

การพัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์
แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน
THERMAL PERFORMANCE DEVELOPMENT OF EVACUATED TUBE
SOLAR COLLECTOR WITH HEAT PIPES

นายกิตติภพ ย่างกุลไพโรจน์ รหัส 51362954
นายทศวรรษ รักสกุล รหัส 51362947
นายวันเฉลิม เมืองพระฝาง รหัส 51361391

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 10/ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 16008379
เลขเรียกหนังสือ..... ฟง.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ๑๖๙๔๑

๑๕๖๔

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ : การพัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้ว
 สูญญากาศชนิดท่อความร้อน
 (Thermal Performance Development of Evacuated Tube Solar
 Collector with Heat Pipes)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายกิตติภพ ย่างกุลไพโรจน์ รหัส 51362954
 : นายทศวรรษ รักสกุล รหัส 51362947
 : นายวันเฉลิม เมืองพระฝาง รหัส 51361391

ที่ปรึกษาโครงการ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์
 สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2554

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรัตนนคร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
 การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

.....
 ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

.....
 กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ปฐมศก วิไลพล)

.....
 กรรมการ
 (ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)

ชื่อหัวข้อโครงการ : การพัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้ว
 สูญญากาศชนิดท่อความร้อน
 (Thermal Performance Development of Evacuated Tube Solar
 Collector with Heat Pipes)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายกิตติภพ อย่างกุลไพโรจน์ รหัส 51362954
 : นายทศวรรษ รักสกุล รหัส 51362947
 : นายวันเฉลิม เมืองพระฝาง รหัส 51361391

ที่ปรึกษาโครงการ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2554

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ศึกษาผลของชนิดท่อความร้อน อัตราการไหลของน้ำ และความดันที่อยู่หว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยตัวรับรังสีแสงอาทิตย์เป็นแบบท่อแก้วสุญญากาศทำจาก Borosilicate มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ 0.1934 m^2 ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบสร้างจากท่อทองแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0016 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0022 m ยาว 15 m นำมาขัดไปมา 5 โค้งเหลี่ยม และท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะสร้างจากท่อทองแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.019 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.022 m ยาว 1.8 m ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้ง 2 ชนิดมีเท่ากันคือ 1.5 m 0.25 m และ 0.05 m ค่าความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนเป็น -80 kPa -40 kPa และ 0 kPa ใช้กับอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และ 0.1 L/min ตามลำดับ ใช้สาร R-134a เป็นสารทำงาน โดยอัตราการเติมสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบเป็น 50% ของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด และอัตราการเติมสารทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนเป็น 70% ของปริมาตรส่วนทำระเหย ทำการทดลองเก็บข้อมูลตั้งแต่ช่วงเวลา 9:00 น. - 17:00 น. จากการเปรียบเทียบสมรรถนะท่อความร้อนทั้งสองชนิด พบว่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนทั้งสองมีค่าเท่ากัน ณ อัตราการไหลและความดันเดียวกัน ซึ่งอัตราการไหล 0.1 L/min จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัตราการไหล 0.05 L/min ของทุกๆ ค่าความดันเกจ ที่อัตราการไหล 0.05 L/min พบว่าที่ความดันเกจ -80 kPa มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 53.37% และที่ความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa มีค่าลดลง 40.02% และ 30.96% ตามลำดับ และที่อัตราการไหล 0.1 L/min พบว่าที่ความดันเกจ -80 kPa มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 67.76% และที่ความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa มีค่าลดลง 55.18% และ 42.92% ตามลำดับ

Project title : Thermal Performance Development of Evacuated Tube Solar Collector with Heat Pipes

Name : Mr. Kittipop Yangkulphairoch ID. 51362954
: Mr. Thosawat Raksakul ID. 51362947
: Mr. Wanchalerm Muamgprafang ID. 51361391

Project advisor : Asst. Prof. Dr. Piyanan Charoensawan

Major : Mechanical Engineering

Department : Mechanical Engineering

Academic year : 2011

Abstracet

This project studied the effects of heat pipe types, water flow rates and pressures between inner surface of evacuated glass tube and heat pipe wall on the operating performance of heater. The evacuated tube was made of borosilicate consists with the irradiation area of 0.1934 m^2 . The closed-loop oscillating heat pipe was made of copper tube with inside diameter of 0.0016 m, outside diameter of 0.0022 m and 15 m length. Its number of turns was 5. The two phase closed thermosyphon was made of copper tube with 0.019 m inside diameter, 0.022 m outside diameter and length of 1.8 m. The evaporator, condenser and adiabatic lengths of both two types of heat pipes were the same as 1.5 m, 0.25 m and 0.05 m respectively. The gage pressures between inner surface of evacuated glass tube and heat pipe wall were -80 kPa, -40 kPa and 0 kPa. The water flow rates were 0.05 L/min and 0.1 L/min. R-134a was used as working fluid with filling ratio of 50% of the total internal tube volume for closed-loop oscillating heat pipe and 70% of evaporator volume for Thermosyphon. All experiments were done from 9.00 am until 5.00 pm. It was found from the experiment results that the thermal efficiencies of solar water heater for both types of heat pipe were equal at the same flow rate and pressure. The efficiencies for flow rate of 0.1 L/min were higher than that for flow rate of 0.05 L/min

at all pressures. At flow rate of 0.05 L/min, the maximum efficiency occurred at the gage pressure of -80 kPa. Its value was 53.37%. The efficiencies for -40 and 0 kPa were lower and their values were 40.02% and 30.96% respectively. At flow rate of 0.1 L/min, the maximum efficiency also occurred at the gage pressure of -80 kPa. Its value was 67.76%. The efficiencies for -40 and 0 kPa were lower and their values were 55.18% and 42.92% respectively.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำในการทำโครงการจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์วาทุทธิ์ ภูมิร ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน

ขอขอบคุณ นายศุภชัย ชุมมนวัฒน์ และนายพงษ์ศักดิ์ เกียรติเจริญศิริ ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านการทำโครงการและด้านเอกสาร

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจสม่ำเสมอตลอดมา



คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฅ
สารบัญกราฟ	ฉ
ลำดับสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
1.3 ขอบเขตของการโครงการ	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.6 งบประมาณที่ใช้	6
1.7 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน	6
1.8 สถานที่ปฏิบัติงาน	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 ค่าคงที่แสงอาทิตย์	7
2.2 ประเภทของรังสีที่ผิวโลก	7
2.3 ทิศทางของรังสีตรง	7
2.4 ลักษณะคลื่นพลังงานแสงอาทิตย์	8
2.5 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์	8
2.6 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์	9
2.7 ส่วนประกอบเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์	10
2.8 ประเภทตัวรับรังสีของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	11
2.9 หลักการทำงานของท่อแก้วสุญญากาศ	12
2.10 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Thermosyphon)	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating or Pulsating Heat Pipe)	18
2.12 ลักษณะของตัวรับแสงแบบรวมรังสี	19
2.13 มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ ASHRAE Standrd 93-77	22
2.14 ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	22
2.15 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	
3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	25
3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา	26
3.3 การตั้งสมมุติฐาน	27
3.4 การออกแบบ	27
3.5 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	30
3.6 การดำเนินการทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 ข้อมูลค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง	39
4.2 ผลกระทบของค่าความดันสุญญากาศและชนิดท่อความร้อน	41
4.3 ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำ	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองและผลการวิเคราะห์	48
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดลอง	53
ภาคผนวก ข กราฟข้อมูลการทดลอง	60
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติ	64
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ	69
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	82

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน	6
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา	26
ตารางที่ ก 1 ข้อมูลการทดลองวันที่ 25 มกราคม 2555	54
ตารางที่ ก 2 ข้อมูลการทดลองวันที่ 26 มกราคม 2555	55
ตารางที่ ก 3 ข้อมูลการทดลองวันที่ 28 มกราคม 2555	56
ตารางที่ ก 4 ข้อมูลการทดลองวันที่ 29 มกราคม 2555	57
ตารางที่ ก 5 ข้อมูลการทดลองวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2555	58
ตารางที่ ก 6 ข้อมูลการทดลองวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555	59
ตารางที่ ค 1 คุณสมบัติของสาร R-134a	65
ตารางที่ ค 2 คุณสมบัติของอากาศ	67
ตารางที่ ค 3 คุณสมบัติของน้ำ	68
ตารางที่ ง 1 ผลการคำนวณค่าอัตราการความร้อนที่แผ่รังสีแสงอาทิตย์ได้รับในแต่ละ ช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิว ท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa	71
ตารางที่ ง 2 ผลการคำนวณค่าอัตราการความร้อนที่ได้รับในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหล ของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อ ความร้อน -80 kPa	72
ตารางที่ ง 3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหล ของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อ ความร้อน -80 kPa	73
ตารางที่ ง 4 ผลการคำนวณค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละ ช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิว ท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa	75
ตารางที่ ง 5 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 25 มกราคม 2555	76
ตารางที่ ง 6 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 26 มกราคม 2555	77
ตารางที่ ง 7 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 28 มกราคม 2555	78
ตารางที่ ง 8 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 29 มกราคม 2555	79
ตารางที่ ง 9 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2555	80
ตารางที่ ง 10 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555	81

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ	2
รูปที่ 1.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศแบบปิด	2
รูปที่ 1.3 ส่วนต่างๆ ของสารทำงานในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	3
รูปที่ 1.4 ท่อความร้อนแบบสั้นทั้ง 3 แบบ	4
รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี	8
รูปที่ 2.2 ไพรานอมิเตอร์	10
รูปที่ 2.3 ไพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย	10
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	11
รูปที่ 2.5 ตัวรับความร้อนแบบท่อสุญญากาศ	12
รูปที่ 2.6 การสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากท่อแก้วสุญญากาศ	13
รูปที่ 2.7 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	14
รูปที่ 2.8 ตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน	15
รูปที่ 2.9 วงจรตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	16
รูปที่ 2.10 ท่อความร้อนแบบสั้นทั้ง 3 แบบ	19
รูปที่ 2.11 ตัวรับแสงอาทิตย์แบบรวมรังสีลักษณะต่างๆ	20
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่นรวมแสง	21
รูปที่ 3.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน	25
รูปที่ 3.2 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	27
รูปที่ 3.3 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ	28
รูปที่ 3.4 ภาพฉายและภาพ 3 มิติของโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์	28
รูปที่ 3.5 ภาพฉายด้านหน้าและภาพ 3 มิติของแผ่นสะท้อนแสง	29
รูปที่ 3.6 ภาพฉายและภาพ 3 มิติของถังน้ำร้อน	29
รูปที่ 3.7 ภาพ 3 มิติของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อน	30
รูปที่ 3.8 การเติมสารทำความเย็น R-134a	31
รูปที่ 3.9 โครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์	32
รูปที่ 3.10 การหุ้มฉนวนของถังน้ำร้อน	33
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด	33
รูปที่ 3.12 ไพรานอมิเตอร์	34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 ไพรานอมิเตอร์	34
รูปที่ 3.13 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	34
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างสายเทอร์โมคัปเปิล	35
รูปที่ 3.15 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	35
รูปที่ 3.16 จุดเก็บข้อมูลของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	36



สารบัญกราฟ

	หน้า
กราฟที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา	39
กราฟที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับกับเวลา	40
กราฟที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำ ในถังน้ำร้อนกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.05 L/min	41
กราฟที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำ ในถังน้ำร้อนกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.1 L/min	42
กราฟที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.05 L/min	43
กราฟที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.1 L/min	44
กราฟที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาที่ความดันเกจ -80 kPa	45
กราฟที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาที่ความดันเกจ -40 kPa	46
กราฟที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาที่ความดันเกจ 0 kPa	47
กราฟที่ ข 1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับทางออกเทียบกับเวลา	61
กราฟที่ ข 2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน, ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min	62
กราฟที่ ข 3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน, ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min	63

ลำดับสัญลักษณ์

		หน่วย
A_a	พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
A_c	พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
A_{out}	พื้นที่เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะส่วนควบแน่นต่อหนึ่งท่อ	m^2
A_x	พื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ	m^2
A_l	พื้นที่ท่อภายในที่พิจารณา	m^2
A_2	พื้นที่ท่อนอกที่พิจารณา	m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	$kJ/kg.K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	m
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	m
\dot{E}_g	ไม่มีแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในปริมาตรควบคุม	W/m^2
\dot{E}_{in}	พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (I_t)	W/m^2
\dot{E}_{out}	พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมหรือความร้อนที่สูญเสียจากระบบ	W/m^2
\dot{E}_{st}	พลังงานสะสมของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (Q_{st})	W/m^2
F_R	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	-
F	อัตราการเติมสารทำงานในส่วนทำระเหย มีค่า 70% ของความยาวของส่วนทำระเหย	-
g	แรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81	m^2/s
h_{air}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	$W/m^2.K$
h_w	การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับ	$W/m^2.K$
h_m	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2.K$
h_{eo}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย	$W/m^2.K$
h_{co}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น	$W/m^2.K$
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน	J/kg
I_t	ความเข้มแสงอาทิตย์	W/m^2
k_{Al}	ค่าการนำความร้อนถึงน้ำร้อน (อลูมิเนียม)	$W/m.K$
k_{Fiber}	ค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน	$W/m.K$
k	ค่าการนำความร้อน	$W/m.K$
k_{cu}	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของผนังท่อทองแดง	$W/m.K$

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

	หน่วย	
M_T	มวลของน้ำในระบบทำน้ำร้อนทั้งหมด	kg
M_{water}	มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	kg
\dot{m}_c	อัตราการไหลเชิงมวลของการไหล	kg/s
n	จำนวนท่อแก้วสุญญากาศ	-
P_a	ความดันบรรยากาศ	Pa
P_v	ความดันไอของสารทำงาน	Pa
P_r	เลขพรินด์เทิล	-
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด	W
Q_{lossl}	พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานการพาและการแผ่รังสีความร้อน	W/m ²
Q_{rad}	พลังงานที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรังสีแสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้ว	W/m ²
Q_{TS}	พลังงานเข้าสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์	W/m ²
Q_{radair}	ค่าความร้อนสูญเสียโดยการเปล่งรังสีความร้อนจากหลอดแก้วสู่อากาศ	W/m ²
Q_{st}	ความร้อนสะสมของน้ำในถังน้ำร้อน	W
Q_{tank}	ความร้อนสูญเสียผ่านทางถังน้ำร้อน	W
r_1	รัศมีที่ภายในที่พิจารณา	m
r_2	รัศมีที่ภายนอกที่พิจารณา	m
$r_{\text{tank,in}}$	รัศมีภายในของถังน้ำร้อน	m
$r_{\text{tank,out}}$	รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อน	m
r_{Fiber}	รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนแล้ว	m
Ra_D	เลขเรย์ลี	-
Re_f	ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของสารทำงาน	-
S_{eo}	พื้นที่ภายนอกในส่วนทำระเหย	m ²
S_{co}	พื้นที่ภายนอกในส่วนควบแน่น	m ²
T_{so}	อุณหภูมิที่แหล่งผลิตความร้อน	°C
T_s	อุณหภูมิที่แหล่งระบายความร้อน	°C
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างแหล่งผลิตความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน	°C
T_f	อุณหภูมิเฉลี่ย	°C
T_{co}	อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น	°C

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
T_w	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บจากช่วงเวลาก่อนหน้า	$^{\circ}\text{C}$
T_{wn}	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บค่าใหม่	$^{\circ}\text{C}$
T_{wn}	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บค่าใหม่	$^{\circ}\text{C}$
T_{in}	อุณหภูมิของของไหลขาเข้า	$^{\circ}\text{C}$
T_{out}	อุณหภูมิของของไหลขาออก	$^{\circ}\text{C}$
T_a	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$
T_{am}	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระบบทำน้ำร้อนจากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=n$	$^{\circ}\text{C}$
Δt	ช่วงเวลาที่ใช้คำนวณ	s
T_{ab}	อุณหภูมิส่วนพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์	$^{\circ}\text{C}$
U_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
Z	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
Z_1	ความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหย	K/W
Z_2	ความต้านทานความร้อนโดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะในส่วนทำระเหย	K/W
Z_3	ความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือด	K/W
Z_{3f}	ความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว	K/W
Z_{3p}	ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด	K/W
Z_4	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอน้ำกับผิวของของเหลวในส่วนของส่วนทำระเหย	K/W
Z_5	ความต้านทานความร้อนของ Pressure Drop จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่น	K/W
Z_6	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอน้ำกับผิวของของเหลวในส่วนควบแน่น	K/W
Z_7	ความต้านทานความร้อนภายในของเหลวที่กำลังควบแน่น	K/W
Z_8	ความต้านทานความร้อนโดยการนำผ่านตัวนำผ่านความหนาแน่นของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะในส่วนควบแน่น	K/W
Z_9	ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อน	K/W
Z_{10}	ความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อ	K/W
Z_{convair}	เป็นความต้านทานความร้อนโดยการพาของอากาศ	K/W

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
Z_{condw}	คือความต้านทานความร้อนถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นสู่น้ำร้อน	K/W
Z_{tot}	ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โทไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	K/W
Z_{tank}	ความต้านทานการสูญเสียความร้อนที่ถังน้ำร้อน	K/W
$(T\alpha)_e$	สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์	-
η_c	ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	%
ϵ_1	ค่าการเปล่งรังสีของท่อภายนอก	-
ϵ_2	ค่าการเปล่งรังสีของท่อภายใน	-
σ	ค่าสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.817×10^{-8}	$W/m^2 \cdot K^4$
β	$(1/((T_s + T_\infty)/2))$	K^{-1}
ν	ความหนืด	m^2/s
α	สภาพแพร่ผ่านความร้อน	m^2/s
μ_f	ความหนืดของของเหลว	$N \cdot s/m^2$
ϕ_2	merit number $(Lk^3 \rho^2 / \mu_f)^{0.25}$	$kg/(K^{0.25} s^{2.5})$
μ_1	สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน	m^2/s
ρ_1	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m^3
ρ_2	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของก๊าซ	kg/m^3
λ_1	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน	$W/m \cdot K$
AO	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่วัดจากจุดบนสุด	m
BO	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $1/4$ ของท่อด้านบนสุด	m
CO	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $1/2$ ของท่อด้านบนสุด	m
DO	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $3/4$ ของท่อด้านบนสุด	m
A4	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่วัดจากจุดบนสุดถึงระยะจุดขอบบนสุดของตัวโค้งแผ่นรวมแสง	m
B3	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $1/4$ ของท่อด้านบนสุดถึงระยะจุดของโค้งแผ่นรวมแสง	m
C2	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $3/4$ ของท่อด้านบนสุดจุดของโค้งแผ่นรวมแสง	m
D1	ระยะวัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมที่ระยะ $3/4$ ของท่อด้านบนสุดถึงระยะจุดของโค้งแผ่นรวมแสง	m

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
m	อัตราการไหลของน้ำ	L/min
P	ค่าความดันเกจภายในท่อแก้วสุญญากาศที่อยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้ว	Pa
T_{c1}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c2}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบด้านนอกด้านล่าง (ส่วนบน)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c3}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบด้านนอกด้านบน (ส่วนล่าง)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c4}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบด้านนอกด้านล่าง (ส่วนล่าง)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c5}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอกด้านบน (ส่วนล่าง)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c6}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอกด้านล่าง (ส่วนล่าง)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c7}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอกด้านบน (ส่วนบน)	$^{\circ}\text{C}$
T_{c8}	อุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอกด้านล่าง (ส่วนบน)	$^{\circ}\text{C}$
T_{wi3}	อุณหภูมิน้ำเข้าท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wi4}	อุณหภูมิน้ำเข้าท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wo1}	อุณหภูมิน้ำออกท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wo2}	อุณหภูมิน้ำออกท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wi1}	อุณหภูมิน้ำเข้าท่อสั้นวงรอบ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wi2}	อุณหภูมิน้ำเข้าท่อสั้นวงรอบ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wo3}	อุณหภูมิน้ำออกท่อสั้นวงรอบ	$^{\circ}\text{C}$
T_{wo4}	อุณหภูมิน้ำออกท่อสั้นวงรอบ	$^{\circ}\text{C}$
T_{A1}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$
T_{A2}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

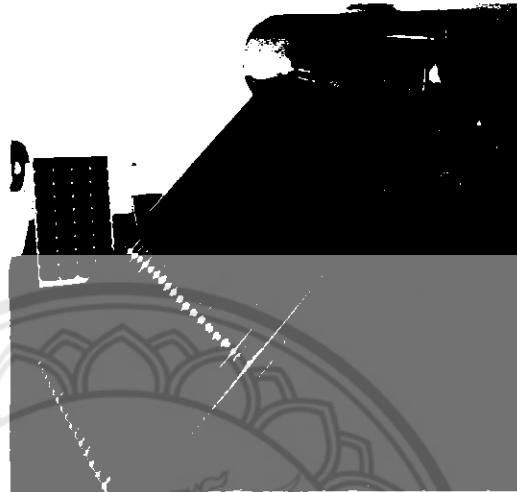
พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่สำคัญชนิดหนึ่งและเป็นพลังงานสะอาด การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางออกของการแก้ไขปัญหาสภาวะวิกฤติด้านพลังงานเนื่องจากจำนวนประชากรของโลกที่เพิ่มสูงขึ้นและความผันผวนของราคาน้ำมันที่เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในปัจจุบัน พลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆหลายด้าน เช่น การนำมาให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ให้แสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ทำน้ำร้อน

การทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องมีอุปกรณ์หลักในการเปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน คือ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar collector) แบ่งเป็น 3 แบบ คือ แบบรวมแสง (Focusing Solar Collector) สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 40 ถึง 90 องศาเซลเซียส และแบบท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส พบว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสง (Focusing Solar Collector) จะทำความร้อนได้สูงที่สุด แต่ต้นทุนอุปกรณ์ค่อนข้างสูงและพื้นที่ติดตั้งมาก ดังนั้นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ดังรูปที่ 1.1 จึงถูกนำมาใช้และทำการวิจัยอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) สามารถทำความร้อนได้สูง ส่วนตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) ยังมีความสามารถในการทำความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับทั้ง 3 แบบ [1]

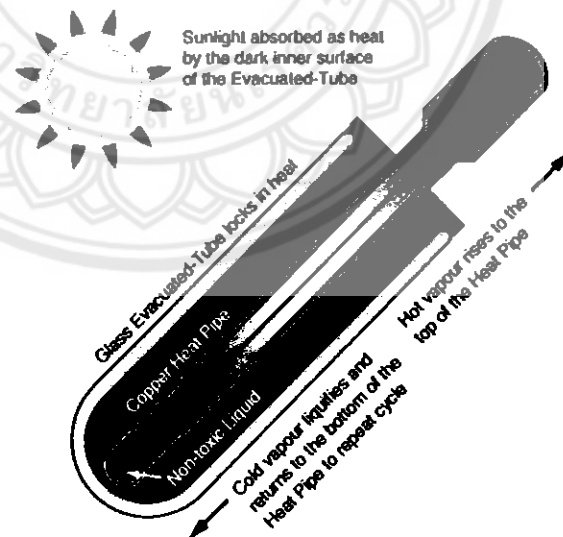
การนำความร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศนำมาใช้ได้ 2 แบบ คือ ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบเปิดและแบบปิดสองสถานะ เนื่องจากท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะดังรูปที่ 1.2 นั้นจะมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแบบเปิด เพราะที่เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ จะถ่ายเทความร้อนแฝง (Latent Heat) ขณะที่เทอร์โมไซฟอนแบบเปิดจะถ่ายเทความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) [2]

หลักการทำงานของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะภายในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะบรรจุสารทำงาน (Working Fluid) จำนวนหนึ่งและน้ำร้อนที่ต้องการนำมาใช้งานนั้นจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับตำแหน่งของส่วนควบแน่น

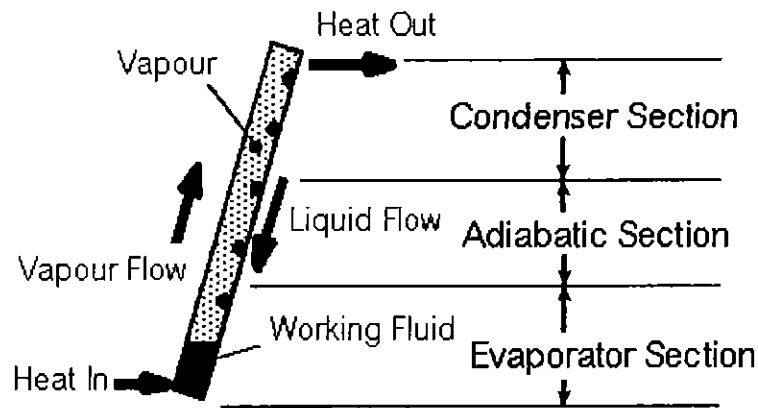
(Condenser) โดยที่ส่วนควบแน่นนี้ต้องอยู่ในระดับที่สูงกว่าส่วนทำระเหย (Evaporator) ส่วนของสารทำงานสามารถแบ่งได้ 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (Evaporator Section) ส่วนที่ไม่มีการส่งถ่ายความร้อน (Adiabatic Section) และส่วนคายความร้อนหรือส่วนควบแน่น (Condenser Section) แสดงดังในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.1 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ [3]



รูปที่ 1.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศแบบปิด [4]

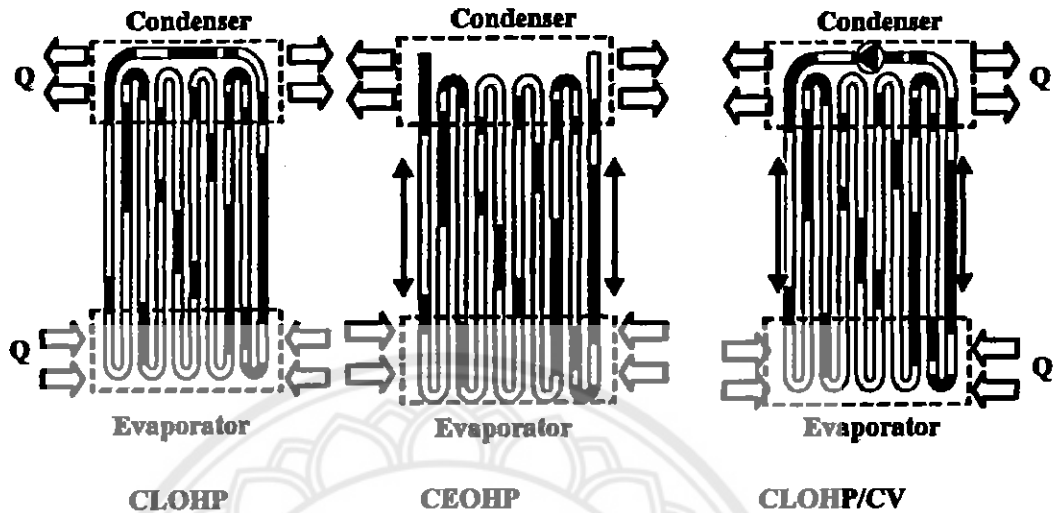


รูปที่ 1.3 ส่วนต่างๆ ของสารทำงานในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ [5]

ท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating Heat Pipe, PHP) ซึ่งเป็นท่อความร้อนที่พัฒนาต่อจากท่อความร้อนธรรมดาและมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำท่อความร้อนแบบสั่นมาประยุกต์ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อแก้วสุญญากาศ โดยท่อความร้อนแบบสั่นสร้างขึ้นมาจากท่อคาปิลลารีวนำมาขุดไประหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเกิดเป็นโค้งเล็กๆ ภายในท่อจะดูดอากาศออกแล้วเติมสารทำงานเข้าไป และภายในท่อสารทำงานจะจัดเรียงตัวสลับกันไปมาระหว่างของเหลวและฟองไอ ถ่ายเทความร้อนได้โดยการไหลเวียนและสั่นในแนวแกนของสารทำงาน ภายในท่อร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานภายในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves, CLOHP/CV) ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-End Oscillating Heat Pipe, CEOHP) และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe, CLOHP) ดังรูปที่ 1.4 โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับจะทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ แต่เนื่องจากท่อที่ใช้สร้างท่อความร้อนนี้มีเส้นศูนย์กลางภายในเล็กมาก การติดตั้งวาล์วกันกลับจึงเป็นไปได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง การใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจึงแพร่หลายมากกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ และแบบสั่นปลายปิด

การวิจัยและพัฒนาท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีอย่างต่อเนื่อง Charoensawan, P. et al. (2003) [17] ศึกษาทดลองถึงผลของตัวแปรที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.2 cm และ 0.1 cm จำนวนโค้งเล็กๆ 5 ถึง 23 โค้งเล็กๆ สารทำงานใช้น้ำเอทานอล และ R123 อัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายใน

ต่อทั้งหมด พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน จำนวนโค้งเลี้ยว สารทำงาน และรูปแบบการสร้างท่อความร้อนแบบล้นวงรอบจะมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อน



รูปที่ 1.4 ท่อความร้อนแบบล้นทั้ง 3 แบบ [6]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบล้นวงรอบที่ประยุกต์จากงานวิจัยข้างต้น เปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนกับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two phase Closed Thermosyphon) และใช้สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบล้นวงรอบ

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบล้นวงรอบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ตัวแปรควบคุม

1.3.1.1 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นแบบท่อแก้วสุญญากาศเป็นแบบท่อแก้ว 2 ชั้น ทำมาจาก Borosilicate มีความยาวท่อแก้วสุญญากาศ 1.5 m

1.3.1.2 ความยาวส่วนควบแน่นของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ 0.25 m ความยาวของส่วนที่ไม่มี การถ่ายเทความร้อนไม่เกิน 0.055 m ส่วนทำระเหย 1.5 m

1.3.1.3 สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน

1.3.1.4 ใช้ค่าพลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศของจังหวัดพิษณุโลก และทดสอบใน ช่วงเวลา 10:00 น.-13:00 น.

1.3.1.5 ท่อแก้วทำมุมเอียง 16° จากแนวระดับ

1.3.2 ตัวแปรต้น

1.3.2.1 อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และ 0.1 L/min

1.3.2.2 ชนิดท่อความร้อน

- ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะทำจากทองแดง อัตราเติมสารทำงาน 70% ของ ปริมาตรส่วนทำระเหย

- ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทำจากทองแดง อัตราเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายใน ท่อทั้งหมด

1.3.2.3 ความดันภายในท่อแก้วสุญญากาศอยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้วทำให้ เป็นสุญญากาศ

1.3.3 ตัวแปรตาม

1.3.3.1 ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีต่างๆเกี่ยวกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อความร้อน แบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

1.4.2 ตั้งสมมติฐาน กำหนดขอบเขต และตัวแปรที่ต้องการศึกษา

1.4.3 สร้างเครื่อง และทำการทดลอง

1.4.4 บันทึกผลการทดลอง

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1.4.6 สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน

1.4.7 นำเสนอโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

1.5.2 เข้าใจผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศ

1.6 งบประมาณที่ใช้

โครงสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	1500 บาท
เอกสารรายงาน	1500 บาท
รวม	3000 บาท

1.7 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

กิจกรรม	2554							2555	
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาทฤษฎี บทความที่เกี่ยวข้อง	←————→								
2. ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อน					←————→				
3. สร้างเครื่องทำน้ำร้อน						←————→			
4. ทดลองและบันทึกผล							←————→		
5. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการทดลอง								←————→	←————→
6. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									←————→
7. นำเสนอผลงาน									←————→

1.8 สถานที่ปฏิบัติงาน

หน่วยวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการและทฤษฎีคือ ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สมการของการถ่ายเทความร้อน ประสิทธิภาพ ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีละเอียด ดังต่อไปนี้

2.1 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลมจึงทำให้ระยะห่าง ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆโดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7% ระยะห่างเฉลี่ย ระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่า ประมาณ 1.495×10^{11} m ค่าคงที่รังสีอาทิตย์ (Solar Constant) คือ ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ $1,367 \text{ W/m}^2$ หรือ $432 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{h}$ บนพื้นผิวโลกจะมีความร้อนประมาณ 946.3 W/m^2

2.2 ประเภทของรังสีที่ผิวโลก

ประเภทของรังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกเราสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

รังสีตรง (Beam or Direct Radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิว รับรังสี มีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลก และวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบบนพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของ ท้องฟ้า

รังสีรวม (Total or Global Radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบบนผิวรับแสง ในกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจาย จากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Total Radiation สำหรับกรณีผิวรับแสง เป็นพื้นราบ รังสีรวมจะมาจากผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Global Radiation

2.3 ทิศทางของรังสีตรง

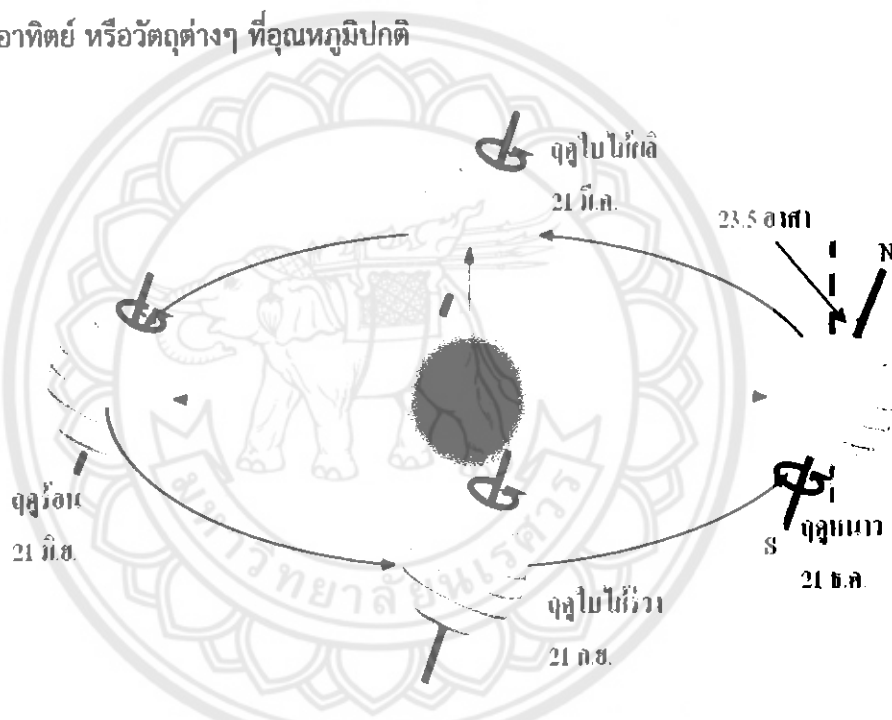
ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างระนาบการหมุนของโลกที่เวลาใดๆ กับรังสีตรง หรือ ตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายโดยใช้มุมต่างๆ ดังนี้ ละติจูด

(Latitude) คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง -90 องศา ถึง +90 องศา

2.4 ลักษณะคลื่นพลังงานแสงอาทิตย์

การแผ่รังสีแสงอาทิตย์ที่มีความสำคัญต่อพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนแบ่งเป็น 2 ช่วงคลื่น

- รังสีแสงอาทิตย์หรือรังสีคลื่นสั้น (Solar or Short-Wave Radiation) เป็นรังสีที่ปล่อยจากดวงอาทิตย์ มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0 μm ซึ่งประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย
- รังสีคลื่นยาว (Long-Wave Radiation) เป็นรังสีที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมปกติจะมีความยาวคลื่นมากกว่า 3.0 μm เช่น รังสีที่แผ่ออกจากบรรยากาศ ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ หรือวัตถุต่างๆ ที่อุณหภูมิปกติ



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี [7]

2.5 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นรูปวงรีดังรูปที่ 2.1 โดยที่แกนของโลกเอียง 23.5° ในฤดูร้อนโลกเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์ ทำให้ซีกโลกเหนือกลายเป็นฤดูร้อน และซีกโลกใต้กลายเป็นฤดูหนาว ในเวลาหกเดือนต่อมาโลกโคจรไปอยู่อีกด้านหนึ่งของวงโคจร โลกเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์ (แกนของโลกเอียง 23.5° คงที่ตลอดปี) ทำให้ซีกโลกใต้กลายเป็นฤดูร้อน และซีกโลกเหนือกลายเป็นฤดูหนาว ประมาณวันที่ 21 มีนาคม ทำให้กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน จากนั้นดวงอาทิตย์จะค่อยกลับมาทางทิศตะวันออกอีกครั้ง ประมาณวันที่ 22 กันยายน ทำให้กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน ในฤดูหนาวดวงอาทิตย์อยู่ค่อนไปทางทิศใต้มากขึ้นในแต่ละวัน และจะอยู่ค่อนไปทางทิศใต้มากที่สุด

ประมาณวันที่ 21 ธันวาคม ดวงอาทิตย์ขึ้นช้าและตกเร็ว ทำให้กลางวันยาวนานกว่ากลางวัน หลังจากนั้นก็จะอยู่ก่อนกลับมาทางทิศตะวันออกอีกเช่นเดิม

2.6 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดรังสีรวม รังสีตรง รังสีกระจาย และชั่วโมงที่มีแดด

- ไพรานอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดค่ารังสีรวม ปกติจะใช้วัดบนพื้นราบแต่อาจประยุกต์ใช้วัดรังสีกระจายได้ด้วยแหวนหรือจานบังเงา
- ไพเฮลิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์
- เครื่องบันทึกแดด เป็นอุปกรณ์วัดจำนวนชั่วโมงที่มีแดด

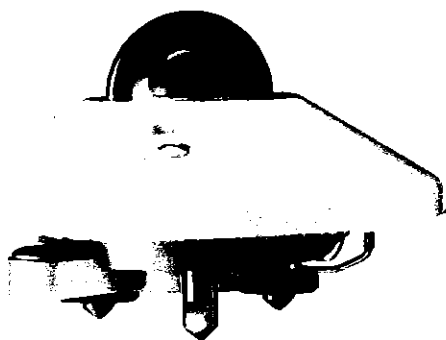
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไพรานอมิเตอร์เนื่องจากไพเฮลิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีแสงอาทิตย์ตามทิศทางของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมา แต่งานวิจัยนี้ต้องการความเข้มแสงตามทิศที่รังสีจากดวงอาทิตย์ส่องลงมากระทบตามแนวของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนเครื่องบันทึกแดดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดจำนวนชั่วโมงที่มีแดด ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการวัดความเข้มแสง ดังนั้นเนื้อหาของอุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์จะกล่าวเฉพาะไพรานอมิเตอร์

ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

ไพรานอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดรังสีรวมที่ประกอบด้วยเทอร์โมไพล์ (Thermopile) หลายชุดต่อกัน ตัวรับรังสีบรรจุอยู่ในโดมแก้วครึ่งทรงกลม โดยโดมทำหน้าที่ป้องกันตัวรับแสงจากฝน ความชื้น ฝุ่น ลม และไม่ให้ตัวรับแสงเสียความร้อนไป ตัวรับแสงต้องวัดค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่มาจากรังสีทรงกลมท้องฟ้าเท่านั้น จึงต้องป้องกันรังสีที่สะท้อนจากพื้นดินและสิ่งรอบด้าน โดยมีจาน (Guard) สวมอยู่โดยรอบโดมกันรังสีที่สะท้อน ตัวไพรานอมิเตอร์มีสกรูปรับระดับ โดยปกติจะปรับให้ตัวรับแสงอยู่ในแนวราบ

การวัดรังสีกระจายบนแนวอนใช้ไพรานอมิเตอร์ที่วัดรังสีรวม แต่ต้องมีเครื่องบังรังสีตรงไม่ให้ตกกระทบผิวรับแสง เครื่องบังรังสีตรงมี 2 ลักษณะคือ

แผ่นวงกลมบังแสง (Shading Disc) เป็นแผ่นวงกลมเล็กที่กั้นไม่ให้รังสีตรงตกกระทบผิวรับแสง เนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางของรังสีตรงตลอดวัน ชั้นวงกลมจะต้องต่อกับเครื่องมือตามแสงอาทิตย์เงาของชั้นวงกลมจะตกบนผิวรับแสงตลอดวัน รังสีบนผิวรับแสงจึงเป็นเฉพาะรังสีกระจาย



รูปที่ 2.2 โพรานอมิเตอร์ [8]

วงแหวนบังแสง (Shading Ring) เป็นแถบโลหะโค้งเป็นส่วนหนึ่งของวงแหวน ซึ่งวางให้เงาตกบนผิวรับแสง วงแหวนจะวางเอียงให้ระนาบของวงแหวนเท่ากับเส้นรุ้งของที่ตั้ง และขยับตามฤดูกาลให้เงาของวงแหวนตกบนผิวรับแสงเสมอ



รูปที่ 2.3 โพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย [8]

2.7 ส่วนประกอบเครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการใช้รังสีจากดวงอาทิตย์ เพื่อผลิต เป็น ความ ร้อน โดยมี ส่วน ประกอบ สำคัญ คือ มีตัวรับความร้อน (Collectors) ถึงเก็บน้ำร้อน (Storage Tanks) ดังรูปที่ 2.4 สำหรับส่วนประกอบตัวรับความร้อนสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.7.1 ตัวดูดซับ ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนถูกดูดซับไว้ ซึ่งวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมีความจำเป็นมากในการทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากหากปราศจากตัวดูดซับจะทำให้ระบบการทำความร้อนไม่สามารถผลิตความร้อนมาให้เพียงพอต่อการทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้

2.7.2 ฉนวนกันความร้อน เป็นสิ่งป้องกันความร้อนรั่วไหล เนื่องจากฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อนรั่วไหลออกมาภายนอก ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงถือว่าฉนวนกัน ความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทุกๆ แบบ

2.7.3 ท่อน้ำทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปยังไปยังถังเก็บหรืออุปกรณ์ที่ต้องการใช้ความร้อนจากน้ำร้อน

2.7.4 ถังเก็บน้ำร้อน (Storage Tank) เป็นถังแบบปิดนิยมทำด้วยสแตนเลสอย่างดีที่ไม่เป็นสนิม ฉนวนหุ้มป้องกันการสูญเสียความร้อน



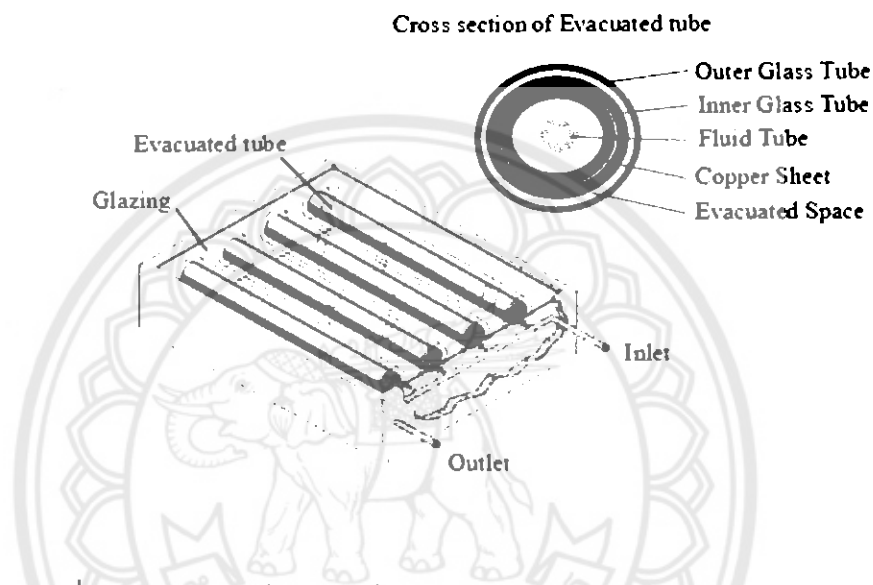
รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [9]

2.8 ประเภทตัวรับรังสีของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

2.8.1 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Collector) ประกอบด้วยแผ่นดูดซับรังสี ซึ่งเชื่อมติดกับกล่องหุ้มฉนวนกับความร้อน และมีแผ่นปิดด้านบน (โดยมากเป็นกระจก) โดยประสิทธิภาพของแผงรับรังสีจะลดลง เมื่อมีฝุ่นเกาะอยู่ตรงกระจกปิดแผง

2.8.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมศูนย์ (Concentrating Collector) ใช้กระจกรวมแสงตกกระทบกับตัวดูดซับ การรับแสงจะมีกระจกทรงพาราโบลิกและมีท่อดูดซับความร้อนพาผ่านที่จุดรวมแสงและมีของเหลวไหลภายในซึ่งสามารถทำอุณหภูมิได้สูงสุด

2.8.3 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated Glass Tube Collectors) เป็นประเภทที่นิยมใช้กันมากทั่วโลก ในรูปที่ 2.5 แผงตัวดูดรังสีประเภทนี้ติดตั้งอยู่ในท่อแก้วที่มีแรงดัน และเป็นสุญญากาศเพื่อลดการสูญเสียความร้อน โดยของไหลร้อนจะไหลผ่านตัวดูดซับรังสีโดยตรงในลักษณะท่อรูปตัว U หรือไหลทวนกระแสในระบบจากท่อหนึ่งไปอีกท่อหนึ่ง แต่ละท่อจะถูกเชื่อมต่อกัน อัตราการส่งผ่านความร้อนจะรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ สามารถทำให้ของไหลร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 90 °C หรือเกินกว่านั้นเพราะสุญญากาศเป็นฉนวนที่ยอดเยี่ยม



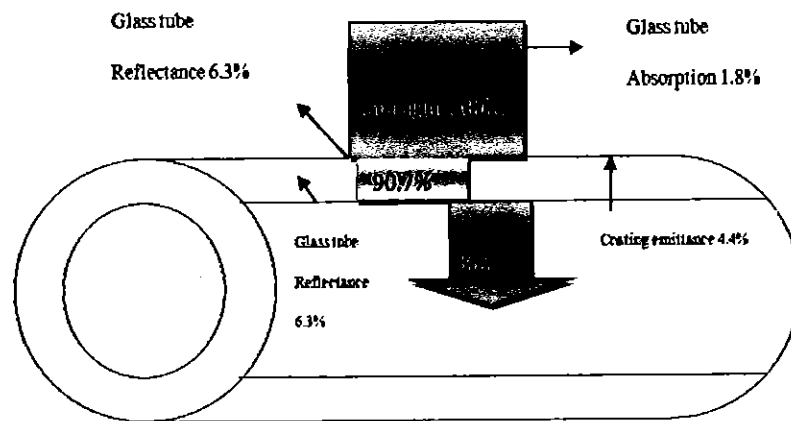
รูปที่ 2.5 ตัวรับความร้อนแบบท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube Collectors) [1]

2.9 หลักการทำงานของท่อแก้วสุญญากาศ

เมื่อท่อแก้วสุญญากาศได้รับรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์จะมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากท่อแก้วสุญญากาศ โดยที่มีการสูญเสียจากการสะท้อนของผิวท่อด้านนอกและด้านในรวมกันเท่ากับ 12.6% และตามผิวท่อแก้วอีก 1.8% รวมทั้งความต้านทานที่ผิวดูดซับอีก 4.4% เหลือนำไปใช้ 80% ดังรูปที่ 2.6 โดยจะเก็บความร้อนด้วยสารดูดซับรังสีที่เคลือบอยู่ในท่อแก้วชั้นใน แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับท่อความร้อน ซึ่งท่อความร้อนเป็นตัวนำความร้อนเข้าสู่ถังบรรจุน้ำเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งนี้ความเข้มของรังสีความร้อนในแต่ละวันจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมินี้

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเหตุผลที่เลือกใช้ตัวรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศได้ดังนี้

- ตัวรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศจะไม่มี การสูญเสียความร้อนจากการนำ และการพา ซึ่งดีกว่าตัวรับความร้อนแบบแผ่นเรียบที่มีความสูญเสียความร้อนได้ไว และมีประสิทธิภาพต่ำกว่า
- ตัวรับความร้อนแบบรวมศูนย์จะใช้พื้นที่ในการติดตั้งและใช้งานมาก และมีราคาต้นทุนสูง



รูปที่ 2.6 การสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากท่อแก้วสุญญากาศ [10]

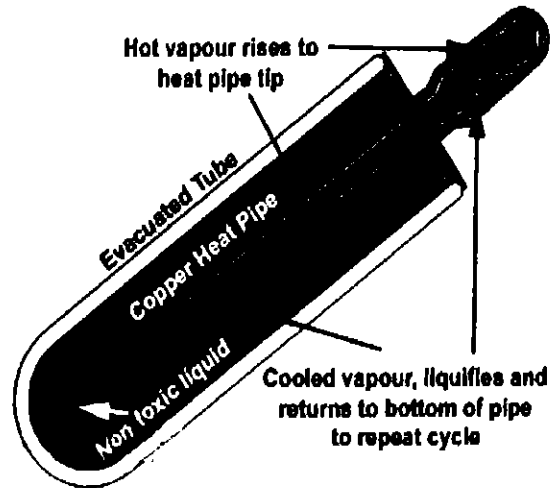
2.10 ท่อเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

ท่อเทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งท่อเทอร์โมไซฟอนแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ แบบเปิด และแบบปิดสองสถานะ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ เนื่องจากท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบเปิด ดังนั้นงานวิจัยนี้กล่าวเฉพาะเนื้อหาของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะเท่านั้น

ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ซึ่งไม่ได้พึ่งพาการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำเพียงอย่างเดียวแต่สารทำงานจะทำหน้าที่เร่งดูดซับความร้อนและความเข้มข้นของแสงแดด ทำให้ได้น้ำร้อนที่เร็วกว่าแม้แดดจะอ่อน สารทำงานที่ใช้ภายในท่อบรรจุสารทำงานที่มีความสามารถในการระบายความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดี โดยปกติสารทำงานที่ใช้ได้แก่ R-12, R-22, R134a, R-404a และ R-406a สารทำงานมีหน้าที่เก็บรวบรวมความร้อนและถ่ายเทให้กับน้ำโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อน

2.10.1 หลักการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

หลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะได้อาศัยความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย ซึ่งอยู่ด้านล่างโดยก๊าซหรือน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในจะเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อนเกิดขึ้น หลังจากที่ไอลอยไปอยู่ที่ส่วนควบแน่นก็จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลย้อนกลับลงมาตามผิวท่อด้านในของท่อโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นของเหลวที่ไหลลงมายังส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ทางด้านล่างของท่อก็จะระเหยกลายเป็นไอต่อไป ทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อน และทำงานเป็นวัฏจักรดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ [11]

2.10.2 การถ่ายเทความร้อนของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

สำหรับการทำงานของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two-Phase Closed Thermo syphon) ความสัมพันธ์ของความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Z) อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Q) และผลต่างอุณหภูมิระหว่างแหล่งผลิตความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน ($\Delta T = T_{so} - T_{si}$) คือ

$$Q = \frac{\Delta T}{Z} \quad (2.1)$$

โดยที่ T_{so} คือ อุณหภูมิที่แหล่งผลิตความร้อน, (K)

T_{si} คือ อุณหภูมิที่แหล่งระบายความร้อน, (K)

Z_1 และ Z_9 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งผลิตความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหยและระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อนตามลำดับ

$$Z_1 = \frac{1}{h_{\infty} s_{\infty}} \quad (2.2)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{\infty} s_{\infty}} \quad (2.3)$$

โดยที่ h_{∞} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย, ($W/m^2 \cdot K$)

s_{∞} คือ พื้นที่ผิวนอกในส่วนทำระเหย, (m^2)

h_{∞} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น, ($W/m^2 \cdot K$)

s_{∞} คือ พื้นที่ผิวนอกในส่วนควบแน่น, (m^2)

Z_2 และ Z_8 เป็นความต้านทานความร้อนที่ผ่านความหนาของผนังของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ

$$Z_2 = \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi L_c k} \quad (2.4)$$

$$Z_8 = \frac{\ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi L_c k} \quad (2.5)$$

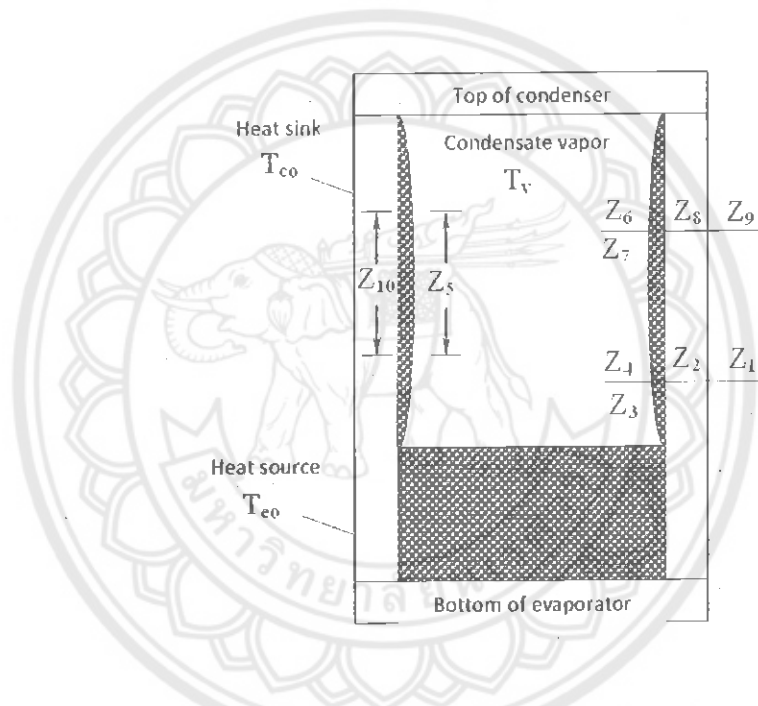
โดยที่ D_{out} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ, (m)

D_{in} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ, (m)

L_c คือ ความยาวของส่วนควบแน่น, (m)

L_e คือ ความยาวของส่วนทำระเหย, (m)

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), (W/m.K)



รูปที่ 2.8 ตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อน [12]

Z_3 และ Z_7 เป็นความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือดและควบแน่นในเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะตามลำดับ และขึ้นอยู่กับสมบัติของของไหล ขนาดของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและอัตราการถ่ายเทความร้อน วิธีการประมาณ Z_3 และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

$$Z_3 = Z_{3p}F + Z_{3r}(1-F) \quad (2.6)$$

$$Z_{3r} = \frac{CQ^{1/3}}{D_{in}^{4/3} g^{1/3} L_{evap} \Phi_2^{4/3}} \quad (2.7)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\Phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi \pi_{in} L_{evap})^{0.6}} \quad (2.8)$$

ถ้า $Z_{3p} < Z_{3f}$ ให้ $Z_3 = Z_{3p}$

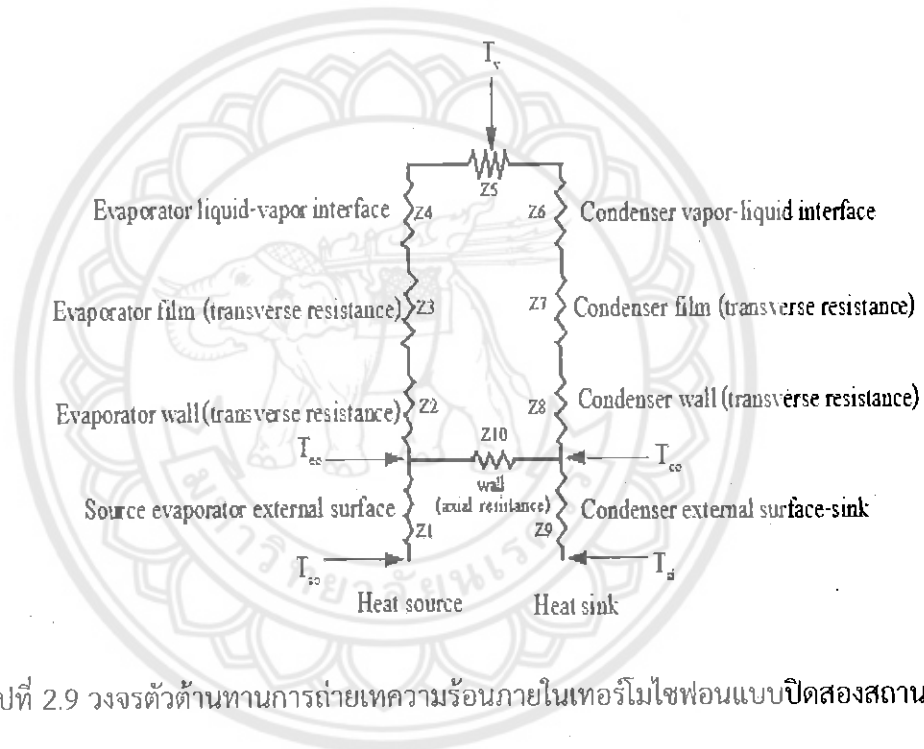
โดยที่ C คือ เป็นค่าที่ได้จากทฤษฎี $\left(\frac{1}{4}\right)\left(\frac{3}{\pi}\right)^{4/3} = 0.235$

Z_{3f} คือ ความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว, (K/W)

Z_{3p} คือ ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด, (K/W)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก

F คือ อัตราการเติมสารทำงานในส่วนทำระเหย



รูปที่ 2.9 วงจรตัวต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ [12]

ค่า Φ_3 ขึ้นกับสารทำงานในตัวสะสมสามารถหาได้จาก

$$\Phi_3 = 0.32 \frac{\rho_f^{0.65} k_f^{0.3} c_{pr}^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_f^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.9)$$

โดยที่ ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของสารทำงานสถานะของเหลว, (kg/m³)

ρ_v คือ ค่าความหนาแน่นของสารทำงานสถานะของไอ, (kg/m³)

k_f คือ ค่าการนำความร้อนของสารทำงานสถานะของเหลว, (W/m.K)

c_{pr} คือ ความร้อนจำเพาะของสารทำงานสถานะของเหลว, (kJ/kg.K)

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน, (kJ/kg)

μ_f คือ ค่าความหนืดของสารทำงานในสถานะของเหลว, (N.s/m²)

P_v คือ ความดันไอของน้ำ, (N/m²)

P_a คือ ความดันบรรยากาศ, (N/m²)

ถ้าสารทำงานเป็นน้ำ

$$\Phi_3 = 63 \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \quad (2.10)$$

และ
$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D_{in}^{4/3} g^{1/3} h(\Phi_2)^{4/3}} \quad (2.11)$$

เมื่อค่า $Re_r > 1300$ โดยที่สามารถหาได้จาก $Re_r = \frac{4Q}{h\mu\pi D_{in}}$

$$Z_7 = \frac{CQ^{1/3}}{D_{in}^{4/3} g^{1/3} h_{fg}(\Phi_2)^{4/3}} \times 191 Re_r^{-0.733} \quad (2.12)$$

และ
$$\Phi_2 = \left(\frac{h_{fg} k_r^3 \rho_r^2}{\mu_r} \right)^{0.25} \quad (2.13)$$

โดยที่ Φ_2 คือ Merit Number, (kg/(K^{0.75} S^{2.5}))

Re_r คือ ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของสารทำงาน

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างไอกับของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ตามลำดับ แต่ Z_4 และ Z_6 มีค่าน้อยมากดังนั้นจึงไม่พิจารณา

Z_5 เกิดจากความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งมีค่าน้อยมากดังนั้นจึงไม่พิจารณาเช่นกัน และ Z_{10} เป็นความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของผนังของภาชนะ

$$Z_{10} = \frac{(0.5L_c + L_a + 0.5L_c)}{A_x k_{copper}} \quad (2.14)$$

โดยที่ A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ, (m²) ซึ่ง $A_x = \frac{\pi}{4}(D_{out}^2 - D_{in}^2)$

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ ในทางกลับกันถ้าส่วนทำระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่น การถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่ออย่างเดียวเท่านั้นและมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสามารถใช้เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะเป็น Thermal Diode ได้ เงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกนคือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8} > 20 \quad (2.15)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ (2.15) ค่าความต้านทานความร้อนรวมคือ

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 + Z_9 \quad (2.16)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.15) จะได้

$$Z = Z_1 + [(Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8)^{-1} + (1/Z_{10})]^{-1} + Z_9 \quad (2.17)$$

เมื่อความร้อนไหลย้อนกลับใน Thermal Diode จะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนภายในและความต้านทานรวมที่พิจารณาเป็น

$$Z = Z_1 + Z_9 + Z_{10} \quad (2.18)$$

2.11 ชนิดและหลักการทำงานท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating or Pulsating Heat Pipe)

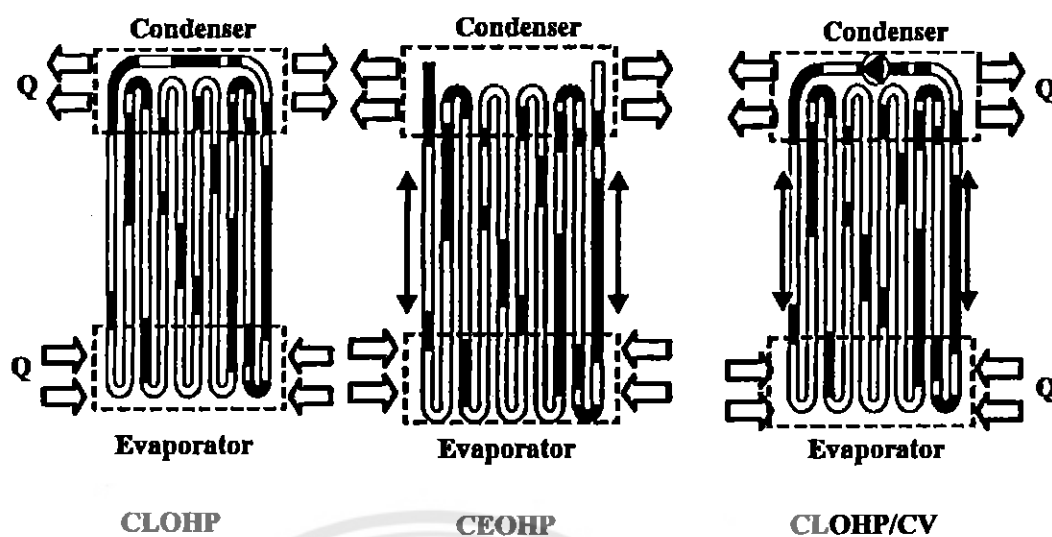
2.11.1 ชนิดของท่อความร้อนแบบสั่น

-ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating Heat Pipe; OHP) สามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ตามลักษณะโครงสร้างของท่อ (Maezawa, 1995) คือ

-ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด (Closed-End Oscillating Heat Pipe; CEOHP) ที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีซดกลับไปมาและเชื่อมปิดที่ปลายทั้งสองข้าง โดยแยกปลายทั้งสองข้างออกจากกันสำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการสั่นที่ขับเคลื่อนความดันที่กวาดแกว่งอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเดือดแบบฟอง (Nucleate Boiling)

-ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe; CLOHP) ที่ทำมาจากท่อคาปิลลารีซดกลับไปมาเช่นเดียวกับท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด แต่ต่างกันตรงที่มีการต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ ดังนั้นในกรณีการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานในแนวแกน

-ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกั้นกลับ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valves; CLOHP/CV) ทำจากท่อคาปิลลารีเช่นเดียวกับสองแบบข้างต้น แต่ต่างกันที่การต่อปลายท่อทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบโดยมีการติดวาล์วกั้นกลับไว้ในท่อตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป เพื่อให้สารทำงานนำความร้อนไหลเวียนไปในทางเดียว ซึ่งรูปแสดงโครงสร้างของท่อความร้อนแบบสั่นทั้ง 3 แบบไว้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ท่อความร้อนแบบสันทั้ง 3 แบบ [6]

2.11.2 หลักการทำงานและการเริ่มต้นการทำงานได้ของท่อความร้อนแบบสัน

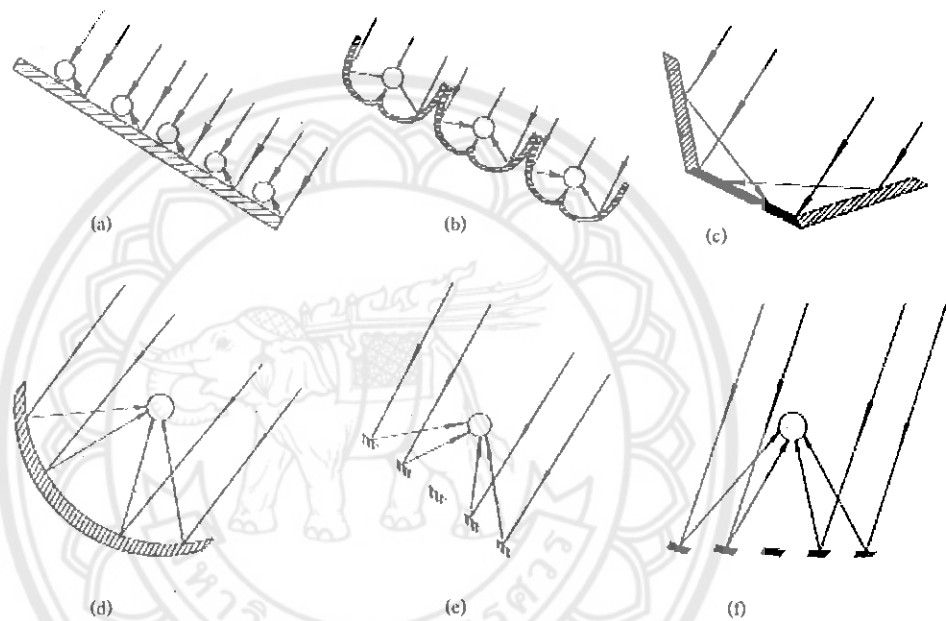
หลักการทำงานของท่อความร้อนแบบสันเกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปมาของสารทำงานร่วมกันกับการเปลี่ยนสถานะของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีก้อนของเหลว (Liquid Plug) และ ฟองไอ (Vapor Bubbles) เกิดร่วมกันในท่อความร้อนตลอดความยาวท่อ ทำให้เกิดสภาวะดังกล่าว ทำให้เกิดการทำให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤต และเป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำงานลงไปภายในท่อ โดยเติมด้วยปริมาตรบางส่วนของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด เมื่อท่อความร้อนแบบสันทำงานจะเกิดการระเหยในส่วนที่ได้รับความร้อนทำให้ความดันไอสูงขึ้นและขนาดฟองไอจะโตขึ้นด้วย ซึ่งฟองไอที่โตขึ้นนี้จะเกิดแรงขับเคลื่อน (Driving Force) ผลักเอาของเหลวให้เคลื่อนที่ต่อไปยังส่วนระบายความร้อน โดยการควบแน่นนี้ที่เกิดขึ้นจะยิ่งช่วยทำให้เกิดความดันแตกต่างของความดันระหว่างปลายทั้งสองข้างมีค่ามากขึ้น เนื่องจากท่อความร้อนทั้งหมดเป็นชิ้นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อฟองไอผลักให้ของเหลวเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนควบแน่น มันก็จะทำให้ก้อนของเหลวและฟองไอในแนวถัดไปเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนทำระเหยและก็จะมีความเร็วสูงขึ้นด้วย ซึ่งก็มีผลทำให้เกิดแรงผลักกลับ (Restoring Force) การทำงานร่วมกันระหว่างแรงขับเคลื่อนและแรงผลักกลับทำให้เกิดการสั่นตามแนวแกนท่อ การส่งผ่านความร้อนเกิดขึ้นจากการไหลกลับไปกลับมาของสารทำงานในส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น

2.12 ลักษณะของตัวรับแสงแบบรวมรังสี

ตัวรับแสงหลายชนิดสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มพลังของรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวรวมรังสีโดยการสะท้อนหรือหักเห ตัวรวมแสงที่เป็นทรงกระบอกจะรวมรังสีและโฟกัสที่มีลักษณะเป็นเส้นไปยังตัวดูดกลืนแสง ส่วนตัวรวมรังสีที่เป็นจานกลมจะรวมรังสีและโฟกัสที่มีลักษณะเป็นจุดไปยังตัวรับ

แสงและตัวดูดกลืนแสง ซึ่งอาจจะเป็นแบบนูนแบนหรือเว้า ลักษณะของตัวรับแสงอาทิตย์แบบรวมรังสี 6 แบบแสดงดังรูปที่ 2.11

โดยทั่วไปตัวรวมรังสีและตัวรับรังสีแสงจะมีขนาดเล็กกว่าช่องรับแสง ซึ่งเป็นผลมาจากรังสีตรง เนื่องจากมุมของรังสีที่ตกกระทบตัวรวมรังสีมีความสำคัญ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์สำหรับตัวเก็บรังสีเหล่านี้ซึ่งตัวสะท้อนรังสีที่มีผิวโค้งมักจะหันแกนเพื่อให้ดวงอาทิตย์อยู่ในแนวที่ต้องการและสามารถเคลื่อนที่ได้สองแกน แกนทั้งสองนั้นอาจจะเป็นแกนในแนวนอนและแนวตั้งหรือแกนหนึ่งทำมุมเอียงขนานกับแกนโลก และอีกแกนหนึ่งตั้งฉากกับผิวมันเอง



รูป 2.11 ตัวรับแสงอาทิตย์แบบรวมรังสีลักษณะต่างๆ (a) ตัวดูดกลืนแบบทอที่มีตัวสะท้อนรังสีอยู่ด้านหลัง (b) ตัวดูดกลืนแบบทอที่มีตัวสะท้อนเป็นแบบ Specular Cusp (c) ตัวรับแสงและตัวสะท้อนมีลักษณะเป็นระนาบ (d) ตัวรวมรังสีแบบพาราโบลา (e) ตัวสะท้อนแบบ Fresnel (f) แถวของฮีลิโอสแตคที่มีตัวรับแสงรวมอยู่ตรงกลาง [14]

รูปที่ 2.11 (a) และ (b) ตัวดูดกลืนเป็นทรงกระบอกวางเรียงตัวอยู่ห่างกันมีตัวสะท้อนอยู่ด้านหลังเพื่อสะท้อนรังสีตรงที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระหว่างตัวดูดกลืน รูป (a) แสดงตัวสะท้อนเป็นแบบแบนราบ รูป (b) แสดงตัวสะท้อนเป็นแบบ Specular Cusp รูป (c) ตัวรับแสงมีลักษณะเป็นระนาบมีตัวสะท้อนแสงแบบพาราโบลา ซึ่งอาจจะเป็นผิวแบบทรงกระบอกที่มีตัวรับแสงเป็นแบบทอหรือผิวโค้งที่มีตัวรับแสงเป็นแบบกลมหรือแบบครึ่งทรงกลม ตัวเก็บรังสีแบบทรงกระบอกชนิดนี้มีการศึกษาถึงรายละเอียดและอยู่ในระหว่างการประยุกต์ใช้งาน รูป (e) แสดงตัวสะท้อนแบบพาราโบลาสามารถใช้ตัวสะท้อนแบบ Fresnel แทนได้ กลุ่มตัวสะท้อนแบบแบนราบที่ถูกจัดเรียงโดยการหักเหรังสีที่ตกกระทบ

ตัวสะท้อนสามารถติดตั้งแยกจากกันและปรับตำแหน่งได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ รูป (f) การใช้ฮีลิโอสแตคจำนวนมากและมีตัวรับแสงอยู่บนหอคอย ซึ่งเป็นพื้นฐานในการออกแบบตัวเก็บรังสีที่มีตัวรับรังสีอยู่กลาง

2.12.1 ทฤษฎีรวมแสงเข้าท่อของ ทรอมเบ - มินเนล [14]

ทรอมเบ คิดค้นแผงรับแสงแบบนี้ขึ้นมาในปี 1975 จากนั้น มินเนลได้มีการพัฒนาขึ้นอีกครั้งในปี 1972 ลักษณะการรวมแสงของแผงรับแสงแบบ 180° ดังรูปที่ 1.12 ส่วนประกอบของลักษณะการรวมแสงของแผงรับแสงแบบรวมแสงนี้มีลักษณะคล้ายของแผงรับแสงแบบแผ่นราบ โดยฟลักซ์ของแสงอาทิตย์จะตกกระทบบที่จุดศูนย์กลางของท่อเท่านั้นความร้อนจะถ่ายเทไปยังของเหลวที่อยู่ในท่อ การรับแสงมีลักษณะคล้ายกับแผงรับแสงแบบแผ่นราบดังนี้

- ต้องการให้แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบลงแผ่นรวมแสงสะท้อนเข้าท่อดูดกลืนแสงทั้งหมดไม่ว่าจะดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดๆก็ตาม

- จุดต่างๆบนท่อดูดกลืนซึ่งทำมุม 2π สามารถรับการแผ่รังสีกระจายจากท้องฟ้าได้

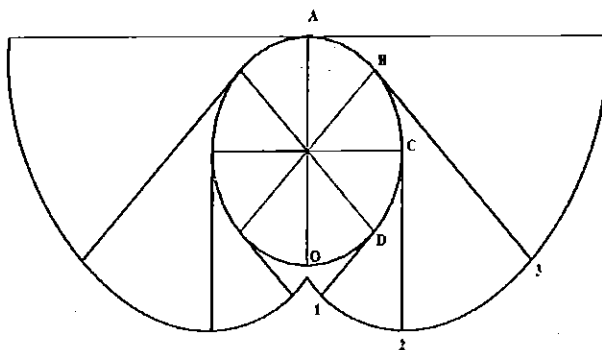
การออกแบบในขั้นต้นนิยมใช้มุม 180 องศาซึ่งถือว่าเป็นมุมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ท่อดูดกลืนแสงได้รับแสงตกกระทบบทุกจุด หรือระยะจตุรวมแสงของแผ่นรวมแสงควรมีค่าไม่ต่ำกว่า πD ของท่อดูดกลืน จากรูป 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่นรวมแสงสามารถอธิบายได้โดย

ระยะ AO วัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมต่อวัดจากจุดบนสุด จะเท่ากับระยะ A4 เป็นขอบบนสุดของตัวโค้งแผ่นรวมแสง

ระยะ BO วัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมต่อที่ระยะ $\frac{1}{4}$ ของท่อด้านบนสุดเท่ากับระยะ B3 ของโค้งแผ่นรวมแสง

ระยะ CO วัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมต่อที่ระยะ $\frac{1}{2}$ ของท่อด้านบนสุดเท่ากับระยะ C2 ของโค้งแผ่นรวมแสง

ระยะ DO วัดจากเส้นรอบวงครึ่งวงกลมต่อที่ระยะ $\frac{3}{4}$ ของท่อด้านบนสุด เท่ากับระยะ D1 ของโค้งแผ่นรวมแสง



เส้นรอบวง AO = ระยะ A4

เส้นรอบวง BO = ระยะ B3

เส้นรอบวง CO = ระยะ C2

เส้นรอบวง DO = ระยะ D1

รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่นรวมแสง [14]

2.13 มาตรฐานการทดสอบตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ ASHRAE Standard 93-77 [15]

เป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถทดสอบได้ทั้งในร่ม (Indoor) และ กลางแจ้ง (Outdoor) โดยสภาวะที่ใช้ทดสอบในโครงการนี้คือ กลางแจ้ง ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

2.13.1 ค่าต่ำสุดของความเข้มรังสีอาทิตย์ ในสภาวะจะทำการวัดที่พื้นผิวตั้งฉากกับรังสีตรงของรังสีแสงอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า 790 W/m^2

2.13.2 ค่าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ในการทดสอบจะทำการทดสอบในช่วงที่ท้องฟ้าโปร่ง ไม่มีเมฆ ซึ่งค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ระนาบตั้งฉากจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 32 \text{ W/m}^2$ ในช่วงเวลา 10 นาที

2.13.3 ค่าความเข้มรังสีกระจาย จะทำการทดสอบเมื่อความเข้มรังสีกระจายเฉลี่ยบนระนาบของแผงรับรังสีอาทิตย์ไม่เกิน 20% ของค่าความเข้มรังสีรวมบนระนาบรับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แต่ในการวิเคราะห์จะใช้ค่าความเข้มรังสีตรงและค่าความเข้มรังสีกระจาย

2.13.4 ช่วงอุณหภูมิอากาศสภาวะแวดล้อมการวิเคราะห์ทั้งหมดจะใช้อุณหภูมิอากาศสภาวะแวดล้อมไม่เกิน 30°C

2.13.5 สภาวะของลม ในการทดลองค่าความเร็วเฉลี่ยของลมจะต้องอยู่ระหว่าง 2.2 - 4.5 m/s

2.13.6 อัตราการไหลของของไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะต้องคงที่ ค่าแนะนำของอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่ที่ตัวเก็บรังสีสำหรับการทดสอบ ในกรณีของไหลเป็นของเหลวคือ $0.02 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ กรณีที่ของไหลเป็นอากาศอัตราการไหลจะเป็น $0.03 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$

2.13.7 ค่าการกระจายของอุณหภูมิของไหลขาเข้าที่ยอมรับได้ หาได้จากการกำหนดให้ เป็น 0, 30, 60, 90% ของค่า $(T_{fi} - T_a)$ ที่ได้จากการอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่กำหนดสำหรับการทดสอบและอุณหภูมิใช้งานสูงสุดที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หรืออาจใช้ค่าการกระจายของ $(T_{fi} - T_a)$ ณ ตำแหน่งที่ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวเก็บลดลงไป 0, 30, 60, 90% ของประสิทธิภาพสูงสุด

2.13.8 สภาวะคงที่ ในการทดสอบของไหลที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะต้องมีอุณหภูมิกคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 2\%$ หรือ $\pm 1.0^\circ\text{C}$ และค่าอัตราการไหลคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 0.0002 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$

2.14 ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ [13]

จาก ASHRAE STANDARD 93-77 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับการกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขที่สภาวะคงที่ มีความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$\eta_c = (A_g/A_c)F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)]/I_t \quad (2.19)$$

$$\text{และ } \eta_c = \dot{m}_c C_p (T_o - T_i) / (I_t A_c) \quad (2.20)$$

โดยที่	η_c	คือ ประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์, (%)
	\dot{m}_c	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล, (kg/s)
	C_p	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล, (kJ/kg.K)
	T_i	คือ อุณหภูมิของของไหลขาเข้า, ($^{\circ}\text{C}$)
	T_o	คือ อุณหภูมิของของไหลขาออก, ($^{\circ}\text{C}$)
	A_a	คือ พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์, (m^2)
	A_c	คือ พื้นที่รับแสงอาทิตย์, (m^2)
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, ($^{\circ}\text{C}$)
	F_R	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์
	U_L	คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน, ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)
	I_t	คือ ความเข้มแสง, (W/m^2)
	$(\tau\alpha)_e$	คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์

2.15 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง [16]

การหาค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) โดยที่ $Q_c = \dot{m}_c c_p (T_{wo} - T_{wi})$ หาได้จาก

$$dQ = \sqrt{\left\{ \left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} d\dot{m} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{wo}} dT_{wo} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T_{wi}} dT_{wi} \right)^2 \right\}} \quad (2.21)$$

การหาค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (η_c) โดยที่

$$\eta_c = \dot{m}_c C_p (T_{wo} - T_{wi}) / (I_t A_c) \quad \text{ได้จาก}$$

$$d\eta = \sqrt{\left[\frac{dQ^2}{(A_c \partial I_t / \partial I_t dI_t)^2} \right]} \quad (2.22)$$

โดยสามารถหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$\frac{\partial Q_c}{\partial \dot{m}_c} d\dot{m} = \frac{c_p \partial \dot{m}_c (T_{wo} - T_{wi})}{\partial \dot{m}_c} d\dot{m} = c_p (T_{wo} - T_{wi}) d\dot{m} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial T_{wo}} dT_{wo} = \frac{c_p \dot{m}_c \partial (T_{wo} - T_{wi})}{\partial T_{wo}} dT_{wo} = -c_p \dot{m}_c dT_{wo} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial Q_c}{\partial T_{wi}} dT_{wi} = \frac{c_p \dot{m}_c \partial (T_{wo} - T_{wi})}{\partial T_{wi}} dT_{wi} = c_p \dot{m}_c dT_{wi} \quad (2.25)$$

$$\frac{A_c \partial I_t}{\partial I_t} dI_t = A_c I_t dI_t \quad (2.26)$$

โดยที่ dI คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดผลรวมของรังสีตรงและกระจาย ($\pm 2\%$)

dQ คือ ค่าความผิดพลาดของพลังงานความร้อนที่สะสมของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จากเครื่องมือวัด

dT_{wi} คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้า ($\pm 1^\circ\text{C}$)

dT_{wo} คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำทางออก ($\pm 1^\circ\text{C}$)

dm คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ

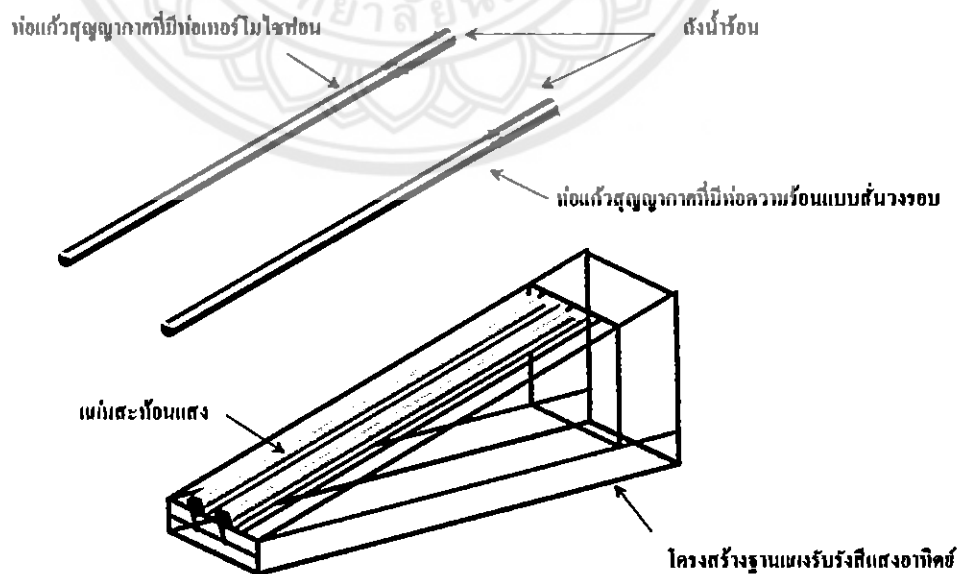


บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยมีอุปกรณ์ต่างๆคือ ถังน้ำร้อน ท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อน (ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ) แผ่นสะท้อนแสง และโครงสร้างฐานแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบ และสะท้อนจากแผ่นสะท้อนแสงผ่านท่อแก้วสุญญากาศ ผ่านเข้าสู่พื้นผิวดูดซับแสงอาทิตย์จะมีความร้อนบางส่วนสูญเสียให้แก่บรรยากาศ และความ ร้อนส่วนใหญ่ที่เหลือจะถูกส่งผ่านสู่ท่อความร้อนในส่วนทำระเหย และส่งความร้อนไปสู่ส่วนควบแน่น เพื่อถ่ายเทสู่น้ำที่ไหลผ่านโดยการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนมี อุณหภูมิลดลงและเกิดการควบแน่น ไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อไปรับ ความร้อนอีกครั้งเป็นวัฏจักร



รูปที่ 3.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน

16008779
รศ.
อภิรักษ์
2554

3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา

ในการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ และเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษาตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวนี้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา

ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา	ขนาด
1. ท่อแก้วสุญญากาศ - เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - ความยาว	0.058 m 0.0047 m 1.5 m
2. ท่อทองแดงที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ - เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - ความยาว	0.0222 m 0.01922 m 1.8 m
3. ท่อทองแดงที่ใช้ทำท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ - เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน - ความยาว	0.0024 m 0.0016 m 15 m
4. ความยาวส่วนทำระเหย	1.5 m
5. ความยาวส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน	0.05 m
6. ความยาวส่วยควบแน่น	0.25 m
7. อัตราการไหล	0.05, 0.1 L/min
8. ค่าความดันเกจภายในท่อแก้วสุญญากาศอยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้ว	0, -40, -80 kPa
9. ค่าความเข้มแสงบริเวณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก	ณ เวลาที่ทำการทดลอง (W/m^2)

3.3 การตั้งสมมุติฐาน

3.3.1 สมบัติของสารทำงานและวัสดุมีค่าคงที่

3.3.2 ไม่คิดความต้านทานความร้อนระหว่างผิวท่อนำความร้อนและผิวดูดซับ

3.3.3 อัตราการไหลของน้ำคงที่ เท่ากับ 0.05 L/min และ 0.1 L/min

3.3.4 ความดันเกจภายในท่อแก้วสุญญากาศอยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้วคงที่ เท่ากับ 0 kPa, -40 kPa และ -80 kPa

3.3.5 ขณะทำการทดลองมีแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ

3.3.6 ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน

3.3.7 ปริมาตรของน้ำจืดเต็มถึงพอดี

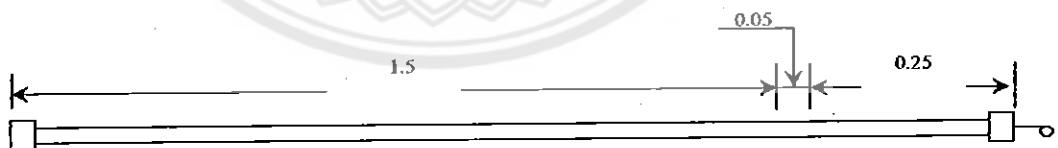
3.3.8 การติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ต้องวางทำมุม 16° กับแนวระนาบโดยให้ด้านหน้าของแผงรับแสงอาทิตย์หันไปยังทิศใต้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางซีกโลกเหนือทำให้แสงแดดจะส่องโดนหลังคาทิศใต้ตลอดทั้งปี

3.4 การออกแบบ

การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน แสดงเป็นภาพ 3 มิติดังรูปที่ 3.7 โดยแบ่งส่วนของการออกแบบดังต่อไปนี้

3.4.1 ออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะทำจากท่อทองแดง มีโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน ทนการกัดกร่อน มีอัตราการขยายตัวต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุงานท่อประเภทอื่นๆ ทนแรงดันสูงได้ ไม่เป็นสนิมและระบายความร้อนได้ดี ไม่มีตะเข็บ ในการออกแบบมีจำนวน 1 ท่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.019 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.022 m ความยาวส่วนทำระเหย 1.5 m ความยาวของส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 0.05 m ความยาวส่วนควบแน่น 0.25 m ดังรูปที่ 3.2

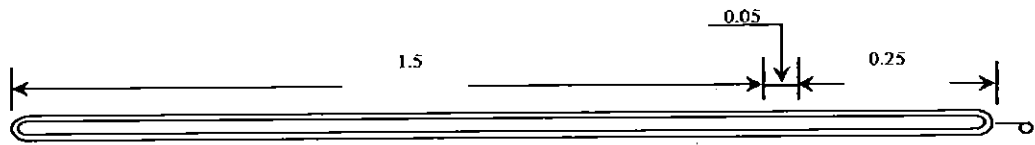


รูปที่ 3.2 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

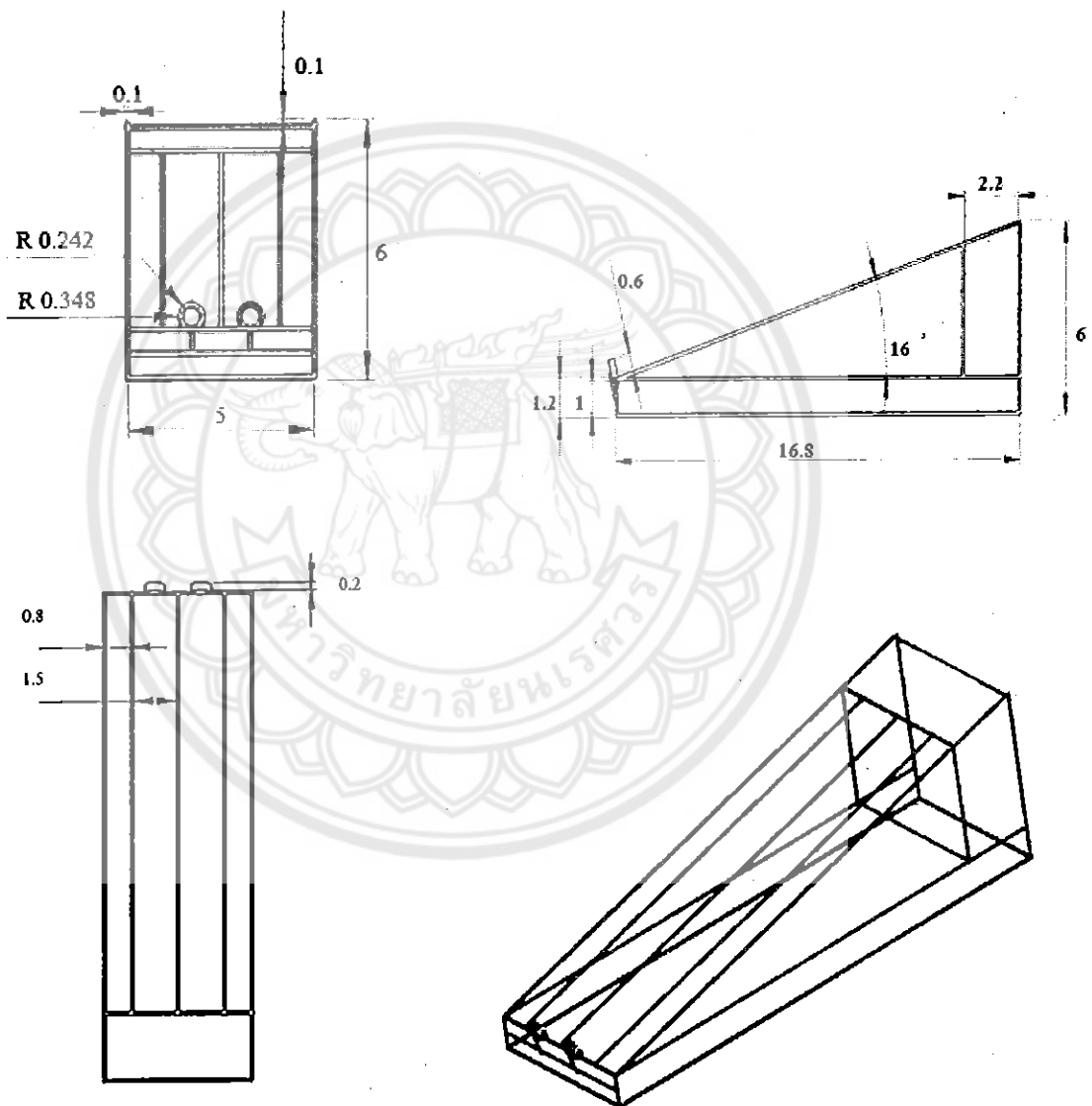
3.4.2 ออกแบบท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทำจากท่อทองแดงขนาดแคปปีลารี ทนการกัดกร่อน มีอัตราการขยายตัวต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุงานท่อประเภทอื่นๆ ทนแรงดันสูงได้ ไม่เป็นสนิมและระบายความร้อนได้ดี ไม่มีตะเข็บ ในการออกแบบมีจำนวน 1 ท่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0016 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0024 m ความยาวของท่อทั้งหมด 15 m นำมาขดจำนวน 5 รอบเพื่อให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีขนาดเท่ากับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดย

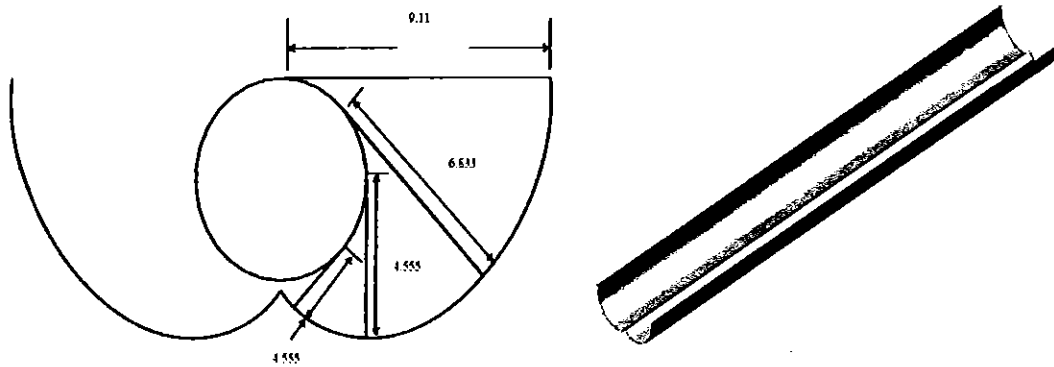
แบ่งเป็นความยาวส่วนทำระเหย 1.5 m ความยาวของส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 0.05 m ความยาวส่วนควบแน่น 0.25 m ดังรูปที่ 3.3



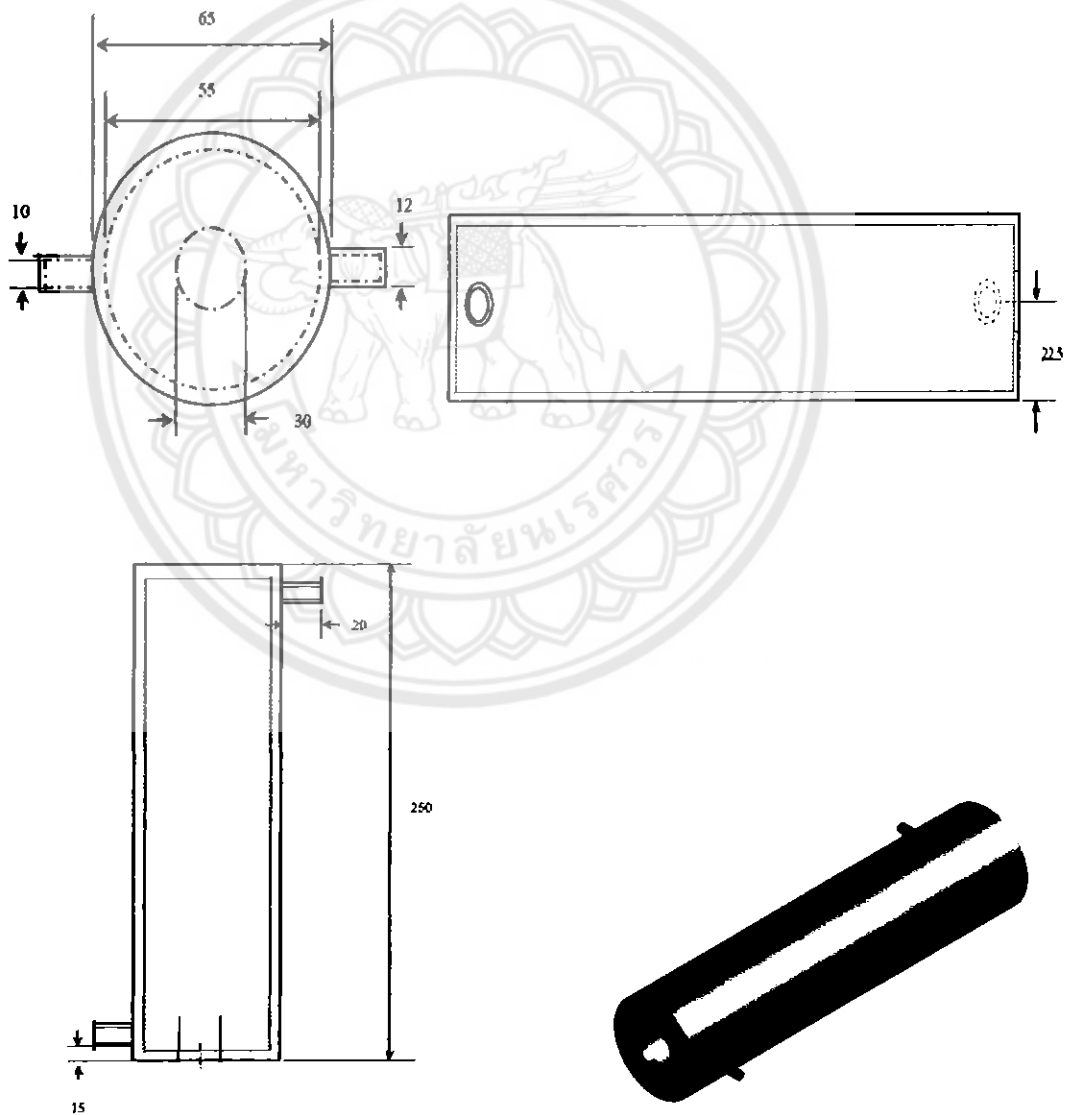
รูปที่ 3.3 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ



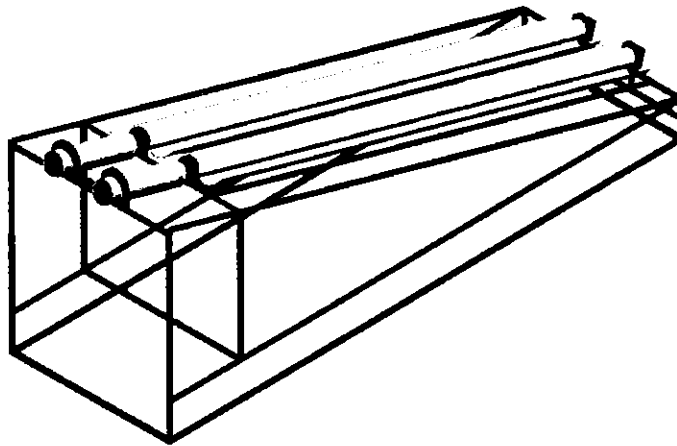
รูปที่ 3.4 ภาพฉายและภาพ 3 มิติของโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.5 ภาพฉายด้านหน้าและภาพ 3 มิติของแผ่นสะท้อนแสง



รูปที่ 3.6 ภาพฉายและภาพ 3 มิติของถังน้ำร้อน



รูปที่ 3.7 ภาพ 3 มิติของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน

3.4.3 การออกแบบโครงสร้างของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

การออกแบบโครงสร้างของตัวแผงรับรังสีให้มีมุมเอียง 16° กับแนวระดับ เพื่อให้สัมพันธ์กับมุมการรับแสงอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลก กำหนดให้มีขนาดความกว้าง 0.5 m ยาว 1.68 m สูง 0.6 m เพื่อรองรับกับแผงรับแสงอาทิตย์และถังน้ำร้อนดังรูปที่ 3.4

3.4.4 การออกแบบแผ่นสะท้อนแสง แผ่นสะท้อนแสงออกแบบตามทฤษฎีทอม-มินเนตามรูปที่

3.5

3.4.5 การออกแบบถังน้ำร้อน ถังน้ำร้อนมีขนาดความจุ 0.5 L มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.05 m ความยาว 0.25 m ดังรูปที่ 3.6

3.5 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ

3.5.1 การสร้างท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะบรรจุไว้ภายใน

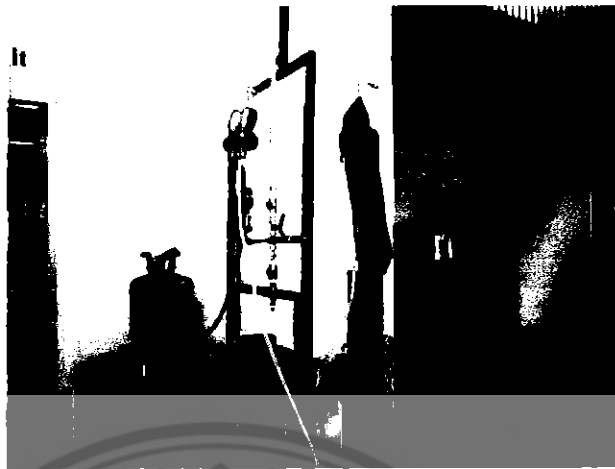
3.5.1.1 เลือกท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.022 m สำหรับทำท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

3.5.1.2 ทำการเชื่อมท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะปิดหัวท้าย โดยตรงส่วนหัวของท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะทำการเจาะรูเพื่อเชื่อมต่อแดงเพื่อใช้ในการเติมสารทำความเย็น R-134a

3.5.1.3 ทำให้ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะเป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำความเย็น R-134a เข้าไปในท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดยการนำท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะมาลดอุณหภูมิเพื่อให้ความดันลดแล้วเติมสารทำความเย็น R-134a โดยเติมสารทำงาน 0.3 kg ดังรูปที่

3.8

3.5.1.4 นำท่อแก้วสุญญากาศประกอบเข้ากับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและวาล์วจุกลมดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การเติมสารทำความเย็น R-134a

3.5.2 การสร้างท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบบรรจุไว้ภายใน

3.5.2.1 เลือกท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0024 m สำหรับทำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.5.2.2 ทำการขดท่อทองแดงจำนวน 5 รอบ ที่ความยาว 1.8 m

3.5.2.3 ทำการเชื่อมท่อทองแดงเข้าเป็นวงรอบและต่อปลายท่อออกมาเพื่อใช้ในการเติมสารทำความเย็น R-134a

3.5.2.4 ทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำความเย็น R-134a เข้าไปในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาลดอุณหภูมิเพื่อให้ความดันลดแล้วเติมสารทำความเย็น R-134a โดยเติมสารทำงาน 0.06 kg

3.5.2.5 นำท่อแก้วสุญญากาศประกอบเข้ากับความร้อนแบบสั่นวงรอบและวาล์วจุกลม

3.5.3 การสร้างชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5.3.1 นำท่อแก้วที่มีท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะบรรจุไว้ภายในยึดเข้ากับถังน้ำร้อนได้ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5.3.2 นำท่อแก้วสุญญากาศที่มีความร้อนแบบสั่นวงรอบบรรจุยึดเข้ากับถังน้ำร้อนได้ชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.5.3.3 การสร้างแผ่นสะท้อนแสง

3.5.3.4 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมขนาดกว้าง 0.3 m ยาว 130 m

3.5.3.5 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมตามรูปทรงตามแบบที่ออกไว้

3.5.3.6 ตัดส่วนที่เหลือออก



รูปที่ 3.9 โครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.5.4 การสร้างถังน้ำร้อน

3.5.4.1 เลือกท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.065 m พร้อมฝาครอบ

3.5.4.2 เจาะช่องเพื่อใส่ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.5.5 การสร้างโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.5.5.1 เลือกท่อพีวีซีขนาด 0.0254 m เพื่อสร้างโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.5.5.2 เชื่อมท่อพีวีซีสำหรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์และถังน้ำร้อน ดังรูปที่ 3.9

3.5.6 การประกอบท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะบรรจุไม้ภายในท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ แผ่นสะท้อนแสง และโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.5.6.1 ยึดแผ่นสะท้อนแสงเข้ากับโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.5.6.2 นำชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะประกอบเข้า โดยให้ส่วนทำระเหยอยู่เหนือแผ่นสะท้อนแสง จากนั้นยึดชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์ให้แน่น

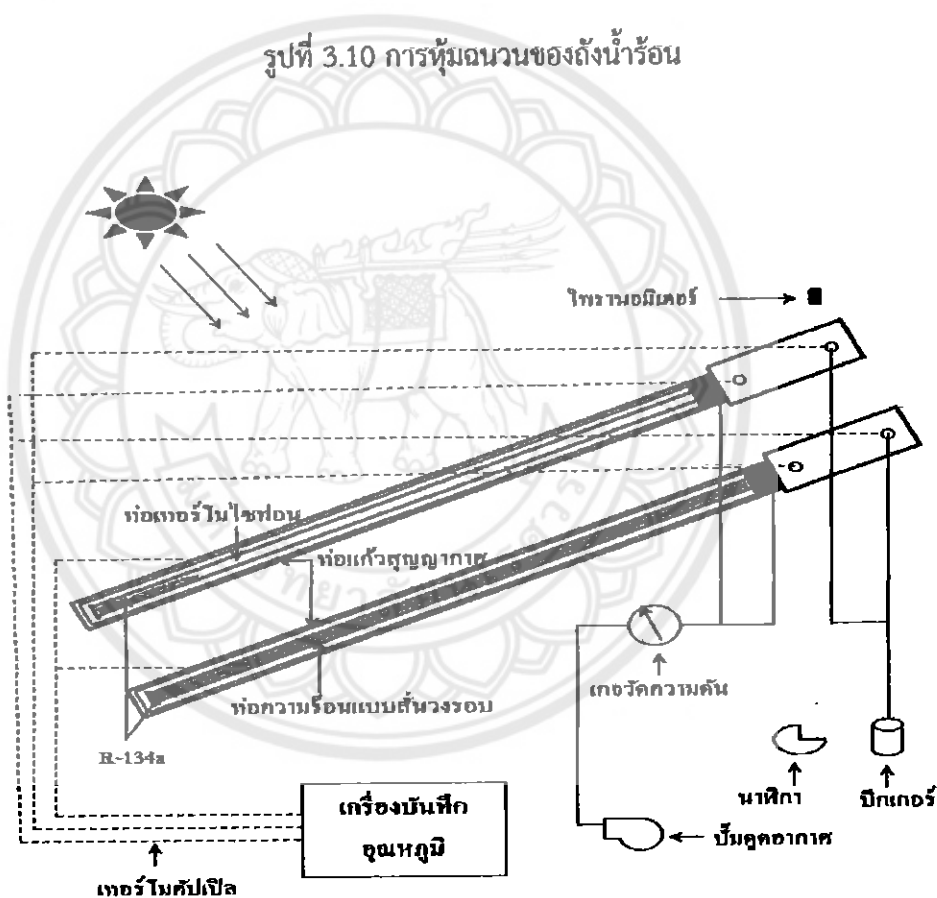
3.5.6.3 นำชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบประกอบเข้า โดยให้ส่วนทำระเหยอยู่เหนือแผ่นสะท้อนแสง จากนั้นยึดชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเข้ากับโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์ให้แน่น

3.5.6.4 ทำการหุ้มฉนวนโดยใช้ฉนวนยางชนิด AEROFLEX หุ้มชุดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตรงส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน

3.5.6.5 ทำการหุ้มฉนวนถังน้ำร้อนโดยใช้ใยแก้วและฉนวนอะลูมิเนียมฟอยล์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การหุ้มฉนวนของถังน้ำร้อน



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

3.6 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้ทำการวัดอุณหภูมิของ ผิวนอกท่อแก้วชั้นนอก ทางน้ำเข้าและออก อุณหภูมิสภาพแวดล้อม โดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการวัดและใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ในการบันทึกข้อมูลและทำการวัดความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ซึ่งติด

กับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยตั้งฉากกับพื้น และวัดอัตราการไหลของน้ำด้วยบีกเกอร์ (Beaker) เทียบกับการจับเวลาการไหลของน้ำ และใช้เกจวัดความดันวัดความดันภายในท่อแก้ว สูญญากาศอยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้วดังรูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทดลอง ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลและค่าตัวแปรที่ต้องเก็บบันทึกผลดังต่อไปนี้

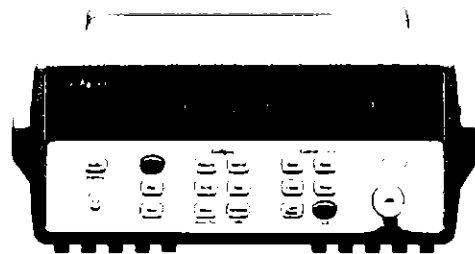
3.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.6.1.1 ไพรานอมิเตอร์ ใช้สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น SP Lite 2 สามารถวัดความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 0 – 2000 W/m² มีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.15%



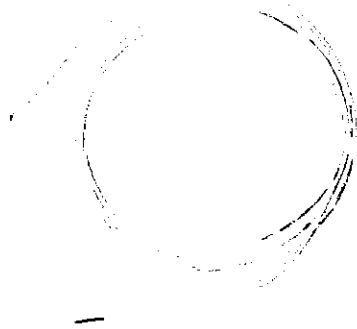
รูปที่ 3.12 ไพรานอมิเตอร์ [17]

3.6.1.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34970 ใช้ในการบันทึกอุณหภูมิ ความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.004% ถึง 0.006%



รูปที่ 3.13 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ [18]

3.6.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ยี่ห้อ Omega ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -200 ถึง 1350 (°C)



รูปที่ 3.14 สายเทอร์โมคัปเปิล [19]

3.6.1.4 นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)

3.6.1.5 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 80 mL

3.6.1.6 ปีมุดอากาศ (Vacuum Pump)

3.6.1.7 เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)

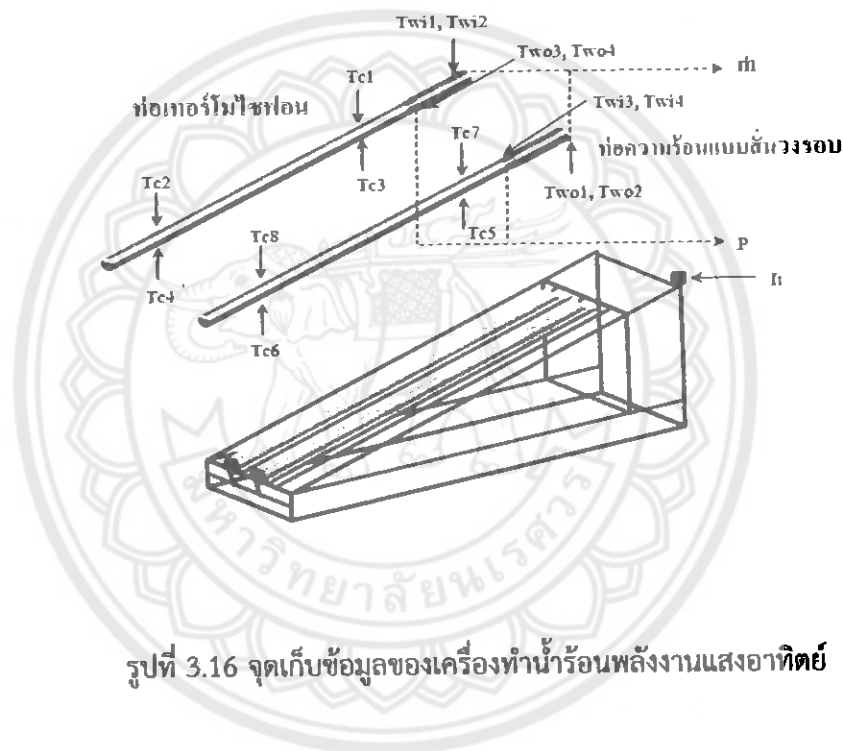
3.6.1.8 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย ท่อแก้วสุญญากาศ จำนวน 2 ท่อ
 ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะซึ่งทำจากทองแดงข้างในบรรจุสารทำงาน R-134a จำนวน 0.3 kg
 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบทำจากท่อทองแดงข้างในบรรจุสารทำงาน R-134a จำนวน 0.06 kg แผ่น
 สะท้อนแสง และถังน้ำร้อน ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมาเก็บค่าข้อมูลต่างๆ โดยจะเก็บค่าข้อมูลที่เป็นสำหรับการวิเคราะห์คำนวณหาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่อัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้า อุณหภูมิน้ำที่ทางออก อุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ค่าความเข้มแสง อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและความดันภายในท่อแก้วสุญญากาศที่อยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้ว โดยจะเก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 9:00 น. ถึง 17:00 น.



รูปที่ 3.16 จุดเก็บข้อมูลของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

โดยที่

P คือค่าความดันภายในท่อแก้วสุญญากาศที่อยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิวภายในท่อแก้ว (Pa)

I_t คือความเข้มแสง W/m^2

T_{c1} คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}C$)

T_{c2} คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}C$)

T_{c3} คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}C$)

T_{c4}	คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c5}	คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c6}	คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c7}	คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{c8}	คืออุณหภูมิของผิวท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wi3}, T_{wi4}	คืออุณหภูมิน้ำเข้าต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wo1}, T_{wo2}	คืออุณหภูมิน้ำออกต่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wi1}, T_{wi2}	คืออุณหภูมิน้ำเข้าต่อสั้นวงรอบ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{wo3}, T_{wo4}	คืออุณหภูมิน้ำออกต่อสั้นวงรอบ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{A1}, T_{A2}	คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}\text{C}$)
q	คืออัตราการไหลของน้ำ(L/min)

ขั้นตอนการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีรายละเอียดดังนี้

3.6.2.1 ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลโดยจัดในบริเวณที่โล่งไม่มีเงา تابผ่านโดยหันหน้าแผงรับแสงอาทิตย์ไปทิศใต้

3.6.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K เป็นตัววัดอุณหภูมิโดยต่อพ่วงเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล โดยเครื่องบันทึกข้อมูลจะวัดข้อมูลไว้ตามที่กำหนด ในที่นี้กำหนดให้วัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ทุกๆ 30 นาที

3.6.2.3 ติดตั้งปั๊มดูดอากาศและเกจวัดความดันเข้ากับวาล์วจุกลม ดูดอากาศออกตามความดันที่กำหนด

3.6.2.4 ติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ไพรานอมิเตอร์) เข้ากับแผงรับรังสีแสงอาทิตย์โดยให้ตั้งฉากกับแนวระดับ เก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ทุกๆ 30 นาทีเช่นเดียวกับเครื่องวัดอุณหภูมิ

3.6.2.5 ติดตั้งวาล์วน้ำเข้ากับถังน้ำร้อน วัดอัตราการไหลของน้ำเทียบกับเวลาโดยใช้ปีกเกอร์และนาฬิกาจับเวลาตามที่กำหนด และคอยตรวจเช็คอัตราการไหลของน้ำ

3.6.2.6 เริ่มทำการเก็บข้อมูลวันที่โดยเริ่มตั้งแต่เวลา 9:00 น. ถึง 17:00 น.

3.6.2.7 ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ จากเครื่องบันทึกข้อมูล ข้อมูลของรังสีแสงอาทิตย์จากไพรานอมิเตอร์ ข้อมูลความดันในท่อแก้วสุญญากาศที่อยู่ระหว่างท่อความร้อนกับผิว

ภายในท่อแก้วจากเกจวัดความดัน และข้อมูลอัตราการไหลของน้ำจากการวัดอัตราการไหลโดยใช้ปีกเกอร์เทียบกับเวลาซึ่งใช้นาฬิกาจับเวลา ลงในแบบบันทึกข้อมูล ดังแสดงในตารางภาคผนวก ก

3.6.2.8 การเก็บข้อมูลจะต้องทำการกระทำทั้งหมด 6 วัน โดยแต่ละวันจะมีการปรับค่าความดันระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับผิวท่อความร้อนด้านนอกและอัตราการไหล ดังตารางที่ 3.1

3.6.2.9 นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนต่อไป

3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลหาเพื่อประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อน ซึ่งประกอบด้วยค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ตามจุดที่แสดงไว้ในขั้นตอนการทดลอง ดังรูปที่ 3.16 ค่าความดันและอัตราการไหล มีดังนี้

3.6.3.1 นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงเทียบกับเวลา

3.6.3.2 นำข้อมูลมาคำนวณอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีได้รับ จากนั้นเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับกับเวลา

3.6.3.3 เปรียบเทียบผลกระทบของความดันสุญญากาศและชนิดท่อความร้อน โดยคำนวณหาอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ให้น้ำในถังน้ำร้อน และคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่ได้รับกับเวลา และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนกับเวลา

3.6.3.4 เปรียบเทียบผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา

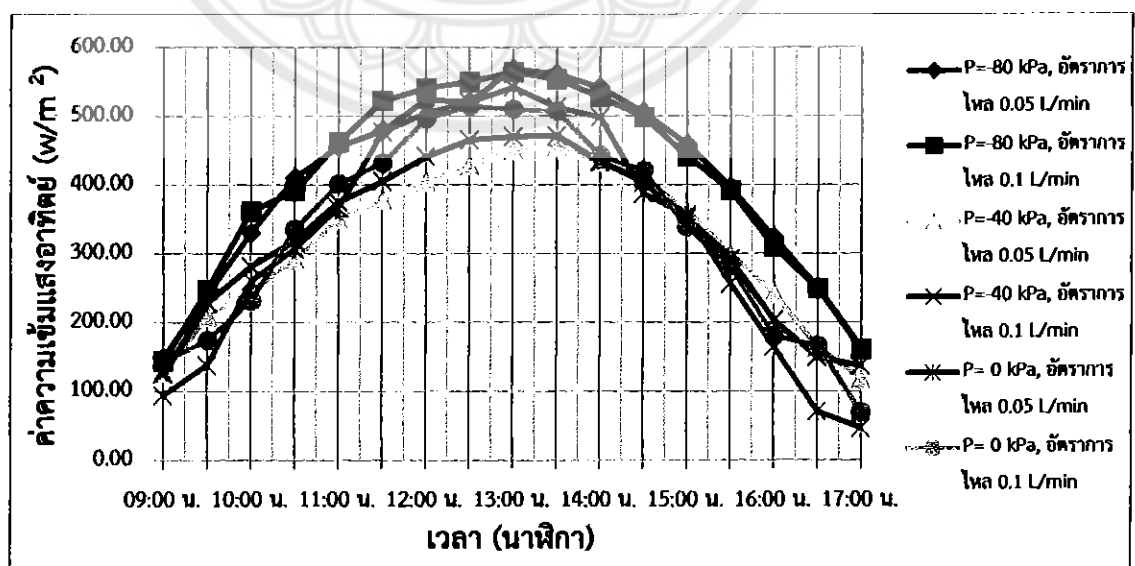
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบและท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ ประกอบด้วย การเปรียบเทียบผลกระทบบของค่าความดันสุญญากาศและชนิดท่อความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบกับที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ และเปรียบเทียบผลกระทบบของอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านถึงน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบกับที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

4.1 ข้อมูลค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลอง

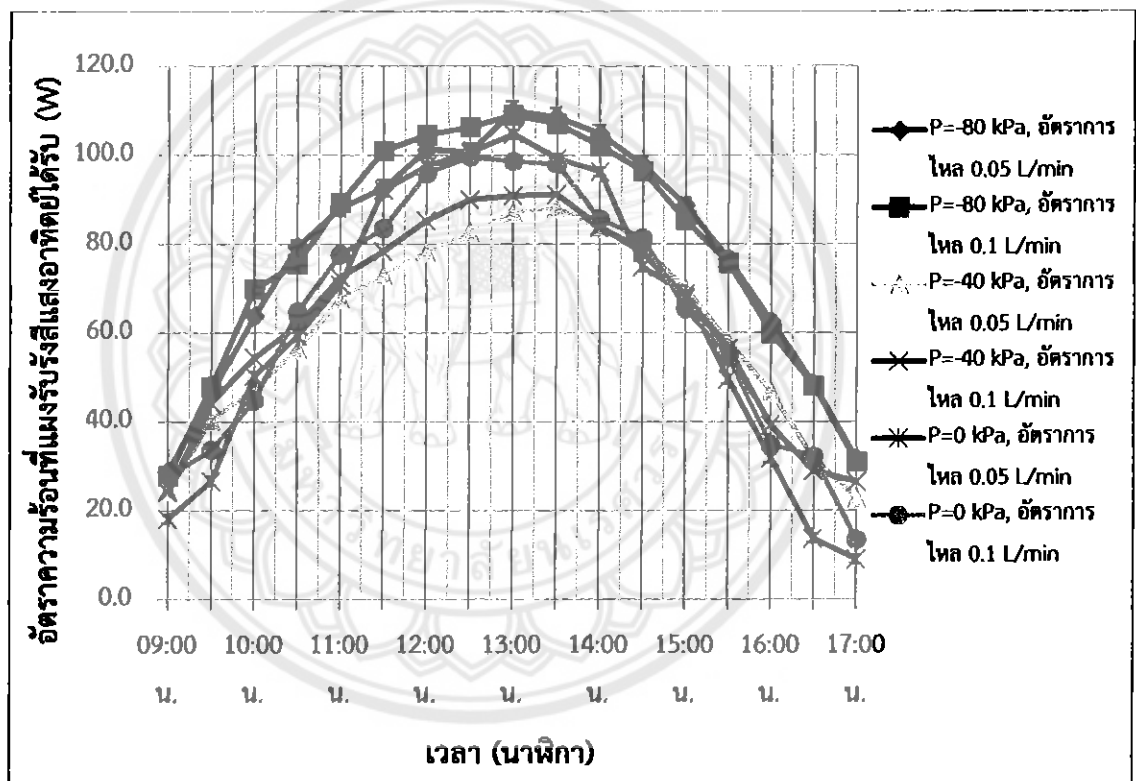
จากการทดลองและเก็บข้อมูลเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ช่วงเวลา 10:00 น. - 17:00 น. ในวันที่ 25, 26, 28, 29 มกราคม 2555 และวันที่ 2, 3 กุมภาพันธ์ 2555 ซึ่งติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ โดยมุมเอียงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ 16° กับแนวระดับ แสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



กราฟที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลา

กราฟที่ 4.1 จะสังเกตได้ว่าลักษณะของกราฟทั้ง 6 เส้นนั้นมีลักษณะคล้ายๆกัน คือ มีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำ เมื่อเวลาเริ่มต้นที่ 9:00 น. ค่าความเข้มแสงอาทิตย์จะยังมีค่าน้อยอยู่และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงเวลา 13:00 น. ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ก็จะลดลง เพราะว่าการที่โลกเคลื่อนที่หมุนรอบตัวเองทำให้ที่เวลาเริ่มต้นมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับพื้นที่ทำการทดลองเป็นมุมเอียงจึงทำให้การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ยังมีค่าน้อย แต่เมื่อถึงเวลา 13:00 น. เป็นเวลาที่ดวงอาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นที่ทำการทดลองมากที่สุด ทำให้สามารถแผ่รังสีมายังพื้นที่ทำการทดลองได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ของกราฟทั้ง 6 เส้นมีค่าสูงสุด

อัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับในแต่ละช่วงเวลาแสดงดังกราฟที่ 4.2



กราฟที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ได้รับกับเวลา

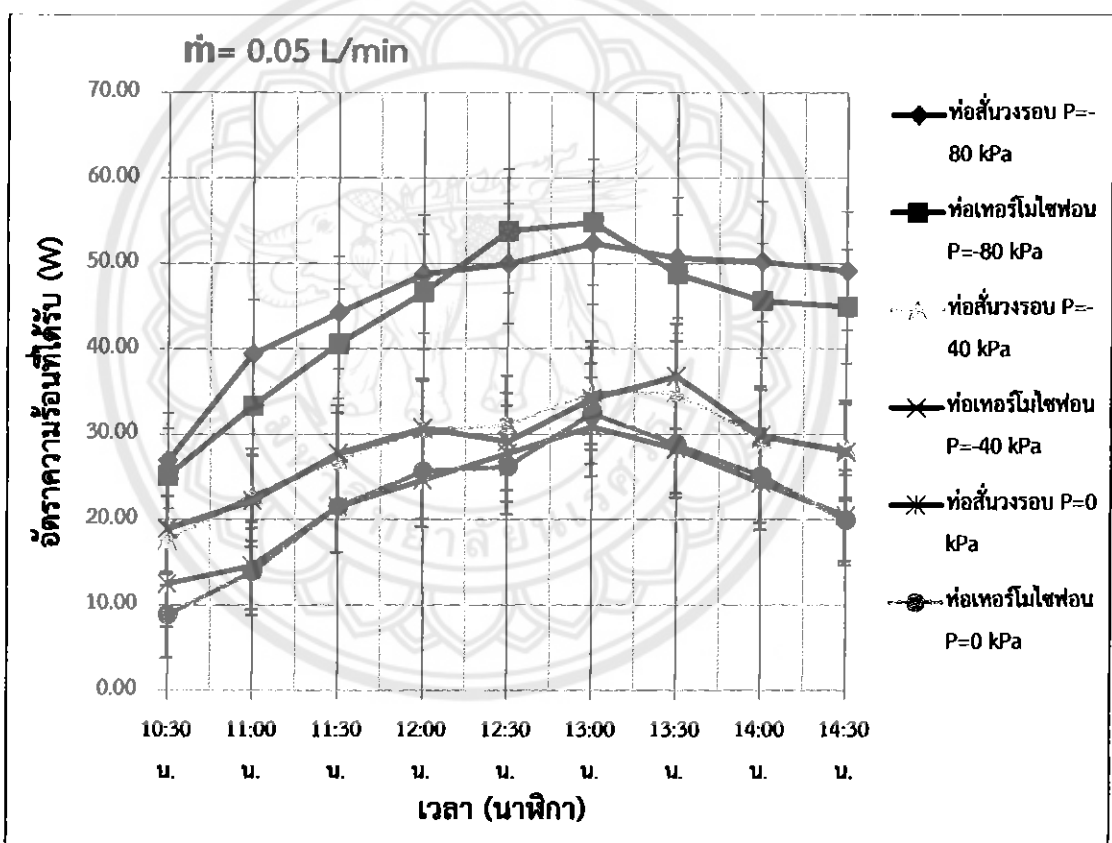
จากกราฟที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ถ้าค่าความเข้มแสงมากอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับจะมากขึ้นตามด้วย โดยช่วงเวลา 9:00 น. – 13:00 น. อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับสูงสุดเท่ากับ 109.1 W ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min และค่าความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa และในช่วงเวลา 13:00 น. – 17:00 น. อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับจะมีค่าลดลงจนสิ้นสุดการทดลอง

จากข้อมูลของ ASHRAE STANDARD จะต้องวิเคราะห์หาอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนและประสิทธิภาพในช่วงที่มีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงและคงที่ ซึ่งการเก็บผลการทดลองค่าความเข้มแสงอาทิตย์ตั้งแต่ช่วงเวลา 9:00 น. – 17:00 น. พบว่าช่วงเวลาที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงและคงที่นั้นจะอยู่ในช่วงเวลา 10:30 น. – 14:30 น. ดังนั้นจะใช้ช่วงเวลาดังกล่าวนี้มาทำการวิเคราะห์หาอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนเท่านั้น

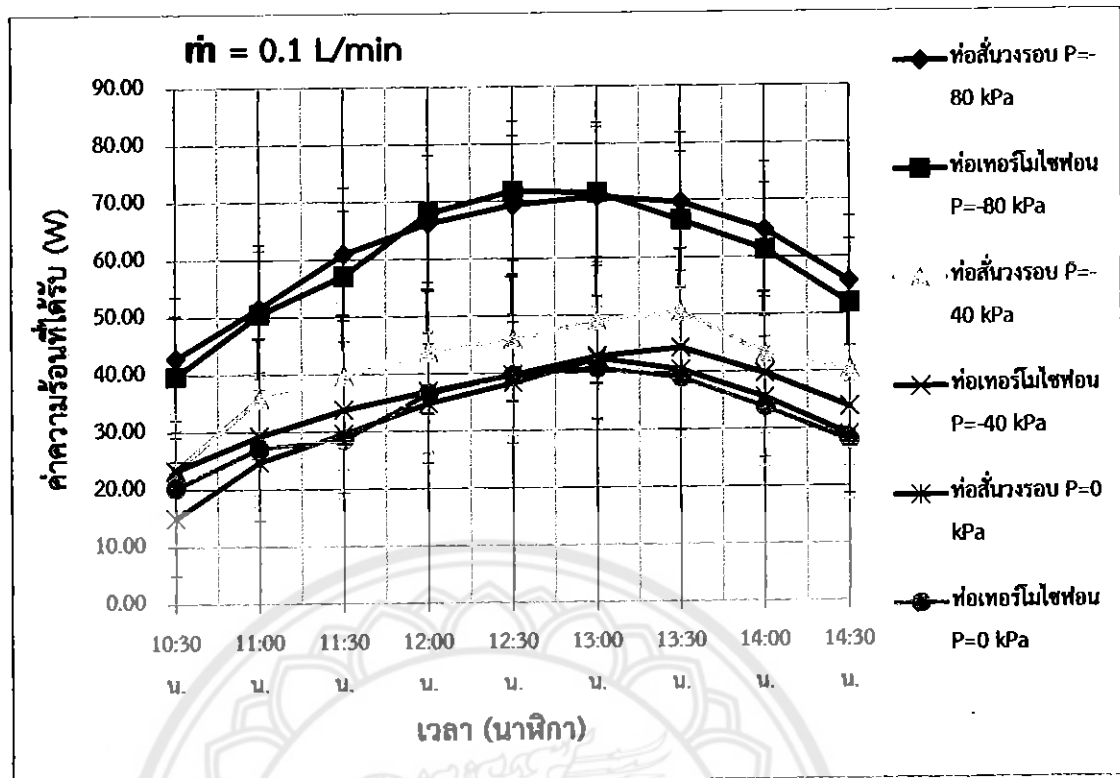
4.2 ผลกระทบของค่าความดันสูญญากาศและชนิดท่อความร้อน

อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำร้อนในถังน้ำร้อนในแต่ละช่วงแสดงดังกราฟที่

4.3 และกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.05 L/min

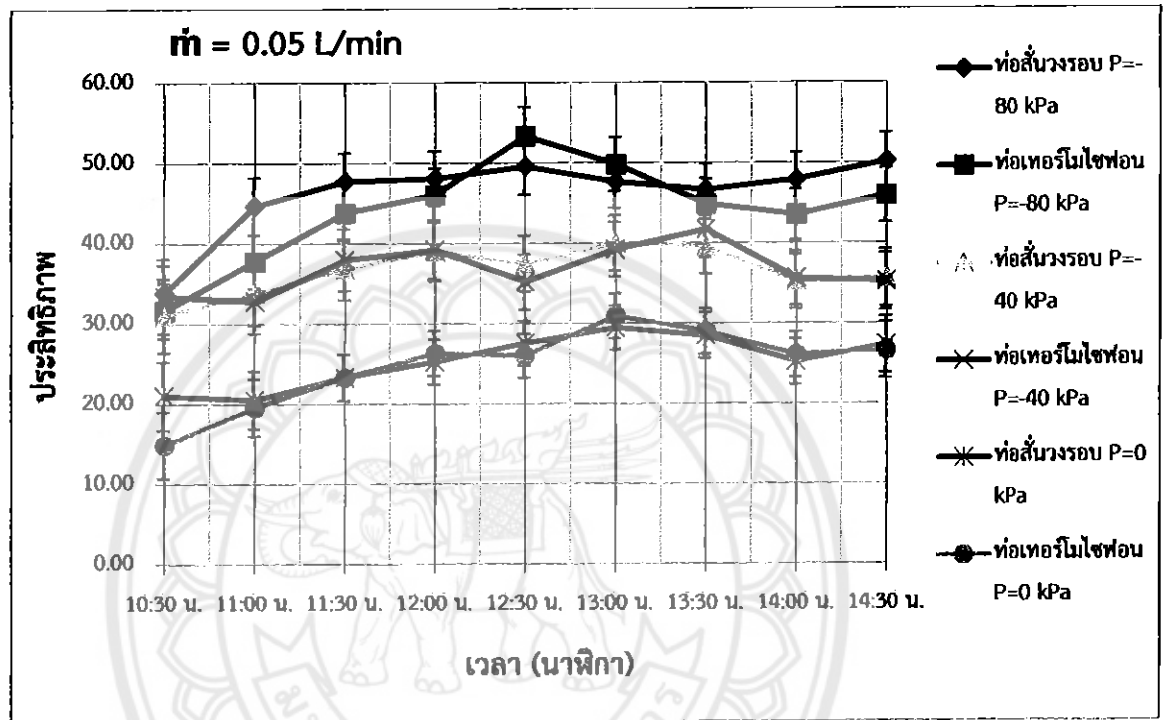


กราฟที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนกับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.1 L/min

จากกราฟที่ 4.3 และกราฟที่ 4.4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของน้ำ จากกราฟช่วงเวลา 10:30 น. – 13:00 น. อัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆมีค่าสูงสุดที่เวลา 13:00 น. และในช่วงเวลา 13:00 น. – 14:30 น. อัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนมีค่าลดลง และพบว่าค่าความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนนั้นยังมีผลต่ออัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนด้วย โดยอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.05 L/min และ 0.1 L/min ของค่าความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนเท่ากับ -80 kPa จะมีอัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนสูงสุดที่ 54.83 W ณ เวลา 13:00 น. และ 71.79 W ณ เวลา 12:30 น. ตามลำดับ ค่าความดันเกจที่เท่ากับ -40 kPa และ 0 kPa (ทั้งอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และ 0.1 L/min) จะมีอัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนต่ำกว่า ซึ่งที่ความดันเกจเท่ากับ -40 kPa กับความดันเกจ 0 kPa จะมีอัตราการร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนเท่ากัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล) สาเหตุที่เท่ากันนั้น เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิ น้ำทางเข้ากับทางออกที่ความดันเกจ

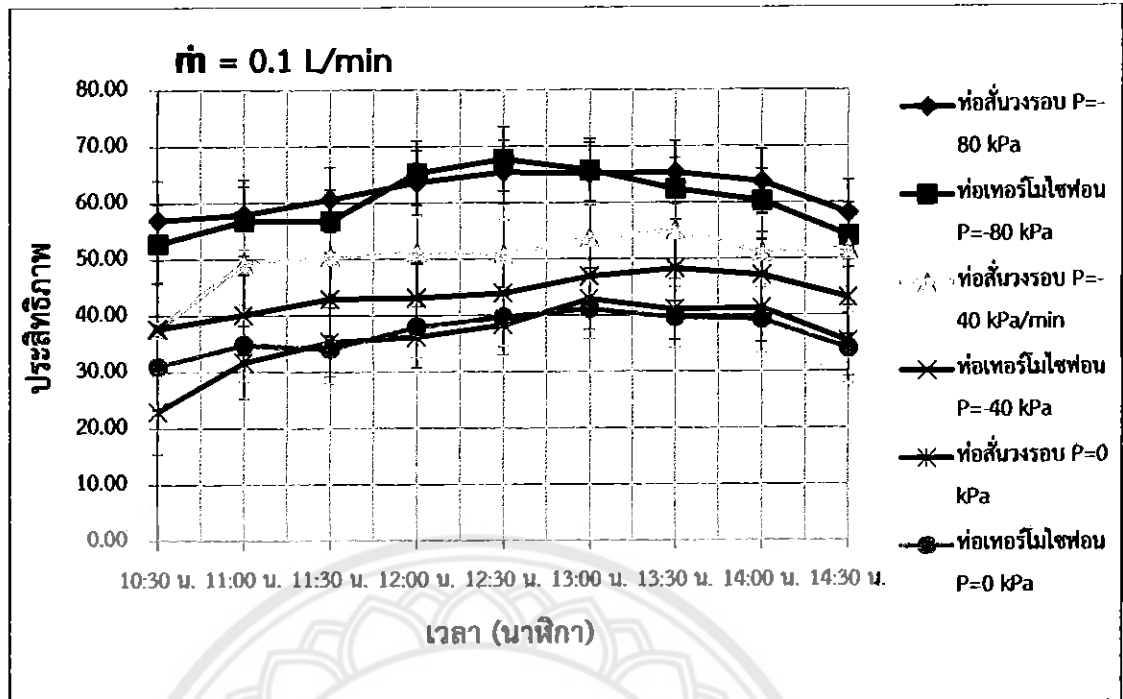
0 kPa มีค่ามากกว่าที่ความดันเกจ -40 kPa จึงทำให้อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนเท่ากัน

ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละช่วงเวลาสามารถแสดงได้ดังกราฟที่ 4.5 และกราฟที่ 4.6



กราฟที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.05 L/min

กราฟที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะช่วงเวลา 10:30 น. - 14:30 น. ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเท่ากันคือ 0.05 L/min ที่ความดันเกจ -80 kPa, -40 kPa, และ 0 kPa พบว่าที่ความดันเกจ -80 kPa ท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 53.37% ที่เวลา 12:30 น. และที่ความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa ท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะมีประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 40.02% และ 30.96% ตามลำดับ ที่เวลาเดียวกัน และทั้งสองท่อความร้อนมีประสิทธิภาพเท่ากันที่ความดันเดียวกัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล)



กราฟที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลาที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.1 L/min

กราฟที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะช่วงเวลา 10:30 น. - 14:30 น. ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเท่ากันคือ 0.1 L/min ที่ความดันเกจ -80 kPa, -40 kPa, และ 0 kPa พบว่าที่ความดันเกจ -80 kPa ท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 67.76% ที่เวลา 12:30 น. และที่ความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa ท่อความร้อนแบบท่อสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะมีประสิทธิภาพลดลงเท่ากับ 55.18% และ 42.92% ตามลำดับ ที่เวลาเดียวกัน และทั้งสองท่อความร้อนมีประสิทธิภาพเท่ากันที่ความดันเดียวกัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล)

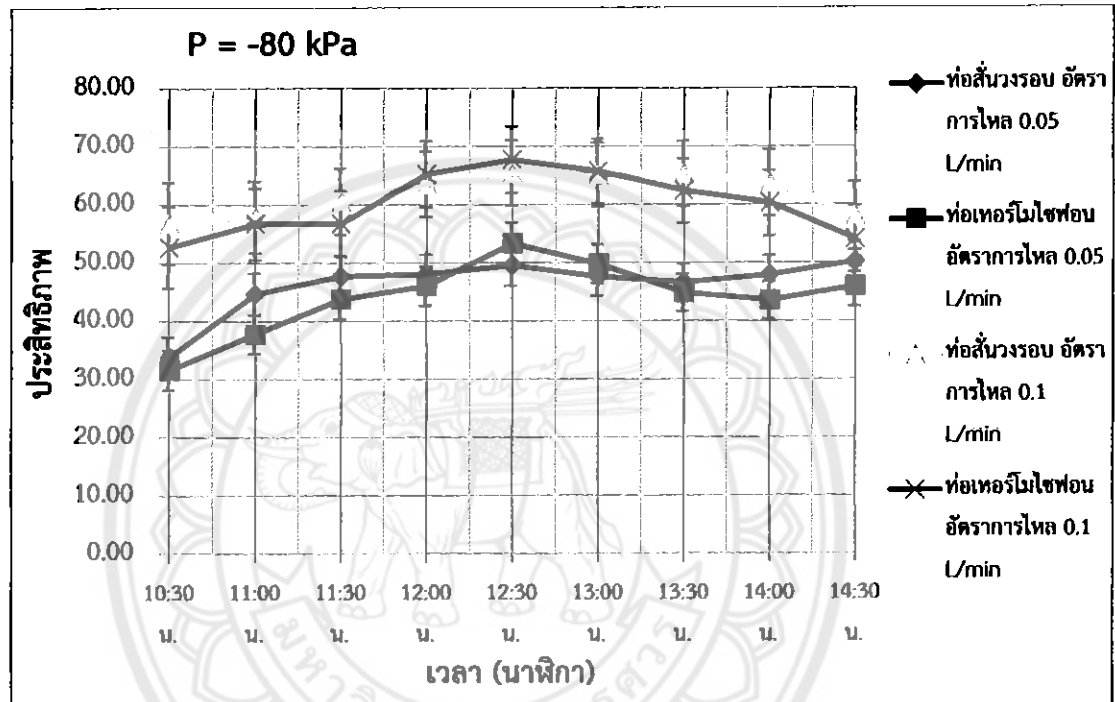
ค่าความดันเกจที่ -80 kPa จะมีประสิทธิภาพสูงสุด และค่าความดันเกจที่ -40 kPa และค่าความดันเกจ 0 kPa จะมีประสิทธิภาพลดลงตามลำดับทั้งอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และ 0.1 L/min สาเหตุที่ค่าความดันเกจ -80 kPa มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น เนื่องจากความดันระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนยังเข้าใกล้ความดันสุญญากาศมากเท่าใดก็จะทำให้มีลักษณะเป็นฉนวนมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ท่อความร้อนดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะนั้นจะมีอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนและประสิทธิภาพเท่ากัน ณ ความดันเดียวกันอัตราการไหลของน้ำเดียวกัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล) สาเหตุที่เท่ากันนั้น

เนื่องจากพื้นที่ผิวรับรังสีแสงอาทิตย์และพื้นที่ผิวของท่อความร้อนทั้งสองชนิดเท่ากัน จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออกไม่แตกต่างกัน

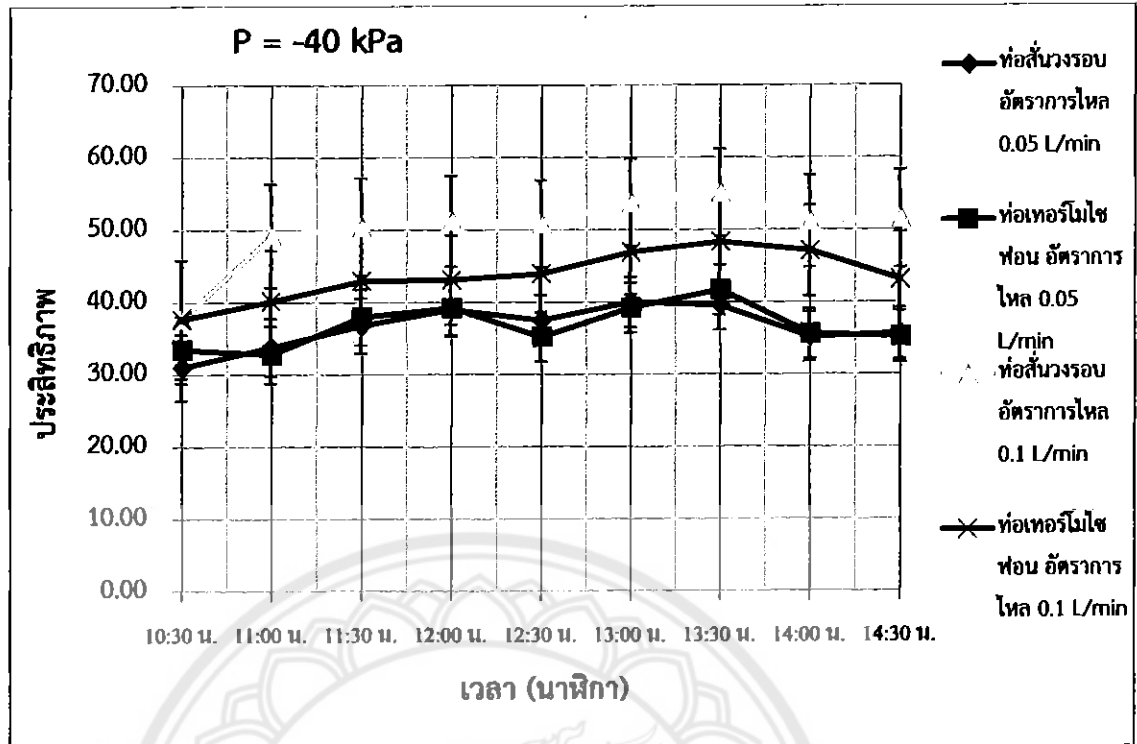
4.3 ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำ

ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำในแต่ละช่วงเวลาสามารถวิเคราะห์ได้ดังกราฟที่ 4.7, 4.8 และกราฟที่ 4.9 ดังต่อไปนี้



กราฟที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลาที่ความดันคง -80 kPa

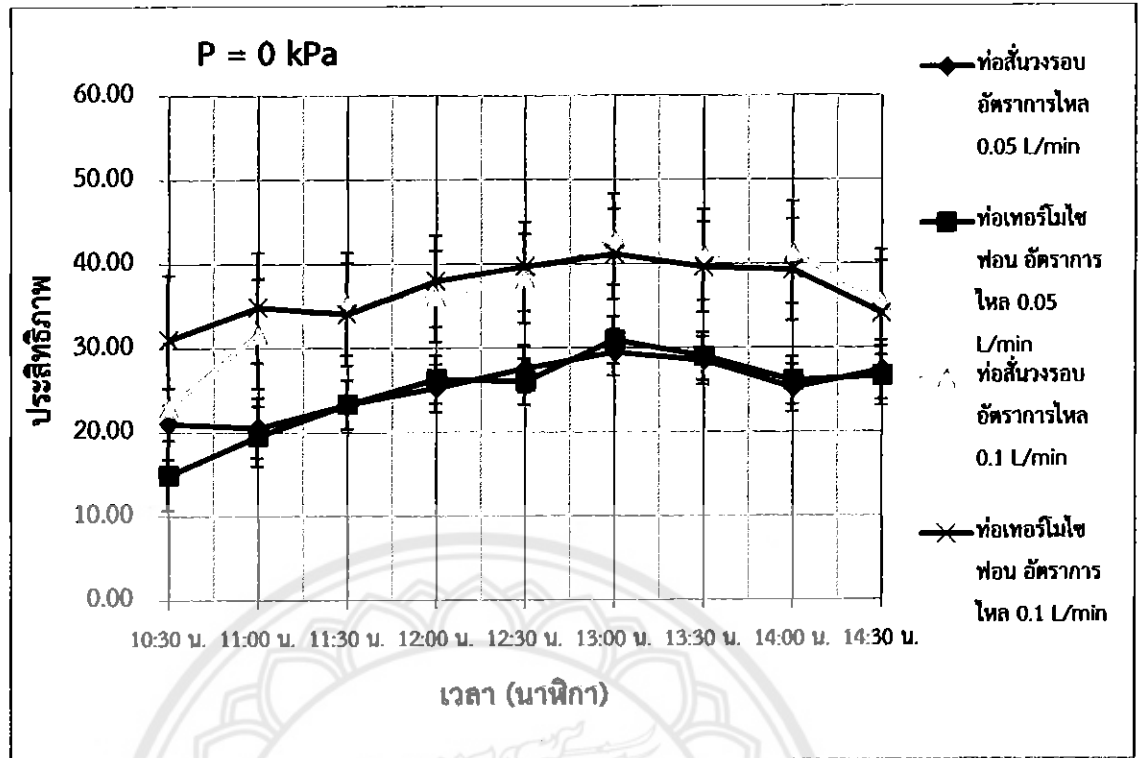
จากกราฟที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างท่อความร้อนแบบสัณวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะที่ความดันคง -80 kPa ซึ่งมีอัตราการไหลต่างกันคือ 0.1 L/min และ 0.05 L/min จะพบว่าที่เวลา 12:30 น.ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 67.76% ที่อัตราการไหล 0.1 L/min และท่อความร้อนแบบสัณวงรอบจะมีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 49.58% ที่อัตราการไหล 0.05 L/min ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งท่อความร้อนทั้งสองชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพเท่ากันที่อัตราการไหลเดียวกัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล)



กราฟที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเวลาที่ความดันแกว -40 kPa

จากกราฟที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะที่ความดันแกว -40 kPa ซึ่งมีอัตราการไหลต่างกันคือ 0.1 L/min และ 0.05 L/min จะพบว่าที่เวลา 13:30 น.ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 55.18% ที่อัตราการไหล 0.1 L/min และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบก็มีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 39.55% เหมือนกันที่อัตราการไหล 0.05 L/min ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งท่อความร้อนทั้งสองชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพเท่ากัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล)

จากกราฟที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะที่ความดันแกว 0 kPa ซึ่งมีอัตราการไหลต่างกันคือ 0.1 L/min และ 0.05 L/min จะพบว่าที่เวลา 13:00 น.ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 42.92% ที่อัตราการไหล 0.1 L/min และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบก็มีประสิทธิภาพต่ำสุดคือ 29.47% เหมือนกันที่อัตราการไหล 0.05 L/min ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งท่อความร้อนทั้งสองชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพเท่ากันที่อัตราการไหลเดียวกัน (ดูได้จากค่าความผิดพลาดของข้อมูล)



กราฟที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับความดันเกจ 0 kPa

ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min ของทุกๆ ค่าความดันที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อน สาเหตุที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min นั้นเนื่องจากประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของน้ำและแปรผกผันกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ดังนั้นที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min ที่ค่าความดันเดียวกันและเวลาเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองและผลการวิเคราะห์

จากการออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบและท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนปิดสองสถานะ มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ 0.1934 m^2 ปริมาตรในถังแลกเปลี่ยนความร้อน 0.5 L มีท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบ 1 ท่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0014 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0022 m ยาว 15 m และท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ 1 ท่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.019 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.022 m ยาว 1.8 m โดยค่าความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนเป็น -80 kPa , -40 kPa และ 0 kPa ใช้กับอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และ 0.1 L/min ตามลำดับ

5.1.1 จากการเปรียบเทียบสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบกับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ พบว่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน และประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนมีค่าเท่ากัน ณ อัตราการไหลของน้ำและความดันที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนเดียวกัน

5.1.2 จากการเปรียบเทียบค่าความดันที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนที่อัตราการไหล 0.05 L/min พบว่าที่ค่าความดันเกจ -80 kPa มีประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 53.37% และค่าความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa มีประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนมีค่าลดลงเท่ากับ 40.02% และ 30.96% ตามลำดับ

5.1.3 จากการเปรียบเทียบค่าความดันที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านในกับท่อความร้อนที่อัตราการไหล 0.1 L/min พบว่าที่ค่าความดันเกจ -80 kPa มีประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนสูงที่สุดเท่ากับ 67.76% และค่าความดันเกจ -40 kPa และ 0 kPa มีประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนจะมีค่าลดลงเท่ากับ 55.18% และ 42.92% ตามลำดับ

5.1.4 จากการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำ พบว่าอัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min ทุกๆค่าความดัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มากขึ้น จะทำให้อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.2.2 สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบให้มากขึ้น เนื่องจากภายในท่อแก้วสุญญากาศยังมีพื้นที่ว่างเหลืออยู่ ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนขดลวดทองแดงให้เต็มพื้นที่ด้านในท่อแก้วสุญญากาศ จะทำให้อุณหภูมิความร้อนแบบสั่นวงรอบมีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อเทียบกับอุณหภูมิความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

5.2.3 อัตราการไหลของน้ำต่ำจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนเหลืออยู่เมื่อค่าความเข้มแสงอาทิตย์ลดในช่วงเวลา 15:00 น. – 17:00 น. จึงทำให้ประสิทธิภาพยังสูงอยู่และสูงสุดในเวลา 17:00 น. ควรศึกษาและออกแบบอัตราการไหลของน้ำให้เหมาะสม ถึงจะสอดคล้องตามทฤษฎี



บรรณานุกรม

- [1] http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/bose/document/solar_hot_water_paper.pdf [สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2554]
- [2] สัมพันธ์ ฤทธิเดช. ท่อความร้อนชั้นสูง Advanced Heat Pipe. คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2551
- [3] <http://www.ajenergy2009.com/product-th-681496-2251564-เครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดแก้วสุญญากาศ.html#> [สืบค้นเมื่อ 20 กันยายน 2554]
- [4] Thermosyphon. <http://sunmaxxsolar.com/images/how-evac-tubes-work.jpg> [สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2554]
- [5] <http://www.geocities.com/heatpipemsu/hp2.html> [สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2554]
- [6] สุวรรณ วาวแว และคณะ. การประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบชาร์ท (Application of Closed Loop Oscillating Heat Pipe to Increasing Performance of Turbo Charge Diesel Engine). การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, พ.ศ. 2547
- [7] http://portal.edu.chula.ac.th/lesa_cd/assets/document/LESA212/1/celestial_sphere/ecliptic/celes_equinox_earth.gif [สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2554]
- [8] <http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Solar%20Energy/Picture/Picture1.jpg> [สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2554]
- [9] <http://www.vcharkarn.com> [สืบค้นเมื่อ 20 สิงหาคม 2554]
- [10] เทวัญ ยั่วคลี, ประเมศร์ แก้วทองดี, สถาปัตย์ อยู่คุ้มดี. การจำลองสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้เทอร์โมไวฟอน (Performance Simulation of Evacuated Tube Solar Water Heater with using Thermosyphon). ปรินูญานินพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2549
- [11] <http://www.ecoyeco.com/thermal-solar-tube/> [สืบค้นเมื่อ 30 สิงหาคม 2554]
- [12] กัณยรัตน์ เรืองเดช, วิทยา บุญบัวทอง, สนิท คำเงิน. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Solar Water Heater). ปรินูญานินพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2544

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] ดำรงค์ศักดิ์ ท้าวอินทร์ดี, ภัทรพันธ์ ขอทะเสน, วสันต์ รุ่งวิทย์วิทย์. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวรับความร้อนแบบหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน (Solar Water Heater with Evacuated Thermosyphon Collector). ปรินูญานิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2552
- [14] กันยารัตน์ เรืองเดช, วิทยา บุญบัวทอง, สนิท คำเงิน. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Solar Water Heater). ปรินูญานิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2544
- [15] ประภวิษณุ วงศ์ชัยพาณิชย์, มานะ ศิริจรรยา, ยมนที หงษ์หิน. การทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 93-77 (Thermal Performance Testing of Flate Solar Collector by ASHRAE Standard 93-77). ปรินูญานิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2552
- [16] กิตติชัย นุชศิริ, ทศพัทธ์ แสนยากุล. การศึกษาสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนชนิดสั้นแบบวงรอบที่วางตัวอยู่ในแนวตั้งเชิงการทดลอง (Experimental Investigation of Thermal Performance of Vertical closed – Loop Pulsating Heat Pipes). ปรินูญานิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2549
- [17] <http://www.renewableenergyworld.com/assets/images/products/8950-sp-lite2-silicon-pyranometer.jpg> [สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2554]
- [18] <http://www.testequity.com/Images/new/agilent/34970a.jpg> [สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2554]
- [19] http://t1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTDieHekvh36votTN1F5ERdvfzCyrubseTwmqM8npXhRk_TTYk8 [สืบค้นเมื่อ 20 ธันวาคม 2554]

ภาคผนวก





ตารางที่ ก 5 ข้อมูลการทดลองวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2555
 ใบบันทึกข้อมูลและผลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เวลา	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00
It	94	137.8	260.2	307	367	477	504.7	520.7	541.9	513.2	498.2	587.3	355.9	256.4	164.5	70.9	46.7
Two1	26.3	27.4	28.5	29.3	29.9	31.2	32.7	33.4	33.5	32.9	34.3	33.9	35.1	34.2	35	33.4	32.5
Two2	26.4	27.7	28.1	29.6	30.2	31.5	32.3	33.5	33.3	33	33.4	34.2	35.2	34.5	35.2	33.6	32.8
Two3	26.2	27.1	28.3	28.9	29.9	31.8	32.4	32.9	33.2	32.3	33.2	33.4	34.9	34	35	33.3	32.5
Two4	26.3	27.6	28.4	29.5	30.3	31.8	32.3	33.5	33.3	32.8	33.6	34	34.5	34.5	35	33.6	32.9
Two1	26.7	28.5	30.5	32	34	37.5	40.2	41	42.9	41.3	41.1	39.8	39	38	37.8	37.4	37
Two2	26.7	28	30.5	32	34.1	37.6	39.6	41	42.6	41.2	41.1	39.8	39	38	37.6	37	36.5
Two3	27	28.8	30.4	32.9	34	38	39.9	41.2	42.2	40.3	40.3	39.6	39.5	38.2	38.5	38.2	38
Two4	27.1	28.7	30.9	32.7	34.6	38	39	41.2	42.1	41.1	40.5	39.6	39.5	38.2	38.5	38.2	38
Tc1	26.2	28.6	32.7	34.2	34.5	38.6	43.3	40.2	40.4	37.5	41.8	37.8	39.1	37.8	37.3	33.5	32.4
Tc2	26.9	29.8	37.1	36.9	38.5	42.1	42.3	41.6	42.6	39.7	45.7	40.5	41.4	38.9	39.4	34.3	35.1
Tc3	26.5	29	32.6	34.1	34.9	38.8	41.2	41.4	41.1	37.6	42.4	37.3	40.6	37.8	37.4	33	31.8
Tc4	26	28.5	33.9	34.1	36.6	36.4	38.6	40	38.9	36.2	40.5	37.1	37.9	37.4	36.4	33.4	32.3
Tc5	26.3	28.8	32.3	33.6	34.5	37.9	40.2	41.2	40.2	37.1	42.2	37.7	39.6	37.8	36.6	32.9	31.8
Tc6	26.5	28.7	32.1	33.2	33.8	36.2	39	40.8	38.9	37.2	42.1	36.7	38.4	37.4	36.5	32.9	32
Tc7	26.2	28.5	31.9	33.4	34.6	37.7	39.2	40.2	40	37	41.6	36.5	41.8	37.3	36.4	32.6	31.7
Tc8	27.3	29.6	34.5	35.4	37.1	42.2	46.3	44	42.9	39.6	44.5	38.5	32.9	39.1	38	33.2	32.6
TA1	25.4	27	28.3	29.2	29.7	31.5	32.1	33.4	33.4	31.8	33.2	33.2	32.2	31.4	30.7	28.7	27.1
TA2	25.3	27.5	28.3	29	30.1	30.9	32.4	32.7	33	32.5	33.4	33.2	32.2	31	30.4	28.8	27.6
m	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
P	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

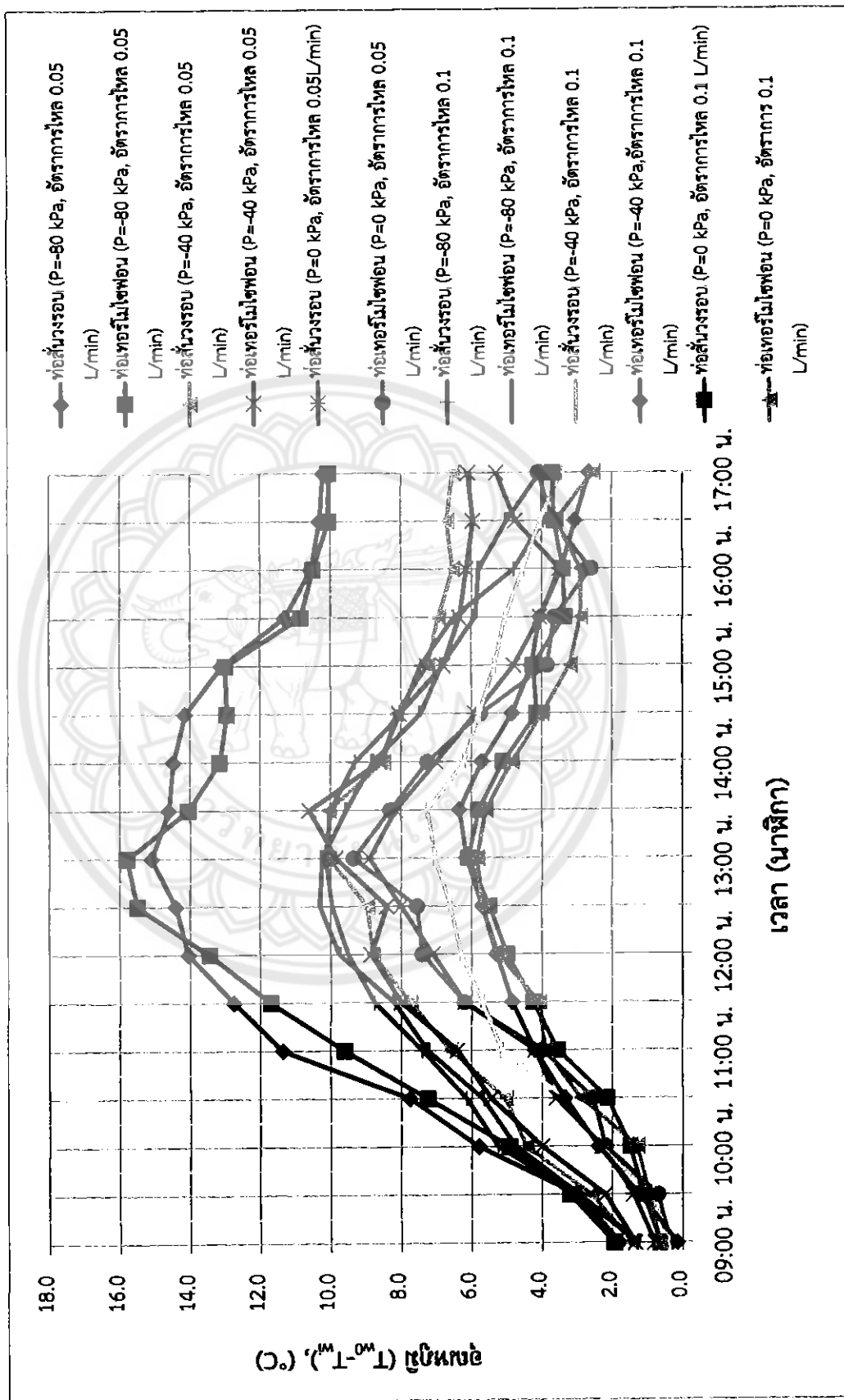


ภาคผนวก ข

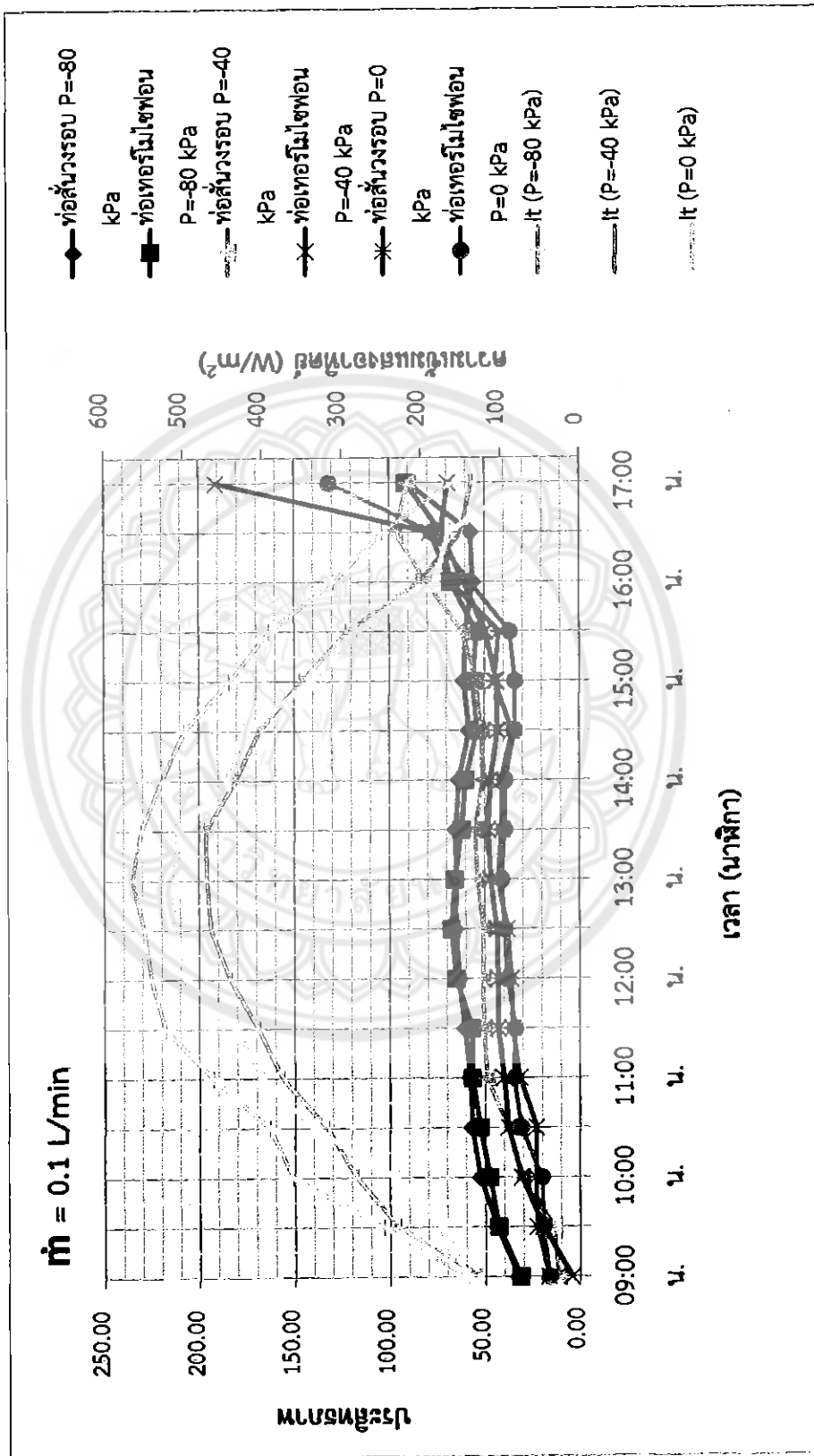
กราฟข้อมูลการทดลอง

มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์ราชบัณฑิตยสถาน

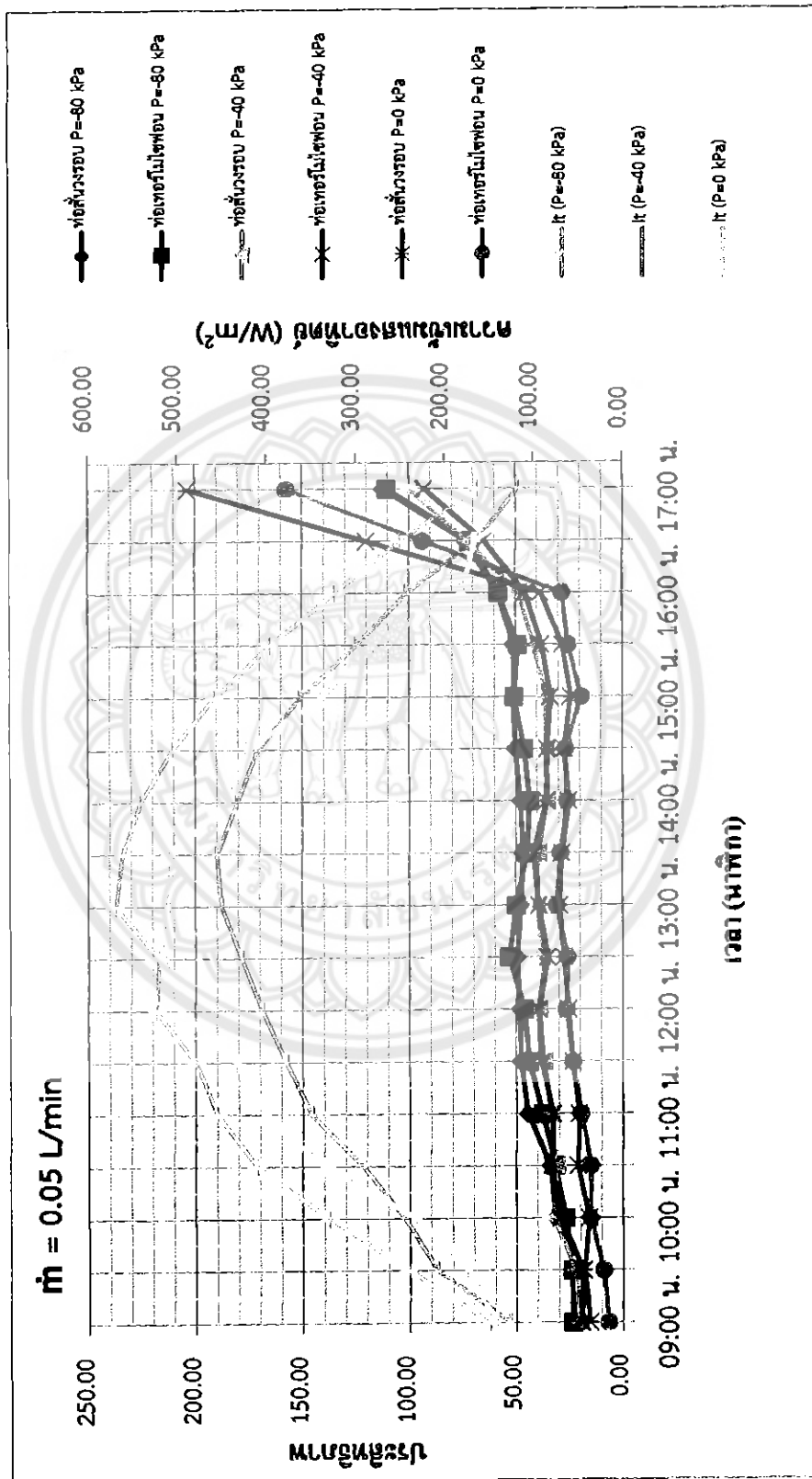
กราฟที่ ข 1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิผิวน้ำทางเข้ากับทางออกเทียบกับเวลา



กราฟที่ ข 2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน, ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.1 L/min



กราฟที่ ข 3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อน, ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ เทียบกับเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min





ตารางที่ ค 1 คุณสมบัติของสาร R-134a [13]

Refrigerant 134a Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor									
Temp. C	Presser MPa	Density	Volume	Enthalpy		Entropy		Specific heat cp	
		kg/m ³ Liquid	m ³ /kg Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
-103.3	0.00039	1591.2	35.263	71.89	335.07	0.4143	1.9638	1.147	0.885
-100	0.00056	1581.9	25.039	75.71	337	0.4366	1.9456	1.168	0.592
-90	0.00153	1553.9	9.7191	87.59	342.94	0.5032	1.8975	1.201	0.614
-80	0.00369	1528.2	4.2504	99.65	349.03	0.5674	1.8585	1.211	0.367
-70	0.00801	1498.6	2.0528	111.78	355.23	0.6286	1.8269	1.215	0.66
-60	0.01594	1471	1.077	123.96	361.51	0.6871	1.8016	1.22	0.685
-50	0.02948	1443.1	0.6056	136.21	367.83	0.7432	1.7812	1.229	0.712
-40	0.05122	1414.8	0.36095	148.57	374.16	0.7973	1.7649	1.243	0.74
-30	0.08436	1385.9	0.22596	161.1	380.45	0.8498	1.7519	1.26	0.771
-28	0.09268	1380	0.20682	163.62	381.7	0.8601	1.7497	1.264	0.778
-26.07	0.10132	1374.3	0.19016	166.07	382.9	0.8701	1.7476	1.268	0.784
-26	0.10164	1374.1	0.18961	166.16	382.94	0.8704	1.7476	1.268	0.785
-24	0.11127	1368.2	0.1741	168.7	384.19	0.8806	1.7455	1.273	0.791
-22	0.1216	1362.2	0.1601	171.26	385.43	0.8908	1.7436	1.277	0.798
-20	0.13268	1356.2	0.14744	173.82	386.66	0.9009	1.7417	1.282	0.805
-18	0.14454	1350.2	0.13597	176.39	387.89	0.911	1.7399	1.286	0.812
-16	0.15721	1344.1	0.12556	178.97	389.11	0.9211	1.7383	1.291	0.82
-14	0.17074	1338	0.1161	181.56	390.33	0.9311	1.7367	1.296	0.827
-12	0.18516	1331.8	0.10749	184.16	391.55	0.941	1.7351	1.301	0.835
-10	0.20052	1325.6	0.09963	186.78	392.75	0.9509	1.7337	1.306	0.842
-8	0.21984	1319.3	0.09246	189.4	393.95	0.9608	1.7323	1.312	0.85
-6	0.23418	1313	0.08591	192.03	395.15	0.9707	1.731	1.317	0.858
-4	0.25257	1306.6	0.07991	194.68	396.33	0.9805	1.7297	1.323	0.866
-2	0.27206	1300.2	0.0744	197.33	397.51	0.9903	1.7285	1.329	0.875
0	0.29269	1293.7	0.06935	200	398.68	1	1.7274	1.335	0.883
2	0.3145	1287.1	0.0647	202.68	399.84	1.0097	1.7263	1.341	0.892
4	0.33755	1280.5	0.06042	205.37	401	1.0194	1.7252	1.347	0.901
6	0.36186	1273.8	0.05648	208.08	402.14	1.0291	1.7242	1.353	0.91
8	0.38749	1267	0.05284	210.8	403.27	1.0387	1.7233	1.36	0.92
10	0.41449	1260.2	0.04948	213.53	404.4	1.0483	1.7224	1.367	0.93
12	0.44289	1253.3	0.04636	216.27	405.51	1.0579	1.7215	1.374	0.939
14	0.47276	1246.3	0.04348	219.03	406.61	1.0674	1.7207	1.381	0.95
16	0.50413	1239.3	0.04081	221.8	407.7	1.077	1.7199	1.388	0.96
18	0.53706	1232.1	0.03833	224.59	408.78	1.0865	1.7191	1.396	0.971
20	0.57159	1224.9	0.03603	227.4	409.84	1.096	1.7183	1.404	0.982
22	0.60777	1217.5	0.03388	230.21	410.89	1.1055	1.7176	1.412	0.994
24	0.64566	1210.1	0.03189	233.05	411.93	1.1149	1.7169	1.42	1.006
26	0.68531	1201.6	0.03003	235.9	412.95	1.1244	1.7162	1.429	1.018
28	0.72676	1194.9	0.02829	238.77	413.95	1.1338	1.7155	1.438	1.031
30	0.77008	1187.2	0.02667	241.65	414.94	1.1432	1.7149	1.447	1.044
32	0.815302	1179.3	0.02516	244.55	415.9	1.1527	1.7142	1.457	1.058
34	0.8625	1171.3	0.02374	247.47	416.85	1.1621	1.7135	1.467	1.073
36	0.91172	1163.2	0.02241	250.41	417.78	1.1715	1.7129	1.478	1.088

ตารางที่ ค 1 คุณสมบัติของสาร R-134a (ต่อ) [13]

Refrigerant 134a Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor (continues)

Temp. C	Presser MPa	Density kg/m ³ Liquid	Volume m ³ /kg Vapor	Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/(kg*K)		Specific heat cp kJ/(kg*K)	
				Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
38	0.96301	1154.9	0.02116	253.37	418.69	1.1809	1.7122	1.489	1.104
40	1.0165	1146.5	0.01999	256.35	419.58	1.1903	1.7115	1.5	1.12
42	1.0721	1137.9	0.0189	259.35	420.44	1.1997	1.7108	1.513	1.138
44	1.13	1129.2	0.01786	262.38	421.28	1.2091	1.7101	1.525	1.156
46	1.1901	1120.3	0.01689	265.42	422.09	1.2185	1.7094	1.539	1.175
48	1.2527	1111.3	0.01598	268.49	422.88	1.2279	1.7086	1.553	1.196
50	1.3177	1102	0.01511	271.59	423.63	1.2373	1.7078	1.569	1.218
52	1.3852	1092.6	0.0143	274.71	424.35	1.2468	1.707	1.585	1.241
58	1.6033	1062.8	0.01212	284.25	426.29	1.2752	1.7041	1.641	1.322
60	1.6815	1052.4	0.01146	287.49	426.86	1.2847	1.7031	1.663	1.354
62	1.7625	1041.7	0.01085	290.77	427.37	1.2943	1.7019	1.686	1.388
64	1.8464	1030.7	0.01026	294.08	427.84	1.3039	1.7007	1.712	1.426
66	1.9334	1019.4	0.0097	297.44	428.25	1.3136	1.6993	1.74	1.468
68	2.0234	1007.7	0.00917	300.84	428.61	1.3234	1.6979	1.772	1.515
70	2.1165	995.6	0.00867	304.29	428.89	1.3332	1.6963	1.806	1.567
72	2.213	983.1	0.00818	307.79	429.1	1.343	1.6945	1.846	1.626
74	2.3127	970	0.00772	311.34	429.23	1.353	1.6926	1.89	1.693
76	2.4159	956.5	0.00728	314.96	429.27	1.3631	1.6905	1.941	1.77
78	2.5227	942.3	0.00686	318.65	429.2	1.3733	1.6881	2	1.861
80	2.6331	927.4	0.00646	322.41	429.02	1.3837	1.6855	2.069	1.967
85	2.9259	886.2	0.0055	332.27	427.91	1.4105	1.6775	2.313	2.348
90	3.2445	836.9	0.00461	343.01	425.48	1.4392	1.6663	2.766	3.064
95	3.5916	771.6	0.00374	355.43	420.6	1.472	1.649	3.961	4.942
100	3.9721	646.7	0.00265	374.02	407.08	1.5207	1.6093	-	-
101.03	4.056	513.3	0.00195	389.79	389.79	1.5593	1.5593	∞	∞

ตารางที่ ค 2 คุณสมบัติของอากาศ [13]

Air Properties of Gases at Atmospheric Pressure

T (K)	ρ kg/m ³	c_p Kj/kg·k	$\mu \cdot 10^7$ N·s/m ²	$\nu \cdot 10^7$ m ² /s	$k \cdot 10^7$ W/m·k	$\alpha \cdot 10^6$ m ² /s	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5336	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728

ตารางที่ ค 3 คุณสมบัติของน้ำ [13]

Temperature Saturation Table for Water

T (°C)	Saturation Pressure (kPa)	Specific Enthalpy (kJ/kg)		Specific Entropy (kJ/kg K)		Specific Volume (cm ³ /g)	
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	vapor
0.01	0.6117	0	2500.9	0	9.1555	1.00021	205991
5	0.8726	21.02	2510.1	0.07625	9.0248	1.00008	147011
10	1.2282	42.02	2519.2	0.15109	8.8998	1.00035	106303
15	1.7058	62.98	2528.3	0.22446	8.7803	1.00094	77875
20	2.3393	83.91	2537.4	0.29648	8.666	1.00184	57757
25	3.1699	104.83	2546.5	0.36722	8.5566	1.00301	43337
30	4.247	125.73	2555.5	0.43675	8.452	1.00441	32878
35	5.629	146.63	2564.5	0.50513	8.3517	1.00605	25205
40	7.3849	167.53	2573.5	0.5724	8.2555	1.00789	19515
45	9.595	188.43	2582.4	0.63861	8.1633	1.00992	15252
50	12.352	209.34	2591.3	0.70381	8.0748	1.01215	12027
55	15.762	230.26	2600.1	0.76802	7.9898	1.01455	9564.3
60	19.946	251.18	2608.8	0.83129	7.9081	1.01713	7667.2
65	25.042	272.12	2617.5	0.89365	7.8296	1.01987	6193.5
70	31.201	293.07	2626.1	0.95513	7.754	1.02277	5039.5
75	38.595	314.03	2634.6	1.0158	7.6812	1.02584	4128.9
80	47.414	335.01	2643	1.0756	7.6111	1.02905	3405.2
85	57.867	356.01	2651.3	1.1346	7.5434	1.03243	2825.8
90	70.182	377.04	2659.5	1.1929	7.4781	1.03595	2359.1
95	84.608	398.09	2667.6	1.2504	7.4151	1.03963	1980.6
100	101.42	419.17	2675.6	1.3072	7.3541	1.04346	1671.8
105	120.9	440.27	2683.4	1.3633	7.2952	1.04744	1418.4
110	143.38	461.42	2691.1	1.4188	7.2381	1.05158	1209.3
115	169.18	482.59	2698.6	1.4737	7.1828	1.05588	1035.8
120	198.67	503.81	2705.9	1.5279	7.1291	1.06033	891.21
125	232.24	525.07	2713.1	1.5816	7.077	1.06494	770.03
130	270.28	546.38	2720.1	1.6346	7.0264	1.06971	668
135	313.23	567.74	2726.9	1.6872	6.9772	1.07465	581.73
140	361.54	589.16	2733.4	1.7392	6.9293	1.07976	508.45
145	415.68	610.64	2739.8	1.7907	6.8826	1.08504	445.96



ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น.

$$\text{จาก } Q_{in} = I_c A_c$$

โดยที่ Q_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงได้รับ (W)

I_c คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)

A_c คือ แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ = 0.1934 m^2

$$\text{วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น. : } Q_{in} = 455.8 \times 0.1934 = 88.2 \text{ W}$$

2. การคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่ได้รับทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น.

$$\text{จาก } Q_{out} = \dot{m} C_p \Delta T$$

โดยที่ Q_{out} คือ ความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน (W)

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.K)

วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบ

$$Q_{st} = (8.3 \times 10^{-4} \times 4180 \times 11.4) = 39.4 \text{ W}$$

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน

$$Q_{st} = (8.3 \times 10^{-4} \times 4180 \times 9.6) = 33.3 \text{ W}$$

3. การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_c) ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น.

$$\text{จาก } \eta_c = (Q_{out}/Q_{in}) \times 100\%$$

วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบ

$$\eta_c = (39.4/88.2) \times 100\% = 44.7\%$$

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอน

$$\eta_c = (33.3/88.2) \times 100\% = 37.8\%$$

ตารางที่ ง 1 ผลการคำนวณค่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa

วันที่ 25 ม.ค. 2555	พื้นที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ (m^2)	ความเข้มแสง (I_t , W/m^2)	อัตราการความร้อนที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ได้รับ (Q_{in} , W)
เวลา (นาฬิกา)			
9:00	0.1934	149.2	28.9
9:30	0.1934	240.6	46.5
10:00	0.1934	329.9	63.8
10:30	0.1934	410.6	79.4
11:00	0.1934	455.8	88.2
11:30	0.1934	479.2	92.7
12:00	0.1934	524.0	101.3
12:30	0.1934	521.1	100.8
13:00	0.1934	568.8	110.0
13:30	0.1934	561.6	108.6
14:00	0.1934	541.7	104.6
14:30	0.1934	505.6	97.8
15:00	0.1934	458.8	88.7
15:30	0.1934	396.4	76.7
16:00	0.1934	323.6	62.6
16:30	0.1934	250.9	48.5
17:00	0.1934	163.0	31.5

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณค่าอัตราการความร้อนที่ได้รับในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa

วันที่ 25 ม.ค. 2555	\dot{m}_c (kg/s)	C_p (kJ/kg.s)	ΔT_p	ΔT_{th}	อัตราการความร้อนที่ ได้รับจากท่อสั้น วงรอบ ($Q_{out,p}$, W)	อัตราการความร้อนที่ ได้รับจากท่อเทอร์ โมไซฟอน ($Q_{out,th}$, W)
เวลา (นาฬิกา)			ของท่อ สั้น วงรอบ ($^{\circ}C$)	ของท่อ เทอร์โมไซ ฟอน ($^{\circ}C$)		
9:00	8.3×10^{-4}	4,180	1.8	2.0	6.2	6.8
9:30	8.3×10^{-4}	4,180	3.0	3.2	10.4	11.1
10:00	8.3×10^{-4}	4,180	5.8	4.9	20.1	17.1
10:30	8.3×10^{-4}	4,180	7.8	7.3	26.9	25.2
11:00	8.3×10^{-4}	4,180	11.4	9.6	39.4	33.3
11:30	8.3×10^{-4}	4,180	12.8	11.7	44.2	40.6
12:00	8.3×10^{-4}	4,180	14.1	13.5	48.8	46.7
12:30	8.3×10^{-4}	4,180	14.4	15.5	50.0	53.8
13:00	8.3×10^{-4}	4,180	15.1	15.8	52.4	54.8
13:30	8.3×10^{-4}	4,180	14.6	14.1	50.7	48.8
14:00	8.3×10^{-4}	4,180	14.5	13.2	50.2	45.6
14:30	8.3×10^{-4}	4,180	14.2	13.0	49.1	44.9
15:00	8.3×10^{-4}	4,180	13.1	13.0	45.5	45.1
15:30	8.3×10^{-4}	4,180	11.3	10.9	39.2	37.6
16:00	8.3×10^{-4}	4,180	10.6	10.5	36.6	36.4
16:30	8.3×10^{-4}	4,180	10.3	10.1	35.7	34.9
17:00	8.3×10^{-4}	4,180	10.2	10.1	35.4	34.9

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa

วันที่ 25 ม.ค. 2555	อัตราการความร้อน ที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ ได้รับ (Q_{in} , W)	อัตราการความร้อน ที่ได้รับ จากท่อสั้น วงรอบ ($Q_{out,p}$, W)	อัตราการความร้อน ที่ได้รับจากท่อ เทอร์โมไซฟอน ($Q_{out,th}$, W)	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน ที่ได้จากท่อสั้น วงรอบ ($\eta_{c,p}$, %)	ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนที่ ได้จากเทอร์โม ไซฟอน ($\eta_{c,th}$, %)
9:00	28.9	6.2	6.8	21.6	23.4
9:30	46.5	10.4	11.1	22.4	23.9
10:00	63.8	20.1	17.1	31.5	26.8
10:30	79.4	26.9	25.2	33.9	31.7
11:00	88.2	39.4	33.3	44.7	37.8
11:30	92.7	44.2	40.6	47.7	43.8
12:00	101.3	48.8	46.7	48.1	46.1
12:30	100.8	50.0	53.8	49.6	53.4
13:00	110.0	52.4	54.8	47.6	49.8
13:30	108.6	50.7	48.8	46.6	44.9
14:00	104.6	50.2	45.6	47.9	43.6
14:30	97.8	49.1	44.9	50.2	46.0
15:00	88.7	45.5	45.1	51.2	50.8
15:30	76.7	39.2	37.6	51.1	49.1
16:00	62.6	36.6	36.4	58.5	58.2
16:30	48.5	35.7	34.9	73.7	71.9
17:00	31.5	35.4	34.9	112.3	110.6

4. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของค่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับทุกๆ 30

นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น

$$\text{จาก } dQ_{in} = (I_t A_c dI_t)$$

โดยที่ dQ_{in} คือ ค่าความผิดพลาดของพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงได้รับ

dI_t คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดความเข้มแสงอาทิตย์ ($\pm 2\%$)

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ = 0.1934 m^2

วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น. : $dQ_{in} = (0.02 \times 455.8 \times 0.1934) = 1.8 \text{ W}$

ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล = $(1.8/88.2) \times 100\% = 2\%$

5. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น

$$\text{จาก } dQ = \sqrt{\{(c_p(T_o - T_i)d\dot{m})^2 + (c_p\dot{m}_c dT_o)^2 + (-c_p\dot{m}_c dT_i)^2\}}$$

โดยที่ dQ คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับ (W)

$d\dot{m}$ คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ ($\pm 10\%$)

dT_{wo} คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำทางออก ($\pm 1^\circ\text{C}$)

dT_{wi} คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้า ($\pm 1^\circ\text{C}$)

วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบ

$$(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 = (4180 \times 11.4 \times 8.3 \times 10^{-4})^2 = 15.6 \text{ W}$$

$$(c_p\dot{m}dT_{wo})^2 = (4180 \times 8.3 \times 10^{-4} \times 1)^2 = 12.0 \text{ W}$$

$$(-c_p\dot{m}dT_{wi})^2 = (4180 \times 8.3 \times 10^{-4} \times 1)^2 = 12.0 \text{ W}$$

$$dQ = \sqrt{(15.6 + 12.0 + 12.0)} = 6.3 \text{ W}$$

ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล = $(6.3/39.4) \times 100\% = 16\%$

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

$$(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 = (4180 \times 9.6 \times 8.3 \times 10^{-4})^2 = 11.1 \text{ W}$$

$$(c_p\dot{m}dT_{wo})^2 = (4180 \times 8.3 \times 10^{-4} \times 1)^2 = 12.0 \text{ W}$$

$$(-c_p\dot{m}dT_{wi})^2 = (4180 \times 8.3 \times 10^{-4} \times 1)^2 = 12.0 \text{ W}$$

$$dQ = \sqrt{(11.1 + 12.0 + 12.0)} = 5.9 \text{ W}$$

ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล = $(5.9/33.3) \times 100\% = 17.7\%$

6. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_c) ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.-17:00 น.

$$\text{จาก } d\eta = \sqrt{\left[\frac{dQ^2}{((A_c \partial \eta_c / \partial T_i) dT_i)^2} \right]}$$

วันที่ 25 มกราคม 2555 ที่เวลา 11:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อสั้นวงรอบ

$$d\eta = \frac{6.3}{1.8} = 3.5$$

สำหรับท่อความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ

$$d\eta = \frac{5.9}{1.8} = 3.3$$

ตารางที่ ง 4 ผลการคำนวณค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละช่วงเวลา ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.05 L/min และความดันเกจที่อยู่ระหว่างผิวท่อแก้วด้านในกับท่อความร้อน -80 kPa

วันที่ 25 ม.ค. 2555	ค่าความ ผิดพลาดของ อัตราการความร้อน ที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ ได้รับ (dQ_{in} , W)	ค่าความ ผิดพลาดของ อัตราการความร้อน ที่ได้รับ จากท่อสั้น วงรอบ ($dQ_{out,p}$, W)	ค่าความ ผิดพลาดของ อัตราการความร้อน ที่ได้รับจากท่อ เทอร์โมไซฟอน ($dQ_{out,th}$, W)	ค่าความ ผิดพลาดของ ประสิทธิภาพ เชิงความร้อน ที่ได้จากท่อสั้น วงรอบ ($d\eta_p$)	ค่าความ ผิดพลาดของ ประสิทธิภาพ เชิงความร้อนที่ ได้จากเทอร์โม ไซฟอน ($d\eta_{th}$)
เวลา (นาฬิกา)					
9:00	0.6	4.9	5.0	8.6	8.6
9:30	0.9	5.0	5.0	5.4	5.4
10:00	1.3	5.3	5.2	4.2	4.1
10:30	1.6	5.6	5.5	3.5	3.5
11:00	1.8	6.3	5.9	3.6	3.4
11:30	1.9	6.6	6.4	3.6	3.4
12:00	2.0	6.9	6.8	3.4	3.3
12:30	2.0	7.0	7.3	3.5	3.6
13:00	2.2	7.2	7.4	3.3	3.3
13:30	2.2	7.1	6.9	3.2	3.2
14:00	2.1	7.0	6.7	3.4	3.2
14:30	2.0	6.9	6.7	3.5	3.4
15:00	1.8	6.7	6.7	3.8	3.8
15:30	1.5	6.3	6.2	4.1	4.0
16:00	1.3	6.1	6.1	4.9	4.9
16:30	1.0	6.1	6.0	6.3	6.2
17:00	0.6	6.1	6.0	9.6	9.5

ตารางที่ 5 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 25 มกราคม 2555

เวลา	A_c (m^2)	I_t (W/m^2)	\dot{m} (kg/s)	C_p ($kJ/kg\cdot s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_{th} ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	$Q_{out,p}$ (W)	$Q_{out,th}$ (W)	$\eta_{c,p}$ (%)	$\eta_{c,th}$ (%)	dQ_{in} (W)	$dQ_{out,p}$ (W)	$dQ_{out,th}$ (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	149.2	8.3×10^{-4}	4,180	-80	1.8	2.0	28.9	6.2	6.8	21.6	23.4	0.6	4.9	5.0	8.6	8.6
9:30	0.1934	240.6	8.3×10^{-4}	4,180	-80	3.0	3.2	46.5	10.4	11.1	22.4	23.9	0.9	5.0	5.0	5.4	5.4
10:00	0.1934	329.9	8.3×10^{-4}	4,180	-80	5.8	4.9	63.8	20.1	17.1	31.5	26.8	1.3	5.3	5.2	4.2	4.1
10:30	0.1934	410.6	8.3×10^{-4}	4,180	-80	7.8	7.3	79.4	26.9	25.2	33.9	31.7	1.6	5.6	5.5	3.5	3.5
11:00	0.1934	455.8	8.3×10^{-4}	4,180	-80	11.4	9.6	88.2	39.4	33.3	44.7	37.8	1.8	6.3	5.9	3.6	3.4
11:30	0.1934	479.2	8.3×10^{-4}	4,180	-80	12.8	11.7	92.7	44.2	40.6	47.7	43.8	1.9	6.6	6.4	3.6	3.4
12:00	0.1934	524.0	8.3×10^{-4}	4,180	-80	14.1	13.5	101.3	48.8	46.7	48.1	46.1	2.0	6.9	6.8	3.4	3.3
12:30	0.1934	521.1	8.3×10^{-4}	4,180	-80	14.4	15.5	100.8	50.0	53.8	49.6	53.4	2.0	7.0	7.3	3.5	3.6
13:00	0.1934	568.8	8.3×10^{-4}	4,180	-80	15.1	15.8	110.0	52.4	54.8	47.6	49.8	2.2	7.2	7.4	3.3	3.3
13:30	0.1934	561.6	8.3×10^{-4}	4,180	-80	14.6	14.1	108.6	50.7	48.8	46.6	44.9	2.2	7.1	6.9	3.2	3.2
14:00	0.1934	541.7	8.3×10^{-4}	4,180	-80	14.5	13.2	104.6	50.2	45.6	47.9	43.6	2.1	7.0	6.7	3.4	3.2
14:30	0.1934	505.6	8.3×10^{-4}	4,180	-80	14.2	13.0	97.8	49.1	44.9	50.2	46.0	2.0	6.9	6.7	3.5	3.4
15:00	0.1934	458.8	8.3×10^{-4}	4,180	-80	13.1	13.0	88.7	45.5	45.1	51.2	50.8	1.8	6.7	6.7	3.8	3.8
15:30	0.1934	396.4	8.3×10^{-4}	4,180	-80	11.3	10.9	76.7	39.2	37.6	51.1	49.1	1.5	6.3	6.2	4.1	4.0
16:00	0.1934	323.6	8.3×10^{-4}	4,180	-80	10.6	10.5	62.6	36.6	36.4	58.5	58.2	1.3	6.1	6.1	4.9	4.9
16:30	0.1934	250.9	8.3×10^{-4}	4,180	-80	10.3	10.1	48.5	35.7	34.9	73.7	71.9	1.0	6.1	6.0	6.3	6.2
17:00	0.1934	163.0	8.3×10^{-4}	4,180	-80	10.2	10.1	31.5	35.4	34.9	112.3	110.6	0.6	6.1	6.0	9.6	9.5

ตารางที่ 6 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 26 มกราคม 2555

เวลา	A_c (m^2)	t (W/m^2)	\dot{m} (kg/s)	C_p ($J/kg\cdot s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_{th} ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	$Q_{out,p}$ (W)	$Q_{out,th}$ (W)	η_{cp} (%)	$\eta_{c,th}$ (%)	dQ_h (W)	$dQ_{out,p}$ (W)	$dQ_{out,th}$ (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	144.2	1.7×10^{-3}	4,180	-80	1.3	1.3	27.9	9.1	8.7	32.6	31.4	0.6	9.9	9.9	17.6	17.6
9:30	0.1934	247.6	1.7×10^{-3}	4,180	-80	3.0	3.0	47.9	20.9	20.6	43.9	43.1	1.0	10.1	10.1	10.5	10.4
10:00	0.1934	361.7	1.7×10^{-3}	4,180	-80	5.3	4.8	70.0	36.6	33.1	52.5	47.5	1.4	10.5	10.4	7.5	7.4
10:30	0.1934	391.1	1.7×10^{-3}	4,180	-80	6.2	5.7	75.6	42.9	39.7	56.9	52.8	1.5	10.7	10.6	7.1	7.0
11:00	0.1934	462.2	1.7×10^{-3}	4,180	-80	7.4	7.2	89.4	51.6	50.5	57.9	56.8	1.8	11.1	11.1	6.2	6.2
11:30	0.1934	522.4	1.7×10^{-3}	4,180	-80	8.8	8.2	101.0	61.0	57.2	60.6	56.8	2.0	11.6	11.4	5.7	5.6
12:00	0.1934	540.7	1.7×10^{-3}	4,180	-80	9.5	9.7	104.6	66.2	68.0	63.6	65.3	2.1	11.9	12.0	5.6	5.7
12:30	0.1934	550.2	1.7×10^{-3}	4,180	-80	10.0	10.3	106.4	69.4	71.8	65.5	67.8	2.1	12.0	12.2	5.6	5.7
13:00	0.1934	564.1	1.7×10^{-3}	4,180	-80	10.2	10.3	109.1	70.7	71.4	65.1	65.8	2.2	12.1	12.2	5.5	5.5
13:30	0.1934	553.8	1.7×10^{-3}	4,180	-80	10.0	9.6	107.1	69.7	66.6	65.4	62.4	2.1	12.1	11.9	5.6	5.5
14:00	0.1934	528.1	1.7×10^{-3}	4,180	-80	9.3	8.8	102.1	64.8	61.3	63.7	60.3	2.0	11.8	11.6	5.7	5.6
14:30	0.1934	498.5	1.7×10^{-3}	4,180	-80	8.0	7.5	96.4	55.8	51.9	58.1	54.1	1.9	11.3	11.1	5.8	5.7
15:00	0.1934	441.7	1.7×10^{-3}	4,180	-80	7.5	6.8	85.4	51.9	47.7	61.0	56.1	1.7	11.1	10.9	6.5	6.4
15:30	0.1934	391.9	1.7×10^{-3}	4,180	-80	6.5	5.9	75.8	45.3	41.1	60.0	54.5	1.5	10.8	10.7	7.1	7.0
16:00	0.1934	309.8	1.7×10^{-3}	4,180	-80	4.8	5.8	59.9	33.5	40.4	56.1	67.8	1.2	10.4	10.6	8.6	8.8
16:30	0.1934	249	1.7×10^{-3}	4,180	-80	4.0	5.0	48.2	27.5	34.9	57.4	72.7	1.0	10.2	10.5	10.6	10.8
17:00	0.1934	160.3	1.7×10^{-3}	4,180	-80	4.0	4.1	31.0	27.9	28.2	90.3	91.4	0.6	10.2	10.2	16.4	16.4

ตารางที่ 7 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 28 มกราคม 2555

เวลา	A_c (m^2)	I_r (W/m^2)	m (kg/s)	C_p ($J/kg.s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_{in} ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	Q_{outp} (W)	Q_{outh} (W)	η_{cp} (%)	η_{cjh} (%)	dQ_{in} (W)	dQ_{outp} (W)	dQ_{outh} (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	126.9	8.3×10^{-4}	4,180	-40	1.5	1.4	24.5	5.0	4.7	20.5	19.1	0.5	4.9	4.9	10.0	10.0
9:30	0.1934	209.2	8.3×10^{-4}	4,180	-40	2.6	2.2	40.5	9.0	7.6	22.3	18.9	0.8	5.0	5.0	6.1	6.1
10:00	0.1934	245.2	8.3×10^{-4}	4,180	-40	4.5	4.0	47.4	15.4	13.9	32.6	29.3	0.9	5.1	5.1	5.4	5.4
10:30	0.1934	292.1	8.3×10^{-4}	4,180	-40	5.1	5.5	56.5	17.5	18.9	31.0	33.5	1.1	5.2	5.3	4.6	4.6
11:00	0.1934	350.2	8.3×10^{-4}	4,180	-40	6.6	6.4	67.7	22.9	22.2	33.8	32.8	1.4	5.4	5.4	4.0	4.0
11:30	0.1934	378	8.3×10^{-4}	4,180	-40	7.7	8.0	73.1	26.9	27.8	36.8	38.0	1.5	5.6	5.6	3.8	3.8
12:00	0.1934	405	8.3×10^{-4}	4,180	-40	8.8	8.9	78.3	30.5	30.7	39.0	39.2	1.6	5.8	5.8	3.7	3.7
12:30	0.1934	428.2	8.3×10^{-4}	4,180	-40	9.0	8.4	82.8	31.1	29.1	37.5	35.2	1.7	5.8	5.7	3.5	3.4
13:00	0.1934	450.6	8.3×10^{-4}	4,180	-40	10.1	9.9	87.1	34.9	34.2	40.0	39.2	1.7	6.0	6.0	3.4	3.4
13:30	0.1934	455.9	8.3×10^{-4}	4,180	-40	10.1	10.6	88.2	34.9	36.8	39.6	41.7	1.8	6.0	6.1	3.4	3.5
14:00	0.1934	433.1	8.3×10^{-4}	4,180	-40	8.5	8.6	83.8	29.5	29.8	35.2	35.6	1.7	5.7	5.7	3.4	3.4
14:30	0.1934	410	8.3×10^{-4}	4,180	-40	8.2	8.1	79.3	28.3	27.9	35.7	35.2	1.6	5.7	5.6	3.6	3.5
15:00	0.1934	362.2	8.3×10^{-4}	4,180	-40	7.3	6.8	70.0	25.2	23.6	35.9	33.7	1.4	5.5	5.4	3.9	3.9
15:30	0.1934	299.7	8.3×10^{-4}	4,180	-40	7.0	6.4	58.0	24.1	22.0	41.6	38.0	1.2	5.5	5.4	4.7	4.6
16:00	0.1934	242.4	8.3×10^{-4}	4,180	-40	6.6	6.2	46.9	22.7	21.3	48.5	45.5	0.9	5.4	5.4	5.7	5.7
16:30	0.1934	164	8.3×10^{-4}	4,180	-40	6.7	6.0	31.7	23.2	20.6	73.3	65.1	0.6	5.4	5.3	8.5	8.4
17:00	0.1934	117.8	8.3×10^{-4}	4,180	-40	6.6	6.1	22.8	22.7	21.2	99.8	92.9	0.5	5.4	5.3	11.8	11.7

ตารางที่ 8 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 29 มกราคม 2555

เวลา	A_c (m^2)	t_f (W/m^2)	\dot{m} (kg/s)	C_p ($kJ/kg.s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_{th} ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	$Q_{out,p}$ (W)	$Q_{out,th}$ (W)	η_{cp} (%)	η_{lch} (%)	dQ_{in} (W)	$dQ_{out,p}$ (W)	$dQ_{out,th}$ (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	125.5	1.7×10^{-3}	4,180	-40	0.4	0.2	24.3	2.8	1.0	11.4	4.3	0.5	9.9	9.9	20.2	20.2
9:30	0.1934	229.1	1.7×10^{-3}	4,180	-40	0.9	1.3	44.3	6.3	8.7	14.1	19.6	0.9	9.9	9.9	11.1	11.1
10:00	0.1934	281.7	1.7×10^{-3}	4,180	-40	2.4	2.4	54.5	16.7	16.7	30.6	30.6	1.1	10.0	10.0	9.1	9.1
10:30	0.1934	318.9	1.7×10^{-3}	4,180	-40	3.4	3.4	61.7	23.3	23.3	37.7	37.7	1.2	10.1	10.1	8.2	8.2
11:00	0.1934	375.2	1.7×10^{-3}	4,180	-40	5.1	4.2	72.6	35.9	29.3	49.3	40.2	1.5	10.5	10.3	7.2	7.0
11:30	0.1934	405.2	1.7×10^{-3}	4,180	-40	5.7	4.9	78.4	39.7	33.8	50.5	43.0	1.6	10.6	10.4	6.7	6.6
12:00	0.1934	441.1	1.7×10^{-3}	4,180	-40	6.3	5.3	85.3	43.9	36.9	51.3	43.1	1.7	10.8	10.5	6.3	6.1
12:30	0.1934	465.5	1.7×10^{-3}	4,180	-40	6.6	5.7	90.0	46.0	39.7	50.9	43.9	1.8	10.9	10.6	6.0	5.9
13:00	0.1934	470.2	1.7×10^{-3}	4,180	-40	7.1	6.2	90.9	49.1	42.9	53.8	46.9	1.8	11.0	10.7	6.0	5.9
13:30	0.1934	471.5	1.7×10^{-3}	4,180	-40	7.3	6.4	91.2	50.5	44.3	55.2	48.3	1.8	11.1	10.8	6.0	5.9
14:00	0.1934	434.3	1.7×10^{-3}	4,180	-40	6.2	5.7	84.0	43.2	39.7	51.2	47.1	1.7	10.8	10.6	6.4	6.3
14:30	0.1934	403.6	1.7×10^{-3}	4,180	-40	5.8	4.9	78.1	40.4	33.8	51.6	43.1	1.6	10.6	10.4	6.8	6.6
15:00	0.1934	351.1	1.7×10^{-3}	4,180	-40	5.3	4.3	67.9	37.3	30.0	54.7	43.9	1.4	10.5	10.3	7.7	7.5
15:30	0.1934	292.5	1.7×10^{-3}	4,180	-40	5.1	4.1	56.6	35.2	28.2	62.0	49.7	1.1	10.5	10.2	9.2	9.0
16:00	0.1934	203	1.7×10^{-3}	4,180	-40	4.6	3.5	39.3	31.7	24.0	80.4	61.0	0.8	10.4	10.1	13.1	12.8
16:30	0.1934	149.6	1.7×10^{-3}	4,180	-40	4.1	3.1	28.9	28.2	21.3	97.1	73.2	0.6	10.2	10.1	17.6	17.3
17:00	0.1934	137.1	1.7×10^{-3}	4,180	-40	3.5	2.7	26.5	24.0	18.5	90.3	69.4	0.5	10.1	10.0	19.0	18.8

ตารางที่ 9 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2555

เวลา	A_c (m^2)	t_f (W/m^2)	\dot{m} (kg/s)	C_p ($kJ/kg\cdot s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_{th} ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	$Q_{out,p}$ (W)	$Q_{out,th}$ (W)	η_{cp} (%)	η_{lch} (%)	dQ_{in} (W)	$dQ_{out,p}$ (W)	$dQ_{out,th}$ (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	94	8.3×10^{-4}	4,180	0	0.8	0.3	18.2	2.8	1.2	15.3	6.7	0.4	4.9	4.9	13.4	13.4
9:30	0.1934	137.8	8.3×10^{-4}	4,180	0	1.4	0.7	26.7	4.9	2.4	18.2	9.1	0.5	4.9	4.9	9.2	9.2
10:00	0.1934	260.2	8.3×10^{-4}	4,180	0	2.3	2.2	50.3	8.0	7.6	15.9	15.2	1.0	5.0	5.0	4.9	4.9
10:30	0.1934	307	8.3×10^{-4}	4,180	0	3.6	2.6	59.4	12.5	8.8	21.0	14.9	1.2	5.1	5.0	4.2	4.2
11:00	0.1934	367	8.3×10^{-4}	4,180	0	4.2	4.0	71.0	14.6	13.9	20.5	19.6	1.4	5.1	5.1	3.6	3.6
11:30	0.1934	477	8.3×10^{-4}	4,180	0	6.2	6.2	92.3	21.5	21.5	23.3	23.3	1.8	5.4	5.4	2.9	2.9
12:00	0.1934	504.7	8.3×10^{-4}	4,180	0	7.1	7.4	97.6	24.6	25.7	25.2	26.3	2.0	5.5	5.5	2.8	2.8
12:30	0.1934	520.7	8.3×10^{-4}	4,180	0	8.0	7.6	100.7	27.8	26.2	27.6	26.0	2.0	5.6	5.6	2.8	2.8
13:00	0.1934	541.9	8.3×10^{-4}	4,180	0	8.9	9.4	104.8	30.9	32.4	29.5	31.0	2.1	5.8	5.9	2.8	2.8
13:30	0.1934	513.2	8.3×10^{-4}	4,180	0	8.2	8.3	99.3	28.3	28.8	28.5	29.0	2.0	5.7	5.7	2.8	2.9
14:00	0.1934	498.2	8.3×10^{-4}	4,180	0	7.0	7.3	96.4	24.3	25.2	25.2	26.1	1.9	5.5	5.5	2.8	2.8
14:30	0.1934	387.3	8.3×10^{-4}	4,180	0	5.9	5.8	74.9	20.5	20.0	27.3	26.6	1.5	5.3	5.3	3.5	3.5
15:00	0.1934	355.9	8.3×10^{-4}	4,180	0	4.8	3.8	68.8	16.7	13.4	24.2	19.4	1.4	5.2	5.1	3.7	3.7
15:30	0.1934	256.4	8.3×10^{-4}	4,180	0	4.1	3.7	49.6	14.1	12.7	28.3	25.5	1.0	5.1	5.1	5.1	5.1
16:00	0.1934	164.5	8.3×10^{-4}	4,180	0	3.5	2.6	31.8	12.1	9.0	38.2	28.4	0.6	5.1	5.0	7.9	7.8
16:30	0.1934	70.9	8.3×10^{-4}	4,180	0	4.8	3.7	13.7	16.5	12.8	120.2	93.6	0.3	5.2	5.1	18.8	18.4
17:00	0.1934	46.7	8.3×10^{-4}	4,180	0	5.3	4.1	9.0	18.4	14.2	203.6	157.5	0.2	5.2	5.1	28.9	28.1

ตารางที่ ง 10 ข้อมูลการคำนวณผลการทดลองวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555

เวลา	A_c (m^2)	t (W/m^2)	m (kg/s)	C_p ($kJ/kg.s$)	P (kPa)	ΔT_p ($^{\circ}C$)	ΔT_m ($^{\circ}C$)	Q_{in} (W)	$Q_{out,p}$ (W)	$Q_{out,m}$ (W)	η_{ep} (%)	η_{cth} (%)	dQ_m (W)	$dQ_{out,p}$ (W)	$dQ_{out,m}$ (W)	$d\eta_p$	$d\eta_{th}$
9:00	0.1934	143.1	1.7×10^{-3}	4,180	0	0.7	0.6	27.7	4.5	4.5	16.3	16.3	0.6	9.9	9.9	17.7	17.7
9:30	0.1934	174.1	1.7×10^{-3}	4,180	0	1.1	0.9	33.7	7.7	6.6	22.7	19.6	0.7	9.9	9.9	14.6	14.6
10:00	0.1934	231.2	1.7×10^{-3}	4,180	0	1.5	1.3	44.7	10.5	9.1	23.3	20.2	0.9	9.9	9.9	11.0	11.0
10:30	0.1934	335.5	1.7×10^{-3}	4,180	0	2.2	2.9	64.9	15.0	20.2	23.0	31.0	1.3	10.0	10.1	7.6	7.7
11:00	0.1934	401.5	1.7×10^{-3}	4,180	0	3.6	3.9	77.7	24.7	27.2	31.7	34.9	1.6	10.2	10.2	6.5	6.5
11:30	0.1934	432	1.7×10^{-3}	4,180	0	4.3	4.1	83.5	29.6	28.6	35.3	34.1	1.7	10.3	10.3	6.1	6.1
12:00	0.1934	496	1.7×10^{-3}	4,180	0	5.0	5.3	95.9	34.9	36.6	36.2	38.0	1.9	10.5	10.5	5.4	5.4
12:30	0.1934	515.1	1.7×10^{-3}	4,180	0	5.5	5.7	99.6	38.3	39.7	38.3	39.7	2.0	10.6	10.6	5.3	5.3
13:00	0.1934	510	1.7×10^{-3}	4,180	0	6.1	5.9	98.6	42.5	40.8	42.9	41.2	2.0	10.7	10.7	5.4	5.4
13:30	0.1934	507.1	1.7×10^{-3}	4,180	0	5.8	5.6	98.1	40.4	39.0	41.0	39.6	2.0	10.6	10.6	5.4	5.4
14:00	0.1934	443	1.7×10^{-3}	4,180	0	5.1	4.9	85.7	35.5	33.8	41.3	39.3	1.7	10.5	10.4	6.1	6.0
14:30	0.1934	421.1	1.7×10^{-3}	4,180	0	4.2	4.0	81.4	28.9	27.9	35.4	34.1	1.6	10.3	10.2	6.3	6.2
15:00	0.1934	338.3	1.7×10^{-3}	4,180	0	4.3	3.2	65.4	29.6	22.3	45.1	33.9	1.3	10.3	10.1	7.8	7.7
15:30	0.1934	282.7	1.7×10^{-3}	4,180	0	3.4	2.9	54.7	23.3	20.2	42.5	36.8	1.1	10.1	10.1	9.2	9.1
16:00	0.1934	180.2	1.7×10^{-3}	4,180	0	3.4	2.9	34.9	23.7	20.2	67.7	57.7	0.7	10.1	10.1	14.4	14.3
16:30	0.1934	166.4	1.7×10^{-3}	4,180	0	3.7	3.6	32.2	25.4	25.1	78.7	77.6	0.6	10.2	10.2	15.7	15.7
17:00	0.1934	69.5	1.7×10^{-3}	4,180	0	3.7	2.6	13.4	25.8	17.8	191.0	131.7	0.3	10.2	10.0	37.6	37.0