สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพประกอบ	ณ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบปิด	2
1.2.2 ขีดจำกัดการทำงานของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะแบบปิด	3
1.2.3 ลักษณะทางกายภาพของส่วนรับความร้อนที่มีต่อขีดจำกัดการทำงาน	3
1.2.4 ผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษาวิจัย	6
1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมไซฟอน	8
2.2 แบบจำลองทางความร้อน	9
2.3 แบบจำลองการทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อเทอร์โมไซฟอน	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดสอบ	
3.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ	16
3.2 ตัวแปรสำหรับการทดสอบ	16
3.3 อุปกรณ์การทดสอบ	17

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด	20
3.5 ขั้นตอนการทดสอบ	23
3.6 วิธีการวิเคราะห์ผล	25
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 ผลของมุมเอียงต่อการส่งผ่านความร้อน	27
4.2 ผลของอัตราส่วนสนทัดที่มีต่อการส่งผ่านความร้อน	30
4.3 ผลของตัวเลขของบอนด์ที่มีต่อการส่งผ่านความร้อน	33
4.4 ผลของการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อความร้อน	33
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อนกับ ความต้านทานความร้อนรวม	40
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก กราฟแสดงผล Q/Q_{90} จากการปรับค่ามุมเอียงการทดสอบ การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในสำหรับท่อขนาด 20 มิลลิเมตร	52
ภาคผนวก ข ตารางคุณสมบัติของสารทำงาน R113 และ R11 ตารางคุณสมบัติของสารผสมน้ำ-เอทธิลีนไกลคอล	67
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลอง	74
ประวัติผู้เขียน	114

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของท่อพลาสติกชนิด HDPE และ PVC	2
3.1	รายละเอียดท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดสอบ	25
ข – 1	คุณสมบัติของสารทำงาน R113	67
ข – 2	คุณสมบัติของสารทำงาน R11	68
ข – 3	ความหนาแน่นของสารผสมน้ำ-เอทธิลีนไกลคอล	69
ข – 4	ความจุความร้อนจำเพาะของสารผสมน้ำ-เอทธิลีนไกลคอล	70
ข – 5	การนำความร้อนของสารผสมน้ำ-เอทธิลีนไกลคอล	71
ข – 6	ความหนืดของสารผสมน้ำ-เอทธิลีนไกลคอล	72
ค – 1	Q/Q_{90} สูงสุดของท่อที่ทำการทดสอบทุกขนาดของสารทำงาน R113	75
ค – 2	Q/Q_{90} สูงสุดของท่อที่ทำการทดสอบทุกขนาดของสารทำงาน R11	75
ค – 3	Q(watts) ของ HDPE ที่ใช้ R113 เป็นสารทำงาน	75
ค – 4	Q(watts) ของ HDPE ที่ใช้ R11 เป็นสารทำงาน	75
ค – 5	R/R_{90} ต่ำสุดของท่อที่ทำการทดสอบทุกขนาดของสารทำงาน R113	76
ค – 6	R/R_{90} ต่ำสุดของท่อที่ทำการทดสอบทุกขนาดของสารทำงาน R11	76
ค – 7	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง15 มม. สารทำงาน R113อัตราส่วนสนทัด 5	77
ค – 8	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 10	77
ค – 9	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 20	78
ค – 10	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 30	78
ค –11	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อนของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 5	79

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง		หน้า
ค – 12	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 10	79
ค – 13	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 20	80
ค – 14	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 30	80
ค – 15	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 5	81
ค – 16	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 10	81
ค – 17	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 20	82
ค – 18	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 30	82
ค – 19	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5	83
ค – 20	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10	83
ค – 21	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20	84
ค – 22	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30	84
ค – 23	ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5	85

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง หน้า

ค – 24 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10 85

ค – 25 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20 86

ค – 26 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30 86

ค – 27 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5 87

ค – 28 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10 87

ค – 29 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20 88

ค – 30 ผลการทดสอบ ผลของมุมเอียงการทำงานต่อสมรรถนะการส่งผ่านความร้อน ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30 88

ค – 31 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R113 89

ค – 32 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. อัตราส่วนสนทัด 30 สารทำงาน R113 89

ค – 33 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R113 91

ค – 34 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อัตราส่วนสนทัด 30 สารทำงาน R113 91

ค – 35 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R113 93

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง หน้า

ค – 36 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. อัตราส่วนสนทัด 30 สารทำงาน R113 93

ค – 37 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R11 96

ค – 38 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. อัตราส่วนสนทัด 30 สารทำงาน R11 96

ค – 39 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R11 98

ค – 40 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. อัตราส่วนสนทัด 30 สารทำงาน R11 98

ค – 41 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. อัตราส่วนสนทัด 5 สารทำงาน R11 101

ค – 42 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อ ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. อัตราส่วนสนทัด30 สารทำงาน R11 101

ค – 43 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 5 104

ค – 44 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 10 104

ค – 45 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 20 105

ค – 46 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 30 105

ค – 47 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 5 106

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง หน้า

ค – 48 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 10 106
ค – 49 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 20 107
ค – 50 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R113 อัตราส่วนสนทัด 30 107
ค – 51 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5 108
ค – 52 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10 108
ค – 53 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20 109
ค – 54 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30 109
ค – 55 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5 110
ค – 56 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10 110
ค – 57 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20 111
ค – 58 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30 111
ค – 59 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 5 112

สารบาญตาราง(ต่อ)

ตาราง หน้า

ค – 60 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 10 112

ค – 61 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 20 113

ค – 62 อัตราการส่งผ่านความร้อน (Heat flux) กับความต้านทานความร้อนรวม (R) ของท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. สารทำงาน R11 อัตราส่วนสนทัด 30 113

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ

รูป		หน้า
1.1	แสดงผลของมุมเอียงที่มีต่อสมรรถนะการทำงานแบ่งได้เป็น 4 ช่วงหลัก [19]	4
1.2	แสดงผลของอัตราส่วน $Q_{critical}/Q_{critical90}$ ของสารทำงานทั้ง 3 ชนิด [19]	5
2.1	ลักษณะส่วนประกอบของเทอร์โมไซฟอน [11]	8
2.2	แสดงความต้านทานในส่วนต่าง ๆ ที่เกิดในท่อความร้อน [11]	9
2.3	แสดงแบบจำลองที่ใช้ทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายใน [17]	15
3.1	แสดงลักษณะของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ที่ใช้ในการทดสอบ	17
3.2	กระเปาะความร้อนและกระเปาะความเย็น (Heating & Cooling Jacket) ที่ทำด้วยท่อพลาสติกชนิด PVC	18
3.3	น้ำกลั่นผสมเอทธิลีนไกลคอล	18
3.4	แท่นติดตั้งและทดสอบเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE	19
3.5	สารทำงาน R113 และ R11	19
3.6	อ่างทำความร้อน	20
3.7	อ่างทำความเย็น	20
3.8	มาตรวัดอัตราการไหล	21
3.9	เครื่องบันทึกข้อมูล	21
3.10	เทอร์โมคัปเปิล	22
3.11	วาล์วควบคุมอัตราการไหล	22
3.12	ชุดเติมสารทำงาน	23
3.13	การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมือวัด	24
4.1	กราฟแสดง Q/Q_{90} เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R113 เป็นสารทำงาน	27
4.2	กราฟแสดง R/R_{90} เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R113 เป็นสารทำงาน	28
4.3	กราฟแสดง Q/Q_{90} เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R11 เป็นสารทำงาน	29
4.4	กราฟแสดง R/R_{90} เทียบกับมุมเอียงการทดสอบของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร และใช้ R11 เป็นสารทำงาน	30

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.5	ผลของ Le/d กับ Q_{max}/Q_{90} ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ที่ใช้สารทำงานเป็น R113	31
4.6	ผลของ Le/d กับ Q_{max}/Q_{90} ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ที่ใช้สารทำงานเป็น R11	32
4.7	ผลของตัวเลขของบอนด์ กับ Q_{max}/Q_{90} ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE	33
4.8	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านความร้อนของการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางความร้อนจาก ESDU 81038 [11] ของสารทำงาน R11 ท่อขนาด 15 มิลลิเมตร	34
4.9	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าการส่งผ่านความร้อนของการทดสอบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางความร้อนจาก ESDU 81038 [11] ของสารทำงาน R11 ท่อขนาด 25 มิลลิเมตร	34
4.10	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d = 5 ใช้ R113 เป็นสารทำงาน	36
4.11	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d = 30 ใช้ R113 เป็นสารทำงาน	36
4.12	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d = 5 ใช้ R113 เป็นสารทำงาน	37
4.13	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d = 30 ใช้ R113 เป็นสารทำงาน	37
4.14	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d = 5 ใช้ R11 เป็นสารทำงาน	38
4.15	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d = 30 ใช้ R11 เป็นสารทำงาน	38
4.16	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d = 5 ใช้ R11 เป็นสารทำงาน	39
4.17	การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d = 30 ใช้ R11 เป็นสารทำงาน	39

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

4.18 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน 41
4.19 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน 42
4.20 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้ R113 เป็นสารทำงาน 43
4.21 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน 44
4.22 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน 45
4.23 อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ กับ ความต้านทานความร้อนรวม ของเทอร์โมไซฟอนแบบ HDPE ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร โดยใช้ R11 เป็นสารทำงาน 46
ก – 1 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R113 53
ก – 2 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R113 53
ก – 3 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R113 54
ก – 4 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R113 54
ก – 5 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R113 55
ก – 6 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R113 55
ก – 7 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R113 56
ก – 8 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R113 56
ก – 9 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R113 57

สารบาญภาพประกอบ (ต่อ)

รูป หน้า

ก – 10 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R113 57
ก – 11 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R113 58
ก – 12 Q/Q_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R113 58
ก – 13 R/R_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R11 59
ก – 14 R/R_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R11 59
ก – 15 R/R_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R11 60
ก – 16 R/R_{90} ของท่อขนาด 15 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R11 60
ก – 17 R/R_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R11 61
ก – 18 R/R_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R11 61
ก – 19 R/R_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R11 62
ก – 20 R/R_{90} ของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R11 62
ก – 21 R/R_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R11 63
ก – 22 R/R_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 10 สารทำงาน R11 63
ก – 23 R/R_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 20 สารทำงาน R11 64
ก – 24 R/R_{90} ของท่อขนาด 25 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R11 64
ก – 25 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R113 65
ก – 26 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R113 65
ก – 27 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 5 สารทำงาน R11 66
ก – 28 การกระจายอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อขนาด 20 มิลลิเมตร Le/d 30 สารทำงาน R11 66

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดของท่อ	m^2
A_{eo}	พื้นที่ภายนอกท่อของส่วนรับความร้อน	m^2
A_{co}	พื้นที่ภายนอกท่อของส่วนคายความร้อน	m^2
Bo	ตัวเลขของบอนด์	
C	ค่าคงที่ของหน้าตัดกลม ซึ่ง $C = (1/4)(3/\pi)^{4/3} = 0.235$	
C_p	ค่าความจุความร้อนของสาร	kJ/kg°C
C_{pl}	ค่าความจุความร้อนของสารทำงานในสถานะของเหลว	kJ/kg°C
D_o,d_o	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อความร้อน	m
D_i,d_i	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน	m
F	อัตราส่วนการเติม	
g	ค่าแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h_c	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น	$W/m^2°C$
h_{co}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ส่วนควบแน่น ภายนอกท่อความร้อน	$W/m^2°C$
h_e	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ส่วนรับความร้อน	$W/m^2°C$
h_f	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในฟิล์มของเหลว	$W/m^2°C$
h_{eo}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ส่วนรับความร้อน ภายนอกท่อความร้อน	$W/m^2°C$
h_p	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แอ่งของเหลว	$W/m^2°C$
k,k_x	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อความร้อน	W/m°C
k_l	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงานในสถานะของเหลว	W/m °C
L	ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน (Latent heat)	kJ/kg
L_c	ความยาวของท่อความร้อนที่ส่วนควบแน่น	m
L_e	ความยาวของท่อความร้อนที่ส่วนรับความร้อน	m
$\dot{m}$	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
P_a	ความดันบรรยากาศ	Pa

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_v	ความดันไอของสารทำงาน	Pa
q	อัตราการส่งผ่านความร้อนต่อหน่วยพื้นที่	W/m^2
Q	ค่าการส่งผ่านความร้อน	W
Q/Q_{90}	อัตราส่วนค่าการส่งผ่านความร้อนที่ตำแหน่งมุมเอียงเทียบกับที่ตำแหน่งแนวดิ่ง	
R,Z	ความต้านทานความร้อนรวม	$K/W,^{\circ}C/W$
R/R_{90}	อัตราส่วนความต้านทานความร้อนรวมที่ตำแหน่งมุมเอียงเทียบกับที่ตำแหน่งแนวดิ่ง	
T_i	อุณหภูมิภายในท่อเทอร์โมไซฟอน	$^{\circ}C$
T_p	อุณหภูมิที่แอ่งของเหลว	$^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำงาน	$^{\circ}C$
T_{si}	อุณหภูมิที่แหล่งความเย็น	$^{\circ}C$
T_{so}	อุณหภูมิที่แหล่งความร้อน	$^{\circ}C$
T_v	อุณหภูมิไอของสารทำงาน	$^{\circ}C$
V_l	ปริมาตรของสารทำงานที่เติม	
ΔT_h	ค่าเฉลี่ยความแตกต่างอุณหภูมิเนื่องจาก Hydrostatic head	$^{\circ}C$
ρ_l	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m^3
ρ_v	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m^3
ν	ความหนืดจลน์ของของเหลว	m^3/s
μ_l	ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงานในสถานะของเหลว	Pa•s
Φ_2	ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit	
Φ_3	ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University