristics of closed-loop oscillating heat pipe (CLOHP) which control the flow direction of working fluid by itself. Closed-loop oscillating heat pipe with non-uniform diameter (CLOHP/NUD) consists of alternative of two different capillary diameters through the pipe length. The effect of temperature, number of turn, type of working fluid, diameter ratio and length ratio on the heat transfer will be studied. The evaporator section of CLOHP/NUD is heated by hot silicone oil. The condenser section of CLOHP/NUD is cooled by mixture of water and ethylene glycol at 1:1 by volume. The evaporator, adiabatic and condenser temperatures will be recorded to observe the direction of working fluid inside CLOHP/NUD. The temperature and mass flow rate of cooling media at inlet and outlet condenser section will be recorded to calculate the heat transfer. The experimental process is started by supplying the silicone oil at evaporator section, then the temperature at all position will be recorded when the system reach the steady state.

The mathematical model is established from governing equation, which consists of continuity equation, momentum equation and conservation of energy. The boundary and physical conditions from the previous study will be used. The domain of working fluid inside the CLOHP/NUD is divided to three parts; they are vapor plug, liquid slug and liquid film. Three assumptions of the modeling are; the pressure drop at the bend is small, the liquid is non-compressed and perfect gas is included. Solution for all of basic governing equations has been determined by the explicit finite element method except the solution of momentum equation of liquid slugs was obtained by implicit finite

246378

element method. The result of the simulation program shows the vapor and liquid flow patterns and the heat transfer rate.

From the experimental results, it was found that the circulation of working fluid inside CLOHP/NUD can be controlled; result in the heat transfer rate of CLOHP/NUD has higher than conventional CLOHP. The heat transfer rate will increase when the length ratio decrease; due to the pressure drop of the connecting point and the number of connected point was small. The maximum heat flux was 20.85 kW/m^2 at 0.2 of the length ratio and the working fluid as R123. While, at 1.0 of the length ratio had only 15.49 kW/m^2 heat transfer rate. Heat transfer of CLOHP/NUD with R123 as working fluid had higher than ethanol and water. The non-uniform diameter of CLOHP causes of the one direction circulation. The vapor flow to the condenser in the bigger tube and the liquid will flow backward to the evaporator section in the small tube.

The modeling result shows the pattern of vapor and liquid movement consistent with the definition of conventional CLOHP. The numerous liquid slugs were found at the condenser section. The heat transfer rate from the model was 32.49 % different from the experimental result.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	i
คณะผู้วิจัย	ii
บทคัดย่อ	iii
Abstract	v
สารบัญเรื่อง	vii
สารบัญตาราง	x
สารบัญภาพ	xi
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	xvi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	15
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	15
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	16
2.1 แผนการดำเนินการ	16
2.2 ตัวแปรในการทดสอบ	16
2.3 ชุดทดสอบ	17
2.4 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด	19
2.5 ขั้นตอนการทดสอบ	22
2.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ	26

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ผลการทดลอง 28

3.1 ผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ 28

3.2 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีต่อฟลักซ์ความร้อน 31

3.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่มีต่อฟลักซ์ความร้อน 35

3.4 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ความร้อน 38

3.5 ผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 39

3.6 ผลของสัดส่วนการเติมสารทำงาน 47

3.7 ผลของสัดส่วนความยาว 49

3.8 ผลของมุมเอียง 55

บทที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 60

4.1 สมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลอง 60

4.2 สมการควบคุมพื้นฐาน 60

4.3 สมการอื่นๆ 66

4.4 ขั้นตอนการแก้สมการ 68

4.5 โครงสร้างแบบจำลอง 70

4.6 รายละเอียดของโครงสร้างโปรแกรม 70

4.7 หลักการทำงาน 78

4.8 รายละเอียดโปรแกรม 81

บทที่ 5 ผลการคำนวณจากแบบจำลอง 84

5.1 ภาพรวมหลักการจำลองสภาพการทำงานของแบบจำลอง 84

5.2 การแสดงลักษณะสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่น 85

5.3 ค่าการส่งถ่ายความร้อน 91

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	93
6.1 ผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง	93
6.2 ผลของสารทำงาน	93
6.3 ผลของสัดส่วนการเติม	94
6.4 ผลของสัดส่วนเส้นความยาว	94
6.5 ผลของมุมเอียงการทำงาน	94
6.6 แบบจำลองทางคณิตศาตร์	94
6.7 ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง	96
ภาคผนวก ก	100
ภาคผนวก ข	106
ภาคผนวก ค	108

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่และค่าไอเจ้นของอนุกรม Graetz 67

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ประเภทของท่อความร้อน (ก) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (ข) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (ค) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ 3

รูปที่ 1.2 การเกิดฟองไอสลับกับก้อนของเหลวในท่อคาปิลลารี่ (Maezawa *et al.*, 1995) 4

รูปที่ 1.3 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่โครงสร้างต่างๆ (Shi Liu *et al.*, 2007) 8

รูปที่ 1.4 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ (Haizhen xian *et al.*, 2007) 8

รูปที่ 1.5 แบบจำลองในหนึ่งมิติของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิด (Dobson *et al.*, 1999) 9

รูปที่ 1.6 รูปร่างของท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิดตามแบบจำลองของ Dobson (Dobson *et al.*, 1999) 10

รูปที่ 1.7 แท่งของเหลวและฟองไอในแบบจำลองหนึ่งมิติของท่อความร้อน แบบสั่นปลายเปิด (Dobson *et al.*, 1999) 10

รูปที่ 1.8 แบบจำลองในหนึ่งมิติของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Dobson *et al.*, 1999) 11

รูปที่ 1.9 สัญลักษณ์ต่างๆ ของ Slug-train (Wong *et al.*, 1999) 12

รูปที่ 1.10 ภาพขยายแท่งของเหลวและฟองไอของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Wong *et al.*, 1999) 12

รูปที่ 1.11 การกำหนดตำแหน่งฟองไอและแท่งของเหลว (Shafii *et al.*, 2001) 14

รูปที่ 2.1 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดกล่องให้ความร้อนและกล่องทำเย็น 17

รูปที่ 2.2 แท่นติดตั้งและชุดทดสอบท่อความร้อน 18

รูปที่ 2.3 อ่างทำความร้อน 19

รูปที่ 2.4 เครื่องทำเย็นน้ำหล่อเย็น 19

รูปที่ 2.5 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) 20

รูปที่ 2.6 เทอร์โมคัปเปิล 20

รูปที่ 2.7 ชุดเติมสารทำงาน 21

รูปที่ 2.8 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด 21

รูปที่ 2.9 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ 22

รูปที่ 2.10 จุดติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล (ตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple) 23

รูปที่ 2.11 ลักษณะการติดตั้งชุดทดสอบและอุปกรณ์ต่าง ๆ 23

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.12 อุณหภูมิส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ที่สัดส่วนความยาว 0.33 สารทำงาน R123 มุมเอียง 90 องศา ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัว 24

รูปที่ 2.13 อุณหภูมิส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น ที่ผิวท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ที่สัดส่วนความยาว 0.33 สารทำงาน R123 มุมเอียง 90 องศา ที่สภาวะคงตัว 25

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.91 จำนวน 30 โค้งเลี้ยว 28

รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร จำนวน 30 โค้งเลี้ยว 29

รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าฟลักซ์ความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร จำนวน 30 โค้งเลี้ยว 29

รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ ที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 31

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.91 อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 32

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 1.06 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 33

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโค้งเลี้ยวและค่าฟลักซ์ความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 2.03 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 33

รูปที่ 3.8 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อน จำนวน 5 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 35

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อน จำนวน 15 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 36

รูปที่ 3.10 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและค่าฟลักซ์ความร้อนจำนวน 30 โค้งเลี้ยว ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C 37

รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและฟลักซ์ความร้อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 100 °C ของ ที่สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.91 จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว 39

รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 0.71 และ 1.06 มิลลิเมตร กับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่มีค่าสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 41

รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่ 0.71 มิลลิเมตรกับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ 42

รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในคงที่1.06 มิลลิเมตรกับท่อความร้อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 มิลลิเมตร จำนวน 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 ที่สัดส่วนการเติมสารทำงาน 50 เปอร์เซ็นต์ 43

รูปที่ 3.15 ผลของสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จำนวนโค้งเลี้ยว 15 โค้งเลี้ยว สารทำงาน R123 มุมการทำงาน 90 องศาจากแนวระดับ 44

รูปที่ 3.16 อุณหภูมิที่วัดได้ของสารทำงานภายในที่ส่วนกันความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น 45

รูปที่ 3.17 ลักษณะของการไหลเวียนของสารทำงานภายในของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ 46

รูปที่ 3.18 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.49 47

รูปที่ 3.19 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.92 47

รูปที่ 3.20 ผลของสัดส่วนการเติมชุดที่มีสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.86 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.21 ผลของค่าสัดส่วนความยาวต่อค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ที่แต่ละโค้งเลี้ยวมีท่อ 2.03 mm และ 1.06 mm 50

รูปที่ 3.22 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ ชุดที่ 2 51

รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอที่ สารทำงาน R123 ที่มุมเอียง 90^{o} 52

รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ สารทำงานเป็นน้ำ ที่มุมเอียง 90^{o} 53

รูปที่ 3.25 แสดงอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่สม่ำเสมอ สัดส่วนยาวเท่ากับ 0.2 สารทำงาน น้ำ มุมเอียง 90^{o} 54

รูปที่ 3.26 มุมเอียงต่อค่าการถ่ายเความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาว 0.3 55

รูปที่ 3.27 แสดงอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 0.33 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น R123 56

รูปที่ 3.28 แสดงอุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่า 0.2 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น R123 สภาวะคงที่ 57

รูปที่ 3.29 อุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่า 0.2 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น น้ำ สภาวะคงที่ 57

รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนความยาวและค่าการส่งถ่ายความร้อน มุมเอียง 0^{o} สารทำงาน R123 เอทานอล และ น้ำ 58

รูปที่ 3.31 แสดงอุณหภูมิท่อความร้อนแบบสั่นที่สัดส่วนความยาวเท่ากับ 3 มุมเอียง 0^{o} สารทำงานเป็น น้ำ สภาวะคงที่ 59

รูปที่ 4.1 หน้าสัมผัสฟองไอ 62

รูปที่ 4.2 กายภาพสารทำงานในท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด 64

รูปที่ 4.3 แบบจำลองท่อความร้อนแบบสั่น 69

รูปที่ 4.4 ผังหลักของโปรแกรม 73

รูปที่ 4.5 ผังย่อย (1) การคำนวณความยาวฟองไอ แท่งของเหลว ส่วนทำระเหย ส่วนกันความร้อน และส่วนควบแน่น 74

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 ผังย่อย (2) การคำนวณค่าคุณสมบัติสารทำงาน 75
รูปที่ 4.7 ผังย่อย (3) การคำนวณมวล ความเร็วของเหลว อุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อน ฟองไอ 76
รูปที่ 4.8 ผังย่อย (4) การคำนวณอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของแท่งของเหลว 77
รูปที่ 5.1 ของไหลภายในท่อความร้อนแบบสั่น ช่วงเริ่มต้นให้ความร้อน 87
รูปที่ 5.2 ของไหลภายในท่อความร้อนแบบสั่นที่สภาวะคงที่ 90
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนจากแบบจำลองกับการทดลอง 91
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนจากแบบจำลองที่ปรับแก้ค่ากับข้อมูลการทดลอง 92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	m^2
Bo	ตัวเลขบอนด์	
C_f	สัมประสิทธิ์ความฝืด	
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ (ความดันคงที่)	J/kg.K
c_v	ความจุความร้อนจำเพาะ (ปริมาตรคงที่)	J/kg.K
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
f	สัมประสิทธิ์ความฝืด	
F	แรง	N
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h	เอนทาลปี	J/kg
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	J/kg.K
Ja	ตัวเลขจาคอป	
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m.K
Ku	ตัวเลขของคูทาเทลาดเซ	
Le	ความยาวส่วนทำระเหย	m
m	มวล	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
n	โค้งเลี้ยว	turns
N	โค้งเลี้ยว	turns
Nu	ตัวเลข*นัสเซลต์*	
P	ความดัน	Pa
Pr	ตัวเลขแพรนด์เทิล	
q	ฟลักซ์ความร้อน	W/m^2
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
R	ความต้านทานความร้อน	K/W
R	แรง	N
R	ค่าคงที่ของแก๊ส	J/kg.K

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์	
T	อุณหภูมิ	^{o}C
u	พลังงานภายในจำเพาะ	J/kg
u	พลังงานภายใน	J
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	W/m^2K
v	ความเร็ว	m/s
V	ปริมาตร	m^3
x	ระยะทาง	m

ตัวอักษรกรีก

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
α	การแผ่ความร้อน	m^2/s
β	มุมเอียง	degree
δ	ความหนาฟิล์ม	m
Δ	ผลต่าง	
λ	แอมปิจูล	
μ	ความหนืด	kg/m.s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
σ	แรงตึงผิว	N/m
τ	ความเค้นเฉือน	N/m^2
ω	ความถี่	Hz

ตัวกำกับล่าง

สัญลักษณ์	ความหมาย
i	ดัชนี
new	เวลาใหม่
a	ส่วนกันความร้อน
c	ส่วนควบแน่น
e	ส่วนทำระเหย
exp	การทดลอง
f	ฟิล์ม
i	ขาเข้า
i	ภายใน
j	ตำแหน่งฟองไอ
ℓ	ของเหลว
l	ของเหลว
L	ของเหลว
le	ตำแหน่งด้านซ้าย
max	สูงสุด
o	ด้านนอก
p	แท่งของเหลว
s	สิ่งแวดล้อม
re	ตำแหน่งด้านขวา
t	ท่อ
v	ฟองไอ
w	ผนังท่อ