



ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบ  
แผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

Effect of Water Flow Rate on Thermal Performance of Flat Plate Solar  
Collector with Closed-loop oscillating Heat pipe

นายจิรวุฒิ

พูลศรี

นายณัฐพล

ปุญญะเขียว

นายปฏิพันธ์

ปฏิรูปา

ปริญญาานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2561



### ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล

ชื่อหัวข้อโครงการ : ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อน  
ของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสันวงรอบ

ผู้ดำเนินโครงการ : นายจิรวุฒน์ พูลศรี รหัสสนิสิต 58362087  
: นายณัฐพล ปุยภูเขียว รหัสสนิสิต 58362261  
: นายปฏิพันธ์ ปฏิรูปา รหัสสนิสิต 58362483

อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2561

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.ปฐมศก วิไลพล)

.....กรรมการ

(ผศ.นพรัตน์ สีหะวงษ์)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	: ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ	
ผู้ดำเนินโครงการงาน	: นายจิรววัฒน์ พูลศรี	รหัสนิสิต 58362087
	: นายณัฐพล ปุยภูเขียว	รหัสนิสิต 58362261
	: นายปฏิพันธ์ ปฏีรูปา	รหัสนิสิต 58362483
อาจารย์ที่ปรึกษา	: รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์	
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	: 2561	

---

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสงที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์เป็นแบบแผ่นเรียบ ขนาดความกว้าง 107.5 cm ยาว 171.5 cm สูง 10 cm ประกอบด้วยท่อความร้อนแบบส่นวงรอบจำนวน 17 ท่อ ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบสร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm และ 20 โค้งเลี้ยว ใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่มีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ ทำการทดสอบปรับอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ และปรับค่าความเข้มแสงของชุดจำลองแสงเทียมที่ใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เมื่อแผ่นดูดกลืนได้รับความร้อนจากชุดจำลองแสงเทียมจะถ่ายเทความร้อนให้กับท่อความร้อนที่ส่วนทำระเหย หลังจากนั้นท่อความร้อนจะระบายความร้อนออกจากท่อความร้อนที่ส่วนควบแน่นซึ่งพันรอบท่อทองแดงที่มีน้ำไหลผ่าน จากการทดลองทั้งหมดพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง แต่จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามค่าอัตราการไหลของน้ำ และพบว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 73% ณ ค่าความเข้มแสงในช่วง 860 ถึง 985 W/m<sup>2</sup> และอัตราการไหลในช่วง 2.0 ถึง 3.0 L/min

**Project title** : Effect of Water Flow Rate on Thermal Performance of Flat Plate Solar Collector with Closed-loop Oscillating Heat pipe

**Name** : Mr.Jirawat Poonsri Code 58362087  
: Mr.Nattapon Puiphookhiew Code 58362261  
: Mr.Pathipan Pathirupa Code 58362483

**Project adviser** : Assoc. Prof. Dr. Piyanun Charoensawan

**Department** : Mechanical Engineering

**Academic Year** : 2019

---

### Abstract

This project aims to study the effect of water flow rate and solar intensity on thermal performance of flat plate solar collector with closed-loop oscillating heat pipe (CLOHP). The collector plate was  $107.5 \times 171.5 \times 10 \text{ cm}^3$  in size and consisted of 17 pipes of CLOHPs. Each CLOHP was made of a copper capillary tube with 1.5 mm inside diameter, 2.8 mm outside diameter and 20 turns. The distilled water was used as the working fluid with 50% filling ratio of total internal tube volume. During the experiment, the water flow rate at the inlet of solar collector and the solar intensity of the artificial solar simulator with using halogen lamps as a light source were adjusted. When the absorber plate received heat from the solar simulator, heat was transferred to the evaporator of CLOHP. Then heat was transferred from the condenser part of CLOHP to the cooling water that flowing through the copper tube wrapped by this section. From all experimental results, the thermal performance of solar collector clearly improved with an increase in the solar intensity from 578 to 985  $\text{W/m}^2$ . However in the range of 1.5-3.0 L/min water flow rates, the thermal performance was slightly different. It can be concluded that the flat plate solar collector with CLOHPs has the maximum efficiency about 73% at the solar intensity of 860-985  $\text{W/m}^2$  and the water flow rate of 2.0-3.0 L/min.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ จะประสบความสำเร็จไม่ได้หากปราศจากบุคคลที่มีความสำคัญ ดังต่อไปนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้แนวทางการแก้ปัญหาตลอดจนให้ความไว้วางใจในการทำงานเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปฐมศก วิไลพล และ ผศ.นพรัตน์ สีหะวงษ์ กรรมการสอบโครงการ ผู้ซึ่งให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขรูปแบบโครงการให้ออกมาได้ดีที่สุด ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำวิธีการใช้และซ่อมแซมเครื่องมือต่างๆ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดทำโครงการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ เอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี โดยเฉพาะการให้การศึกษาที่ดีแก่ผู้จัดทำตลอดมา

จิรวัดน์	พูลศรี
ณัฐพล	ปุยภูเขียว
ปฏิพันธ์	ปฏิรูปา

## สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 งบประมาณ	6
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์	7
2.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	9
2.3 ท่อความร้อน	14
2.4 ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับแสงอาทิตย์	21
2.5 มาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ASHRAE Standard 93-77	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
2.7 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน	28
3.2 อุปกรณ์การทดลอง	28
3.3 หลักการทำงานของระบบและตัวแปรในการทดสอบ	33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง ณ อัตราการไหล 1.5 L/min	36
4.2 วิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสง	40
4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	42

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	45
บรรณานุกรม	46
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลอง	48
ภาคผนวก ข กราฟแสดงผลการทดลอง	52
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ	58



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ผังการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบระบบใช้ปั้มน้ำหมุนเวียน	5
รูปที่ 2.1 ไฟเฮลิโอมิเตอร์	8
รูปที่ 2.2 ไพรานอมิเตอร์	8
รูปที่ 2.3 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	9
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์เก็บความร้อน	10
รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ	11
รูปที่ 2.6 ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศ	12
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลิก	13
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของท่อความร้อน	15
รูปที่ 2.9 ท่อความร้อนที่มีวัสดุพอรู	15
รูปที่ 2.10 ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน	17
รูปที่ 2.11 ท่อความร้อนแบบแผ่นแบน	18
รูปที่ 2.12 ประเภทของท่อความร้อนแบบสั้น	20
รูปที่ 2.13 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์	21
รูปที่ 3.1 ชุดจำลองแสงเทียม	28
รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม	29
รูปที่ 3.3 ชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์	30
รูปที่ 3.4 เครื่องบันทึกข้อมูล	30
รูปที่ 3.5 ไพรานอมิเตอร์	31
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดอัตราการไหล	31
รูปที่ 3.7 เทอร์โมคัปเปิล	32
รูปที่ 3.8 ภาพจริงระบบการทำงานของชุดทดสอบ	32
รูปที่ 3.9 ภาพแสดงทางเข้า-ออก ของน้ำในระบบ	33
รูปที่ 3.10 ภาพเขียนแบบไอโซเมตริกการทำงานของชุดทดสอบ	33
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min	37
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min	38
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเท ความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min	39



## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง	40
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง	41
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) เทียบกับความเข้มแสง	41
รูปที่ 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ	42
รูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min	52
รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min	53
รูปที่ ข.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min	53
รูปที่ ข.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min	54
รูปที่ ข.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min	55
รูปที่ ข.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min	55
รูปที่ ข.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min	56
รูปที่ ข.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกกับ ความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min	57
รูปที่ ข.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min	57

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางการดำเนินงาน	5
ตารางที่ ก.1 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1	48
ตารางที่ ก.2 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2	49
ตารางที่ ก.3 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3	50
ตารางที่ ก.4 แสดงผลการทดลองเฉลี่ย	51



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันมีความนิยมในการลดการใช้พลังงาน มนุษย์ส่วนใหญ่ก็หันมาประยุกต์ใช้พลังงานทดแทน เพื่อประหยัดพลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน อย่างเช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติและอื่นๆ ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่สามารถหมดไปได้ แต่มีดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดีเป็นที่นิยมนักคือ นำมาผลิตกระแสไฟฟ้า และนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสำหรับใช้ประโยชน์ เรียกอีกอย่างว่า ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการต่างๆต่อไป ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์มี 3 ชนิด คือ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat plate collector) ตัวรับรังสีแบบพาราโบลา (Parabolic trough collector) และ ตัวรับรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศ (Evacuated glass tube collector) ข้อได้เปรียบของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่เหนือกว่าตัวรับรังสีแบบพาราโบลาและแบบท่อแก้วสุญญากาศคือ ราคาของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบถูกกว่าตัวรับรังสีแบบพาราโบลาและแบบท่อแก้วสุญญากาศ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีช่วงอุณหภูมิความร้อนต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเหมาะสำหรับการทำน้ำร้อนในครัวเรือนมากกว่า ตัวรับรังสีแบบพาราโบลา ที่มีช่วงอุณหภูมิความร้อนอยู่ที่  $290-400^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเหมาะกับการทำไอน้ำแรงดันสูง และการติดตั้งทำได้หลายรูปแบบ เช่น ติดบนหลังคาหรือติดเป็นส่วนหนึ่งของหลังคาจึงง่ายแก่การติดตั้ง

ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ ประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสง (Absorber plate) ทำจากอลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็ก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง ตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีสมบัติเลือกรังสี (Selective coating) ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ ทั้งรังสีตรง (Direct radiation) และรังสีกระจาย (Diffuse radiation) ด้านบนแผ่นรับแสงปิดทับด้วยกระจกหรือพลาสติกที่มีสมบัติโปร่งแสง

หลักการทำงานของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านกระจกหรือพลาสติกไปยังแผ่นดูดกลืน จะทำให้แผ่นดูดกลืนมีอุณหภูมิสูงขึ้นและแผ่นดูดกลืนจะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทความร้อนให้กับตัวกลางที่เป็นน้ำหรือสารทำงาน (Medium) ที่ไหลอยู่ภายในระบบท่อ น้ำหรือสารทำงานที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะถูกส่งไปเก็บยังอุปกรณ์เก็บความร้อน (Energy storage) เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถนำมาใช้ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$  เช่น การผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในบ้านเรือน เป็นต้น หลังจากนั้นมีการพัฒนาโดยการใช้ท่อความร้อน (Heat pipe) เข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

ท่อความร้อน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนประสิทธิภาพสูงที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ท่อความร้อนมีหลายชนิดหลายรูปแบบแต่เราให้ความสนใจที่จะนำท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe) มาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ท่อความร้อนแบบสั่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อความร้อนขนาดเล็กหรือระดับไมโครเมตรซึ่งมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสร้างขึ้นจากท่อคาปิลลารียาวที่ขดเป็นโค้งเลี้ยวเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ภายในมีการดูดอากาศออกและเติมสารทำงานเข้าไปในท่อ สารทำงานภายในท่อจะเรียงตัวกันเป็นแท่งสลับกันระหว่างแท่งของเหลว (Liquid slug) และฟองไอ (Vapor bubble) การถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้โดยการไหลเวียนและการสั่นในแนวแกนของสารทำงานภายในท่อความร้อนร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น ท่อความร้อนแบบสั่นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนทำระเหย (Evaporator section) มีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในส่วนแหล่งความร้อน (Heat source) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) มีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในส่วนแหล่งระบายความร้อน (Heat sink) โดยทั่วไป สามารถแบ่งท่อความร้อนแบบสั่นได้ 3 ชนิดตามโครงสร้างของท่อคือ ท่อความร้อนสั่นแบบปลายปิด (Closed-end oscillating heat pipe, CEOHP) ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบแบบมีวาล์วกันกลับ (Closed-loop oscillating heat pipe with check valves, CLOHP/CV) และท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-loop oscillating heat pipe, CLOHP) ซึ่งเราสนใจที่จะนำท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ มาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ สร้างจากท่อคาปิลลารียาวท่อเดียวที่มีการเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานร่วมกับการไหลเวียนของสารทำงานต่างๆ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ข้อได้เปรียบของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

ที่มีเหนือกว่าท่อความร้อนสั้นแบบปลายปิดและท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบแบบมีวาล์วกันกลับคือ การไหลเวียนของสารทำงานของท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบจะมีความเป็นอิสระมากกว่า เพราะท่อ ความร้อนสั้นแบบปลายปิดปลายทั้งสองข้างไม่เชื่อมติดกันจึงทำให้การไหลเวียนไม่เป็นอิสระ สำหรับ ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบแบบมีวาล์วกันกลับการสร้างจะยุ่งยากเนื่องจากท่อมีขนาดเล็กจึงอาจทำ ให้เกิดการอุดตันบริเวณวาล์วกันกลับ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน

การศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของของไหลหล่อเย็น เช่น น้ำหรืออากาศ ที่มีต่อ สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ [3,4] พบว่า ในการทำน้ำร้อนสมรรถนะตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ดีจะเกิดขึ้นที่อัตราการไหลของน้ำ 0.15 L/min และ 0.3 L/min ส่วนการทำอากาศร้อนสมรรถนะที่ดีจะเกิดขึ้นที่ 0.01125-0.01875 kg/m<sup>2</sup>s จากข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้นเราจึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำต่อ สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่ สร้างขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของความเข้มแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อสมรรถนะ ทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์เป็นแบบแผ่นเรียบ ขนาดความกว้าง 107.5 cm ยาว 171.5 cm สูง 10 cm ประกอบด้วยฉนวนเซรามิกหนา 2.5 cm วางอยู่ด้านล่างสุดทับด้วยแผ่นสังกะสีพ่นสีดำ ขนาด 1×1.5×0.001 m และท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบจำนวน 17 ท่อ ส่วนด้านบนตัวรับรังสีจะถูก ปิดด้วยแผ่นกระจกใสหนา 5 mm

1.3.2 ท่อความร้อนที่ใช้เป็นท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ สร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดง เส้น ผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm ความยาวส่วนทำระเหย 1 m 20 โค้งเลี้ยว และใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่มีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50 % ของปริมาตร ทั้งหมดภายในท่อ

1.3.3 ปรับอัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง 1.5 – 3.0 L/min

1.3.4 ทำการทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ในร่มโดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วยหลอดฮาโลเจนจำนวน 15 หลอด ขนาดกำลังไฟฟ้า 1500 W ปรับค่าความเข้มแสงโดยใช้เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า

1.3.5 ทำการทดสอบโดยการปรับค่าความเข้มแสงอยู่ในช่วง 500 – 1000 W/m<sup>2</sup>

1.3.6 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ทำมุมเอียง 18° จากแนวระดับ

1.3.7 ความร้อนจากตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะถูกถ่ายเทให้แก่ น้ำ ณ ส่วนควบแน่นของท่อความร้อน

1.3.8 ทำการทดสอบ ณ ห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ทราบถึงผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

1.4.2 ได้ทราบถึงผลกระทบของความเข้มแสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.5.1 ศึกษาข้อมูลพื้นฐานและทฤษฎีของพลังงานแสงอาทิตย์ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ท่อความร้อน ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ อุปกรณ์วัดพลังงานแสงอาทิตย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาการทำงานของชุดทดสอบและวิธีการทดสอบดังแสดงในแผนผังรูปที่ 1.1



ตารางที่ 1 ตารางการดำเนินงาน (ต่อ)

ขั้นตอน	ช่วงระยะเวลาการดำเนินงาน									
	2561					2562				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
2. ศึกษาการทำงาน ของชุดทดสอบ			←→							
3. ทำการทดสอบ					←→					
4. วิเคราะห์ผลการ ทดลอง							←→			
5. สรุปผลการทดลอง								←→		
6. ทำรายงาน									←→	

## 1.6 งบประมาณ

ค่าจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์ 3,000 บาท





## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่หมดสิ้น ดังนั้นหากมนุษย์สามารถนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเป็นหนทางในลดการใช้พลังงานอื่นๆ เช่น พลังงานปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และอื่นๆ

##### 2.1.1 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลมจึงทำให้ระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7% ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ  $1.495 \times 10^{11}$  m ค่าคงที่รังสีแสงอาทิตย์ (Solar constant) คือค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ  $1,367 \text{ W/m}^2$  หรือ  $432 \text{ Btu/ft}^2\text{h}$  บนพื้นผิวโลกจะมีค่าความร้อนประมาณ  $946.3 \text{ W/m}^2$

##### 2.1.2 ประเภทของรังสีที่ผิวโลก

ประเภทของรังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกเราสามารถแบ่งออกดังนี้

1. รังสีตรง (Beam or direct radiation) คือ รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวตัวรับรังสีมีทิศทางแน่นอนที่เวลาใดเวลาหนึ่ง ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดรังสีตรง คือ ไพเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) เป็นอุปกรณ์วัดรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ มีส่วนประกอบของชุดเครื่องที่ตามดวงอาทิตย์ เพื่อให้ผิวรับแสงตั้งฉากกับลำแสงจากดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.1

2. รังสีกระจาย (Diffuse radiation) คือ รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนจากชั้นบรรยากาศของโลกและวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า

3. รังสีรวม (Total or global radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบบนผิวรับแสง ในกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสี

กระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากผิวโลก อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดรังสีรวม คือ ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เป็นอุปกรณ์ที่จะวัดการแผ่รังสีอาทิตย์ บนพื้นที่ราบในช่วงสเปกตรัม 0.3  $\mu\text{m}$  ถึง 3  $\mu\text{m}$  ไพรานอมิเตอร์จะวัดรังสีอาทิตย์จากทุกทิศทาง ซึ่งอุปกรณ์นี้ใช้สำหรับการวัดรังสีรวม แต่อาจประยุกต์ใช้วัดรังสีกระจายได้โดยแหวนหรือจานบังเงา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ไพรานอมิเตอร์ [1]



รูปที่ 2.2 ไพรานอมิเตอร์ [2]

### 2.1.3 ลักษณะคลื่นพลังงานแสงอาทิตย์

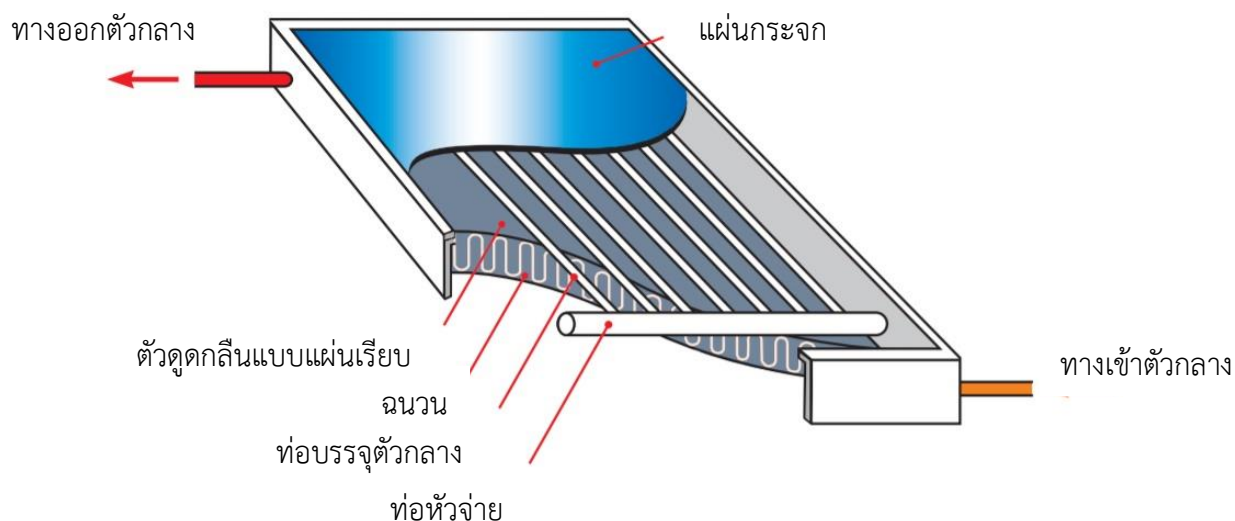
การแผ่รังสีของแสงอาทิตย์ที่มีความสำคัญต่อพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อนแบ่งเป็น 2 ช่วงคลื่น

1. รังสีแสงอาทิตย์หรือรังสีคลื่นสั้น (Solar or short-wave radiation) เป็นรังสีที่ปล่อยจากดวงอาทิตย์มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.3 ถึง 3.0  $\mu\text{m}$  ซึ่งประกอบด้วยรังสีตรงหรือรังสีกระจาย
2. รังสีคลื่นยาว (Long-wave radiation) เป็นรังสีที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมปกติจะมีความยาวคลื่นมากกว่า 3.0  $\mu\text{m}$  เช่น รังสีที่แผ่ออกจากชั้นบรรยากาศ ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ หรือวัตถุต่างๆที่อุณหภูมิปกติ

## 2.2 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar collector)

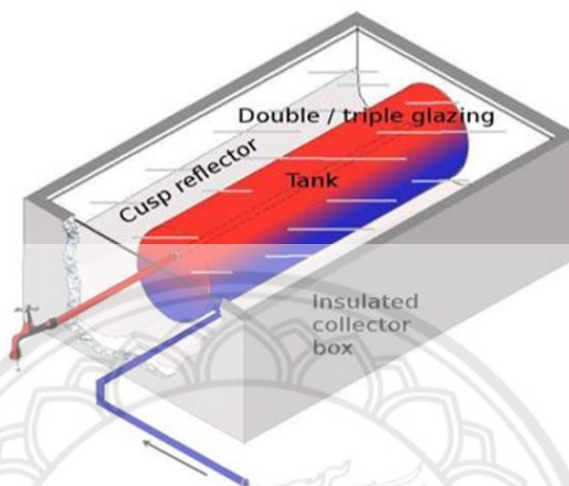
อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการดูดซับและสะสมพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และถ่ายเทความร้อนไปให้ตัวกลางที่ลำเลียงไปตามระบบท่อ ส่วนประกอบหลักของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ได้แก่

- ตัวดูดกลืน (Absorber) ลักษณะดังรูปที่ 2.3 ทำหน้าที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีสั้น (Short wave radiation) ได้ดี สะท้อนแสงน้อย อัตราการปลดปล่อยพลังงานในรูปรังสีคลื่นยาว (Long wave radiation) ต่ำและไม่ยอมให้แสงส่องผ่านได้แก่ อะลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็ก
- อุปกรณ์นำความร้อน (Heat carrier) ประกอบด้วยตัวกลางและระบบท่อนำความร้อน ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากตัวดูดกลืนไปยังอุปกรณ์ปลายทาง ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ [3]

- อุปกรณ์เก็บความร้อน (Energy storage) ทำหน้าที่เก็บสะสมความร้อนก่อนที่จะนำไปใช้งาน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์เก็บความร้อน [4]

ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งตามรูปทรงของตัวรับรังสี ได้แก่ ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ แบบท่อแก้วสุญญากาศ และแบบรางพาราโบลา

### 2.2.1 ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ

ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบประกอบด้วยตัวดูดกลืนที่เป็นแผ่นเรียบรับแสง ทำจากอลูมิเนียมหรือแผ่นเหล็กที่เคลือบด้วยสารพิเศษที่มีสมบัติเลือกรังสีช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ ด้านบนแผ่นรับแสงปิดทับด้วยกระจกหรือพลาสติก ดังรูปที่ 2.5 การทำงานของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องเข้ามาผ่านกระจกหรือพลาสติกที่เคลือบด้วยสารพิเศษที่มีสมบัติเลือกรังสีไปยังแผ่นดูดกลืนกลายเป็นพลังงานความร้อนส่งผ่านให้ตัวกลางที่เป็นน้ำหรือสารทำงานที่ไหลอยู่ภายในระบบท่อไปยังอุปกรณ์เก็บความร้อนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ โดยทั่วไปตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถนำมาใช้ผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ประโยชน์ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน  $100^{\circ}\text{C}$  เช่น การผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในบ้านเรือน เป็นต้น หลังจากนั้นมีการพัฒนาโดยการใช้ท่อความร้อนเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนภายในตัวรับรังสีแสงอาทิตย์



กรอบอลูมิเนียมรีดขึ้นรูปชุบด้วยไฟฟ้า

รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ [3]

ข้อดีของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ

- ราคาถูกกว่าแบบท่อแก้วสุญญากาศ
- ประสิทธิภาพสูงถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่าง ระหว่างอุณหภูมิตัวดูดกลืนรังสีและอากาศ

แฉดล้อมสูงมาก

- การติดตั้งทำได้หลายรูปแบบ เช่น ติดตั้งบนหลังคา ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของหลังคาเป็นผนัง
- การประกอบติดตั้งทำได้ง่าย

ข้อเสียของตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบ

- ประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบท่อแก้วสุญญากาศ (เนื่องจากมีค่าการสูญเสียความร้อนรวมที่สูงกว่า)

- ระบบรองรับการติดตั้งต้องเป็นลักษณะพื้นราบเรียบ
- ต้องการพื้นที่ติดตั้งมากกว่าแบบท่อแก้วสุญญากาศ
- ไม่เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง เช่น การผลิตไอน้ำ

### 2.2.2 ตัวรับรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศ

ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นท่อสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย หลอดแก้ว 2 ชั้น โดยระหว่างท่อแก้ว 2 ชั้นเป็นสุญญากาศ เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจากการนำและการพาความร้อน (Conductive and Convective heat losses) ท่อแก้วชั้นในพ่นสีด้วยสีดำและเคลือบด้วยสารพิเศษที่มีสมบัติเลือกรังสี ทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนและถ่ายเทความร้อนให้กับท่อชั้นในที่ทำจากโลหะทองแดงหรืออลูมิเนียมติดอยู่กับครีป (Fin) และมีตัวกลางเป็นของเหลว เช่น น้ำไหลเวียนอยู่ภายในท่อชั้นใน ทำให้ประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานสูงกว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 2.6 ตัวรับรังสีแบบท่อสุญญากาศ [3]

ข้อดีของตัวรับรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศ

- ประสิทธิภาพสูงแม้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ
- ราคาต่อสมรรถนะการทำความร้อนสูง เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง เช่น การผลิตไอน้ำ
- ขนส่งได้ง่ายกว่าเนื่องจากน้ำหนักเบาบางชนิดสามารถประกอบได้บริเวณพื้นที่ติดตั้งระบบ
- สามารถปรับทิศทางการรับรังสีอาทิตย์ของแผ่นดูดรังสีภายในท่อแก้วได้
- ติดตั้งได้หลายรูปแบบ เช่น แนวนอนราบกับพื้นหลังคาช่วยลดแรงลมปะทะและลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง

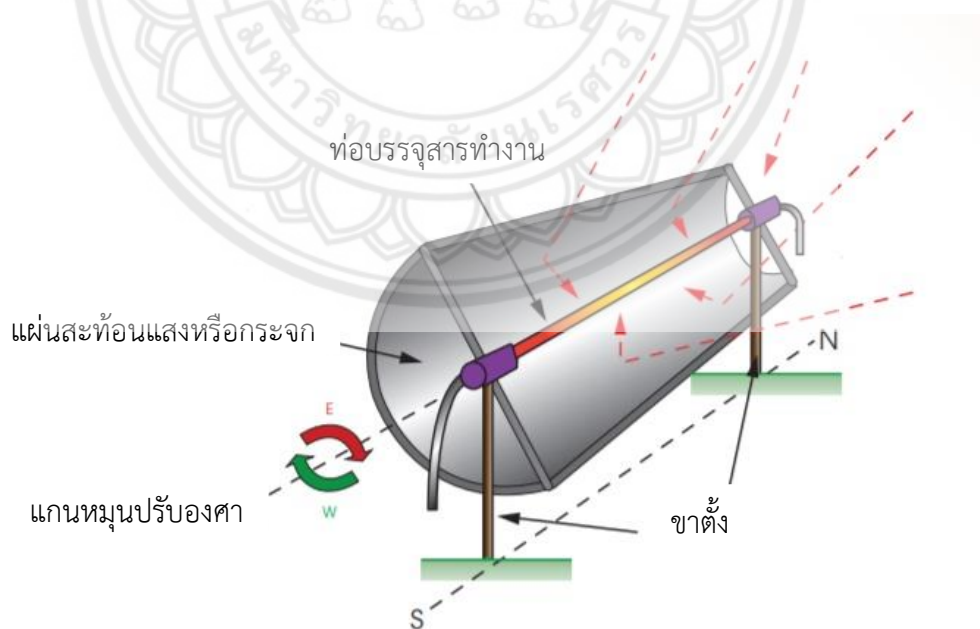


ข้อเสียของตัวรับรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศ

- ราคาสูงกว่าแบบแผ่นเรียบ
- ไม่สามารถติดตั้งแบบนอนราบได้กรณีเป็นแบบ heat pipe (ต้องมีมุมเอียง ประมาณ 25°)
- ไม่สามารถติดตั้งแบบเป็นส่วนหนึ่งของหลังคาได้
- ไม่เหมาะกับการใช้งานอุณหภูมิสูง เช่น การผลิตไอน้ำ

### 2.2.3 ตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลา

ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีแผ่นสะท้อนแสง (Reflector) รูปทรงพาราโบลาช่วยรวมแสงอาทิตย์ไปยังจุดโฟกัส ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งแนวท่อที่มีตัวกลางไหลผ่านทำให้ดูดกลืนความร้อนได้ในปริมาณสูงมากโดยมีอุณหภูมิสูงถึง 290-400°C กรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางถ้าติดตั้งตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลาจำนวนมากพอความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้น้ำกลายสภาพเป็นไอน้ำแรงดันสูงป้อนเข้าสู่โรงไฟฟ้าพลังความร้อนจากแสงอาทิตย์เพื่อนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไปตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลายังสามารถออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเพื่อรับแสงอาทิตย์จากรังสีตรงความเข้มสูงได้ตลอดทั้งวัน เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแปรรูปพลังงานให้สูงขึ้นได้อีกด้วย ดังรูป ที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบของตัวรับรังสีแบบรางพาราโบลา [3]

ข้อดีของตัวรับรังสีแบบพาราโบลิก

- เหมาะกับการใช้ผลิตไอน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากอุณหภูมิที่ผลิตออกมาได้มีอุณหภูมิสูงถึง 290-400°C
- สามารถออกแบบให้มีระบบติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าเพื่อรับ แสงอาทิตย์จากรังสีตรงความเข้มสูงได้ตลอดทั้งวัน

ข้อเสียของตัวรับรังสีแบบพาราโบลิก

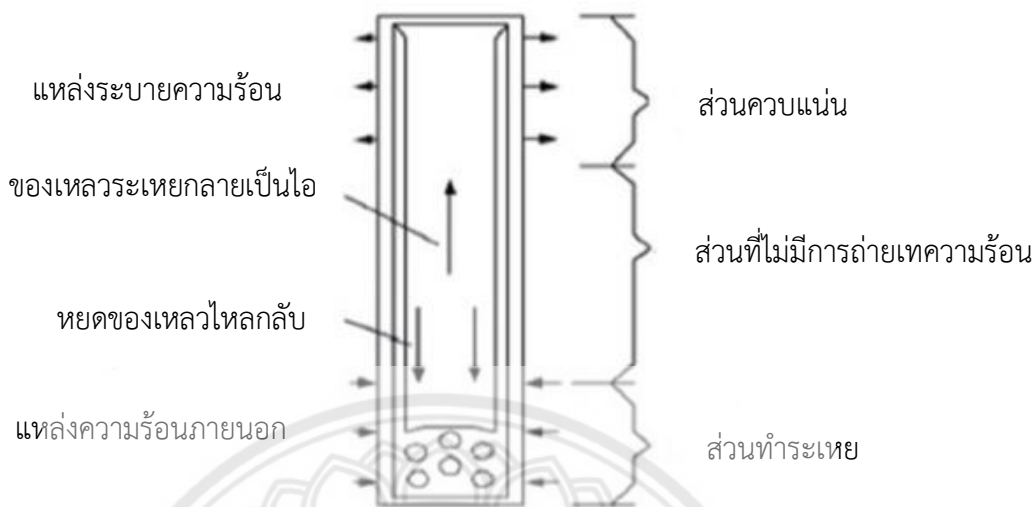
- สร้างยากและติดตั้งยาก
- มีต้นทุนในการสร้างสูง
- ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก
- ไม่เหมาะกับการใช้ในครัวเรือน

สาเหตุที่เลือกใช้ตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบในโครงการนี้ เนื่องจากตัวรับรังสีแบบแผ่นเรียบมีราคาถูกกว่าตัวรับรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศและแบบพาราโบลิก ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีช่วงอุณหภูมิน้ำร้อนต่ำกว่า 100°C ซึ่งเหมาะสำหรับการทำน้ำร้อนในครัวเรือนมากกว่าตัวรับรังสีแบบพาราโบลิก ที่มีช่วงอุณหภูมิน้ำร้อนอยู่ที่ 290-400°C ซึ่งเหมาะกับการทำไอน้ำแรงดันสูง และการติดตั้งทำได้หลายรูปแบบ เช่น ติดบนหลังคาหรือติดเป็นส่วนหนึ่งของหลังคาจึงง่ายแก่การติดตั้ง

### 2.3 ท่อความร้อน (Heat pipe)

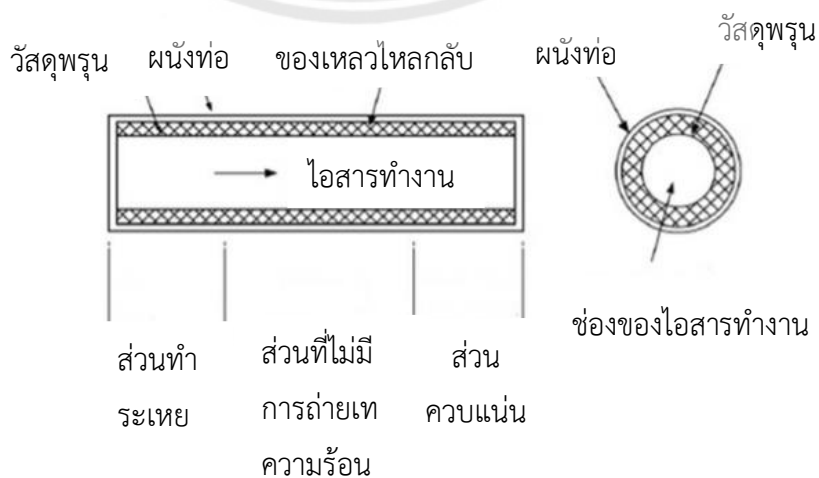
ท่อความร้อน เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบปิดสองสถานะที่มีประสิทธิภาพสูงที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก ทำงานโดยใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อ ซึ่งระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนให้กับสารรับความร้อนที่ต้องการจะถ่ายเทให้ เช่น น้ำหรืออากาศแล้วควบแน่นกลับเป็นของเหลวไหลย้อนกลับมายังส่วนทำระเหยอีกครั้ง เนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสารทำงานมีค่าสูงมากจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งโดยมีอุณหภูมิแตกต่างกันน้อย ท่อความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และส่วนควบแน่นดังแสดงในรูปที่ 2.8





รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของท่อความร้อน [4]

2.3.1 ท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพรุน (Conventional heat pipe) ท่อความร้อนแบบธรรมดาถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย Gaugler ในปี ค.ศ.1944 ณ บริษัท General motors เพื่อใช้ในระบบการทำความเย็น ท่อความร้อนที่มีวัสดุพรุนมีลักษณะเป็นท่อเหล็กสแตนเลสและมีวัสดุพรุนแบบตาข่ายติดอยู่ข้างในของผนังท่อและบรรจุของไหลทำงาน (Working fluid) ในปริมาณเล็กน้อยที่สถานะอิ่มตัวอยู่ข้างในของท่อ องค์ประกอบของท่อความร้อนแบบธรรมดาคือ ภาชนะบรรจุ (Container) ประกอบด้วยผนังท่อและปลายปิดทั้งสองด้าน โครงสร้างวัสดุพรุน (Wick structure) และของไหลทำงาน (Working Fluid) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ท่อความร้อนที่มีวัสดุพรุน [4]

หลักการทำงานคือ กระบวนการทำงานจะเริ่มต้นจากการนำความร้อนจากแหล่งความร้อนภายนอกผ่านผนังท่อและโครงสร้างวัสดุพูนที่ส่วนทำระเหยสารทำงานจะระเหยกลายเป็นไอเนื่องจากผลต่างความดันไอ (Vapor pressure difference) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอผ่านส่วนไม่มีการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนควบแน่น ไอจะควบแน่นและคายความร้อนให้กับแหล่งระบายความร้อนเป็นของเหลว หลังจากนั้นความดันคาпилลารี (Capillary pressure) ซึ่งเกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและไอ อันเนื่องมาจากค่าความตึงผิวของสารทำงานและพื้นผิวโค้ง (Menisci) ของหน้าสัมผัสจะทำหน้าที่ปั๊มของเหลวควบแน่นกลับไปยังส่วนทำระเหย

ข้อดีของท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพูน

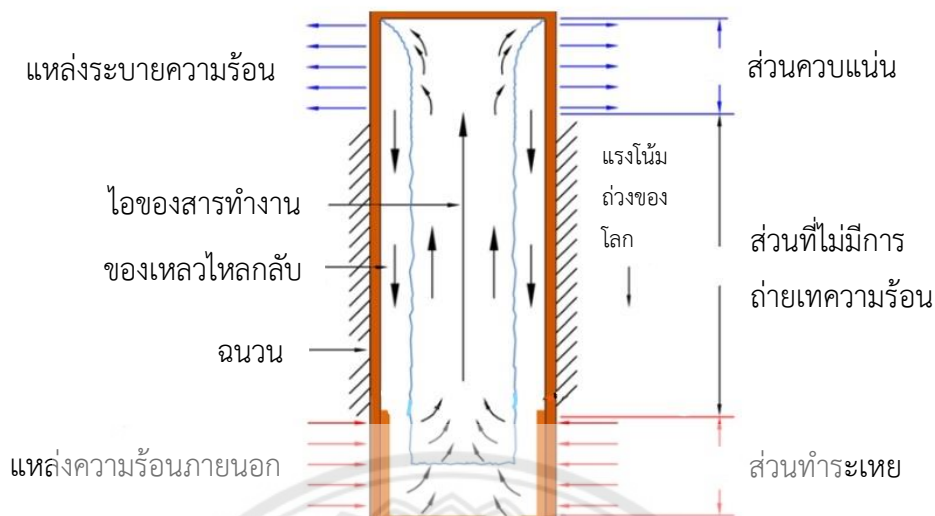
- สามารถทำงานในแนวราบได้ ก็คือ ส่วนทำระเหยสามารถวางตัวอยู่ในระดับเดียวกับส่วนควบแน่นได้
- ส่วนทำระเหยจะอยู่ต่ำหรือสูงกว่าส่วนควบแน่นก็ได้

ข้อเสียของท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพูน

- มีวิธีที่สร้างค่อนข้างยาก
- เกิดขีดจำกัดการไหลสวนทางนั่นคือ หยดของเหลวจะหลุดจากวัสดุพูนและถูกดึงเข้าไปในกระแสน้ำของไอที่ไหลไปยังส่วนควบแน่น ถ้าเกิดขึ้นมากก็จะทำให้ของเหลวที่ส่วนทำระเหยไม่เพียงพอทำให้ท่อความร้อนหยุดทำงานได้

### 2.3.2 เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two phase closed thermosyphon)

เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ มีลักษณะเป็นท่อความร้อนที่ปราศจากโครงสร้างวัสดุพูนอยู่ภายในท่อ และอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ในการไหลเวียนของเหลวควบแน่น เทอร์โมไซฟอนอาจจะวางตัวอยู่ในแนวตั้งหรือแนวเอียง ตัวท่อเทอร์โมไซฟอนประกอบด้วย ส่วนทำระเหย ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และส่วนควบแน่น โดยที่ส่วนทำระเหยต้องอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเสมอ เพราะต้องอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการทำงานของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 การทำงานในแนวตั้งจะมีการกระจายตัวของของเหลวควบแน่นรอบผิวท่อส่วนทำระเหยได้ดีกว่าแนวเอียง



รูปที่ 2.10 ท่อความร้อนเทอร์โมไซฟอน [4]

หลักการทํางาน เมื่อสารทํางานที่ส่วนระเหยได้รับความร้อนที่ปลายด้านล่างของท่อจนสารทํางานเดือดและระเหยกลายเป็นไอลอยขึ้นไปในส่วนควบแน่นที่เย็นกว่าไอจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนและควบแน่นกลายเป็นของเหลว ของเหลวที่ควบแน่นจะไหลย้อนกลับสู่ส่วนทำระเหยด้วยแรงดึงดูดของโลก

ข้อดีของเทอร์โมไซฟอน

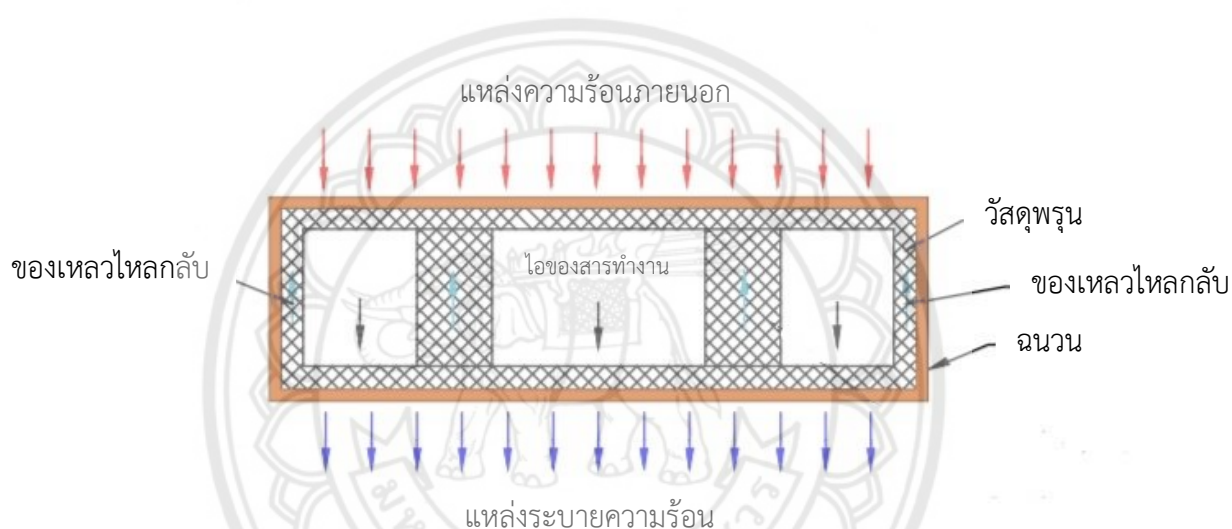
- สามารถส่งถ่ายความร้อนปริมาณมากจากปลายด้านหนึ่งไปสู่ปลายอีกด้านหนึ่งได้ ด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย
- มีค่าการนำความร้อนสูงมาก
- สร้างได้ง่ายกว่าท่อความร้อนที่ต้องบรรจุวัสดุพูนไว้ภายใน

ข้อเสียของเทอร์โมไซฟอน

- ไม่สามารถทํางานได้ในทุกตำแหน่ง เพราะของเหลวควบแน่นจะไหลกลับไปสู่ส่วนทำระเหยได้ด้วยความโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นส่วนทำระเหยต้องอยู่ต่ำกว่าส่วนควบแน่นเท่านั้น
- สมรรถนะในการส่งถ่ายความร้อนจะลดลงเมื่อมุมทํางานของเทอร์โมไซฟอนเข้าใกล้แนวแกนระดับ

### 2.3.3 ท่อความร้อนแบบแผ่นแบน (Flat plate heat pipe)

ท่อความร้อนแบบแผ่นแบนเป็นท่อความร้อนที่อาศัยความดันคาปิลลารีในการไหลเวียนของของเหลวควบแน่นเช่นกัน แต่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเป็นแผ่นแบนดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้ใช้วัสดุพอร์ซันในการดึงของเหลวกลับสู่ส่วนทำระเหยแล้ว วัสดุพอร์ซันยังช่วยในการกระจายตัวของของเหลวอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวส่วนทำระเหยทั้งหมดด้วย ประยุกต์ใช้ในการหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กเช่น Semiconductor และ Transistor หรือใช้ควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.11 ท่อความร้อนแบบแผ่นแบน [4]

### 2.3.4 ท่อความร้อนแบบสั่น (Oscillating heat pipe)

ท่อความร้อนแบบสั่น ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาขีดจำกัดการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในท่อความร้อนขนาดเล็กหรือระดับไมโครเมตร ซึ่งมีค่าการถ่ายเทความร้อนสูงสร้างขึ้นจากท่อคาปิลลารียาวที่ขดเป็นโค้งเลี้ยว เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนและแหล่งระบายความร้อน ภายในมีการดูดอากาศออกและเติมสารทำงานเข้าไปในท่อ สารทำงานภายในท่อจะเรียงตัวกันเป็นแท่งสลับกันระหว่างแท่งของเหลวและฟองไอ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้โดยการไหลเวียนและการสั่นในแนวแกนของสารทำงานภายในท่อความร้อนร่วมกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงาน ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะดีขึ้นเนื่องจากมีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น

ท่อความร้อนแบบสั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนทำระเหยมีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในตำแหน่งหรือพื้นที่ของแหล่งความร้อนภายนอก ส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและส่วนควบแน่นมีตำแหน่งการใช้งานอยู่ในส่วนที่ต้องการระบายความร้อนออก

สาเหตุที่เลือกใช้ท่อความร้อนแบบสั้น เนื่องจากท่อความร้อนแบบสั้นมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพอรุนและแบบเทอร์โมไซโฟน รวมถึงไร้ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อน ท่อความร้อนแบบสั้นสามารถสร้างได้ง่ายเนื่องจากไม่มีวัสดุพอรุนอยู่ภายในท่อเมื่อเทียบกับท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพอรุน และสามารถทำงานได้ทุกระนาบเมื่อเทียบกับเทอร์โมไซโฟน ท่อความร้อนแบบสั้นมีทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้

- ท่อความร้อนแบบสั้นปลายปิด สร้างจากท่อคาปิลลารียาวท่อเดียวที่มีการปิดปลายท่อทั้งสองข้างแยกจากกัน ในกรณีนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานตามแนวแกนท่อเพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยการสั่นจะถูกกระตุ้นโดยการผันผวนของคลื่นความดันอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการเดือดของฟองในของไหลทำงาน ดังรูปที่ 2.12.ก

- ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบ สร้างจากท่อคาปิลลารียาวท่อเดียวที่มีการเชื่อมต่อปลายทั้งสองข้างเข้าด้วยกันเป็นวงรอบ การถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการสั่นของสารทำงานร่วมกับการไหลเวียนของสารทำงานผ่านโค้งเลี้ยวต่างๆ ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ดังรูปที่ 2.12.ข

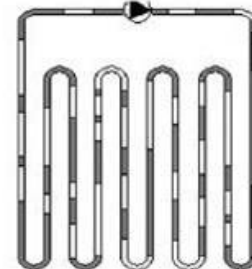
- ท่อความร้อนแบบสั้นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ มีลักษณะเป็นท่อคาปิลลารีขนาดเล็กขดกลับไปกลับมาปลายท่อทั้งสองด้านเชื่อมต่อกันเป็นวงรอบและติดตั้งวาล์วกันกลับ (Check valves) ไว้ตรงตำแหน่งส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน สำหรับควบคุมทิศทางการไหลของสารทำงานภายในท่อ เพื่อให้ให้มีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกัน การติดตั้งวาล์วกันกลับจะติดตั้งไว้ที่ตำแหน่งส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน เพราะเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อเป็นหลักเมื่อเทียบกับส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นซึ่งเป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารทำงานมากกว่าการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.12.ค



(ก) แบบส้นปลายปิด



(ข) แบบส้นวงรอบ



(ค) แบบส้นวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ

รูปที่ 2.12 ประเภทของท่อความร้อนแบบส้น [4]

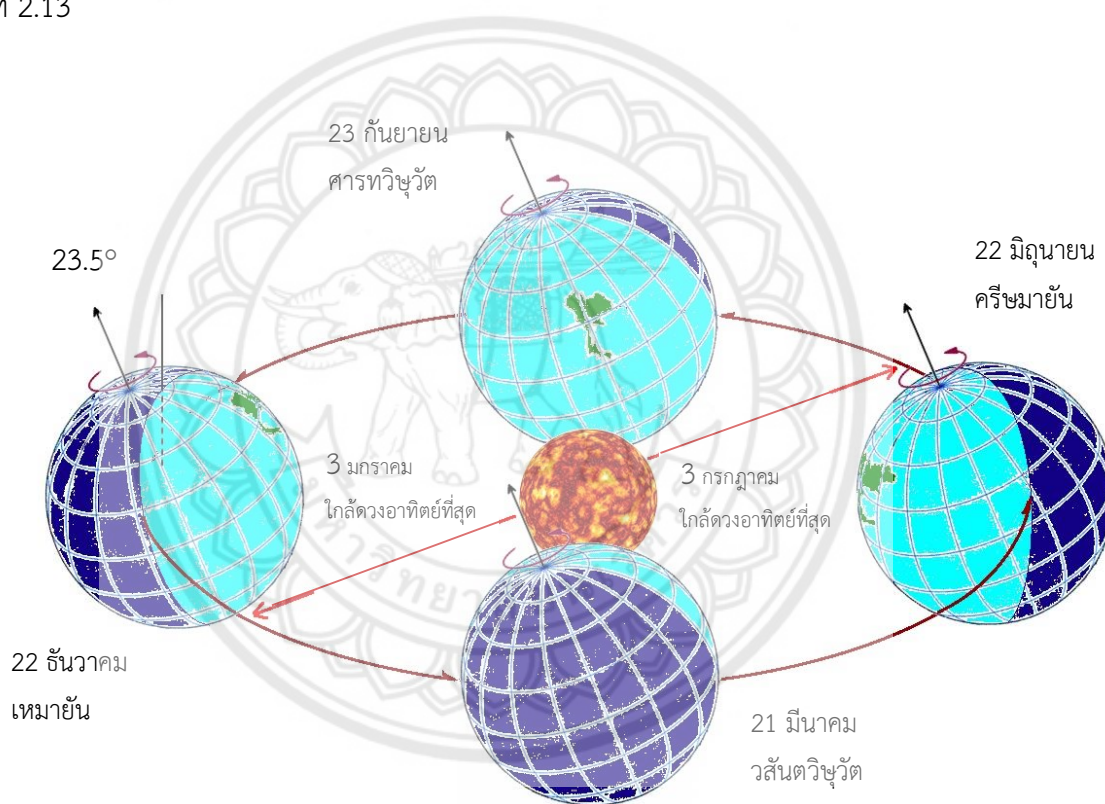
#### ข้อดีของท่อความร้อนแบบส้น

- ไม่ต้องใช้วัสดุพูนภายในท่อ เพราะอาศัยการเคลื่อนที่แบบส้นเนื่องจากผลต่างความดันในการทำงานของสารทำงาน
- ถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น โดยเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวให้มีพื้นที่สัมผัสในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น
- มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพูนและแบบเทอร์โมไซฟอน
- ท่อความร้อนแบบส้นสามารถสร้างได้ง่ายเนื่องจากไม่มีวัสดุพูนอยู่ภายในท่อเมื่อเทียบกับท่อความร้อนแบบธรรมดาที่มีวัสดุพูน
- สามารถทำงานได้ทุกระนาบเมื่อเทียบกับเทอร์โมไซฟอน
- ท่อความร้อนแบบส้นไร้ขีดจำกัดในการถ่ายเทความร้อน

สาเหตุที่เลือกใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบในโครงการนี้ เนื่องจากสารทำงานมีการเคลื่อนที่ได้เป็นวงรอบอย่างอิสระทำให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนแบบส้นชนิดปลายปิด แต่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนรองลงมาจากท่อความร้อนแบบส้นชนิดวงรอบที่มีวาล์วกันกลับ ซึ่งท่อความร้อนแบบส้นชนิดวงรอบที่มีวาล์วกันกลับนั้นในส่วนของ การติดตั้งวาล์วกันกลับติดตั้งได้ยากถ้าติดตั้งวาล์วกันกลับได้ไม่ดีจะทำให้วาล์วขวางทางการไหลของสารทำงาน ดังนั้นกลุ่มพวกเราจึงเลือกใช้ท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ

## 2.4 ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

เนื่องจากแกนโลกเอียงทำมุม  $23.5^{\circ}$  กับแนวตั้งในการโคจรรอบดวงอาทิตย์และการหมุนรอบตัวเอง จะทำให้แกนของโลกด้านหนึ่งจะเอนเข้าหาดวงอาทิตย์ ส่วนแกนอีกด้านหนึ่งจะเอนออกห่างจากดวงอาทิตย์เสมอ ผลจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์และการหมุนรอบตัวเองจะทำให้เกิด “ความผันแปรของระยะเวลากลางวันและกลางคืน” เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณใกล้ระหว่างเส้นรุ้ง (Latitude) ที่  $6^{\circ}$ - $19^{\circ}$  เหนือเส้นศูนย์สูตร จึงทำให้ได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากความผันแปรของระยะเวลากลางวันและกลางคืน ประเทศจึงเหมาะแก่การติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ [5]

การติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์นั้นควรติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ให้โดนแสงตลอดทั้งวันไม่ควรที่จะมีเงามาบังแผง หลีกเลี้ยงให้ไกลจากเงาต้นไม้หรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ เพราะจะทำให้แผงผลิตไฟฟ้าได้ไม่เต็มที่และควรติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ให้หันไปทางด้านทิศใต้ เนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเองรอบเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นตำแหน่งที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากเท่าไรก็ยิ่งมีความเข้มแสงของดวงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้น ประเทศไทยอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรขึ้นมาจึงทำให้การติดตั้งตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จึงหันไปทางด้านทิศใต้ ซึ่งจะทำให้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์รับแสงจากดวงอาทิตย์ได้ทั้งวัน



ความชันของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Tilt angle) จะอ้างอิงจากแนวระนาบตามองศาละติจูดของแต่ละพื้นที่ที่จะติดตั้ง จังหวัดพิษณุโลกตั้งอยู่ที่พิกัดละติจูดที่  $16.78^{\circ}$  44 ลิปดาเหนือ ลองจิจูดที่  $100^{\circ}$  16.4 ลิปดาตะวันออก ดังนั้นตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ควรติดตั้งทำมุม  $16^{\circ}$ - $18^{\circ}$  กับแนวระดับจึงจะสามารถรับแสงได้ดีที่สุด

## 2.5 มาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ASHRAE Standard 93-77

ASHRAE Standard 93-77 (American society of heating, Refrigerating and Air conditioning engineering) [9] เป็นมาตรฐานที่ใช้หาสมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่สามารถทดสอบได้ทั้งในร่ม (Indoor) และกลางแจ้ง (Outdoor) โดยสภาวะที่ใช้ทดสอบในโครงการนี้คือในร่มซึ่งเงื่อนไขดังนี้

- ค่าต่ำสุดของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ในสภาวะจะทำการวัดที่พื้นผิวตั้งฉากกับรังสีตรงของรังสีแสงอาทิตย์ต้องไม่น้อยกว่า  $790 \text{ W/m}^2$

- ค่าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดของความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ในการทดสอบจะทำการทดสอบในช่วงที่ท้องฟ้าโปร่ง ไม่มีเมฆ ซึ่งค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่ระนาบตั้งฉากจะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 32 \text{ W/m}^2$  ในช่วง 10 นาที

- ค่าความเข้มรังสีกระจาย จะทำการทดสอบเมื่อความเข้มรังสีกระจายเฉลี่ยบนระนาบของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ไม่เกิน 20% ของค่าความเข้มรังสีรวมบนระนาบรับรังสีของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ แต่ในการวิเคราะห์จะใช้ค่าความเข้มรังสีตรงและค่าความเข้มรังสีกระจาย

- ช่วงอุณหภูมิอากาศสภาวะแวดล้อม การวิเคราะห์ทั้งหมดจะใช้อุณหภูมิอากาศสภาวะแวดล้อมไม่เกิน  $30^{\circ}\text{C}$

- สภาวะของลม ในการทดลองค่าความเร็วเฉลี่ยของลมจะต้องอยู่ระหว่าง  $2.2 - 4.5 \text{ m/s}$

- อัตราการไหลของของไหลผ่านตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะต้องคงที่ ค่าแนะนำของอัตราการไหลต่อหน่วยพื้นที่ตัวเก็บรังสีสำหรับการทดสอบ ในกรณีที่ของไหลเป็นของเหลวคือ  $0.02 \text{ kg/s.m}^2$

- ค่าการกระจายของอุณหภูมิของไหลขาเข้าที่ยอมรับได้ หาได้จากการกำหนดให้ เป็น 0% , 30% , 60% , 90% ของค่า  $(T_{f,i} - T_a)$  ที่ได้จากอุณหภูมิอากาศแวดล้อมที่กำหนดสำหรับการทดสอบ และอุณหภูมิใช้งานสูงสุดที่แนะนำโดยบริษัทผู้ผลิตตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ หรืออาจใช้ค่าการกระจายของ  $(T_{f,i} - T_a)$  ณ ตำแหน่งที่ประสิทธิภาพทางความร้อนของตัวรับลดลงไป 0% , 30% , 60% , 90% ของประสิทธิภาพสูงสุด



- สภาวะคงที่ ในการทดสอบของไหลที่ไหลผ่านตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะต้องมีอุณหภูมิคงที่หรือเปลี่ยนแปลงไม่เกิน  $\pm 2\%$  หรือ  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$  และอัตราการไหลคงที่หรือเปลี่ยนแปลง ไม่เกิน  $\pm 0.0002 \text{ kg/s.m}^2$

จาก ASHRAE Standard 93-77 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้สมการแสดงคุณสมบัติพื้นฐานสำหรับการกำหนดประสิทธิภาพทางความร้อนของการทำงานของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ภายใต้ เงื่อนไขที่ สภาวะคงที่ มีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\eta_c = F_R [(\tau\alpha)_e - \frac{U_L(T_i - T_a)}{I_t}] \quad (1)$$

และ

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_c C_p (T_o - T_i)}{I_t A_c} \quad (2)$$

โดยที่

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

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ P. Charoensawan และ P. Terdtoon (2008) [7] ได้ศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบส่นวงรอบที่วางตัวอยู่ในแนวระดับ สร้างท่อความร้อนจากท่อคาปิลลารีทองแดงและศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเป็น 1 mm , 1.5 mm และ 2 mm ความยาวส่วนทำระเหยเป็น 50 mm และ 150 mm จำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 5 , 11 , 16 และ 26 โดยสารทำงานที่ใช้ทดสอบเป็นน้ำและเอทานอลที่อัตราส่วนการเติมสารทำงานต่างๆ คือ 30 , 50 และ 80% ทำการทดสอบที่อุณหภูมิส่วนทำระเหยตั้งแต่ 40°C ถึง 90°C จากการทดลองทั้งหมดพบว่า การเริ่มทำงานของท่อความร้อนแบบส่นวงรอบที่วางตัวแนวระดับ จะขึ้นกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยซึ่งสัมพันธ์กับจำนวนโค้งเลี้ยว จำนวนโค้งเลี้ยววิกฤตจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อและสมบัติของสารทำงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิการทำงาน เมื่ออุณหภูมิเกิน 70°C จะมีจำนวนโค้งเลี้ยววิกฤตซึ่งหมายถึงจำนวนโค้งเลี้ยวต่ำสุดที่ท่อความร้อนสามารถทำงานได้ในแนวระดับของท่อขนาด 2 mm เป็น 11 โค้งเลี้ยว นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยให้สูงขึ้น ลดความยาวส่วนทำระเหยหรือความยาวประสิทธิผลลง และเพิ่มจำนวนโค้งเลี้ยวมากขึ้น และพบว่าอัตราส่วนการเติมที่เหมาะสมสำหรับท่อความร้อนที่มีความยาวส่วนทำระเหย 150 mm คือ 30% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อแต่สำหรับความยาวส่วนทำระเหย 50 mm จะเป็นทั้ง 30% และ 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ และน้ำเป็นสารทำงานที่เหมาะสมกับท่อความร้อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเป็น 2 mm แต่ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเป็น 1 mm สามารถใช้ได้ทั้งน้ำและเอทานอล

งานวิจัยของ T. Hudakorn และ P. Terdtoon (2010) [8] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบโดยตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบทำจากแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีทาสีดำขนาด 2 m<sup>2</sup> ติดตั้งท่อความร้อนแบบส่นวงรอบเข้ากับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบทั้งหมด 5 ชุด ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบสร้างจากท่อทองแดง มีขนาดของส่วนทำระเหยยาว 1.0 m ส่วนควบแน่นยาว 0.17 m และเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนเป็น 1.0 mm จำนวนโค้งเลี้ยวทั้งหมด 15 โค้งเลี้ยว ใช้ R134a เป็นสารทำงานที่อัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรภายในทั้งหมดของท่อความร้อน ทำการทดลองโดยให้อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.021 , 0.082 และ 0.123 kg/s ส่งผลให้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อพื้นที่ผิวของตัวรับรังสีอยู่ในช่วง 0.0103-0.0616 kg/m<sup>2</sup>s ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเป็น 52.74-77.83% ในกรณีที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.01125-0.01875

kg/m<sup>2</sup>s และพบว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบที่ใช้เทอร์โมไซฟอนประมาณ 16.36–17.18% และในกรณีที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 0.01125–0.01875 kg/m<sup>2</sup>s ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบให้ประสิทธิภาพสูงกว่าตัวรับรังสีแบบร่องตัววีและตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบประมาณ 1.83–17.02% และ 13.81–26.18% ตามลำดับ

งานวิจัยของ K.B. Nguyen และคณะ (2012) [9] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ อัตราส่วนการเติมสารทำงานและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ในการสูญเสียความร้อนที่ด้านบนของ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์และสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อ ความร้อนแบบสั่นวงรอบ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ ประกอบด้วย ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น และส่วนที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อ 2 mm และมีจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อน 8 โค้งเกลียว ส่วนทำระเหยยึดติดกับแผ่น ทองแดงที่ชุบด้วยโครเมียมสีดำ ซึ่งดูดซับพลังงานจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ที่มีหลอดฮาโลเจน จำนวน 12 หลอด และถูกควบคุมโดยตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้า ส่วนควบแน่นจะบรรจุอยู่ในกล่อง ระบายความร้อนด้วยน้ำทำจากแผ่นอะคริลิกโปร่งใส มีอัตราส่วนการเติมสารทำงานอยู่ในช่วง 30% ถึง 80% โดยทำการทดลองเพิ่มขึ้นทีละ 10% และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 0.15 L/min, 0.30 L/min และ 0.45 L/min ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบมีสมรรถนะที่ดีในการทำงานของสารทำงานในอัตราส่วนการเติมสารที่ 60% และ 70% โดยมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ 0.15 L/min และ 0.30 L/min

งานปริญญาานิพนธ์ของนายทิวากร กาจันทร์ นายธนกร แต่งก่อ และนายวีรชัย แก้วฉัยยา (2016) [4] ได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยมีการติดตั้งให้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบหันหน้าไปทางทิศใต้ และเอียงทำมุม 18° กับแนวระดับ ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมีขนาด 1.5 m<sup>2</sup> ต่อความร้อนแบบสั่นวงรอบสร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm ใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่มีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อความร้อน และได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์นั้นคือ ความเข้มแสงอาทิตย์ ความยาวของส่วนทำระเหย 1 m และ 1.5 m จำนวนโค้งเกลียว 15, 20 และ 25 โค้งเกลียว และจำนวนท่อความร้อน 5 และ 8 ชุด ทำการทดสอบตัวรับรังสีแสงอาทิตย์กับชุดกำเนิดแสงเทียมที่ใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปรับค่าความเข้มแสงได้ จากการทดลองทั้งหมดพบว่า สมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง และพบว่าความยาวส่วนทำระเหย จำนวนโค้งเกลียวและจำนวน

ท่อที่เหมาะสม คือ 1 m 20 โค้งเลี้ยว และ 8 ชุด ตามลำดับ โดยตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบส่นวงรอบมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ 76.5% ณ ความเข้มแสงสูงสุดคือ 535 W/m<sup>2</sup>

งานปริญญานิพนธ์ของนายกรวิทย์ กลิ่นน้อย นายณัฐพนธ์ สิงห์ชนะ และนายปรัชญา รังคะภูติ (2017) [5] ได้ทำการศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบส่นวงรอบ โดยใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบระบบไหลเวียนตามธรรมชาติ และระบบใช้ปั้มน้ำหมุนเวียน มีการติดตั้งให้ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบหันหน้าไปทางทิศใต้และเอียงทำมุม 18° กับแนวระดับ ความร้อนที่ใช้เป็นต่อความร้อนแบบส่นวงรอบ สร้างจากท่อคาบิลลารีทองแดง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm ความยาวส่วนทำระเหย 1 m จำนวนโค้งเลี้ยว 20 โค้งเลี้ยว และใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่มีอัตราการส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ ทำการทดสอบภายใต้สภาวะอากาศและแสงอาทิตย์ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ถึงเก็บน้ำร้อนมีขนาด 50 ลิตร จากการทดลองทั้งหมดพบว่า กรณีระบบไหลเวียนตามธรรมชาติ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดที่ 61.89°C มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แผงได้รับสูงสุดที่ 1259.9 W อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับสูงสุดที่ 426.5 W และประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 35.9% เนื่องจากมีความเข้มแสงสูงที่สุดที่ 633.29 W/m<sup>2</sup> และกรณีระบบใช้ปั้มน้ำหมุนเวียน เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สามารถผลิตน้ำร้อนได้ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ 72.17°C มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แผงได้รับสูงสุดที่ 1231 W อัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับสูงสุดที่ 544 W และประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 59% เนื่องจากมีความเข้มแสงสูงที่สุดที่ 615.48 W/m<sup>2</sup> การเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่น้ำได้รับสูงมากขึ้น แม้จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แผงได้รับและค่าความเข้มแสงที่ต่ำ

## 2.7 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนั้นเกิดจากความสามารถในการวัดของแต่ละอุปกรณ์ดังนั้นการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Uncertainty analysis) จากผลการทดลอง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$W_R = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

- โดยที่  $W_R$  คือ ผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด
- $x_i$  คือ ตัวแปรอิสระของการวัดตัวที่  $i$
- $R$  คือ ผลรวมขอตัวแปรการคำนวณ
- $W_i$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดที่  $i$



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ

3.1.2 ศึกษาและทดสอบการทำงานของชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียมและกระบวนการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

3.1.3 ทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

3.1.4 วิเคราะห์ผลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

#### 3.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.2.1 ชุดจำลองแสงเทียม (Solar simulator) ประกอบไปด้วยหลอดฮาโลเจนจำนวน 15 หลอด ขนาดกำลังไฟฟ้า 1500 W ปรับค่าความเข้มแสงโดยใช้เครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชุดจำลองแสงเทียม

3.2.2 ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม (Solar simulator controller) ตัวปรับแรงดันไฟฟ้า (Dimmer) ทั้งหมด 15 ตัว สำหรับชุดหลอดฮาโลเจนทั้งหมด มีแรงดันไฟฟ้าเข้า 380 Volts แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม

3.2.3 ชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar collector) ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์เป็นแบบแผ่นเรียบ ขนาดความกว้าง 107.5 cm ยาว 171.5 cm สูง 10 cm ประกอบด้วยฉนวนเซรามิกหนา 2.5 cm วางอยู่ด้านล่างสุดทับด้วยแผ่นสังกะสีพ่นสีดำขนาด  $1 \times 1.5 \times 0.001$  m และท่อความร้อนแบบส้นวงรอบจำนวน 17 ท่อ ส่วนด้านบนตัวรับรังสีจะถูกปิดด้วยแผ่นกระจกใสหนา 5 mm ภายในบรรจุท่อความร้อนที่ใช้เป็นท่อความร้อนแบบส้นวงรอบ สร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดงเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm ความยาวส่วนทำระเหย 1 m และ 20 โค้งเลี้ยว โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นสารทำงานที่มีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ ดังรูปที่ 3.3





รูปที่ 3.3 ชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

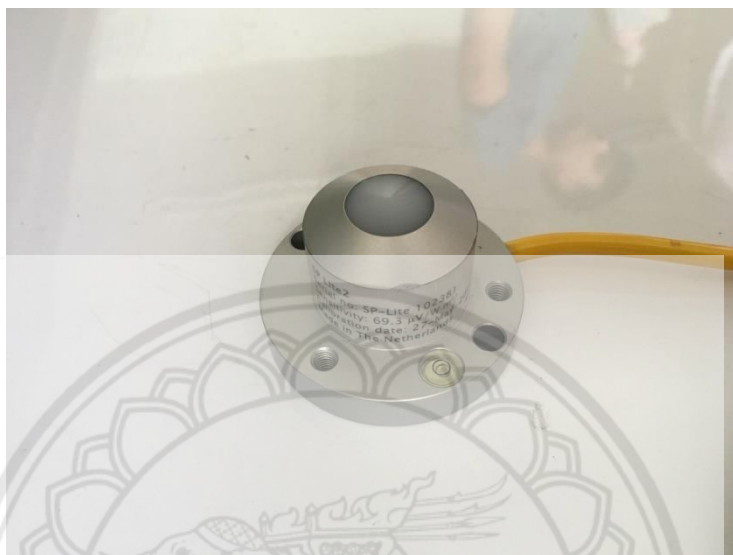
3.2.4 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 34972A ขนาด 40 ช่องสัญญาณ มีความแม่นยำ  $\pm 0.0035^{\circ}\text{C}$  ช่วงการวัด  $-100^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1200^{\circ}\text{C}$  แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องบันทึกข้อมูล



3.2.5 ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น SP Lite 2 มีค่าความไวต่อแสงเท่ากับ  $69.3 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  มีค่าความเข้มแสงสูงสุดที่วัดได้  $2000 \text{ W}/\text{m}^2$  แสดงดังรูปที่ 3.5 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเข้มแสงที่ทำงานร่วมกับเครื่องบันทึกข้อมูลในการวัดและแสดงค่า



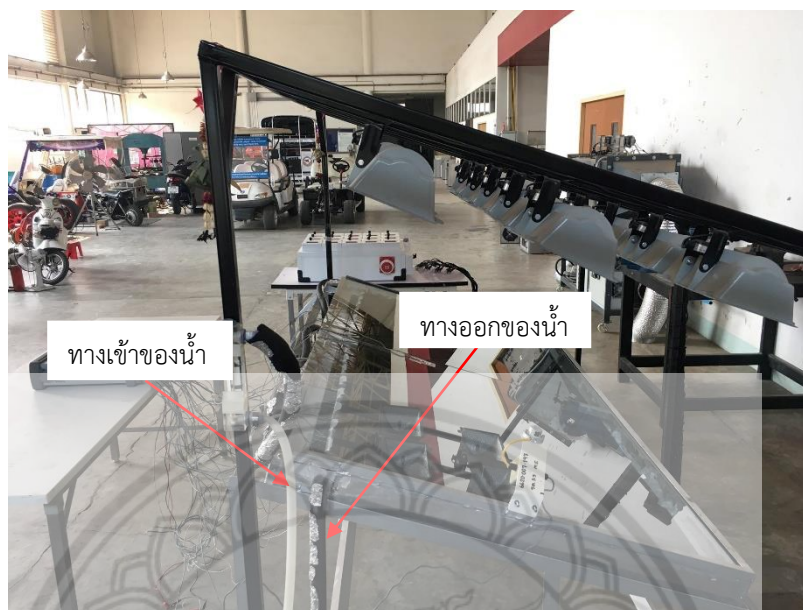
รูปที่ 3.5 ไพรานอมิเตอร์

3.2.6 เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ยี่ห้อ Uni-Pure คือเครื่องมือที่ใช้สำหรับตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ มีช่วงการวัด คือ  $0.2\text{-}2.0 \text{ gal}/\text{min}$  หรือ  $1\text{-}7 \text{ L}/\text{min}$  ในการทดลองใช้ค่าการวัดอยู่ที่  $1.5\text{-}2.5 \text{ L}/\text{min}$  แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดอัตราการไหล

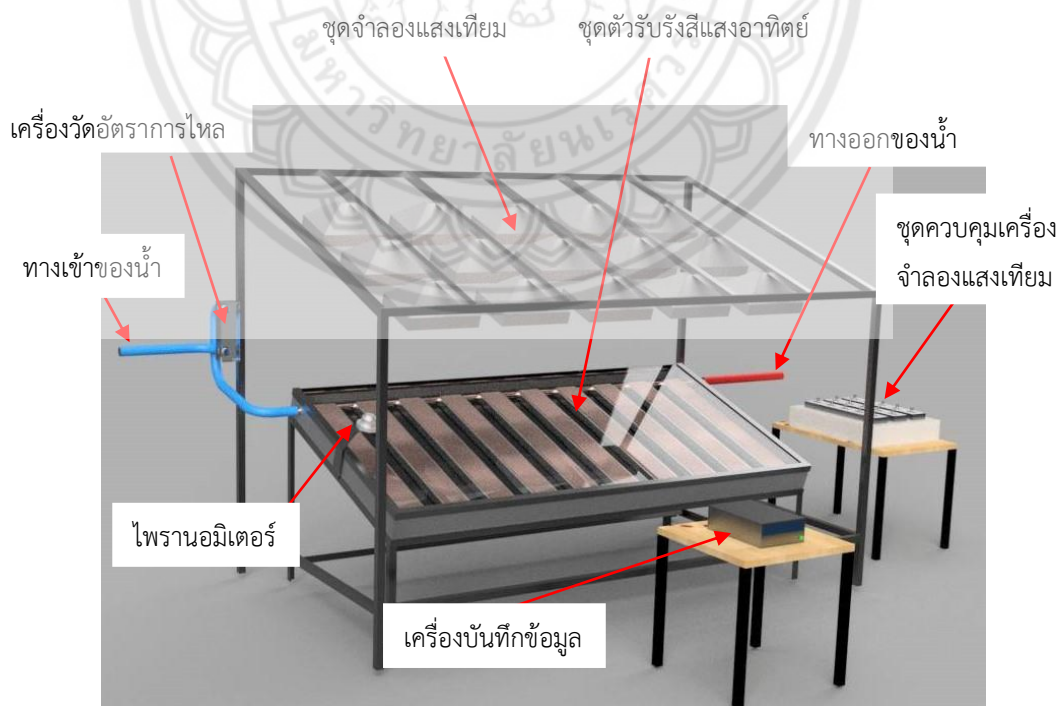




ทางเข้าของน้ำ

ทางออกของน้ำ

รูปที่ 3.9 ภาพแสดงทางเข้า-ออก ของน้ำในระบบ



ชุดจำลองแสงเทียม

ชุดตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

เครื่องวัดอัตราการไหล

ทางออกของน้ำ

ทางเข้าของน้ำ

ชุดควบคุมเครื่อง  
จำลองแสงเทียม

ไพรานอมิเตอร์

เครื่องบันทึกข้อมูล

รูปที่ 3.10 ภาพเขียนแบบไอโซเมตริกการทำงานของชุดทดสอบ

ชุดการทดสอบ ประกอบไปด้วยตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ต่อความร้อนแบบ สิ้นวงรอบ ชุดจำลองแสงเทียม ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม ไพรานอมิเตอร์ เครื่องวัดอัตราการ ไหล และเครื่องบันทึกข้อมูล อุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกติดตั้งและจัดเรียงดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยที่ท่อน้ำ ทางเข้าและท่อน้ำที่ทางออกของตัวรับรังสีจะหุ้มด้วยฉนวนยางหุ้มท่อแบบสวมแอร์โรเฟล็กซ์ (Aeroflex) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และทิศทางการไหลของน้ำในระบบจะแสดงในรูปที่ 3.10 โดยที่ท่อน้ำ น้ำเงินคือน้ำที่ทางเข้าตัวรับรังสี ท่อสีแดงคือน้ำที่ทางออกของตัวรับรังสี เริ่มทำการทดลองโดยเปิด วาล์วให้น้ำไหลเวียนโดยควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วและมีเครื่องวัดอัตราการไหลเพื่อปรับอัตรา การไหลตามที่ต้องการ จากนั้นเปิดเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เพื่อให้แสงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ มาตกกระทบบนตัวรับรังสี จากแผนผังชุดทดสอบได้มีการวัดอุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของ ตัวรับรังสีรวมถึงวัดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม อุณหภูมิที่แผ่นดูดกลืนและอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย ของท่อความร้อน ค่าความเข้มแสงจะถูกวัดค่าด้วยไพรานอมิเตอร์ จากนั้นบันทึกค่าทั้งหมดด้วยเครื่อง บันทึกข้อมูล

### 3.3.2 ตัวแปรในการทดสอบ

#### ตัวแปรควบคุม

- ท่อความร้อนที่ใช้เป็นท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบ สร้างจากท่อคาปิลลารีทองแดงเส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน 1.5 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.8 mm

- ใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงานที่มีอัตราส่วนการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรทั้งหมดภายใน ท่อ

- จำนวนท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบ 17 ท่อ

- ท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบมีความยาวส่วนทำระเหยเท่ากับ 1 m

- ท่อความร้อนแบบสิ้นวงรอบมีจำนวนโค้งเลี้ยวเป็น 20 โค้งเลี้ยว

- อุณหภูมิที่ทางเข้าของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีค่าอยู่ในช่วง 28-33°C

- แผ่นกระจกใสหนา 5 mm

#### ตัวแปรต้น

- ความเข้มแสงที่ได้จากชุดกำเนิดแสงเทียมที่แรงดันไฟฟ้า 65-101 Volts จะมีค่าอยู่ในช่วง 500-1000 W/m<sup>2</sup>

- อัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.5-3.0 L/min

ตัวแปรตาม

- อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อน

- อุณหภูมิแผ่นดูดกลืน

- อุณหภูมิกระจก

- อุณหภูมิน้ำที่ทางออก

- ประสิทธิภาพตัวรับรังสีแสงอาทิตย์

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

- นำชุดตัวรับรังสีที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลมาทำการทดลองโดยหันหน้าชุดตัวรับรังสีให้ขนานกับชุดจำลองแสงเทียมดังรูปที่ 3.10 เพื่อให้แสงจากชุดจำลองแสงเทียมส่องตั้งฉากกับชุดตัวรับรังสี

- ตั้งค่าเครื่องบันทึกข้อมูลวัดอุณหภูมิจุดที่ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล และวัดค่าความเข้มแสง

- ปรับวาล์วให้น้ำเข้าสู่ระบบ โดยปรับให้มีอัตราการไหลคงที่ เท่ากับ 1.5 L/min ตามลำดับ

- ปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม โดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 65 Volt หรือค่าความเข้มแสง  $578 \text{ W/m}^2$

- บันทึกผลการทดลอง โดยบันทึกค่าอุณหภูมิ ความเข้มแสง โดยจะบันทึกค่าทุกๆ 10 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที

- ปิดชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียม เพื่อให้ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียมได้ระบายความร้อน

- ทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 74, 83, 92 และ 101 Volts หรือค่าความเข้มแสง 666 776 860 และ  $985 \text{ W/m}^2$

- ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ

- ทำการทดลองซ้ำโดยปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min

- นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดไปวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวรับรังสี



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบ สิ้นวงรอบนั้น ประกอบด้วย การเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มแสงที่ได้รับกับอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้าและทางออกของตัวรับรังสีเพื่อทำการวิเคราะห์ผล คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ของแต่ละอัตราการ ไหลของน้ำ ทำการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ โดยทำการเก็บข้อมูลการ ทดลองจากเครื่องบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิส่วนต่างๆ ที่ได้ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลไว้ และค่า ความเข้มแสงทุกๆ 10 นาที

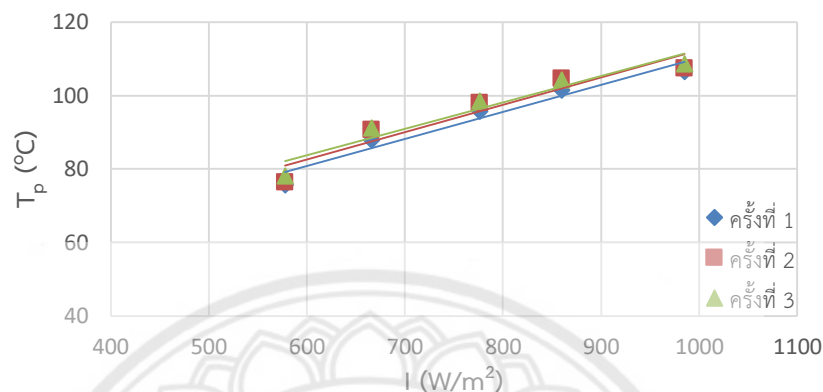
การวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบ สิ้นวงรอบ จากการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง ที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5 ถึง 3.0 L/min และที่ค่าความเข้ม แสง 500 ถึง 1000 W/m<sup>2</sup> พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง ยกตัวอย่างที่อัตราการ ไหลของน้ำ 1.5 L/min ส่วนผลการทดลองของอัตราการไหลของน้ำ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min จะ แสดงไว้ที่ภาคผนวก ข

#### 4.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง ณ อัตราการไหล 1.5 L/min

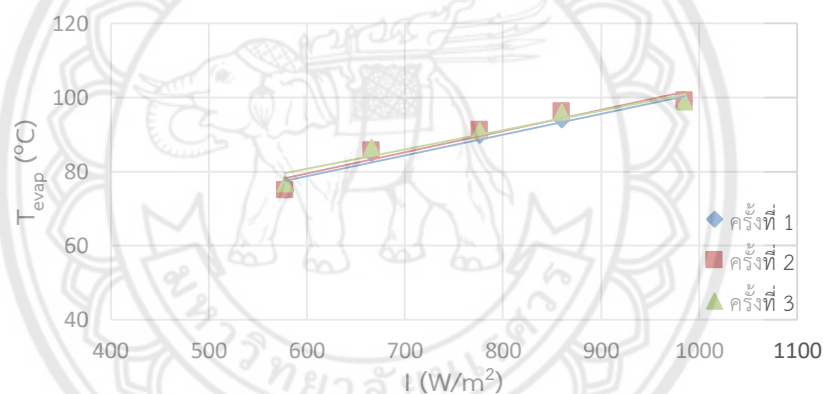
จากรูปที่ 4.1 (ก) จากการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง จะเห็นว่าแนวโน้มการทดลองเป็นไปในทาง เดียวกันและค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าความคาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดอยู่ที่  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  โดยพบว่า อุณหภูมิแผ่นดูดกลืนมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985 W/m<sup>2</sup> จะมีค่าอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนเฉลี่ยประมาณ 77 ถึง 108<sup>o</sup>C

จากรูปที่ 4.1 (ข) ในลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.1 (ก) จะพบว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อ ความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยในช่วง ค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985 W/m<sup>2</sup> จะมีค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยเฉลี่ยประมาณ 75 ถึง 99<sup>o</sup>C

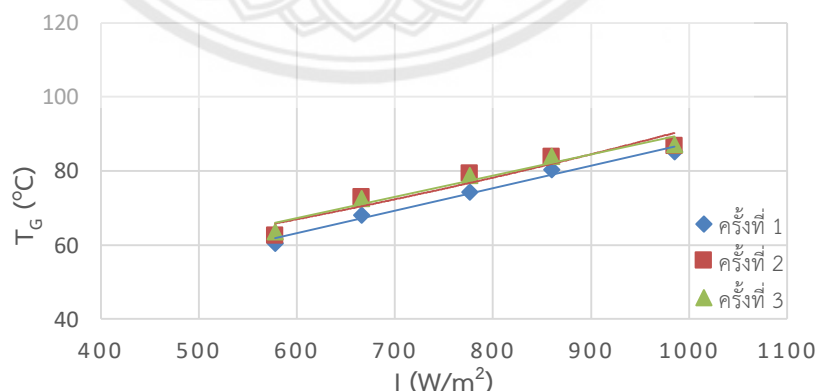
จากรูปที่ 4.1 (ค) จะพบว่าอุณหภูมิแผ่นกระจกมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น และกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $\text{W/m}^2$  จะมีค่าอุณหภูมิแผ่นกระจกเฉลี่ยประมาณ 62 ถึง 86 $^{\circ}\text{C}$



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นดูดกลืน ( $T_p$ ) เทียบกับความเข้มแสง ( $I$ )



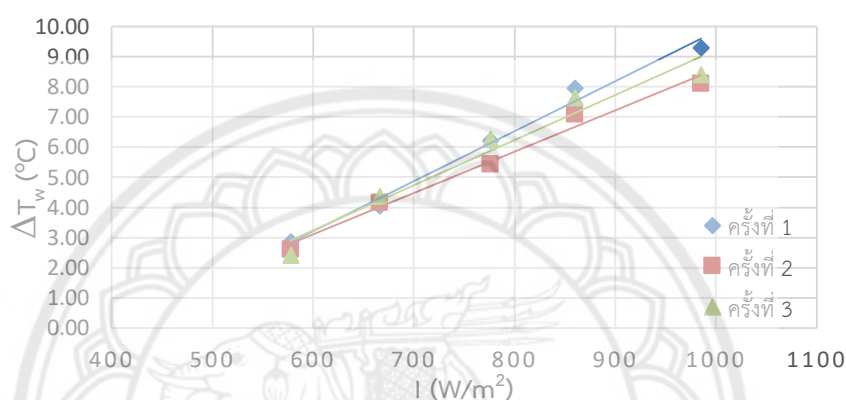
(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหย ( $T_{EVAP}$ ) เทียบกับความเข้มแสง



(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นกระจก ( $T_g$ ) เทียบกับความเข้มแสง

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min

จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย และที่ความเข้มแสงเดียวกันอุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนจะมีค่าสูงสุด ถัดมาจะเป็นอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและอุณหภูมิแผ่นกระจกตามลำดับ เนื่องจากแผ่นดูดกลืนมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีได้ดีกว่าส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและแผ่นกระจก จึงทำให้อุณหภูมิแผ่นดูดกลืนสูงกว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อนและอุณหภูมิแผ่นกระจก

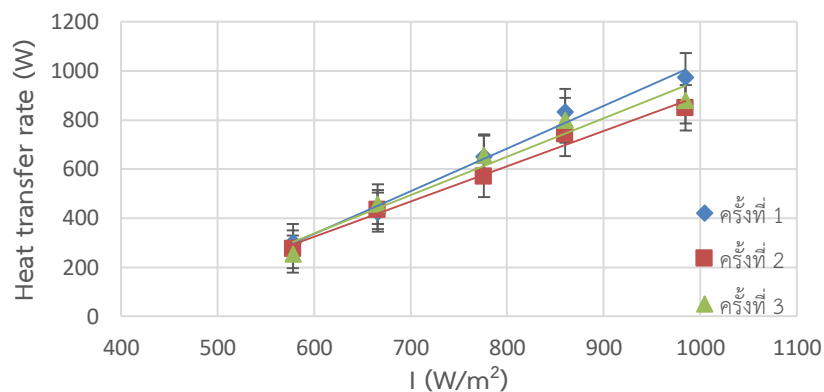


รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min

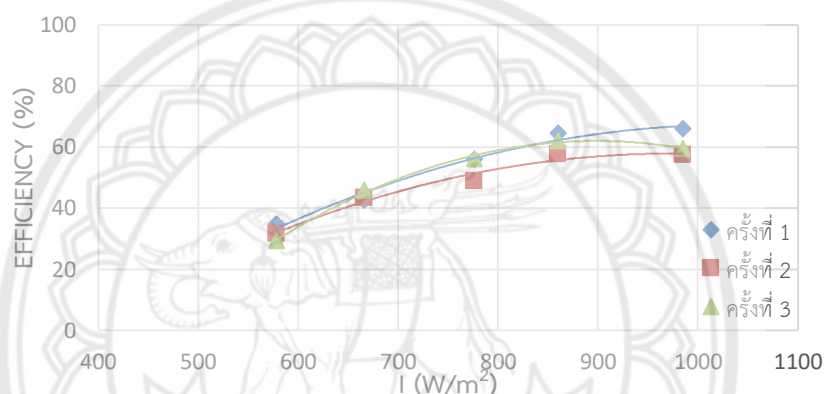
จากรูปที่ 4.2 พบว่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและค่าใกล้เคียงกัน และผลต่างของอุณหภูมิน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $W/m^2$  จะมีค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยประมาณ 2.64 ถึง 8.61 $^{\circ}C$

จากรูปที่ 4.3 (ก) จะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นและกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อพิจารณา ค่าความผิดพลาด (Error bar) ของอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง ที่ค่าความเข้มแสง 578, 666, 776, 860, 985  $W/m^2$  มีค่าความผิดพลาดของอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ  $\pm 76$ ,  $\pm 80$ ,  $\pm 85$ ,  $\pm 91$  และ  $\pm 95$  W ตามลำดับ พบว่าค่าความผิดพลาดของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีการซ้อนทับกันของข้อมูลที่ค่าความเข้มแสงเดียวกัน จึงสรุปได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกัน โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $W/m^2$  จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 276 ถึง 901 W





(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

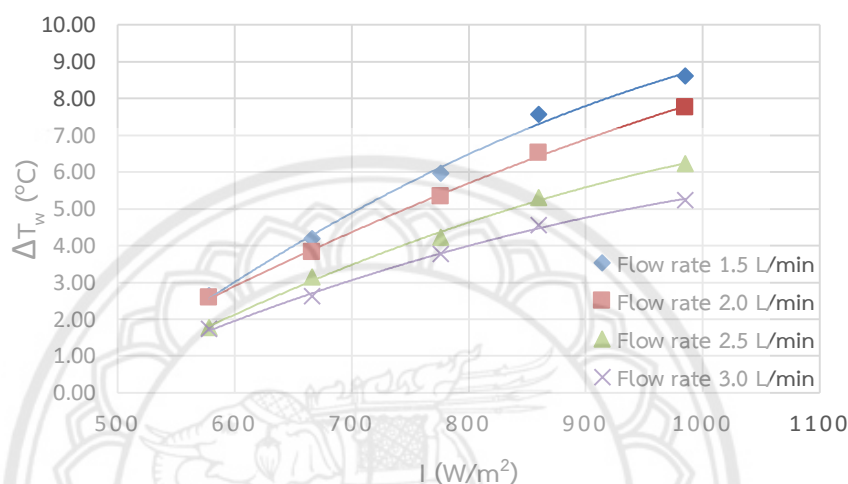


(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) กับความเข้มแสง รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min

จากรูปที่ 4.3 (ข) จะพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 578 ถึง 860  $W/m^2$  กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและจะคงที่ในช่วงค่าความเข้มแสง 860 ถึง 985  $W/m^2$  โดยค่าความเข้มแสงเริ่มต้นที่ 578  $W/m^2$  จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 31.83% และที่ความเข้มแสงสูงสุด 985  $W/m^2$  จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 60.98% จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกัน เพราะค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.3 (ก) เนื่องจากค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้จากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทดลองซ้ำทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกันในทุกค่าความเข้มแสง เพราะฉะนั้นหลังจากนี้จะพิจารณาข้อมูลทั้งหมดของการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำและค่าความเข้มแสง

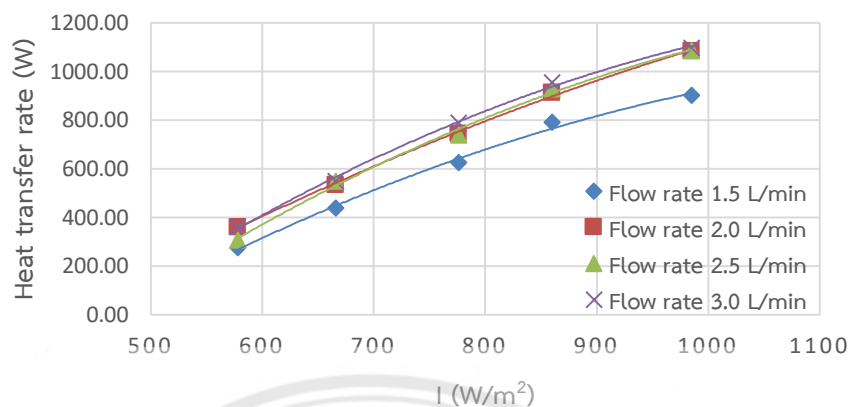
#### 4.2 วิเคราะห์ผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำและความเข้มแสง



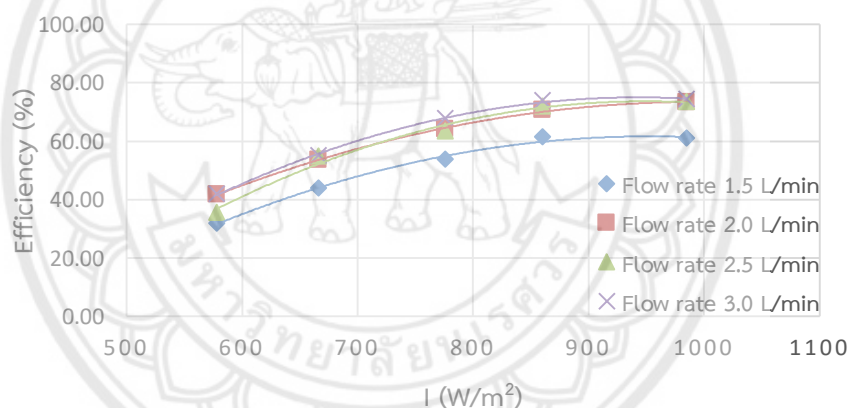
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ทุกอัตราการไหลของน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยค่าความเข้มแสงต่ำสุด 578  $\text{W}/\text{m}^2$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min จะมีค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ยประมาณ 2.64, 2.59, 1.77 และ 1.73 $^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และที่ค่าความเข้มแสงสูงสุด 985  $\text{W}/\text{m}^2$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min จะมีค่าผลต่างของอุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกเฉลี่ยประมาณ 8.61, 7.76, 6.23 และ 5.24 $^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ และพบว่าผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกจะมีแนวโน้มลดลง เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นในทุกค่าความเข้มแสง

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของทุกอัตราการไหลของน้ำจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของน้ำ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min โดยที่ค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $\text{W}/\text{m}^2$  จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเพียง 276 ถึง 901 W ขณะที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันเล็กน้อย โดยมีค่าประมาณ 344 ถึง 1089 W ที่ค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $\text{W}/\text{m}^2$



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

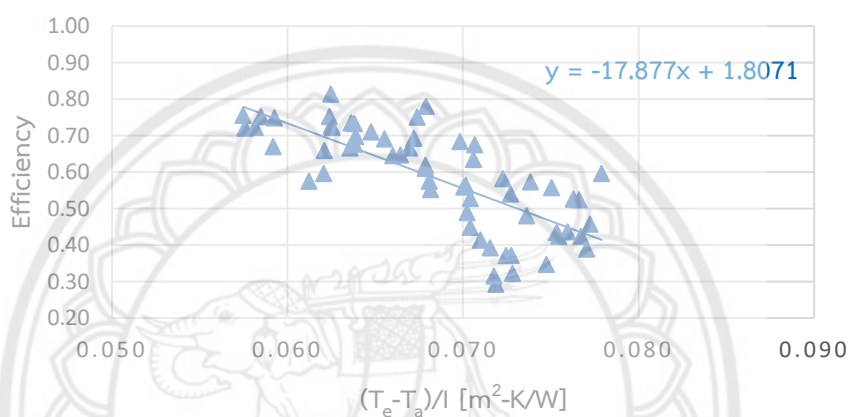


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) เทียบกับความเข้มแสง

จากรูปที่ 4.6 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของทุ้อัตราการไหลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยในช่วงค่าความเข้มแสง 860 ถึง 985  $W/m^2$  จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ และพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำ 1.5 L/min จะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดเพียง 31.83 ถึง 60.98% ที่ค่าความเข้มแสง 578 ถึง 985  $W/m^2$  และพบว่าค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min โดย ณ ค่าความเข้มแสงสูงสุด 985  $W/m^2$  ที่อัตราการไหลของน้ำ 2.0, 2.5 และ 3.0 L/min จะมีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยประมาณ 73.30, 73.35 และ 73.95% ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความเข้มแสงมีผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยที่ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง และจะคงที่ในช่วงค่าความเข้มแสง 860 ถึง 985 W/m<sup>2</sup> และในช่วงอัตราการไหลของน้ำ 1.5 ถึง 2.0 L/min ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ในช่วงอัตราการไหลของน้ำ 2.0 ถึง 3.0 L/min ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง

#### 4.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) และ  $(T_e - T_a)/I$  ได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายประสิทธิภาพเชิงความร้อนของตัวรับรังสีซึ่งจะสอดคล้องกับสมการที่ 1 ขึ้น จะมีสมการเป็น

$$\eta = 1.8071 - 17.877\left(\frac{T_e - T_a}{I}\right) \quad (4)$$

โดยที่จุดตัดเส้นสมการกับแกนตั้งคือค่า  $F_R(\tau\alpha)$  และความชันของเส้นสมการคือค่า  $F_R U_L$  โดยค่า  $F_R(\tau\alpha)$  แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีของตัวรับรังสีและค่า  $F_R U_L$  แสดงถึงสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวรับรังสี

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ที่ใช้ตัวรับรังสีขนาดเท่ากับ  $1 \times 1.5$  m<sup>2</sup> มีแผ่นกระจกใสปิดอยู่ด้านบนภายในบรรจุท่อความร้อนแบบส่นวงรอบจำนวน 5 ท่อ ซึ่งติดตั้งอยู่บนแผ่นดูดกลืนที่มีสีดำ และมีแผ่นฉนวนกันความร้อนปิดอยู่ด้านล่างของแผ่นดูดกลืน ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบแต่ละท่อสร้างขึ้นจากท่อคาปิลลารีทองแดง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเป็น 1.5 mm และ 2.8 mm ตามลำดับ มีจำนวน 20 โค้งเลี้ยว และมีความยาวส่วนทำระเหย 1 m จะได้ตั้งสมการที่ (5) [6]

$$\eta = 0.6302 - 0.2921\left(\frac{T_e - T_a}{I}\right) \quad (5)$$

จากสมการที่ (4) และ (5) จะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ  $17.877 \text{ W/m}^2\text{-K}$  ซึ่งมีความมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ได้จากงานวิจัย ก่อนหน้านี้มีค่าเท่ากับ  $0.2921 \text{ W/m}^2\text{-K}$  แต่ค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ  $1.8071$  ซึ่งมีความมากกว่าค่าความสามารถในการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้ามีค่าเท่ากับ  $0.6302$  ด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพของตัวรับรังสีมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการทดลองที่ใช้ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบจำนวน 17 ท่อ แต่ งานวิจัยก่อนหน้าใช้ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบเพียง 5 ท่อ แม้ว่าการเพิ่มจำนวนท่อความร้อนจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นดูดกลืนมายังท่อความร้อน แต่ก็เป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสูญเสียความร้อนของท่อความร้อนให้แก่สภาวะแวดล้อมเช่นเดียวกัน

จากการเปรียบเทียบปริมาณนิพนธ์ เรื่องการศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสัณวงรอบโดยใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบระบบไหลเวียนตามธรรมชาติ และระบบใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน [5] ซึ่งเป็นชุดทดสอบชุดเดียวกัน กรณีที่ใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนจะประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่ 59% ณ ค่าความเข้มแสง  $615.48 \text{ W/m}^2$  และอัตราการไหลของน้ำ  $2.4 \text{ L/min}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง ที่ค่าความเข้มแสง  $666 \text{ W/m}^2$  และอัตราการไหลของน้ำ  $2.5 \text{ L/min}$  จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนประมาณ 54.96%

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เมื่อค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะสูงขึ้น และที่ค่าความเข้มแสงเดียวกันอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนจะมีค่าสูงสุด ถัดมาจะเป็นอุณหภูมิส่วนทำระเหยของท่อความร้อน และอุณหภูมิแผ่นกระจก ตามลำดับ

5.1.2 ค่าความเข้มแสงมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ ที่ค่าความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย

5.1.3 อัตราการไหลของน้ำมีผลค่อนข้างน้อยต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบ โดยที่ค่าอัตราการไหลของน้ำในช่วง 1.5 ถึง 2.0 L/min ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่อัตราการไหลของน้ำในช่วง 2.0 ถึง 3.0 L/min ค่าประสิทธิภาพเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลง

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มแสง แต่จะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยตามอัตราการไหลของน้ำ และพบว่าตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบส่นวงรอบจะมีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 73% ที่ค่าความเข้มแสงสูงสุดในช่วง 860 ถึง 985 W/m<sup>2</sup> และอัตราการไหลของน้ำ 2.0 ถึง 3.0 L/min

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีไพแรนอมิเตอร์สำหรับวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีมาตรฐาน เพื่อที่จะสามารถวัดค่าความเข้มแสงอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำ

5.2.2 ควรมีเครื่องมือสำหรับวัดและควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่มีมาตรฐาน เพื่อที่จะสามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่มากยิ่งขึ้น

5.2.3 ควรปรับปรุงชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียมให้สามารถระบายความร้อนได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากเมื่อทำการทดลองเป็นเวลานานจะทำให้ชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียมมีอุณหภูมิสูงเกินไปส่งผลให้ตัวปรับค่าแรงดันไฟฟ้า (Dimmer) ของชุดควบคุมเครื่องจำลองแสงเทียมไม่สามารถควบคุมความเข้มแสงให้คงที่ได้และทำให้ตัวปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเสียได้



## บรรณานุกรม

- [1] EKO Instruments. (2017). Pyrheliometer (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <https://eko-eu.com/products/solar-energy/solar-monitoring-stations/str-21gs0-solar-monitoring-systems>. สืบค้นเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2561.
- [2] Hukseflux thermal sensors. (2018) pyranometers (ออนไลน์). แหล่งที่มา <https://www.hukseflux.com/products/solar-radiation-sensors/pyranometers/sr03-pyranometer>. สืบค้นเมื่อ 16 พฤศจิกายน 2561.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557) พลังงานแสงอาทิตย์. In กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สารานุกรมพลังงานทดแทน (pp.20, 23, 42). กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย.
- [4] ทิวากร กาจจันทร์ ธนกร กาจจันทร์ และวีรชัย แก้วฉัยยา. การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบโดยใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ. ปรินญาณิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2559.
- [5] กรวิทย์ กลิ่นน้อย ญัฐพนธ์ สิงห์ธนะ และปรัชญา รังคะภูติ. การศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ โดยใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแบบระบบไหลเวียนตามธรรมชาติ และระบบใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียน. ปรินญาณิพนธ์ วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2560.
- [6] ของ ทิวากร กาจจันทร์ ธนกร กาจจันทร์ วีรชัย แก้วฉัยยา นพรัตน์ สีหะวงษ์ ปฐมศก วิไลพล และปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์. (2561) ผลของความยาวส่วนทำระเหยและจำนวนโค้งเกลียวของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบต่อสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 1 (2561) 9-17.
- [7] P. Charaensawan and P. Terdtoon. Thermal performance of horizontal closedloop oscillating heat pipes. Applied Thermal Engineering 28 (2008) 460-466.
- [8] T. Hudakorn and P. Terdtoon. Thermal Performance Investigation of a Closed-Loop Oscillating Heat Pipe Flat Plate Solar Collector. The Second International Conference



on Science. Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB II). 13-14 August 2010, Quang Binh University, Vietnam

[9] K. B. Nguyen, S. H. Yoon and J. H. Choi. Effect of working-fluid filling ratio and cooling-water flow rate on the performance of solar collector with closed-loop oscillating heat pipe. *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (1) (2012) 251-258.

[10] ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์. (2555). เทคโนโลยีที่ความร้อน. พิษณุโลก : บริษัท โฟกัส พรินติ้ง จำกัด.



## ภาคผนวก ก

ตาราง ก.1 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1

I (W/m <sup>2</sup> )	Flow rate (L/min)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>G</sub> (°C)	T <sub>w,i</sub> (°C)	T <sub>w,o</sub> (°C)	ΔT <sub>w</sub> (°C)	Heat transfer rate (W)	η (%)
578	1.5	75.74	74.88	31.66	60.43	28.02	30.90	2.87	300.73	34.69
	2.0	82.51	79.70	35.16	68.67	33.44	35.86	2.42	337.61	38.94
	2.5	78.44	76.13	34.04	62.36	32.45	34.05	1.60	279.83	32.28
	3.0	79.07	77.23	35.86	61.16	33.09	34.72	1.63	341.03	39.33
666	1.5	87.95	84.72	33.62	68.06	28.64	32.70	4.06	424.46	42.49
	2.0	94.43	88.39	37.37	77.52	34.64	38.39	3.75	523.10	52.36
	2.5	89.36	84.69	35.66	70.51	31.83	34.58	2.75	479.59	48.01
	3.0	89.74	85.22	36.80	68.21	34.03	36.61	2.58	539.49	54.00
776	1.5	95.81	89.70	35.33	74.22	28.89	35.11	6.22	651.50	55.97
	2.0	100.97	91.64	38.97	83.38	35.44	40.54	5.10	711.09	61.09
	2.5	96.22	89.18	36.29	75.40	31.89	35.57	3.68	642.01	55.16
	3.0	95.63	88.93	37.36	72.89	34.55	38.15	3.60	753.24	64.71
860	1.5	101.56	93.97	37.21	80.33	29.44	37.40	7.96	833.21	64.59
	2.0	103.12	94.00	39.10	85.37	34.83	41.09	6.26	872.99	67.67
	2.5	101.86	93.38	37.66	80.54	32.14	37.39	5.25	915.91	71.00
	3.0	99.57	92.59	37.70	77.05	33.94	38.46	4.51	944.38	73.21
985	1.5	106.59	98.96	37.79	85.16	29.46	38.76	9.30	973.79	65.91
	2.0	109.23	98.52	40.13	90.30	34.77	42.71	7.94	1107.46	74.96
	2.5	106.35	96.79	38.48	84.98	32.38	38.05	5.67	989.70	66.98
	3.0	104.22	95.85	38.23	80.40	33.80	39.11	5.31	1111.86	75.25

ตาราง ก.2 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2

I (W/m <sup>2</sup> )	Flow rate (L/min)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>G</sub> (°C)	T <sub>w,i</sub> (°C)	T <sub>w,o</sub> (°C)	ΔT <sub>w</sub> (°C)	Heat transfer rate (W)	η (%)
578	1.5	76.36	74.90	33.41	62.57	29.66	32.27	2.61	273.52	31.55
	2.0	82.19	79.25	35.64	70.38	33.38	36.02	2.64	367.90	42.43
	2.5	78.89	76.86	34.99	62.78	31.01	32.86	1.85	322.92	37.25
	3.0	79.25	77.58	36.53	60.44	33.20	34.91	1.72	359.04	41.41
666	1.5	90.69	85.67	35.49	72.87	29.92	34.07	4.15	434.30	43.47
	2.0	90.27	85.15	34.34	76.68	32.72	36.48	3.76	524.77	52.53
	2.5	90.77	86.14	36.94	70.18	31.69	34.97	3.28	572.22	57.28
	3.0	88.14	83.98	37.08	66.15	33.15	35.67	2.52	527.35	52.79
776	1.5	98.05	91.19	36.68	79.24	30.45	35.88	5.43	568.70	48.86
	2.0	97.54	89.19	34.39	82.52	32.41	37.70	5.29	737.89	63.39
	2.5	96.38	89.18	37.22	75.01	31.49	35.94	4.45	775.64	66.64
	3.0	94.14	88.06	37.22	72.02	32.98	36.83	3.84	804.53	69.12
860	1.5	104.64	96.20	37.65	83.82	30.79	37.88	7.09	742.25	57.54
	2.0	102.28	92.68	34.86	86.59	32.43	38.83	6.40	893.51	69.26
	2.5	100.43	92.37	37.70	79.94	31.50	36.42	4.92	858.68	66.56
	3.0	98.25	91.56	36.83	74.39	32.77	37.30	4.53	947.94	73.48
985	1.5	107.44	99.07	38.76	86.82	31.09	39.20	8.11	849.23	57.48
	2.0	106.24	96.21	34.65	90.00	32.26	39.96	7.71	1075.36	72.78
	2.5	106.00	95.80	38.50	87.53	33.53	39.65	6.12	1067.16	72.23
	3.0	101.67	93.47	36.73	75.68	32.71	37.79	5.08	1063.71	71.99

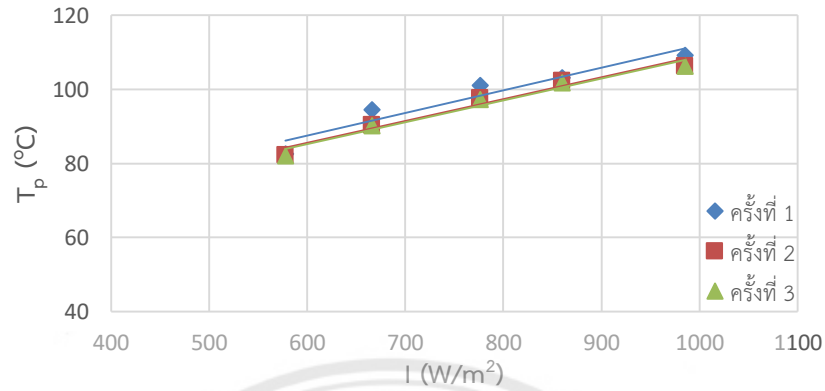
ตาราง ก.3 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3

I (W/m <sup>2</sup> )	Flow rate (L/min)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>G</sub> (°C)	T <sub>w,i</sub> (°C)	T <sub>w,o</sub> (°C)	ΔT <sub>w</sub> (°C)	Heat transfer rate (W)	η (%)
578	1.5	78.14	76.67	35.13	63.62	30.90	33.32	2.42	253.52	29.24
	2.0	82.07	79.57	35.65	69.96	33.73	36.44	2.72	379.20	43.74
	2.5	79.03	77.38	35.34	61.96	33.25	35.10	1.85	322.92	37.25
	3.0	80.42	78.46	37.76	62.28	33.67	35.53	1.86	389.39	44.91
666	1.5	91.28	86.50	35.05	72.62	31.26	35.63	4.37	457.74	45.82
	2.0	90.18	85.38	35.40	75.95	33.13	37.12	3.99	557.29	55.78
	2.5	92.32	86.41	34.53	77.83	33.13	36.54	3.41	595.43	59.60
	3.0	91.08	85.86	37.73	70.34	33.55	36.33	2.78	581.36	58.19
776	1.5	98.51	90.93	36.48	78.76	31.20	37.45	6.26	654.74	56.25
	2.0	97.19	89.92	35.07	82.00	32.90	38.54	5.64	786.74	67.59
	2.5	98.26	89.29	35.09	82.26	33.06	37.62	4.57	796.40	68.42
	3.0	95.08	88.32	38.73	73.86	33.44	37.31	3.88	811.65	69.73
860	1.5	104.29	95.94	37.58	84.00	31.20	38.84	7.64	799.61	61.99
	2.0	101.79	92.41	34.46	85.47	32.75	39.69	6.93	967.48	75.00
	2.5	105.52	94.14	35.74	88.10	32.93	38.70	5.77	1006.45	78.02
	3.0	98.26	91.34	37.66	76.38	33.21	37.84	4.63	969.71	75.17
985	1.5	108.57	98.84	37.70	87.14	30.92	39.33	8.41	879.79	59.55
	2.0	106.30	95.86	34.25	88.82	32.55	40.19	7.64	1066.29	72.17
	2.5	108.37	97.16	35.63	92.04	32.87	39.76	6.89	1202.37	81.38
	3.0	102.85	94.85	38.22	78.28	33.09	38.43	5.34	1117.30	75.62

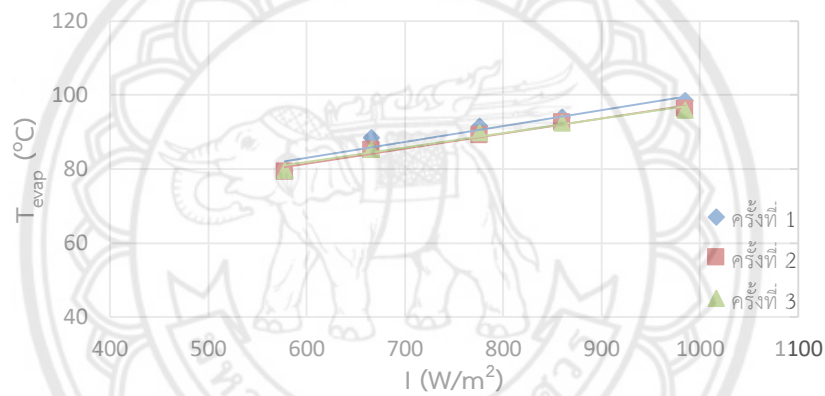
ตาราง ก.4 แสดงผลการทดลองเฉลี่ย

I (W/m <sup>2</sup> )	Flow rate (L/min)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>evap</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>G</sub> (°C)	T <sub>w,i</sub> (°C)	T <sub>w,o</sub> (°C)	ΔT <sub>w</sub> (°C)	Heat transfer rate (W)	η (%)
578	1.5	76.74	75.48	33.40	62.21	29.53	32.16	2.64	275.92	31.83
	2.0	82.26	79.50	35.48	69.67	33.51	36.10	2.59	361.57	41.70
	2.5	78.79	76.79	34.79	62.37	32.24	34.00	1.77	308.56	35.59
	3.0	79.58	77.76	36.72	61.30	33.32	35.05	1.73	363.15	41.89
666	1.5	89.98	85.63	34.72	71.18	29.94	34.13	4.19	438.83	43.93
	2.0	91.62	86.31	35.70	76.72	33.50	37.33	3.83	535.05	53.56
	2.5	90.82	85.75	35.71	72.84	32.22	35.36	3.15	549.08	54.96
	3.0	89.66	85.02	37.20	68.23	33.58	36.20	2.62	549.40	55.00
776	1.5	97.46	90.61	36.16	77.41	30.18	36.15	5.97	624.98	53.69
	2.0	98.57	90.25	36.14	82.63	33.58	38.92	5.34	745.24	64.02
	2.5	96.95	89.22	36.20	77.56	32.15	36.38	4.23	738.02	63.40
	3.0	94.95	88.44	37.77	72.92	33.66	37.43	3.77	789.81	67.85
860	1.5	103.50	95.37	37.48	82.71	30.48	38.04	7.56	791.69	61.37
	2.0	102.39	93.03	36.14	85.81	33.34	39.87	6.53	911.32	70.65
	2.5	102.60	93.30	37.03	82.86	32.19	37.50	5.31	927.01	71.86
	3.0	98.69	91.83	37.40	75.94	33.31	37.86	4.56	954.01	73.95
985	1.5	107.53	98.96	38.08	86.37	30.49	39.10	8.61	900.94	60.98
	2.0	107.25	96.86	36.35	89.71	33.20	40.96	7.76	1083.04	73.30
	2.5	106.91	96.58	37.53	88.19	32.93	39.15	6.23	1086.41	73.53
	3.0	102.92	94.72	37.73	78.12	33.20	38.44	5.24	1097.62	74.29

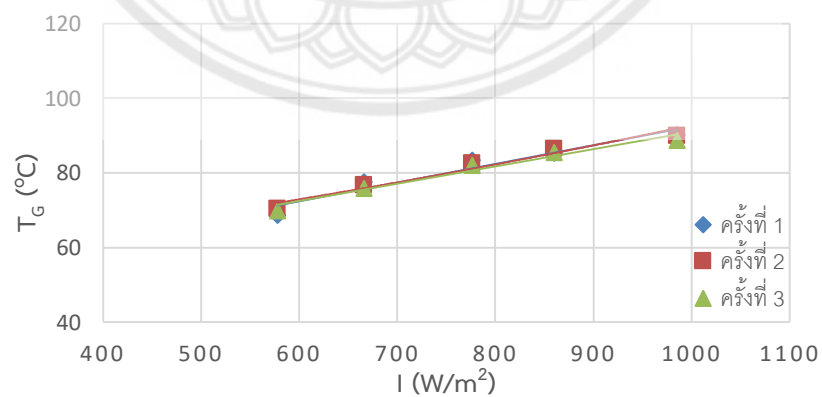
### ภาคผนวก ข



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นดูดกลืน ( $T_p$ ) เทียบกับความเข้มแสง ( $I$ )

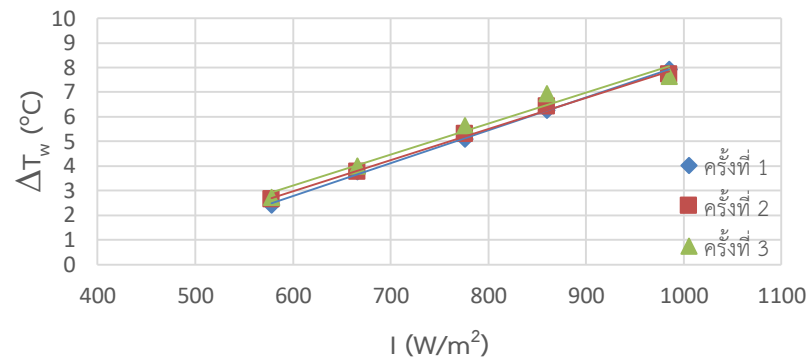


(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหย ( $T_{EVAP}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

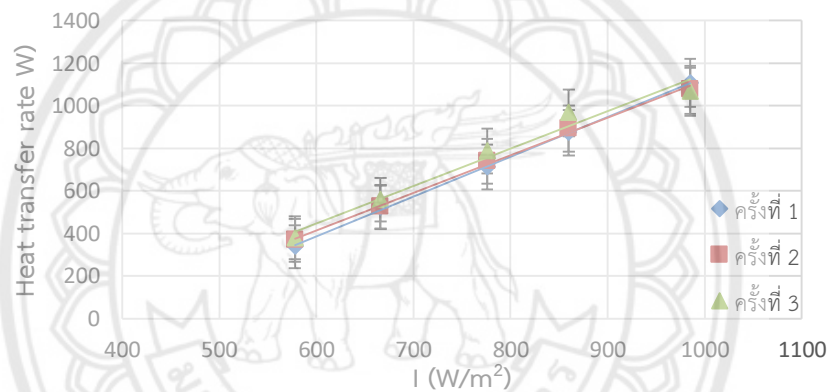


(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นกระจก ( $T_g$ ) เทียบกับความเข้มแสง

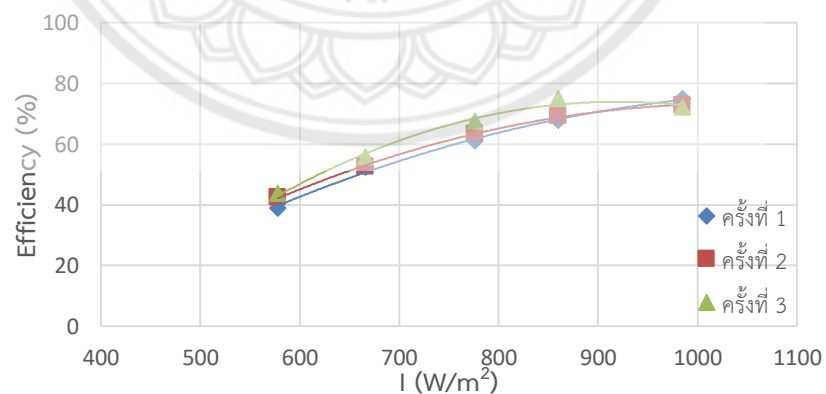
รูปที่ ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง  
ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min



รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min

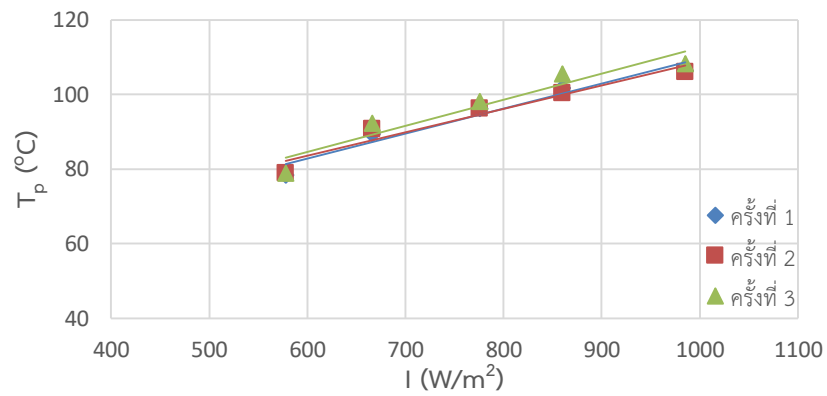


(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

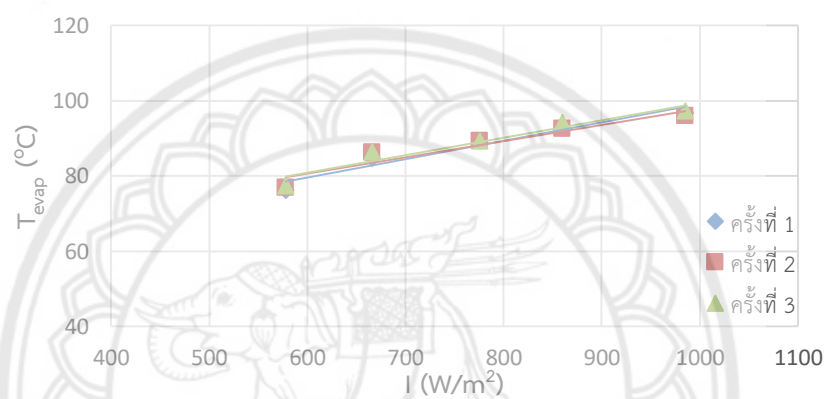


(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) กับความเข้มแสง

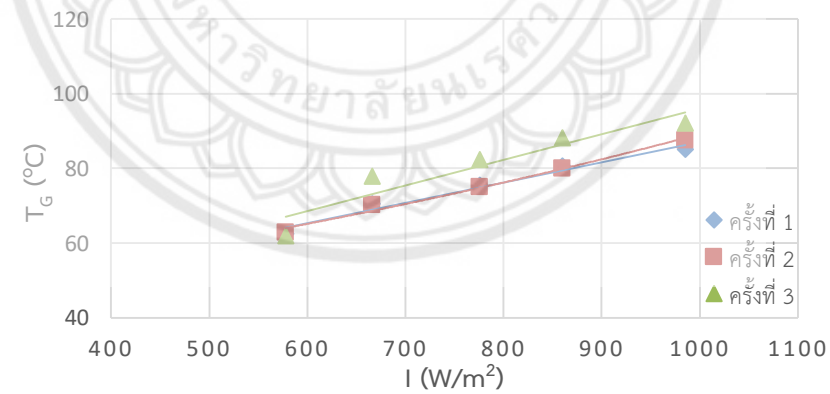
รูปที่ ข.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.0 L/min



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นดูดกลืน ( $T_p$ ) เทียบกับความเข้มแสง (I)



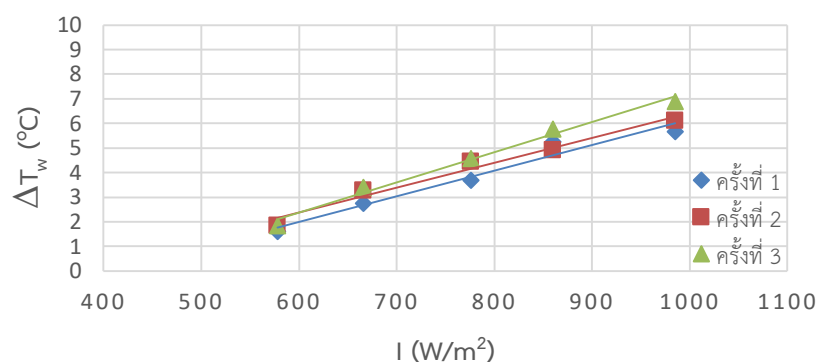
(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหย ( $T_{EVAP}$ ) เทียบกับความเข้มแสง



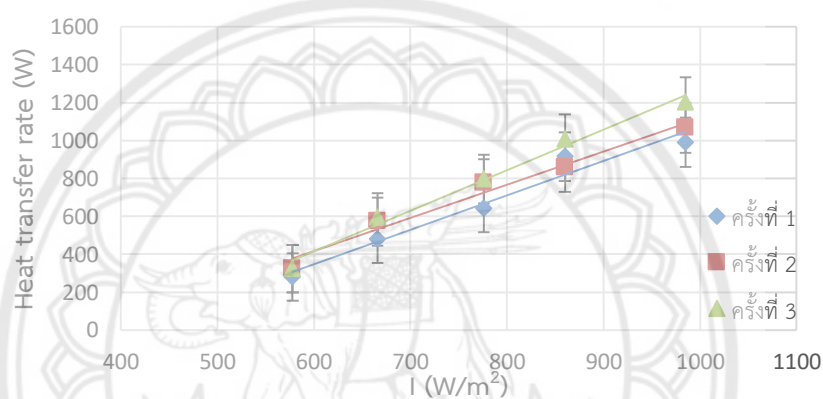
(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นกระจก ( $T_g$ ) เทียบกับความเข้มแสง

รูปที่ ข.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min

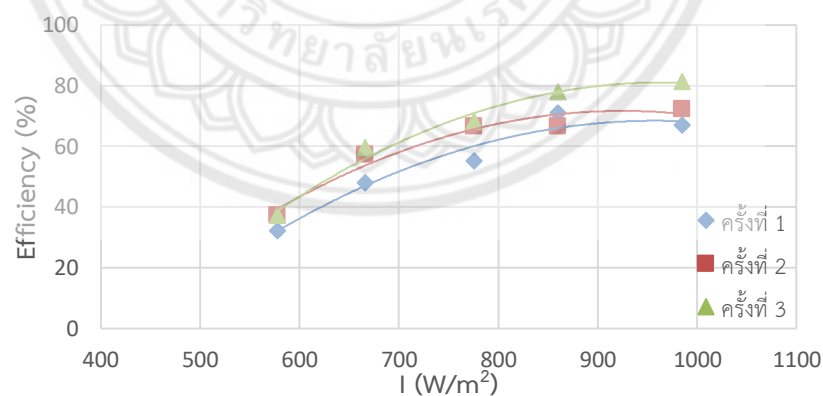




รูปที่ ข.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min

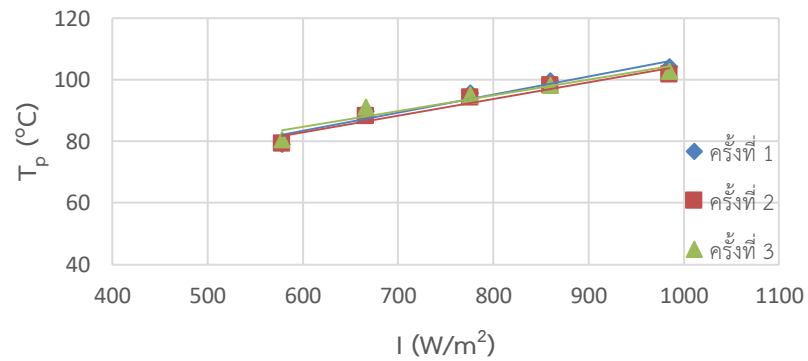


(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

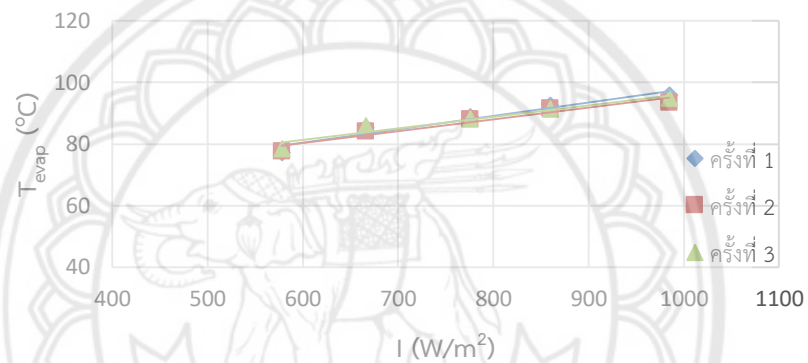


(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) กับความเข้มแสง

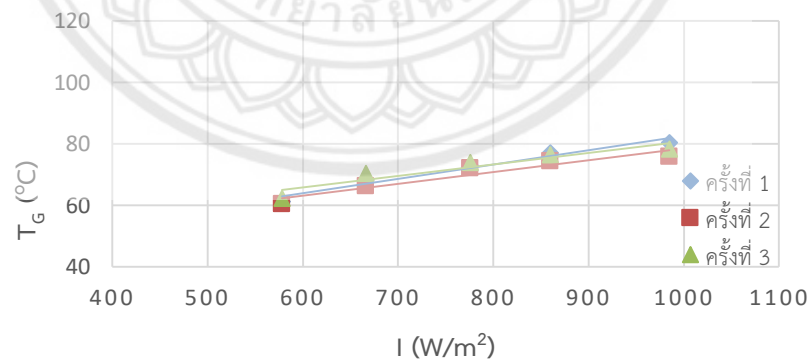
รูปที่ ข.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2.5 L/min



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นดูดกลืน ( $T_p$ ) เทียบกับความเข้มแสง ( $I$ )

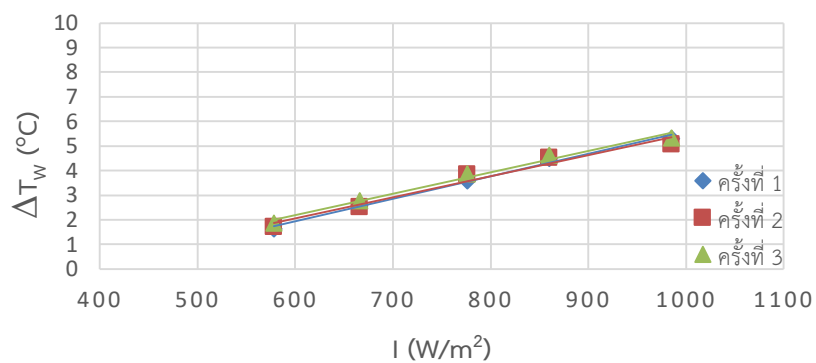


(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนทำระเหย ( $T_{EVAP}$ ) เทียบกับความเข้มแสง

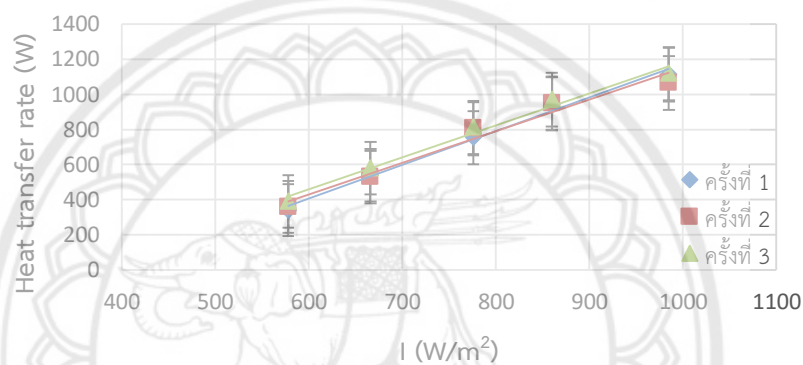


(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแผ่นกระจก ( $T_g$ ) เทียบกับความเข้มแสง

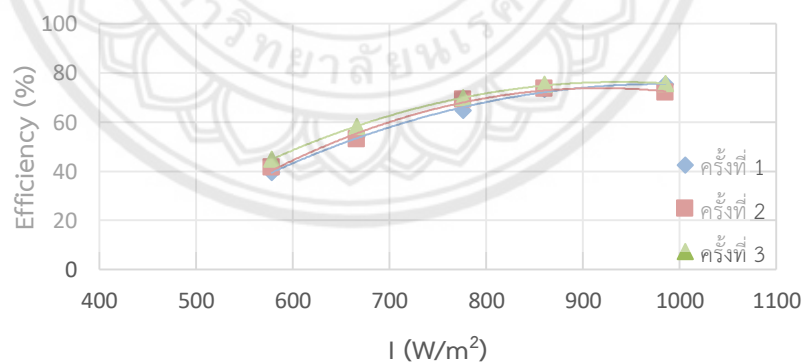
รูปที่ ข.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิส่วนต่างๆ ของตัวรับรังสีเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min



รูปที่ ข.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min



(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อน ( $Q_{out}$ ) เทียบกับความเข้มแสง



(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน (Efficiency) กับความเข้มแสง

รูปที่ ข.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับความเข้มแสง ณ อัตราการไหลของน้ำ 3.0 L/min