

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

Study of Thermal Performance of Evacuated Tube Solar Water
Heater with Closed - Loop Oscillating Heat Pipes

นายทวีชัย	เจนจบ	รหัส	52360973
นายมานพ	วงศ์จันทร์	รหัส	52361239
นายนิธิวัฒน์	พุกจินดา	รหัส	52365237

ห้องเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 2 ต.ค. 2556
เลขทะเบียน..... 16430533
เลขเรียกหนังสือ..... ฟร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๓๓๑๖ ๓

2555
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ

การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงาน
แสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
Study of Thermal Performance of Evacuated Tube Solar
Water Heater with Closed – Loop Oscillating Heat Pipes

ผู้ดำเนินโครงการ


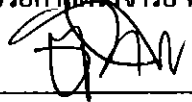

นายทวีชัย	เจนจบ	รหัส	5236097
นายมานพ	วงษ์จันทร์	รหัส	52361239
นายรัฐวัฒน์	พุกจินดา	รหัส	52365237

ที่ปรึกษาโครงการ สาขาวิชา ภาควิชา ปีการศึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์
วิศวกรรมเครื่องกล
วิศวกรรมเครื่องกล
2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

	ที่ปรึกษาโครงการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)	
	กรรมการ
(ดร.บินนาท ราชประดิษฐ์)	
	กรรมการ
(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)	

ชื่อหัวข้อโครงการ	การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายทวีชัย	เจนจบ	รหัส 52360973
	นายมานพ	วงษ์จันทร์	รหัส 52361239
	นายรัฐวัฒน์	พุกจินดา	รหัส 52365237
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2555		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จึงได้ทำการทดลองโดยการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ใช้สารทำงานเป็น R-134a โดยมีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายในทั้งหมดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งการทดลองมีทั้งหมด 2 ชุด โดยชุดที่ 1 เป็นการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวต่างกัน ซึ่งแบ่งออกเป็น 5, 10 และ 15 โค้งเลี้ยว และทั้ง 3 ท่อ มีความยาวส่วนทำระเหย 1.5 m ความยาวส่วนควบแน่น 0.25 m และความยาวส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 0.05 m และในชุดที่ 2 เป็นการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยให้ความยาวของส่วนควบแน่นแตกต่างกัน โดยใช้ความยาวที่ 0.25 m, 0.15 m และ 0.05 m โดยท่อทั้ง 3 จะมีความยาวของส่วนทำระเหยเท่ากันคือ 1.5 m และความยาวส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนเท่ากันคือ 0.05 m โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศทั้ง 2 ชุด ได้ทำการทดลองในช่วงเวลา 9.00 น. – 16.00 น. และทำการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K วัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ วัดอัตราการไหล โดยให้การไหลคงที่ๆ 0.1 L/min ทุกๆ 30 นาที โดยผลการทดลองชุดที่ 1 พบว่า เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูงสุด คือ 43.76% และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 51.31 W โดยที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5 และ 10 โค้งเลี้ยว มีประสิทธิภาพเพียง 28.43% และ 32.36% ตามลำดับ และมีอัตราการถ่ายเทความร้อน 31.76 W และ 38.04 W ตามลำดับ และผลการทดลองในชุดที่ 2 พบว่าเครื่องทำน้ำร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 115.2 W และมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 73.34% ซึ่งสูงที่สุด โดยสูงกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.25 m ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อน 99.12 W และ 93.89 W ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 63.14% และ 60.12% ตามลำดับ

Project title	Study of Thermal Performance of Evacuated Tube Solar Water Heater with Closed – Loop Oscillating Heat Pipes
Name	Mr. Taweechai Chenjob ID 52360973 Mr. Manop Wongjan ID 52361239 Mr. Nattawat Pugjinda ID 52365237
Project advisor	Asst. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan
Major	Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering
Academic year	2555

Abstract

This project aims to study the thermal performance of evacuated tube solar water heater with closed-loop oscillating heat pipe (CLOHP). In order to investigate the effects of parameters on the operation of solar water heater, the experiments were conducted by establishing the evacuated tube solar water heaters contained with CLOHP. R-134a was used as the working fluid at the filling ratio of 50% of total internal volume of CLOHP. The experiments can be divided into two parts. First, three evacuated tube solar water heaters with the different numbers of turns of CLOHP of 5, 10 and 15 were constructed. The evaporator, adiabatic and condenser lengths for all of them were the same at 1.5 m, 0.25 m and 0.05 m respectively. Second, three evacuated tube solar water heaters with the different CLOHP condenser lengths of 0.25 m, 0.15 m and 0.05 m were constructed. The evaporator and adiabatic lengths for all of them were the same at 1.5 m and 0.05 m respectively. All experiments were conducted from 9:00 am to 4:00 pm. Each temperature point was measured by the K type thermocouple and the solar intensity was also detected by the Pyranometer. The water flow rate was measured and kept at 0.1 L/min. All data were recorded at every 30 minutes. It was found from the first experiment that the best performance was revealed when the evacuated tube solar water heater contained the CLOHP with 15 numbers of turns. Its average efficiency and heat rate transfer were 43.76% and 51.31 W respectively. The efficiencies were 28.43% and 32.36% for 5 and 10 turns, respectively. The rates of heat transfer were 31.76 W and 38.04 W for 5 and 10 turns, respectively. For the second experiment, the evacuated tube solar water heater with CLOHP at 15 numbers of turns and 0.05 m condenser length had the maximum heat transfer rate of 115.2 W. Its average efficiency was 73.34% which was highest and higher than those for 0.15 m and 0.25 m condenser lengths. The rates of heat transfer

were 99.12 W and 93.89 W for 0.15 m and 0.25 m condenser lengths, respectively. The efficiencies were 63.14% and 60.12% for 0.15 m and 0.25 m condenser lengths, respectively.



กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือในด้านการให้คำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์วาทุ์ ภมร ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือสำหรับการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

และขอขอบคุณ นายศุภชัย ชุมนุมวัฒน์ นิสิตปริญญาโท ที่ให้ความช่วยในด้านข้อมูลต่างๆ ในการจัดทำโครงการนี้ และสุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความร่วมมือและมีส่วนช่วยให้โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี



คณะผู้จัดทำโครงการ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
สารบัญกราฟ.....	ฎ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	5
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	6
2.1 ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์.....	6
2.2 ส่วนประกอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	8
2.3 ลักษณะของท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ.....	9
2.4 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	12
2.5 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	13
2.6 ทฤษฎีแผงรับรังสีความร้อน.....	14
2.7 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง.....	15
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	17
3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	17
3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา.....	18
3.3 การตั้งสมมติฐาน.....	19
3.4 การออกแบบ.....	19
3.5 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์.....	21
3.6 การดำเนินการทดลอง.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	29
4.1 การทดลองชุดที่ 1.....	29
4.1 การทดลองชุดที่ 2.....	37
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
5.1 ผลการทดลอง และผลการวิเคราะห์.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	40
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการทดลอง.....	42
ภาคผนวก ข กราฟข้อมูลการทดลอง.....	47
ภาคผนวก ค ตารางคุณสมบัติ.....	51
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ.....	55
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	42

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางการดำเนินงาน.....	5
1.2 รายละเอียดงบประมาณ.....	5
3.1 ตัวแปรควบคุม.....	18
3.2 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา.....	18
ก.1 ข้อมูลการทดลองวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556.....	43
ก.2 ข้อมูลการทดลองวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556.....	44
ก.3 ข้อมูลการทดลองวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	45
ก.4 ข้อมูลการทดลองวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556.....	46
ค.1 แสดงสมบัติของ R-134a ที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว.....	52
ง.1 การคำนวณของการทดลองท่อความร้อนแบบสันงรอบที่มีจำนวนโค้งเดียว 5, 10 และ 15 วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556.....	59
ง.2 การคำนวณของการทดลองท่อความร้อนแบบสันงรอบที่มีจำนวนโค้งเดียว 5, 10 และ 15 วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556.....	60
ง.3 การคำนวณของการทดลองท่อความร้อนแบบสันงรอบ 15 โค้งเดียว โดยมีความยาวส่วน ควมแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 cm วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556.....	61
ง.4 การคำนวณของการทดลองท่อความร้อนแบบสันงรอบ 15 โค้งเดียว โดยมีความยาวส่วน ควมแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 cm วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556.....	62

สารบัญญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ.....	1
1.2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง	1
1.3 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ.....	2
2.1 โพรานอมิเตอร์วัดรังสีรวม.....	7
2.2 โพรานอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย	7
2.3 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์.....	7
2.4 ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี	8
2.5 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์	9
2.6 ลักษณะของท่อความร้อนธรรมดา	10
2.7 ประเภทของท่อความร้อนแบบสัน	11
2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่นรวมแสง.....	14
3.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ ชนิดท่อความร้อนแบบสันวงรอบ.....	17
3.2 ท่อความร้อนแบบสันวงรอบ.....	19
3.3 ภาพฉายของโครงฐานของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์.....	20
3.4 แผนผังการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ ที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสันวงรอบ.....	23
3.5 โพรานอมิเตอร์.....	24
3.6 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ.....	24
3.7 สายเทอร์โมคัปเปิล.....	24
3.8 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ.....	24
3.9 การวัดข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ.....	25

สารบัญกราฟ

กราฟที่	หน้า
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์กับเวลา.....	30
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา.....	30
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวต่างกัน.....	31
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวต่างกัน.....	33
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์กับเวลาของการทดลอง ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	34
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	35
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยวโดยมีความยาวส่วนควบแน่นในระยะต่างๆ ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556	35
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลา ของการทดลองต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว โดยมีความยาวส่วนควบแน่นในระยะต่างๆ ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556..	36
ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556.....	48
ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556.....	48
ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556.....	49
ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำขาเข้ากับขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	49
ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	50
ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556.....	50

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

		หน่วย
$D_{i,max}$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด	m
σ	คือ แรงดึงผิวของสารทำงาน	N/m
ρ_l	คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน	kg/m^3
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
q_x	คือ ฟลักซ์ความร้อน	W/m^2
k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$\text{W/m}^2\text{-K}$
L	คือ ความยาว	m
ΔT	คือ ผลต่างของอุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
Q	คือ ปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา	W
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$\text{W/m}^2\text{-K}$
A	คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	m^2
Q	คือ ปริมาณความร้อน	W
M_w	คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ	m^3/s
C_{p_w}	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	J/kg-K
ΔT_w	คือ ผลต่างอุณหภูมิของน้ำ	$^{\circ}\text{C}$
I	คือ ค่าความเข้มแสง	W/m^2
η_c	คือ ประสิทธิภาพแผงรับรังสีแสงอาทิตย์	
A_c	คือ พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์	m^2
dQ_{in}	คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ	
dI_t	คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์	%
dQ	คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับ	W
dm	คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำ	%
dT_{wo}	คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของน้ำขาออก	$^{\circ}\text{C}$

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

หน่วย

dT_{wi}	คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิของ น้ำขาเข้า	$^{\circ}C$
η_c	คือ ค่าประสิทธิภาพการทำงาน	%
T_{E-051}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{E-052}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{C-051}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{W-051}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{W-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{W-051}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{W-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{GT-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{GD-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{GT-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{GD-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) 5 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{E-101}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 10 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{E-102}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 10 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$
T_{C-101}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 10 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

		หน่วย
T_{W-101}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 10 โค้งเลี้ยว	$^{\circ}C$

T _{WI-102}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WO-101}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WO-102}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GT-101}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GD-101}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GT-102}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GD-102}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) 10 โค้งเลี้ยว	°C
T _{E-151}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{E-152}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{C-151}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WI-151}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WI-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WO-151}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{WO-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GT-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GD-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) 15 โค้งเลี้ยว	°C
T _{GT-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) 15 โค้งเลี้ยว	°C

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

		หน่วย
T _{GD-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) 15 โค้งเลี้ยว	°C

T_a	คือ อุณหภูมิอากาศโดยรอบ	$^{\circ}\text{C}$
I_t	คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์	W/m^2
m	คือ อัตราการไหลของน้ำ	L/min
T_{E-051}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{E-052}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{C-051}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W1-051}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W1-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W0-051}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W0-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{GT-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{GD-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{GT-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{GD-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) L_c 0.05 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{E-151}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.15 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{E-152}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.15 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

		หน่วย
T_{C-151}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L_c 0.15 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W1-151}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L_c 0.15 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$
T_{W1-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L_c 0.15 m 15 โค้งเดียว	$^{\circ}\text{C}$

T _{WO-151}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{WO-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GT-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GD-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GT-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GD-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) L _c 0.15 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{E-251}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{E-252}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{C-251}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{WI-251}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{WI-252}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{WO-251}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{WO-252}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GT-251}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน) L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GD-251}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง) L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C

สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ (ต่อ)

หน่วย

T _{GT-252}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน) L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C
T _{GD-252}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง) L _c 0.25 m 15 โค้งเลี้ยง	°C

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่สำคัญชนิดหนึ่งและเป็นพลังงานสะอาด การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นทางออกของการแก้ไขปัญหาภาวะวิกฤติด้านพลังงาน เนื่องจากจำนวนประชากรของโลกในปัจจุบัน พลังงานแสงอาทิตย์จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆหลายด้าน เช่น การนำมาให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย ให้แสงสว่าง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยมีแนวคิดนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้น้ำร้อน

การทำน้ำร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์จะต้องมีอุปกรณ์หลักในการเปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานความร้อน คือ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ แบ่งเป็น 3 แบบ คือ

1.1.1 แบบท่อแก้วสุญญากาศ สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 100 ถึง 200 C° ดังแสดงในรูปที่ 1.1



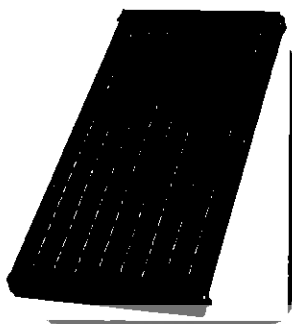
รูปที่ 1.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ [1]

1.1.2 แบบรวมแสง สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงกว่า 300 C° ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบรวมแสง [1]

1.1.3 แบบแผ่นเรียบ สามารถทำน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 40 ถึง 90 C° ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ [1]

พบว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรวมแสงจะทำความร้อนได้สูงที่สุด แต่ต้นทุนอุปกรณ์ค่อนข้างสูงและพื้นที่ติดตั้งมาก ดังนั้นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ จึงถูกนำมาใช้และการทำวิจัยอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อสุญญากาศ สามารถทำความร้อนได้สูง ส่วนตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ยังมีความสามารถในการทำความร้อนต่ำเมื่อเทียบกับทั้ง 3 แบบ

หลอดแก้วสุญญากาศ คือ ตัวดูดซับรังสีในระบบผลิตความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์โดยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ดูดซับมาจะเปลี่ยนเป็นความร้อนเมื่อนำน้ำมาส่งผ่านก็จะกลายเป็นน้ำร้อนหลอดแก้วสุญญากาศ เป็นหลอดแก้วประเภท "Borosilicate Glass" มีความแข็งแรงมาก หลอดแก้วชั้นนอกเป็นแก้วชนิดโปร่งใส โดยรังสีอาทิตย์สามารถผ่านได้แต่จะสะท้อนกลับได้น้อยมาก หลอดแก้วชั้นในจะถูกเคลือบด้วยกรรมวิธีพิเศษที่เรียกว่า "Selective Coating ด้วยสาร Al-N/Al" ซึ่งจะทำให้สามารถดูดซับรังสีอาทิตย์ได้ดี และรังสีจะสะท้อนกลับได้น้อยมาก ส่วนบนของหลอดแก้วทั้ง 2 ชั้น จะถูกหลอมเข้าด้วยกัน และอากาศที่อยู่ระหว่างหลอดแก้วทั้งสอง จะถูกดูดออกไปโดยใช้สูญญากาศที่สุญญากาศ ซึ่งเป็นกรรมวิธีที่เรียกว่า "Evacuation" เพื่อให้เป็นสุญญากาศ

สุญญากาศ คือ ฉนวนกันความร้อนสูญเสียที่ดีที่สุด มีความสำคัญมาก เพราะหลอดแก้วสุญญากาศ ทำหน้าที่ดูดซับรังสีอาทิตย์เปลี่ยนเป็นความร้อน จึงไม่ต้องการให้ความร้อนนั้นสูญเสียไป โดยเฉพาะอุณหภูมิภายในหลอดแก้วชั้นในสูงถึง 200 °C แต่หลอดแก้วชั้นนอก จะเย็นโดยสามารถสัมผัสได้ ซึ่งเป็นวิธีทำความร้อนได้โดยแม้กระทั่งในช่วงหน้าฝน และช่วงหน้าหนาว หากเป็น Solar collector ชนิดแผ่นเรียบจะไม่สามารถป้องกันความร้อนสูญเสียนี้ได้

ท่อความร้อนแบบสั่น ซึ่งเป็นท่อความร้อนที่พัฒนาต่อจากท่อความร้อนธรรมดาและมีสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำท่อความร้อนแบบสั่นมาประยุกต์ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในท่อแก้วสุญญากาศ โดยท่อความร้อนแบบสั่นสร้างขึ้นมาจากท่อคาปิลลารีววนำมาขดไปมาระหว่าง

ส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเกิดเป็นไค้งเลี้ยว ภายในห้องจะดูดอากาศออกแล้วเติมสารทำงานเข้าไป และท่อสารทำงานภายในจะจัดเรียงตัวสลับกันไปมาระหว่างของเหลวและฟองไอ การถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้โดยการไหลเวียนและสั่นในแนวแกนของสารทำงานภายในห้องร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานภายในส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ท่อความร้อนแบบสั่นสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ ท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับจะให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสุด รองลงมาคือท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบและท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิดตามลำดับ แต่เนื่องจากท่อที่ใช้สร้างท่อความร้อนนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กมาก การติดตั้งวาล์วกันกลับจึงเป็นไปได้ยากและค่าใช้จ่ายสูง การใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบจึงแพร่หลายมากกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับและท่อความร้อนแบบสั่นปลายปิด

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับท่อความร้อน [7] พบว่าได้มีการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนอยู่ 2 ชนิด คือท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ซึ่งจากการค้นคว้าข้อมูลพบว่าท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยมีการทดลองที่มีการให้พื้นที่ผิวท่อความร้อนทั้ง 2 ชนิดเท่ากัน แต่เนื่องจากท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบนั้นยังเหลือพื้นที่ในการบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบพอสมควร งานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อศึกษาจำนวนไค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
- เพื่อศึกษาความยาวส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงผลกระทบของจำนวนไค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ
- ทราบถึงผลกระทบของความยาวส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ที่ส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

ตัวแปรควบคุม

- ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้เป็นแบบท่อแก้วสุญญากาศเป็นแบบท่อแก้ว 2 ชั้น ทำมาจาก Borosilicate มีความยาวมีความยาวท่อแก้วสุญญากาศ 1.5 m
- ความยาวส่วนทำระเหย 1.5 m และความยาวส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน 0.05 m
- สารทำความเย็น R-134a เป็นสารทำงาน
- ท่อแก้วทำมุมเอียง 16 องศา จากแนวระดับ
- อัตราการไหลของน้ำร้อน 0.1 L/min
- ชนิดท่อความร้อนคือท่อความร้อนแบบสันวงรอบทำจากทองแดง อัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50 % ของปริมาตรภายในท่อทั้งหมด
- ค่าพลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศ ณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

ตัวแปรต้น

- จำนวนโค้งเลี้ยงของท่อความร้อนแบบสันวงรอบคือ 5 - 15 โค้งเลี้ยง
- ความยาวส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสันวงรอบตั้งแต่ 0.05 – 0.25 m

ตัวแปรตาม

- ประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำร้อน
- อัตราการถ่ายเทความร้อน
- อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อน
- 1.5.3 สร้างเครื่องทำน้ำร้อน
- 1.5.4 ทดลองและบันทึกผล
- 1.5.5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
- 1.5.6 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์
- 1.5.7 นำเสนอผลงาน

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	2555							2556		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	
1. ศึกษาทฤษฎีและบทความที่เกี่ยวข้อง	←			→						
2. ออกแบบเครื่องทำน้ำร้อน				←	→	→				
3. สร้างเครื่องทำน้ำร้อน					←	→	→			
4. ทดลองและบันทึกผล							←	→		
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง								←	→	
6. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									←	→
7. นำเสนอผลงาน									←	→

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดงบประมาณ

ลำดับที่	รายการ	ราคา (บาท)
1	โครงสร้างเครื่องทำน้ำร้อน	1,000
2	ถังน้ำร้อน	1,500
3	จัดทำรูปเล่ม	500
	รวม	3,000

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะกล่าวถึงค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ ส่วนประกอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะของท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (The Solar Constant)

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7 เปอร์เซ็นต์ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1.495×10^{11} m ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (Solar Constant, G_{sc}) คือ ค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ $1,367 \text{ W/m}^2$ หรือ $432 \text{ BTU/Ft}^2\text{-hr}$

2.1.1 รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกบนพื้นโลกสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่

2.1.1.1 รังสีตรง (Direct or Beam Radiation) เป็นรังสีที่ได้จากดวงอาทิตย์โดยตรงมีทิศทางที่แน่นอน สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางรังสี เช่น รวมแสงหรือสะท้อนเพื่อนำไปใช้งาน

2.1.1.2 รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีที่ได้รับหลังจากที่มีการกระจาย หักเห และสะท้อนในชั้นบรรยากาศหรือสิ่งแวดล้อม ทำให้มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ ไม่สามารถรวมแสงหรือสะท้อนได้

2.1.1.3 รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย

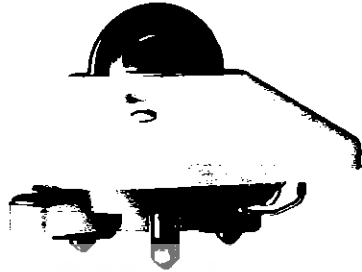
2.1.2 อุปกรณ์วัดรังสีแสงอาทิตย์

เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีรวม คือไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) การวัดรังสีกระจายจะใช้ไพรานอมิเตอร์ โดยมีแหวนเงา (Shading Ring) บังไม่ให้ตัววัดเห็นดวงอาทิตย์และการวัดรังสีตรงจะใช้ไพเฮลิโอมิเตอร์ (Pyheliometer)

อุปกรณ์วัดรังสีอาทิตย์

- ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เป็นเครื่องมือวัดรังสีรวมที่ประกอบด้วยเทอร์โมไพล์ (Thermopile) หลายชุดต่อกัน ตัวรับรังสีบรรจุอยู่ในโดมแก้วครึ่งทรงกลมดังรูปที่ 2.1 ใน การที่จะวัดรังสีกระจายในแนวราบสามารถทำได้โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ชนิดเดียวกับที่ใช้วัดรังสีรวม แต่จะต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้บังรังสีตรงไม่ให้รังสีตรงตกลงบนตัวรับรังสี ดังรูปที่ 2.2 อุปกรณ์บังรังสีตรงที่สำคัญมี 2 ชนิดคือ จานเงา (Shading Disc) และ แหวนเงา (Shading Ring)

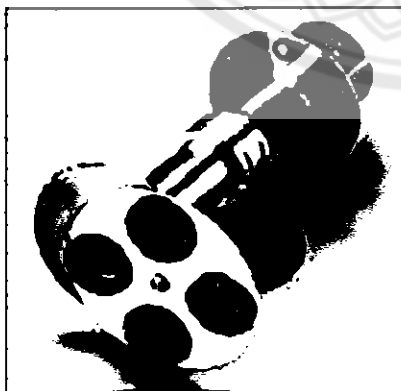
- ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดรังสีตรง มีชุดขับเคลื่อนตามดวงอาทิตย์ เพื่อที่จะให้ผิวรับรังสีตั้งฉากกับลำแสงตลอดเวลา ผิวรับรังสีติดอยู่ส่วนท้ายของท่อที่ให้แสงเข้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.1 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์วัดรังสีรวม [2]



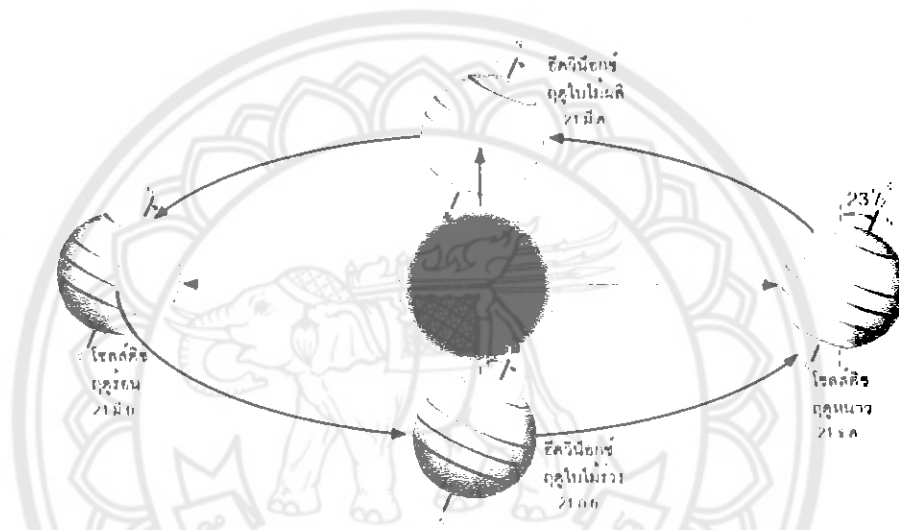
รูปที่ 2.2 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์วัดรังสีกระจาย [2]



รูปที่ 2.3 ไพร์เฮลิโอมิเตอร์ [2]

2.1.3 ตำแหน่งการติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

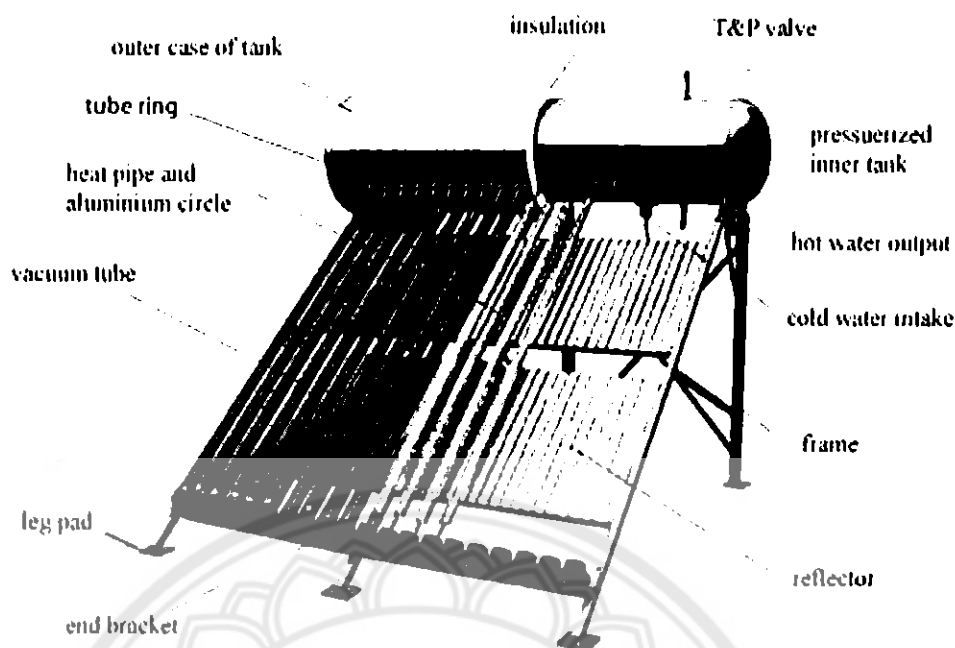
โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะที่แกนเอียงทำมุมกับแนวตั้ง 23.5 องศา ตำแหน่งบนพื้นโลกหันเข้าหาดวงอาทิตย์ตามลักษณะที่แสดงในรูป 2.4 ซึ่งในการติดตั้งแผงรับรังสีแสงอาทิตย์นั้นควรจะต้องติดตั้งตำแหน่งที่มีโอกาสจะได้รับแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน และต้องไม่ถูกร่มเงาของอาคารหรือต้นไม้บังแสง และควรทำมุมเอียงเพื่อตั้งฉากกับรังสีแสงอาทิตย์ และควรติดตั้งไว้ทางทิศใต้เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางซีกโลกเหนือ ซึ่งด้านทิศใต้จะได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน และจังหวัดพิษณุโลกตั้งอยู่ที่พิกัดละติจูดที่ 16.78 องศา 44 ลิปดาเหนือ ลองจิจูดที่ 100 องศา 16.4 ลิปดาตะวันออก ดังนั้นการวางตัวของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ควรทำมุม 16.78 องศา กับแนวระดับจึงจะสามารถรับแสงอาทิตย์ได้ดีที่สุด



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบ 1 ปี [3]

2.2 ส่วนประกอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เครื่องทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ เป็นการนำพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน โดยใช้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar Collector) เป็นตัวแปลงและเก็บพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำทำให้น้ำที่มีอุณหภูมิต่ำเป็นน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 40-70 °C ซึ่งเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ และถังเก็บน้ำร้อน ดังรูปที่ 2.5

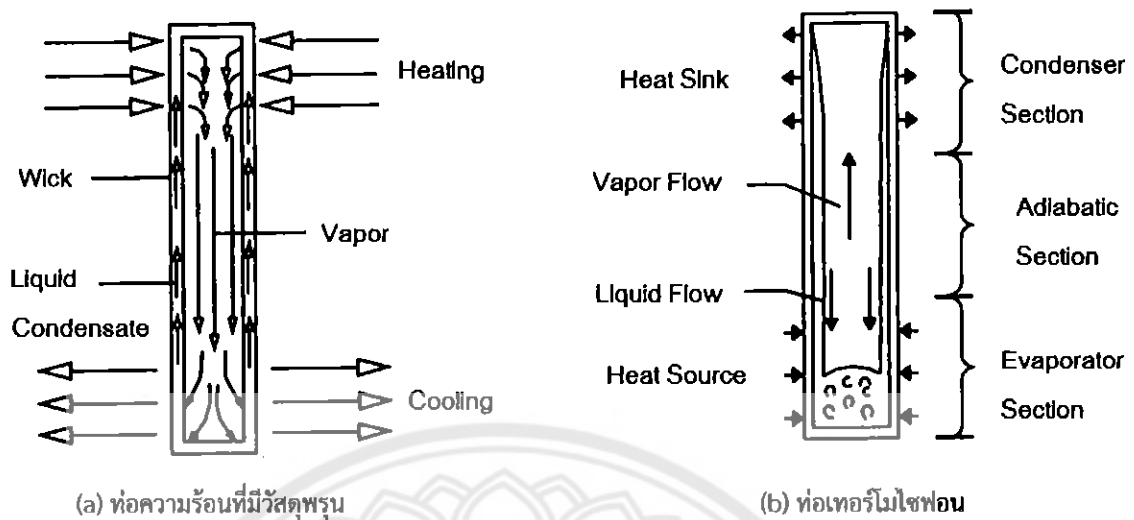


รูปที่ 2.5 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [4]

- ตัวดูดซับความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องทำน้ำร้อนถูกดูดซับไว้ ซึ่งวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมีความจำเป็นมากในการทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากหากปราศจากตัวดูดซับจะทำให้ระบบการทำความร้อนไม่สามารถผลิตความร้อนมาให้เพียงพอต่อการทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้
- ฉนวนกันความร้อน เป็นสิ่งป้องกันความร้อนรั่วไหล เนื่องจากฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ความร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อนรั่วไหลออกมาภายนอก ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าจึงถือว่าฉนวนกันความร้อนเป็นอุปกรณ์สำคัญในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ทุกๆ แบบ
- ท่อทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปยังถังเก็บหรืออุปกรณ์ที่ต้องการใช้ความร้อนจากน้ำร้อน
- ถังเก็บน้ำร้อน (Storage Tank) เป็นถังแบบปิดนิยมทำด้วยสแตนเลสอย่างดีที่สุดที่ไม่เป็นสนิม ฉนวนหุ้มป้องกันการสูญเสียความร้อน

2.3 ลักษณะของท่อความร้อนและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

ท่อความร้อน (Heat pipe) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปิดสองสถานะที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งทำจากท่อโลหะภายในท่อจะประกอบด้วยวัสดุพรุนและสารทำงานดังที่แสดงในรูปที่ 2.6(a) โดยทั่วไปท่อความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือส่วนที่ระเหยส่วนควบแน่นและส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน หลักการทำงานของท่อความร้อนคือเมื่อมีการให้ความร้อนที่ส่วนที่ระเหยสารทำงานที่เป็นของเหลวจะกลายเป็นไอทำให้ไหลไปยังส่วนควบแน่นและเมื่อไอที่ส่วนควบแน่นมีการถ่ายเทความร้อนออกจะกลับคืนสถานะเป็นของเหลวไหลไปยังส่วนที่ระเหย โดยอาศัยแรงคาพิลลารีผ่านวัสดุพรุนหรือแรงโน้มถ่วงของโลก และจะทำงานเป็นวัฏจักร



(a) ท่อความร้อนที่มีวัสดุพรุน

(b) ท่อเทอร์โมไซฟอน

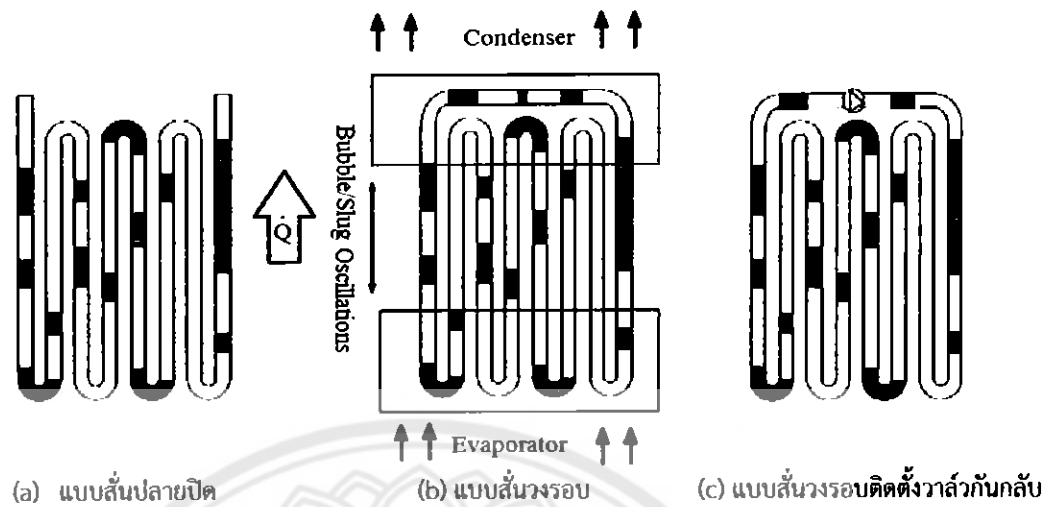
รูปที่ 2.6 ลักษณะของท่อความร้อนธรรมดา [5]

2.3.1 ท่อความร้อนธรรมดา

ท่อความร้อนธรรมดาถูกสร้างขึ้นโดย Gaugler ในช่วงประมาณ ปี ค.ศ. 1942 เป็นท่อปลายปิดที่มีสารทำงานปริมาณหนึ่งบรรจุไว้ภายในดังรูปที่ 2.6 (a) โดยที่ของเหลวจะรับความร้อนและกลายเป็นไอในส่วนบนของท่อหลังจากนั้นไอจะเคลื่อนที่มายังด้านบนส่วนควบแน่นและคายความร้อนออกมาเพื่อเปลี่ยนเป็นของเหลวแล้วอาศัยแรงคาปิลลารีที่เกิดจากโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick structure) ภายในท่อเพื่อดึงของเหลวนี้กลับขึ้นไปด้านบนไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนอีกครั้งหนึ่ง หากแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ต่ำกว่าแหล่งระบายความร้อนดังรูปที่ 2.6 (b) ท่อความร้อนก็ไม่จำเป็นต้องใช้โครงสร้างวัสดุพรุน เนื่องจากอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกดึงสารทำงานเหลวกลับลงมายังแหล่งกำเนิดความร้อนแทนซึ่งเรียกท่อความร้อนธรรมดานี้ว่า เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ซึ่งท่อความร้อนนี้ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามจากการพัฒนาทางเทคโนโลยีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ นั้น มีขนาดเล็กลงและมีความร้อนที่ต้องระบายออกสูงขึ้นดังนั้นท่อความร้อนที่นำมาใช้กับงานนี้จึงต้องมีขนาดเล็กลงแต่ต้องสามารถดึงความร้อนออกจากแผงวงจรได้มากขึ้น การลดขนาดท่อความร้อนลงอย่างมากจนถึงระดับไมโครเมตรหรือคาปิลลารี (Capillary tube) มีผลทำให้เกิดขีดจำกัดการส่งผ่านความร้อนขึ้นนั่นคือขีดจำกัดคาปิลลารีซึ่งเกิดจากโครงสร้างวัสดุพรุน (Wick structure) จึงไม่สามารถนำของเหลวย้อนกลับมายังส่วนทำระเหยได้อย่างเพียงพอ

2.3.2 ท่อความร้อนแบบสั่น

ท่อความร้อนแบบสั่นได้ถูกสร้างขึ้นจากท่อคาปิลลารีเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเล็กมากและไม่มีโครงสร้างวัสดุพรุนภายในท่อ ซึ่งท่อถูกตัดไปมาให้เป็นโค้งเลี้ยวเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งระบายความร้อนเนื่องจากผลของความตึงผิวทำให้สารทำงานปริมาณหนึ่งที่บรรจุอยู่ภายในท่อเรียงตัวอยู่ในรูปแท่งของเหลว (Liquid slug) และฟองไอ (Vapor bubble) สลับกันไปตลอดความยาวทั้งหมดของท่อการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นของสารทำงานที่เกิดขึ้นด้วยการกระตุ้นการสั่นด้วยตัวมันเอง (Self-excite oscillation) โดยทั่วไปสามารถแบ่งท่อความร้อนแบบสั่นได้ 3 ประเภทตามลักษณะโครงสร้างท่อดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั้น [6]

โดยรูปที่ 2.7 (a) แสดงท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe, CEOHP) ซึ่งปลายท่อทั้งสองถูกปิดและแยกออกจากกันรูปที่ 2.7 (b) แสดงท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ ที่เชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน (Closed-loop oscillating heat pipe, CLOHP) รูปที่ 2.7 (c) แสดงท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับซึ่งจะเชื่อมปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกัน และภายในมีวาล์วกันกลับ (Closed-loop oscillating heat pipe with check valve, CLOHP/CV) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการไหลของสารทำงานเมื่อมีการให้ความร้อนที่แหล่งกำเนิด ความร้อนความร้อนจะไปสร้างฟองไอเพิ่มขึ้นทำให้แรงของเหลวถูกผลักไปยังส่วนควบแน่นทำให้สารทำงานเกิดการไหลขึ้นและที่แหล่งระบายความร้อนความร้อนจะถูกถ่ายเทออกไปทำให้ฟองไอจะยุบตัวลงหรือกลายเป็นของเหลวไปรวมกับแรงของเหลวที่อยู่ติดกันทำให้เกิดแรงไหลย้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนและเมื่อการไหลของทั้งสองแหล่งไหลชนกันทำให้เกิดการสั่นขึ้นตามแนวแกน การไหลของท่อซึ่งปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อนนี้จึงมีความซับซ้อนมาก ถึงแม้ว่าท่อความร้อนแบบสั้นที่มีวาล์วกันกลับจะทำให้สารทำงานไหลเวียนได้ง่ายในทิศทางที่กำหนดแต่มีความยุ่งยากในการสร้างและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดกับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบซึ่งสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบจะมีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิดอย่างเห็นได้ชัดจึงมีความสนใจในการนำท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

ท่อความร้อนแบบสั้นจะสามารถทำงานได้โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของก้อนของเหลวและฟองไอกภายในท่อซึ่งจะเกิดขึ้นได้นั้นสารทำงานจะต้องมีการจัดตัวอยู่ในรูปฟองไอและก้อนของเหลวสลับกันไปและการที่สารทำงานจะสามารถจัดตัวให้อยู่ในรูปก้อนของเหลวและฟองไอนั้นจะต้องพิจารณาถึงแรงตึงผิวและความหนาแน่นของสารทำงานที่อุณหภูมิทำงานเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั้นได้ดังสมการที่ 1

$$D_{i,max} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_i g}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

- โดยที่ $D_{i,max}$ คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในสูงสุด, m
 σ คือ แรงตึงผิวของสารทำงาน, N/m
 ρ_i คือ ความหนาแน่นของสารทำงาน, kg/m³
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s²

2.4 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การนำความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่โมเลกุลของตัวกลางมีการสัมผัสกันโดยตรงปริมาณของความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนนั้นมีค่าแปรผันกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตามระยะทาง ดังสมการที่ 2

$$q_x = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

- โดยที่ q_x คือ ฟลักซ์ความร้อน, W/m²
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, W/m²-K
 L คือ ความยาว, m
 ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ

กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนเป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่โมเลกุลตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วยตัวอย่างเช่นการเคลื่อนที่ของลมที่ผ่านหน้าขดลวดความร้อนซึ่งลมดังกล่าวก็จะมีอุณหภูมิสูงตามไปด้วยการพาความร้อนสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบดังนี้

- การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) กลไกการเกิดการถ่ายโอนความร้อนมักเกิดเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นในระบบตัวอย่างเช่นถ้าในบ้านมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอกเมื่อเปิดหน้าต่างลมจากภายนอกจะพัดเข้ามาแล้วพาความร้อนในบ้านออกไปทำให้ภายในบ้านมีอุณหภูมิลดลงเป็นต้นซึ่งการถ่ายเทความร้อนในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Force convection) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่พร้อมๆกับทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนซึ่งจะต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วยตัวอย่างเช่นการใช้พัดลมระบายความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับนี้จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ซึ่งสมการมีดังต่อไปนี้

$$Q = hA\Delta T \dots\dots\dots (2.3)$$

- โดยที่ Q คือปริมาณความร้อนที่เกิดการถ่ายโอนเนื่องจากการพา, W
- h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m²-K
- A คือพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, m²
- ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิ

2.5 สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

เมื่อสารได้รับความร้อนอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น และถ้าได้รับปริมาณความร้อนมากพอจะมีผลทำให้สารเกิดการเปลี่ยนสถานะ (Phase) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความจุความร้อนของสารแต่ละชนิดซึ่งไม่เท่ากัน ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) เป็นปริมาณของพลังงานความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิที่ให้กับสารใดๆ เพิ่ม 1 °C ต่อหน่วยมวล ถ้าปริมาณความร้อน Q หน่วย ถูกถ่ายเทมวล m กับสิ่งแวดล้อมแล้วทำให้ อุณหภูมิเปลี่ยนไป ΔT

สมการคำนวณปริมาณความร้อนที่ส่งผ่านไปยังน้ำ

$$Q = M_w C_{p_w} \Delta T_w \dots\dots\dots (2.4)$$

- โดยที่ Q คือปริมาณความร้อน, W
- M_w คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, m³/s
- C_{p_w} คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, J/kg-K
- ΔT_w คือผลต่างอุณหภูมิของน้ำ

ประสิทธิภาพของแผงรับรังสี (Collector Efficiencies) ประสิทธิภาพของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์จะเป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งสามารถแสดงได้จากอัตราส่วนความร้อนที่อยู่ภายในถึงน้ำต่อค่าการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่ได้จากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ในช่วงเวลาเดียวกันดังสมการที่ 5

$$\eta_c = Q / (A I) \dots\dots\dots (2.5)$$

- โดยที่ Q คือปริมาณความร้อน, W
- A_c คือพื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์, m²
- I คือค่าความเข้มแสง, W/m²
- η_c คือประสิทธิภาพแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

2.6 ทฤษฎีแผ่รังสีความร้อน

ทฤษฎีรวมแสงเข้าท่อของ ทรอเมเบ - มิเนล

ทรอเมเบ คิดค้นแผ่รังสีแสงแบบนี้ขึ้นมาในปี 1975 จากนั้น มิเนล ได้มีการพัฒนาขึ้นอีกครั้งหนึ่งในปี 1982 ลักษณะการรวมแสงของแผ่รังสีแสงแบบ 180° ส่วนประกอบของลักษณะการรวมแสงของแผ่รังสีแสงแบบรวมแสงนี้มีลักษณะคล้ายของแผ่รังสีแสงแบบแผ่นราบ โดยฟลักซ์ของแสงอาทิตย์จะตกกระทบบนที่จุดศูนย์กลางของท่อเท่านั้น ความร้อนจะถ่ายเทไปยังของเหลวที่อยู่ในท่อ การรับแสงมีลักษณะคล้ายกับแผ่รังสีแสงแบบแผ่นราบดังนี้

- ต้องการให้แสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผ่รวมแสง สะท้อนเข้าสู่เข้าท่อดูดกลืนแสงทั้งหมด ไม่ว่าจะดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดก็ตาม

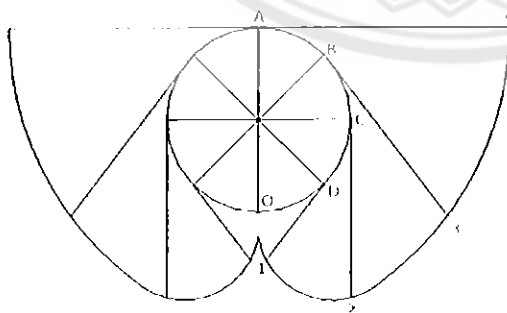
- จุดต่างๆบนท่อดูดกลืนซึ่งทำมุม 2π สามารถรับการแผ่รังสีกระจายจากท้องฟ้าได้ การออกแบบขั้นต้นนิยมใช้มุม 180° ซึ่งถือเป็นมุมที่น้อยที่สุดที่ทำให้ท่อดูดกลืนแสงได้รับแสงตกกระทบบนทุกจุด หรือระยะจุดรวมแสงของแผ่รวมแสงควรมีค่าไม่ต่ำกว่า πD ของท่อดูดกลืน จากรูป 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่รวมแสง สามารถอธิบายได้โดย

ระยะ AO วัดจากเส้นรอบครึ่งวงกลมท่อวัดจากจุดบนสุด จะเท่ากับระยะ A4 เป็นขอบบนสุดของตัวโค้งแผ่รวมแสง

ระยะ BO วัดจากเส้นรอบครึ่งวงกลมท่อที่ระยะ $1/4$ ของท่อด้านบนสุดกับระยะ B3 ของเส้นโค้งแผ่รวมแสง

ระยะ CO วัดจากเส้นรอบครึ่งวงกลมท่อที่ระยะ $1/2$ ของท่อด้านบนสุดกับระยะ C2 ของเส้นโค้งแผ่รวมแสง

ระยะ DO วัดจากเส้นรอบครึ่งวงกลมท่อที่ระยะ $3/4$ ของท่อด้านบนสุดกับระยะ D1 ของเส้นโค้งแผ่รวมแสง



เส้นรอบวง AO = ระยะ A4

เส้นรอบวง BO = ระยะ B3

เส้นรอบวง CO = ระยะ C2

เส้นรอบวง DO = ระยะ D1

รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อดูดกลืนแสงกับความโค้งของแผ่รวมแสง [7]

2.7 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดจากการทดลอง

การหาค่าความผิดพลาดของค่าความร้อนแฝงรับรังสีแสงอาทิตย์ โดยที่ $Q_{in} = I_c A_c$ หาได้จาก

$$dQ_{in} = (I_c A_c dI_c) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

โดยที่ dQ_{in} คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ

dI_c คือ ค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ($\pm 2\%$)

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์

การหาค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยที่ $Q_{out} = \dot{m}C_p\Delta T$ หาได้จาก

$$dQ = \sqrt{\{(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 + (c_p\dot{m}_c dT_{wo})^2 + (-c_p\dot{m}_c dT_{wi})^2\}} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

โดยที่ dQ คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับ (W)

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

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

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

การหาค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยที่ $\eta_c = \dot{m}C_p\Delta T / I_c A_c$ หาได้จาก

$$d\eta = \sqrt{\left[\frac{dQ^2}{\{(A_c \partial I_c / \partial I_c) dI_c\}^2}\right]} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

โดยที่ η_c คือ ค่าประสิทธิภาพการทำงาน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากปฏิญานิพนธ์ของ กิตติภพ ย่างกุลไพโรจน์ และคณะ (2554) [7] ได้ทำการศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสันนวงรอบ ซึ่งทำการทดลองโดยให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีท่อความร้อนบรรจุอยู่ใน และกำหนดให้ท่อความร้อนของทั้ง 2 ชนิดมีพื้นที่ผิวเท่ากัน จากการทดลองพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อเทอร์โมไซฟอนให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนแบบสันนวงรอบ แต่เนื่องจากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนแบบสันนวงรอบยังเหลือพื้นที่ในการบรรจุท่อเพิ่ม ทำให้งานวิจัยนี้คิดที่จะเพิ่มพื้นที่สัมผัสของท่อความร้อนแบบสันนวงรอบและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบต่อไป

งานวิจัยของ Gi K., et al. (1999) [8] ได้ทำการศึกษาที่ความร้อนแบบสั้น 2 แบบคือแบบปลายปิดและแบบวงรอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของท่อความร้อนแบบสั้นโดยท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 4 mm และ 2 mm ตามลำดับโดยใช้สารทำงาน R-142b ความยาวส่วนทำระเหยส่วนควบแน่นและส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนมีความยาวเท่ากับ 15 cm , 15 cm และ 10 cm ตามลำดับในระหว่างการทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นนี้จะทำงานที่อุณหภูมิส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกือบคงที่อยู่ที่ 35 °C หรือ 45 °C จากการทดลองพบว่าท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ ค่าสมรรถนะทางความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลและความรุนแรงของการสั่นของสารทำงานอัตราส่วนการเติมที่ 50 % ถึง 60 % ทำให้เกิดความเร็วของการไหลสูงสุดและความเร็วจะเพิ่มขึ้นที่ละน้อยตามมุมเอียงจนกระทั่งอยู่ในแนวตั้งค่าสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด จะอยู่ที่มุมเอียงใกล้เคียงกับแนวตั้งซึ่งจะสร้างการสั่นที่รุนแรงโดยความยาวของไอและของเหลวสั้นสำหรับท่อความร้อนแบบปลายปิดสารทำงานไม่สามารถไหลได้แต่ความร้อนจะถูกส่งผ่านโดยการสั่นของสารทำงานระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่นการสั่นภายในแบบปลายปิดนั้นเกิดขึ้นง่ายที่มุมเอียงน้อยจากแนวระนาบและอัตราส่วนการเติมสารทำงานน้อยถึงปานกลางเมื่อเปรียบเทียบทั้งสองแบบซึ่งทำให้เห็นว่าท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบจะมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่าแบบปลายปิดเนื่องจากแบบวงรอบนั้นมีการไหลของสารทำงานซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนด้วย

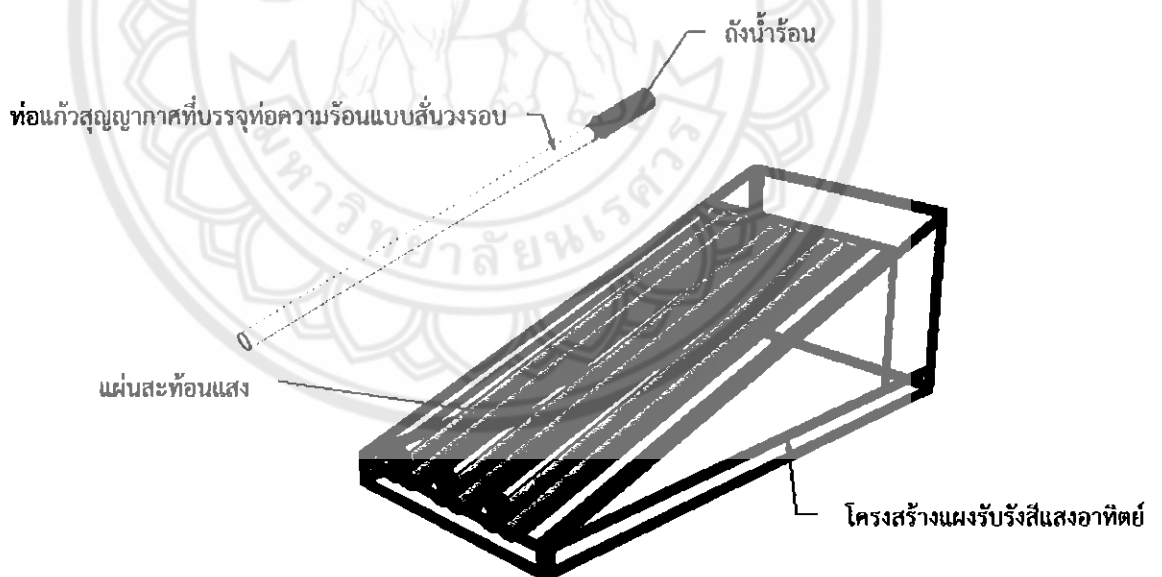


บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 ลักษณะและการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยมีอุปกรณ์ต่างๆ คือ ถังน้ำร้อน ท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบเส้นวงรอบ แผ่นสะท้อนแสง และโครงสร้างฐานแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ เมื่อแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบ และสะท้อนจากแผ่นสะท้อนแสงผ่านท่อแก้วสุญญากาศ ผ่านเข้าสู่พื้นผิวดูดซับแสงอาทิตย์ จากนั้นความร้อนจะถูกส่งผ่านสู่ท่อความร้อนในส่วนทำระเหย และส่งความร้อนไปสู่ส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนสู่น้ำที่ไหลผ่านในถังน้ำร้อน ทำให้สารทำงานภายในท่อความร้อนมีอุณหภูมิลดลงและเกิดการควบแน่น และไหลกลับไปยังส่วนทำระเหยเพื่อไปรับความร้อนอีกครั้งเป็นวัฏจักร



รูปที่ 3.1 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนแบบเส้นวงรอบ

3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการศึกษา

ในการทดสอบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรควบคุม ดังตารางที่ 3.1 และตัวแปรที่ต้องการศึกษา ดังตารางที่ 3.2 และทำการวิเคราะห์หาผลของตัวแปรเหล่านี้ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรควบคุม

ตัวแปรที่ควบคุม	ขนาด
1. ท่อแก้วสุญญากาศ	
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	0.058 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	0.047 m
- ความยาว	1.5 m
2. ท่อทองแดงที่ใช้ทำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ	
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก	0.0024 m
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน	0.0016 m
3. อัตราส่วนการเติมสารทำงาน R-134a	50%
4. ความยาวส่วนทำระเหย	1.5 m
5. ความยาวส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน	0.055 m
6. อัตราการไหล	0.1 L/min
7. ค่าความเข้มแสงบริเวณอาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก	ณ เวลาทำการทดลอง (W/m ²)

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ตัวแปรที่ต้องการศึกษา	ขนาด
ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมี	
- จำนวนโค้งเลี้ยว (n)	5, 10 และ 15 โค้งเลี้ยว
- ความยาวส่วนควบแน่น (L _c)	0.05, 0.15 และ 0.25 m

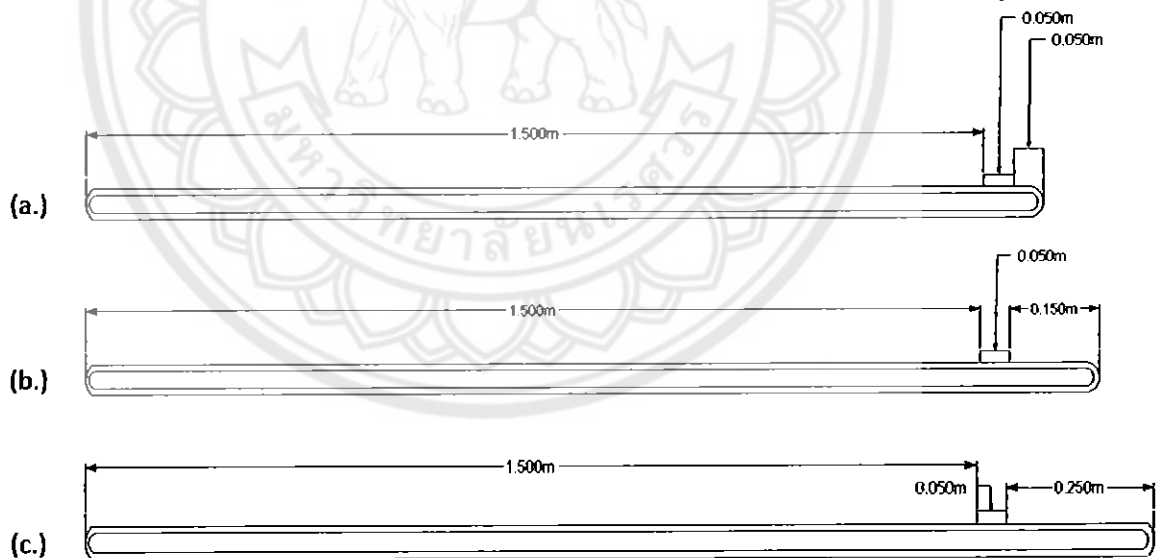
3.3 การตั้งสมมติฐาน

- 3.3.1 สมบัติของสารทำงานและวัสดุมีค่าคงที่
- 3.3.2 ขณะทำการทดลองมีแสงอาทิตย์ตกกระทบแผงรับแสงอาทิตย์สม่ำเสมอ
- 3.3.3 ไม่มีการสูญเสียความร้อนจากส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน
- 3.3.4 การติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแผงรับรังสีแสงอาทิตย์วางมุม 16 องศา กับแนวระนาบโดยให้ด้านหน้าของแผงรับแสงอาทิตย์หันไปทางทิศใต้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่อยู่ทางซีกโลกเหนือทำให้แสงแดดจะส่องโดนหลังคาทางทิศใต้ตลอดทั้งปี

3.4 การออกแบบ

3.4.1 ออกแบบท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

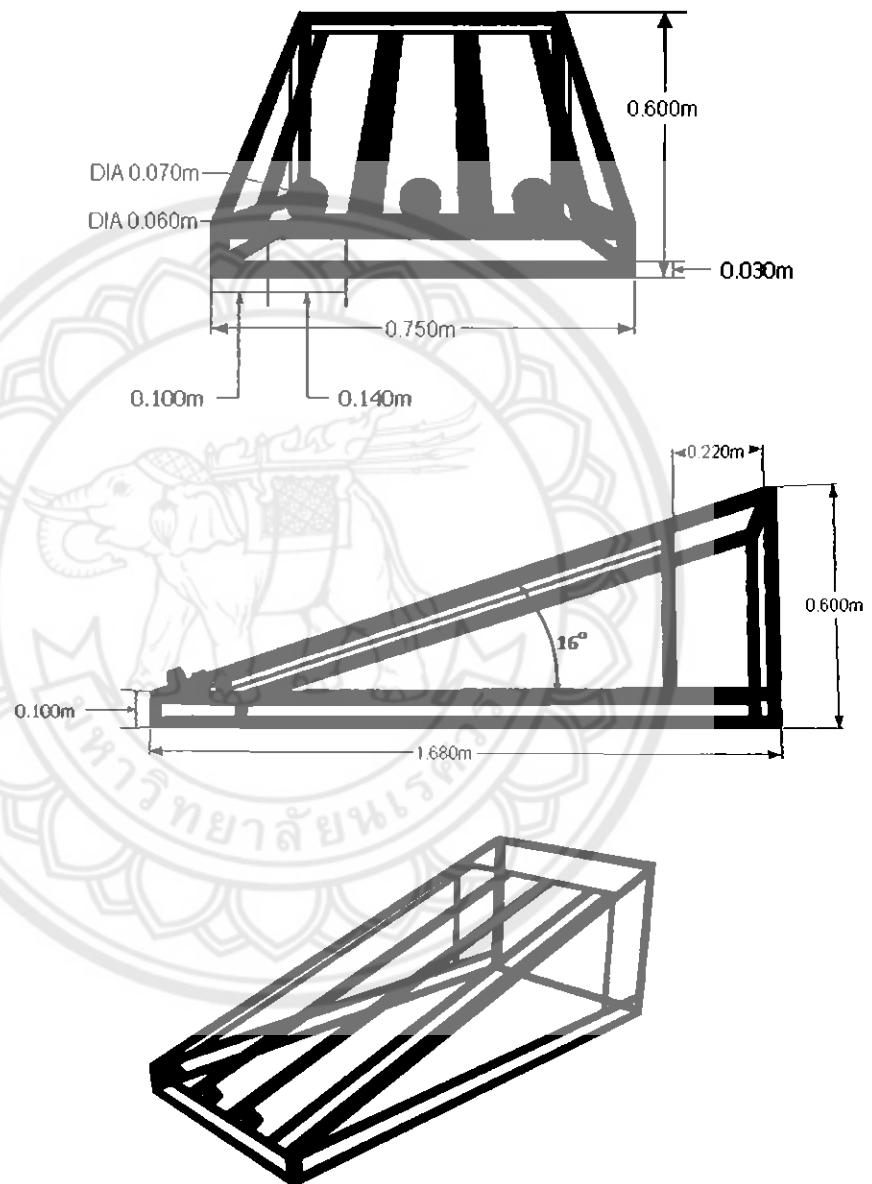
ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบทำจากท่อทองแดงขนาดคาบิลลารี ทนการกัดกร่อนไม่เป็นสนิมและระบายความร้อนได้ดี ในการออกแบบท่อ ใช้ท่อทองแดง 1 เส้นซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0016 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0024 m จากนั้นนำมาขุดไปมาจนได้จำนวนโค้งเหลี่ยมที่ต้องการ ซึ่งมีสวนควบแน่นแตกต่างกัน ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ (a.) ความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m (b.) ความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m (c.) ความยาวส่วนควบแน่น 0.25 m

3.4.2 การออกแบบโครงสร้างของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

การออกแบบโครงสร้างของแผงรับรังสีทำมุมเอียง 16 องศา กับแนวระดับ เพื่อให้สัมพันธ์กับมุมการรับแสงอาทิตย์ของจังหวัดพิษณุโลก กำหนดให้มีขนาดความกว้าง 0.75 m ยาว 1.68 m สูง 0.6 m เพื่อรองรับกับแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และถังน้ำร้อน ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพฉายของโครงสร้างของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

3.4.3 การออกแบบแผ่นสะท้อน แผ่นสะท้อนแสงออกแบบตามทฤษฎีทอม - มิเนล

3.4.4 การออกแบบถังน้ำร้อนชุดทดลองจำนวนโค้งเดี่ยว ถังน้ำร้อนมีขนาดความจุ 0.36 L มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.043 m ความยาว 0.25 m

3.4.5 การออกแบบถังน้ำร้อนชุดทดลองความยาวส่วนควบแน่น ถังน้ำร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.043 m มีความจุ 0.36 L, 0.22 L และ 0.07 L ความยาว 0.25 m, 0.15 m และ 0.05 m ตามลำดับ

3.5 การสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ขั้นตอนในการสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.5.1 การสร้างท่อแก้วสุญญากาศจำนวน 3 ท่อที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบบรรจุไว้ภายในโดยมีจำนวนโค้งเดี่ยว 5, 10 และ 15

3.5.1.1 เลือกท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0024 m สำหรับทำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.5.1.2 ทำการขุดท่อทองแดงจำนวน 5, 10 และ 15 โค้งเดี่ยว โดยมีความยาวรวมของส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน และส่วนควบแน่น 1.8 m

3.5.1.3 ทำการเชื่อมท่อทองแดงเข้าเป็นวงรอบและต่อปลายท่อออกมาเพื่อใช้ในการเติมสารทำความเย็น R-134a

3.5.1.4 ทำให้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบเป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำงาน R-134a เข้าไปในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยการนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมาลดอุณหภูมิด้วยน้ำแข็งเพื่อให้ความดันลดแล้วทำการเติมสารทำงาน R-134a โดยเติมสารทำงานจำนวน 27 g, 55 g และ 83 g ลงในท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเดี่ยว ตามลำดับ

3.5.1.5 นำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทั้ง 3 โค้งเดี่ยวประกอบเข้าไปในท่อแก้วสุญญากาศและปิดช่องว่างด้วยซิลิโคน

3.5.3.1 นำท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบบรรจุอยู่ภายในยึดกับถังน้ำร้อนในส่วนควบแน่น ซึ่งถังน้ำมีขนาดความยาว 0.25 m

3.5.2 การสร้างท่อแก้วสุญญากาศจำนวน 3 ท่อที่มีท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบบรรจุไว้ภายในโดยมีความยาวส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m

3.5.2.1 เลือกท่อทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0024 m สำหรับทำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

3.5.2.2 ทำการขุดท่อทองแดงจำนวน 15 โค้งเดี่ยว โดยมีความยาวรวมส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อน และส่วนควบแน่น 1.6, 1.7 และ 1.8 m

3.5.2.3 ทำการเชื่อมต่อทองแดงเข้าเป็นวงรอบและต่อปลายท่อออกมาเพื่อใช้ในการเติมสารทำความเย็น R-134a

3.5.2.4 ทำให้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบเป็นสุญญากาศแล้วเติมสารทำงาน R-134a เข้าไปในท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ โดยการนำท่อความร้อนแบบส่นวงรอบมาลดอุณหภูมิด้วยน้ำแข็งเพื่อให้ความดันลดแล้วทำการเติมสารทำงาน R-134a โดยเติมสารทำงานจำนวน 74 g, 78 g และ 83 g ลงในท่อความร้อนแบบส่นวงรอบที่มีความยาว 1.6, 1.7 และ 1.8 m ตามลำดับ

3.5.2.5 นำท่อความร้อนแบบส่นวงรอบในระยะทั้ง 3 ประกอบเข้าไปในท่อแก้วสุญญากาศและปิดช่องว่างด้วยซิลิโคน

3.5.2.6 นำท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบส่นวงรอบบรรจุอยู่ภายในยึดกับถังน้ำร้อนในส่วนควบแน่น ซึ่งถังน้ำร้อนมีความยาว 0.05, 0.15 และ 0.25 m

3.5.3 สร้างแผ่นสะท้อนแสงอาทิตย์

3.5.3.1 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมขนาดกว้าง 0.3 m ยาว 1.5 m

3.5.3.2 ตัดแผ่นอะลูมิเนียมให้โค้งตามรูปทรงของท่อแก้วสุญญากาศ

3.5.3.3 ติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมบริเวณด้านล่างท่อแก้วสุญญากาศ

3.5.4 การสร้างถังน้ำร้อน

3.5.4.1 นำท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.048 m พร้อมฝาครอบทั้งสองด้านโดยมีความยาว 0.05, 0.15 และ 0.25 m จากนั้นเจาะรูด้านหนึ่งเพื่อใส่ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ และปิดช่องว่างด้วยซิลิโคน

3.5.4.2 เจาะรูด้านข้างของถังน้ำเป็นช่องสำหรับน้ำไหลเข้าและไหลออก

3.5.5 การสร้างโครงฐานของตัวแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

3.5.5.1 เลือกท่อพีวีซีขนาด 0.0254 m เพื่อสร้างโครงฐานของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์และทำการเชื่อมต่อท่อพีวีซีเป็นโครงฐานสำหรับแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และถังน้ำร้อน

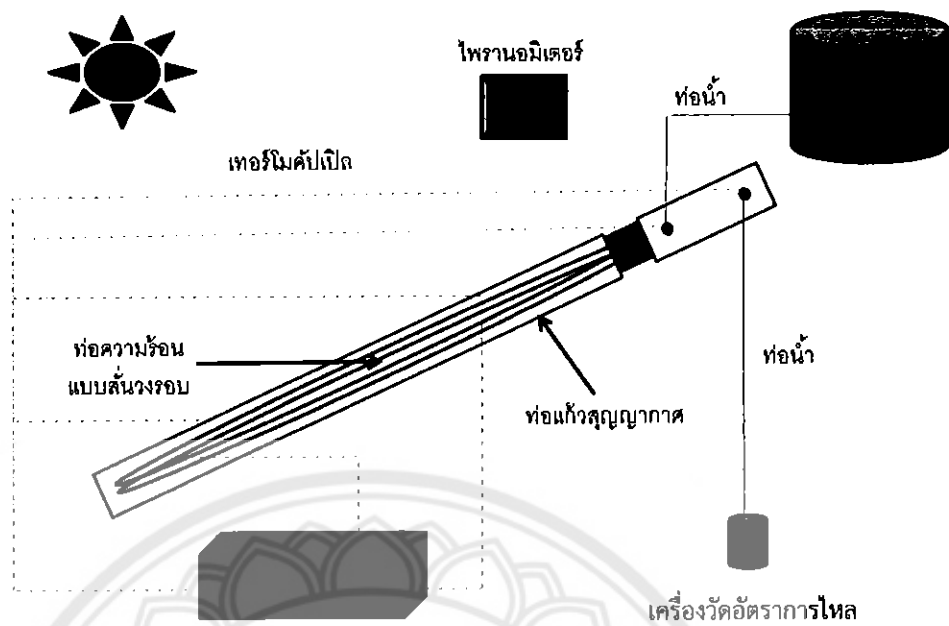
3.5.6 การประกอบเครื่องทำน้ำร้อน

3.5.6.1 ยึดแผ่นอะลูมิเนียมติดกับโครงฐานให้แน่น

3.5.6.2 นำท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบส่นวงรอบบรรจุอยู่มาติดตั้งโดยให้ส่วนทำระเหยอยู่เหนือแผ่นอะลูมิเนียม จากนั้นยึดท่อแก้วสุญญากาศที่มีท่อความร้อนแบบส่นวงรอบบรรจุอยู่ติดกับโครงฐานให้แน่น

3.5.6.3 ทำการหุ้มฉนวนในส่วนที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนด้วยซิลิโคน

3.5.6.4 ทำการหุ้มฉนวนถังน้ำร้อนโดยใช้ฉนวนใยแก้วและฟอยล์อะลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 แผนผังการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ

3.6 การดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง คือเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ สายเทอร์โมคัปเปิล เครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ บีกเกอร์ และถังน้ำ ซึ่งมีแผนผังการทดลองดังรูปที่ 3.4 โดยทำการวัดอุณหภูมิของ ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น ผิวท่อแก้วสุญญากาศชั้นนอก ทางน้ำเข้าและออก อุณหภูมิสภาพแวดล้อมโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) Type K ในการวัดและใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ในการแปลงผลอุณหภูมิจากสายเทอร์โมคัปเปิลและบันทึกข้อมูลและทำการวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์โดยใช้ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ซึ่งติดกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และวัดอัตราการไหลของน้ำด้วยบีกเกอร์ (Beaker) เทียบกับการจับเวลาการไหลของน้ำ เพื่อให้มีอัตราการไหล 0.1 L/min

3.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.6.1.1 ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ดังรูป 3.5 ใช้สำหรับวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Kipp & Zonen รุ่น SP Lite 2 สามารถวัดค่าความเข้มแสงได้ตั้งแต่ $0 - 2000 \text{ W/m}^2$ โดยมีความคลาดเคลื่อน 2%

3.6.1.2 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger) ดังรูป 3.6 ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34907 ใช้ในการบันทึกอุณหภูมิ ความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.004% ถึง 0.006%

3.6.1.3 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ดังรูป 3.7 ยี่ห้อ Omega ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิด K สามารถวัดอุณหภูมิในช่วง -200 ถึง $1350^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$

3.6.1.4 นาฬิกาจับเวลา (Stopwatch)

3.6.1.5 ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 1 L

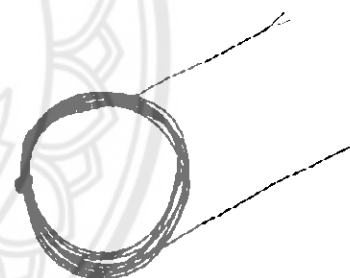
3.6.1.6 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย ท่อแก้วสุญญากาศ จำนวน 3 ท่อ ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.5 ไทแรนอมิเตอร์ [10]



รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ [11]



รูปที่ 3.7 สายเทอร์โมคัปเปิล [12]



(a.)

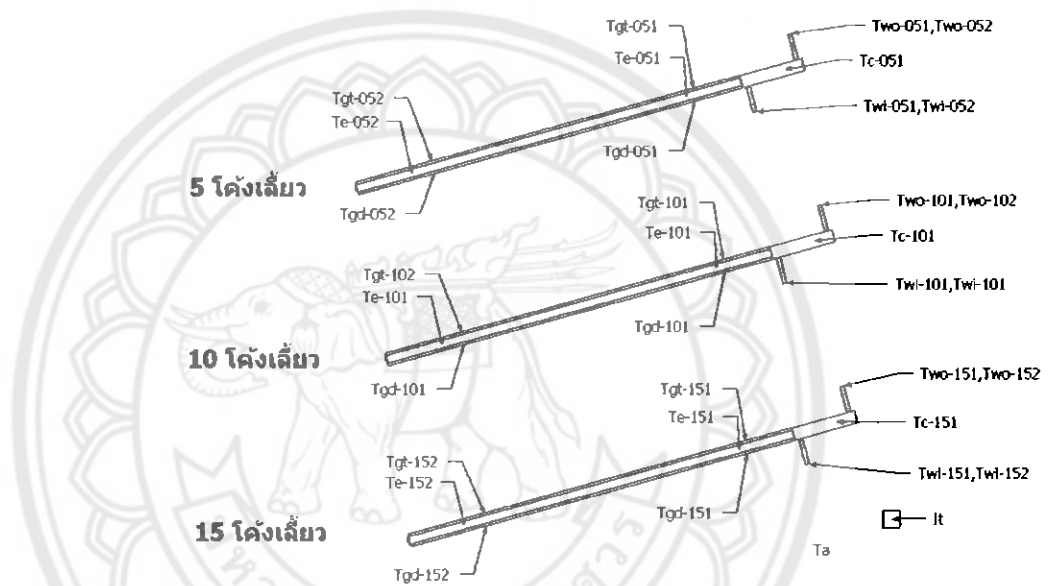


(b.)

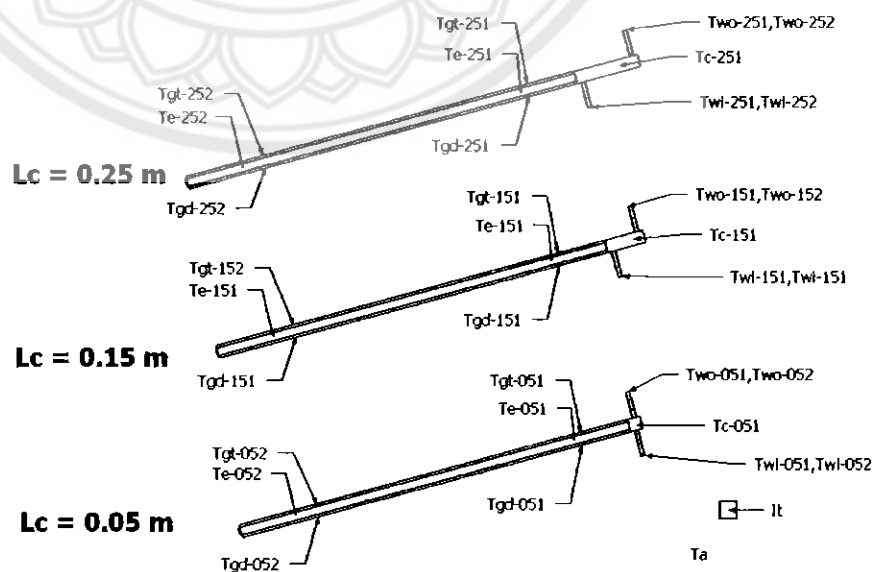
รูปที่ 3.8 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ (a.) ทดลองจำนวนโค้งเดียว (b.) ทดลองความยาวส่วนควบแน่น

3.6.2 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมาเก็บข้อมูลต่างๆ โดยจะเก็บข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า อุณหภูมิน้ำที่ทางออก ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย อุณหภูมิที่ส่วนควบแน่น อุณหภูมิที่ผิวท่อแก้วสุญญากาศ อุณหภูมิอากาศโดยรอบ อัตราการไหล และค่าความเข้มแสงอาทิตย์ โดยจะเก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น.



(a.) การวัดข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองจำนวนโค้งเดียว



(b.) การวัดข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองความยาวส่วนควบแน่น
รูปที่ 3.9 การวัดข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ

การทดลอง ชุดที่ 1

ตัวแปรการทดลองจำนวนโค้งเดียว ชุดต่อความร้อนแบบสันวงรอบ 5 โค้งเดียว ดังรูป 3.9a

T_{E-051}, T_{E-052}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{C-051}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wf-051}, T_{Wf-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wo-051}, T_{Wo-052}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-051}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-052}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรการทดลองจำนวนโค้งเดียว ชุดต่อความร้อนแบบสันวงรอบ 10 โค้งเดียว ดังรูป 3.9a

T_{E-101}, T_{E-102}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{C-101}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wf-101}, T_{Wf-102}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wo-101}, T_{Wo-102}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-101}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-101}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-102}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-102}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรการทดลองจำนวนโค้งเดียว ชุดต่อความร้อนแบบสันวงรอบ 15 โค้งเดียว ดังรูป 3.9a

T_{E-151}, T_{E-152}	คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{C-151}	คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wf-151}, T_{Wf-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{Wo-151}, T_{Wo-152}	คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-151}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GT-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)
T_{GD-152}	คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)
T_a	คือ อุณหภูมิอากาศโดยรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)
I_t	คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)
m	คือ อัตราการไหลของน้ำ (L/min)

การทดลอง ชุดที่ 2

ตัวแปรการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว L_c 0.05 m ดังรูป 3.9b

T_{E-051}, T_{E-052} คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{C-051} คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Wf-051}, T_{Wf-052} คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{W0-051}, T_{W0-052} คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-051} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-051} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-052} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-052} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว L_c 0.15 m ดังรูป 3.9b

T_{E-151}, T_{E-152} คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{C-151} คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Wf-151}, T_{Wf-152} คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{W0-151}, T_{W0-152} คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-151} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-151} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-152} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-152} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวแปรการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว L_c 0.25 m ดังรูป 3.9b

T_{E-251}, T_{E-252} คือ อุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{C-251} คือ อุณหภูมิส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Wf-251}, T_{Wf-252} คือ อุณหภูมิน้ำขาเข้าส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{W0-251}, T_{W0-252} คือ อุณหภูมิน้ำขาออกส่วนควบแน่น, ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-251} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-251} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านบน (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GT-252} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนบน), ($^{\circ}\text{C}$)

T_{GD-252} คือ อุณหภูมิผิวท่อแก้วสุญญากาศด้านนอก ด้านล่าง (ส่วนล่าง), ($^{\circ}\text{C}$)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศโดยรอบ, ($^{\circ}\text{C}$)

I_t คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)

m คือ อัตราการไหลของน้ำ (L/min)

ขั้นตอนการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มีรายละเอียดดังนี้

3.6.2.1 ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ณ อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลโดยจัดให้อยู่บริเวณที่โล่งไม่มีเงาบัง โดยหันหน้าแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้

3.6.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K เป็นตัววัดอุณหภูมิโดยต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ โดยเครื่องบันทึกอุณหภูมิจะวัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลไว้ ในที่นี้กำหนดให้วัดอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ทุกๆ 30 นาที ตั้งแต่เวลา 09.00 – 16.00 น.

3.6.2.3 ติดตั้งเครื่องวัดรังสีแสงอาทิตย์ (ไพรานอมิเตอร์) เข้ากับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์โดยให้ตั้งฉากกับแนวระดับ เก็บข้อมูลค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ทุกๆ 30 นาทีเช่นเดียวกับเครื่องวัดอุณหภูมิ

3.6.2.4 ติดตั้งวาล์วน้ำเข้ากับถังน้ำร้อนเพื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเทียบกับเวลาโดยใช้ปีกเกอร์และนาฬิกาจับเวลาตามที่กำหนด และคอยตรวจอัตราการไหลของน้ำ

3.6.2.5 เริ่มทำการเก็บข้อมูลโดยเริ่มตั้งแต่เวลา 9.00 น. ถึง 16.00 น.

3.6.2.6 ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิตามจุดต่างๆ จากเครื่องวัดอุณหภูมิ ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์วัดได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ ทุกๆ 30 นาที

3.6.2.7 ทำการเก็บข้อมูล 2 วัน/ชุดการทดลอง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาอัตราการทำความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบต่อไป

3.6.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ ประกอบด้วย ค่าความเข้มแสง ค่าอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ตามจุดต่างๆ ค่าอัตราการไหลของน้ำ ที่แสดงไว้ในขั้นตอนการทดลอง

3.6.3.1 นำข้อมูลที่ได้จากการบันทึกข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงเทียบกับเวลา

3.6.3.2 คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อน เขียนกราฟแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา ณ จำนวนโค้งเลี้ยวและความยาวส่วนควบแน่นต่างๆ

3.6.3.3 คำนวณประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เทียบกับเวลา ณ จำนวนโค้งเลี้ยวและความยาวส่วนควบแน่นต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ท่อความร้อนแบบ สันวงรอบนั้น ประกอบด้วย การเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของท่อความร้อนแบบสันวงรอบ โดยมีการปรับจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสันวงรอบให้แตกต่างกันและทำการวิเคราะห์ผล จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบความยาวส่วนควบแน่นของท่อความร้อนแบบสันวงรอบเพื่อวิเคราะห์หา ความยาวที่ดีที่สุดในการใช้งานและเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ สูงสุด

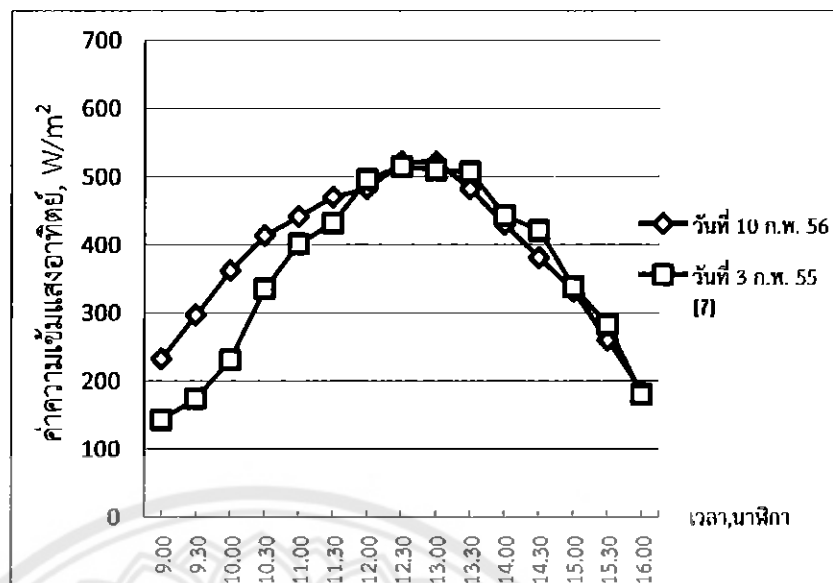
4.1 การทดลองชุดที่ 1

การทดลองท่อความร้อนแบบสันวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5, 10 และ 15

การทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายใน บรรจุท่อความร้อนแบบสันที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5, 10 และ 15 ได้ทำการทดลองในวันที่มี ท้องฟ้าโปร่งใสตลอดทั้งวันโดยดูจากค่าความเข้มแสงที่วัดได้ดังแสดงในกราฟที่ 4.1 และวันที่ ได้ทำการทดลองคือวันที่ 9 และ 10 กุมภาพันธ์ 2556 โดยทำการทดลอง 2 วัน เพื่อให้ได้ ค่าที่แม่นยำและถูกต้อง ซึ่งทดลองในช่วงเวลา 09.00 น. – 16.00 น. โดยมีการหันเครื่อง ทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ไปทางทิศใต้และมีมุมเอียง 16° กับแนวระดับ จากการ ทดลองพบว่าค่าในวันที่ 9 และ 10 กุมภาพันธ์ 2556 มีค่าใกล้เคียงกันและค่าต่างๆ มี แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน จึงได้นำผลการทดลองของวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556 มา แสดง เนื่องจากมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูง จึงทำให้มีอุณหภูมิน้ำขาออก อัตราการถ่ายเท ความร้อน และประสิทธิภาพสูงกว่าวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556 สำหรับผลของวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556 แสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ข

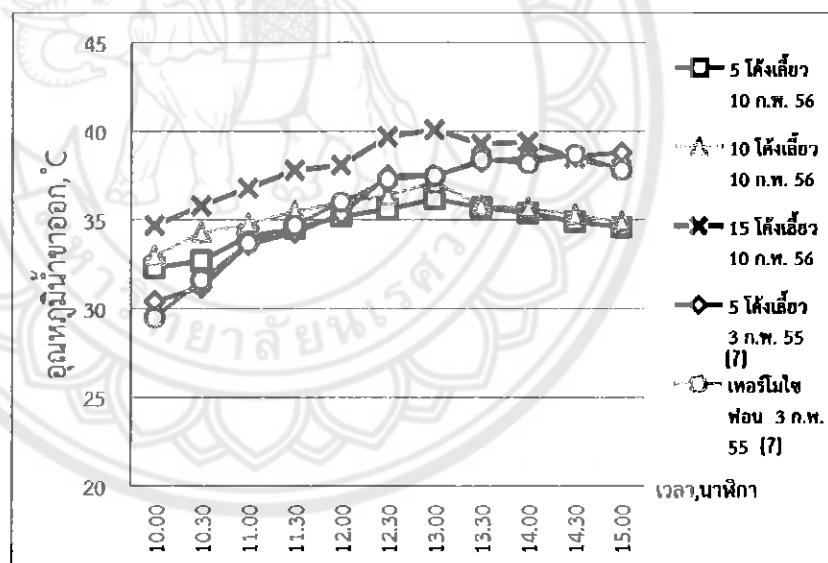
4.1.1 วิเคราะห์ค่าความเข้มแสงอาทิตย์

จากกราฟที่ 4.1 มีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ จะเห็นได้ว่าที่เวลา 09.00 น. มีค่าความ เข้มแสงอาทิตย์ต่ำและจะเริ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 13.00 น. ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ จะสูงสุดที่ 521.7 W/m^2 และจะเริ่มลดลง เนื่องจากในเวลา 13.00 น. เป็นเวลาที่ดวง อาทิตย์ตั้งฉากกับพื้นที่ทำการทดลองมากที่สุด ทำให้สามารถแผ่รังสีให้กับบริเวณที่ทำการ ทดลองได้มากที่สุด จึงทำให้ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ณ เวลานั้นสูงที่สุด โดยเปรียบเทียบกับค่าความเข้มแสงอาทิตย์ของวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555 ที่ได้ทำการศึกษาในปริญญาโท ก่อนหน้านี้ [7]



กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์กับเวลา

4.1.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิน้ำขาออก

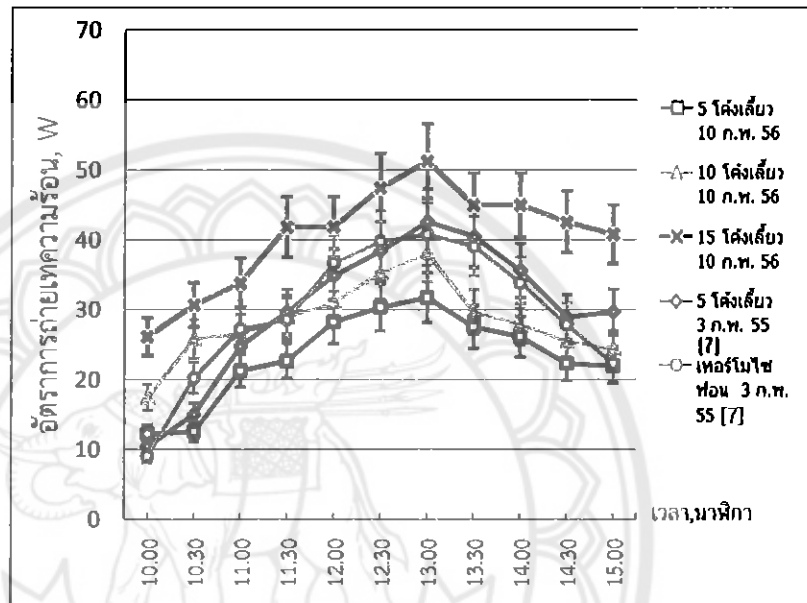


กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา

กราฟที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา โดยมีการแสดงเปรียบเทียบ 5 ชุดการทดลองคือ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเดี่ยว โดยทดลองในวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556 และ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 5 โค้งเดี่ยว [7] ท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ [7] ที่ทำการทดลองในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555 จากการเปรียบเทียบพบว่าท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว มีอุณหภูมิน้ำร้อนขาออกสูงสุด คือ 40.1°C โดยที่ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 5 และ 10 โค้งเดี่ยว มีอุณหภูมิ

สูงสุดอยู่ที่ 36.3°C และ 37.1°C ตามลำดับ และท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ 5 โค้งเลี้ยวที่ทำการทดลองในวันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2555 กับท่อเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะมีอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดเพียง 38.4°C และ 38.3°C ตามลำดับ

4.1.3 การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบส้นวงรอบที่จำนวนโค้งเลี้ยว 5, 10 และ 15



กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเลี้ยวต่างกัน

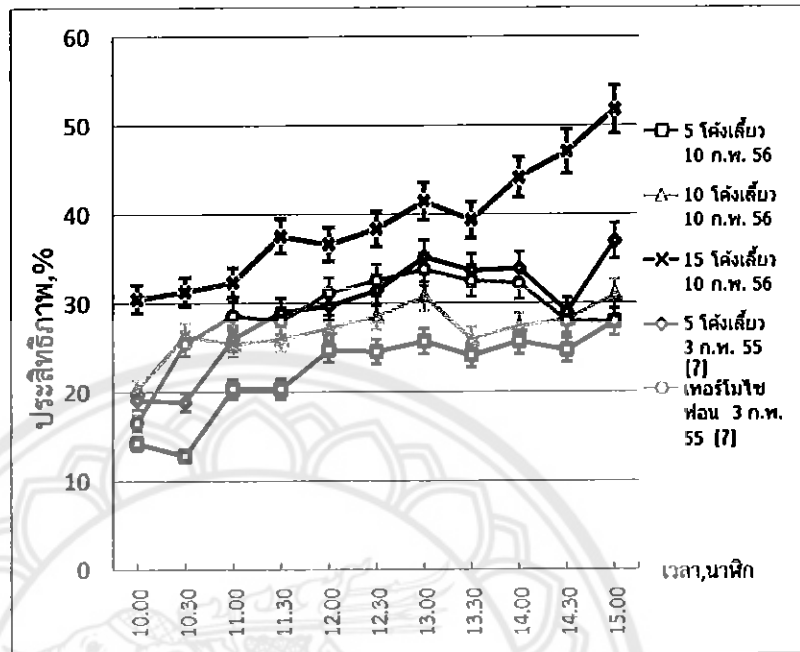
จากกราฟที่ 4.3 เป็นการแสดงผลการทดลองในช่วงเวลา 10.00 น. – 15.00 น. เนื่องจากในช่วงเวลาที่ไม่ได้นำมาแสดงนั้นเป็นช่วงเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากช่วงดังกล่าวมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์น้อย จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณไม่เป็นไปตามทฤษฎี จึงนำผลการทดลองช่วงเวลา 10.00 น. – 15.00 น. มาทำการคำนวณ เพื่อนำผลการคำนวณที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ระหว่างท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเลี้ยว ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 51.31 W ซึ่งสูงกว่าท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ 10 และ 5 โค้งเลี้ยว ที่มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเพียง 38.04 W และ 31.76 W ตามลำดับ จากนั้นได้นำค่ามาเปรียบเทียบกับวิทยานิพนธ์ของนาย กิตติภพ อย่างกุลไพโรจน์ และคณะ [7] ที่ได้ทำการศึกษาท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ 5 โค้งเลี้ยว และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ ในหัวข้อเรื่องสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อความร้อนสุญญากาศ

ชนิดท่อความร้อน เนื่องจากมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ใกล้เคียงกัน โดยท่อความร้อนแบบสัณ
วงรอบ 5 โค้งเหลี่ยมและท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะมีอัตราการ
ถ่ายเทความร้อนสูงสุดเพียง 42.6 W และ 40.8 W ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าท่อความร้อน
แบบสัณวงรอบที่มี 15 โค้งเหลี่ยม ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากท่อความร้อน
แบบสัณวงรอบ 15 โค้งเหลี่ยม นั้นมีการเพิ่มพื้นที่ผิวส่วนทำระเหยเพื่อส่งถ่ายความร้อนจากผิว
ดูดซับแสงอาทิตย์ โดยมีพื้นที่ 0.339 m^2 ซึ่งท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 10 และ 5 โค้ง
เหลี่ยม มีพื้นที่ 0.226 m^2 และ 0.113 m^2 ตามลำดับ และพื้นที่ผิวสัมผัสในส่วนควบแน่นเพื่อ
ถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเพิ่มมากขึ้น คือ 0.038 m^2 ซึ่งมากกว่าท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ
10 และ 5 โค้งเหลี่ยม ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสในส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเพียง
 0.025 m^2 และ 0.012 m^2 ตามลำดับ จึงทำให้ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 15 โค้งเหลี่ยม นั้น
มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

4.1.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ภายในบรรจุท่อ ความร้อนแบบสัณวงรอบโดยมีจำนวนโค้งเหลี่ยม 5, 10 และ 15

กราฟที่ 4.4 เป็นการแสดงผลการทดลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสัณวงรอบที่มีจำนวนโค้งเหลี่ยม 5, 10
และ 15 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลา พบว่า
ประสิทธิภาพในช่วงเช้าจะมีค่าค่อนข้างต่ำจากนั้นจะค่อยๆ มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจาก
ช่วงเช้านั้นมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำ จากนั้นค่าความเข้มแสงอาทิตย์จะเริ่มสูงขึ้นและ
สูงสุดที่เวลา 13.00 น. จากนั้นค่าความเข้มแสงจะเริ่มลดลง ซึ่งดูได้จากกราฟ 4.1 จะเห็นว่า
ค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน แต่จากกราฟที่ 4.3 จะพบว่าค่า
ประสิทธิภาพนั้นจะสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่ลดลงตามค่าความเข้มแสง เนื่องจากท่อแก้ว
สุญญากาศสามารถเก็บรักษาความร้อนที่สะสมอยู่ภายในได้เป็นอย่างดี จึงทำให้ความร้อน
นั้นยังคงอยู่ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น จากการเปรียบเทียบท่อความร้อน
แบบสัณวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเหลี่ยม ได้ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุด คือ 28.43%,
32.36% และ 43.76% ตามลำดับ จากนั้นได้นำค่ามาเปรียบเทียบกับวิทยานิพนธ์ของนาย
กิตติภพ อย่างกุลไพโรจน์และคณะ [7] ที่ได้ทำการศึกษาท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 5 โค้ง
เหลี่ยม และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ย
เพียง 29.36% และ 28.8% ตามลำดับ สรุปได้ว่าการใช้ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 15 โค้ง
เหลี่ยม นั้นให้ประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 15 โค้งเหลี่ยม นั้นมี
พื้นที่ผิวส่วนทำระเหยเพื่อส่งถ่ายความร้อนจากผิวดูดซับแสงอาทิตย์และพื้นที่ผิวสัมผัสใน
ส่วนควบแน่นเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมากกว่าท่อความร้อนแบบสัณวงรอบ 5 และ 10

โค้งเดียว และท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ จึงทำให้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดียว มีประสิทธิภาพสูงสุด



กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนที่มีจำนวนโค้งเดี่ยวต่างกัน

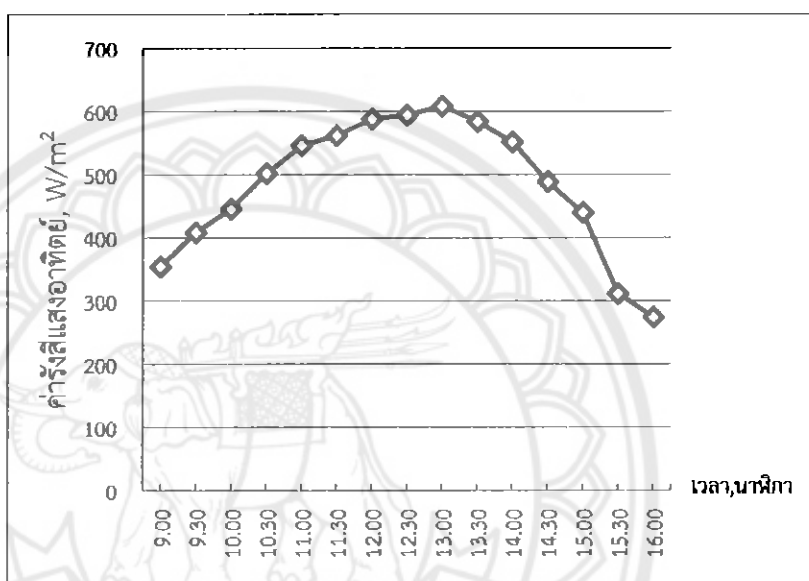
4.2 การทดลองชุดที่ 2

การทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดียว โดยมีการปรับความยาวส่วนควบแน่นในระยะเวลาต่างๆ

จากการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีจำนวนโค้งเดี่ยว 5, 10 และ 15 ได้ข้อสรุปว่าท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีจำนวนโค้งเดี่ยว 15 นั้นทำงานได้ดีที่สุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุด จึงได้นำท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว มาทดลองต่อเพื่อศึกษาผลของความยาวส่วนควบแน่นที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพการทำงานของระบบ โดยทำการทดลองในวันที่ 24 และ 25 กุมภาพันธ์ 2556 ทั้งนี้ในการทดลองซ้ำกัน เพื่อให้ได้ค่าในการทดลองที่ชัดเจน ไม่คลาดเคลื่อนจากกันมาก ซึ่งทั้ง 2 วัน ที่ทำการทดลองพบว่ามีค่าต่างๆ ที่ใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่เนื่องจากค่าความเข้มแสงอาทิตย์ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่าประสิทธิภาพในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 มีค่าสูงกว่า วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556 จึงได้นำผลการทดลองในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 มาแสดง ซึ่งผลของวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556 แสดงในภาคผนวก ก และ ข

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงอาทิตย์

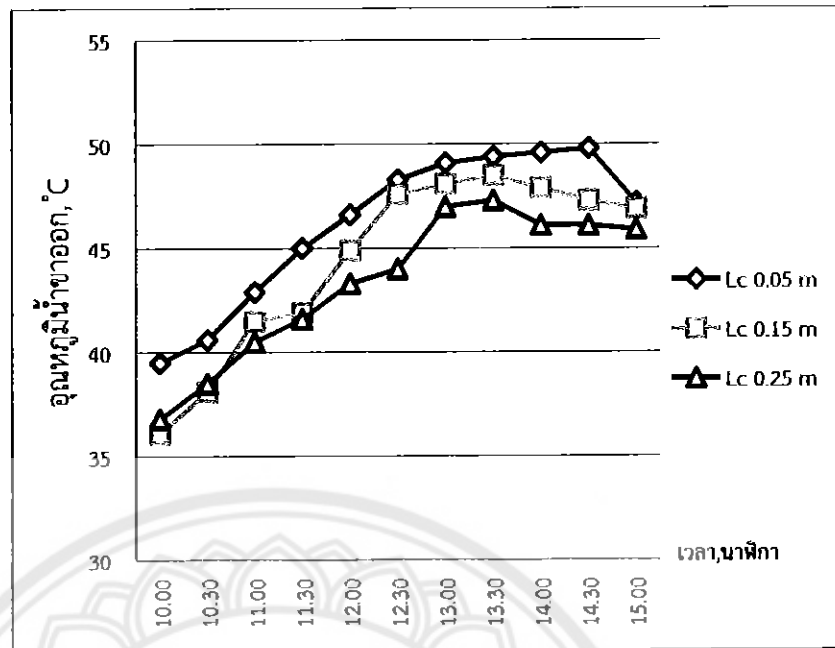
กราฟที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงอาทิตย์กับเวลาของการทดลองต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว โดยมีความยาวส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m โดยทำการทดลองในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งเป็นวันที่มีท้องฟ้าโปร่งใสและมีค่าความเข้มแสงสูง จากกราฟจะเห็นว่ากราฟเป็นรูปประฆังคว่ำ โดยมีค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นถึงการไม่มีเมฆมาบังดวงอาทิตย์ ซึ่งค่าความเข้มแสงสูงสุดของวัน คือ 608.7 W/m^2 ที่เวลา 13.00 น.



กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีแสงอาทิตย์กับเวลาของการทดลอง
วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

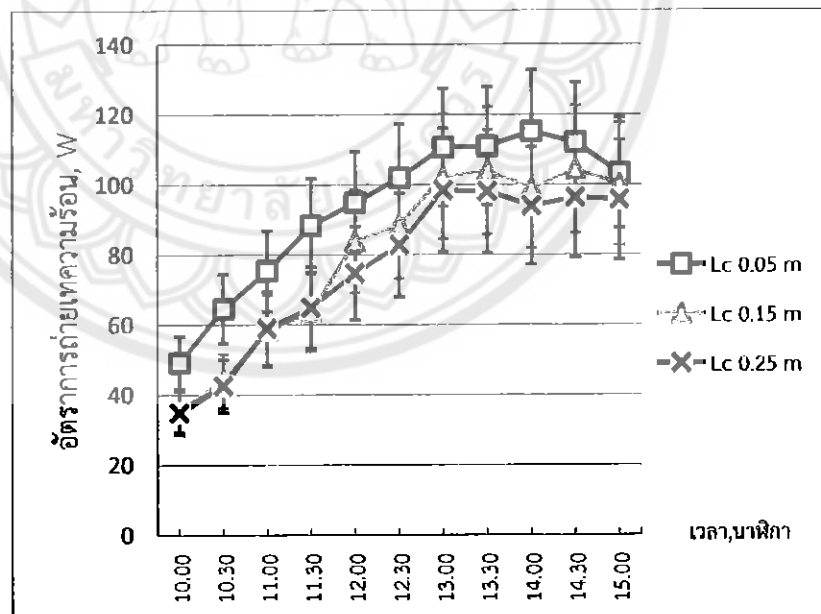
4.2.2 การวิเคราะห์อุณหภูมิน้ำขาออก

กราฟ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา จากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิน้ำขาออกของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m มีค่าสูงสุด โดยมีอุณหภูมิน้ำขาออกสูงสุดที่ 50.1°C ซึ่งที่ความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.025 m มีอุณหภูมิน้ำขาออกสูงสุดเพียง 48.5°C และ 47.7°C ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m ให้อุณหภูมิน้ำขาออกสูงที่สุด



กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

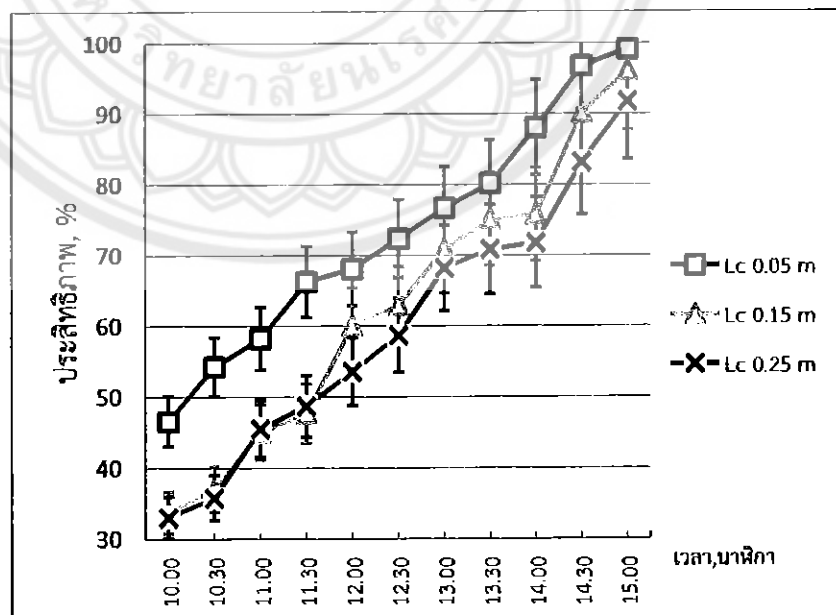
4.2.3 การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มี 15 โค้งเดียว โดยมีความยาวส่วนควบแน่นในระยยะต่างๆ



กราฟที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเวลาของการทดลองท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเดียวโดยมีความยาวส่วนควบแน่นในระยยะต่างๆ ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

กราฟที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับเวลา ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อความร้อนแบบสั้น วงรอบทั้ง 3 คือ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบทั้ง 3 มีค่า 115.2 W, 99.12 W และ 93.89 W ตามลำดับ ซึ่งพบในช่วงเวลา 14.00 น. จะเห็นว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่นต่างกันนั้น พบว่าความยาวส่วนควบแน่นสั้นที่สุดมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด เนื่องจากท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 5 cm มีถึงน้ำร้อนสั้นที่สุด จึงทำให้มีการสูญเสียความร้อนต่ำ เพราะมีพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านสั้น ทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) มีค่าสูง และมีการไหลของน้ำที่ใกล้เคียงกับการไหลแบบตั้งฉาก (Cross flow) ซึ่งเป็นการไหลที่ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดี โดยดึงน้ำที่สั้นจะมีการไหลแบบตั้งฉากทำให้น้ำมีการไหลวนสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบในส่วนควบแน่นได้ทั้งหมด ส่วนดึงน้ำยาวจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดี เนื่องจากน้ำไม่สามารถไหลวนสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อความร้อนแบบสั้นได้ทั้งหมด โดยจะมีน้ำบางส่วนกระจุกตัวอยู่บริเวณปลายดึงน้ำทั้งสองข้าง ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีส่วนควบแน่น 0.05 m จึงมีค่าสูงสุด

4.2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มี 15 โค้งเลี้ยว โดยมี ความยาวส่วนควบแน่นในระยะต่างๆ



กราฟที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับเวลา ของการทดลองท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว โดยมีความยาวส่วนควบแน่นในระยะต่างๆ ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

กราฟที่ 4.8 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 3 ระยะ เทียบกับเวลา โดยท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทั้ง 3 มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m จากการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทั้ง 3 พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m ให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย สูงสุด 73.34% ส่วนท่อท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.25 m มีค่า 63.14% และ 60.12% ตามลำดับ จากการสังเกตกราฟ จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m เมื่อเทียบกับเส้นกราฟของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.25 m พบว่าในช่วงเช้านี้มีผลต่างของค่าประสิทธิภาพค่อนข้างสูง จากนั้นจะเริ่มมีผลต่างประสิทธิภาพลดลงและเข้าใกล้กันในช่วง 13.00 น. จึงได้ข้อสรุปว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m มีประสิทธิภาพสูงตั้งแต่เริ่มการทดลอง จากนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.25 m จะมีค่าประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำในช่วงเช้า ซึ่งต่างกับแบบ 0.05 m ค่อนข้างมาก จากนั้นจะเริ่มมีค่าสูงขึ้นจนค่าประสิทธิภาพเข้าใกล้ค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาว 0.05 m ดังนั้นท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.05 m ทำงานได้ดีตั้งแต่ช่วงความเข้มแสงอาทิตย์ต่ำและทำงานได้ดีขึ้นเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์สูงขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงกว่าและมีความเสถียรมากกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 0.15 m และ 0.25 m

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองและผลการวิเคราะห์

จากการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ภายในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยมีการทดลอง 2 ชุดการทดลอง คือ ชุดแรกเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบโดยมีการกำหนดจำนวนโค้งเลี้ยวเท่ากับ 5, 10 และ 15 โค้งเลี้ยวและทำการทดลองโดยมีน้ำไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 0.1 L/min โดยน้ำที่ไหลผ่านท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแล้วจะถูกปล่อยทิ้งไป และทางเข้าจะมีน้ำเข้ามาแทนที่ ในชุดที่ 2 จะเป็นการทดลองท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว 3 ชุด ซึ่งแต่ละชุดจะมีความยาวในส่วนควบแน่นต่างกันไป คือ 5 cm, 15 cm และ 25 cm จากนั้นจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบทั้ง 3 ชุด เพื่อศึกษาผลของความยาวส่วนควบแน่นที่มีต่อการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ

5.1.1 จากการเปรียบเทียบจำนวนโค้งเลี้ยวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยในการวันทำการทดลองนั้นมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุด 521.7 W/m^2 พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยวทำงานได้ดีที่สุด คือ มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 51.31 W และมีประสิทธิภาพการทำงานโดยเฉลี่ย 43.76% ซึ่งสูงกว่าท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 5 และ 10 โค้งเลี้ยว ที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อน 31.76 W และ 38.04 W ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการทำงานโดยเฉลี่ย 28.43% และ 32.36% ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยวดีที่สุด

5.1.2 จากการเปรียบเทียบท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ที่มีความยาวส่วนควบแน่น 5 cm, 15 cm และ 25 cm พบว่าท่อความร้อนแบบสั่นที่มีความยาวส่วนควบแน่น 5 cm มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยสูงสุด คือ 73.34% โดยที่ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีความยาวส่วนควบแน่น 15 cm และ 25 cm มีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเพียง 63.14% และ 60.12% ตามลำดับ

5.1.3 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ที่มีความยาวส่วนควบแน่น 5 cm ทำงานได้ดีที่สุด โดยมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 73.34% อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 115.2 W และมีอุณหภูมิน้ำขาออกสูงสุด $50.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในวันทำการทดลองมีค่าความเข้มแสงอาทิตย์สูงสุดที่ 608.7 W/m^2

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเพิ่มจำนวนท่อแก้วสุญญากาศที่อยู่ในบรรจุท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ เพื่อให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้อุณหภูมิน้ำที่สูงขึ้นและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.2.2 การใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบควรมีช่องระบายอากาศให้กับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบในส่วนควบแน่น เพื่อระบายความร้อนเมื่อไม่มีน้ำอยู่ในระบบ เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายขึ้นกับท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

5.2.3 ควรรักษาสภาพการเป็นสุญญากาศภายในท่อแก้วชั้นในให้คงที่ โดยไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปภายในท่อแก้วสุญญากาศได้ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

5.2.4 วัสดุที่ใช้ในการทำถังน้ำร้อนในส่วนควบแน่นมีข้อจำกัดคือ มีขนาดใหญ่ ถ้าต้องการทำถังน้ำร้อนให้เล็กลงควรใช้วัสดุชนิดอื่น



บรรณานุกรม

- [1] <http://solarfeeds.com/csp-technology-down-but-not-out/> (สืบค้น 5/09/2012)
- [2] http://mte.kmutt.ac.th/elearning/Solar%20Energy/HTML/unit_01.htm (สืบค้น 5/09/2012)
- [3] http://portal.edu.chula.ac.th/lesa_cd/assets/document/LESA212/1/celestial_sphere/ecliptic/ecliptic.html (สืบค้น 6/09/2012)
- [4] http://greenterrafirma.com/evacuated_tube_collector.html (สืบค้น 6/09/2012)
- [5] Dunn, P. and Reay, D.A. (1982). *Heat pipe* (3th ed.). UK: Pergamon Press Ltd.
- [6] Maezawa, S., Gi, K., Minamisawa, A. and Akachi, H. (1995). Thermal performance of capillary tube thermosyphon. In *Proceeding of the 9th International Heat Pipe Conference*. (pp. 791–795). New Mexico: Albuquerque.
- [7] ปริญญาณีพนของ กิตติภพ ย่างกุลไพโรจน์ และคณะ. การพัฒนาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศชนิดท่อความร้อนสข. ปริญญาณีพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยรัตนนคร, 2554
- [8] Gi, K., Sato, F. and Maezawa, S. (1999). Flow Visualization Experiment on Oscillating Heat Pipe. In *Proceedings of the 11th International Heat Pipe Conference*. (pp. 149–153). Japan: Tokyo.
- [9] ศุภชัย ชุมมนวัฒน์. การระบายความร้อนถึงเก็บข้าวเปลือกด้วยท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยรัตนนคร, 2554
- [10] <http://www.renewableenergyworld.com/rea/partner/kipp-zonen/products/sp-lite2-silicon-pyranometer> (สืบค้น 3 กุมภาพันธ์ 2556)
- [11] <http://www.kmitl.ac.th/foodeng/new/mobile/articles.php?lng=en&pg=33> (สืบค้น 3 กุมภาพันธ์ 2556)
- [12] <http://www.integrate.com/thermocouple.php> (สืบค้น 3 กุมภาพันธ์ 2556)





ตารางที่ ก 1 ข้อมูลการทดลองวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556

ใบบันทึกข้อมูลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ทดสอบแบบสั้นวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเดียว

No	Code	CH.	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00	
5 โค้งเดียว	E-051	101	40.6	43.4	73.3	78.8	80.8	82.4	83.6	87.8	90.2	96.3	88.8	87.3	75.6	71.3	69.2	
	E-052	102	41.5	44.3	74.8	82	84.7	83.7	88.3	93.4	96.8	98.7	94.5	92.4	80	74.7	71.4	
	C-051	103	29.8	30	31.4	33.6	34.7	34.9	35.4	36.2	36.6	36.5	36.2	36.4	35.9	35.6	36.1	
	TI-051	104	28.5	28.5	30.2	30.1	30.4	30.8	31.1	31.5	31.8	32	31.8	31.7	31.5	31.4	31.2	
	TI-052	105	28.3	28.5	29.3	30	30.7	30.9	31.2	31.5	31.9	32.1	31.7	31.6	31.6	31.5	31.1	
	TO-051	106	28.9	29.2	30.5	32.8	33.9	34.7	35.1	35.5	36	36.2	35.9	35.9	35.8	35	34.8	
	TO-052	107	29	29.2	30.4	33	34.2	34.8	35	35.5	36.1	36.3	36.1	36	35.7	35.2	35	
	GT-051	108	26.4	27.9	29.2	29.8	31.4	31.5	33.7	38.3	37.7	35.7	36.6	36	35.9	35.6	32.9	
	GD-051	109	28.4	31.5	34.9	33.8	36.3	36.9	37.2	40.6	41.9	39.3	39.5	39	38.7	37.5	35.8	
	GT-052	110	28.6	31.7	34.3	36.4	37.4	38.6	38.7	41.3	42.8	40.8	40.2	39.6	39.2	37.7	35.8	
10 โค้งเดียว	GT-052	111	28.2	29.9	33.1	33.5	34.8	35	35.9	38.4	39.3	39.3	38.7	38.5	38.1	37.7	36.4	
	E-101	112	42.7	45.9	75.2	81.6	83.8	85.7	88	93.9	96.8	96.2	93	89	84.7	81	74.7	
	E-102	113	42.4	49.3	78.2	84.3	86.9	88.1	91	97.4	100.7	100.3	97	92.5	88.1	85	78.6	
	C-101	114	29.2	30.1	30.7	33.5	35.3	35.7	36.1	37	37.7	38	37.5	37	36.4	35.8	34.6	
	TI-101	115	28.3	28.5	29.5	30.3	30.6	31	31.3	31.7	31.8	31.9	31.7	31.5	31.4	31.2	30.8	
	TI-102	116	28.3	28.4	29.4	30.2	30.6	31	31.4	31.8	31.9	32.1	31.9	31.7	31.7	31.4	31	
	TO-101	117	29.1	29.5	30.7	33.8	34.6	35	35.4	36.2	36.9	37.2	36.8	36.2	35.8	35.2	35	
	TO-102	118	29.5	29.6	30.8	33.9	34.7	35.1	35.5	36.3	37	37.2	37.2	36.8	36.3	35.8	35.3	35.1
	GT-101	119	29.5	31.8	36	37.7	37.7	38.5	40.1	42.6	42.1	41.8	41.5	40	39.9	38.5	36.3	
	GD-101	120	27.9	29.4	31.5	30.8	32.8	33.7	35.2	35.4	34.7	34.6	37.1	35.8	36.6	35.7	35.4	
15 โค้งเดียว	GT-102	213	27.8	29.9	34.1	33.4	34.7	35.4	35.9	38.9	38.9	39	38.7	38.7	38.4	37.8	36	
	GT-102	214	27.4	28.9	31.3	32	33.4	33.9	35.6	37.5	37.6	38.4	37.9	37.4	37.2	36.6	35.5	
	E-151	201	43.3	45.8	74.6	83	85.2	87.6	91.5	96.6	97	95.1	93	90.3	87.6	85.2	80.6	
	E-152	202	43.2	45.2	77.4	88.6	91.8	94.8	99.1	104.6	106.8	104.8	102.8	100.6	98.7	95.9	91.3	
	C-151	203	29.6	30.2	30.8	33.8	35.3	35.9	37	37.9	38.6	38.3	38.1	37.8	37.8	36.8	35.5	
	TI-151	204	28.2	28.3	29.4	30.3	30.6	30.8	31.6	31.9	32	31.7	31.7	31.6	31.5	31	30.5	
	TI-152	205	28.25	28.5	29.5	30.5	30.9	31.1	32	32.2	32.5	32.3	32.3	32.2	32.1	31.7	31.2	
	TO-151	206	29.1	30.2	31	34.1	35.3	35.8	37.2	38.3	39.1	38.7	38.5	38.3	38.1	37.3	36	
	TO-152	207	29.5	29.7	30.8	33.2	34.6	34.7	36	37.1	38.3	37.6	37.1	37.8	37.3	36.5	35.3	
	GT-151	208	28.5	30.2	34.3	37.4	37.6	38.6	39.6	42.5	42.9	41.9	41	41.4	39.9	38.7	37.4	
GD-151	209	27.7	28.8	32.3	33.4	34.6	35.6	36.9	38.7	40	39.1	39	39.2	38.5	37.9	36.5		
GT-152	210	28.6	30	34.5	37.6	37.9	38.8	39.3	42.5	42.8	42.3	41.5	41.8	40.7	39.6	38.2		
GT-152	211	28.1	29.1	32.1	34	34.5	35.2	36	38.8	39	38.9	38.1	38.7	38.2	37.8	36.6		
TA	212	26.3	27.6	30.1	30.9	31.2	32.6	33.2	34	34	35	35	35.2	34.6	34.7	34.4		
Rad		16.21	21.86	22.35	40.07	43.21	46.83	48.31	52.25	49.95	47.38	43.82	39.28	33.96	27.5	19.21		

ตารางที่ ก 2 ข้อมูลการทดลองวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556

ใบบันทึกข้อมูลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบสัณฆรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเดียว

No	Code	CH.	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	
๗ โค้งเดียว	E-051	101	33.5	65.5	81.1	82.8	85.7	90.3	92.8	94.5	95.8	92.3	87.8	85.5	81.1	79.9	76.6	
	E-052	102	33.8	65.7	87.2	87	90.6	95.2	98.7	101.7	102.9	100.2	99.6	96.5	92.7	91.2	87.2	
	C-051	103	28.2	29.6	32.9	33.4	34.4	34.7	35.4	36	36.5	36	35.6	35.1	34.8	34.6	34.2	
	TI-051	104	28.3	29.5	30.6	31	31.2	31.3	31.5	31.5	31.5	31.7	31.6	31.5	31.4	31.5	30.9	
	TI-052	105	28.2	29.4	30.3	30.6	30.8	31	30.9	31.1	31.9	31.8	31.8	31.8	31.8	31.6	31.5	31.2
	TO-051	106	28.2	29.7	32.1	32.5	34	34.3	34.3	35.3	35.7	36.3	35.7	35.5	34.8	34.7	34.2	34
	TO-052	107	28.5	29.7	32.3	32.7	34.1	34.5	35.2	35.6	36.2	36.2	35.7	35.4	34.9	34.6	34.1	33.9
	GT-051	108	28.5	29.3	30.8	30.2	31.7	32.1	33.9	33.5	34.9	34.9	35.2	35.9	35.2	36	35.1	33.6
	GD-051	109	32.6	34.6	37.6	35.6	37.7	37.6	38.3	39.1	41.2	40.2	40.2	38.3	39.1	38.7	38.1	36.4
	GT-052	110	33.2	36.2	39.5	38.4	39.9	39.7	40.4	40.6	43.1	41.3	39.3	40	39.1	38	36.2	
	GT-052	111	30	33	35.5	35	36	36.5	37.5	38.9	40.8	39.9	39	39.4	39	38.7	37.2	
	E-101	112	36.5	68.4	85.9	86.4	88.2	91.7	93.5	96.3	97	94.2	91.3	89.7	85.9	84.4	78.2	
	E-102	113	36.4	69.3	90.2	91.3	93.8	99.7	100.9	104.4	105	103.6	102.3	100.1	96.2	94.8	89.9	
	10 โค้งเดียว	C-101	114	28.3	29.6	33.7	34.5	35.2	35.7	36.4	37	37.2	36.2	35.8	35.6	35.4	35.1	34.7
TI-101		115	28.3	29.4	30.4	30.5	31	31.2	31.5	31.2	31.5	31.5	31.6	31.5	31.4	31.3	30.9	
TI-102		116	28.3	29.5	30.6	30.6	31.1	31.4	31.5	31.5	31.7	31.8	31.8	31.7	31.6	31.5	31.1	
TO-101		117	28.4	29.7	33	34.2	34.9	35.4	35.9	36.4	37	36	35.7	35.2	35.1	34.9	34.5	
TO-102		118	28.4	29.7	33	34.3	34.8	35.5	36	36.4	37.1	35.8	35.7	35.3	34.9	34.8	34.6	
GT-101		119	34.1	37.6	40.5	39.8	40.5	41.3	41.5	42.1	43.6	42.3	41.3	40.3	39.7	38.5	36	
GD-101		120	30.5	33	32.7	31.9	35.5	33.5	34.5	35.6	38.3	36.9	36.4	36.1	35.8	36.8	35.9	
GT-102		213	31.8	33	36.2	35.7	36.8	37.6	38.6	39.4	39.9	40.8	40.6	39.5	39.2	38.7	38.3	
GT-102		214	30.7	32.2	34.8	33.9	35.1	36.5	37.3	37.5	38	39.7	39.8	37.3	37.7	36.8	36.6	
E-151		201	37.1	70.8	86.4	87	90	93.4	95.4	98.1	98.2	96.1	94.1	91.8	88.3	86	79.8	
E-152		202	36.1	70.5	92.4	92.5	96.8	100.5	102.5	106.9	107.3	105.4	104.1	102.3	98.5	96	91.3	
1๗ โค้งเดียว		C-151	203	28.4	29.8	34.3	35.5	36.4	37.7	37.8	39.5	39.8	38.9	39.2	38.1	37.4	36.9	35.5
		TI-151	204	28.4	29.4	30.4	30.7	31	31.8	31.8	32	32.2	32.1	32.2	31.8	31.5	31.2	30.8
		TI-152	205	28.3	29.6	30.8	31.1	31.5	31.5	32	32.6	32.1	32.8	32.7	32	32	31.9	31.3
	TO-151	206	28.3	30.1	34.7	35.8	36.8	37.8	38.1	39.7	40.1	39.3	39.4	38.5	37.9	37.2	36.1	
	TO-152	207	28.6	30	34	34.8	35.4	37.5	37.7	38.5	38.9	38.5	38.4	37.5	37.3	36.7	35.7	
	GT-151	208	32.7	35.7	36.5	39.8	40.9	42	42.2	43.5	43.9	43.3	43.4	40.5	40.9	39.9	38.1	
	GD-151	209	31.1	33.4	34.7	35.4	36.9	38.1	39.3	40.2	41	40.6	41.1	38.8	39.7	39.2	37.1	
	GT-152	210	31.8	35.4	36.1	39.6	40.6	41.1	40.2	43	43.7	43	43	41	41.1	40.8	38.8	
	GT-152	211	31	33.3	34	35.7	36.3	36.6	37.4	39.9	39.8	39.7	39.7	38.6	39.3	39	37.6	
	TA	212	28.8	29.7	31.2	32	32.3	32.9	33.5	33.9	34.4	34.7	34.8	34.8	35.6	35.4	34.6	34.9
	Rad		23.25	29.67	36.2	41.35	44.13	47.03	48.2	52.17	52.14	48.23	42.98	38.14	33.25	26.05	18.58	

ตารางที่ ก 3 ข้อมูลการทดลองวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

ใบบันทึกข้อมูลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้หอความร้อนแบบสัณวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว โดยมีความยาวส่วนควมแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m

No	Code	CH.	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
E S D	E-051	101	51.8	75	99.3	103	107.8	110.8	118	123.1	126.5	122.8	120.5	115.3	109.2	108.1	94.9
	E-052	102	52.9	73.3	96.8	102.4	103.2	105.3	117	125.3	120.3	122.5	121.3	114	113.7	107.9	98.8
	C-051	103	34.5	38.5	40.5	45.7	46.8	48	50.9	54.2	55.9	55.7	55.5	55.4	55.1	54.1	51.5
	TI-051	104	29.3	30.2	31.3	31.6	32.5	32.6	33.2	33.8	33.3	33.8	33.7	33.5	32.8	32.2	31.1
	TI-052	105	29.3	30.2	31.2	31.9	32.6	32.6	33.3	33.8	33.4	33.9	33.8	33.6	32.9	32.2	31.2
	TO-051	106	32.3	33.9	37.1	41.4	43.8	45.5	47.1	48.5	49.3	50.1	50.9	49.4	48.1	47.9	46.8
	TO-052	107	32	33.3	39.5	40.6	42.9	45	46.6	48.3	49.1	49.4	49.6	49.8	47.2	47.1	46.2
	GT-051	108	34.1	36.6	40	40.1	41	41.8	41.5	43.5	43.8	43.9	40.2	41.5	41	40.1	37.5
	GD-051	109	32	32.7	34.6	33.5	33.5	35.2	35.5	38.3	41	39.4	36.8	40.1	37.7	37.7	36.1
	GT-052	110	34.2	36.5	38.2	39.2	39.4	41.1	40.8	42.9	43.4	43.6	41.4	41.3	40.4	39.5	39.8
	GT-052	111	33.1	33.4	35.2	34	33.6	36.1	36.4	37.8	39.4	38.2	36.8	40	36.5	37.4	37.8
	E S D	E-101	112	51.6	76.7	98.1	105.5	109.4	111.7	118	121.6	122.8	120.4	119.5	112.4	108	103.1
E-102		113	51.4	73.4	100.3	104.4	108.1	110.8	117	121.5	123.8	122.8	123	115.8	111.3	106.9	95.1
C-101		114	31.9	38.2	39.7	44.3	46.1	47.2	50	53.7	55	54.9	54.8	54.2	53.9	53.1	50.6
TI-101		115	29.4	30.4	31.4	32.3	32.6	32.8	33	33.6	33.1	33.3	33.3	31.9	32.1	31.5	31
TI-102		116	29.5	30.6	31.5	32.5	32.9	33	33.2	33.7	33.3	33.5	33.5	32.3	32.6	31.9	31
TO-101		117	31.7	33.7	36.1	38.1	41.5	41.9	44.9	47.6	48.1	48.5	47.9	47.3	46.9	46.9	46.3
TO-102		118	31.6	33.7	37	39.3	40.7	42.1	45.3	45.1	47.6	48.1	47.3	46.8	46.5	46.8	45.8
GT-101		119	34.8	38	40.1	42.2	41.8	43.6	42.3	45.1	45.1	45.7	39.5	43.2	41.6	40.6	38.3
GD-101		120	34.4	33.5	35.3	37.4	39	40.1	40.8	42.1	42.7	42.4	39.8	41.1	40.4	38.3	37.7
GT-102		213	33.7	37	38.5	40.7	39.8	42.1	42.2	44	46.3	45.7	43.2	43	40.3	40.3	38.8
GT-102		214	34.8	33.7	36	36.5	36.1	38.3	38.5	41.1	44.5	44.7	43	42.3	35.2	39.5	40.2
E S D		E-151	201	58.4	101	99.5	98.5	101.5	105	111	114.9	115	112.7	112.8	108.8	107.8	105.9
	E-152	202	58.7	105	105.1	105.7	109.8	113.5	119	125.7	128.4	125.6	126.5	124.8	122.4	120.1	116
	C-151	203	29.2	32.4	41.8	44	45.1	46.6	49.4	53.1	54.8	54.8	54.2	53.3	53.2	51.8	49.9
	TI-151	204	29.3	30.3	31	32	32.6	32.4	33.1	33.9	33.1	33.3	33.1	32.6	32.8	32.5	31.2
	TI-152	205	28.5	30	31.2	32.1	32	32.4	33.3	33.1	33.2	33.6	33.2	32.6	32	32.7	31.3
	TO-151	206	29.2	33.4	35.4	37.8	41	41.8	44.5	46.7	47.5	47.7	47.1	46.7	46.3	46.3	44.7
	TO-152	207	29.5	33.3	36.8	38.5	40.5	41.6	43.3	44	47	47.3	46.1	46.1	45.9	45.2	43.7
	GT-151	208	34.4	38.9	38.9	42.1	42.8	44	42.6	44.9	42.8	44.6	42.3	40.5	41.2	40.2	38.5
	GD-151	209	31.9	35.7	34.7	36.1	36.4	38.9	38.8	41.3	40.9	41.6	40.7	39.7	39.3	39.3	37.9
	GT-152	210	34.5	38.7	38.1	41.3	40.8	43.1	42.6	43.9	45	44.5	43.5	42.3	41.1	40.9	40.3
	GT-152	211	32.7	35.1	34.4	36	35.3	37.8	37.9	39.9	42	41.9	40.7	39.7	38.6	38.5	38.8
	TA	212	30.4	30.7	31.6	32.1	31.3	35.2	34.1	34.6	36.2	36.2	37.2	35.3	35.3	34.1	35.1
Rad			35.43	40.9	44.57	50.19	54.6	56.21	58.8	59.43	60.87	58.41	55.18	48.86	43.97	31.19	27.5

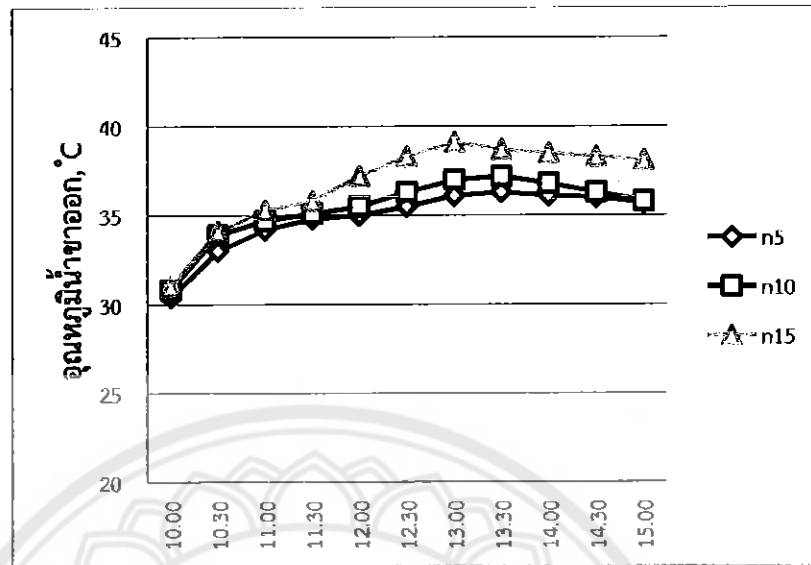
ตารางที่ ก 4 ข้อมูลการทดลองวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556

ใบบันทึกข้อมูลการทดลองเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่ววงรอบ 15 โค้งเดี่ยว โดยมีความยาวส่วนควมแนม 0.05, 0.15 และ 0.25 m

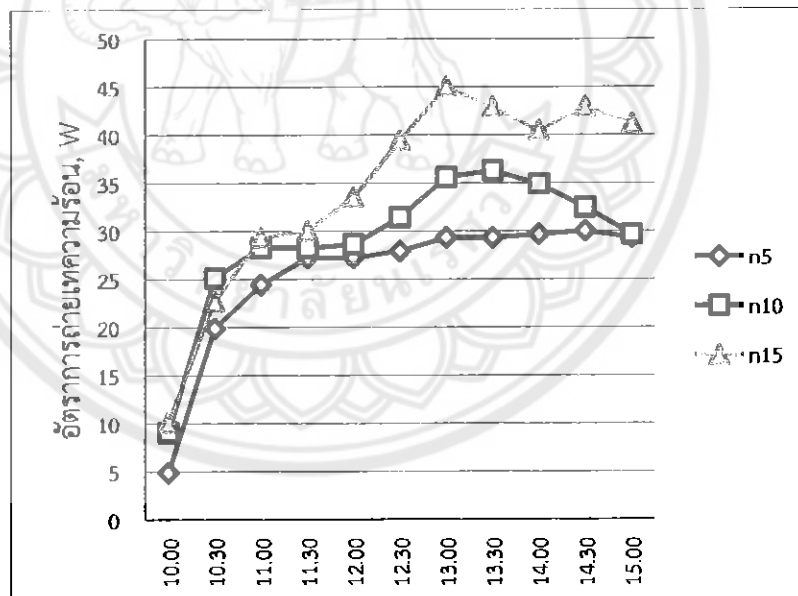
No	Code	CH.	9.00	9.30	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00	15.30	16.00
L 5 S	E-051	101	42.8	82.1	102.9	105.1	106.1	110.4	114	114.6	115.8	115.2	114.5	113.6	110.2	107	107
	E-052	102	38.6	73	105.2	107.3	107.4	111.2	115	116	118.1	118.1	117.6	117.3	116.4	114.2	112
	C-051	103	28	36.5	40.2	42.3	45.9	56.3	47.2	47.7	49.4	50.5	50.2	49.4	49.1	49.2	48.6
	TI-051	104	27	28.8	30.6	31.7	32.7	33.2	33.5	33.8	33.7	33.9	33.9	33.6	33.5	32.6	32.2
	TI-052	105	27.1	28.9	30.6	31.7	32.8	33.3	33.6	33.8	33.9	33.9	33.9	33.7	33.6	32.8	32.3
	TO-051	106	27.5	36.3	39.4	41.7	44.2	45.5	46.8	47.1	48.8	49.2	49	48.2	47.3	47.6	47
	TO-052	107	27.6	36.2	39.2	41.2	43.9	44.9	46.5	47	48.5	49.6	49.4	48.3	46.5	46.1	46.3
	GT-051	108	33.8	37.9	41.9	42.9	44	44.7	45.3	46.7	45.4	44.9	46.1	43.3	43.6	41.6	37.6
	GD-051	109	30.9	34.4	37.1	37.5	39.1	40	40.2	42.6	41	40.2	42.1	40.4	41	41.8	36.8
	GT-052	110	33.6	37.4	40.2	42	42.9	43.8	44.3	45.4	44.8	43.6	44.9	42.8	42.8	40.2	39.4
	GT-052	111	30.8	35	37	38.4	39.4	40.7	40.2	42.2	40.4	40.2	41.2	40.3	40.3	40.6	39.4
L 15 S	E-101	112	44.7	81.9	104.1	104.1	105.5	109.9	113	114.1	115.3	115.7	114	112.7	107.6	105.1	108
	E-102	113	39.6	71.2	102.9	104.1	105.6	110.6	115	116.1	117.6	119.6	119.2	118.5	115.2	112.5	111
	C-101	114	27.9	32.9	39.3	41.5	43.4	44.6	45.4	47.5	48	48.5	48.2	47.7	44.1	43.6	43.1
	TI-101	115	27.3	28.9	30.8	31.5	32.4	32.8	33	33.1	33	33	32.7	32.4	32.2	32.6	31.7
	TI-102	116	27.2	28.8	30.7	31.5	32.2	32.7	32.8	33.1	33	33.2	32.9	32.7	32.5	32.3	31.9
	TO-101	117	27.5	32.3	38.8	41.5	42.9	43.8	45.1	46.8	48.1	48.3	48.1	47.1	44.3	43.7	43.2
	TO-102	118	27.6	32.6	38.9	41.3	43.1	43.6	44.4	46.5	47.6	47.8	47.5	45.9	43.7	43.3	42.8
	GT-101	119	34.1	38.8	44.1	44.6	45.1	54.5	47.1	48.5	47.8	45.3	46.9	43.6	44.8	39.7	40.4
	GD-101	120	30	34.4	39.9	39.9	40.7	41.9	44.2	47	43.8	42.2	44.4	42.1	42.4	41.3	39.4
	GT-102	213	33.7	38.2	43.1	44.2	45.6	45.7	46.5	48.3	46.9	45.5	46.3	44.6	44.7	40.8	42.8
	GT-102	214	31.8	35.5	39.8	41.4	42.7	44.1	42.9	45.6	45.2	44.6	44.6	44.3	73.7	42.4	43.5
L 25 S	E-151	201	47.1	78	93.3	94.2	97.2	99.9	103	106.2	106.7	104.2	102.9	100.5	93.9	93.9	89.9
	E-152	202	39.2	74.9	99.5	101.7	105.6	108	112	115.7	118.9	116.2	115.7	113.7	106.8	106.3	103
	C-151	203	26.9	29.3	38.5	41.4	42.4	41.7	43.2	46.3	48	47.9	47.4	46.3	42.8	42.3	42.9
	TI-151	204	27.1	29.1	30.9	31.9	32.8	33.1	33.7	33.5	33.5	34	33.7	33.3	32.7	32.7	32.3
	TI-152	205	27	28.7	30.4	31.3	31.9	32	33.7	33.3	33.2	33.4	33	32.6	31.9	32	31.6
	TO-151	206	27	30	38.7	41.3	42.4	42.8	44.3	46.4	48	47.9	47.1	46	42.8	42.2	42.7
	TO-152	207	27.3	30.4	38.4	40.9	41.1	41.2	44.2	46.2	47.7	46.7	46.7	43.9	42.7	41.2	41.5
	GT-151	208	34.6	37.7	42.2	42.4	42.9	43.2	45.8	47.4	46.5	45.5	45.8	42	43.5	39.7	40
	GD-151	209	31.4	35.5	38.2	38.2	38.8	40.3	42.3	44.6	43.2	42.9	43.6	41.2	42	40	39.4
	GT-152	210	34.3	38	40.9	42.4	41.6	42.9	44.6	47.2	46.2	46.1	45.5	41.8	44.5	40.6	41.5
	GT-152	211	33.1	35.8	37.8	38.4	37.6	38.6	40.2	44	42.6	42.8	42.7	38.7	42.5	38	39
TA	212	31.2	33.3	33.9	37	37	36	36.2	36.1	37.4	37.7	38.3	37.9	37.5	36.6	36.9	
Rad			32.49	38.1	45.21	49.08	53.37	56.44	57.7	57.28	57.07	56.26	51.53	47.25	40.5	33.81	29.8



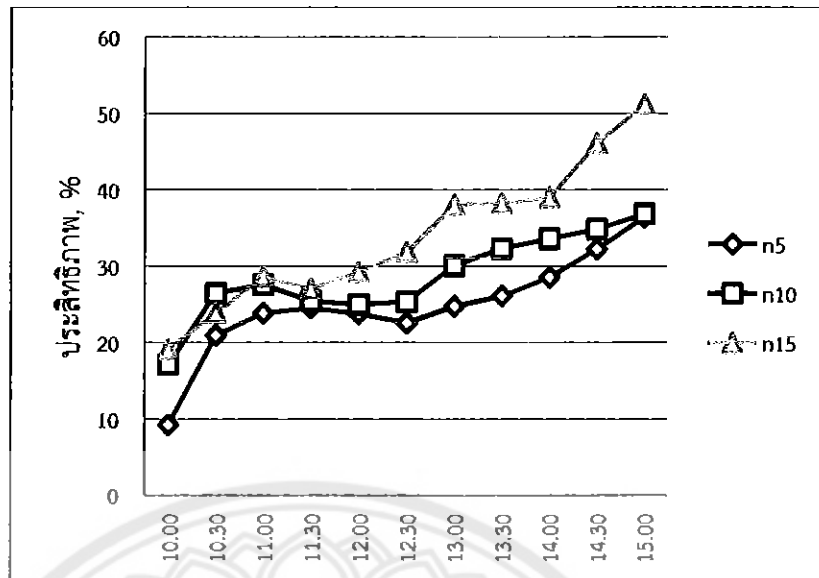
การทดลองต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 5, 10 และ 15 โค้งเดี่ยว



กราฟ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556

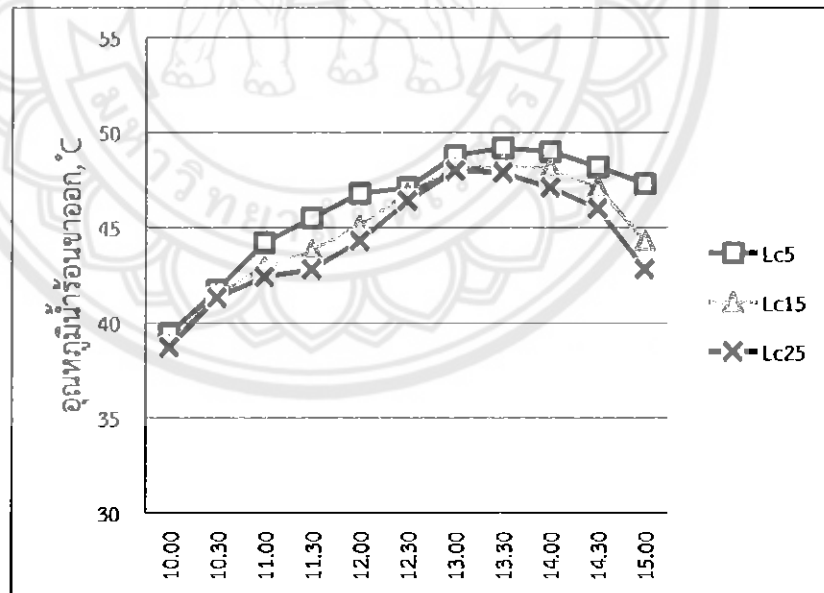


กราฟ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556

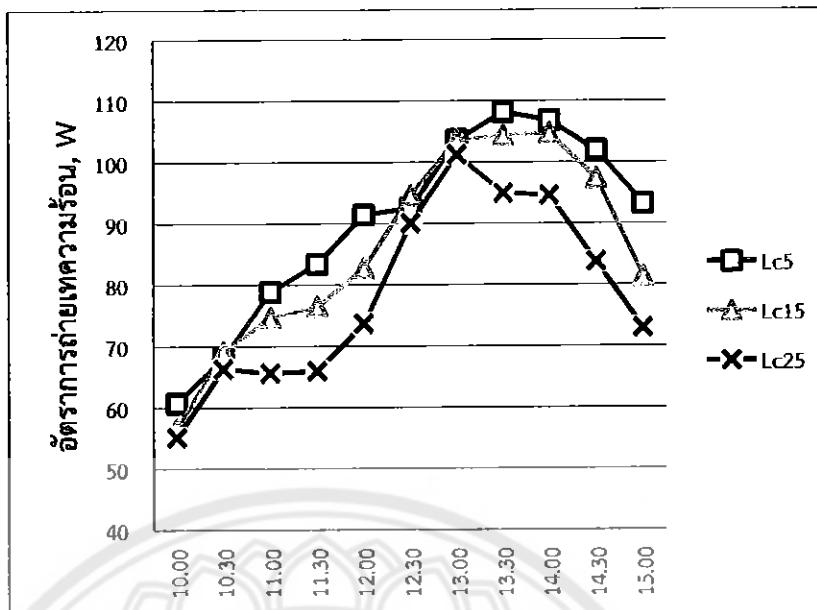


กราฟ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเทียบกับเวลา ณ วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556

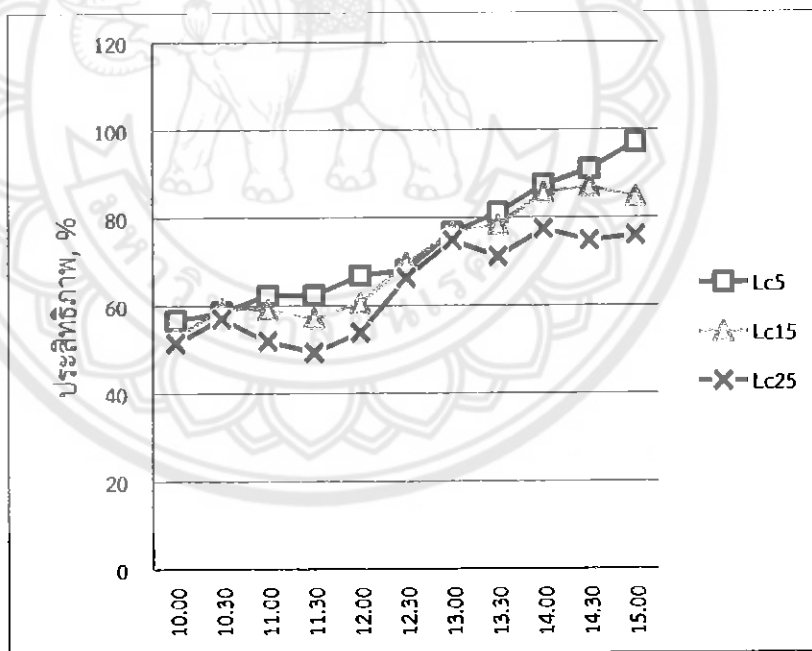
การทดลองต่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว โดยมีความยาวส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m



กราฟ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้ากับขาออกเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556



กราฟ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556



กราฟ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเทียบกับเวลา ณ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556



ตารางที่ ค.1 แสดงสมบัติของ R-134a ที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว [9]

T °C	P MPa	ρ		Enthalpy		Entropy		C_p	
		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	337.00	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	0.660
-60	0.01594	1471.0	1.077	123.96	361.51	0.6871	1.8016	1.220	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	0.740
-30	0.08436	1385.9	0.22596	161.10	380.45	0.8498	1.7519	1.26	0.771
-28	0.09268	1380.0	0.20682	163.62	381.70	0.8601	1.7497	1.264	0.778
-26.07	0.10132	1374.3	0.19016	166.07	382.90	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	0.17410	168.70	384.19	0.8806	1.7455	1.273	0.791
-22	0.12160	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	0.9110	1.7399	1.286	0.812
-16	0.15721	1344.1	0.12556	178.97	389.11	0.9211	1.7383	1.291	0.820
-14	0.17074	1338.0	0.11610	181.56	390.33	0.9311	1.7367	1.296	0.827
-12	0.18516	1331.8	0.10749	184.16	391.55	0.9410	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	189.40	393.95	0.9608	1.7323	1.312	0.850
-6	0.23418	1313.0	0.08591	192.03	395.15	0.9707	1.7310	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	200.00	398.68	1.0000	1.7274	1.335	0.883
2	0.31450	1287.1	0.06470	202.68	399.84	1.0097	1.7263	1.341	0.892

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) แสดงสมบัติของ R-134a ที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว [9]

T °C	P MPa	ρ kg/m ³		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/(kg·K)		c_p kJ/(kg·K)	
		Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor
4	0.33755	1280.5	0.06042	205.37	401.00	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	0.910
8	0.38749	1267.0	0.05284	210.80	403.27	1.0387	1.7233	1.360	0.920
10	0.41449	1260.2	0.04948	213.53	404.40	1.0483	1.7224	1.367	0.930
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	0.950
16	0.50413	1239.3	0.04081	221.80	407.70	1.0770	1.7199	1.388	0.960
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	227.40	409.84	1.0960	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	1.420	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	0.81530	1179.3	0.02516	244.55	415.90	1.1527	1.7142	1.457	1.058
34	0.86250	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
38	0.96301	1154.9	0.02116	253.37	418.69	1.1809	1.7122	1.489	1.104
40	1.01650	1146.5	0.01999	256.35	419.58	1.1903	1.7115	1.500	1.120
42	1.07210	1137.9	0.01890	259.35	420.44	1.1997	1.7108	1.513	1.138
44	1.13000	1129.2	0.01786	262.38	421.28	1.2091	1.7101	1.525	1.156
46	1.19010	1120.3	0.01689	265.42	422.09	1.2185	1.7094	1.539	1.175
48	1.25270	1111.3	0.01598	268.49	422.88	1.2279	1.7086	1.553	1.196
50	1.31770	1102.0	0.01511	271.59	423.63	1.2373	1.7078	1.569	1.218
52	1.38520	1092.6	0.01430	274.71	424.35	1.2468	1.7070	1.585	1.241
58	1.60330	1062.8	0.01212	284.25	426.29	1.2752	1.7041	1.641	1.322
60	1.68150	1052.4	0.01146	287.49	426.86	1.2847	1.7031	1.663	1.354
62	1.76250	1041.7	0.01085	290.77	427.37	1.2943	1.7019	1.686	1.388

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) แสดงสมบัติของ R-134a ที่สถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว [9]

T °C	P MPa	ρ		Enthalpy		Entropy		C_p	
		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)
64	1.84640	1030.7	0.01026	294.08	427.84	1.3039	1.7007	1.712	1.426
66	1.93340	1019.4	0.00970	297.44	428.25	1.3136	1.6993	1.740	1.468
68	2.02340	1007.7	0.00917	300.84	428.61	1.3234	1.6979	1.772	1.515
70	2.11650	995.6	0.00867	304.29	428.89	1.3332	1.6963	1.806	1.567
72	2.21300	983.1	0.00818	307.79	429.10	1.3430	1.6945	1.846	1.626
74	2.31270	970.0	0.00772	311.34	429.23	1.353	1.6926	1.89	1.693
76	2.41590	956.5	0.00728	314.96	429.27	1.3631	1.6905	1.941	1.770
78	2.52270	942.3	0.00686	318.65	429.20	1.3733	1.6881	2.000	1.861
80	2.63310	927.4	0.00646	322.41	429.02	1.3837	1.6855	2.069	1.967
85	2.92590	886.2	0.00550	332.27	427.91	1.4105	1.6775	2.313	2.348
90	3.24450	836.9	0.00461	343.01	425.48	1.4392	1.6663	2.766	3.064
95	3.59160	771.6	0.00374	355.43	420.60	1.4720	1.649	3.961	4.942
100	3.97210	646.7	0.00265	374.02	407.08	1.5207	1.6093	-	-
101.03	4.05600	513.3	0.00195	389.79	389.79	1.5593	1.5593	∞	∞



ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น. – 16:00 น.

$$\text{จาก } Q_{in} = I_c A_c$$

โดยที่ Q_{in} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่แผงได้รับ (W)

I_c คือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ (W/m^2)

A_c คือ แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ = $0.1934 m^2$

$$\text{วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น. : } Q_{in} = 608.7 \times 0.237 = 144.3 W$$

2. การคำนวณค่าอัตราการความร้อนที่ได้รับ ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น. – 16:00 น.

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

โดยที่ Q_{out} คือ ความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ถ่ายเทให้น้ำในถังน้ำร้อน (W)

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

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($kJ/kg \cdot K$)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออก

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 5 cm

$$Q_{st} = (0.00167 \times 4180 \times 15.85) = 110.6 W$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 15 cm

$$Q_{st} = (0.00167 \times 4180 \times 14.65) = 102.3 W$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 25 cm

$$Q_{st} = (0.00167 \times 4180 \times 14.1) = 98.43 W$$

3. การคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น.–16:00 น.

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

โดยที่ η_c คือ ค่าประสิทธิภาพการทำงาน

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 5 cm

$$\eta_c = (110.6/144.3) \times 100\% = 76.7 \%$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 15 cm

$$\eta_c = (102.3/144.3) \times 100\% = 70.89 \%$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 25 cm

$$\eta_c = (98.43/144.3) \times 100\% = 68.23 \%$$

4. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ
ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น. – 16:00 น.

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

โดยที่ dQ_{in} คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ได้รับ

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

A_c คือ พื้นที่แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ = 0.1934 m^2

$$\text{วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น. : } dQ_{in} = (0.02 \times 608.7 \times 0.237) = 2.89 \text{ W}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล} = (2.89/144.3) \times 100\% = 2\%$$

5. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับ ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา
9:00 น. – 16:00 น.

$$\text{จาก } dQ = \sqrt{\{(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 + (c_p\dot{m}_c dT_{wo})^2 + (-c_p\dot{m}_c dT_{wi})^2\}}$$

โดยที่ dQ คือ ค่าความผิดพลาดของค่าอัตราความร้อนที่ได้รับ (W)

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

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

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

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 5 cm

$$(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 = (0.1 \times 0.00167 \times 4180 \times 15.85)^2 = 122.4 \text{ W}$$

$$(c_p\dot{m}_c dT_{wo})^2 = (4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$(-c_p\dot{m}_c dT_{wi})^2 = (-4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$dQ = \sqrt{(122.4 + 48.7 + 48.7)} = 14.83 \text{ W}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล} = (14.83/110.6) \times 100\% = 13.4\%$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 15 cm

$$(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 = (0.1 \times 0.00167 \times 4180 \times 14.65)^2 = 104.6 \text{ W}$$

$$(c_p\dot{m}_c dT_{wo})^2 = (4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$(-c_p\dot{m}_c dT_{wi})^2 = (-4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$dQ = \sqrt{(104.6 + 48.7 + 48.7)} = 14.21 \text{ W}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล} = (14.21/102.3) \times 100\% = 13.89\%$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นงรอบ 15 โค้งเลี้ยว ความยาวส่วนควมแน่น 25 cm

$$(c_p(T_{wo} - T_{wi})d\dot{m})^2 = (0.1 \times 0.00167 \times 4180 \times 14.1)^2 = 96.9 \text{ W}$$

$$(c_p\dot{m}_c dT_{wo})^2 = (4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$(-c_p\dot{m}_c dT_{wi})^2 = (-4108 \times 0.00167 \times 1)^2 = 48.7 \text{ W}$$

$$dQ = \sqrt{(96.9 + 48.7 + 48.7)} = 13.94 \text{ W}$$

ดังนั้น ค่าความผิดพลาดของข้อมูล = $(13.94/98.43) \times 100\% = 14.16\%$

6. การคำนวณหาค่าความผิดพลาดของประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_c) ทุกๆ 30 นาที ณ ช่วงเวลา 9:00 น. – 16:00 น.

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

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556 ที่เวลา 13:00 น.

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว ความยาวส่วนควบแน่น 5 cm

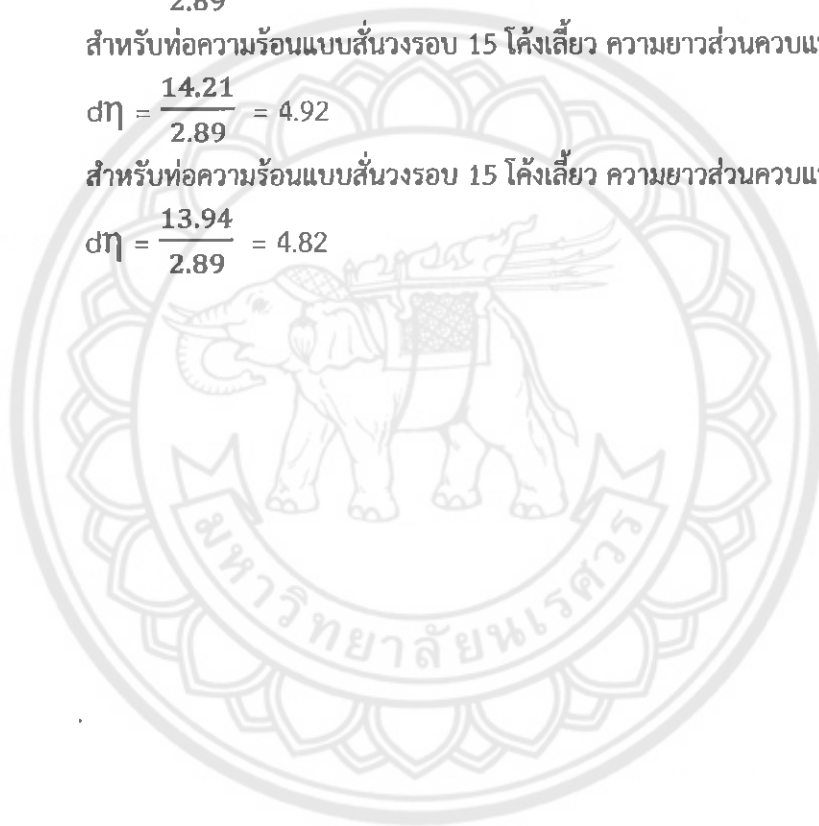
$$d\eta = \frac{14.83}{2.89} = 5.13$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว ความยาวส่วนควบแน่น 15 cm

$$d\eta = \frac{14.21}{2.89} = 4.92$$

สำหรับท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว ความยาวส่วนควบแน่น 25 cm

$$d\eta = \frac{13.94}{2.89} = 4.82$$



ตาราง ง.1 การคำนวณของการทดลองหาค่าความร้อนแบบสั่นวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5, 10 และ 15

วันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2556

เวลา	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00
$A_c (m^2)$	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
$I_b (W/m^2)$	301	309	312	326	332	340	340	350	350	352	346
$\dot{m} (kg/s)$	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167
$C_p (kg/kg.s)$	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180
$\Delta T_5 (^{\circ}C)$	0.7	2.85	3.5	3.9	3.9	4	4.2	4.2	4.25	4.3	4.2
$\Delta T_{10} (^{\circ}C)$	1.3	3.6	4.05	4.05	4.1	4.5	5.1	5.2	5	4.65	4.25
$\Delta T_{15} (^{\circ}C)$	3.25	4.2	4.3	4.8	5.65	6.45	6.15	5.8	6.15	5.9	3.25
$I_A (W)$	52.97	94.97	102.4	111	114.5	123.8	118.4	112.3	103.9	93.09	80.49
$Q_5 (W)$	4.886	19.89	24.43	27.22	27.22	27.92	29.32	29.32	29.67	30.02	29.32
$Q_{10} (W)$	9.075	25.13	28.27	28.27	28.62	31.41	35.6	36.3	34.9	32.46	29.67
$Q_{15} (W)$	10.12	22.69	29.32	30.02	33.51	39.44	45.02	42.93	40.49	42.93	41.19
$\eta_5 (\%)$	9.225	20.95	23.86	24.53	23.78	22.55	24.77	26.11	28.57	32.24	36.43
$\eta_{10} (\%)$	17.13	26.46	27.61	25.47	25	25.37	30.07	32.33	33.61	34.87	36.86
$\eta_{15} (\%)$	19.11	23.89	28.63	27.05	29.27	31.85	38.03	38.23	38.99	46.12	51.17
$dI_A (W)$	1.059	1.899	2.048	2.22	2.29	2.477	2.368	2.246	2.077	1.862	1.61
$dQ_5 (W)$	1.102	2.221	2.635	2.896	2.896	2.962	3.094	3.094	3.127	3.16	3.094
$dQ_{10} (W)$	1.341	2.7	2.995	2.995	3.028	3.293	3.694	3.762	3.627	3.393	3.127
$dQ_{15} (W)$	1.414	2.474	3.094	3.16	3.493	4.066	4.609	4.405	4.167	4.405	4.235
$d\eta_5 (\%)$	1.04	1.169	1.287	1.305	1.265	1.196	1.307	1.377	1.505	1.697	1.922
$d\eta_{10} (\%)$	1.266	1.422	1.462	1.349	1.322	1.33	1.56	1.675	1.746	1.822	1.942
$d\eta_{15} (\%)$	1.335	1.303	1.51	1.424	1.525	1.642	1.947	1.961	2.006	2.366	2.631

ตาราง ง.2 การคำนวณของการทดลองหาค่าความร้อนแบบสัณฐานวงรอบที่มีจำนวนโค้งเลี้ยว 5, 10 และ 15

วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2556

เวลา	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00
$A_c (m^2)$	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
$I_a (W/m^2)$	312	320	323	329	335	339	344	347	348	356	354
$\dot{m} (kg/s)$	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167
$C_p (kg/kg.s)$	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180
$\Delta T_5 (^{\circ}C)$	1.75	1.8	3.05	3.25	4.05	4.35	4.55	3.95	3.75	3.2	3.15
$\Delta T_{10} (^{\circ}C)$	2.5	3.7	3.8	4.15	4.45	5.05	5.45	4.25	4	3.65	3.5
$\Delta T_{15} (^{\circ}C)$	3.75	4.4	4.85	6	6	6.8	7.35	6.45	6.45	6.1	5.85
$IA (W)$	85.79	98	104.6	111.5	114.2	123.6	123.6	114.3	101.9	90.39	78.8
$Q_5 (W)$	12.22	12.57	21.29	22.69	28.27	30.37	31.76	27.57	26.18	22.34	21.99
$Q_{10} (W)$	17.45	25.83	26.53	28.97	31.06	35.25	38.04	29.67	27.92	25.48	24.43
$Q_{15} (W)$	26.18	30.71	33.86	41.88	41.88	47.47	51.31	45.02	45.02	42.58	40.84
$\eta_5 (%)$	14.24	12.82	20.36	20.35	24.75	24.56	25.7	24.12	25.7	24.71	27.9
$\eta_{10} (%)$	20.34	26.36	25.36	25.99	27.19	28.51	30.79	25.95	27.41	28.19	31
$\eta_{15} (%)$	30.51	31.34	32.37	37.58	36.66	38.39	41.52	39.39	44.2	47.11	51.82
$dIA (W)$	1.716	1.96	2.092	2.229	2.285	2.473	2.471	2.286	2.037	1.808	1.576
$dQ_5 (W)$	1.571	1.598	2.347	2.474	2.995	3.193	3.326	2.929	2.798	2.442	2.41
$dQ_{10} (W)$	2.005	2.765	2.83	3.061	3.259	3.661	3.93	3.127	2.962	2.732	2.635
$dQ_{15} (W)$	2.798	3.226	3.527	4.303	4.303	4.848	5.225	4.609	4.609	4.371	4.201
$d\eta_5 (%)$	0.915	0.815	1.122	1.11	1.311	1.291	1.346	1.281	1.373	1.351	1.529
$d\eta_{10} (%)$	1.169	1.411	1.353	1.373	1.427	1.48	1.59	1.368	1.454	1.511	1.672
$d\eta_{15} (%)$	1.63	1.646	1.686	1.93	1.883	1.961	2.114	2.016	2.263	2.418	2.666

ตาราง ง.3 การคำนวณของการทดลองหาค่าความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งเดี่ยว โดยมีความยาว
ส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m

วันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2556

เวลา	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00
A_c (m ²)	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
I_a (W/m ²)	445.7	501.9	546	562.1	588.1	594.3	608.7	584.1	551.8	488.6	439.7
\dot{m} (kg/s)	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167
C_p (kg/kg.s)	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180
ΔT_5 (°C)	7.05	9.25	10.8	12.65	13.6	14.6	15.85	15.9	16.5	16.05	14.8
ΔT_{15} (°C)	5.1	6.3	8.35	9.1	12	12.7	14.65	14.9	14.2	14.95	14.35
ΔT_{25} (°C)	5	6.1	8.45	9.3	10.7	11.85	14.1	14.05	13.45	13.8	13.7
I_A (W)	105.6	119	129.4	133.2	139.4	140.8	144.3	138.4	130.8	115.8	104.2
Q_5 (W)	49.21	64.57	75.39	88.3	94.94	101.9	110.6	111	115.2	112	103.3
Q_{15} (W)	35.6	43.98	58.29	63.52	83.77	88.65	102.3	104	99.12	104.4	100.2
Q_{25} (W)	34.9	42.58	58.99	64.92	74.69	82.72	98.43	98.08	93.89	96.33	95.63
η_5 (%)	46.59	54.28	58.26	66.29	68.11	72.36	76.7	80.18	88.07	96.75	99.14
η_{15} (%)	33.7	36.97	45.04	47.68	60.1	62.94	70.89	75.14	75.8	90.12	96.13
η_{25} (%)	33.04	35.8	45.58	48.73	53.59	58.73	68.23	70.85	71.79	83.19	91.77
dI_A (W)	2.113	2.379	2.588	2.664	2.788	2.817	2.885	2.769	2.616	2.316	2.084
dQ_5 (W)	11.03	11.8	12.42	13.25	13.7	14.19	14.83	14.85	15.17	14.93	14.29
dQ_{15} (W)	10.49	10.81	11.46	11.74	12.95	13.27	14.21	14.34	13.99	14.37	14.06
dQ_{25} (W)	10.47	10.75	11.5	11.82	12.38	12.88	13.94	13.92	13.62	13.79	13.74
$d\eta_5$ (%)	5.221	4.958	4.8	4.971	4.913	5.037	5.139	5.365	5.8	6.448	6.856
$d\eta_{15}$ (%)	4.967	4.543	4.43	4.406	4.645	4.71	4.926	5.18	5.349	6.203	6.748
$d\eta_{25}$ (%)	4.956	4.519	4.444	4.435	4.441	4.572	4.832	5.026	5.209	5.956	6.595

ตาราง ง.4 การคำนวณของการทดลองห่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ 15 โค้งแล้ว โดยมีความยาว
ส่วนควบแน่น 0.05, 0.15 และ 0.25 m

วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2556

เวลา	10.00	10.30	11.00	11.30	12.00	12.30	13.00	13.30	14.00	14.30	15.00
A_c (m ²)	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237	0.237
I_a (W/m ²)	452.1	490.8	533.7	564.4	576.8	572.8	570.7	562.6	515.3	472.5	405
\dot{m} (kg/s)	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167	0.00167
C_p (kg/kg.s)	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180	4,180
ΔT_s (°C)	8.7	9.75	11.3	11.95	13.1	13.25	14.85	15.5	15.3	14.6	13.35
ΔT_{15} (°C)	8.1	9.9	10.7	10.95	11.85	13.55	14.85	14.95	15	13.95	11.65
ΔT_{25} (°C)	7.9	9.5	9.4	9.45	10.55	12.9	14.5	13.6	13.55	12	10.45
I_A (W)	107.1	116.3	126.5	133.8	136.7	135.8	135.3	133.3	122.1	112	95.99
Q_s (W)	60.73	68.06	78.88	83.42	91.45	92.49	103.7	108.2	106.8	101.9	93.19
Q_{15} (W)	56.54	69.11	74.69	76.44	82.72	94.59	103.7	104.4	104.7	97.38	81.32
Q_{25} (W)	55.15	66.32	65.62	65.97	73.65	90.05	101.2	94.94	94.59	83.77	72.95
η_s (%)	56.68	58.51	62.36	62.36	66.89	68.13	76.64	81.15	87.45	91.01	97.09
η_{15} (%)	52.77	59.41	59.05	57.14	60.51	69.68	76.64	78.27	85.74	86.96	84.73
η_{25} (%)	51.47	57.01	51.88	49.32	53.87	66.33	74.83	71.2	77.45	74.8	76
dI_A (W)	2.143	2.326	2.53	2.675	2.734	2.715	2.705	2.667	2.443	2.24	1.92
dQ_s (W)	11.59	11.99	12.64	12.92	13.46	13.53	14.31	14.65	14.54	14.19	13.58
dQ_{15} (W)	11.38	12.05	12.38	12.49	12.88	13.67	14.31	14.37	14.39	13.87	12.79
dQ_{25} (W)	11.31	11.89	11.85	11.87	12.32	13.36	14.14	13.7	13.67	12.95	12.27
$d\eta_s$ (%)	5.409	5.154	4.995	4.831	4.922	4.983	5.292	5.492	5.954	6.335	7.072
$d\eta_{15}$ (%)	5.309	5.18	4.894	4.667	4.711	5.036	5.292	5.387	5.892	6.191	6.663
$d\eta_{25}$ (%)	5.277	5.112	4.686	4.438	4.505	4.921	5.227	5.136	5.598	5.781	6.394