สารบัญ

	หน้า
ปกใน	ก
ใบรับรองโครงงาน	ข
บทคัดย่อ	ค
Abstract	จ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญ	ซ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
ลำดับสัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการทดลอง	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 วิธีการดำเนินงาน	4
1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน	6
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้	6
1.8 งบประมาณ	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	8
2.1 เทอร์โมไซฟอน	8
2.2 การถ่ายเทความร้อนในการทำงานแบบ two-phase closed thermosyphon	10
2.3 การไหลสองสถานะภายในท่อปิดที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม	12
2.4 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน	14

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	16
3.1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	16
3.2 ตัวแปรควบคุม	16
3.3 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด	16
3.4 วิธีการทดลอง	24
บทที่ 4 การทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	26
4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อเทอร์โมไซฟอน และค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน	27
4.2 ผลกระทบของอัตราการเติมที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อเทอร์โมไซฟอน และค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน	54
4.3 ผลกระทบของมุมเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลภายในท่อเทอร์โมไซฟอน และค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน	90
4.4 ผลกระทบของชนิดสารทำงานภายในเทอร์โมไซฟอนที่มีต่อรูปแบบการไหล และค่าการถ่ายเทความร้อนภายในท่อเทอร์โมไซฟอน	115
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	118
5.1 สรุปผลการทดลอง	118
5.2 ข้อเสนอแนะ	120
บรรณานุกรม	121
ภาคผนวก ก การคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนจากผลการทดลอง	122
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลอง	137
ประวัติผู้ทำโครงการ	143

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน 6

ตารางที่ ข.1 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยต่างๆ เทียบกับมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน ที่สารทำงานเป็นน้ำ 137

ตารางที่ ข.2 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเติมสารทำงาน เทียบกับมุมเอียงและอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่สารทำงานเป็นน้ำ 138

ตารางที่ ข.3 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่มุมเอียงต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและอัตราการเติมสารทำงาน ที่สารทำงานเป็นน้ำ 139

ตารางที่ ข.4 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยต่างๆ เทียบกับมุมเอียงและอัตราการเติมสารทำงาน ที่สารทำงานเป็นน้ำผสมเอทานอล 140

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่อัตราการเติมสารทำงาน เทียบกับมุมเอียงและอุณหภูมิส่วนทำระเหย ที่สารทำงานเป็นน้ำผสมเอทานอล 141

ตารางที่ ข.6 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่มุมเอียงต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิของส่วนทำระเหยและอัตราการเติมสารทำงาน ที่สารทำงานเป็นน้ำผสมเอทานอล 142

ตารางที่ ข.7 แสดงค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนของสารทำงานต่างๆ เทียบกับอัตราการเติมสารทำงาน ที่มุมเอียง 70 องศา อุณหภูมิของส่วนทำระเหย 80°C 142

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	เทอร์โมไซฟอนที่วางตัวในแนวดิ่งและแนวเอียง	2
รูปที่ 1.2	การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนที่วางตัวในแนวดิ่งและแนวเอียง	3
รูปที่ 1.3	แสดงแผนผังการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง	5
รูปที่ 2.1	แสดงโครงสร้างและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน	9
รูปที่ 2.2	แสดงวงจรความต้านทานความร้อนรวม	11
รูปที่ 2.3	แสดงรูปแบบการไหลภายในท่อปิดในแนวดิ่ง	12
รูปที่ 2.4	แสดงรูปแบบการไหลภายในท่อปิดในแนวระดับ	13
รูปที่ 3.1	แสดงสายเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่างๆ	17
รูปที่ 3.2	แสดงรูปปั๊มน้ำร้อน	17
รูปที่ 3.3	แสดงเครื่องเก็บข้อมูลภายนอก	18
รูปที่ 3.4	แสดงกล้องดิจิตอลสำหรับถ่ายภาพนิ่ง	18
รูปที่ 3.5	แสดงกล้องวิดีโอสำหรับบันทึกภาพเคลื่อนไหว	19
รูปที่ 3.6	ฮีตเตอร์	19
รูปที่ 3.7	เครื่องปั้มสุญญากาศ	20
รูปที่ 3.8	แผงควบคุมอุณหภูมิฮีตเตอร์	20
รูปที่ 3.9	เครื่องเติมสารทำงาน	21
รูปที่ 3.10	ถังต้มน้ำสำหรับต้มน้ำร้อนเข้าที่ส่วนทำระเหย	21
รูปที่ 3.11	แสดงชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนที่มีส่วนทำระเหยเป็นท่อแก้ว Pyrex	22
รูปที่ 3.12	แสดงชุดทดลองท่อเทอร์โมไซฟอนที่มีส่วนควบแน่นเป็นท่อแก้ว Pyrex	23
รูปที่ 3.13	ท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ในการทดลอง	23
รูปที่ 4.1	ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 30% ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา	29
รูปที่ 4.2	ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 30% ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 30% ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 32

รูปที่ 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 30% ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 34

รูปที่ 4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 50% ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 36

รูปที่ 4.6 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 50 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 38

รูปที่ 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 50 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 41

รูปที่ 4.8 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 50 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 43

รูปที่ 4.9 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 70 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 45

รูปที่ 4.10 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 70 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 47

รูปที่ 4.11 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 70 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 49

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.12 ผลกระทบของอุณหภูมิของส่วนทำระเหยที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่มีอัตราการเติม 70 % ของส่วนทำระเหย และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 51

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำ 52

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมสารทำงานและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำกลั่นผสมกับเอทานอล 53

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50 °C และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 55

รูปที่ 4.16 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50 °C และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 57

รูปที่ 4.17 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50 °C และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 59

รูปที่ 4.18 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50 °C และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 61

รูปที่ 4.19 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60 °C และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 63

รูปที่ 4.20 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60 °C และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 65

รูปที่ 4.21 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60 °C และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 67

รูปที่ 4.22 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60 °C และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 69

รูปที่ 4.23 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70 °C และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 71

รูปที่ 4.24 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70 °C และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 73

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.25 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70°C และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 76

รูปที่ 4.26 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70°C และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 78

รูปที่ 4.27 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C และวางตัวในแนวเอียง 30 องศา 80

รูปที่ 4.28 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C และวางตัวในแนวเอียง 50 องศา 83

รูปที่ 4.29 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 85

รูปที่ 4.30 ผลกระทบของอัตราการเติมสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C และวางตัวในแนวเอียง 90 องศา 87

รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมสารทำงานและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำ 88

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิส่วนทำระเหยและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำกลั่นผสมกับเอทานอล 89

รูปที่ 4.33 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50°C และอัตราการเติม 30% 91

รูปที่ 4.34 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60°C และอัตราการเติม 30% 93

รูปที่ 4.35 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70°C และอัตราการเติม 30% 95

รูปที่ 4.36 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C และอัตราการเติม 30% 97

รูปที่ 4.37 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50°C และอัตราการเติม 50% 99

รูปที่ 4.38 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60°C และอัตราการเติม 50% 101

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 4.39 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70 °C และอัตราการเติม 50% 103

รูปที่ 4.40 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80 °C และอัตราการเติม 50% 105

รูปที่ 4.41 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 50 °C และอัตราการเติม 70% 107

รูปที่ 4.42 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 60 °C และอัตราการเติม 70% 109

รูปที่ 4.43 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 70 °C และอัตราการเติม 70% 111

รูปที่ 4.44 ผลกระทบของการวางตัวในแนวเอียงที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80 °C และอัตราการเติม 70% 113

รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงจากแนวระดับและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำ 114

รูปที่ 4.46 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงจากแนวระดับและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่สารทำงานเป็นน้ำกลั่นผสมกับเอทานอล 114

รูปที่ 4.47 ผลกระทบของชนิดสารทำงานที่มีต่อรูปแบบการไหลของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80 °C และวางตัวในแนวเอียง 70 องศา 116

รูปที่ 4.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารทำงานและค่าการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80 °C มุมเอียง 70 องศา 117

ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_x	พื้นที่หน้าตัดของผนังภาชนะ	m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น	kJ/kg-K
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ	m
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
h_{co}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น	W/m-K
h_{eo}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย	W/m-K
l_a	ความยาวของส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	m
l_c	ความยาวของส่วนควบแน่น	m
l_e	ความยาวของส่วนทำระเหย	m
$\dot{m}$	อัตราการไหลของน้ำเย็น	L/s
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
S_{co}	พื้นที่ผิวภายนอกของส่วนควบแน่น	m^2
S_{eo}	พื้นที่ผิวภายนอกของส่วนทำระเหย	m^2
T_i	ค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาเข้า	°C
T_o	ค่าอุณหภูมิน้ำเย็นขาออก	°C
T_{si}	อุณหภูมิของส่วนระบายความร้อน	°C
T_{so}	อุณหภูมิของส่วนให้ความร้อน	°C
ΔT_h	ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเนื่องจากความต่างของ Hydro static head	°C
Z	ค่าความต้านทานความร้อน	K/W
Z_1	ค่าความต้านทานความร้อนโดยการพาระหว่างส่วนให้ความร้อนกับผิวนอกของส่วนทำระเหย	K/W
Z_2	ค่าความต้านทานความร้อนโดยการนำผ่านความหนาของผนังในส่วนทำระเหย	K/W
Z_3	ค่าความต้านทานความร้อนของของเหลวที่กำลังเดือด	K/W

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

Z_4	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าของของเหลวและไอในส่วนทำระเหย	K/W
Z_5	ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น	K/W
Z_6	ค่าความต้านทานความร้อนระหว่างผิวหน้าของของเหลวและไอในส่วนควบแน่น	K/W
Z_7	ค่าความต้านทานความร้อนของของเหลวที่กำลังควบแน่น	K/W
Z_8	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังในส่วนควบแน่น	K/W
Z_9	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการพาระหว่างผิวนอกของส่วนควบแน่นกับตัวระบายความร้อน	K/W
Z_{10}	ค่าความต้านทานความร้อน โดยการนำในแนวแกนท่อผ่านพื้นที่หน้าตัดของผนังท่อจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น	K/W