สารบาญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญ	ฉ
สารบาญตาราง	ซ
สารบาญภาพ	ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	10
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาเชิงทฤษฎีและเชิงประยุกต์	10
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	11
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ	12
2.2 การดึงความร้อนที่ถังโดยใช้ปั๊มความร้อน	13
2.3 ระบบปั๊มความร้อน	14
2.4 การถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์	16
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ	19
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	27
3.3 แนวทางและวิธีวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบ	28
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ	
4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	30
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	32
4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน และร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	34

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	
5.1 การผลิตน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	38
5.2 การผลิตน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	39
5.3 เปรียบเทียบการลงทุนในแต่ละ ระบบ	41
5.4 วิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน	41
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการทดสอบ	44
6.1.1 การทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า	44
6.1.2 การทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	44
6.1.3 การเปรียบเทียบสมรรถนะและการใช้งาน	44
6.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	48
ภาคผนวก ข แสดงอุปกรณ์และการวัดที่จุดต่างๆในงานวิจัย	80
ประวัติผู้เขียน	82

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
ก.1	ข้อมูลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าในวันที่ 28 ธันวาคม 2541	49
ก.2	ข้อมูลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนในวันที่ 22 เมษายน 2542	51
ก.3	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน 50 °C ในเดือน มกราคม	53
ก.4	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน ในเดือน เมษายน	56
ก.5	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 40 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	59
ก.6	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	62
ก.7	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	66
ก.8	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	69
ก.9	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน เสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	73
ก.10	ข้อมูลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน เสริมด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ทางออกน้ำร้อนใช้งานเพื่อให้อุณหภูมิคงที่ที่ 60 °C จากเดือนที่เป็นตัวแทนของปี	76

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	วงจรการทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	2
1.2	ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	3
1.3	ค่า COP_h เทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมสำหรับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่เป็นอีวาปอเรเตอร์กับชุดอีวาปอเรเตอร์ที่ใช้พัดลมส่งเป่า	3
1.4	ค่าเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จากการคำนวณและการทดลอง	4
1.5	การให้ความร้อนแก่อาคารจากระบบปั๊มความร้อนร่วมกับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	5
1.6	ค่าเปรียบเทียบ COP จากการทดลองและการคำนวณจาก SOLSIM ในวันที่ 7 มีนาคม 1992	5
1.7	ระบบการทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	6
1.8	ค่าCOP ของระบบทำน้ำร้อนที่อัตราการไหล2, 4 และ 6 litre/min	6
1.9	อุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน	7
1.10	ระบบการทำน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนร่วมกับตัวรับรังสีแบบเปลือย	7
1.11	ผลการเปรียบเทียบการทดลองและการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	8
1.12	ระบบการทำน้ำร้อนจากปั๊มความร้อนร่วมกับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	9
1.13	ผลการทดลองระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	9
1.14	ค่า COP ของระบบปั๊มความร้อนร่วมกับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	10
2.1	วงจรการทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	12
2.2	ถังเก็บน้ำร้อนซึ่งมีอีวาปอเรเตอร์จากปั๊มความร้อนอยู่ภายใน	13
2.3	แสดงกระบวนการที่เกิดขึ้นในวัฏจักรปั๊มความร้อนอยู่ภายในแบบอัดไอ	14
2.4	การถ่ายเทความร้อนที่คอนเดนเซอร์	16
2.5	ขั้นตอนการใช้สูตรคำนวณระบบทำน้ำร้อนจากแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	18
3.1	ชุดการทดลองระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	19
3.2	ตัวรับรังสีพลังงานแสงอาทิตย์	20
3.3	ปั๊มน้ำร้อน	20
3.4	ปั๊มน้ำป้อน	21
3.5	ฮีตเตอร์ไฟฟ้า	21
3.6	วาล์วระบายแรงดันของระบบทำน้ำร้อน	22
3.7	ถังเก็บน้ำร้อน	22
3.8	คอมเพรสเซอร์ของระบบปั๊มความร้อน	23
3.9	คอนเดนเซอร์ของระบบปั๊มความร้อน	23
3.10	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	24

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.11	เกจวัดความดันของสารตัวกลางระบบปั๊มความร้อน	25
3.12	เกจวัดอัตราการไหลของน้ำ	25
3.13	เครื่องบันทึกค่ารังสีแสงอาทิตย์	26
3.14	เกจวัดอัตราการไหลของสารตัวกลางระบบปั๊มความร้อน	26
3.15	เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า	27
4.1	วงจรการทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อน	30
4.2	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งานที่ 50 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่อุณหภูมิของน้ำป้อนเข้า 25 - 35 °C ในวันที่ 28 ธันวาคม 2541	31
4.3	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนในวันที่ 28 มกราคม 2543	32
4.4	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมของระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนในวันที่ 22 เมษายน 2542	33
4.5	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน จากการทดลอง ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้า เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในวันที่ 28 ธันวาคม 2541	34
4.6	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน จากการทดลอง ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในวันที่ 22 เมษายน 2542	34
4.7	แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของระบบปั๊มความร้อนจากการทดลองระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในวันที่ 22 เมษายน 2542	35
4.8	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งานที่ 50 °C จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ตัวแทนของปีดือเดือน มกราคม, เมษายน กรกฎาคม และเดือน ตุลาคมพร้อมด้วยค่าเฉลี่ยของทุกเดือน	35
4.9	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิน้ำร้อนใช้งานที่ 50 °C จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับปั๊มความร้อนที่ใช้ตัวแทนของปีดือเดือน มกราคม, เมษายน, กรกฎาคม, และเดือน ตุลาคมพร้อมด้วยค่าเฉลี่ยของทุกเดือน	36

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.10	แผนภูมิแสดงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ ของระบบปั๊มความร้อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ร่วมกับปั๊มความร้อนที่ใช้ตัวแทนของปี คือเดือน มกราคม เมษายน กรกฎาคม และเดือน ตุลาคมพร้อมด้วยค่าเฉลี่ยของทุกเดือน	36
4.11	แผนภูมิแสดงการใช้พลังงานของระบบทำน้ำร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ร่วมกับฮีตเตอร์ ไฟฟ้าและปั๊มความร้อน น้ำร้อนใช้งานมีอุณหภูมิคงที่ ที่ 40, 50 และ 60 °C จากการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าเสริม	37
5.1	แผนภูมิแสดงระยะเวลาคืนทุนที่อุณหภูมิน้ำร้อนใช้งาน 40, 50 และ 60 °C	42
ข.1	แสดงอุปกรณ์และการวัดที่จุดต่างๆในงานวิจัย	81

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_c	พื้นที่ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
A_i	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ด้านในท่อ	m^2
A_o	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ด้านนอกท่อ	m^2
Cp_w	ค่าความจุความร้อนของน้ำ	J/kg C
Cont	ค่าคงที่	-
COPh	สัมประสิทธิ์สมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน	-
F_R	ตัวประกอบการส่งถ่ายความร้อน	-
G_T	รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกบนระนาบตัวรับรังสี	W/m^2
h_1	ค่าเอลทาลปีของสารตัวกลางทางเข้าของคอมเพรสเซอร์	kJ/kg
h_2	ค่าเอลทาลปีของสารตัวกลางทางออกของคอมเพรสเซอร์	kJ/kg
h_3	ค่าเอลทาลปีของสารตัวกลางทางเข้าของคอนเดนเซอร์	kJ/kg
h_4	ค่าเอลทาลปีของสารตัวกลางทางออกของคอนเดนเซอร์	kJ/kg
h_i	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ด้านในท่อ	W/m^2K
h_o	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ด้านนอกท่อ	W/m^2K
m	มวลของน้ำ และ มวลของก๊าซที่เป็นสารทำงาน	kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลของน้ำในระบบทำน้ำร้อน	kg/min
$\dot{m}_r$	อัตราการไหลของของสารตัวกลางระบบปั๊มความร้อน	kg/s
n	ค่าดัชนีของสารตัวกลางในระบบปั๊มความร้อน	-
P_1	ความดันทางด้านอีวาปอเรเตอร์	MPa
P_2	ความดันทางด้านคอนเดนเซอร์	MPa
Q_C	ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากคอนเดนเซอร์	W
Q_E	ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากอีวาปอเรเตอร์	W
Q_U	ความร้อนที่ได้จากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	W
Q_{AUX}	ความร้อนที่ฮีตเตอร์จ่ายให้แก่น้ำร้อน	W
R	ค่าคงที่เฉพาะของก๊าซ ในระบบปั๊มความร้อน	kJ/kmol K
T_a	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	°C
T_C	อุณหภูมิของสารตัวกลางในคอนเดนเซอร์	°C
T_E	อุณหภูมิของสารตัวกลางในอีวาปอเรเตอร์	°C
T_{fi}	อุณหภูมิน้ำทางเข้าของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	°C

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
T_{fo}	อุณหภูมิน้ำทางออกของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	°C
T_{Le}	อุณหภูมิน้ำทางออกของคอนเดนเซอร์	°C
T_{Li}	อุณหภูมิน้ำทางเข้าของคอนเดนเซอร์	°C
T_s	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	°C
T_s^+	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บน้ำร้อนในช่วงเวลาต่อไป	°C
T_1	อุณหภูมิสารตัวกลางที่ทางเข้าคอมเพรสเซอร์	°C
T_2	อุณหภูมิสารตัวกลางที่ทางออกคอมเพรสเซอร์	°C
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 K$
U_L	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจากผิวดูดรังสีแสงอาทิตย์สู่สิ่งแวดล้อม	$W/m^2 K$
V_1	ปริมาตรของสารตัวกลางในระบบปั๊มความร้อน	m^3
W_{COMP}, W_{1-2}	งานที่คอมเพรสเซอร์	W
Δt	ช่วงเวลา	min
$\tau\alpha$	ผลคูณประสิทธิผลค่าส่งผ่านและดูดกลืนของตัวรับรังสี แสงอาทิตย์สู่สิ่งแวดล้อม	-

สัญลักษณ์ตัวห้อย (Subscript)

a	สิ่งแวดล้อม	-
C	คอนเดนเซอร์และ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	-
Comp	คอมเพรสเซอร์	-
E	อีวาปอเรเตอร์	-
f	น้ำที่ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	-
h	ปั๊มความร้อน	-
i	ทางเข้า	-
L	น้ำป้อน	-
o	ทางออก	-
r	สารตัวกลางระบบปั๊มความร้อน	-
s	ถังเก็บน้ำร้อน	-
w	น้ำร้อน	-

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University