

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อน

แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

Solar Water Heater with Evacuated Tube Thermosyphon Collector

นายดำรงศักดิ์ ท้าวอินทร์ตะ รหัส 49380813
นายภัทรพันธ์ ขอทะเสน รหัส 49381070
นายवलันต์ รุ่งวิทย์วาทัญญู รหัส 49381261

ชื่อของผลงานวิศวกรรมศาสตร์	
ฉบับที่	14 กค 2553
เลขทะเบียน	15072773
เลขเรียกหนังสือ	
มหาวิทยาลัยธนบุรี	

รศ.
๑๔๙๙ค
๑๕๕๒

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

ปีการศึกษา 2552



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ : เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอด
สุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

(Solar Water Heater with Evacuated Tube Thermosyphon Collector)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายดำรงศักดิ์ ท้าวอินทร์ดีะ รหัส 49380813
: นายภัทรพันธ์ ขอทะเลสน รหัส 49381070
: นายวสันต์ รุ่งวิทย์วาทัญญู รหัส 49381261

ที่ปรึกษาโครงการ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	: เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	: นายดำรงศักดิ์ ท้าวอินทร์ดีะ	รหัส 49380813
	: นายภัทรพันธ์ ขอทะเลเสน	รหัส 49381070
	: นายวสันต์ รุ่งวิทย์วาทัญญู	รหัส 49381261
ที่ปรึกษาโครงการงาน	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์	
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล	
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	: 2552	

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ตัวกักเก็บความร้อน และตัวถังน้ำร้อน ลักษณะตัวกักเก็บความร้อนเป็นหลอดแก้วสุญญากาศ 2 ชั้นข้างในประกอบด้วยท่อเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R134a เป็นสารทำงาน เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มีขนาด กว้าง 1.18 m ยาว 1.975 m และสูง 0.745 m มีพื้นที่รับแสง 4.099 m² โดยมีท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 15 ท่อ และถังน้ำร้อนมีความจุ 15 ลิตรอัตราการไหลของน้ำผ่านถังน้ำร้อนคือ 1 l/min จากการทดลองเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน ในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 ตั้งแต่เวลา 7.30 น. ถึง 17.30 น. พบว่าค่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสงและความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกจากถังน้ำร้อน โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 17:30 น. มีค่าประมาณ 78% ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยตลอดทั้งวัน มีค่าประมาณ 28.9% น้ำร้อนมีอุณหภูมิสูงสุดที่เวลา 16.00 น. มีค่าประมาณ 42.6 °C และอุณหภูมิลดลงทั้งวันมีค่าประมาณ 39.5 °C

Project title : Solar Water Heater with Evacuated Tube Thermosyphon Collector
Name : Mr. Damrongsak Tawinta ID. 49380813
: Mr. Pattarapun Kortasen ID. 49381070
: Mr. Wasan Rungwitwathunyu ID. 49381261
Project advisor : Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan
Major : Mechanical Engineering
Department : Mechanical Engineering
Academic year : 2009

.....

Abstract

The project aimed to design and construct the solar water heater with evacuated tube thermosyphon collector. It consisted of two main parts, the collector and the hot water tank. The collector type was a coaxial double-layer evacuated glass tube which inside held thermosyphon with using R134a as a working fluid. The complete solar water heater was 1.18 m wide, 1.975 m long and 0.745 m high and consisted of 15 thermosyphon pipes. The collector area was 4.099 m². The capacity of the hot water tank was 15 l. The flow rate of water was 1 l/min through hot water tank. The solar water heater with evacuated tube thermosyphon collector was tested in May 5, 2010 along the local time of the day from 7:30 a.m. to 5:30 p.m. and its thermal efficiencies were recorded. It was found from the experimental data that the thermal efficiency of solar water heater depended on the solar intensity and the temperature difference of water inlet and outlet from hot water tank. The highest thermal efficiency was 78% at 5:30 p.m. The average thermal efficiency throughout the day was 28.9%. The highest water temperature was 42.6°C at 4:00 p.m and the average water temperature during the day was 39.5°C.

กิตติกรรมประกาศ

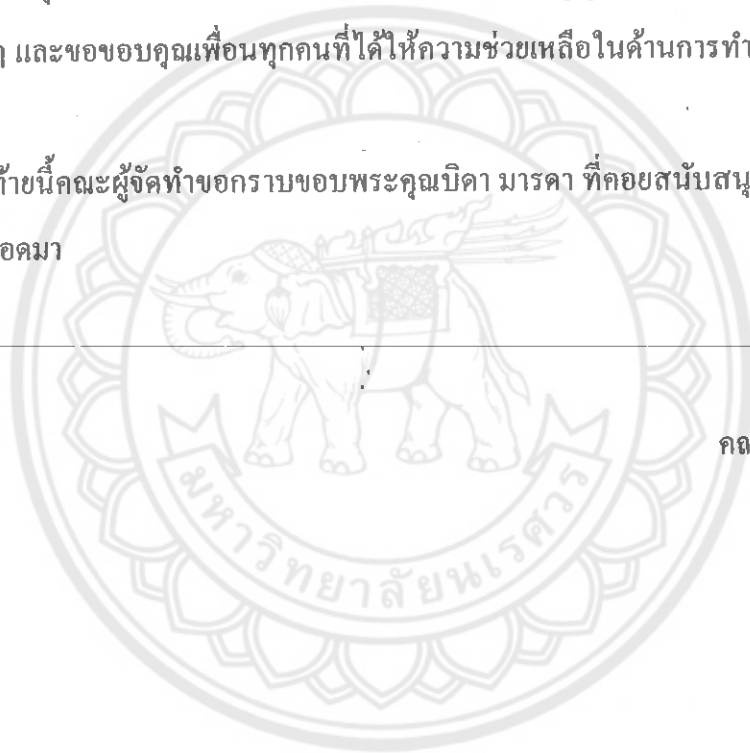
โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำในการทำโครงการจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คณะผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ วาฤทธิ์ ภมร ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

ขอขอบคุณ นายชัยวัฒน์ วรรณ โกษิตย์ ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาโท ที่ได้คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการและด้านเอกสาร

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ สม่ำเสมอตลอดมา

คณะผู้จัดทำโครงการ



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญกราฟ	ฅ
ลำดับสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.4 ขอบเขตของการทำโครงการ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.6 แผนการดำเนินโครงการ	5
1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน	6
1.8 อุปกรณ์ที่ใช้	6
1.9 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์	7
2.2 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	11
2.3 การถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน	18
2.4 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนผิวทรงกระบอก	23
2.5 การแผ่รังสี	24
2.6 สมการของการถ่ายเทความร้อนในระบบทำน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	31
2.8 ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	
3.1 ตำราจรรยาบรรณข้อมูล	33
3.2 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อน	35
3.3 การตั้งสมมุติฐาน	36
3.4 การคำนวณการออกแบบ	36
3.5 การออกแบบ	43
3.6 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	45
3.7 การดำเนินการทดลอง	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	55
4.2 ผลการทดลอง	57
4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสูญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	58
4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสูญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	61
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองและผลการวิเคราะห์	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดลอง	68
ภาคผนวก ข กราฟข้อมูลการทดลอง	74
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติ	77
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ	84
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	91



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลพื้นฐานของห้องสุญญากาศ	33
ตารางที่ 3.2	ตารางสำหรับใช้เลือกขนาดท่อทองแดงที่นำมาเป็นเทอร์โมไซฟอน	34
ตารางที่ 3.3	แสดงรายละเอียดที่ได้จากการคำนวณการออกแบบ	42
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบการคำนวณการออกแบบและผลการทดลองจากเครื่องที่สร้าง	55
ตารางที่ 4.2	แสดงการเปรียบเทียบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า	62
ตารางที่ ก 1	แสดงตารางบันทึกข้อมูลและผลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	69
ตารางที่ ก 2	ข้อมูลการทดลองวันที่ 5 พฤษภาคม 2553	71
ตารางที่ ก 3	ตารางการคำนวณค่าพลังงานความร้อน	73
ตารางที่ ค 1	แสดงสมบัติของ R-134a	78
ตารางที่ ค 2	แสดงสมบัติของ Refrigerant-134a	80
ตารางที่ ค 3	แสดงสมบัติของอากาศ	81
ตารางที่ ค 4	แสดงสมบัติของน้ำ	82
ตารางที่ ค 5	แสดงคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	83
ตารางที่ ง 1	ตารางผลการคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับในหน่วยของวัตต์	85
ตารางที่ ง 2	ตารางผลการคำนวณหาอัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับในแต่ละช่วงเวลา	86
ตารางที่ ง 3	ตารางผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละช่วงเวลา	88

สารบัญรูปภาพ

	หน้า	
รูปที่ 1.1	แสดงแผนภาพรวมของระบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัว กักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน และเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีเทอร์โมไซฟอน	5
รูปที่ 2.1	ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี	8
รูปที่ 2.2	ไพรานอมิเตอร์	10
รูปที่ 2.3	ไพรานอมิเตอร์รัศมีกระจาย	10
รูปที่ 2.4	ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบน	13
รูปที่ 2.5	ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์	13
รูปที่ 2.6	ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศ	14
รูปที่ 2.7	แสดงการสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากหลอดสุญญากาศ	15
รูปที่ 2.8	เทอร์โมไซฟอนแบบระบบเปิด	16
รูปที่ 2.9	เทอร์โมไซฟอนแบบระบบปิด	17
รูปที่ 2.10	แสดงการทำงานภายในหลอดแก้วสุญญากาศ	17
รูปที่ 2.11	แสดงการเชื่อมต่อของเทอร์โมไซฟอนกับระบบ	18
รูปที่ 2.12	แสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด	19
รูปที่ 2.13	วงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน	20
รูปที่ 2.14	การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับ	23
รูปที่ 2.15	รูปวัตถุโค้งงอขนาดเล็กอยู่ในโพรงปิดขนาดใหญ่ ($A_2 \gg A_1$)	24
รูปที่ 2.16	รูปทรงกระบอกซ้อนคู่ร่วมศูนย์กลางยาวอนันต์	25
รูปที่ 2.17	รูปแสดงปริมาณควบคุม (Control Volume) ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงาน แสงอาทิตย์ทั้งระบบ	26
รูปที่ 2.18	รูปแสดงปริมาณควบคุมของผิวแก้วภายนอกกับพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์	27
รูปที่ 2.19	รูปแสดงปริมาณควบคุมของท่อเทอร์โมไซฟอน	29
รูปที่ 2.20	รูปแสดงปริมาณควบคุมส่วนของถังเก็บน้ำร้อน	30
รูปที่ 3.1	แสดงรูปของเครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	35
รูปที่ 3.2	แสดงรูปของท่อเทอร์โมไซฟอน	43
รูปที่ 3.3	ภาพถ่ายของถังน้ำร้อน	43

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.4	ภาพ 3 มิติของถังน้ำร้อน	44
รูปที่ 3.5	ภาพถ่ายของโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์	44
รูปที่ 3.6	ภาพ 3 มิติของโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์	45
รูปที่ 3.7	ภาพ 3 มิติของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน	45
รูปที่ 3.8	แสดงรูปท่อเทอร์โมไซฟอน	46
รูปที่ 3.9	แสดงรูปการประกอบท่อเทอร์โมไซฟอนกับหลอดแก้วสุญญากาศ	46
รูปที่ 3.10	แสดงรูปถังน้ำร้อน	47
รูปที่ 3.11	แสดงรูปโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์	47
รูปที่ 3.12	แสดงรูปการประกอบหลอดแก้วสุญญากาศกับ โครงฐาน	48
รูปที่ 3.13	แสดงรูปการประกอบถังน้ำร้อนเข้ากับ โครงฐานและหลอดแก้วสุญญากาศ	48
รูปที่ 3.14	แสดงรูปการหุ้มฉนวนของถังน้ำร้อน	49
รูปที่ 3.15	แสดงจุดวัดในการทดลอง	49
รูปที่ 3.16	แสดงไพรมอมิเตอร์	50
รูปที่ 3.17	แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ	50
รูปที่ 3.18	แสดงตัวอย่างสายเทอร์โมคัปเปิล	50
รูปที่ 3.19	แสดงเครื่องวัดอัตราการไหล	51
รูปที่ 3.20	เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	51
รูปที่ 3.21	แสดงจุดเก็บข้อมูลของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	52

สารบัญกราฟ

	หน้า	
กราฟที่ 4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออก อุณหภูมิสภาพแวดล้อม และค่าความเข้มแสงเทียบกับเวลา	57
กราฟที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับแสงได้รับกับ เวลา	58
กราฟที่ 4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนได้รับกับเวลา	59
กราฟที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราความร้อนสะสมภายในถังน้ำร้อนกับ เวลา	60
กราฟที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับ เวลา	61
กราฟที่ ข 1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดจัดเก็บข้อมูล , พลังงานแสงอาทิตย์กับเวลา วันที่ 5 พฤษภาคม 2553	75
กราฟที่ ข 2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นใน ระบบกับเวลา	76

ลำดับสัญลักษณ์

		หน่วย
A_a	พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
A_c	พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
A_{out}	พื้นที่เทอร์โมไซฟอนส่วนควบแน่นต่อหนึ่งท่อ	m^2
A_x	พื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ	m^2
A_1	พื้นที่ท่อภายในที่พิจารณา	m^2
A_2	พื้นที่ท่อนอกที่พิจารณา	m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	$kJ/kg.K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
D_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
D_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน	m
\dot{E}_g	ไม่มีแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในปริมาตรควบคุม	W/m^2
\dot{E}_{in}	พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (I_s)	W/m^2
\dot{E}_{out}	พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมหรือความร้อนสูญเสียจากระบบ	W/m^2
\dot{E}_{st}	พลังงานสะสมของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (Q_{st})	W/m^2
F_R	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	-
F	อัตราการเค็มสารทำงานในส่วนทำระเหย 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_{co}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย	$W/m^2.K$
h_{co}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น	$W/m^2.K$
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน	J/kg
I_t	ความเข้มแสง	W/m^2
k_{Al}	ค่าการนำความร้อนถังน้ำร้อน (อลูมิเนียม)	$W/m.K$

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
k_{Fiber}	ค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน	W/m.K
k	ค่าการนำความร้อน	W/m.K
k_{Cu}	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของผนังท่อทองแดง	W/m.K
l_c	ความยาวของส่วนทำระเหย	m
l_e	ความยาวของส่วนควบแน่น	m
L	ความร้อนแฝง	J/kg
M_T	มวลรวมของน้ำในระบบทำน้ำร้อนทั้งหมด	kg
M_{water}	มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน	kg
\dot{m}_c	อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล	kg/s
n	จำนวนท่อแก้วสุญญากาศ	-
P_a	ความดันบรรยากาศ	Pa
P_v	ความดันไอของสารทำงาน	Pa
P_r	เลขพรินด์เทิล	-
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด	$^{\circ}C$
Q_{loss1}	พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานการพาและการแผ่รังสีความร้อน	W/m^2
Q_{rad}	พลังงานที่แผ่อาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับแสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้ว	W/m^2
Q_{TS}	พลังงานเข้าสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์	W/m^2
Q_{radair}	ค่าความร้อนสูญเสียโดยการเปล่งรังสีความร้อนจากหลอดแก้วสู่อากาศหาได้จากสมการดังนี้	W/m^2
Q_{st}	ความร้อนสะสมของน้ำในถังน้ำร้อน	W
Q_{tank}	ความร้อนสูญเสียผ่านทางถังน้ำร้อน	W
I_t	รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยที่ตกลงบนตัวกักเก็บแสงอาทิตย์จากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=n$	W/m^2
r_1	รัศมีท่อภายในที่พิจารณา	m
r_2	รัศมีท่อภายนอกที่พิจารณา	m
$r_{tank,in}$	รัศมีภายในของถังน้ำร้อน	m

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
$r_{\text{Lank,out}}$	รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อน	m
r_{Fiber}	รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนแล้ว	m
Ra_D	เลขเรย์ลี	-
Re_f	ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของสารทำงาน	-
S_{co}	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
T_w	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บจากช่วงเวลาก่อนหน้า	°C
T_{wn}	อุณหภูมิน้ำในถังเก็บค่าใหม่	°C
T_{in}	อุณหภูมิของของไหลขาเข้า	°C
T_{out}	อุณหภูมิของของไหลขาออก	°C
T_a	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	°C
T_{am}	อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระบบทำน้ำร้อนจากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=n$	°C
Δt	ช่วงเวลาที่ใช้คำนวณ	s
T_{ab}	อุณหภูมิส่วนพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์	°C
U_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน	W/m ² .K
Z	ความต้านทานความร้อนรวม	K/W
Z_1	ความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งกำเนิดความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหย	K/W
Z_2	ความต้านทานความร้อน โดยการนำผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย	K/W
Z_3	ความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือด	K/W

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
Z_{3f}	ความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว	K/W
Z_{3p}	ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด	K/W
Z_4	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวใน ส่วนของส่วนทำระเหย	K/W
Z_5	ความต้านทานความร้อนของ pressure drop จากส่วนทำระเหยไปยังส่วน ควบแน่น	K/W
Z_6	ความต้านทานความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสไอกับผิวของของเหลวใน ส่วนควบแน่น	K/W
Z_7	ความต้านทานความร้อนภายในของไหลที่กำลังควบแน่น	K/W
Z_8	ความต้านทานความร้อน โดยการผ่านตัวนำผ่านความหนาของผนังท่อ เทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น	K/W
Z_9	ความต้านทานความร้อนระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบาย ความร้อน	K/W
Z_{10}	ความต้านทานความร้อนในแนวแกนตามผนังท่อ	K/W
$Z_{convair}$	เป็นความต้านทานความร้อน โดยการพาของอากาศ	K/W
Z_{condw}	คือความต้านทานความร้อนถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นสู่น้ำร้อน	K/W
Z_{tot}	ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน	K/W
Z_{tank}	ความต้านทานการสูญเสียความร้อนที่ถังน้ำร้อน	K/W
$(\tau\alpha)_e$	สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์	-
η_c	ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	%
ε_1	ค่าการเปล่งรังสีของท่อภายนอก	-
ε_2	ค่าการเปล่งรังสีของท่อภายใน	-
σ	ค่าชดเชฟาน-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_r	ความหนืดของของเหลว	$N \cdot s/m^2$

ลำดับสัญลักษณ์ (ต่อ)

		หน่วย
ϕ_2	merit number $(Lk^3 \rho_1^2 / \mu_r)^{0.25}$	$\text{kg}/(\text{K}^{0.25} \text{s}^{2.5})$
μ_1	สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน	m^2/s
ρ_1	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว	kg/m^3
ρ_2	ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ	kg/m^3
λ_1	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน	$\text{W}/\text{m.K}$



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นต่อการดำรงชีวิตประจำวัน มนุษย์จึงได้มีการพัฒนาการใช้พลังงานมาตลอดตามยุคสมัยต่างๆ โดยเริ่มจากการใช้พลังงานจากไม้ฟืน เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน หินน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ โดยเชื้อเพลิงฟอสซิลนั้นเป็นส่วนหนึ่งของพลังงานที่สะสมอยู่ในซากพืชและซากสัตว์และได้ทับถมกันไว้ในชั้นทราย หินปูน ตะกอน โคลน ที่ซ้อนกันมาเป็นเวลา 500-600 ล้านปี จากการสำรวจปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมในโลก มีอยู่ประมาณ 250,000 ล้านบาร์เรล และถ่านหินประมาณ 470 ล้านตัน ถ้ามีการใช้พลังงานดังเช่นปัจจุบัน น้ำมันปิโตรเลียมจะหมดจากโลกประมาณ 50 ปีข้างหน้า และถ่านหินจะหมดจากโลกประมาณ 100 ปีข้างหน้า อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานสิ้นเปลืองเหล่านี้ จะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การเกิดฝนกรด ปรากฏการณ์เรือนกระจก ปริมาณฝุ่น และแก๊สพิษในอากาศเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมสูงขึ้นทุกปี เกิดการแปรปรวนของฤดูกาล ทำให้ผลผลิตทางการเกษตรลดลง การตายของต้นไม้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นมนุษย์จึงได้มีการพัฒนาในเรื่องของพลังงานธรรมชาติ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ โดยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่สะอาด สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ให้แสงสว่าง ให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย การประยุกต์ใช้เพื่อระบายอากาศภายในบ้าน การตากแห้งหรือการอบแห้ง และเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เครื่องทำน้ำร้อนจึงเป็นตัวอย่างหนึ่งของเทคโนโลยีเพื่ออำนวยความสะดวกสบายที่สิ้นเปลืองพลังงานจำนวนไม่น้อย ตั้งแต่อดีตเครื่องทำน้ำร้อนถูกออกแบบให้ผลิตน้ำร้อนจากพลังงานไฟฟ้าที่เป็นพลังงานที่สิ้นเปลือง ซึ่งเมื่อคิดโดยภาพรวมของโลกจะเห็นว่าเราต้องสูญเสียพลังงานจำนวนมากไปกับเครื่องทำน้ำร้อน

ดังนั้นเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน โดยใช้ตัวรับรังสีดวงอาทิตย์ (Solar collector) เป็นตัวแปลงและเก็บพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้สำหรับกิจกรรมในครัวเรือน หากประเมินความ

ต้องการน้ำร้อนในครัวเรือน ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ในการอาบน้ำ มีปริมาณการใช้ประมาณวันละ 200 ลิตร พลังงานที่กำหนดจากแหล่งกำเนิดความร้อน คือ แสงอาทิตย์ประมาณ 30 MJ/day จะต้องใช้พื้นที่ตัวรับรังสีประมาณ 2 m²

ปัจจุบันการใช้เครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ได้รับความนิยมแพร่หลายอย่างกว้างขวางทั่วโลก ทั้งในยุโรป อเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น และประเทศจีน การผลิตเครื่องทำน้ำร้อนสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ ในบางประเทศ เช่น จีน อิสราเอล แคลิฟอร์เนีย และออสเตรเลีย-ตอนเหนือ ซึ่งระบบทำน้ำร้อน ได้มีผลบังคับทางกฎหมายเพื่อติดตั้งภายในบ้านที่สร้างใหม่ สำหรับการใส่เครื่อง

ทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ในประเทศไทยยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ทั้งนี้เนื่องจากมีราคาแพงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนจากไฟฟ้า และก๊าซหุงต้ม นอกจากนี้การบริการในการขายและการซ่อมบำรุงหลังการขายเป็นไปอย่างลำบาก เนื่องจากตัวแทนจำหน่ายจะอยู่ที่ส่วนกลาง คือ กรุงเทพมหานคร อุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเครื่องจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีจากต่างประเทศ

การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะต้องทำการพัฒนาที่ตัวรับรังสี ระบบท่อน้ำรับความร้อนจากตัวรับรังสี และถังเก็บน้ำร้อน โดยประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจะขึ้นอยู่กับตัวกักเก็บความร้อน ซึ่งมีหลายชนิดคือ แบบแผ่นแบน แบบรวมศูนย์และแบบหลอดสุญญากาศ จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 ชนิดพบว่า แบบหลอดสุญญากาศมีประสิทธิภาพการทำความร้อนสูง มีการสูญเสียความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับแบบอื่น สามารถผลิตน้ำร้อนได้จำนวนมากและได้อุณหภูมิสูงในการดึงความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ซึ่งมี 2 แบบคือ แบบเปิดและแบบปิดสองสถานะ โดยที่แบบปิดสองสถานะไม่มีปัญหาท่อแตกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน อีกทั้งเรื่องของไหลไม่ไหลเวียนบริเวณก้นท่อและปัญหาการดึงความร้อนในท่อที่มีขนาดยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กดังเช่นที่เกิดในแบบเปิด

ดังนั้น โครงการนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีการดึงความร้อนจากตัวกักเก็บความร้อน โดยใช้เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two-phase closed thermosyphon) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้ความร้อนแฝง และสามารถส่งถ่ายความร้อนได้ แม้ว่าจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย จากแนวความคิดดังกล่าวข้างต้น จึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ประหยัดพลังงานและสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูง โดยอาศัยหลักการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟน

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ได้ต้นแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟนที่ผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง

1.3.2 ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟน

1.3.3 สามารถปรับปรุงและแก้ไขเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟน เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3.4 ประหยัดพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากการนำเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซโฟนมาใช้แทนเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของการทำโครงการ

1.4.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำร้อน คือ $0.6 \text{ m}^3/\text{day}$

1.4.2 ระยะเวลาการทำงานทดลอง 7:30 น. ถึง 17:30 น.

1.4.3 วัตถุประสงค์พลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิก๊าซ ๓ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

1.4.4 หลอดแก้วสุญญากาศ 2 ชั้นทำมาจาก Borosilicate glass มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.058 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.047 m และยาว 1.5 m

1.4.5 เทอร์โมไซโฟนสร้างจากท่อทองแดงและใช้ R134a เป็นสารทำงานที่มีอัตราการเต็มของสารทำงาน 70 % ของปริมาตรส่วนทำระเหย

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล

1.5.1.1 ข้อมูลเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

1.5.1.2 ข้อมูลงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพสำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน

1.5.2 ทำการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบ

หลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

1.5.2.1 ออกแบบและเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

1.5.2.2 เขียนแบบแสดงโครงสร้างของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

1.5.3 ทำการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

1.5.4 ทดสอบการใช้งานและเก็บข้อมูล

1.5.4.1 ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน ดังรูปที่ 1.1

1.5.4.2 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของน้ำตามจุดต่างๆ ติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ไพรานอมิเตอร์) เข้ากับแผงรับแสงอาทิตย์

1.5.5 เริ่มทำการทดลองและเก็บข้อมูล โดยเริ่มตั้งแต่วันที่ 7:30 น. ถึง 17:30 น.

1.5.6 นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

1.5.7 สรุปผลการวิเคราะห์และประเมินผล

1.5.8 ทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์และนำเสนอผลงาน

1.7 สถานที่ปฏิบัติงาน

หน่วยวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

1.8 อุปกรณ์ที่ใช้

1. ไพรานอมิเตอร์ใช้สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์
2. เทอร์โมคัปเปิลใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ
3. เครื่องวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำ
4. หลอดแก้วสุญญากาศ 2 ชั้นทำมาจาก Borosilicate glass มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 0.058 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.047 m และยาว 1.5 m
5. ท่อทองแดง
6. สารทำงานใช้ R134a
7. โครงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
8. ถังเก็บน้ำร้อน

1.9 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

1.9.1 หลอดแก้วสุญญากาศ	20,000 บาท
1.9.2 ท่อทองแดง	6,000 บาท
1.9.3 สารทำงาน	2,500 บาท
1.9.4 โครงของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	1,500 บาท
1.9.5 ถังเก็บน้ำร้อน	2,000 บาท
รวม	32,000 บาท

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการและทฤษฎี คือ พลังงานแสงอาทิตย์

ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอก การแผ่รังสีความร้อน สมการของการถ่ายเทความร้อนในระบบทำน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

2.1.1 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์จึงมีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7% ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1.495×10^{11} m ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (Solar constant) คือค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ $1,353 \text{ W/m}^2$ บนผิวโลกจะมีความร้อนประมาณ 946.3 W/m^2

2.1.2 ประเภทของรังสีที่ผิวโลก

รังสีตรง (Beam or Direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

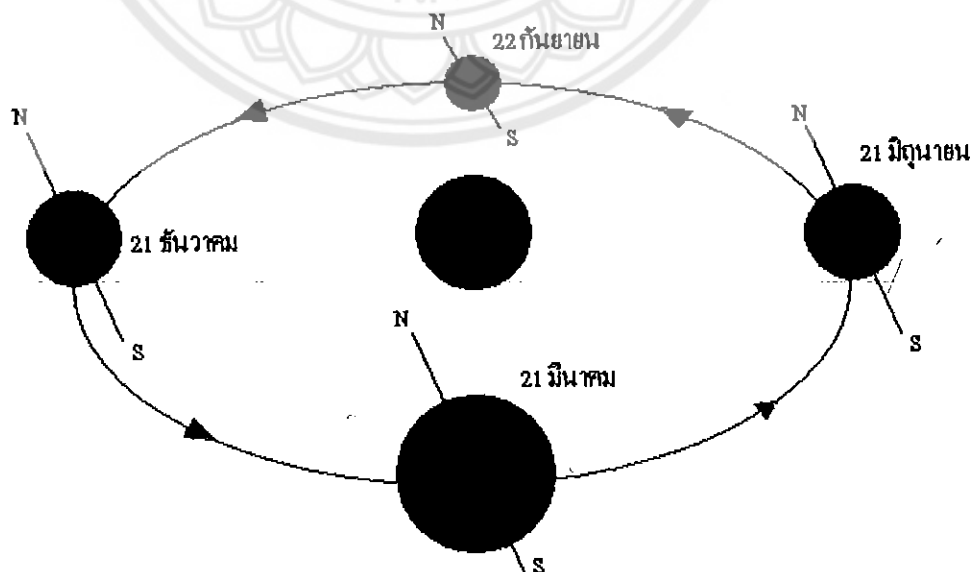
รังสีกระจาย (Diffuse radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศของโลกและวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า

รังสีรวม (Total or Global radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบบนผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและผิวโลก เรียกรังสีรวมนี้ว่า Total radiation สำหรับกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้น

ราบ รังสีรวมจะมาจากผิวโลก เรียกรังสีรวมในกรณีนี้ว่า Global radiation

2.1.3 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะที่แกนมุมเอียงทำมุมกับแนวตั้ง 23.5 องศา ตำแหน่งบนพื้นโลกหันเข้าหาดวงอาทิตย์ตามลักษณะที่แสดงในรูป 2.1 ทางขวามือเป็นตำแหน่งของโลกในวันที่ 21 มิถุนายน พื้นที่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด คนที่อยู่บนเส้นละติจูด 23.5 องศาเหนือ จะเห็นดวงอาทิตย์เหนือศีรษะพอดีที่เวลาเที่ยงวัน ประเทศที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร เช่น ประเทศไทย จะร้อนที่สุดเหนือซัมเมอร์ โซลทริส (คำว่า โซลทริส แปลว่าพระอาทิตย์) หลังจากวันที่ 21 มิถุนายน โลกโคจรในลักษณะที่หันพื้นที่ทางซีกโลกเหนือออกจากดวงอาทิตย์ วันที่ 22 กันยายน แนวของแสงอาทิตย์จะอยู่บนระนาบของเส้นศูนย์สูตร คนที่อยู่ทีเส้นศูนย์สูตรจะเห็นดวงอาทิตย์อยู่ตรงศีรษะพอดี โดยที่ซีกโลกด้านเหนือและซีกโลกด้านใต้จะรับแสงอาทิตย์เท่ากัน และช่วงเวลาของกลางวันและกลางคืนเท่ากันคือ 12 ชั่วโมง ที่เวลาดังกล่าวเรียกว่าอิกวinox หลังจากวันที่ 21 กันยายน ซีกโลกด้านเหนือจะหันออกจากดวงอาทิตย์มากที่สุด ซึ่งเป็นตอนที่หนาวมากที่สุดหรือ อินเตอร์ โซลทริส หลังจากวันที่ 21 ธันวาคม โลกจะโคจรไปอยู่ที่ตำแหน่งอิกวinoxอีกครั้งหนึ่งในวันที่ 21 มีนาคม เป็นผลดีต่อประเทศไทยแล้วที่ประสิทธิภาพการผลิตน้ำร้อนด้วยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะมีแสงเข้าถึงตลอดทั้งปี เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จึงเหมาะสมที่จะใช้ในประเทศไทย



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี [6]

2.1.4 อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการวัดพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดรังสีรวม รังสีตรง รังสีกระจาย และชั่วโมงที่มีแดด

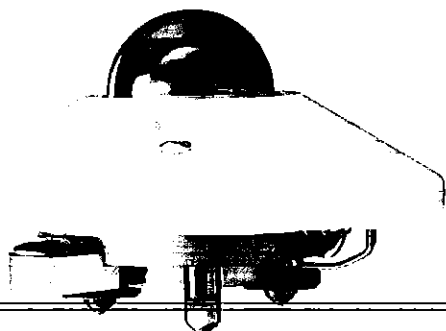
1. ไพรานอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดค่ารังสีรวม ปกติจะใช้วัดบนพื้นราบแต่อาจประยุกต์ใช้วัดรังสีกระจายได้โดยแหวนหรือจานบังเงา
2. ไพเฮลิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดรังสีจากดวงอาทิตย์
3. เครื่องบันทึกแดด เป็นอุปกรณ์วัดจำนวนชั่วโมงที่มีแดด

ในโครงการนี้เลือกใช้ไพรานอมิเตอร์เนื่องจากไพเฮลิโอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีแสงอาทิตย์ตามทิศทางของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องลงมา แต่โครงการนี้ต้องการความเข้มแสงตามทิศที่รังสีจากดวงอาทิตย์ส่องลงมากระทบตามแนวของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ส่วนเครื่องบันทึกแดด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดจำนวนชั่วโมงที่มีแดด ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการวัดความเข้มแสง ดังนั้นเนื้อหาของอุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์จะกล่าวเฉพาะไพรานอมิเตอร์

ไพรานอมิเตอร์

ไพรานอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดรังสีรวม โดยทั่วไปประกอบด้วยตัวรับแสง (Detector) ที่ประกอบด้วยเทอร์โมไพล์ (Thermopile) หลายชุดต่ออนุกรมกัน ตัวรับแสงบรรจุอยู่ในโคมแก้วครึ่งทรงกลม โคมแก้วนี้มีหน้าที่ป้องกันตัวรับแสงจากฝุ่นและลม ซึ่งจะทำให้ตัวรับแสงสูญเสียความร้อนไปเนื่องจากการพาและการแผ่รังสี ปกติโคมแก้วจะมี 2 ชั้นทำด้วยแก้วพิเศษซึ่งจะต้องมีความหนาที่สม่ำเสมอเพื่อที่จะไม่ก่อให้เกิดการกระจายของรังสีที่ตกกระทบบนตัวรับแสง เทอร์โมไพล์ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดเชื่อมกันอยู่ โลหะแต่ละชิ้นข้างหนึ่งชุบเคลือบด้วยสีดำและอีกด้านหนึ่งชุบเคลือบด้วยสีขาวสลับกันไป โลหะด้านที่ชุบเคลือบด้วยสีขาวจะมีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โลหะสีดำมีสมบัติการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เมื่อมีแสงตกกระทบจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของผิวทั้งสอง เนื่องจากโลหะข้างหนึ่งดูดกลืนรังสีอาทิตย์ อีกข้างหนึ่งสะท้อนรังสีอาทิตย์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก โดยที่แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดขึ้นกับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของโลหะขาวและดำ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวรับแสง แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าประมาณ $5-10 \text{ mV} \cdot \text{cal}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ โคมแก้วจะมีงานกลมสีขาวสวมอยู่ งานกลมนี้มีหน้าที่

ป้องกันรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นดินและสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะให้รังสีที่เข้า โคมเป็นรังสีที่มาจาก
 เครื่องทรงกลมท้องฟ้าเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2

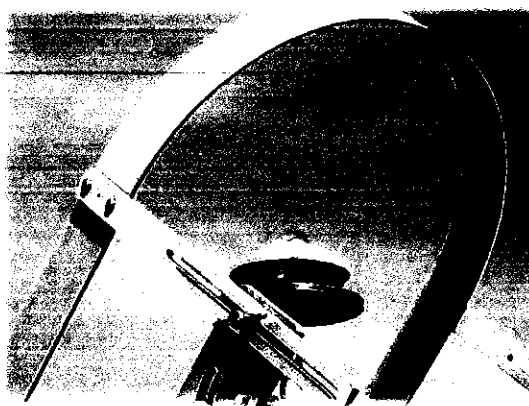


รูปที่ 2.2 ไพรานอมิเตอร์ [7]

ในการที่จะวัดรังสีกระจายในแนวราบสามารถทำได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ชนิดเดียวกับที่
 ใช้วัดรังสีรวม แต่จะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้บังรังสีตรงไม่ให้รังสีตรงตกลงบนตัวรับแสงดังรูปที่ 2.3
 อุปกรณ์บังรังสีตรงที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ

1. จานบังเงา (Shading disc) มีลักษณะเป็นจานกลมเล็กซึ่งขับเคลื่อนโดยใช้เครื่องมือติดตาม
 แสงอาทิตย์ (Solar tracking) โดยที่เงาของจานกลมจะตกลงบนตัวรับแสงตลอดทั้งวัน และขนาด
 ของเงาจะต้องมีขนาดพอดีกับตัวรับแสงเพื่อไม่ให้จานกลมบัง รังสีส่วนอื่นที่ไม่ใช่รังสีตรง รังสีที่
 ตกกระทบตัวรับแสงจึงเป็นรังสีกระจายเท่านั้น

2. แหวนบังเงา (Shading ring) มีลักษณะเป็นส่วนของวงแหวน โดยที่วงแหวนนี้จะต้องวางให้
 มีมุมเอียงเท่ากับเส้นรุ้งของตำแหน่งที่ต้องการวัด และจะต้องมีการขยับวงแหวนให้เงาของวงแหวน
 ตกกลงบนตัวรับแสงตลอดเวลา



รูปที่ 2.3 ไพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย [7]

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ตัวกักเก็บความร้อน (Collectors) และถังเก็บน้ำร้อน (Storage tanks) ในบางระบบอาจมีปั๊มน้ำเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ขึ้นอยู่กระบบว่าเป็นระบบแบบใด สำหรับรายละเอียดของตัวกักเก็บความร้อนและถังเก็บน้ำร้อน มีดังนี้

2.2.1 ตัวกักเก็บความร้อน

ตัวกักเก็บความร้อน จะมีรูปร่างลักษณะเป็นกล่อง กรอบหรืออาจเป็นห้องๆ หนึ่ง ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านลงมาให้เป็นพลังงานความร้อน แล้วส่งผ่านพลังงานความร้อนที่ได้ให้กับสารตัวกลางที่ไหลอยู่ในท่อ สำหรับตัวกักเก็บความร้อนมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. ผนังโปร่งใสเป็นผิวด้านที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์
2. แผ่นโลหะผิวสีดำหรือสีทึบด้านใน เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับความร้อน
3. มีการหุ้มฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนที่ดูดซับไว้รั่วไหลออกจากเครื่อง
4. ท่อหรือทางออกของความร้อน ซึ่งจะเป็นช่องทางนำความร้อนที่กักเก็บไว้ออกไปใช้งาน

โดยผ่านตัวกลาง เช่น น้ำ หรือของเหลวอื่นๆ

ผิวด้านที่รับพลังงานจากแสงอาทิตย์

สามารถใช้วัสดุโปร่งใสใดๆ ก็ได้ในการทำผิวด้านนี้ แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้กระจกใส เนื่องจากกระจกใสสามารถผลิตและหาซื้อได้ง่าย ในการทำเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์นั้น ควรเลือกใช้กระจกใสที่มีความแข็งแรง ทนทานต่อการแตกร้าวและการขีดข่วนได้ดีพอสมควร เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกและตกกระทบแผ่นดูดซับความร้อน แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งคุณสมบัติเด่นของกระจก คือ ยอมให้แสงผ่านได้ง่ายแต่เป็นฉนวนความร้อนที่ดี ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนจะถูกกักเก็บไว้

แผ่นดูดซับความร้อน

ความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อน จะถูกดูดซับไว้โดยวัตถุภายในเครื่อง ไม่ว่าจะวัตถุนั้นจะเป็นแผ่นโลหะ ถังเก็บน้ำ ท่อน้ำ ก้อนอิฐ หรือก้อนหิน ซึ่งวัตถุเหล่านี้ (อาจเรียกรวมๆ ว่ามวลกักเก็บความร้อน หรือ Thermal mass) ควรทาสีดำหรือสีทึบ เนื่องจากวัตถุสีดำหรือสีทึบ จะมีความสามารถในการดูดความร้อนสูง ยกตัวอย่างง่ายๆ เช่น รถยนต์ที่มีเบาะนั่งสีดำ เมื่อจอดทิ้งไว้กลางแดดโดยไม่เปิดกระจก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะผ่านกระจกเข้ามาในรถและความร้อนจะถูกดูดซับไว้โดยเบาะนั่งสีดำ ถ้าหากมีคนเข้าไปนั่งจะพบว่า เบาะนั่งจะร้อนมาก ซึ่งหากเบาะนั่งมีสี

อ่อนๆ เช่น สีเหลืองหรือสีขาว แสงอาทิตย์จะถูกสะท้อนออกไป ทำให้เบาะนั่งจะร้อนน้อยกว่าเบาะนั่งสีดำ แสดงให้เห็นว่า สีดำหรือสีทึบมีการดูดซับความร้อนได้ดี

วัตถุประสงค์ที่ตัวดูดซับมีความจำเป็นมากในการทำน้ำร้อนด้วยพลังแสงอาทิตย์ เนื่องจากหากปราศจากตัวดูดซับจะทำให้ระบบการทำความร้อนไม่สามารถผลิตความร้อนมาให้เพียงพอต่อการทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้

ฉนวนกันความร้อน

ธรรมชาติของความร้อนจะมีการเคลื่อนที่จากที่ร้อน ไปยังที่ที่เย็นกว่า หรือที่เรียกกันว่า การถ่ายเทความร้อนนั่นเอง ฉนวนกันความร้อนจะเป็นสิ่งป้องกันความร้อนรั่วไหล หรือเป็นการชะลอการรั่วไหลของความร้อน

เนื่องจากฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อนรั่วไหลออกมาภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงถือว่าฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทุกแบบ

ท่อหรือทางออกของความร้อน

เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านกระจกใสเข้ามาในเครื่องทำน้ำร้อน โดยมีตัวดูดซับความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนในการป้องกันความร้อนรั่วไหลแล้ว อุปกรณ์ที่สำคัญอีกอุปกรณ์หนึ่งคืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปยังที่ที่ต้องการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ในการปรับอากาศต้องมีช่องลม ท่อลม และพัดลมในการที่จะนำอากาศที่ได้รับการปรับอุณหภูมิแล้ว ไปยังส่วนต่างๆ ของอาคาร ในการทำน้ำร้อนไปใช้งานก็เช่นกัน ต้องมีท่อน้ำ ป้อนน้ำ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในการนำน้ำร้อน ไปยังถังเก็บหรืออุปกรณ์ที่ต้องการใช้ความร้อนจากน้ำร้อน

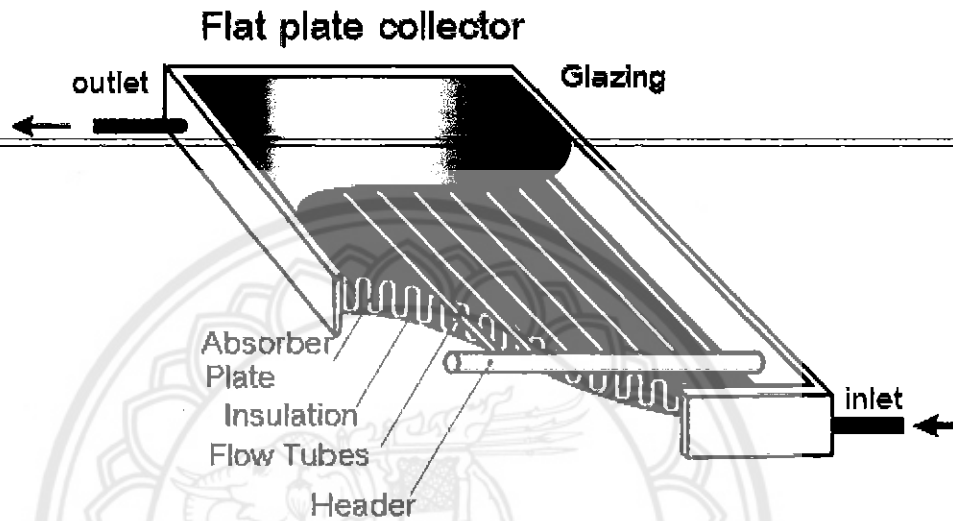
ประเภทของตัวกักเก็บความร้อน

โดยทั่วไป ตัวกักเก็บความร้อนแยกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบแผ่นแบน (Flat-plate collector) แบบหลอดสุญญากาศ (Evacuated-tube collector) และแบบความร้อนรวมศูนย์ (Concentrating collector)

1. ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบน

ประกอบด้วยแผ่นดูดซับรังสี ซึ่งเชื่อมติดกับกล่องหุ้มฉนวนกันความร้อน และมีแผ่นปิดด้านบน (โดยมากเป็นกระจก) ดังรูปที่ 2.4 เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน อย่างไรก็ตามแผงรับ

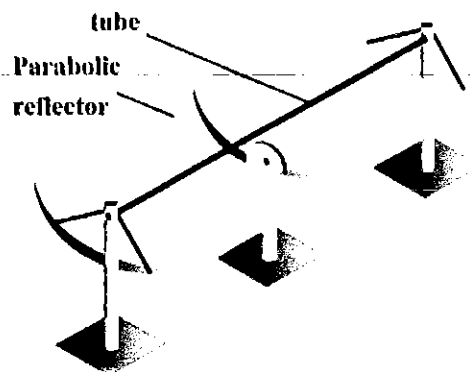
รังสีประเภทนี้ไม่ได้เป็นสุญญากาศ ทำให้ความร้อนถูกปล่อยออกมาได้ง่าย โดยเฉพาะในวันที่มีเมฆมาก การสูญเสียความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทนี้นับเป็นเทคโนโลยีที่เก่าและมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทหลอดสุญญากาศ โดยประสิทธิภาพของแผงจะลดลงเมื่อมีฝุ่นเกาะอยู่ตรงกระจกปิดแผง นอกจากนี้คุณภาพของน้ำจะไม่ค่อยดีเนื่องจากการเกิดของคราบน้ำในท่อ



รูปที่ 2.4 ตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบน [5]

2. ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์

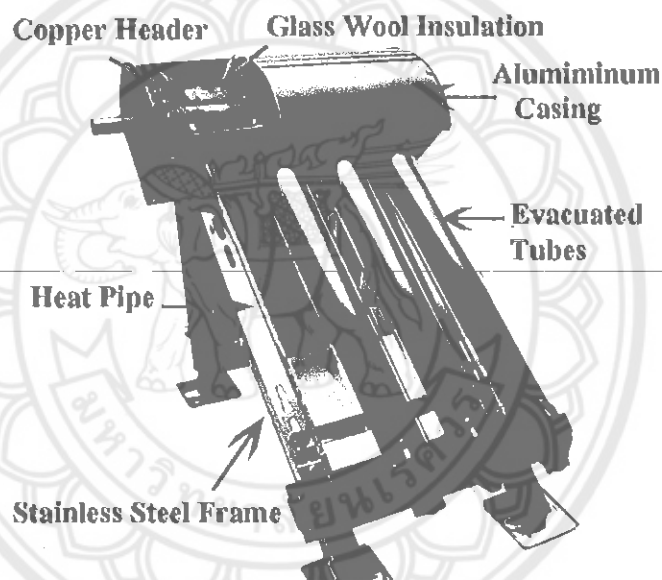
จะมีลักษณะเป็นกระจกที่มีรูปทรงโค้งแบบพาราโบลาคงรูปที่ 2.5 เพื่อทำหน้าที่สะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ให้มารวมที่ท่อ ซึ่งท่อจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวดูดซับและเป็นท่อที่บรรจุสารสำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อถ่ายเทไปยังอุปกรณ์อื่นๆ อีกต่อไป โดยแบบรวมศูนย์จะใช้พื้นที่ในการรับรังสีแสงอาทิตย์มากและใช้ต้นทุนในการสร้างสูง



รูปที่ 2.5 ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์ [8]

3. ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศ

หลอดสุญญากาศดังรูปที่ 2.6 ได้ถูกออกแบบและพัฒนามาจากเทคโนโลยีของแบบแผ่นแบนให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น มีอายุการใช้งานนานกว่า 15 ปี ประสิทธิภาพทำความร้อนสูง การสูญเสียความร้อนต่ำ และชุดแผงรับแสงไม่ต้องมีการบำรุงรักษา โดยหลอดแก้วสุญญากาศจะเป็นหลอดแก้ว 2 ชั้น โดยชั้นนอกเป็นหลอดแก้วใสเพื่อให้รังสีดวงอาทิตย์สามารถผ่านได้ ส่วนชั้นในทำหน้าทีเป็นตัวดูดซับ ซึ่งจะถูกล้อมด้วยสารดูดรังสีแบบพิเศษ ที่มีคุณลักษณะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดี และมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีน้อย สำหรับช่องว่างระหว่างชั้นหลอดแก้วจะมีลักษณะเป็นสุญญากาศซึ่งเป็นฉนวนอย่างดี สามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนจากการนำและการพาความร้อนได้มาก

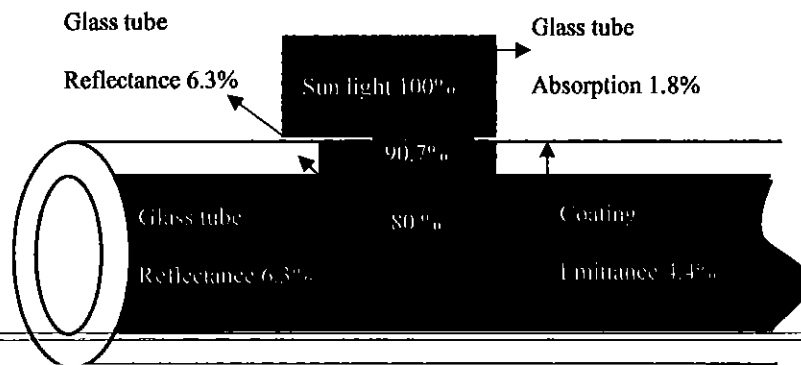


รูปที่ 2.6 ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศ [9]

หลักการทำงานของหลอดสุญญากาศ

เมื่อหลอดสุญญากาศได้รับรังสีความร้อนจากแสงอาทิตย์ ก็จะมีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากหลอดสุญญากาศ โดยที่มีการสูญเสียจากการสะท้อนของผิวหลอดทั้งด้านนอกและด้านในรวมกันเท่ากับ 12.6% และตามผิวหลอดแก้วอีก 1.8% รวมทั้งความต้านทานที่ผิวดูดซับอีก 4.4% เหลือนำไปใช้ 80% ดังรูปที่ 2.7 โดยจะทำการเก็บความร้อนด้วยสารดูดซับรังสีที่เคลือบอยู่ในหลอดแก้วชั้นใน แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นตัวนำความร้อนเข้าสู่ถังที่บรรจุน้ำ เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 60 – 80 °C

โดยประมาณ และเกิดความร้อนสม่ำเสมอ ทั้งนี้ความเข้มของรังสีความร้อนในแต่ละวันจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิน้ำ



รูปที่ 2.7 แสดงการสูญเสียและการดูดกลืนความร้อนจากหลอดแก้วสุญญากาศ [3]

จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเหตุผลที่เลือกใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศได้ดังนี้

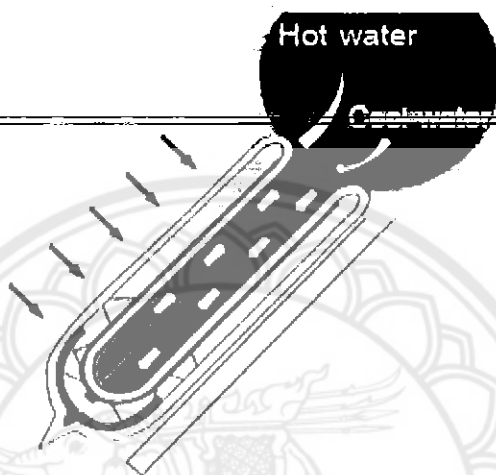
1. ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศจะไม่เกิดการสูญเสียความร้อนจากการนำ และการพา ซึ่งดีกว่าตัวกักเก็บความร้อนแบบแผ่นแบนซึ่งสูญเสียความร้อนได้ไว และมีประสิทธิภาพต่ำกว่า
2. ตัวกักเก็บความร้อนแบบรวมศูนย์จะใช้พื้นที่ในการใช้งานมาก และมีราคาต้นทุนที่สูง

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

ท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือที่เรียกว่า “เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon heat exchanger)” สำหรับใช้ช่วยในการประหยัดพลังงาน เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีลักษณะพิเศษต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ คือสามารถส่งถ่ายความร้อนได้เมื่อแหล่งรับความร้อนและระบายความร้อนอยู่ห่างกันมากๆ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก และยังคงสะดวกต่อการบำรุงรักษา ท่อเทอร์โมไซฟอนแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบระบบเปิด และแบบระบบปิด

1. แบบระบบเปิด

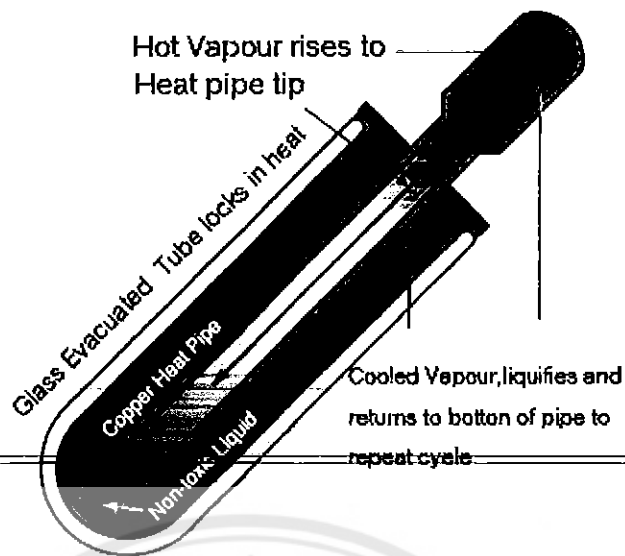
ระบบนี้นิยมใช้น้ำเป็นสารทำงาน เนื่องจากน้ำมีคุณสมบัติตามธรรมชาติ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงหรือน้ำร้อนก็จะลอยตัวอยู่ด้านบน และน้ำเย็นจะอยู่ด้านล่างเสมอ ดังรูปที่ 2.8 โดยหลักการนี้ปัจจัยหลักอยู่ที่ ความเข้มแสงและเวลาในการทำความร้อน



รูปที่ 2.8 เทอร์โมไซฟอนแบบระบบเปิด [10]

2. แบบระบบปิด

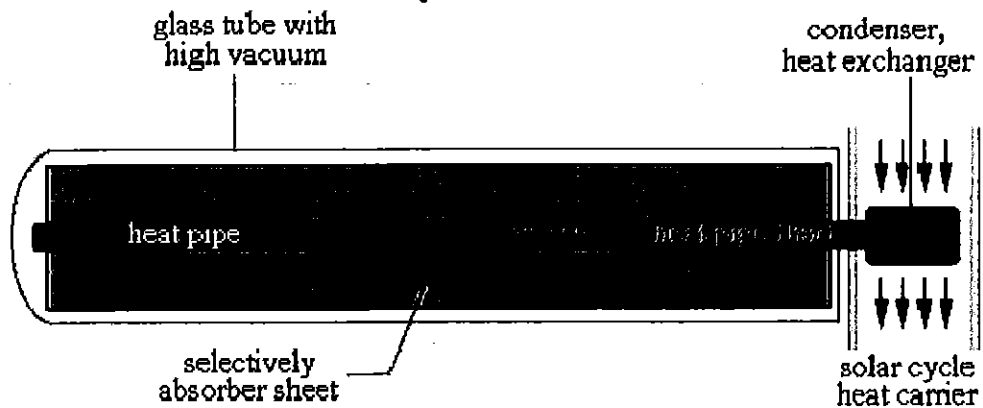
ระบบนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.9 ซึ่งไม่ได้พึ่งการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำเพียงอย่างเดียว แต่สารทำงานจะทำหน้าที่เร่งและดูดซับความร้อนและความเข้มของแสงแดด ทำให้ได้น้ำร้อนที่เร็วกว่าแม้แดดจะอ่อน การทำงานของระบบนี้เป็นระบบที่ไม่ต้องการความเข้มแสงมากนัก สามารถเก็บรวบรวมความร้อนที่อยู่ในบริเวณรอบข้างมาถ่ายเทให้กับน้ำ น้ำจึงร้อนและร้อนเร็ว จึงมั่นใจได้ว่าน้ำที่ได้จะสะอาดและร้อนเพียงพอต่อการใช้งาน ไม่จำเป็นต้องเก็บน้ำไว้มากเพราะน้ำที่ร้อนมากก็สามารถผสมและใช้เป็นน้ำอุ่นได้ดีกว่า ส่วนสารทำงานที่ใช้ภายในท่อบรรจุสารทำงานควรมีความสามารถในการระบายความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้สารทำงาน R-12, R-22, R-134a, R-404a และ R-406a ในการทดลองบรรจุสารทำงานแต่ละชนิด ซึ่งสามารถวางใจได้ เพราะในระบบสารทำงานไม่ได้สัมผัสกับน้ำโดยตรง สารทำงานมีหน้าที่เพียงเก็บรวบรวมความร้อนและถ่ายเทให้น้ำ โดยใช้หลักการของการแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.9 เทอร์โมไซฟอนแบบระบบปิด [11]

หลักการการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนระบบปิด

หลักการการทำงานของท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนระบบปิด ได้อาศัยความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ด้านล่าง โดยก๊าซหรือน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิสูง สารทำงานภายในจะเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อนเกิดขึ้น หลังจากที่ไอได้ลอยไปอยู่ที่ส่วนควบแน่นก็จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลย้อนกลับลงมาตามผิวท่อด้านในของท่อ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก จากนั้นของเหลวที่ไหลลงมายังส่วนทำระเหยซึ่งอยู่ทางด้านล่างของท่อ ก็จะระเหยกลายเป็นไอต่อไป ทำให้เกิดการส่งถ่ายความร้อน และทำงานเป็นวัฏจักรดังรูปที่ 2.10 โดยมีการเชื่อมต่อระหว่างเทอร์โมไซฟอนกับระบบดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานภายในหลอดแก้วสุญญากาศ [12]



รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมต่อของเทอร์โมไซฟอนกับระบบ [12]

2.2.2 ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank)

ถังเก็บน้ำร้อน จะเป็นถังแบบปิดนิยมทำด้วยสแตนเลสอย่างดีที่ไม่เป็นสนิม มีฉนวนหุ้มป้องกันการสูญเสียความร้อนหรือให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ถังเก็บน้ำร้อนนี้จะถูกออกแบบภายในให้สามารถเก็บและจ่ายน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแยกส่วนไม่ปะปนกันระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็น ซึ่งท่อน้ำร้อนเข้าถังจะต้องอยู่ส่วนบนของถังและท่อน้ำเย็นออกจากถังจะอยู่ส่วนล่างของถัง ทุกชิ้นส่วนสามารถประกอบเข้าด้วยกัน และเชื่อมต่อด้วยท่อทองแดงหุ้มฉนวนอย่างดี ข้อต่อทุกจุดจะใช้ชนิดทนแรงดันสูงกันการรั่วซึม นอกจากนี้จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ได้ฟองอากาศ (Air vent) ไว้ในส่วนบนของถัง

2.3 การถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน

การทำงานของเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two-phase closed Thermosyphon) ความสัมพันธ์ของความต้านทานความร้อนทั้งหมด (Z) อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด (Q) และผลต่างอุณหภูมิระหว่างแหล่งผลิตความร้อนกับแหล่งระบายความร้อน ($\Delta T = T_{\infty} - T_{si}$) คือ

$$Q = \Delta T / Z \quad (2.1)$$

โดยที่ T_{∞} = อุณหภูมิที่แหล่งผลิตความร้อน, °C

T_{si} = อุณหภูมิที่แหล่งระบายความร้อน, °C

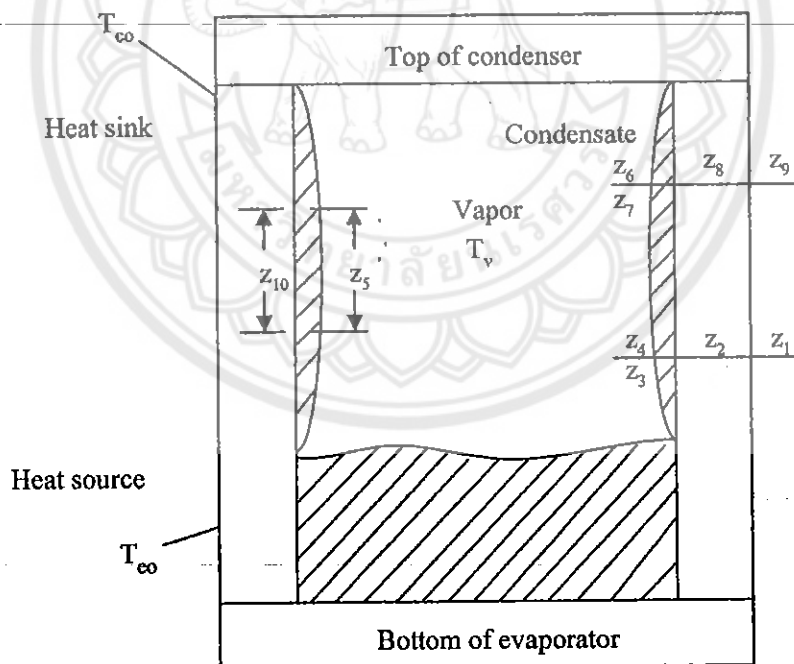
และวงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอนดังรูปที่ 2.12 และ 2.13

Z_1 และ Z_9 เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งผลิตความร้อนและผิวข้างนอกของส่วนทำระเหยและระหว่างผิวของส่วนควบแน่นกับแหล่งระบายความร้อนตามลำดับ

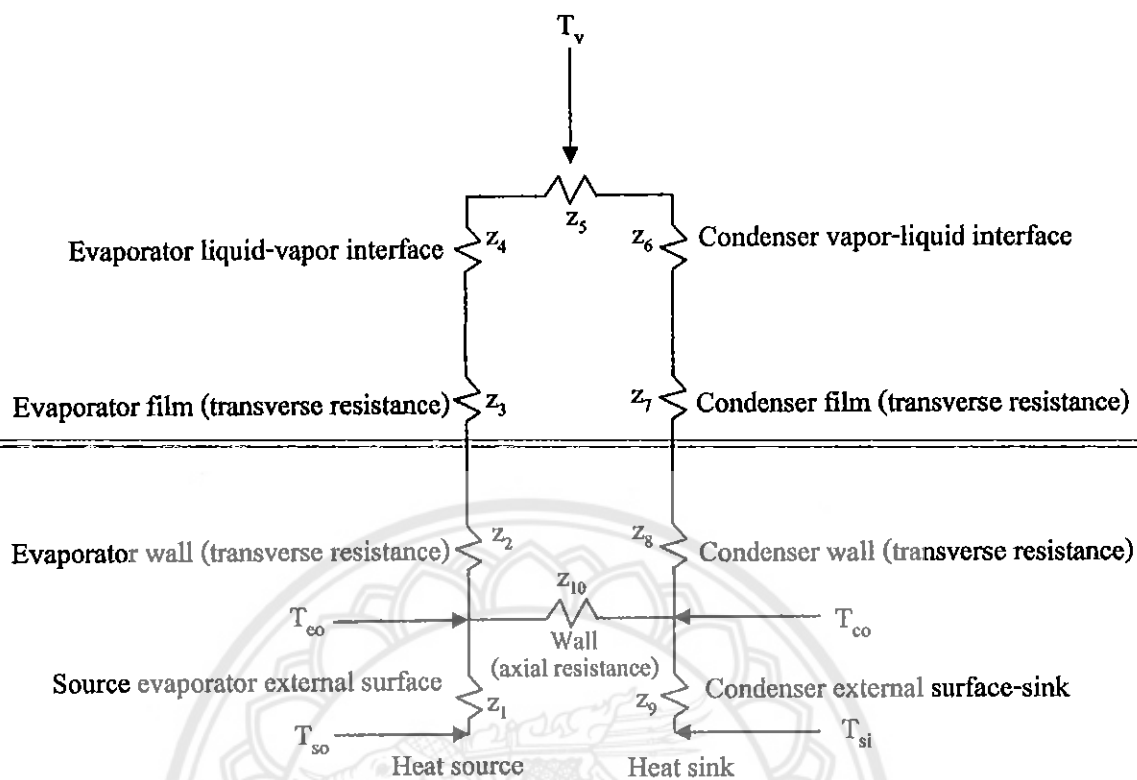
$$Z_1 = \frac{1}{h_{co} \times S_{co}} \quad (2.2)$$

$$Z_9 = \frac{1}{h_{co} \times S_{co}} \quad (2.3)$$

โดยที่ h_{co} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนทำระเหย, $W/m^2 \cdot K$
 S_{co} = พื้นที่ภายนอกในส่วนทำระเหย, m^2
 h_{co} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวนอกของส่วนควบแน่น, $W/m^2 \cdot K$
 S_{co} = พื้นที่ภายนอกในส่วนควบแน่น, m^2



รูปที่ 2.12 แสดงตำแหน่งค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด [3]



รูปที่ 2.13 วงจรความต้านทานการถ่ายเทความร้อนภายในเทอร์โมไซฟอน [3]

Z_2 และ Z_8 เป็นความต้านทานความร้อนที่ผ่านความหนาของผนังของเทอร์โมไซฟอนส่วนทำระเหยและระหว่างผิวของส่วนควบแน่นตามลำดับ

$$Z_2 = \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2\pi l_c k_{cu}} \tag{2.4}$$

$$Z_8 = \frac{\ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2\pi l_c k_{cu}} \tag{2.5}$$

- โดยที่
- D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อเทอร์โมไซฟอน, m
 - D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของท่อเทอร์โมไซฟอน, m
 - l_c = ความยาวของส่วนควบแน่น, m
 - l_c = ความยาวของส่วนทำระเหย, m
 - k_{cu} = ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของผนังท่อทองแดง, W/m.K

Z_3 และ Z_7 เป็นความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือดและควบแน่นในเทอร์โมไซฟอนตามลำดับ และขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล ขนาดของเทอร์โมไซฟอนและอัตราการถ่ายเทความร้อน วิธีประมาณ Z_3 และ Z_7 สำหรับท่อที่วางตัวแนวระนาบสามารถหาได้ดังนี้

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

$$Z_{3f} = \frac{0.235Q^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} \rho_1 (\phi_2)^{4/3}} \quad (2.7)$$

$$Z_{3p} = \frac{1}{\phi_3 g^{0.2} Q^{0.4} (\pi D_i l_c)^{0.6}} \quad (2.8)$$

$$\phi_3 = \frac{\rho_l^{0.65} \lambda_l^{0.3} c_p^{0.7}}{\rho_v^{0.25} h_{fg}^{0.4} \mu_l^{0.1}} \left[\frac{P_v}{P_a} \right]^{0.23} \times 0.32 \quad (2.9)$$

ถ้าสารทำความเย็นเป็นน้ำ $\phi_3 = 63 \left(\frac{P_v}{P_a} \right)^{0.23}$ (2.10)

- โดยที่
- Z_{3f} = ความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว, K/W
 - Z_{3p} = ความต้านทานความร้อนในแอ่งเดือด, K/W
 - g = แรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$
 - ρ_l = ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะของเหลว, kg/m^3
 - ρ_v = ความหนาแน่นของสารทำงานในสถานะก๊าซ, kg/m^3
 - λ_l = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของสารทำงาน, $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
 - h_{fg} = ค่าความร้อนแฝงของสารทำงาน, J/kg
 - c_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน, $\text{J}/\text{kg}/\text{K}$
 - μ_l = สัมประสิทธิ์ความหนืดของสารทำงาน, m^2/s
 - P_v = ความดันไอของสารทำงาน, Pa
 - P_a = ความดันบรรยากาศ, Pa

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

ถ้า $Z_{3p} > Z_{3f}$ ให้ใช้สมการ (2.6)

และ Z_7 สามารถหาได้ดังนี้

สำหรับ $50 < Re_f < 1,300$ คำนวณ Z_7 จากสมการ

$$Z_7 = \frac{0.235Q^{1/3}}{D_i^{4/3} g^{1/3} \mu_f (\Phi_2)^{4/3}} \quad (2.11)$$

$$Re_f = 4Q/L\mu_f \pi D_i \quad (2.12)$$

$$\text{สำหรับ } Re_f > 1,300 ; \quad Z_7 = (\text{สมการ } Z_7) \times 191 Re_f^{-0.733} \quad (2.13)$$

$$\text{โดยที่ } \Phi_2 = \text{merit number } (Lk^3 \rho_f^2 / \mu_f)^{0.25}, \text{ kg}/(\text{K}^{0.25} \text{ s}^{2.5}) \quad (2.14)$$

L = ความร้อนแฝง, J/kg

μ_f = ความหนืดของๆเหลว, N.s/m²

g = แรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ, 9.81 m²/s

Re_f = ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ของสารทำงาน

F = อัตราการเติมสารทำงานในส่วนทำระเหย มีค่า 70 % ของความยาวของส่วนทำระเหย

Z_4 และ Z_6 เป็นความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างไอน้ำกับของเหลวในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นตามลำดับ แต่มีค่าน้อยมากดังนั้นจึงไม่นำมาคิด

Z_5 เกิดความดันตกคร่อมระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น แต่มีค่าน้อยมากดังนั้นจึงไม่นำมาคิด และ Z_{10} คือความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของผนังของภาชนะ

$$Z_{10} = \frac{(0.5I_c + I_a + 0.5I_c)}{A_x K_{cu}} \quad (2.15)$$

$$\text{โดยที่ } A_x \text{ เป็นพื้นที่หน้าตัดของผนังท่อ } m^2 \text{ และ } A_x = \frac{\pi}{4}(D_0^2 + D_i^2) \quad (2.16)$$

สำหรับตำแหน่งการทำงานปกติ เมื่อส่วนทำระเหยอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่น การนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่อจะมีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเทอร์โมไซฟอน ในทางกลับกันถ้าส่วนทำระเหยอยู่สูงกว่าส่วนควบแน่น การถ่ายเทความร้อนในเทอร์โมไซฟอนจะเกิดขึ้นจากการนำความร้อนผ่านผนังตามแนวแกนท่ออย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมากดังนั้นสามารถใช้เทอร์โมไซฟอนเป็น Thermal diode ได้

เงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกน คือ

$$\frac{Z_{10}}{Z_2+Z_3+Z_5+Z_7+Z_8} > 20 \quad (2.17)$$

ถ้าเป็นไปตามสมการ (2.13) ความต้านทานความร้อนรวมคือ

$$Z = Z_1+Z_2+Z_3+Z_5+Z_7+Z_8+Z_9 \quad (2.18)$$

ถ้าไม่เป็นไปตามสมการ (2.13) จะได้

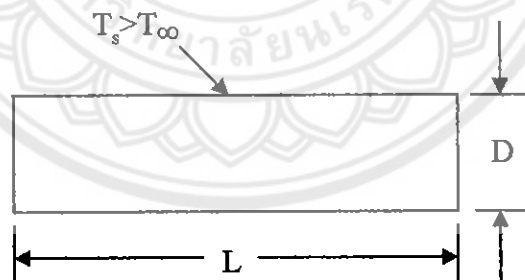
$$Z = Z_1 + \left[(Z_2+Z_3+Z_5+Z_7+Z_8)^{-1} + \left(\frac{1}{Z_{10}} \right)^{-1} \right]^{-1} + Z_9 \quad (2.19)$$

เมื่อมีความร้อนไหลย้อนกลับใน Thermal diode จะไม่มีการถ่ายเทความร้อนภายใน และความต้านทานรวมจะเป็น

$$Z = Z_1+Z_9+Z_{10} \quad (2.20)$$

2.4 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอก

การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกยาวพิจารณาที่ทรงกระบอกแนวระดับใช้สำหรับหาค่าการถ่ายเทความร้อนในส่วนของหลอดแก้วและส่วนควบแน่น



รูปที่ 2.14 การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับ [3]

ทรงกระบอกแนวระดับ

เซอร์ซิลและชูเนาะนำไปใช้สหสัมพันธ์สำหรับ $10^5 < Ra_D < 10^{12}$ ดังสมการ

$$Nu_m = h_m \frac{D}{k} = \left\{ 0.6 + \left[\frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{1} + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{8/27} \right]^2 \right\} \quad (2.21)$$

$$\text{เมื่อ } Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta D_o^3 (T_s - T_\infty)}{\nu\alpha} \quad (2.22)$$

โดยที่ Nu_m = เลขนัสเซลท์
 Pr = เลขพรันด์เทิล
 Ra_D = เลขเรย์ลี
 ν = ความหนืด, m^2/s
 α = สภาพแพร่ผ่านความร้อน, m^2/s

D = เส้นผ่าศูนย์กลาง, m
 k = ค่าการนำความร้อน, $W/m.K$
 h_m = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2.K$
 β = $(1/((T_s + T_\infty)/2))$ (2.23)

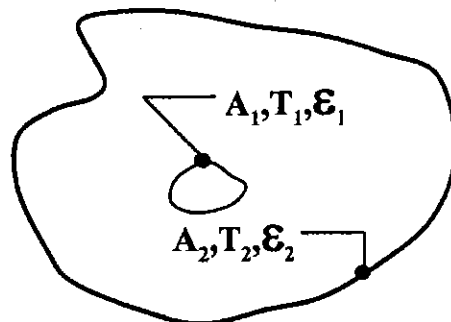
ดังนั้น

$$h_m = \left(\frac{k}{D}\right) \left\{ 0.6 + \left[\frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{8/27}} \right]^2 \right\} \quad (2.24)$$

สมบัติทุกตัวของของไหลพิจารณาที่ $T_f = (T_s + T_\infty)/2$ (2.25)

2.5 การแผ่รังสี

ในกรณีของการพิจารณาการแผ่รังสีเป็นไปในลักษณะวัตถุโค้งนูนขนาดเล็กอยู่ในโพรงปิดขนาดกว้างใหญ่ ($A_2 \gg A_1$) โดยพิจารณา A_2 เป็นพื้นที่ของโลกและ A_1 เป็นพื้นที่ของหลอดแก้วสุญญากาศตั้งรูปที่ 2.15 และเป็นไปตามสมการ (2.24)



รูปที่ 2.15 รูปวัตถุโค้งนูนขนาดเล็กอยู่ในโพรงปิดขนาดกว้างใหญ่ ($A_2 \gg A_1$) [3]

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2, net} = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.26)$$

ฯลฯ

6499ค

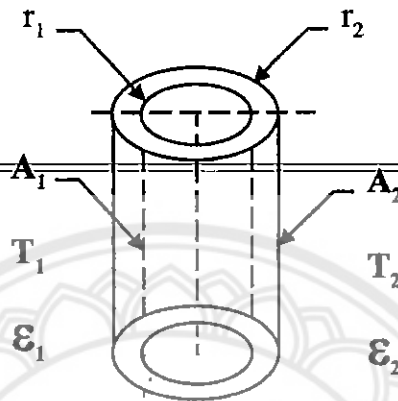
2552

e.2

โดยที่ $\frac{A_1}{A_2} \approx 0$

15072773

ทรงกระบอกซ้อนคู่ร่วมศูนย์กลางยาวอนันต์ ดังรูปที่ 2.16 และเป็นไปตามสมการที่ (2.25)



รูปที่ 2.16 รูปทรงกระบอกซ้อนคู่ร่วมศูนย์กลางยาวอนันต์ [3]

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2, net} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (2.27)$$

โดยที่

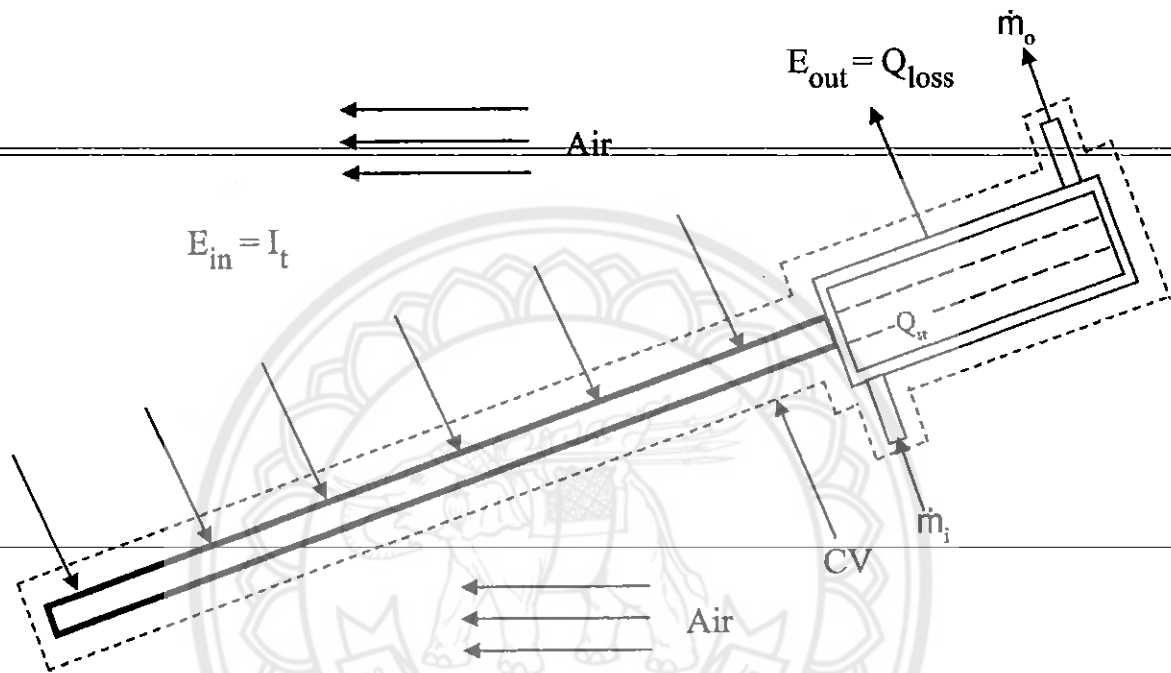
- r_1 = รัศมีที่อยู่ภายในที่พิจารณา, m
- r_2 = รัศมีที่อยู่ภายนอกที่พิจารณา, m
- σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.817×10^{-8} , W/m².K⁴
- A_1 = พื้นที่ที่อยู่ภายในที่พิจารณา, m²
- A_2 = พื้นที่ที่อยู่ภายนอกที่พิจารณา, m²
- ϵ_1 = ค่าการเปล่งรังสีของที่อยู่ภายนอก
- ϵ_2 = ค่าการเปล่งรังสีของที่อยู่ภายใน

2.6 สมการของการถ่ายเทความร้อนในระบบทำน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสูญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

มีการแสดงแผนผังการถ่ายเทความร้อนดังรูปที่ 2.17 จากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.28)$$

- โดยที่ \dot{E}_g = ไม่มีแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในปริมาตรควบคุม, W/m^2
 \dot{E}_{in} = พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (I_t), W/m^2
 \dot{E}_{out} = พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมหรือความร้อนสูญเสียจากระบบ (Q_{loss}),
 $Q_{loss} = Q_{loss1} + Q_{loss2}$, W/m^2
 \dot{E}_{st} = พลังงานสะสมของน้ำร้อนในถังเก็บน้ำร้อน (Q_s), W/m^2



รูปที่ 2.17 ปริมาตรควบคุม (Control volume) ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งระบบ

เครื่องทำน้ำร้อนสามารถแบ่งเป็นสามช่วงเพื่อง่ายแก่การศึกษาโดยแสดงได้ดังนี้

1. สมการการถ่ายเทความร้อนจากผิวแก้วภายนอกสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์
2. สมการการถ่ายเทความร้อนจากผิวดูดซับแสงอาทิตย์สู่เทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น
3. สมการการถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นสู่ถังน้ำร้อน

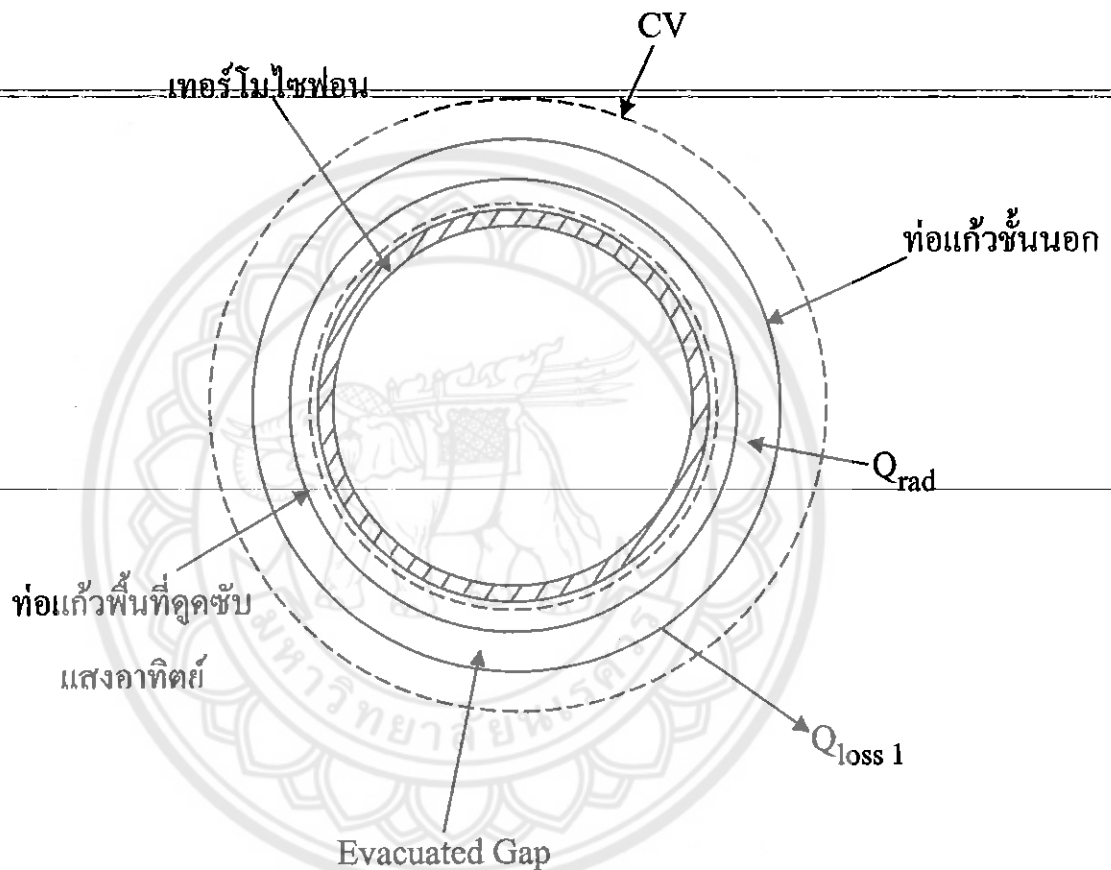
2.6.1 สมการการถ่ายเทความร้อนจากผิวแก้วภายนอกสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์

พลังงานความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์คือพลังงานที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับแสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้ว (Q_{rad}) ซึ่งที่ปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 2.18 และการหาค่าความร้อนถ่ายเทสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{rad} = 0.8 \times A_{out} \times I_t \quad (2.29)$$

$$Q_{rad} - Q_{loss1} = Q_{TS} \quad (2.30)$$

- โดยที่ Q_{rad} = พลังงานที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับแสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้ว, W/m^2
- Q_{loss1} = พลังงานความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความต้านทานการพาและการแผ่รังสีความร้อน, W/m^2
- Q_{Ts} = พลังงานเข้าสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์, W/m^2
- A_{out} = พื้นที่หลอดแก้วภายนอก, m^2



รูปที่ 2.18 รูปแสดงปริมาณการควบคุมของผิวแก้วภายนอกกับพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์

การหาค่าความร้อนสูญเสียทางทฤษฎี (Q_{loss1}) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Q_{\text{loss1}} = \left((T_G - T_{\text{am}}) / Z_{\text{convair}} \right) + Q_{\text{radair}} \quad (2.31)$$

$$Q_{\text{loss1}} = \frac{\sigma A_1 (T_{\text{ab}}^4 - T_G^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{r_1}{r_2} \left(\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (2.32)$$

โดยที่ Z_{convair} = เป็นความต้านทานความร้อน โดยการพาของอากาศหาได้จาก

$$Z_{\text{convair}} = 1/h_{\text{air}} \times A_{\text{out}}, \text{ K/W}$$

h_{air} = การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับหาได้จากสมการที่ 2.24, $W/m^2.K$

Q_{radair} = ค่าความร้อนสูญเสียโดยการเปล่งรังสีความร้อนจากหลอดแก้วสู่อากาศหาได้จากสมการดังนี้, W/m^2

$$Q_{radair} = \sigma A_{out} \times \epsilon_1 (T_G^4 - T_{am}^4) \quad (2.33)$$

โดยที่ ϵ_1 = ค่าการเปล่งรังสีของท่อแก้วภายนอก

h_{air} = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, $W/m^2.K$

จากสมการถ่ายเทความร้อนจากผิวแก้วภายนอกสู่พื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์จะทำให้หาอุณหภูมิที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์ (T_{su}) โดยการแผ่รังสีจากสมการที่ (2.25)

2.6.2 สมการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์สู่เทอร์โมไซฟอนในส่วน

ควมแน่น

โดยแสดงปริมาณความร้อนคงรูปที่ 2.19 และมีการสมดุลพลังงานจะได้

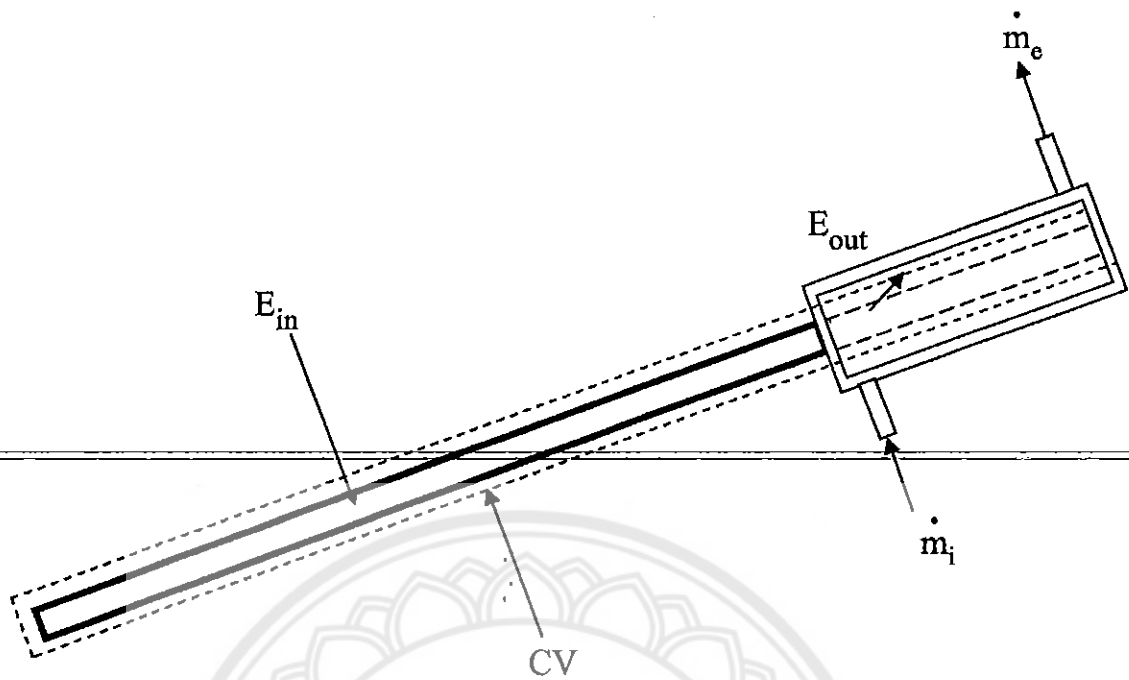
$$\dot{E}_g + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.34)$$

โดยที่ \dot{E}_g = ไม่มีแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในปริมาณควบคุม, W/m^2

\dot{E}_{in} = พลังงานความร้อนจากพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์ที่แผ่รังสีให้กับเทอร์โมไซฟอน (Q_{TS}), W/m^2

\dot{E}_{out} = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากส่วนควมแน่นของเทอร์โมไซฟอนเข้าสู่ น้ำร้อนในถังเก็บ (Q_{conv}), W/m^2

\dot{E}_{st} = ไม่มีพลังงานความร้อนสะสมในปริมาณควบคุม, W/m^2



รูปที่ 2.19 รูปแสดงปริมาณควบคุมของท่อเทอร์โมไซฟอน

ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_{TS} = Q_{convw} \quad (2.35)$$

ซึ่ง

$$Q_{TS} = T_{ab} - T_{co} / Z_{tot} \quad (2.36)$$

โดยที่

- T_{ab} = อุณหภูมิส่วนพื้นที่ผิวคู่ค้ำบแสงอาทิตย์, °C
 T_{co} = อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น, °C
 Z_{tot} = ความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอน, K/W

$$Q_{convw} = \left((T_{co} - T_{ab}) \times n / Z_{condw} \right) \quad (2.37)$$

โดยที่ $Z_{condw} = 1/h_w \times A_{out}$ คือความต้านทานความร้อนถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นสู่น้ำร้อน, K/W

h_w = การพาความร้อนตามธรรมชาติบนทรงกระบอกแนวระดับหาได้จากสมการที่ (2.24), $W/m^2 \cdot K$

A_{out} = พื้นที่เทอร์โมไซฟอนส่วนควบแน่นต่อหนึ่งท่อ, m^2

n = จำนวนท่อแก้วสุญญากาศ

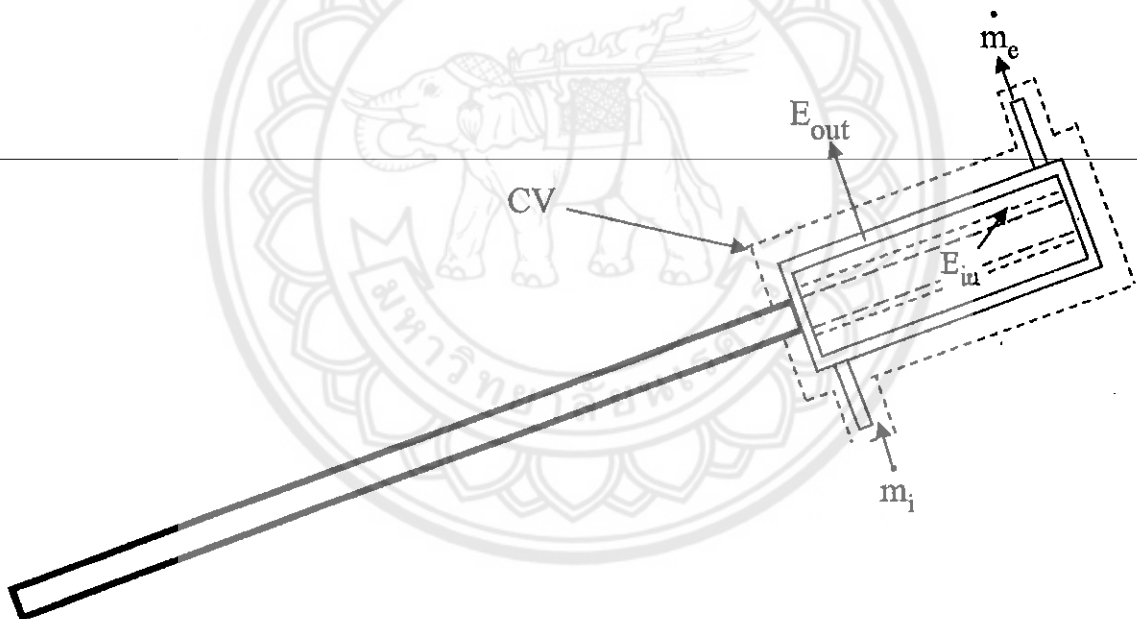
จากสมการที่ (2.35) จะสามารถหาอุณหภูมิของเทอร์โมไซฟอนส่วนที่มีการควบแน่น (T_{co}) และ Z_p ถ้าเป็นตามสมการที่ (2.13) ค่า Z_{tot} ได้จากสมการที่ (2.15) หรือไม่เป็นไปตามสมการที่ (2.17)

2.6.3 สมการการถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นสู่ถังน้ำร้อน

การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่นสู่ถังน้ำที่ไหลผ่านจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาแบบธรรมชาติส่วนนี้มีปริมาตรควบคุมดังรูปที่ 2.20 ที่มีสมการสมดุลพลังงานดังนี้

$$\dot{E}_g + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.38)$$

- โดยที่ \dot{E}_g = ไม่มีแหล่งสร้างพลังงานความร้อนในปริมาตรควบคุม, W/m^2
 \dot{E}_{in} = พลังงานความร้อนจากส่วนควบแน่นที่ถ่ายเทความร้อนสู่ถังน้ำร้อนในถังเก็บ
 (Q_{convw}) , W/m^2
 \dot{E}_{out} = พลังงานความร้อนสูญเสียเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่อากาศผ่านถังน้ำร้อน โดยการพาและนำความร้อน (Q_{loss2}) , W/m^2
 \dot{E}_{st} = พลังงานความร้อนของน้ำที่สะสมไว้ในถังน้ำร้อน (Q_{st}) , W/m^2



รูปที่ 2.20 รูปแสดงปริมาตรควบคุมส่วนของถังเก็บน้ำร้อน

หาอุณหภูมิถังเก็บน้ำในปัจจุบัน (T_{wn}) จากสมการอนุรักษ์พลังงาน

$$(Q_{convw} - Q_{loss2}) + \dot{m}_i h_i = \dot{Q}_{st} + \dot{m}_e h_e \quad (2.39)$$

- โดยที่ Q_{st} = ความร้อนสะสมในน้ำในถังน้ำร้อน, W
 $Q_{st} = [(T_{wn} - T_w) \times M_{water} \times C_p] / \Delta t \quad (2.40)$
 Δt = ช่วงเวลาที่ใช้คำนวณ, s
 C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังน้ำร้อน, $kJ/kg.K$

- M_{water} = มวลของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน, kg
 T_w = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บจากช่วงเวลาก่อนหน้านี้, K
 T_{wn} = อุณหภูมิน้ำในถังเก็บค่าใหม่, K
 m_i = อัตราการไหลของน้ำ, kg/s
 h = ปริมาณความร้อนที่ผ่านระบบ, kJ/kg

$$\text{ดังนั้น } Q_{\text{loss2}} = (T_w - T_{\text{am}})/Z_{\text{tank}} \quad (2.41)$$

- โดยที่ Q_{loss2} = ความร้อนสูญเสียผ่านทางถังน้ำร้อน, W
 Z_{tank} = ความต้านทานการสูญเสียความร้อนที่ถังน้ำร้อน, K/W

หาได้จาก

$$Z_{\text{tank}} = \left\{ \ln \left(\frac{r_{\text{tank,out}}}{r_{\text{tank,in}}} \right) / 2 \times \pi \times L_{\text{tank}} \times k_{\text{Al}} + \ln \left(\frac{r_{\text{Fiber}}}{r_{\text{tank,out}}} \right) / 2 \times \pi \times L_{\text{tank}} \times k_{\text{Fiber}} + (1/A_{\text{Fiber}} \times h_{\text{air}}) \right\} \quad (2.42)$$

- โดยที่ $r_{\text{tank,in}}$ = รัศมีภายในของถังน้ำร้อน, m
 $r_{\text{tank,out}}$ = รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อน, m
 r_{Fiber} = รัศมีภายนอกของถังน้ำร้อนที่หุ้มฉนวนแล้ว, m
 k_{Al} = ค่าการนำความร้อนถังน้ำร้อน(อลูมิเนียม), W/m.K
 k_{Fiber} = ค่าการนำความร้อนของฉนวนกันความร้อน, W/m.K

2.7 ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ [21]

จาก ASHRAE STANDARD 93-77 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐาน สำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ภายใต้เงื่อนไขที่ภาวะคงที่ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$\eta_c = (A_a/A_c)F_R[(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)]/I_t \quad (2.43)$$

และ

$$\eta_c = \dot{m}_c C_p (T_o - T_i) / I_t A_c \quad (2.44)$$

โดยที่

- η_c = ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, %
 \dot{m}_c = อัตราการไหลเชิงมวลของไหล, kg/s

- C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล, J/kg.K
 T_i = อุณหภูมิของของไหลขาเข้า, °C
 T_o = อุณหภูมิของของไหลขาออก, °C
 A_a = พื้นที่ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์, m^2
 A_c = พื้นที่รับรังสีแสงอาทิตย์, m^2
 T_a = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C
 F_R = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์
 U_L = สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน, $W/m^2.K$

I_t = ความเข้มแสง, W/m^2

$(\tau\alpha)_e$ = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านและดูดซับรังสีแสงอาทิตย์

2.8 ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [21]

การหาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน จากความสัมพันธ์ได้กราฟของอัตราความร้อนที่น้ำร้อนสะสมไว้ส่วนด้วยพื้นที่ได้กราฟของอัตราความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนแผงรับแสงอาทิตย์สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\eta_{th,s} = [M_T C_p (T_m^n - T_m^0)] / \left[A_c \sum_{t=0}^n I_t \Delta t \right] \quad (2.45)$$

โดยที่

T_m = อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในระบบทำน้ำร้อนจากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=n$, °C

I_t = รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยที่ตกลงบนตัวกักเก็บแสงอาทิตย์จากช่วงเวลา $t=0$ ถึง $t=n$, W/m^2

Δt = ช่วงเวลา, s

A_c = พื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์, m^2

M_T = มวลรวมของน้ำในระบบทำน้ำร้อนทั้งหมด, kg

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถังเก็บน้ำร้อน, kJ/kg.K

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีหลักการออกแบบและสร้าง โดยเริ่มจากการสำรวจ

รวบรวมข้อมูลของหลอดแก้วสุญญากาศและท่อทองแดง ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ การตั้งสมมุติฐานการออกแบบ การคำนวณการออกแบบ การออกแบบแต่ละส่วนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และขั้นตอนสุดท้ายคือการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.1 สำรวจรวบรวมข้อมูล

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพื้นฐานของท่อสุญญากาศ [15]

Length (nominal)	1500 mm
Outer tube diameter	58 mm
Inter tube diameter	47 mm
Glass thickness	1.6 mm
Thermal expansion	$3.3 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$
Material	Borosilicate Glass 3.3
Absorptive Coating	Graded Al-N/Al
Absorptance	>92% (AM 1.5)
Emittance	<8% (80 °C)
Vacuum	$P < 5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
Stagnation Temperature	>200°C
Heat Loss	0.8 W/m ² .°C
Maximum Strength	0.8 MPa

จากการสำรวจหาข้อมูลจำเพาะของหลอดแก้วสุญญากาศเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน โดยได้เลือกใช้หลอดแก้วสุญญากาศของบริษัท Apricus เพราะมีข้อมูลค่าตัวแปรต่าง ๆ ครบถ้วนในด้านสมบัติของวัสดุดังแสดงในตารางที่ 3.1

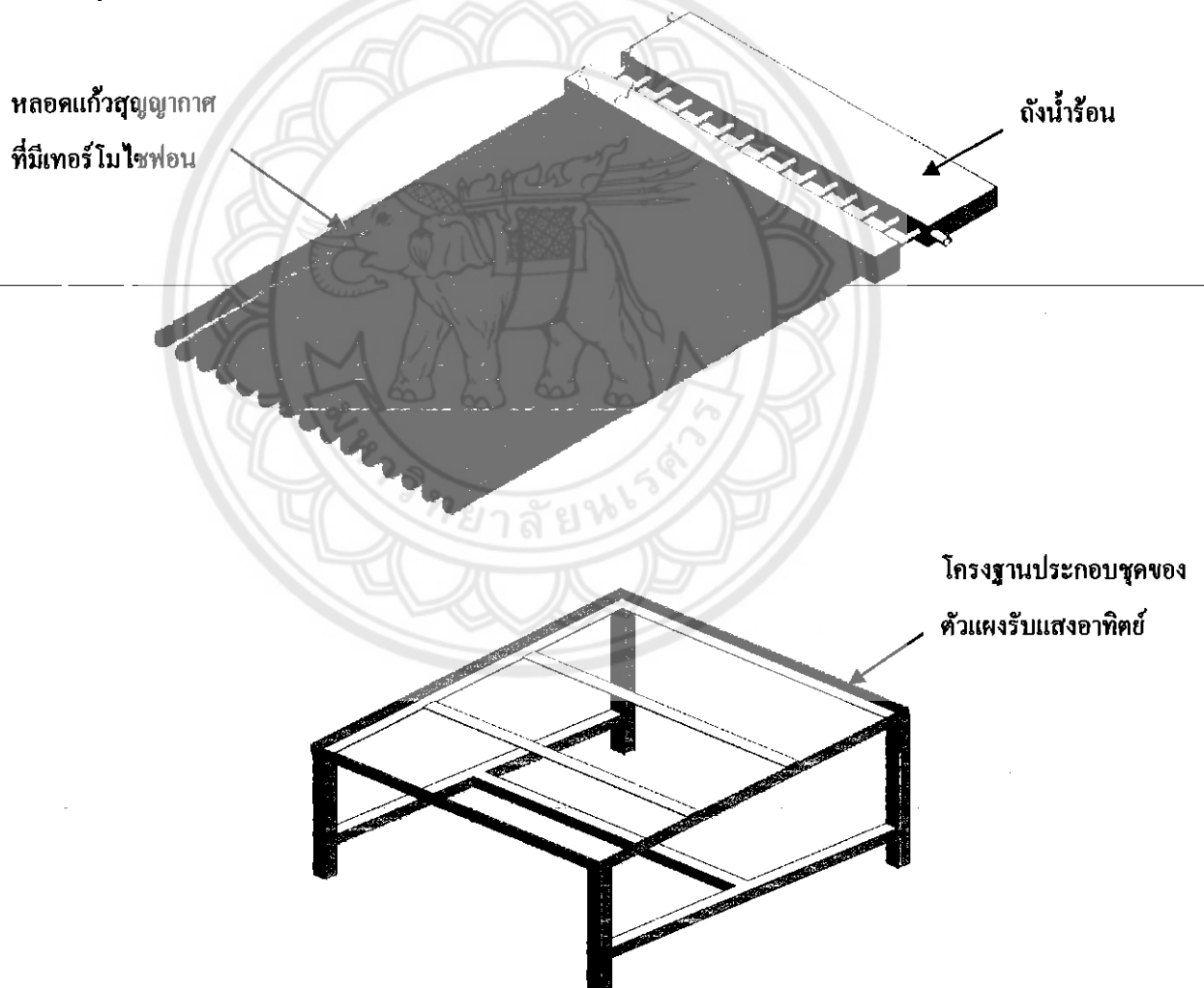
จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหลอดแก้วสุญญากาศชั้นในเท่ากับ 0.047 m ดังนั้นท่อทองแดงที่ใช้ทำเทอร์โมไซฟอนต้องมีขนาดเล็กกว่า แต่ต้องใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดแก้วชั้นในเพื่อลดช่องว่างระหว่างท่อทองแดงและหลอดแก้วสุญญากาศชั้นในเพื่อทำให้การถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น สำหรับตารางที่ 3.2 เป็นตารางสำหรับใช้เลือกขนาดของท่อทองแดงที่นำมาทำเป็นเทอร์โมไซฟอน ซึ่งได้เลือกท่อทองแดงขนาดเท่ากับ $\frac{1}{4}$ in โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.0222 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.01992 m ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด

ตารางที่ 3.2 ตารางสำหรับใช้เลือกขนาดท่อทองแดงที่นำมาเป็นเทอร์โมไซฟอน [14]

ท่อทองแดง					
ขนาด (in)	เส้นผ่าศูนย์กลาง		TYPE - L ความหนา		ความยาว (m)
	in	m	in	m	
1/4	3/8	0.00952	0.030	0.00076	6
3/8	1/2	0.01270	0.035	0.00089	6
1/2	5/8	0.01588	0.040	0.00102	6
5/8	3/4	0.01905	0.042	0.00107	6
3/4	7/8	0.02222	0.045	0.00114	6
1	1.1/8	0.02858	0.050	0.00127	6
1.1/4	1.3/8	0.03492	0.055	0.00140	6
1.1/2	1.5/8	0.04127	0.060	0.00152	6
2	2.1/8	0.05398	0.070	0.00178	6
2.1/2	2.5/8	0.06668	0.080	0.00203	6
3	3.1/8	0.07938	0.090	0.00229	6
3.1/2	3.5/8	0.09208	0.100	0.00254	6
4	4.1/8	0.10478	0.110	0.00279	6

3.2 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อน

การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยมีอุปกรณ์ต่างๆ คือ ถังน้ำร้อน หลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน และโครงฐานประกอบชุดของตัวแผงรับแสงอาทิตย์ โดยหลอดแก้วเมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผ่านหลอดแก้วสุญญากาศ และผ่านเข้าสู่พื้นผิวดูดซับแสงอาทิตย์ จะมีความร้อนบางส่วนสูญเสียให้แก่บรรยากาศ และความร้อนส่วนใหญ่ที่เหลือจะถูกส่งผ่านสู่เทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหยและส่งความร้อนไปสู่เทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทสู่น้ำที่ไหลผ่าน โดยการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้สารทำงานภายในเทอร์โมไซฟอนมีอุณหภูมิลดลง และเกิดการควบแน่นไหล ไปยังส่วนทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อไปรับความร้อนอีกครั้ง เป็นวัฏจักรเรื่อยไป



รูปที่ 3.1 แสดงรูปของเครื่องทำน้ำร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

3.3 การตั้งสมมติฐาน

- 3.3.1 สมบัติของสารทำงานและวัสดุมีค่าคงที่
- 3.3.2 ที่ส่วนทำระเหยไม่คิด Z_4, Z_5, Z_6 เนื่องจากมีค่าน้อยมาก
- 3.3.3 ไม่คิดความต้านทานความร้อนระหว่างผิวท่อกับส่วนทำระเหยและผิวคูคัช
- 3.3.4 อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ $0.6 \text{ m}^3/\text{day}$
- 3.3.5 ขณะทำการทดลองมีแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์เสมอ
- 3.3.6 ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน
- 3.3.7 ปริมาตรของน้ำร้อนมีความจุเต็มถึงเก็บพอดี

3.3.8 การติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ต้องวางทำมุม 16° กับแนวระนาบ โดยให้ด้านหน้าของแผงรับแสงอาทิตย์หัน ไปยังทิศใต้เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางซีกโลกเหนือทำให้แสงแดดจะส่องโดนหลังคาด้านทิศใต้ตลอดทั้งปี

3.4 การคำนวณการออกแบบ

ในการคำนวณการออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากผิวแก้วภายนอกสู่พื้นที่ผิวคูคัชแสงอาทิตย์ การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ผิวคูคัชแสงอาทิตย์สู่เทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่นและการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นสู่ถังน้ำร้อน

3.4.1 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากผิวแก้วภายนอกสู่พื้นที่ผิวคูคัชแสงอาทิตย์

รายละเอียดของหลอดแก้วสุญญากาศ

จำนวนหลอดแก้วสุญญากาศ 15 หลอด มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.058 m มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.047 m และมีความยาวหลอดละ 1.5 m

จากตารางที่ 3.1 หลอดแก้วสุญญากาศมีสมบัติการแผ่รังสี (ϵ) เท่ากับ 0.08 และ 0.075 ค่าการส่งผ่านรังสีเท่ากับ 0.92 และค่าการคูคัชรังสีเท่ากับ 0.9

พื้นที่ภายนอกของหลอดแก้ว (A_o) หาได้จากสมการ $\pi D_o L$ ซึ่งได้รับรังสีแสงอาทิตย์เพียง 50 % จึงได้พื้นที่ภายนอกของหลอดแก้วเท่ากับ 0.13665 m^2

พื้นที่ภายในของหลอดแก้ว (A_i) หาได้จากสมการ $\pi D_i L$ ซึ่งได้พื้นที่ภายในของหลอดแก้วเท่ากับ 0.1107 m^2

พื้นที่ของหลอดแก้วทั้งหมด ($A_{o,tot}$) หาได้จากพื้นที่ภายนอกของหลอดแก้วทั้งหมดจำนวน 15 หลอด เท่ากับ $(2.05) \text{ m}^2$

$$0.13665 \times 15$$

จากการวัดค่าต่างๆ ณ อาคารปฏิบัติวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
นเรศวร วันที่ 5 พฤษภาคม 2553 ที่เวลา 11:30 น. ถึง 12:30 น. ได้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (T_{am})
เท่ากับ 34.3 °C อุณหภูมิที่ผิวหลอดแก้วชั้นนอก (T_G) เท่ากับ 46.1 °C อุณหภูมิที่ผิวฉนวน (T_{insu})
เท่ากับ 35.3 °C และความเข้มแสง (Q_G) เท่ากับ 881.3 W/m²

จากการคำนวณค่าสมบัติของอากาศที่สภาพแวดล้อมและผิวหลอดแก้วสุญญากาศที่
อุณหภูมิ 40.5 °C ได้ค่าสมบัติของอากาศดังนี้

คำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียที่ผิวหลอดแก้วสุญญากาศชั้นนอก (Q_{loss1}) จากข้อมูลต่อ

สุญญากาศในตารางที่ 3.1 จากสมการ (2.31) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{loss1} &= 0.8 \times 0.2733 \times (319.9 - 307.4) \\ Q_{loss1} &= 2.7 \text{ W} \end{aligned}$$

การคำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวลูกสูบ (T_{ab}) จากสมการ (2.32) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 2.7 &= \frac{(5.67 \times 10^{-8}) (0.1107) (T_{ab}^4 - 319.9^4)}{\frac{1}{0.08} + \frac{0.0235}{0.029} \left(\frac{1 - 0.075}{0.075} \right)} \\ T_{ab} &= 376.8 \text{ K} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าความร้อนที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับแสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้ว
สุญญากาศ (Q_{rad}) จากสมการ (2.29) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{rad} &= 881.3 \times 0.13665 \times 0.92 \times 0.9 \\ Q_{rad} &= 99.7 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

หลอดแก้วสุญญากาศมีจำนวน 15 หลอด ดังนั้นค่าความร้อนที่แสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับ
แสงอาทิตย์ที่เป็นหลอดแก้วสุญญากาศทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1,495.7 W/m²

คำนวณหาค่าความร้อนที่เทอร์โมไซฟอน (Q_{Ts}) จากสมการ (2.30) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Q_{Ts} &= 99.7 - 2.7 \\ Q_{Ts} &= 97 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

เทอร์โมไซฟอนมีจำนวน 15 ท่อ ดังนั้นค่าความร้อนที่เทอร์โมไซฟอนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ
1,455 W/m²

3.4.2 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากพื้นที่ผิวดูดซับแสงอาทิตย์สู่ท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนควบแน่น

รายละเอียดของท่อทองแดง

ท่อทองแดงมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D_o) เท่ากับ 0.0222 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D_i) เท่ากับ 0.01992 m มีความยาวส่วนทำระเหย (L_v) เท่ากับ 1.5 m ส่วนไม่มีการสูญเสียความร้อน (L_c) เท่ากับ 0.25 m และส่วนควบแน่น (L_c) เท่ากับ 0.25 m

พื้นที่ภายนอกของท่อทองแดงส่วนทำระเหย (A_v) หาได้จากสมการ $\pi D_o L_v$ ซึ่งได้พื้นที่

เท่ากับ 0.10462 m^2

พื้นที่ภายนอกของท่อทองแดงส่วนควบแน่น (A_c) หาได้จากสมการ $\pi D_o L_c$ ซึ่งได้พื้นที่

เท่ากับ 0.01744 m^2

คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของท่อทองแดงได้จากสมการ (2.16)

$$A_{\text{cross}} = \frac{\pi(0.0222^2 - 0.01992^2)}{4}$$

$$A_{\text{cross}} = 7.542 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

การคำนวณหาความต้านทานความร้อนรวม (Z_{tot}) ของท่อเทอร์โมไซฟอน ดังนี้

คำนวณหาความต้านทานการพาความร้อนจากผิวท่อส่วนทำระเหย โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ เท่ากับ $30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (จากภาคผนวกตารางที่ 5) ได้จากสมการ (2.2)

$$Z_1 = \frac{1}{30 \times (0.10462)}$$

$$Z_1 = 0.318 \text{ K/W}$$

คำนวณหาความต้านทานความร้อนที่ผ่านความหนาของผนังท่อเทอร์โมไซฟอนในส่วนทำระเหย (Z_2) ได้จากสมการ (2.4)

$$Z_2 = \frac{\ln \frac{0.0222}{0.01992}}{2\pi(1.5)(398)}$$

$$Z_2 = 2.888 \times 10^{-5} \text{ K/W}$$

คำนวณหาความต้านทานความร้อนภายในของของเหลวที่กำลังเดือดในท่อเทอร์โมไซฟอน (Z_3) ได้จากสมการ 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.14

จากการคำนวณค่าสมบัติของสารทำความเย็น R134a ที่อุณหภูมิ 57.4 °C ได้ค่าสมบัติของ
สารทำความเย็น R134a ดังนี้ โดยที่อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าเท่ากับ 33.6 °C

$$\begin{aligned} h_{fg} &= 179.115 \text{ kJ/kg} & K &= 56.35 \times 10^{-3} \text{ W/m.K} \\ \rho_f &= 910.313 \text{ kg/m}^3 & \mu &= 0.006805 \times 10^{-2} \text{ N.s/m}^2 \end{aligned}$$

สารทำความเย็น R134a ที่ boiling

$$\begin{aligned} \rho_f &= 1,374.3 \text{ kg/m}^3 & C_{p_f} &= 1.286 \text{ J/kg.K} \\ P &= 0.10132 \times 10^6 \text{ Pa} & C_{p_g} &= 0.784 \text{ J/kg.K} \\ V_g &= 0.19016 \text{ m}^3/\text{kg} & \rho_g &= 5.2587 \text{ kg/m}^3 \\ h_f &= 166.07 \times 10^3 \text{ J/kg} & h_g &= 382.9 \times 10^3 \text{ J/kg} \\ k &= 105.4 \times 10^{-3} \text{ W/m.K} & k_{\text{ทองแดง}} &= 398 \text{ W/m.K} \\ \mu &= 406.4 \times 10^{-6} \text{ Pa.s} \end{aligned}$$

คำนวณ Merit number (ϕ_2) จากสมการ (2.14)

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \left(\frac{179115 \times (56.35 \times 10^{-3})^3 \times 910.313^2}{0.006805 \times 10^{-2}} \right)^{0.25} \\ \phi_2 &= 790.434 \text{ kg/(K}^{0.75} \text{s}^{2.5}) \end{aligned}$$

คำนวณ ϕ_3 ได้จากสมการ (2.9)

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \left(\frac{0.32 (1,374.3^{0.65} \times (105.4 \times 10^{-3})^{0.3} \times 1.286^{0.7})}{5.2587^{0.25} \times 216.83^{0.4} \times (406.4 \times 10^{-6})^{0.1}} \right) \times \left(\frac{0.10132 \times 10^6}{1.0132 \times 10^5} \right)^{0.23} \\ \phi_3 &= 3.6756 \end{aligned}$$

คำนวณหาความต้านทานความร้อนฟิล์มของเหลว (Z_{3f}) ได้จากสมการ (2.7) โดยที่ความ
ยาวของส่วนควบแน่นเท่ากับ 0.25 m และความยาวของส่วนควบแน่นเท่ากับ 1.5 m

$$\begin{aligned} Z_{3f} &= \frac{0.235 \times (97)^{1/3}}{(0.01992)^{4/3} \times (9.81)^{1/3} \times 1.5 \times (790.434)^{4/3}} \\ Z_{3f} &= 0.00852 \text{ K/W} \end{aligned}$$

คำนวณหาความต้านทานความร้อนในแง่เดือด (Z_{3p}) ซึ่งหาได้จากสมการ (2.8)

$$Z_{3p} = \frac{1}{3.6756 \times (9.81)^{0.2} \times (97)^{0.4} (\pi \times 0.01992 \times 1.5)^{0.6}}$$

$$Z_{3p} = 0.11431 \text{ K/W}$$

เนื่องจาก $Z_{3p} > Z_{3f}$ คำนวณ Z_3 จากสมการ (2.6)

$$Z_3 = 0.11431(0.7) + 0.00852(1-0.7)$$

$$Z_3 = 0.0826 \text{ K/W}$$

คำนวณหาความต้านทานในของเหลวที่ความหนืดในเทอร์โมไซฟอน (Z_7) ได้ดังนี้
จากสมการ (2.12)

$$Re_f = \frac{4 \times 97}{(179,115)(68.05 \times 10^{-6})\pi(0.01992)}$$

$$Re_f = 508.665$$

เนื่องจาก $Re_f < 1,300$ คำนวณ Z_7 ได้จากสมการ (2.11)

$$Z_7 = \frac{0.235 \times (97)^{1/3}}{(0.01992)^{4/3} \times (9.81)^{1/3} \times 0.25 \times (790,434)^{4/3}}$$

$$Z_7 = 0.0508 \text{ K/W}$$

คำนวณความต้านทานความร้อนที่ผ่านผิวของส่วนควบแน่น (Z_8) ได้จากสมการ (2.5)

$$Z_8 = \frac{\ln \frac{0.0222}{0.01992}}{2\pi \times 0.25 \times 398}$$

$$Z_8 = 1.733 \times 10^{-4} \text{ K/W}$$

คำนวณความต้านทานความร้อนตามแนวแกนของผนังภาชนะ (Z_{10}) ได้จากสมการ (2.15)

$$Z_{10} = \frac{(0.5 \times 1.5) + 0.25 + (0.5 \times 0.25)}{7.542 \times 10^{-5} \times 398}$$

$$Z_{10} = 37.47 \text{ K/W}$$

ทดสอบเงื่อนไขของการออกแบบเมื่อไม่พิจารณาการนำความร้อนในแนวแกนจากสมการ (2.17)

$$Z_p = \frac{37.47}{2.888 \times 10^{-5} + 0.0821 + 0.0513 + 1.733 \times 10^{-4}}$$

$$Z_p = 280.191$$

เนื่องจาก $Z_p > 20$ คำนวณหาความต้านทานความร้อนรวม (Z_{tot}) ของท่อเทอร์โมไซฟอน
ได้จากสมการ (2.18)

$$Z_{\text{tot}} = 0.318 + 2.888 \times 10^{-5} + 0.0826 + 0.0508 + 1.733 \times 10^{-4}$$

$$Z_{\text{tot}} = 0.452 \text{ K/W}$$

คำนวณอุณหภูมิที่ส่วนควบแน่นของท่อเทอร์โมไซฟอน (T_{∞}) ได้จากสมการ (2.36)

$$T_{\infty} = 376.8 - (97 \times 0.452)$$

$$T_{\infty} = 333 \text{ K หรือ } 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.4.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นสู่ถังน้ำร้อน

ถังน้ำร้อนมีปริมาตรเท่ากับ 0.015 m^3 พื้นที่ภายในของถังน้ำร้อนเท่ากับ 0.24 m^2 พื้นที่ผิวนอกของถังน้ำร้อนเท่ากับ 0.25 m^2 ความยาวของถังเท่ากับ 1 m ความหนาของถังเท่ากับ 0.005 m ความหนาฉนวนเท่ากับ 0.05 m ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน ($k_{\text{ฉนวน}}$) เท่ากับ 0.038 W/m.K ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของถังน้ำร้อน ($k_{\text{ถัง}}$) เท่ากับ 283.1 W/m.K ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ (h_{air}) เท่ากับ $30 \text{ W/m}^2.\text{K}$ และค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำ ($h_{\text{น้ำ}}$) เท่ากับ $85 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (จากภาคผนวกตารางที่ ค 5)

คำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อเทอร์โมไซฟอนส่วนควบแน่นมายังน้ำในถังได้ดังนี้

$$Q_{\text{out}} = 85 [(15 \times 0.01744) (60 - 33.6)]$$

$$Q_{\text{out}} = 587 \text{ W}$$

คำนวณค่าความต้านทานความร้อนของถังน้ำร้อน (Z_{tank}) หาได้จากสมการ (2.42)

$$Z_{\text{tank}} = \left(\frac{1}{0.25 \times 30} \right)$$

$$Z_{\text{tank}} = 0.1333 \text{ K/W}$$

คำนวณหาค่าการสูญเสียความร้อนของถังน้ำร้อน (Q_{loss2}) หาได้จากสมการ (2.41)

$$Q_{\text{loss2}} = \frac{35.3 - 34.3}{0.133}$$

$$Q_{\text{loss2}} = 7.5 \text{ W}$$

คำนวณหาอุณหภูมิน้ำที่ทางออกได้จากสมการ (2.39) สมการอนุรักษ์พลังงานโดยกำหนดให้ถึงน้ำร้อนเป็นระบบที่ต้องการหาและอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.01667 l/s โดยหาได้ดังนี้

$$587-7.5 = (0.01667)(4.164 \times 10^3)(T_{\text{out}}-33.6) + \left[\left(\frac{T_{\text{out}}+33.6}{2} - 33.6 \right) \times 15 \times 4.164 \times 10^3 \right] / 1800$$

$$T_{\text{out}} = 40.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ดังนั้นจะได้อุณหภูมิน้ำที่ทางออกเท่ากับ 40.2 °C

คำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขที่ภาวะคงที่ได้จากสมการ (2.44)

$$\eta_c = \frac{(0.01667)(4.164 \times 10^3)(40.2-33.6)}{881.3 \times 2.05}$$

$$\eta_c = 25.4 \%$$

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดที่ได้จากการคำนวณการออกแบบ

จำนวนหลอดแก้วสุญญากาศ	15 หลอด
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหลอดแก้วสุญญากาศ	0.058 m
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหลอดแก้วสุญญากาศ	0.047 m
จำนวนท่อทองแดง	15 ท่อ
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อทองแดง	0.01992 m
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อทองแดง	0.0222 m
ความยาวของส่วนทำระเหย	1.5 m
ความยาวของส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน	0.25 m
ความยาวของส่วนควบแน่น	0.25 m
ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	25.4 %

3.5 การออกแบบ

3.5.1 ออกแบบท่อเทอร์โมไซฟอน

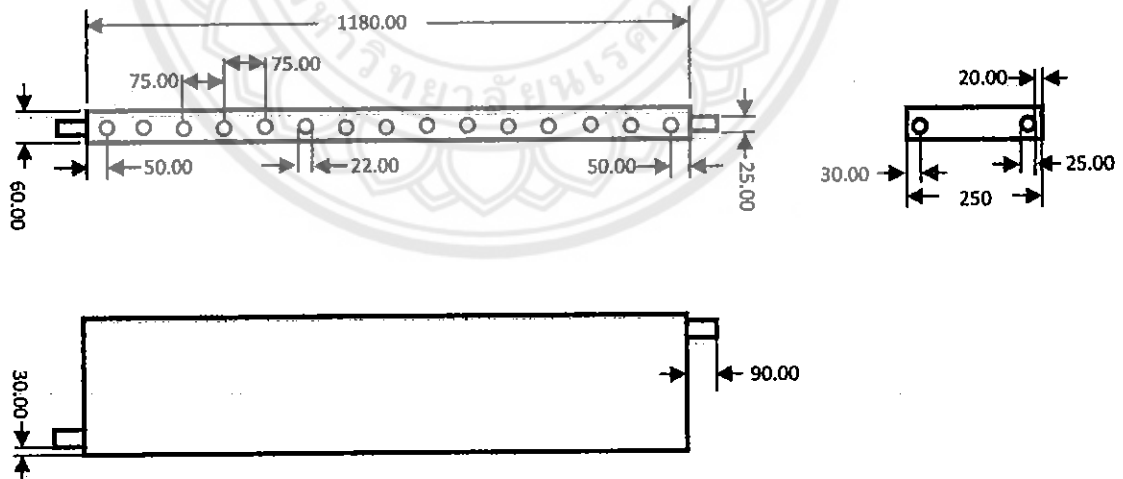
ท่อเทอร์โมไซฟอนทำจากท่อทองแดง ท่อทองแดงมีโครงสร้างที่ไม่มีรูพรุน ทนการกัดกร่อน มีอัตราการขยายตัวต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุงานท่อประเภทอื่นๆ ทนแรงดันได้สูง ไม่เป็นสนิม และระบายความร้อนได้ดี ไม่มีตะเข็บ ในการออกแบบมีจำนวนทั้งหมด 15 ท่อ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.01992 m เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0222 m ความยาวของส่วนทำระเหย 1.5 m ความยาวของส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 0.25 m ความยาวของส่วนควบแน่น 0.25 m ดังรูปที่ 3.2



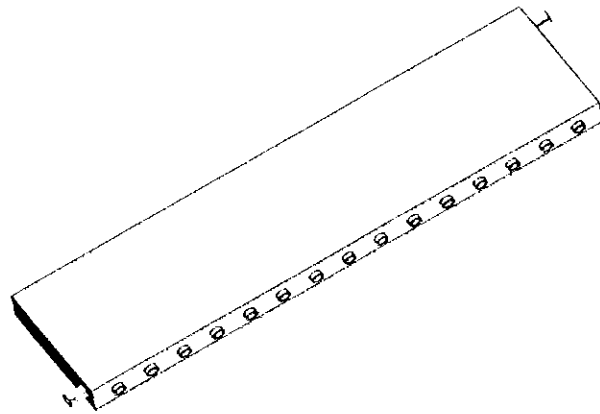
รูปที่ 3.2 แสดงรูปของท่อเทอร์โมไซฟอน

3.5.2 การออกแบบถังน้ำร้อน

ถังน้ำร้อนบรรจุน้ำร้อน 15 ลิ มีความยาว 1.18 m ความกว้าง 0.25 m และความสูง 0.06 m ดังรูปที่ 3.3 ออกแบบให้ถังน้ำร้อนให้มีความกว้างเพื่อการแลกเปลี่ยนน้ำร้อนกับท่อเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งดังรูปที่ 3.4



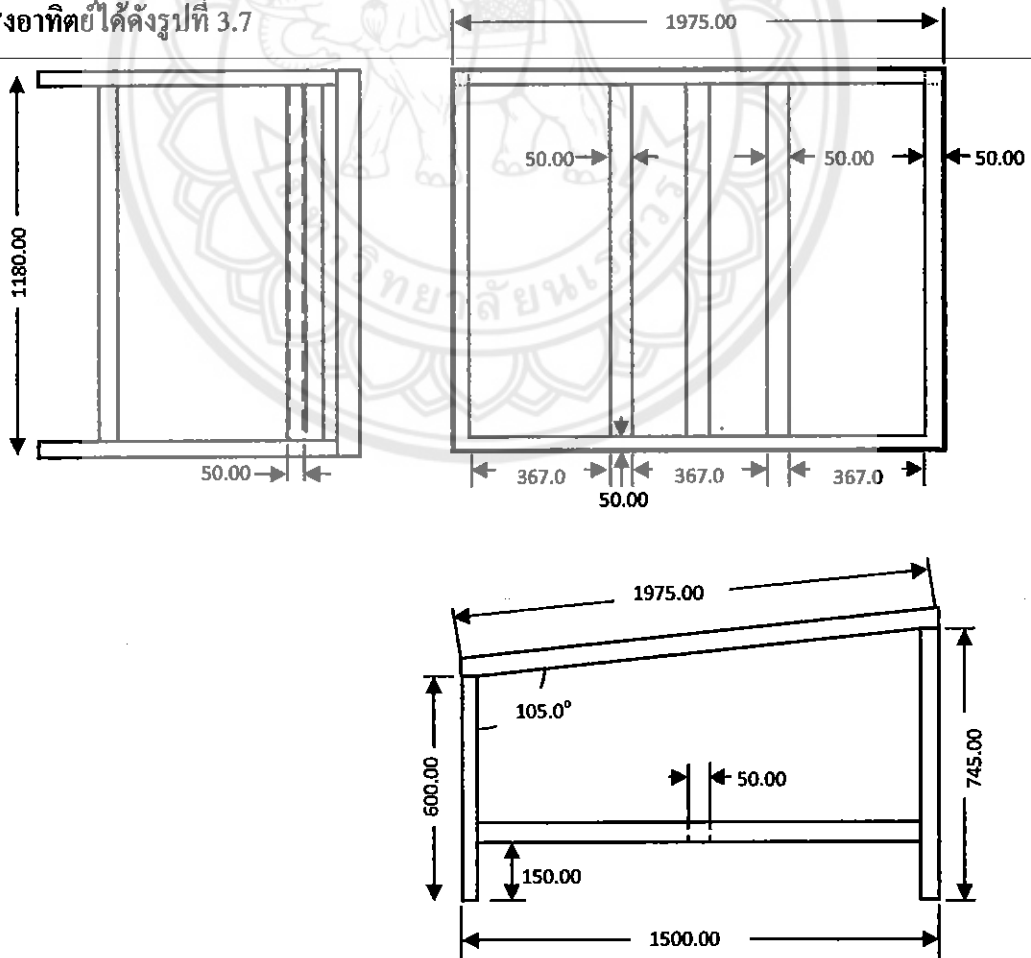
รูปที่ 3.3 ภาพฉายของถังน้ำร้อน



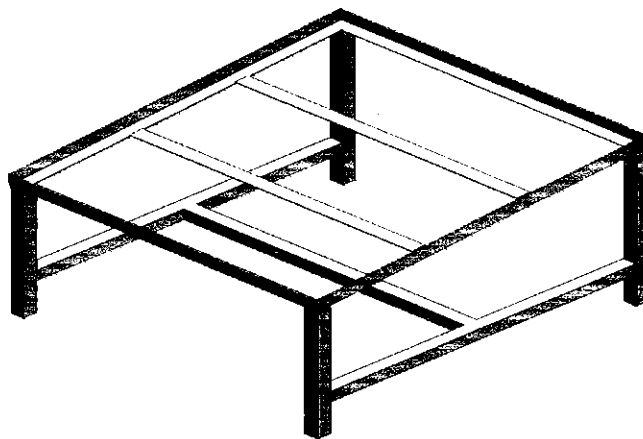
รูปที่ 3.4 ภาพ 3 มิติของถังน้ำร้อน

3.5.3 การออกแบบโครงสร้างของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

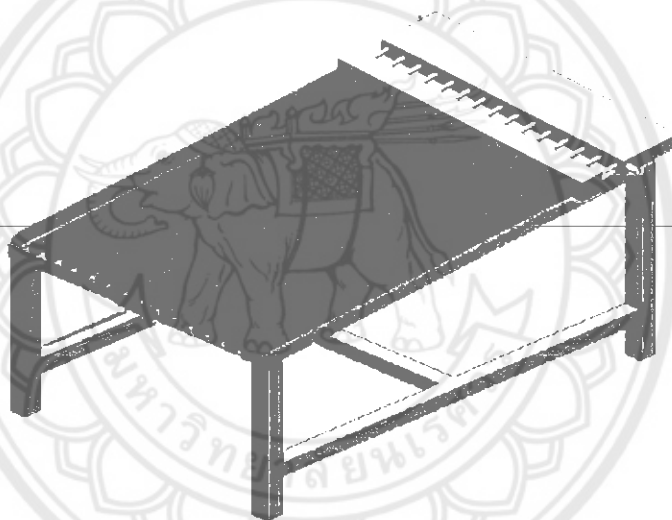
ออกแบบ โครงสร้างของตัวแผงรับแสงอาทิตย์ให้มีมุมเอียง 16° เพื่อให้สัมพันธ์กับมุมการรับแสงอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลกและให้มีขนาดกว้าง 1.18 m ยาว 1.975 m สูง 0.745 m เพื่อรองรับกับแผงรับแสงอาทิตย์และถังน้ำร้อนดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 โดยที่โครงสร้างสามารถรองรับแผงรับแสงอาทิตย์ได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ภาพฉายของ โครงสร้างของตัวแผงรับแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.6 ภาพ 3 มิติของโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์



รูปที่ 3.7 ภาพ 3 มิติของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

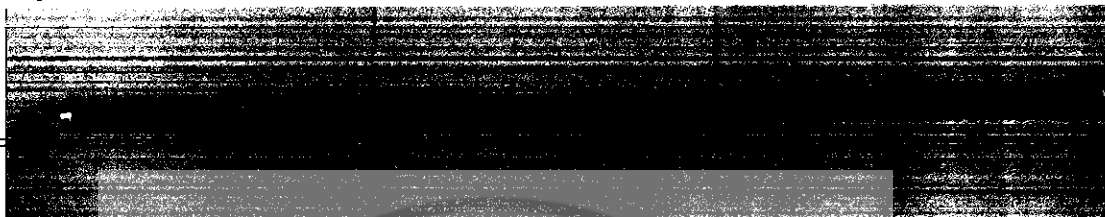
3.6 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. การสร้างหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนบรรจุไว้ภายใน
2. การสร้างถังน้ำร้อน
3. การสร้างโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์
4. การประกอบหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนบรรจุไว้ภายใน ตัวถังน้ำร้อนและโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

3.6.1 การสร้างหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนบรรจุไว้ภายใน

1. เลือกท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0222 m สำหรับทำเทอร์โมไซฟอน
2. สร้างเกลียวเพื่อทำการยึดกับถังแลกเปลี่ยนน้ำร้อน
3. ทำการเชื่อมเทอร์โมไซฟอนปิดหัวท้าย โดยส่วนหัวของเทอร์โมไซฟอนทำการเจาะรูเพื่อเชื่อมท่อทองแดงเพื่อใช้ในการเติมสารทำความเย็น R-134a ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงรูปเทอร์โมไซฟอน

4. ทำให้เทอร์โมไซฟอนเป็นสุญญากาศ แล้วเติมสารทำความเย็นเข้าไปในเทอร์โมไซฟอน โดยการนำเทอร์โมไซฟอนมาลดอุณหภูมิเพื่อให้ความดันลดแล้วเติมสารทำความเย็น R-134a โดยแต่ละท่อเติมสารทำงานท่อละ 0.2 kg
5. นำหลอดแก้วสุญญากาศมาประกอบเข้ากับเทอร์โมไซฟอนดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงรูปการประกอบเทอร์โมไซฟอนกับหลอดแก้วสุญญากาศ

3.6.2 การสร้างถังน้ำร้อน

1. ทำการเจาะรูเพื่อใส่เทอร์โมไซฟอนจำนวน 15 จุด ท่อน้ำเข้าและออกอีก 2 จุด รวมเป็น 17 จุด
2. ทำการติดเกลียวท่อสำหรับสวมเทอร์โมไซฟอน

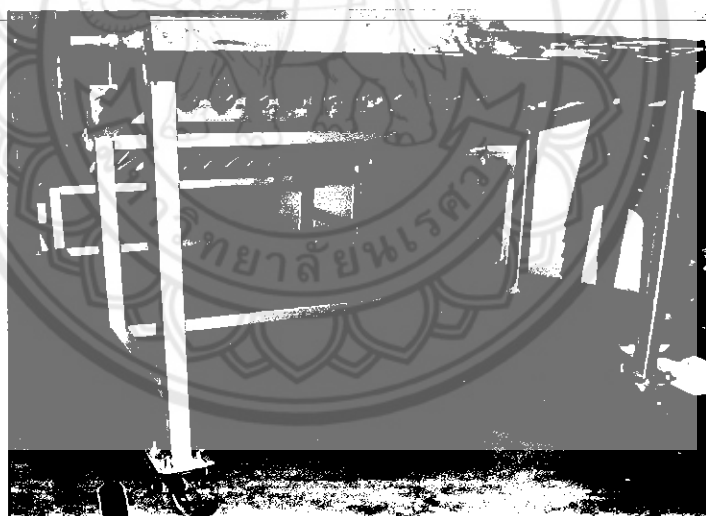
3. เชื่อมล้งน้ำร้อนให้ได้ตามแบบคังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงรูปล้งน้ำร้อน

3.6.3 การสร้างโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

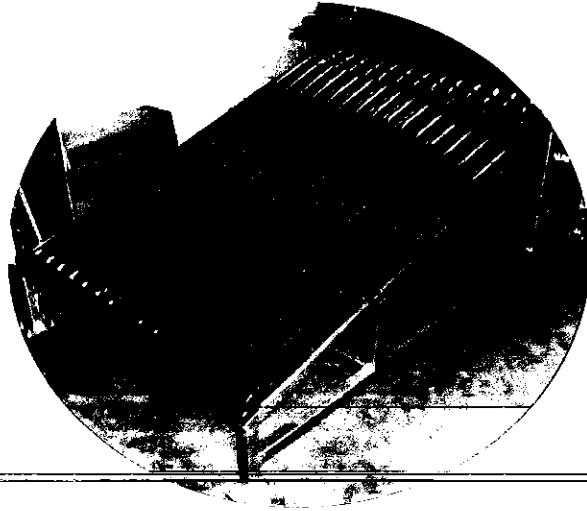
1. เลือกเหล็กฉากขนาด 1 in เพื่อสร้าง โครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์
2. เชื่อมเหล็กฉากขนาด 1 in สำหรับเป็นตัวรองรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์และล้งน้ำร้อนคังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงรูปโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

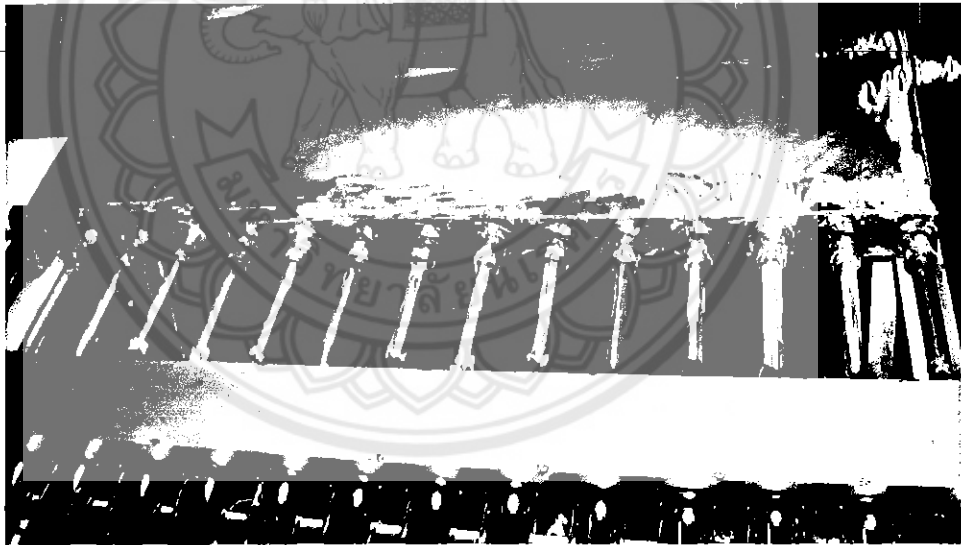
3.6.4 การประกอบหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนบรรจุไว้ภายในตัวล้งน้ำร้อนและโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์

1. นำหลอดแก้วสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนบรรจุไว้ภายในมาขีคเข้ากับโครงฐานของตัวแผงรับแสงอาทิตย์โดยมีโครงขีคหัวและท้ายของหลอดแก้วสุญญากาศ ตามแนวมุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์คังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงรูปการประกอบหลอดแก้วสุญญากาศกับ โครงฐาน

2. นำฉนวนน้ำร้อนมาประกอบเข้า โดยให้ส่วนความแน่นของแต่ละท่อสวมเข้ากับรูของฉนวนน้ำร้อน หมุนเกลียวของท่อเทอร์โมไซโฟนให้แน่นแล้วยึดฉนวนน้ำร้อนเข้ากับ โครงฐานของตัวแผงรับ แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงรูปการประกอบฉนวนน้ำร้อนเข้ากับ โครงฐานและหลอดแก้วสุญญากาศ

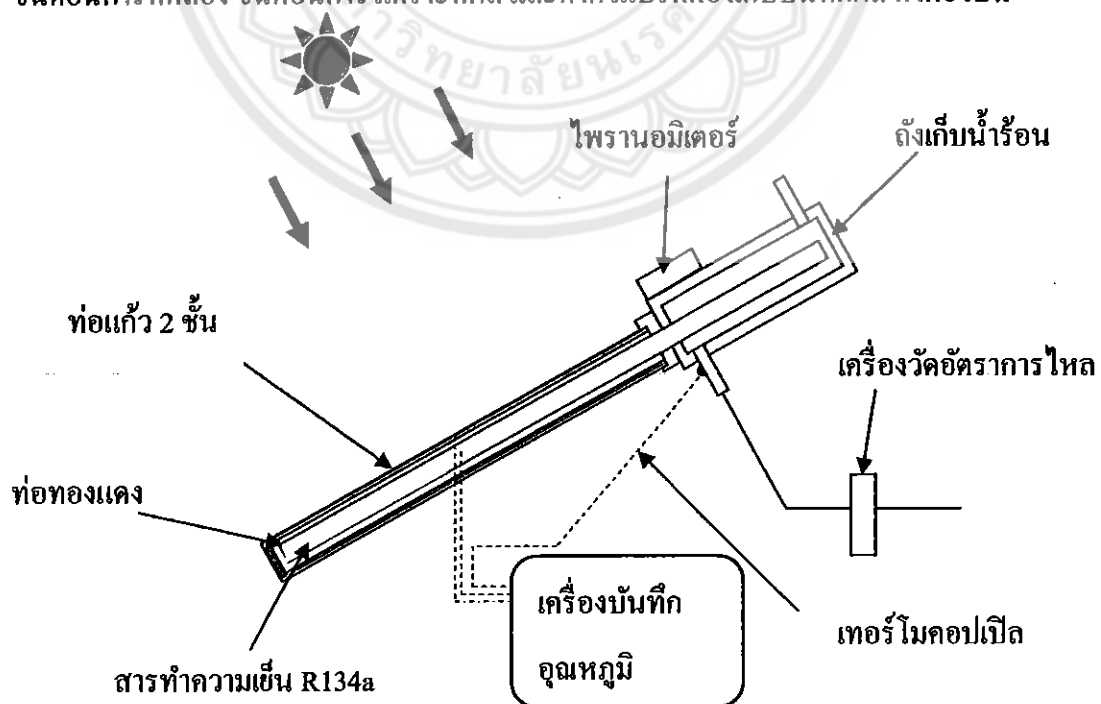
3. ทำการหุ้มฉนวนโดยใช้ฉนวนยางชนิด AEROFLEX หุ้มท่อทองแดงส่วนที่ไม่มีการ สูญเสียความร้อนและหุ้มฉนวนน้ำร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนของตัวฉนวนน้ำร้อนดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงรูปการหุ้มฉนวนของถังน้ำร้อน

3.7 การดำเนินการทดลอง

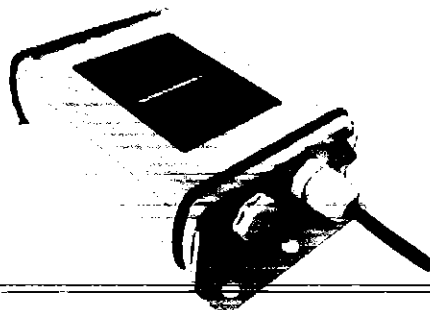
การดำเนินการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้ทำการวัดอุณหภูมิของส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น ผิวหลอดแก้วชั้นนอก ผิวหลอดแก้วชั้นใน ผิวฉนวน ที่น้ำทางเข้าและออก อุณหภูมิสภาพแวดล้อมโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการวัดและใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ในการบันทึกข้อมูล และทำการวัดความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ซึ่งติดตั้งกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยทำมุมเอียงตามแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ และวัดอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าโดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) และเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ขั้นตอนการทดลอง ขั้นตอนการวิเคราะห์ผล และค่าตัวแปรที่ต้องเก็บบันทึกผล ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 แสดงอุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

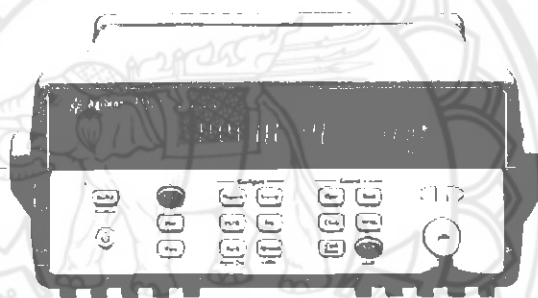
3.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.7.1.1 ไพรานอมิเตอร์ใช้สำหรับวัดรังสีแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Ingenieurburo รุ่น Si-01TC สามารถวัดความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1000 W/m^2 มีความผิดพลาดอยู่ที่ $\pm 5\%$



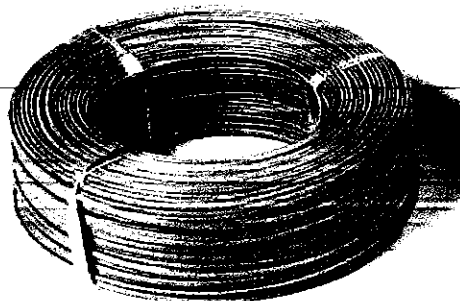
รูปที่ 3.16 แสดงไพรานอมิเตอร์ [16]

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



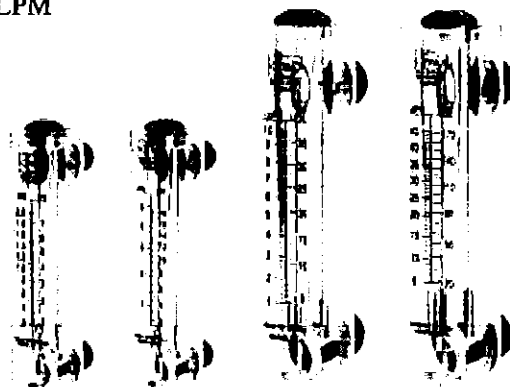
รูปที่ 3.17 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ [13]

3.7.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ยี่ห้อ Omega ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -200 ถึง $1350 \text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างสายเทอร์โมคัปเปิล [17]

3.7.1.4 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ยี่ห้อ UNI-PURE สามารถวัดอัตราการไหลของน้ำได้ในช่วง 0–9 LPM



รูปที่ 3.19 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหล [18]

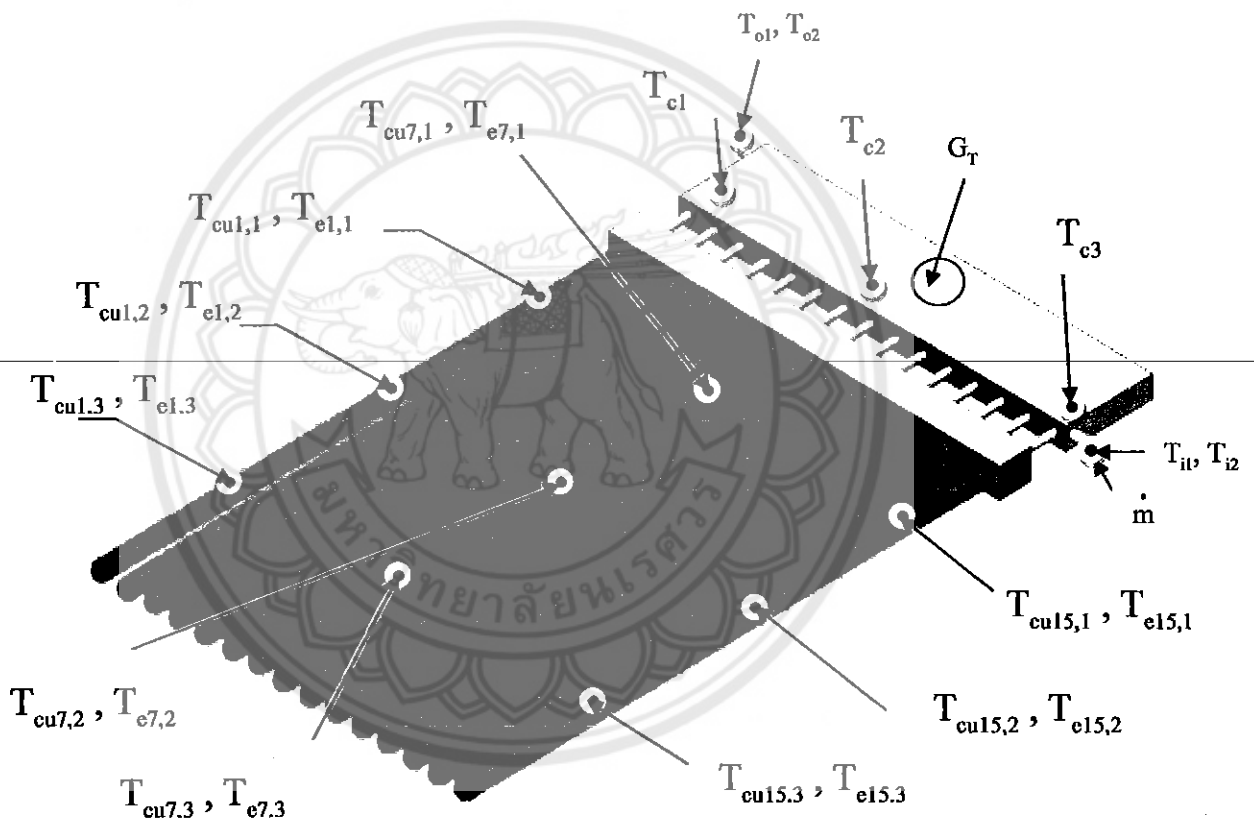
3.7.1.5 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะประกอบด้วย หลอดแก้วสุญญากาศ ทำจาก (Borosilicate glass) จำนวน 15 ท่อ ท่อเทอร์โมไซ์ฟอนซึ่งทำจากท่อทองแดงข้างในจะบรรจุสารทำงานใช้ R134a ท่อละ 0.2 kg ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.7.2 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมาเก็บค่าข้อมูลต่างๆ โดยจะเก็บค่าข้อมูลที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์คำนวณหาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้า อุณหภูมิที่ผิวหลอดแก้วชั้นนอก อุณหภูมิที่ผิวหลอดแก้วชั้นใน อุณหภูมิที่ผิวท่อเทอร์โมไซฟอน อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น และค่าความเข้มของแสงอาทิตย์ โดยจะเก็บข้อมูลทุก ๆ 30 นาที ในวันที่ 5 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2553 เวลา 7:30 น. ถึง 17:30 น. รายละเอียดของจุดที่จัดเก็บข้อมูลแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงจุดเก็บข้อมูลของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

I_t	คือความเข้มแสง (W/m^2)
T_{c1} , T_{c7} และ T_{c15}	คืออุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น โดยต่อเข้าจุดตรงกลางของท่อเทอร์โมไซฟอนท่อที่ 1, 7 และ 15 ($^{\circ}C$)
$T_{cu1,1}$ ถึง $T_{cu1,3}$	คืออุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนท่อที่ 1 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}C$)

$T_{cw7,1}$ ถึง $T_{cw7,3}$	คืออุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนท่อที่ 7 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{cu15,1}$ ถึง $T_{cu15,3}$	คืออุณหภูมิของท่อเทอร์โมไซฟอนท่อที่ 15 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{e1,1}$ ถึง $T_{e1,3}$	คืออุณหภูมิของผิวหลอดแก้วด้านนอกหลอดที่ 1 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{e7,1}$ ถึง $T_{e7,3}$	คืออุณหภูมิของผิวหลอดแก้วด้านนอกหลอดที่ 7 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{e15,1}$ ถึง $T_{e15,3}$	คืออุณหภูมิของผิวหลอดแก้วด้านนอกหลอดที่ 15 แต่ละจุดห่างกัน 0.45 m ซึ่งวัด 3 จุด ($^{\circ}\text{C}$)
T_{i1} และ T_{i2}	คืออุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าของแผงรับแสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
T_{o1} และ T_{o2}	คืออุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของแผงรับแสงอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
\dot{m}	คืออัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้า (l/s)

ขั้นตอนการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีรายละเอียดดังนี้

1. ในการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นระบบเปิด โดยการนำน้ำไปใช้งานที่ 0.01667 l/s
2. ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและอัตราการไหล ดังรูปที่ 3.21 ในที่นี้ใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K เป็นตัววัดอุณหภูมิโดยต่อพ่วงเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล โดยเครื่องบันทึกข้อมูลนี้จะวัดข้อมูลไว้ตามเวลาที่กำหนด ในที่นี้กำหนดให้เก็บอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ทุก 30 นาที
3. ติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ไพรานอมิเตอร์) เข้ากับแผงรับแสงอาทิตย์โดยปรับความเอียงให้เท่ากับแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ เก็บข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์จากไพรานอมิเตอร์ทุก 30 นาที เช่นเดียวกับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ
4. เริ่มทำการทดลองเก็บข้อมูล โดยเริ่มตั้งแต่เวลา 7:30 น. ถึง 17:30 น.
5. ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ จากเครื่องบันทึกข้อมูลและข้อมูลของรังสีแสงอาทิตย์จากไพรานอมิเตอร์ลงในแบบบันทึกข้อมูลเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ดังแสดงในภาคผนวก ตารางที่ ก 1
6. นำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.7.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนตามจุดวัดต่างที่แสดงในขั้นตอนการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ วิเคราะห์ค่าความเข้มแสง อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าและทางออก และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมในแต่ละช่วงเวลา วิเคราะห์หาสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
2. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มแสง อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าและทางออก และอุณหภูมิสภาพแวดล้อมในแต่ละช่วงเวลา
3. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟหาอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน และอัตราการความร้อนสะสมในถังน้ำร้อน เพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
4. วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ผลการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน ประกอบด้วย การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน ผลการทดลองการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

4.1 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการเปรียบเทียบใช้ช่วงเวลาที่ 11:30 – 12:30 น. เพราะเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงสูงสุด ซึ่งผลของการเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 4.1

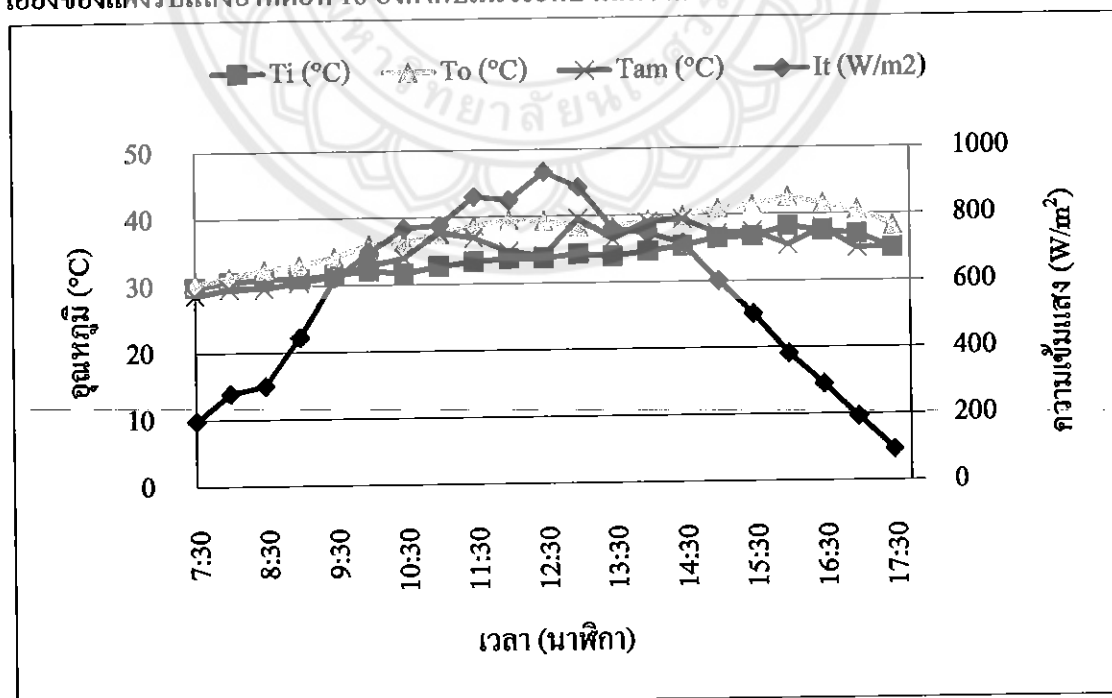
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการคำนวณการออกแบบและผลการทดลองจากเครื่องที่สร้าง

ตัวแปร	ผลการคำนวณการออกแบบ	ผลที่ได้จากการทดลอง
T_{am}	34.3 °C	34.3 °C
T_G	46.1 °C	46.1 °C
T_{ab}	103.8 °C	108 °C
T_{dnnv}	35.3 °C	35.3 °C
T_c	60 °C	58.9 °C
T_{in}	33.6 °C	33.6 °C
T_{out}	40.2 °C	39.2 °C
I_t	881.3 W/m ²	881.3 W/m ²
Q_{out}	587 W	386.7 W
η_c	25.4%	22.7%

จากผลของการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์พบว่าที่อุณหภูมิสภาพแวดล้อม อุณหภูมิผิวหลอดแก้ว อุณหภูมิฉนวน อุณหภูมิน้ำเข้าและค่าความเข้มแสงเดียวกัน เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จากการคำนวณจะมีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง โดยที่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จากการคำนวณสามารถทำอุณหภูมิที่ผิวจุดจับเท่ากับ 103.8°C ถ่ายเทไปยังผิวส่วนควบแน่นได้อุณหภูมิ 60°C และอัตราความร้อนที่น้ำได้รับ 587 W ทำให้ได้น้ำร้อนอุณหภูมิสูงถึง 40.2°C ประสิทธิภาพเท่ากับ 25.4% ต่างจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลองซึ่งทำอุณหภูมิที่ผิวจุดจับได้ 108°C ถ่ายเทไปยังผิวส่วนควบแน่นได้อุณหภูมิเท่ากับ 58.9°C และอัตราความร้อนที่น้ำได้รับ 386.7 W ทำให้ได้น้ำร้อนอุณหภูมิต่ำกว่า 39.2°C ซึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 22.7% ดังนั้นประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองมีค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพแตกต่างกันอยู่ที่ 10.6%

4.2 ผลการทดลอง

จากการทดลองและเก็บข้อมูลเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ช่วงเวลา 07:30–17:30 น. ในวันที่ 5 พฤษภาคม 2553 ซึ่งติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์หันหน้าไปทางทิศใต้ โดยปรับมุมเอียงของแผงรับแสงอาทิตย์ที่ 16 องศา กับแนวระดับ แสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



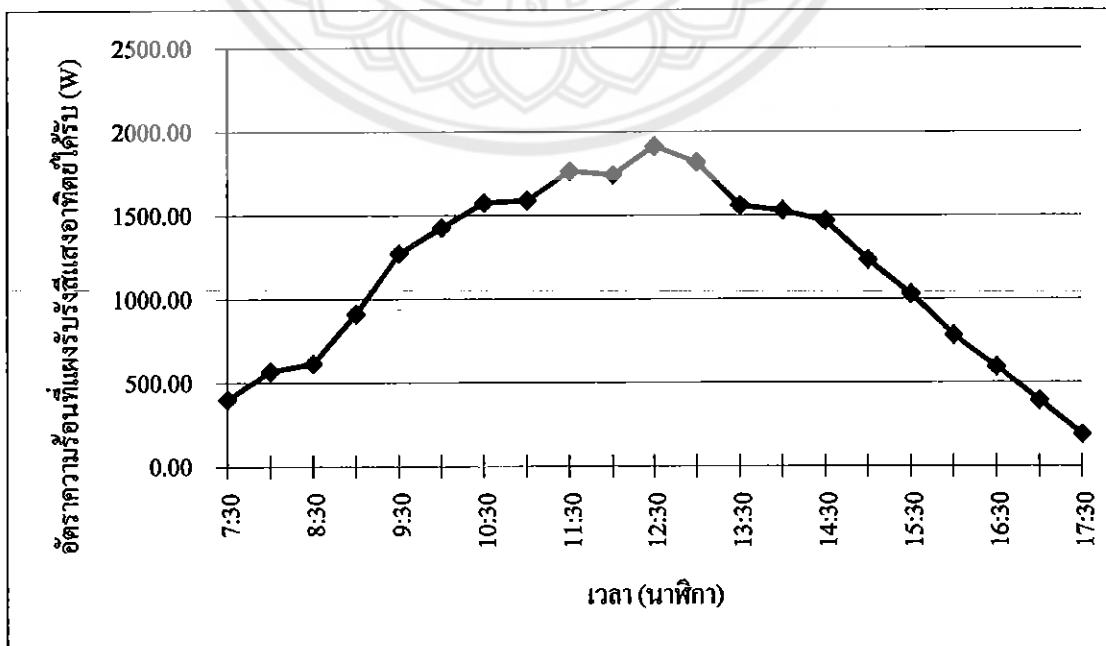
กราฟที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าและทางออก อุณหภูมิสภาพแวดล้อม และค่าความเข้มแสงเทียบกับเวลา

จากกราฟที่ 4.1 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางเข้าและน้ำร้อนที่ทางออกของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 7:30 – 8:00 น. ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะในช่วงเวลานี้ค่าความเข้มแสงยังมีค่าน้อยและเริ่มปล่อยน้ำเข้าสู่ถังน้ำร้อน โดยในช่วงเวลา 7:30 – 9:30 น. อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าคงที่เฉลี่ยอยู่ที่ $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ และมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อมจนในเวลา 16:00 น. มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ $38.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพราะเกิดความร้อนสะสมของน้ำที่ทางเข้าในท่อประปา ก่อนจะเข้าสู่ถังน้ำร้อน ส่วนความแตกต่างอุณหภูมิของน้ำเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากเวลา 8:00 น. โดยมีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในช่วงเวลา 12:00 – 12:30 น. ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 933 W/m^2 และมีอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกสูงสุดเท่ากับ $42.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในเวลา 16:00 น. ทั้งนี้เพราะน้ำที่ทางเข้ามีอุณหภูมิสูงและมีความร้อนสะสมในถังน้ำร้อน หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกเริ่มลดลงจนถึง $38.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่เวลา 17:30 น. เพราะค่าความเข้มแสงลดลง

4.3 การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

จากข้อมูลการทดลองสามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วย อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน และอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อน

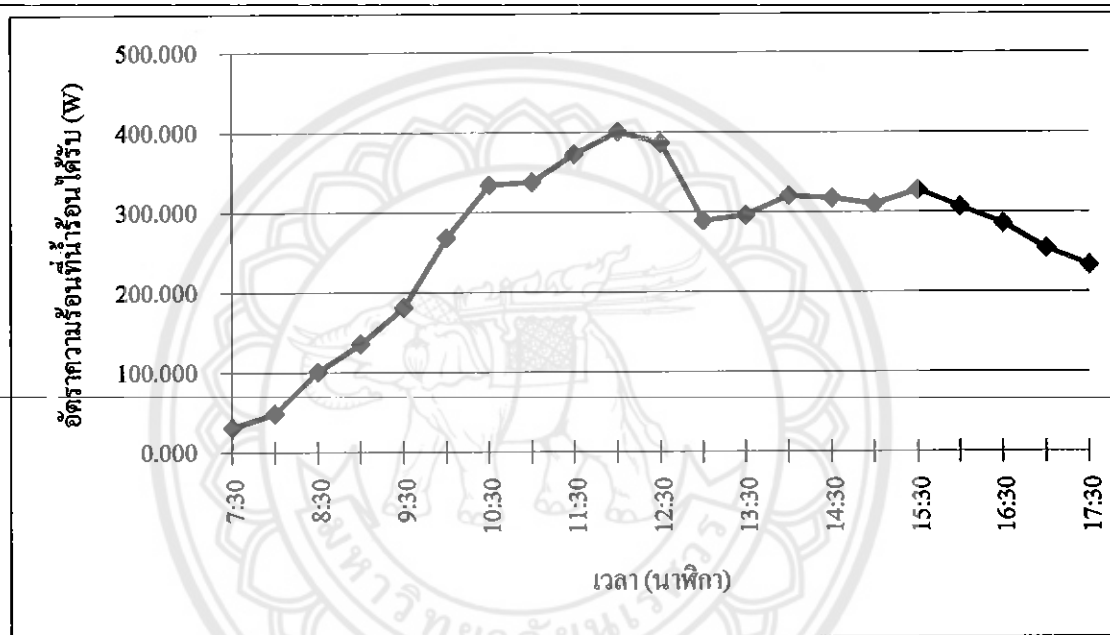
โดยอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับในแต่ละช่วงเวลาจะแสดงดังกราฟที่ 4.2



กราฟที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับกับเวลา

จากกราฟที่ 4.2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเข้มแสง โดยตั้งแต่เริ่มทำการทดลองเวลา 7:30 น. อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 12:30 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่อัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,912.6 W และเป็นช่วงเวลาที่ค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 993 W/m² ค่ำยเช่นกัน หลังจากนั้นอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าลดลงเรื่อยๆ เพราะค่าความเข้มแสงมีค่าลดลงจนสิ้นสุดการทดลองที่เวลา 17:30 น.

อัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนในแต่ละช่วงเวลาจะแสดงดังกราฟที่ 4.3

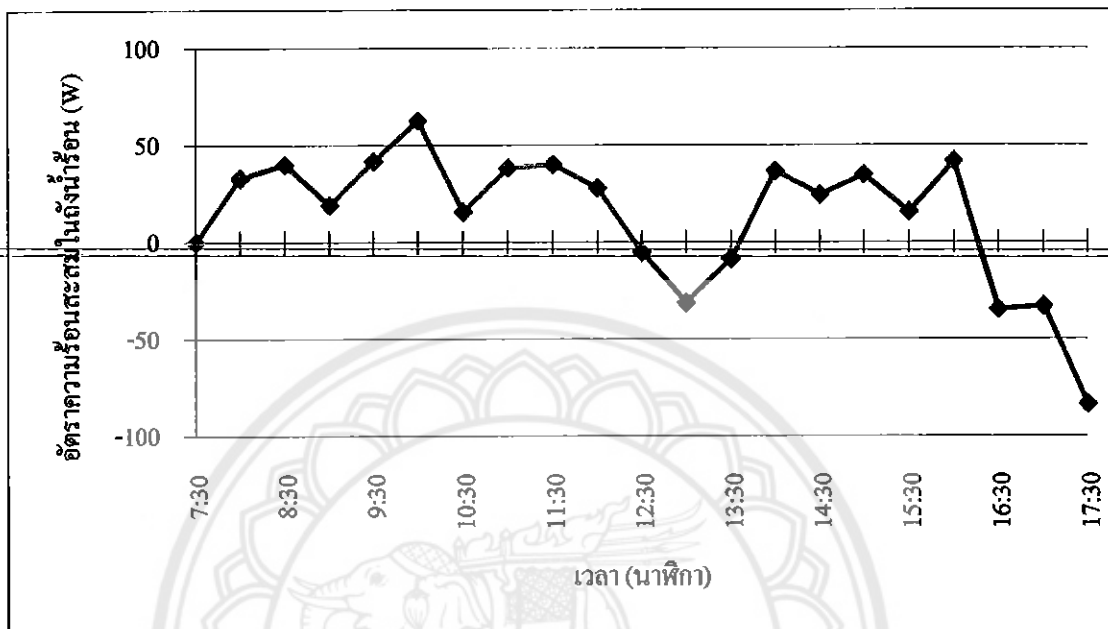


กราฟที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนกับเวลา

จากกราฟที่ 4.3 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของน้ำ จากกราฟในช่วงเวลา 7:30 – 12:00 น. อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสูงสุดที่ 400.6 W ในเวลา 12:00 น. เช่นเดียวกับความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ มีค่าสูงสุดที่ 5.7 °C ที่เวลา 12:00 น. และในเวลา 12:30 – 13:00 น. ค่าอัตราการความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนได้รับมีค่าลดลงนั้นเกิดจากอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้ามีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและอุณหภูมิน้ำที่ทางออกมีค่าลดลงตามความเข้มแสงทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิลดลง หลังจากนั้นค่าก็จะลดลงจนมีค่าเกือบจะคงที่อยู่ในช่วงเวลา 13:00 – 16:30 น. เฉลี่ยอยู่ที่ 306.5 W เพราะค่าความเข้ม

แสงลดลงแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออกยังคงที่จึงทำให้อัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับมีค่าคงที่ตามและหลังจากนั้นอัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับก็จะลดลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลอง

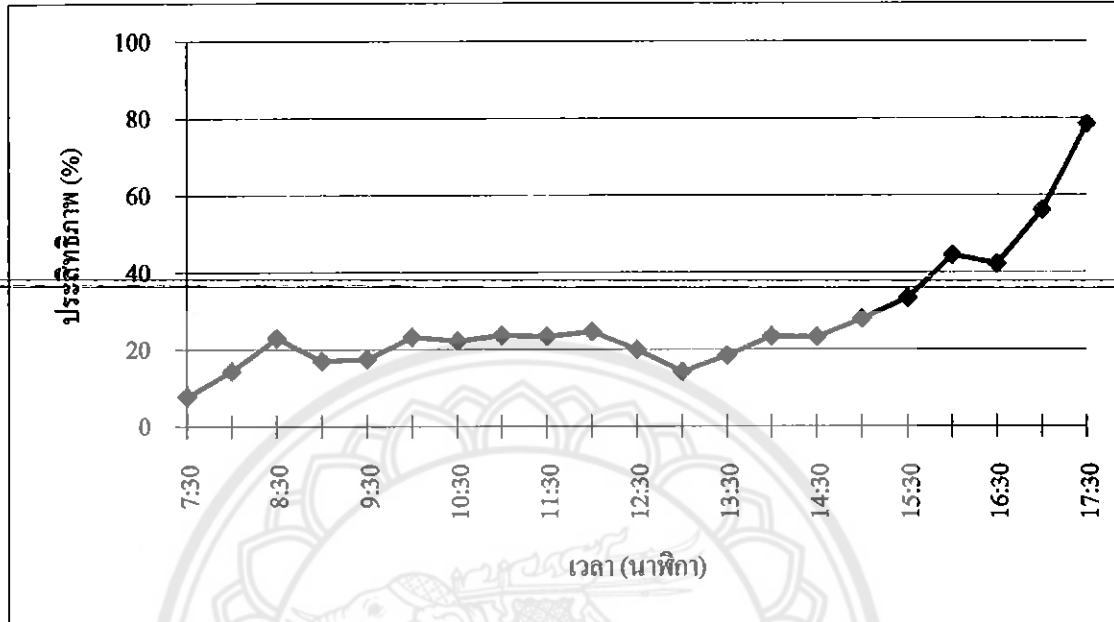
อัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนในแต่ละช่วงเวลาจะแสดงคังกราฟที่ 4.4



กราฟที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนกับเวลา

จากกราฟที่ 4.4 วิเคราะห์ได้ว่าอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนเกิดขึ้นได้เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกของในแต่ละช่วงเวลา ถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกในแต่ละช่วงเวลามีค่ามากก็จะมีอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนมาก แต่ในทางกลับกันถ้าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกในแต่ละช่วงเวลามีค่าน้อย อัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนก็จะมีค่าน้อยด้วยเช่นกัน จากกราฟที่ 4.4 อัตราความร้อนสะสมภายในถังน้ำร้อนมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 62.7 W ในเวลา 10:00 น. และมีช่วงที่อัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนติดลบอยู่ในช่วงเวลา 12:30 – 13:30 น. และหลังจาก 16:30 น. เป็นต้นไป อัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนที่ติดลบนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากบางช่วงเวลามีเมฆมาบดบังแสงอาทิตย์ทำให้ ค่าความเข้มแสงมีค่าน้อย จึงทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออก ณ เวลานั้นมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางออกช่วงเวลาก่อนหน้านั้นทำให้อัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนติดลบหรือเกิดจากการที่อัตราความร้อนสะสมของน้ำร้อนภายในถังเกิดการสูญเสียออกไปพร้อมกับน้ำร้อนที่ทางออก

จากการความสัมพันธ์ของอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน และอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อน สามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดังกราฟที่ 4.5



กราฟที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับเวลา

จากกราฟที่ 4.5 สามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้ว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์สูงสุดอยู่ที่เวลา 17:30 น. มีค่าเท่ากับ 78.5 % โดยช่วงเวลา 7:30 – 8:30 น. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากในช่วงเช้าอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้ายังมีอุณหภูมิไม่สูงเพราะอุณหภูมิสภาพแวดล้อมยังต่ำอยู่ ส่วนอุณหภูมิน้ำที่ทางออกมีอุณหภูมิสูงขึ้นเพราะค่าความเข้มแสงเริ่มเพิ่มขึ้น ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำมีค่ามากขึ้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนจึงมีค่ามากขึ้น และในช่วงเวลา 8.30 - 14.30 น. กราฟมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ที่ 21% แต่หลังจาก 14.30 น. เป็นต้นไปกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการที่ค่าความเข้มแสงมีค่าลดลงแต่ยังมีพลังงานความร้อนสะสมภายในถังน้ำร้อนและท่อเทอร์โมไซฟอนเหลืออยู่ อีกทั้งน้ำที่ทางเข้ายังมีอุณหภูมิสูง จึงทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ยังคงทำงานต่อไปทำให้น้ำร้อนที่ออกมายังมีอุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จึงมีค่ามากขึ้นในช่วงท้าย

4.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า โดยการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนกับค่าใช้จ่ายและค่าไฟของเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์กับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า (มีรายละเอียดในภาคผนวก ง)

ข้อมูลเครื่องทำน้ำร้อน	เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	เครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า
ราคาเครื่องทำน้ำร้อน	32,000 บาท	6,490 บาท
ปริมาณการผลิตน้ำร้อนต่อวัน	0.6 m ³	0.6 m ³
เวลาในการผลิตน้ำร้อน	10 hr	2 hr
อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้	30 - 42 °C	35 °C
อัตราค่าไฟฟ้า หน่วยละ	-	2.978 บาท [19]
การใช้พลังงานไฟฟ้าใน 1 วัน	-	12 kW-hr
ราคาค่าไฟฟ้าใน 1 วัน	-	33.75 บาท
ค่าไฟฟ้าใน 1 ปี	-	12,255 บาท
ระยะเวลาการคืนทุน	2 ปี 1 เดือน	-

จากการเปรียบเทียบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า โดยที่ผลิตน้ำร้อน 0.6 m³/day ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้าใช้เวลาในการทำความร้อน 2 hr ทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิประมาณ 35 °C แต่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ใช้เวลาในการทำความร้อน 10 hr ซึ่งจะทำน้ำร้อนได้ช่วงอุณหภูมิ 30 - 42 °C และไม่สามารถควบคุมการทำความร้อนได้ โดยสามารถทำอุณหภูมิได้ถึง 40 °C ตั้งแต่ 15.00 น. เป็นต้นไป โดยจะขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์และค่าใช้จ่ายในการในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะสูงเมื่อเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า แต่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะไม่มีค่าพลังงานไฟฟ้าเหมือนกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า โดยที่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าประมาณ

ปีละ 12,255 บาท ซึ่งจากการวิเคราะห์จะพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะคืนทุนในการสร้างภายใน 2 ปี 1 เดือน ดังนั้นเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ทำน้ำร้อนในระยะยาวเพราะว่าไม่เสียค่าพลังงานไฟฟ้า



บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองและผลการวิเคราะห์

จากการออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน จะได้เครื่องทำน้ำร้อนที่มีขนาด กว้าง 1.18 m ยาว 1.975 m และสูง 0.745 m มีพื้นที่รับแสง 4.099 m² โดยมีท่อเทอร์โมไซฟอนจำนวน 15 ท่อ และถังน้ำร้อนมีความจุ 15 l โดยอัตราการไหลผ่านถังน้ำร้อน 1 l/min

จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลา 11:30 น. – 12:30 น. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการคำนวณและจากการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้เท่ากับ 25.4% และ 22.7% ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนพบว่า ในช่วงเวลา 12:00 น. – 12:30 น. ค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 993 W/m² โดยทำให้อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1,912.6 W และอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อนสูงสุดเท่ากับ 400.6 W ส่วนอัตราความร้อนสะสมในถังน้ำร้อนมีค่าสูงสุดอยู่ในเวลา 10.00 น. เท่ากับ 62.7 W จากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ในวันที่ 5 พฤษภาคม 2553 ตลอดทั้งวัน ทำให้ทราบค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ที่เวลา 17:30 น. มีค่าเท่ากับ 78.6%

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ตัวกักเก็บความร้อนแบบหลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนได้ทำการเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้าขนาด 6 kW โดยที่เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้าจะต้องเสียค่าใช้จ่ายกับพลังงานไฟฟ้าประมาณปีละ 12,255 บาท ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถคืนทุนในการสร้างภายใน 2 ปี 1 เดือน ดังนั้นเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบ

หลอดสุญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอน มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ทำน้ำร้อนในระยะยาว เพราะที่ไม่เสียดำพลังงานไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

แนวทางการพัฒนาที่ได้เสนอแนะมีดังต่อไปนี้

1. จากการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นเป็นระบบเปิด โดยมีน้ำไหลผ่านถังน้ำร้อน วิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 17.30 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเข้มแสงน้อยแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกยังสูง เพราะน้ำในถังน้ำร้อนยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ ดังนั้นควรออกแบบถังน้ำร้อนให้พอดีกับส่วนควบแน่นหรือทำแผ่นกั้นทางเดินน้ำในถังน้ำร้อนเพื่อให้น้ำกระจายไปทั่วทั้งระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

2. ในการเพิ่มประสิทธิภาพการรับแสงของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดสุญญากาศ หากมีการนำวัสดุที่มีความสามารถในการสะท้อนแสงสูง เช่น กระจก มาทำแผ่นสะท้อนด้านหลังหลอดแก้วจะเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อนให้สูงขึ้นได้

3. เนื่องจากพื้นที่ผิวรับแสงมีน้อย ทำให้อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าทำการเพิ่มจำนวนแผงรับรังสีแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มพื้นที่การรับแสง อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย

4. เปลี่ยนชนิดของท่อความร้อนที่ใช้เป็นท่อความร้อนแบบพิเศษ เช่น ท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating heat pipe) ซึ่งท่อความร้อนแบบสั่นมีคุณสมบัติในการส่งถ่ายความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนจึงทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] จงจิตร หิรัญลาภ. กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน (Solar Energy Thermal Processes). สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543
- [2] กัณษัตร์ เรืองเดช, วิทยา บุญบัวทอง, สนิท คำเงิน. เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Solar Water Heater). ปริชญานิพนธ์ วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2544
- [3] เทวัญ บัวคดี, ประเมศวร์ แก้วทองดี, สถาปัตยกรรม อนุรักษ์. การจำลองสมรรถนะเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศที่ใช้เทอร์โมไซฟอน (Performance Simulation of Evacuated Tube Solar Water Heater with Using Thermosyphon). ปริชญานิพนธ์ วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2549
- [4] <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS44-07-Solar.html> [สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [5] <http://teenet.chiangmai.ac.th/emac/journal/2001/01/04.php> [สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [6] <http://www.bloggang.com/mainblog.php?id=sompop&month=16-12-2005 &group=5&gblog=1> [สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [7] http://mte.kmutt.ac.th/mte_learning/Solar%20Energy/HTML/unit_01.htm [สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [8] http://www.hk-phy.org/energy/alternate/print/solarheat_phy_print_e.html [สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [9] <http://www.loadmun.info/index.php?topic=3682.msg10508#msg10508> [สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [10] <http://www.solarisland.net/index04.html> [สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [11] <http://www.sunmaxxsolar.com/how-evacuated-tube-solar-collectors-work.php> [สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] <http://www.loadmun.info/index.php?topic=4037.msg11455#msg11455> [สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [13] <http://www.kmitl.ac.th/foodeng/new/articles.php?lng=en&pg=33> [สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [14] http://www.sinsiamgroup.co.th/pic_copper/coptube.doc [สืบค้นเมื่อ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
-
- [15] http://www.apricus.com/html/evacuated_tubes.htm [สืบค้นเมื่อ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [16] http://www.ib-mut.de/data/files_downloads_en/Si-Sensoren_e.pdf [สืบค้นเมื่อ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [17] <http://www.ies-thailand.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538773521> [สืบค้นเมื่อ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2552]
- [18] <http://www.bannkrunggong.com/system.html> [สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน พ.ศ. 2553]
-
- [19] <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html> [สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน พ.ศ. 2553]
- [20] http://www.spairc.com/product.detail_308636_th_2474530 [สืบค้นเมื่อ 4 เมษายน พ.ศ. 2553]
- [21] Heat Pipe – Performance of two-phase closed thermosyphons, ESDU, 81038
- [22] http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/htrtheory3.htm#eq5_5 [สืบค้นเมื่อ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2553]





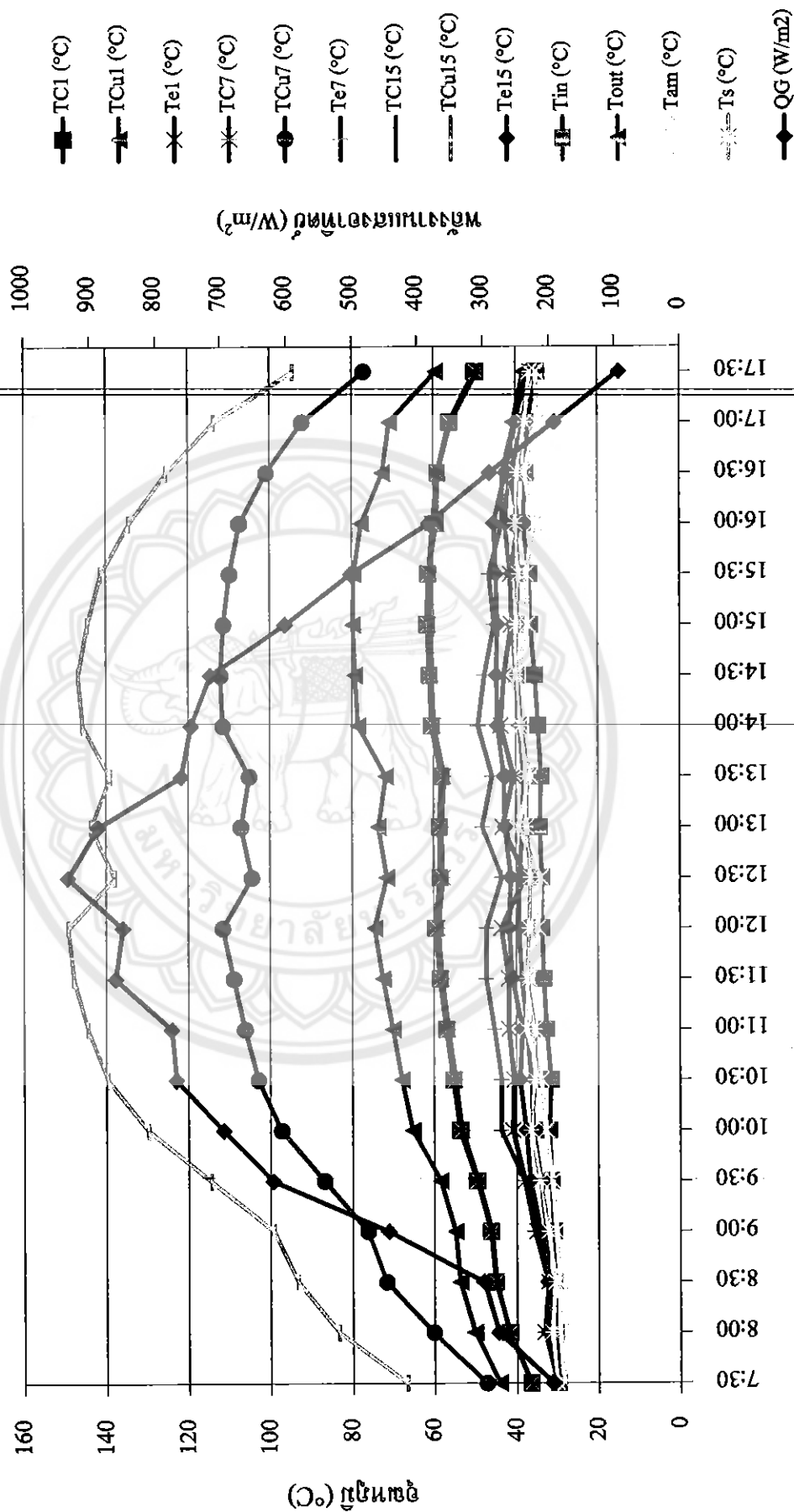
ตารางที่ ก 3 ตารางการคำนวณค่าพลังงานความร้อน

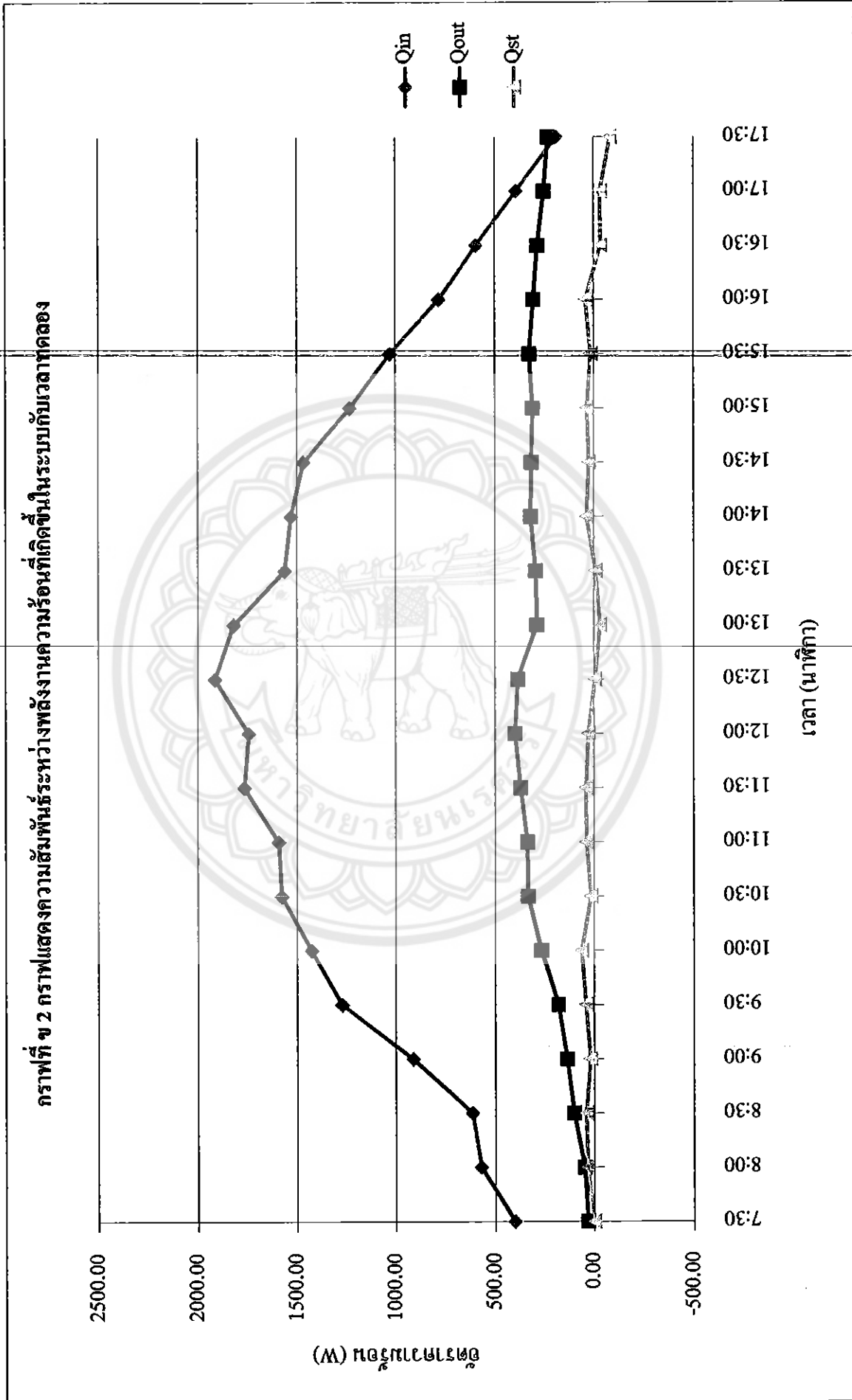
เวลา	I_t (W/m ²)	Q_{st} (W)	Q_{out} (W)	$Q_{out,tot}$ (W)
7:30	401.8	0	31.3	31.3
8:00	569.9	33.0	48.7	81.8
8:30	615	40	101	141
9:00	912.2	19.1	135.8	155
9:30	1273	41.8	181.1	222.9
10:00	1426.8	62.7	268.2	330.9
10:30	1576.4	15.6	334.4	350.1
11:00	1590.8	38.3	337.9	376.2
11:30	1765	40	372.7	412.8
12:00	1742.5	27.8	400.6	428.5
12:30	1912.6	-5.2	386.7	381.5
13:00	1818.3	-31.3	289.1	257.8
13:30	761	-8.7	296.1	287.4
14:00	1560	-8.7	296.1	287.4
14:30	1529.3	36.5	320.5	357.1
15:00	1467.8	24.3	317	341.4
15:30	1234.1	34.8	310	344.9
16:00	1029.1	15.6	327.4	343.1
16:30	783.1	41.8	306.5	348.3
17:00	594.5	-34.8	285.6	221.2
17:30	393.6	-33	254.3	149.8



กราฟที่ ข 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุดจัดเก็บข้อมูล, พลังงานแสงอาทิตย์ กับเวลาทดลอง วันที่ 5 พฤษภาคม 2553

2553







ตารางที่ ค 1 แสดงสมบัติของ R-134a [3]

Refrigerant 134a Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor									
Temp. C	Presser MPa	Density		Enthalpy		Entropy		Specific heat cp	
		Liquid kg/m ³	Vapor m ³ /kg	Liquid kJ/kg	Vapor kJ/kg	Liquid kJ/(kg*K)	Vapor kJ/(kg*K)	Liquid kJ/(kg*K)	Vapor kJ/(kg*K)
-103.3	0.00039	1591.2	35.263	71.89	335.07	0.4143	1.9638	1.147	0.585
-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	1526.2	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 ก 1 แสดงสมบัติของ R-134a (ต่อ)

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

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
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 2 แสดงสมบัติของ Refrigerant-134a [3]

Refrigerant-134a Properties of Gases at Atmospheric Pressure

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^2$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·k)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$\beta \cdot 10^3$ (K ⁻¹)
230	1426.8	1.249	0.04912	0.3443	112.1	0.629	5.5	2.02
240	1397.7	1.267	0.04202	0.3006	107.3	0.606	5.0	2.11
250	1367.9	1.287	0.03633	0.2656	102.5	0.583	4.6	2.23
260	1337.1	1.308	0.03166	0.2368	97.9	0.560	4.2	2.36
270	1305.1	1.333	0.02775	0.2127	93.4	0.537	4.0	2.53
280	1271.8	1.361	0.02443	0.1921	89.0	0.514	3.7	2.73
290	1236.8	1.393	0.02156	0.1744	84.6	0.491	3.5	2.93
300	1199.7	1.432	0.01905	0.1588	80.3	0.468	3.4	3.30
310	1159.9	1.481	0.01680	0.1449	76.1	0.443	3.3	3.73
320	1116.8	1.543	0.01478	0.1323	71.8	0.417	3.2	4.33
330	1069.1	1.627	0.01292	0.1209	67.5	0.388	3.1	5.19
340	1015.0	1.751	0.01118	0.1102	63.1	0.355	3.1	6.57
350	951.3	1.961	0.0951	0.1000	58.6	0.314	3.2	9.10
360	870.1	2.437	0.0781	0.0898	54.1	0.255	3.5	15.39
370	740.3	5.105	0.0580	0.0783	51.8	0.137	5.7	55.24

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของอากาศ [2]

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 ก 4 แสดงสมบัติของน้ำ [2]

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

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน [22]

Type of Convection	h ($W/m^2.K$)
Still air	6
Moving air ($3 m s^{-1}$)	30
Free Convection gases	25-250
Free Convection liquids	50-20,000
Free Convection Over Various Shape Air	2
Free Convection Over Various Shape Water	60-300
Turbulent Convection Over Various Shape and through tubes Air	6
Turbulent Convection Over Various Shape and through tubes Water	1100
Plate Heat Exchanger, liquid to liquid U range	1000 > 4000
Shell and Tube, liquid inside and outside tubes U range	150 > 1200
Spiral Heat Exchanger, liquid to liquid U range	700 > 2500
Plate Heat Exchanger, liquid to liquid U range	1000 > 4000
Boiling liquids	2400-24,000
Condensing liquids	1800-18,000
Liquids flowing through pipes	1200-6000



ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โม

ไซฟอน

ขั้นตอนการคำนวณ

1. หาค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 07:30 น.-

17:30 น.

จาก

$$Q_{in} = I_t A_c$$

โดยที่ Q_{in} = พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงได้รับ (W)
 I_t = ค่าความเข้มแสง (W/m^2)
 A_c = แผงรับแสงของเครื่องทำน้ำร้อน = $4.099 m^2$

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 07:30 น. : } Q_{in} &= 196 \times 2.05 \\ &= 401.8 \text{ W} \end{aligned}$$

ตารางที่ 1 ตารางผลการคำนวณหาค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับในหน่วยของวัตต์ (W)

เวลา (นาฬิกา)	ความเข้มแสง (I_t , W/m^2)	อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ (Q_{in} , W)
7:30	196	401.8
8:00	278	569.9
8:30	300	615
9:00	445	912.2
9:30	621	1273
10:00	696	1426.8
10:30	769	1576.4
11:00	776	1590.8
11:30	861	1765
12:00	850	1742.5
12:30	933	1912.6

เวลา (นาฬิกา)	ความเข้มแสง ($I_t, W/m^2$)	อัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ (Q_{in}, W)
13:00	887	1818.3
13:30	761	1560
14:00	746	1529.3
14:30	716	1467.8
15:00	602	1234.1
15:30	502	1029.1
16:00	382	783.1
16:30	290	594.5
17:00	192	393.6
17:30	93	190.6

2. หาค่าอัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับ ($Q_{out,tot}$) ในแต่ละช่วงเวลา

$$Q_{out} = \dot{m}c_p\Delta T \text{ และ } Q_{st} = MC_p(T_{out, \text{ก่อน}} - T_{out, \text{หลัง}})$$

จาก

$$Q_{out,tot} = \dot{m}c_p\Delta T + MC_p(T_{out, \text{ก่อน}} - T_{out, \text{หลัง}})$$

โดยที่ Q_{out} = ความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน (W)

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (m^3/s)

$$\begin{aligned} \text{ที่เวลา 08.00 น. } Q_{out,tot} &= (0.01667 \times 4,180 \times 0.45) + 15 \times 4,180(31.3 - 30.3) \\ &= 31.3 \text{ W} \end{aligned}$$

ตารางที่ 2 ตารางผลการคำนวณหาอัตราความร้อนที่น้ำร้อนได้รับในแต่ละช่วงเวลา (W)

เวลา (นาฬิกา)	\dot{m} (l/s)	c_p (J/kg.m ³)	ΔT (°C)	Q_{st} (W)	$Q_{out,tot}$ (W)
7:30	0.01667	4,180	0.45	0	31.3
8:00	0.01667	4,180	0.7	33.0	81.8
8:30	0.01667	4,180	1.45	40	141
9:00	0.01667	4,180	1.95	19.1	155
9:30	0.01667	4,180	2.6	41.8	222.9

เวลา (นาฬิกา)	ḡ (l/s)	c _p (J/kg.m ³)	ΔT (°C)	Q _{si} (W)	Q _{out,tot} (W)
10:00	0.01667	4,180	3.85	62.7	330.9
10:30	0.01667	4,180	4.8	15.6	350.1
11:00	0.01667	4,180	4.85	38.3	376.2
11:30	0.01667	4,180	5.35	40	412.8
12:00	0.01667	4,180	5.75	27.8	428.5
12:30	0.01667	4,180	5.55	-5.2	381.5
13:00	0.01667	4,180	4.15	-31.3	257.8
13:30	0.01667	4,180	4.25	-8.7	287.4
14:00	0.01667	4,180	4.6	-8.7	287.4
14:30	0.01667	4,180	4.55	36.5	357.1
15:00	0.01667	4,180	4.45	24.3	341.4
15:30	0.01667	4,180	4.7	34.8	344.9
16:00	0.01667	4,180	4.4	15.6	343.1
16:30	0.01667	4,180	4.1	41.8	348.3
17:00	0.01667	4,180	3.65	-34.8	221.2
17:30	0.01667	4,180	3.35	-33	149.8

3. นำอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับและอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละชั่วโมง

จาก

$$\eta_{th} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

ที่เวลา 07:30 น.

จาก

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{31.3}{401.8} \times 100\% \\ &= 7.8 \end{aligned}$$

ตารางที่ 3 ตารางผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละช่วงเวลา

เวลา (นาฬิกา)	อัตราการความร้อนรวมที่ น้ำได้รับ ($Q_{out,tot}$, W)	อัตราการความร้อนที่แผงรับรังสี แสงอาทิตย์ได้รับ (Q_m , W)	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_m %)
7:30	31.3	401.8	7.8
8:00	81.8	569.9	14.3
8:30	141	615	22.9
9:00	155	912.2	16.9
9:30	222.9	1273	17.5
10:00	330.9	1426.8	23.1
10:30	350.1	1576.4	22.2
11:00	376.2	1590.8	23.6
11:30	412.8	1765	23.3
12:00	428.5	1742.5	24.5
12:30	381.5	1912.6	19.9
13:00	257.8	1818.3	14.1
13:30	287.4	1560	18.4
14:00	287.4	1529.3	23.3
14:30	357.1	1467.8	23.2
15:00	341.4	1234.1	27.9
15:30	344.9	1029.1	33.3
16:00	343.1	783.1	44.4
16:30	348.3	594.5	42.1
17:00	221.2	393.6	56.2
17:30	149.8	190.6	78.5

ดังนั้น ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 78.5 % อยู่ช่วงในเวลา 17:30 น

การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบหลอดแก้ว
 สูญญากาศที่มีเทอร์โมไซฟอนเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนไฟฟ้า

รายละเอียดเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานไฟฟ้า [20]

ระบบจ่ายน้ำ	ระบบหลายจุด (ควบคุมด้วยก๊อกน้ำตามจุดจ่ายน้ำ)
กำลังไฟฟ้า	6.0 kW / 220 V
ปุ่มปรับกำลังไฟฟ้า	หมุนเปิด/ 2.5/ 3.5/ 6.0 kW
ทำอุณหภูมิได้	32–48 °C
แรงดันน้ำต่ำสุดที่เครื่องต้องการ	0.2 kg/ cm ³
ระบบความปลอดภัย	6 ระบบนิรภัย
แผ่นฝาครอบผลิตจากวัสดุ UL-94VO	ใช่
แผ่นหลังผลิตจากวัสดุ UL-94VO	ใช่
เทอร์โมสแตท แบบอัตโนมัติ	2 ตัว
เทอร์โมสแตท แบบรีเซ็ต	2 ตัว
ไฟแสดงการทำงาน	ไฟแสดงการทำงาน ELB
ขนาด : สูง x กว้าง x ลึก (mm)	320 x 180x 90
น้ำหนัก (kg)	2.3
อุปกรณ์พิเศษ	ชุดกรองน้ำ
ปริมาณน้ำ และการทำอุณหภูมิของเครื่อง	
3.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 37° C MED 42° C HIGH 54° C
4.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 34° C MED 38° C HIGH 46° C
5.0 l / min	ที่ กำลังไฟ LOW 33° C MED 35° C HIGH 43° C

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับ	32,000 บาท
เครื่องทำน้ำร้อน ขนาด 6 kW ราคา	6,490 บาท
จากอัตราค่าไฟฟ้าโดยคิดที่มีการใช้ไฟฟ้าเกิน 401 หน่วยขึ้นไปราคาหน่วยละ	2.978 บาท
ปริมาตรของน้ำใน 1 วัน	0.6 m ³
โดยคิดที่เครื่องทำน้ำร้อน ไฟฟ้าทำน้ำร้อน 0.6 m ³ ใช้เวลา	2 hr
ดังนั้นใน 1 วันใช้พลังงานไฟฟ้าไป	2×6 = 12 kW-hr
เพราะฉะนั้นค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทำน้ำร้อนใน 1 วัน	2.978×12 = 33.75 บาท

ค่าไฟฟ้าต่อปี $365 \times 33.75 = 12,255$ บาท

ระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ $32,000 - 6,490 / 12,255 = 2.08$ ปี

ดังนั้นระยะเวลาคืนทุนของเครื่องทำน้ำร้อนเท่ากับ 2 ปี 1 เดือน

