

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 สารสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	11
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	11
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	
2.1 หลักการทำงานของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน	12
2.2 ความต้านทานความร้อนรวม (Overall thermal resistance)	13
2.3 ซีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน	16
2.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	20
2.5 การศึกษามุมเอียงของท่อความร้อน	22
2.6 การส่งผ่านคลื่นอุลตราโซนิกในตัวกลางของแข็งและของเหลว	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย	
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	27
3.2 วิธีดำเนินการศึกษา	33
3.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล	38

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลของคลื่นอุลตราโซนิกที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	42
4.2 ผลของอัตราส่วนการเติมสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	54
4.3 การวิเคราะห์หุ้มที่ทำต่อแนวระนาบของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน	55
4.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ค่าความต้านทานความร้อนกรณีมีอุลตราโซนิกประกอบ	57
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะแนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง	
5.1 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน	62
5.2 แบบจำลองค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการเดือดในท่อเทอร์โมไซฟอน	63
5.3 คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน	63
5.4 แนวทางการทำวิจัยต่อเนื่อง	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดลองและข้อมูลที่ใช้ในการนำเสนอกราฟ	68
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	84
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติทางความร้อนของท่อโลหะ และสารทำงาน	88
ภาคผนวก ง ผลงานวิชาการที่ได้เผยแพร่	95
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ค่าคงที่ของสารทำงานแต่ละชนิดในสมการที่ 1.14 และ 1.15	7
3.1	ตัวแปรและเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ	35
ก.1	ข้อมูลสำหรับรูป 4.1	69
ก.2	ข้อมูลสำหรับรูป 4.2 และ 4.3	69
ก.3	ข้อมูลสำหรับรูป 4.4 และ 4.6	70
ก.4	ข้อมูลสำหรับรูป 4.5	72
ก.5	ข้อมูลสำหรับรูป 4.6	73
ก.6	ข้อมูลสำหรับรูป 4.7	74
ก.7	ข้อมูลสำหรับรูป 4.8	75
ก.8	ข้อมูลสำหรับรูป 4.9	75
ก.9	ข้อมูลสำหรับรูป 4.10	75
ก.10	ข้อมูลสำหรับรูป 4.11	75
ก.11	ข้อมูลสำหรับรูป 4.12	76
ก.12	ข้อมูลสำหรับรูป 4.13	78
ก.13	ข้อมูลสำหรับรูป 4.14	80
ก.14	ข้อมูลสำหรับรูป 4.15	81
ก.15	ข้อมูลสำหรับรูป 4.16	82
ค.1	Thermophysical Properties of Copper	89
ค.2	Thermophysical Properties of Saturated Methanol	91
ค.3	Thermophysical Properties of Saturated Acetone	92
ค.4	Thermophysical Properties of Saturated Water	93
ค.5	ค่าคงที่ในตัวกลางของแข็งที่อุณหภูมิ 20°C	94
ค.6	ค่าคงที่ในตัวกลางของเหลวที่อุณหภูมิ 20°C	94

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
1.1	แบบจำลองที่ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน
1.2	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีการใช้และไม่ใช้ ติดคลื่นอัลตราโซนิก
2.1	หลักการทำงานอย่างง่ายของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน
2.2	แสดงวงจรความต้านทานความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอน
2.3	การแห้งเมื่อปริมาณการเติมสารทำงานน้อย
2.4	การแห้งเมื่อปริมาณการเติมสารทำงานมาก
2.5	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน
2.6	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานกัน
2.7	การส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
2.8	การตกกระทบของคลื่นอัลตราโซนิกในแนวตั้งฉากกับผิวของตัวกลาง
3.1	ลักษณะท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบ
3.2	ภาพถ่ายแสดงอุปกรณ์ควบคุมระบบอัลตราโซนิก
3.3	ภาพถ่ายระบบให้ความร้อน
3.4	ภาพถ่ายชุดระบบความเย็น
3.5	ภาพถ่ายเครื่องเก็บข้อมูลทดสอบ
3.6	ภาพถ่ายสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
3.7	ภาพถ่ายเครื่องวัดอัตราการไหล
3.8	ภาพถ่ายเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า
3.9	ภาพอุปกรณ์สำหรับการเติมสารทำงาน
3.10	ชุดทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนเมื่อมี ระบบอัลตราโซนิกประกอบ
3.11	แนวทางการทดลองและวิเคราะห์ผล

สารบัญภาพ (ต่อ)

4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงานที่อุณหภูมิ แหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50°C-80 °C ในกรณีที่ใช้น้ำ เมทานอล และอะซิโตน เป็นสารทำงาน	44
4.2	ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการ ทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานเมทานอล	46
4.3	ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการ ทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานอะซิโตน	46
4.4	ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการ ทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ กรณีไม่มีคลื่น อุลตราโซนิก	47
4.5	ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการ ทดลองกับค่าคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ กรณีมีคลื่น อุลตราโซนิก	48
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณีใช้เมทานอล เป็นสารทำงาน และความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ	49
4.7	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณีที่ใช้อะซิโตน เป็นสารทำงาน และความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ	49
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของการเดือดของสารทำงาน กรณีที่ใช้น้ำเป็น สารทำงาน และความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 0, 8, 10 และ 14 kHz ตามลำดับ	50
4.9	ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานเมทานอล และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10 และ 14 kHz	53
4.10	ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานอะซิโตน และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10 14 kHz	53
4.11	ค่าอัตราส่วนพลังงานกรณีสารทำงานน้ำ และคลื่นอุลตราโซนิกมีค่า 8, 10, 14 kHz	53
4.12	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิของแหล่งจ่ายความร้อนกรณีใช้น้ำ เป็นสารทำงาน ร้อยละการเพิ่มสารทำงานในส่วนทำระเหย 50% และ 100%	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

4.13	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50°C – 80°C ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ที่ปริมาตรการเติมสารทำงานส่วนทำระเหย 50% ของมุมเอียง 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ตามลำดับ (ก) ไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (ข) มีคลื่นอุลตราโซนิก	56
4.14	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิแหล่งจ่ายความร้อนระหว่าง 50°C – 80°C ในกรณีที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ที่ปริมาตรการเติมสารทำงานส่วนทำระเหย 100% ของมุมเอียง 18, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ตามลำดับ (ก) ไม่มีคลื่นอุลตราโซนิก (ข) มีคลื่นอุลตราโซนิก	57
4.15	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลองกับค่าคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้เมทานอลเป็นสารทำงาน	58
4.16	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลองกับค่าคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้อะซิโตนเป็นสารทำงาน	59
4.17	ค่าความต้านทานความร้อนภายในท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนจากการทดลองกับค่า ปรับปรุงการคำนวณตามทฤษฎีของ ESDU ของสารทำงานน้ำ	60
4.18	ค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในส่วนการทำระเหยของการทดลองกับค่าคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน	61
ค.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขบอนด์กับ f_1	89
ค.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับค่า f_3	90

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	m^2
C_0	ความเร็วที่อุณหภูมิเริ่มต้นของของเหลว Θ_0	m/s
C_p	ความจุความร้อนสารทำงาน	$kJ/kg.K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
E_p	ค่ายังโมดูลัส	Pa
F	อัตราส่วนการเพิ่มสารทำงานในส่วนรับความร้อน	
g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
G_s	ค่ายังโมดูลัสตามแนวขวาง	Pa
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.K$
k	ค่าการนำความร้อน	$W/m.K$
L	ความยาว	m
$LMTD$	อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก	
$\dot{m}$	อัตราการไหล	kg/s
n	ค่าคงที่	
P	ความดัน	Pa
q_{latent}	ค่าความร้อนแฝงกลายเป็นไอ	J/kg
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
q'	ฟลักซ์ความร้อน	W/m^2
Re	ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์	
T	อุณหภูมิ	K
U	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2.K$
v	ความเร็วของสารทำงาน	m/s
Z	ค่าความต้านทานความร้อน	K/W
β	มุมของท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอนที่ทำกับแนวระดับ	
$\bar{\beta}_{ad}$	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของการอัดตัว	Pa^{-1}
$\bar{\beta}_{is}$	ค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนคงที่ (Isothermal) ของการอัดตัว	Pa^{-1}

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
f	ความถี่ของคลื่นอุลตราโซนิก	kHz
σ	แรงตึงผิวของของเหลว	N/m
μ	ค่าความหนืดของของเหลว	N.s/m ²
ν	ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลว	Pa.s
η	อัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน	
ρ	ความหนาแน่นไอสารทำงาน	kg/m ³
ν	อัตราส่วนปัวซอง	
χ	อัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ $\frac{\bar{\beta}_{is}}{\bar{\beta}_{ad}}$	
γ	ค่าสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิสัมบูรณ์	m/s.K
$\ominus$	อุณหภูมิที่เวลาใดๆของของเหลว	K

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวกำกับล่าง

ความหมาย

a	ส่วนอะเดียเบติก
atm	สภาวะบรรยากาศ
c	ส่วนควบแน่น
e	ส่วนทำระเหย
i	ภายในท่อ
l	ของเหลว
max	ค่าสูงสุด
no,ul	ไม่มีระบบคลื่นอุลตราโซนิก
o	ภายนอกท่อ
s	ผิวท่อ
v	ไอ
w	ผนังท่อ
ul	มีระบบคลื่นอุลตราโซนิก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

All rights reserved