สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพประกอบ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุน	4
2.1.1 ผลของอัตราส่วนการเติมที่มีการถ่ายเทความร้อน	4
2.1.2 ผลของความเร็วการหมุนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน	4
2.1.3 ผลของอุณหภูมิการทำงานที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน	5
2.1.4 ผลของอัตราส่วนสนทัดการทำงานที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน	8
2.2 การศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน ที่ใช้สารที่ไม่มี CFCs	9
3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	11
4 ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาวิจัย	11
5 ขอบเขตของงานวิจัย	11
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	14
2.1 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน	14
2.2 แบบจำลองการทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน	18
2.3 หลักการและทฤษฎีท่อความร้อนแบบหมุน	20
2.3.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบหมุนทั่วไป	20
2.3.2 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี	23
2.4 ตัวแปรไร้มิติ	28

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University

บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง 31
3.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง 31
3.2 ตัวแปรในการทดลอง 31
3.3 อุปกรณ์การทดลอง 31
3.4 วิธีการทดลอง 39
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง 39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 41
4.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน 41
4.1.1 ผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน 41
4.1.2 ผลของอัตราส่วนสนทัดที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน 41
4.1.3 ผลของขนาดท่อที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน 46
4.1.4 ผลของความเร็วรอบการหมุนที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อน 50
4.2 ผลของตัวแปรไร้มิติต่างที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน 53
4.2.1 ผลของตัวเลขเวเบอร์ 53
4.2.2 ผลของตัวเลขฟรูด 54
4.2.3 ผลของตัวเลขบอนด์ 54
4.2.4 ผลของตัวเลขแพรนตัน 55
4.2.5 ผลของตัวเลขดูทาเทลาดเซ 56
4.2.6 ผลของตัวแปรไร้มิติ Heat flux 57
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ 64
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย 64
5.2 ข้อเสนอแนะ 65
บรรณานุกรม 66

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง 68
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดลอง 101
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติของสารทำงาน HP62 และ MP39 118

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบัญภาพประกอบ

รูป	หน้า
1.1 รูปท่อความร้อนแบบหมุน	3
1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น	5
1.3 ความสัมพันธ์ระว่างความเร็วรอบการหมุนกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือด	6
1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่น	6
1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา	7
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางและอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่มุมเอียง 0 องศา	7
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา	8
1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 0 องศา	9
1.9 ผลของมุมเอียงที่มีต่อค่า Q/Q90 และ R/R90 ของท่อความร้อนที่ใช้ MP39 และ HP62 เป็นสารทำงาน12	10
1.10 การติดตั้งท่อที่ตำแหน่งมุมเอียง 0 องศา	12
1.11 การติดตั้งท่อที่ตำแหน่งมุมเอียง 90 องศา	12
2.1 แสดงความต้านทานในส่วนต่าง ๆที่เกิดในท่อความร้อน	15
2.2 แสดงแบบจำลองที่ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายใน	20
2.3 พิกัดการหมุนและองค์ประกอบความเร็วในระบบที่หมุนรอบแกนด้วยความเร็ว ω	22
2.4 ท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี	23
2.5 ปรากฏการณ์ของตัวเลขเวเบอร์	28
2.6 ปรากฏการณ์ของตัวเลขฟรูด	29
2.5 ปรากฏการณ์ของตัวเลขบอนด์	30
3.1 ท่อทดสอบ	32

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.2 ตำแหน่งการติดเทอร์โมคัปเปิ้ล	32
3.3 การติดตั้งขดลวดความร้อนกับท่อความร้อน	33
3.4 การติดตั้งฉนวน	33
3.5 มัลติมิเตอร์	34
3.6 แท่นและอุปกรณ์ทดลอบ	34
3.7 ชุดปรับมุมเอียง	35
3.8 สารทำงาน	35
3.9 ชุดเติมสาร	36
3.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก	36
3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิ	37
3.12 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล	37
3.13 สลิปริงค์	38
3.14 เครื่องวัดความเร็วรอบ	38
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน	41
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	42
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียงใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ที่มุมเอียง 90 องศา (q/q_{90})	43
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัด (Le/d) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน	44
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัด (Le/d) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมีที่ใช้ MP62 เป็นสารทำงาน	45
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสนทัดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัดใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราส่วนสนทัด 20 (q/q_{20})	46
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี ที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน	47

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างผลของตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนตามแนวรัศมี ที่ใช้ MP39 เป็นสารทำงาน 48

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในกับอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50.4 mm ($q/q_{50.4}$) 49

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนที่ใช้ HP62 เป็นสารทำงาน 50

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบหมุนที่ใช้ MP62 เป็นสารทำงาน 51

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางกับอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนซึ่งทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางใด ๆ ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ความเร็วรอบการหมุนที่เท่ากับ 7g (q/q_{7g}) 52

4.13 ความสันพันธ์ระหว่างตัวเลขของเวเบอร์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 53

4.14 ความสันพันธ์ระหว่างตัวเลขของฟรูดกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 54

4.15 ความสันพันธ์ระหว่างตัวเลขของบอนด์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 55

4.16 ความสันพันธ์ระหว่างตัวเลขของแพรนดันกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 56

4.17 ความสันพันธ์ระหว่างตัวเลขของคูทาเทลาดเซกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 57

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติของ Heat flux (q^*) กับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มุมเอียง 90 องศา 57

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาค่าได้ต่อค่า q^* ที่มุมเอียง 90 องศา 60
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณจาก สมการ 4.2 กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง 61
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่หาค่าได้ต่อค่า q^* ที่มุมเอียง 0 องศา 62
4.22 ความสันพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณใน สมการ 4.3 ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จาก การทดลอง 63

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่รับความร้อน	m^2
Bo	ตัวเลขของบอนด์ (Bond number, $Bo = d\left[g\left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\sigma}\right)\right]^{1/2}$)	
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะของสารทำงาน	J/kg K
Ek	ตัวเลขของเอ็กมาน (Ekman number, $Ek = \frac{\upsilon}{\omega D^2}$)	
d	เส้นผ่านศูนย์กลางการหมุน	m
Fr	ตัวเลขของฟรูด (Froude number, $Fr = \frac{V^2}{gl}$)	
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	kJ/kg.K
I	กระแสไฟฟ้า	Amp
Ja	ตัวเลขของจาคอบ (Jakob mumber, $Ja = \frac{C_p\theta}{h_{fg}}$)	
k	ค่าการนำความร้อนของฉนวน	W/m K
Ku	ตัวเลขของคูทาเทลาดเซ (Kutateledze number, $Ku = \frac{q_e}{\rho_v h_{fg}\left[\sigma g\left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v^2}\right)\right]^{1/4}}$)	
L	ความยาวท่อ	m
Nu	ตัวเลขของนัทเซล (Nusselt number, $Nu_l = \frac{ql}{\theta\lambda}$)	
P	ความดัน	N/m^2
Pr	ตัวเลขของแพรนตัน (Prandtl number, $Pr = \frac{C_p\mu}{k}$)	
q*	ตัวแปรไร้มิติ Heat flux(Dimensionless heat flux, $q^* = \frac{q}{g\mu}$)	
Q	ค่าการถ่ายเทความร้อน	W
R	รัศมีการหมุน	m
T_c	อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น	°C

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

T_e	อุณหภูมิที่ส่วนระเหย	°C
T_s	อุณหภูมิที่ฉนวน	°C
T_a	อุณหภูมิที่ส่วน Adiabatic	°C
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น	°C
V	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	Volt
V	ความเร็วของไหล	m/s
We	ตัวเลขของเวเบอร์ (Weber number, $We = \frac{\rho V^2 l}{\sigma}$)	
Z	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว	kg/m^3
ρ_g	ความหนาแน่นของของไอ	kg/m^3
σ	แรงตึงผิว	N/m
μ	ค่าความหนืดของของไหล	Pa.s
ω	ความเร็วรอบการหมุน	rpm
ν	ค่าความหนืดจลน์	m^2/s

ตัวกับกับล่าง

c	ส่วนควบแน่น	
e	ส่วนทำระเหย	
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง	
i	ส่วนภายใน	
l	ของเหลว	
L	ความยาวตามแนวแกน	
o	ภายนอก	
s	ฉนวน	
v	ไอ	
x	ความหนา	
0	มุมเอียง	องศา
90	มุมอียง	องศา

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University