สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญภาพ	ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	25
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	25
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	25
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe)	27
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	
3.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง	35
3.2 ตัวแปรในการทดลอง	35
3.3 ชุดทดลอง	36
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด	38
3.5 วิธีการทดลอง	41

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้สารทำงาน MP39	44
4.2 ผลของสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ (กรณีเปรียบเทียบระหว่างสารทำงาน MP39 และสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b)	50
4.3 ผลของสารทำงานที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่สภาวะวิกฤต (กรณีเปรียบเทียบสารทำงานชนิด Azeotropic blend และ Non-azeotropic blend)	56
4.4 ผลของสัดส่วนผสมโดยปริมาตรที่ต่างกันของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สภาวะวิกฤต	59
4.5 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวเมื่อใช้สารทำงานผสม MP39 ที่สภาวะวิกฤต	66
4.6 ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวเมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) ที่สภาวะวิกฤต	69
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก คำสำคัญ	78
ภาคผนวก ข คำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	80
ภาคผนวก ค รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	82
ประวัติผู้เขียน	91

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
4.1	รูปแบบการไหลในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	45
4.2	ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	46
4.3	รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้สารผสมระหว่าง R123 และ R141b อัตราส่วนผสมโดยปริมาตร1:1	51
4.4	ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยวเมื่อใช้สารผสมระหว่าง R123 และ R141b อัตราส่วนผสมโดยปริมาตร1:1 เป็นสารทำงาน	52
4.5	ผลของสารทำงาน MP39 และและสารผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงาน จำนวน 2โค้งเลี้ยว ที่สภาวะวิกฤต	57
4.6	ผลของสารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b ที่สัดส่วนการผสมโดยปริมาตรต่างกัน จำนวน 2โค้งเลี้ยว ที่สภาวะวิกฤต	61
4.7	รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39เป็นสารทำงาน	66
4.8	ลำดับการเกิดสภาวะสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39เป็นสารทำงาน	67
4.9	รูปแบบการไหลภายในแต่ละสภาวะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบจำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39เป็นสารทำงาน	70
4.10	ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123และ R141b (1:1) เป็นสารทำงาน	70

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
1.1	การเกิดฟองไอสลับกับของเหลวในท่อคาปิลลารี่	3
1.2	ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและอัตราการถ่ายเทความร้อน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	5
1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดสารทำงานและอัตราการถ่ายเทความร้อน	6
1.4	ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด	7
1.5	ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด	8
1.6	ผลของชนิดสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด	9
1.7	ผลของความยาวส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	11
1.8	ผลของจำนวนโค้งเลี้ยวที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	12
1.9	ผลของชนิดสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลภายใน ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	14
1.10	รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด จำนวน 2โค้งเลี้ยว อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 25 แสดงเฉพาะ 1 โค้งเลี้ยว	17
1.11	รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด จำนวน 2โค้งเลี้ยว อัตราส่วนสนทัดเท่ากับ 75 แสดงเฉพาะ 1 โค้งเลี้ยว	18
1.12	ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm สารทำงาน R123	19

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
1.13	ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 mm สารทำงาน R123	20
1.14	ลำดับรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่ 10 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนทำระเหย 50 mm แสดงเฉพาะส่วนทำระเหยโค้งเลี้ยวที่ 1-4	21
1.15	ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดปลายปิด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.0 mm สารทำงานผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล	22
1.16	ขั้นตอนการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm สารทำงาน HP62	24
2.1	โครงสร้างของท่อความร้อนแบบสั่นทั้ง 3 ชนิด	27
2.2	ขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อน	31
2.3	รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวดิ่ง	32
2.4	รูปแบบการไหลในท่อหน้าตัดกลมในแนวระดับ	33
3.1	ตัวอย่างท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2	แผนภาพแสดงชุดการทดลองเชิงคุณภาพ	37
3.3	เครื่องทำเย็นน้ำหล่อเย็น	38
3.4	เครื่องตัดกระแสไฟฟ้าอัตโนมัติ	38
3.5	ตัวปรับความสว่างของแสงอิเล็คทรอนิคส์	39
3.6	สายเทอร์โมคัปเปิล	39
3.7	เครื่องอ่านอุณหภูมิแบบตั้งโต๊ะ	40
3.8	กล้องถ่ายภาพนิ่งแบบดิจิตอล	41
4.1	ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	45

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.2	การเกิดแถบการแห้งที่สภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยวเมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	46
4.3	ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	49
4.4	ลำดับการเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b สัดส่วนผสมโดยปริมาตร 1:1 เป็นสารทำงาน	51
4.5	ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	55
4.6	ผลของสารทำงานผสมที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว ที่ใช้ MP39 และสารผสมระหว่างR123 และ R141b เป็นสารทำงาน	56
4.7	ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับค่าความร้อนแฝงการกลายเป็นไอของสารทำงานภายในท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	58
4.8	รูปแบบการไหลภายในของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 2 โค้งเลี้ยว ที่ใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b เป็นสารทำงานที่อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรต่างกัน	61
4.9	ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับสัดส่วนโดยปริมาตรของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ	64
4.10	การเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้ MP39 เป็นสารทำงาน	66
4.11	การเกิดสภาวะวิกฤตของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ จำนวน 5 โค้งเลี้ยว เมื่อใช้สารทำงานผสมระหว่าง R123 และ R141b (1:1) เป็นสารทำงาน	69

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป **หน้า**

4.12 ความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ภายในที่เกิดขึ้นกับจำนวนโค้งเลี้ยว
ของท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบ 72

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะ (ความดันคงที่)	J/kg.K
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
$D_{i,\ ratio}$	สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง	
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	J/kg
Ku	ตัวเลขของคูทาเทลาดเซ (Kutateladze Number)	
Le	ความยาวส่วนทำระเหย	m
Lt	ความยาวรวมทั้งหมด	m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
Pr	ตัวเลขของแพรทเติล (Prandtl Number)	
Q	อัตราการส่งถ่ายความร้อน	W
Z	ความต้านทานทางความร้อน	K/W
R	ความต้านทานทางความร้อน	K/W
N	จำนวนโค้งเลี้ยว	
T	อุณหภูมิ	^oC
Δ	ผลต่าง	
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
σ	แรงตึงผิว	N/m
HT	ท่อร้อน	
CT	ท่อเย็น	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวกำกับล่าง	**ความหมาย**
cond	ส่วนควบแน่น
evap	ส่วนทำระเหย
in	ขาเข้า
i	ภายใน
l	ของเหลว
max	สูงสุด
out	ขาออก
v	ไอ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved