



64265

รายงานการวิจัย

สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ร่วมโรงเรือนกระจก

Performance of solar collector assists greenhouse

จารุวัฒน์ เจริญจิต

Jaruwat Jareanjit

551.5271

๑ 274

จีระศักดิ์ เพียรเจริญ

Jeerasak Peanjaroen

2557

บรรเจิด โปฏกรณ์

Bunjerd Potakarut

วิจัย / แสงอาทิตย์
รังสี - อากาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2557

สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ร่วมโรงเรือนกระจก

จากรุวัฒน์ เจริญจิต จีระศักดิ์ เพียรเจริญ และบรรเจิด โปฏุภรณ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเชิงทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีปกติ เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโรงเรือนกระจกที่ทำจากผ้าใบพลาสติกใส กรณีที่ 1 ติดตั้งในโรงเรือนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก และกรณีที่ 2 ติดตั้งในเรือนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน โดยใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป โดยทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบขนาด 1.95 ตารางเมตรทำมุม 7 องศา กับแนวราบ ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 0, 30, 60, 90 % ของอุณหภูมิ $(T_{\text{in(max)}} - T_a)$ โดยวัดอุณหภูมิที่ทางเข้า และทางออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและค่ารังสีอาทิตย์ ตามลำดับ จากการทดสอบพบว่า สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบกรณีปกติ มีค่า $F_R \tau \alpha = 0.659$ และ $F_R U_L = 9.555 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโรงเรือนกระจก กรณีที่ 1 มีค่า $F_R \tau \alpha = 0.645$ และ $F_R U_L = 8.923 \text{ W/m}^2\text{K}$ และกรณีที่ 2 มีค่า $F_R \tau \alpha = 0.567$ และ $F_R U_L = 8.304 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับ โดยสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโรงเรือนกระจกสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในกรณีปกติ เมื่อพิจารณาในส่วนของเทอมการสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$) พบว่าโรงเรือนกระจกส่งผลให้เทอมการสูญเสียความร้อนลดลง ตามลำดับ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่เหมาะสม ในการเพิ่มสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เพื่อประสิทธิภาพทางพลังงานความร้อนของระบบความร้อนรังสีอาทิตย์ที่ทำงานต่อเนื่องกันสูงขึ้น โดยใช้โรงเรือนกระจกต่อไป

Performance of solar collector assists greenhouse

Jaruwat Jareanjit, Jeerasak Peanjaroen and Bunjerd Potakarut

ABSTRACT

The purpose of this experimental research is to compare the performance of the sole solar collector to that of the solar collector assisted by a greenhouse made of plastic canvas. The experiment was carried out into two cases. In Case 1, the collector was installed in a plastic greenhouse and a variable was the outdoor temperature. In Case 2, the collector was installed in a plastic greenhouse and a variable was the indoor temperature. The performance of the solar collectors was tested according to ASHRAE STANDARD 93-2003. The flat-sheet solar collector of 1.95 m^2 with slat 10 degrees was used. The temperature at 0, 30, 60, 90 % ($T_{fi(max)} - T_a$) was recorded and tested. The temperature measured at the entrance and the exit of the collectors, the ambient temperature and the solar radiation values were used as the data. The research result indicates that the performance of the flat-sheet sole solar collector was $F_R \tau \alpha = 0.659$ and $F_R U_L = 9.555 \text{ W/m}^2\text{K}$; the performance of the solar collector in Case 1 was $F_R \tau \alpha = 0.645$ and $F_R U_L = 8.923 \text{ W/m}^2\text{K}$ and the performance of the solar collector in Case 2 was $F_R \tau \alpha = 0.567$ and $F_R U_L = 8.304 \text{ W/m}^2\text{K}$. The performance of the solar collector assisted by a greenhouse was higher than that of the sole solar collector. In terms of heat loss ($F_R U_L$), the greenhouse could help the reduction of the heat loss. Therefore, the use of greenhouse is an appropriate mean to increase the performance of the sole solar collectors for the greater efficiency of a thermal energy in a thermal system.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำรายงานการวิจัยเรื่อง สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ร่วมโรงเรือนกระจก สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากการได้รับการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณผู้บริหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี พ.ศ. 2557 ตลอดจนคณาจารย์สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนวทางในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมาโดยตลอด และที่จะขาดมิได้คือครอบครัวและคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

จารุวัฒน์ เจริญจิต

จีระศักดิ์ เพ็ชรเจริญ

บรรเจิด โปฏกรณ์

กรกฎาคม 2557



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ข
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์	3
2.2 ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency)	5
2.3 ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ (Solar water heating systems)	7
2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	16
3.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	16
3.2 ออกแบบและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์	18
3.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ	21
3.4 การทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของ ASHRAE Standard 93-2003	23
3.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE	25
3.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	26
4.1 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีระบบปกติ	26
4.2 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งใน โรงเรียนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (case: 1)	26
4.3 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งใน โรงเรียนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน (case:2)	27
4.4 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) ทั้ง 3 กรณี	28
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	29
5.1 สรุปผลการทดลอง	29
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
บรรณานุกรม	30
ภาคผนวก ก	32
รูปโครงสร้างและส่วนประกอบตัวเครื่อง	32
ภาคผนวก ข	46
ภาพจากตอนที่ทดสอบ	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ปราศจากมลพิษ มีศักยภาพในการทดแทนพลังงานฟอสซิล ซึ่งมีแนวโน้มราคาที่จะเพิ่มสูงขึ้นและกำลังหมดไปอย่างรวดเร็ว รวมถึงเป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อน ปัจจุบันรังสีอาทิตย์สามารถนำมาใช้ได้สองรูปแบบคือ การนำรังสีอาทิตย์มาใช้ในรูปแบบ ความร้อน (solar thermal) และรูปแบบไฟฟ้า (solar cell) ในอนาคตสามารถนำรังสีอาทิตย์มาช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนทางด้านพลังงาน และการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงและทางอ้อม ในบทความนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีความร้อนจากรังสีอาทิตย์สำหรับภาคอุตสาหกรรมพลังงานในอนาคต และการประยุกต์ใช้ สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันพบว่ามีความสำคัญการส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างเป็นทางการ โดยกระทรวงพลังงานจัดทำแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) (Alternative Energy Development Plan: AEDP (2012-2021)) เพื่อกำหนดกรอบและทิศทางการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศ โดยส่งเสริมการนำรังสีอาทิตย์มาผลิตความร้อนในภาคอุตสาหกรรมทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยส่งเสริมโครงการติดตั้งระบบน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ นำร่องในอาคารภาครัฐ พัฒนาระบบน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ระดับครัวเรือนที่มีต้นทุนต่ำ รวมถึงมาตรการบังคับ เช่น บังคับอาคารขนาดใหญ่ติดตั้งระบบน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงถึงการเล็งเห็นศักยภาพทางความร้อนของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ ต่อการประหยัดพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยตรงและโดยทางอ้อม เป็นการส่งเสริมความมั่นคงทางด้านพลังงานในประเทศ และรักษาสิ่งแวดล้อมในภาพใหญ่ระดับประเทศอย่างชัดเจน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการผสมผสานเทคนิคระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์แบบ Active โดยอาศัยปั๊มหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ ร่วมกับการทำงานภายใต้สภาวะเรือนกระจก ซึ่งอาศัยคุณสมบัติของกระจก ที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ ผ่านลงมายังภายในได้ แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากโรงเรือนเอาไว้ จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในตู้กระจก จนมีอุณหภูมิสูงขึ้น พิจารณาว่าจากปัจจัยดังกล่าว จะช่วยลดอุณหภูมิการสูญเสียความร้อน U_L ผู้บรรยากาศ หรือลม จากการที่มีโรงเรือนขนาดเล็กมากคลุม และเป็นการเพิ่ม T_a ส่งผลให้ ลดความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_{in}-T_a$ ลง เมื่อพิจารณาจากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{Q_c}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_f - T_a)}{I_T}$$

ส่งผลให้สมรรถนะของระบบมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยลงทุนเพิ่มเติมในส่วนของโรงเรือนที่คลุมด้วยพลาสติกใส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ชุดเดิมที่มีอยู่แล้ว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างชุดทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์
2. ทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ติดตั้งในโรงเรือนกระจก เทียบกับระบบปกติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ชุดทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่สร้างขึ้นเป็นระบบผลิตน้ำร้อน ขนาด 50 ลิตร ใช้น้ำ เป็นสารทำงานที่อัตราการไหล 0.02 kg/s-m^2 ในการทดสอบสมรรถนะ
2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นราบขนาด 2 ตารางเมตร เป็นแหล่งความร้อนหลักในการผลิตน้ำร้อน โดยติดตั้งทำการทดสอบเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิจุดต่างๆ ภายใต้ศักยภาพของรังสีอาทิตย์ ภูมิภาคที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จังหวัดสงขลา
3. สร้างโรงเรือนกระจกโดยโครงสร้างคลุมด้วยพลาสติกใส ขนาด 1.5 เมตร x 2 เมตร x 2 เมตร 1 ชุด เพื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของระบบที่ใช้ติดตั้งในเรือนกระจก และติดตั้งภายนอก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์ เพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการทางความร้อนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นการลดการนำเข้าเชื้อเพลิง
2. ส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียน ช่วยพัฒนาการผลิต ลดต้นทุนพลังงาน ในการผลิตความร้อนในอุตสาหกรรม หรือด้านเกษตรกรรมในพื้นที่อีกทั้งเพิ่มความมั่นคงทางพลังงาน
3. เป็นการใช้พลังงานสะอาด ลดการทำลายสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยอีกทางหนึ่ง
4. ได้ข้อมูลศักยภาพทางความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาวิจัย พัฒนาและถ่ายทอดเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่อไป
5. เป็นการบูรณาการความรู้ช่วยในการแก้ปัญหาขาดแคลนพลังงานของประเทศ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หลักในระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ โดยทำหน้าที่ดูดกลืนการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ เปลี่ยนเป็นความร้อน และถ่ายโอนให้กับตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดี ต้องมีค่าส่งผ่านและดูดกลืน ($\tau\alpha$) รังสีอาทิตย์สูง (transmittance & absorptance) โดยสีดำมีค่าดูดกลืนรังสีสูงสุด ดังนั้นผิวแผ่นดูดกลืนรังสีส่วนใหญ่เคลือบผิวสีดำ นอกจากนี้ได้มีการพัฒนาผิวเลือกรังสี (selective surfaces) ที่มีคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีอาทิตย์สูง และการเปล่งรังสี (emittance) ความร้อนต่ำ ($\alpha = 0.9$ และ $\varepsilon = 0.1$) เพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากการเปล่งรังสีจากแผ่นดูดกลืนรังสีสู่สิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าสีดำด้านทั่วไป ซึ่งปัจจุบันกรรมวิธีการผลิตผิวเลือกรังสีอาทิตย์มีต้นทุนต่ำลง จึงสามารถพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงขึ้น และราคาต่ำลง นอกจากนี้การติดตั้งกระจกโปร่งใส ที่มีค่าส่งผ่านรังสีอาทิตย์สูง และดูดกลืนรังสีอาทิตย์ต่ำ (วัสดุชนิดเดียวกันจะมีค่าแปรผกผันกัน) ปิดผิวแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เพื่อเพิ่มความสามารถดูดกลืนรังสี และลดการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนสู่บรรยากาศ ซึ่งการวิเคราะห์สมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จะพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนที่สภาวะคงตัว (steady state) โดยใช้สมการของ Hottel-Willier-Bliss ในการหาอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_c = A_c F_R [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_f - T_a)] \quad (1)$$

โดยที่ Q_c ค่าอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ของสารทำงาน คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q_c = m C_p (T_{fo} - T_{fi}) \quad (2)$$

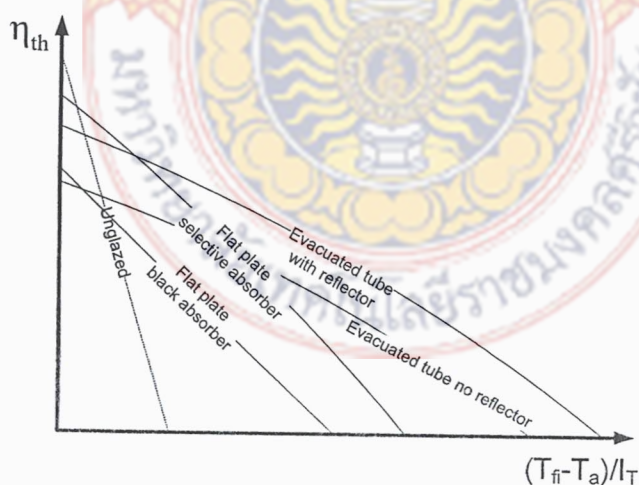
เมื่อ Q_c คืออัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี (W), F_R คือแฟกเตอร์การนำความร้อนมาใช้ของตัวเก็บรังสี, A_c คือพื้นที่แผ่นดูดกลืนรังสี (absorber area, m^2), I_T คือ ค่ารังสีอาทิตย์ (W/m^2), $\tau\alpha$ คือผลคูณประสิทธิภาพค่าส่งผ่านและดูดกลืนของตัวเก็บรังสี, U_L คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมจากแผ่นดูดกลืนรังสี ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ C$), m คืออัตราการไหลของ

ของไหล(kg/s), C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ(J/kg °C), T_{fi} คืออุณหภูมิของสารตัวกลางเข้าตัวเก็บรังสี (°C) และ T_{fo} คืออุณหภูมิของสารตัวกลางออกตัวเก็บรังสี (°C) ตามลำดับ

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีคำนวณจากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{Q_c}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{I_T} \quad (3)$$

ในทางปฏิบัติ ค่า $F_R (\tau\alpha)$ และค่า $-F_R U_L$ สามารถหาได้จากการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE (ASHRAE STANDARD 93-2003, 2003) โดยนำข้อมูลการทดสอบดังกล่าว มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $(T_{fi} - T_a)/I_T$ กราฟที่ได้สามารถวิเคราะห์เป็นสมการเส้นตรงที่ได้จากการ (fit curve) โดยข้อมูลที่ได้ จะแสดงสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังนี้ โดยที่จุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ η_{th} จะแสดงค่า $F_R (\tau\alpha)$ และค่าความชันของเส้นกราฟจะแสดงค่า $-F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดต่างๆ ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.1 โดยค่า $F_R (\tau\alpha)$ แสดงประสิทธิภาพเชิงรังสี ซึ่งแสดงค่าการส่งผ่าน และค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี ส่วนเทอม $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีแบบต่างๆ โดยประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จะแปรผกผันตามค่าการสูญเสียความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยตัวเก็บรังสีแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะของเส้นกราฟแตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ [1]

พิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จากภาพที่ 2.1 พบว่าที่สภาวะเดียวกัน ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ที่มีกระจกปิด (glazed flat plate) มีสมรรถนะสูงกว่า ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ที่ไม่มีกระจกปิด (unglazed flat plate) โดยแผ่นดูดกลืนรังสี (absorber plate) ที่เคลือบผิวเลือก รังสีบนแผ่นดูดกลืนรังสี (flat plate selective absorber) มีสมรรถนะสูงกว่า การเคลือบด้วยสีดำ (flat plate black absorber) ในขณะที่ตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศ (evacuated tube) มีสมรรถนะสูงกว่า ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ เนื่องจากสุญญากาศ ช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกจากแผ่นดูดกลืน รังสี ตามลำดับ และมีสมรรถนะสูงขึ้น เมื่อติดตั้งแผ่นสะท้อนแสง (evacuated tube with reflector) ให้รังสีตกกระทบแผ่นดูดกลืนรังสีได้มากขึ้นตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าว พบว่าสมรรถนะตัวเก็บ รังสีอาทิตย์ เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับ วัสดุที่ใช้ดูดกลืนรังสี ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ และการ สูญเสียความร้อน โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีสมรรถนะสูง ต้องมีประสิทธิภาพเชิงรังสี $F_R (\tau\alpha)$ สูง และมีค่าการสูญเสียความร้อนต่ำ $-F_R U_L$ ตามลำดับ เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงาน η_{th} ของตัว เก็บรังสีอาทิตย์ มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสารตัวกลางในตัวเก็บรังสีสูงขึ้น ดังนั้นการลดการสูญเสีย ความร้อนดังกล่าวจึงมีความสำคัญ นอกเหนือจากการเลือกวัสดุดูดกลืนรังสี และการเพิ่มความเข้ม รังสีโดยการสะท้อนรวมแสง ซึ่งเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ ดังนั้น สามารถพิจารณาได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีสมรรถนะสูง เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (1) และ (3) จะต้องมีอัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี (Q_c) และประสิทธิภาพ (η_{th}) สูง ในทุกช่วงอุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามค่าการส่งผ่านค่าดูดกลืนรังสี ($\tau\alpha$) ของวัสดุ และความเข้มของรังสีอาทิตย์ จาก อัตราส่วนการรวมรังสี (concentration ratio) ตามลำดับ โดยแปรผกผันกับค่าการสูญเสียความร้อน ($-F_R U_L$) ต่ำ ส่งผลให้ลักษณะของกราฟสมรรถนะมีจุดตัดแกน $y (\eta_{th})$ สูง แต่มีความชันของ กราฟ ($-F_R U_L$) ต่ำ สามารถผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

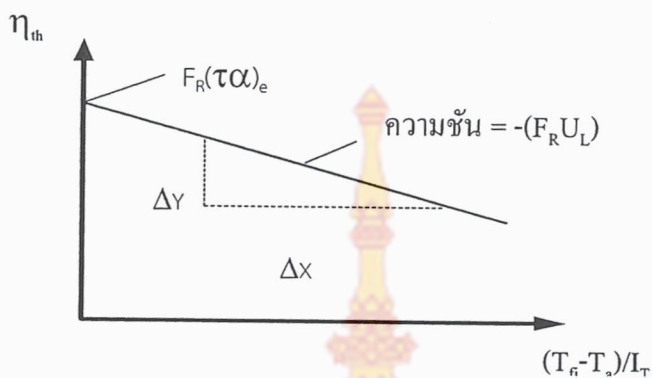
2.2 ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีจะเป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ ได้จากรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี กำหนดจาก

$$\eta_{th} = \frac{q_c}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha)_c - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{I_T} \quad (4)$$

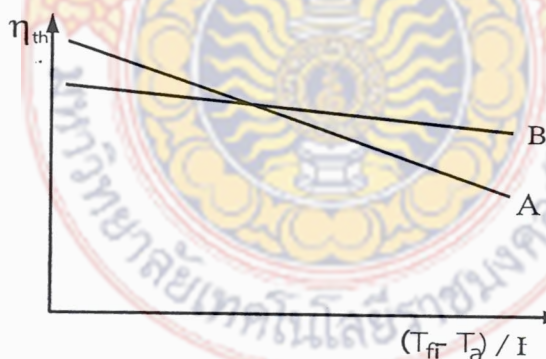
เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง η_c และ $(T_f - T_a)/I_T$ มาพล็อตกราฟจะได้เป็นสมการเส้นตรงโดย มีค่าความชันของเส้นกราฟเท่ากับ $-F_R U_L$ และค่าจุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ (η_{th}) คือค่า $F_R (\tau\alpha)_c$.

ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และค่า $-F_R U_L$ ของโครงการวิจัยนี้สามารถหาได้จากการทดลองโดยหาจากสมการที่ 4 และนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า η_{th} และ $(T_f - T_s)/I_T$

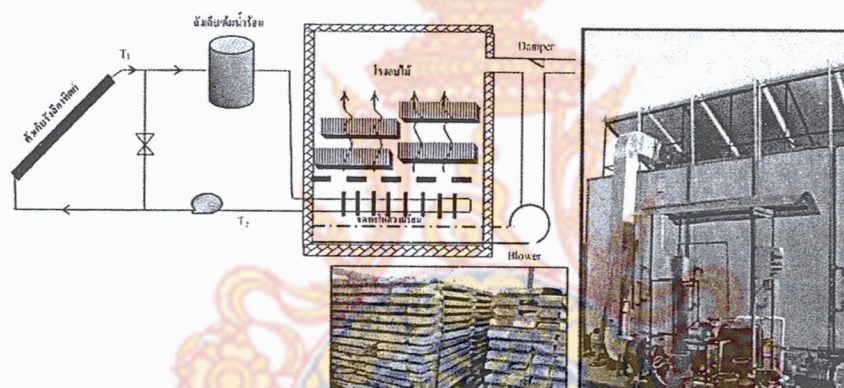
ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ แสดงสมรรถนะเชิงรังสี ถ้ามีค่าสูงแสดงว่า การส่งผ่านค่าดูคกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีมีค่าสูง ส่วนเทอม $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าตัวเก็บรังสีดังกล่าวป้องกันความร้อยสูญเสียไม่ดีพอ ทั้ง 2 แบบนี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสี ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากรูปตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ A เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่แบบ B เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง



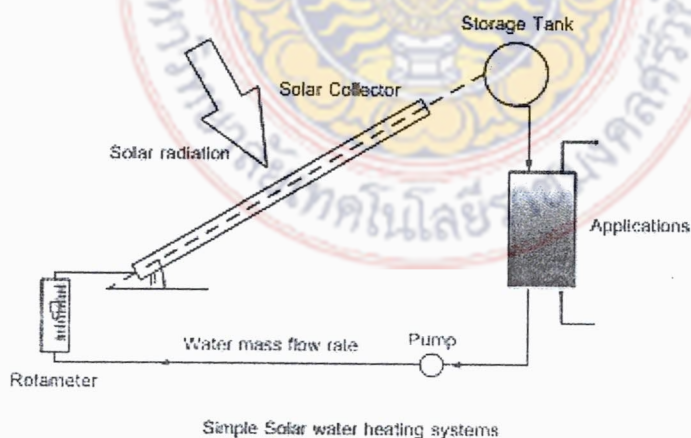
รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ A และ B

2.3 ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ (Solar water heating systems)

เป็นระบบที่ศักยภาพในการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง โดยระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ที่มีถึงสะสมความร้อน เป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลักในการผลิตน้ำร้อนระดับอุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อนำไปถ่ายเทให้กับอาคาร เช่น ในการผลิตอากาศร้อน สำหรับระบบอบแห้ง ตามลำดับ รูปที่ 2.4 เป็นการผลิตน้ำร้อน เพื่อใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ไม้ [2] น้ำร้อนที่ผลิตได้ จะถูกป้อนผ่านขดท่อในห้องอบไม้ และทำอากาศภายในห้องให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอากาศร้อน จะลอยตัวผ่านกองไม้ที่ต้องการอบแห้ง และพาความชื้นออกไปจากห้อง ในกรณีที่อุณหภูมิไม่สูงพอ ที่ถังค้ำน้ำร้อนจะมีการให้ความร้อนเสริม เพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำที่เข้าสู่ขดท่อในห้อง ให้อุณหภูมิที่ อุณหภูมิอากาศร้อนสามารถทำได้ถึง 80°C



รูปที่ 2.4 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ไม้ ด้วยระบบน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ [2]



รูปที่ 2.5 ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์พื้นฐาน

โดยรูปที่ 2.5 แสดงพื้นฐานของระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังต่อไปนี้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เปลี่ยนเป็นความร้อนถ่ายโอนให้กับสารตัวกลาง (น้ำ อากาศ หรือ ของไหลชนิดอื่น) ที่ไหลผ่านท่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ในกระบวนการทางความร้อนทันที หรือส่งไปถึงสะสมความร้อน สำหรับใช้ในกรณีที่โหลดความร้อนไม่คงที่ หรือสำรองความร้อนเพื่อใช้ในช่วงที่ไม่มีรังสีอาทิตย์ โดยใช้ปั๊ม หรือพัดลม ในระบบ Active หรือ อาศัยหลักการหมุนเวียนโดยธรรมชาติ ในระบบ Passive ตามลำดับ ซึ่งพลังงานความร้อนดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานโดยตรง (direct systems) หรือ โดยทางอ้อม (indirect systems) โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน[3] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 กรณีแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารตัวกลางถ่ายโอนความร้อนต่างชนิดกันตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งความร้อนหลัก หรือ แหล่งความร้อนเสริมเพื่อประหยัดพลังงาน โดยน้ำเป็นสารทำงานที่นิยมใช้ในระบบดังกล่าว จากคุณสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่มีค่าเท่ากับ $4.187 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ส่งผลให้สามารถสะสมความร้อนได้ดี และสามารถถ่ายโอนความร้อนให้กับสารทำงานชนิดอื่นที่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะต่ำกว่า (อากาศ หรือน้ำมัน) และมีการผลิตเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ในรูปแบบของระบบนิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นหลัก หรือ แหล่งความร้อนเสริมเพื่อประหยัดพลังงาน ต่อไป

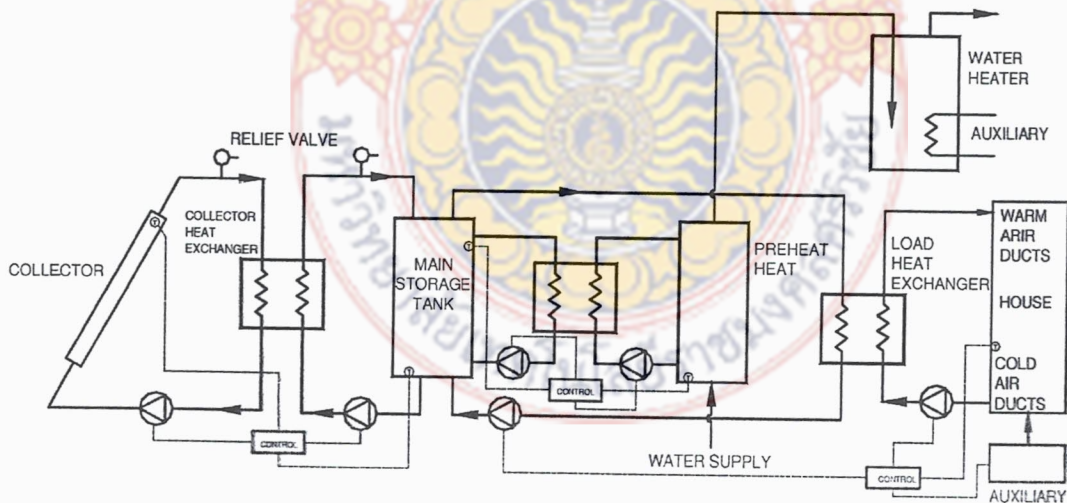


Fig. 36. Detail schematic of a solar water heating system.

รูปที่ 2.6 ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ แบบมีแหล่งความร้อนเสริม พร้อมถึงสะสมความร้อน สำหรับจ่ายน้ำร้อน และอากาศร้อน [3]

ตารางที่ 2.1 ประเภทของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบต่างๆ และช่วงอุณหภูมิที่ผลิตได้ [4]

การเคลื่อนที่	ประเภทตัวเก็บรังสีอาทิตย์	ลักษณะการ ดูดกลืนรังสี	ช่วงอุณหภูมิ (°C)
อยู่กับที่	ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (FPC)	แผ่นราบ	30-80
	ตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศ (ETC)	แผ่นราบ	50-200
	ตัวเก็บรังสีแบบซีพีซี (CPC)	แนวท่อ	60-240
ติดตาม ดวงอาทิตย์ 1 แกน	ตัวเก็บรังสีแบบซีพีซี (CPC)	แนวท่อ	60-300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	แนวท่อ	60-250
	ตัวเก็บรังสีแบบรางพาราโบลา (PTC)	แนวท่อ	60-300
	ตัวเก็บรังสีแบบรางทรงกระบอก (CTC)	แนวท่อ	60-300
ติดตาม ดวงอาทิตย์ 2 แกน	ตัวสะท้อนรังสีแบบจานพาราโบลา (PDR)	จุดโฟกัส	100-500
	Heliostat field collector (HFC)	จุดโฟกัส	150-2000

ปัจจุบันมีตัวเก็บรังสีอยู่หลายชนิด มีคุณลักษณะเฉพาะ[4] ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 ซึ่งแต่ละชนิดมีศักยภาพเชิงความร้อน หรือช่วงอุณหภูมิที่ผลิตได้ แตกต่างกัน โดยช่วงอุณหภูมิดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการทางความร้อนในหลายระดับตามความเหมาะสม แต่ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ และเหมาะสำหรับนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยทั่วไปที่นิยมใช้จะมีอยู่สองชนิดคือ ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบมีกระจกปิด และตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ซึ่งยึดอยู่กับที่ (stationary) หันหน้าไปทางทิศใต้ เมื่อตำแหน่งติดตั้งอยู่ซีกโลกเหนือ หรือหันหน้าไปทางทิศเหนือ เมื่อตำแหน่งติดตั้งอยู่ซีกโลกใต้ สำหรับประเทศไทยอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตร อยู่ซีกโลกเหนือ จึงหันหน้าไปทางทิศใต้ เพื่อรับรังสีได้ตลอดทั้งปี ทำมุมกับแนวระดับ 10–15° เท่ากับตำแหน่งละติจูด (latitude) เพื่อให้แผงตั้งฉากกับรังสีอาทิตย์ อาจจะมากกว่า หรือน้อยกว่า ตามความเหมาะสม

จากข้อมูลที่ผ่านมา พบว่ารังสีอาทิตย์มีศักยภาพทางความร้อนในการผลิตสารทำงานอุณหภูมิช่วงต่างๆ ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่ง (European Solar Thermal Industry Federation, 2006) รายงานช่วงอุณหภูมิที่มีศักยภาพในกระบวนการทางความร้อนภาคอุตสาหกรรมต่างๆ โดยในอุตสาหกรรม การอบแห้ง ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง (30-90°C) เมื่อพิจารณาพร้อมกับข้อมูลในตารางที่ 2 พบว่า ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (FPC) สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะมีศักยภาพสูงขึ้น เมื่อสามารถทำอุณหภูมิได้ประมาณ 250°C ซึ่งช่วงอุณหภูมิ 80°C-250°C ตัวเก็บรังสีแบบท่อสุญญากาศ (ETC), และตัวเก็บรังสีแบบซีพีซี (compound parabolic collector; CPC) มีสมรรถนะในการผลิตน้ำร้อนได้ มีความเป็นไปได้สูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ ในอุตสาหกรรมอบแห้ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นระบบ Active และสามารถเลือกใช้เป็นระบบสะสมความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาในภาพรวม ระบบดังกล่าวสามารถใช้ในกระบวนการความร้อน ในรูปแบบความร้อน

หลัก ความร้อนเสริม เพื่อลดการใช้พลังงานตามความเหมาะสม หรือ สามารถเลือกใช้เป็นระบบ สะสมความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

งานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวข้องกับระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ทำการศึกษา สมรรถนะของตัวเก็บรังสีรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อระบบทำน้ำร้อน

กอบสิน ทวีสิน [5] ศึกษาและวิจัยตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงาน รังสีอาทิตย์ที่มีลักษณะของท่อที่มีขนาดต่างกันในตัวเก็บรังสี โดยใช้พื้นที่รับรังสีขนาด 1.2 m^2 เพื่อ หาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อน พบว่า ท่อทางเดินของของไหลที่เป็นท่อกลมจะมีสมรรถนะ ดีกว่าท่อแบบสี่เหลี่ยม

พลทรัพย์ บุญวานิช [6] ศึกษาและวิจัยตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบของระบบทำน้ำร้อนด้วย พลังงานรังสีอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บรังสีแบบแผ่นทองแดงและแผ่นอะลูมิเนียม โดยใช้ท่อ ทองแดงขดไปมาบนแผ่นคูริงสี เพื่อหาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนทั้ง 2 แบบ พบท่อทองแดง ครีบทองแดงจะมีสมรรถนะสูงกว่าท่อทองแดงครีบอลูมิเนียม

สมนึก บุญญศาสตร์พันธ์ [7] ทดสอบตัวเก็บรังสีที่มีผิวคูริงสีเป็นท่อทองแดงแบบเซอร์ เพนไทม์และครีบอลูมิเนียมอะโนไดซ์ทาสีดำ โดยศึกษาลักษณะการต่อแบบอนุกรมและแบบขนาน โดยมีถังเก็บน้ำร้อนขนาด 690 L พบว่า ในการต่อแบบขนานไม่ควรเกิน 6 ชุด แต่ละชุดมีตัวเก็บรังสี 5 ตัวต่ออนุกรมกัน ถ้าต่อขนานเกินกว่าค่าดังกล่าวการแจกแจงการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีในแต่ละชุดจะไม่สม่ำเสมอ

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และกานดา แสงจันทร์ [8] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัว เก็บรังสีแบบฮีทไปป์-เรอร์มัลโคไอด์ โดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมโนไดซ์ดำ ขนาด $1.1 \times 1.8 \text{ m}^2$ เป็น แผ่นคูริงสีท่อแถว และท่อเฮดเดอร์เป็นท่อทองแดง ท่อเฮดเดอร์มี 2 ชั้น ซึ่งชั้นในให้น้ำไหลผ่าน ขนาดท่อเฮดเดอร์ $1.578 \times 10^{-2} \text{ m}$ ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0125 kg/s โดยมีอัตราส่วนของปริมาตรน้ำในระบบปิดต่อปริมาตรระบบปิดทั้งหมดที่เหมาะสมมี ค่าประมาณ 0.8 และทดสอบที่สภาวะคงที่ (Steady state) ผลการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสี ได้ค่า $F_R(T\alpha) = 0.453$ และ $F_R U_L = 3.45 \text{ W/m}^2\text{C}$

จารุวัฒน์ เจริญจิต [9] ได้ศึกษามาตรฐานการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสี อาทิตย์แบบแผ่นราบและแบบท่อสุญญากาศ จากการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ ท่อความร้อนสุญญากาศได้ค่าเท่ากับ $F_R \tau\alpha = 0.5628$ และ $F_R U_L = 6.1093 \text{ W/m}^2\text{K}$ เทียบกับตัวเก็บ

รังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบซึ่งมีสมรรถนะเท่ากับ $F_R \tau \alpha = 0.795$ และ $F_{R,U_L} = 12.02 \text{ W/m}^2\text{K}$ ที่อัตราการไหลของสารทำงานในระบบที่ใช้ในการทดสอบประมาณ 0.02 kg/sm^2 แต่นำมาทดสอบที่อัตราการไหลที่ 0.04 kg/s เพื่อให้อุณหภูมิน้ำที่ทางออกแผงสูงขึ้นจึงเลือกที่จะลดอัตราการไหลให้ต่ำลง และต้องคำนวณหาค่า $F_R \tau \alpha$ และ F_{R,U_L} ใหม่ ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบมีค่า $F_R \tau \alpha = 0.4557$ และ $F_{R,U_L} = 4.9468 \text{ W/m}^2\text{K}$ สำหรับแบบท่อความร้อนสุญญากาศ $F_R \tau \alpha = 0.5628$ และ $F_{R,U_L} = 6.1093 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับ จากค่าสมรรถนะพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบเหมาะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำและแบบท่อความร้อนสุญญากาศเหมาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเทอมของการสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ มีค่าสูงกว่าหรือกราฟชันกว่าแบบท่อความร้อนสุญญากาศ ซึ่งเทอมดังกล่าวจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงที่อุณหภูมิน้ำเข้าแผงสูง ๆ

วัฒนพงษ์ รัชวีเชียรและคณะ [10] ได้ศึกษามาตรฐานเพื่อทดสอบสมรรถนะตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-77 ด้วยระบบหมุนตามดวงอาทิตย์ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวเก็บรังสีรังสีอาทิตย์ รุ่น FPS 120 ขนาดตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ $1.20 \text{ m} \times 1.80 \text{ m}$ (2.16 m^2) รุ่น R.D.-F 200 ขนาดตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ $2.00 \text{ m} \times 1.04 \text{ m}$ (2.08 m^2) และรุ่น SOL-B ขนาดตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ $1.03 \text{ m} \times 2.04 \text{ m}$ (2.10 m^2) โดยทำการบันทึกผลและเก็บข้อมูลอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_{am}), อุณหภูมิน้ำเข้าตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ (T_{in}), อุณหภูมิน้ำออกจากตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ (T_{out}) และความเข้มรังสีอาทิตย์ (I_T) เพื่อนำผลข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบรุ่น FPS 120, SOL-B และ R.D.-F 200 ของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์มีประสิทธิภาพเท่ากับ 62.00% ที่อุณหภูมิใช้งาน $44 - 47 \text{ }^\circ\text{C}$ และความเข้มรังสีรังสีอาทิตย์ $900-977 \text{ W/m}^2$, 57.00% ที่อุณหภูมิใช้งาน $42-50 \text{ }^\circ\text{C}$ และความเข้มรังสีรังสีอาทิตย์ $944-996 \text{ W/m}^2$ และ 64.00% ที่อุณหภูมิใช้งาน $46-56 \text{ }^\circ\text{C}$ และความเข้มรังสีรังสีอาทิตย์ $821-844 \text{ W/m}^2$ ตามลำดับ

จอมภพ แวศักดิ์ [11] ได้ศึกษาการหาสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่ติดตั้งบนหลังคาบ้านพักอาศัยในเขตกรุงเทพฯ ผลปรากฏว่าอุณหภูมิแผ่นปิดและอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง $50-55 \text{ }^\circ\text{C}$ และ $104-116 \text{ }^\circ\text{C}$ ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ในช่วง 58%-67% นอกจากนี้ยังได้แสดงสมการประสิทธิภาพของตัวรับรังสีอาทิตย์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการทำนายหาสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบได้อีกด้วย

ฉัตรณรงค์ ยลสวัสดิ์, ศิริชัย เทพา และพิชัย นามประกาย [12] ได้ศึกษาสมรรถนะของหลังคาทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์โดยใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์ ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 โดยออกแบบกระเบื้องกว้าง 50 cm ยาว 100 cm หนา 2 cm มีท่อทองแดง

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 cm ขดทอเป็นแบบขนานภายในพื้นที่กว้าง 40 cm ยาว 80 cm มีระยะห่างระหว่างท่อ 4 cm ตัวแปรที่สนใจคืออุณหภูมิน้ำออกและน้ำเข้า ปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านหลังคา พบว่าสามารถใช้ฟังก์ชันการใช้ประโยชน์รายวันนำไปหาสมรรถนะของระบบได้ ในการดำเนินทดสอบกระเบื้องทำน้ำร้อนซึ่งได้ทดลองในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 จากผลการทดสอบจะแสดงค่า $F_R U_L = 34.65 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ และค่า $F_R (\tau\alpha) = 0.7905$ ซึ่งค่าประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดของแผ่นกระเบื้องมีค่าเท่ากับ 63.05% เมื่อ $(T_n - T_a) / I_T$ มีค่าเป็นศูนย์

เบญจมาศ ปุ้ยอ็อก และวิทยา ยงเจริญ [13] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ซึ่งมีขนาด 150 L จำนวน 2 แผง โดยทำการทดสอบที่อาคารสนามกีฬาในร่ม เพื่อทำน้ำร้อนไปใช้บริเวณห้องอาบน้ำชายและห้องอาบน้ำหญิง ในการทดสอบจะทำการตรวจวัดค่าความเข้มรังสีของรังสีอาทิตย์ ค่าอุณหภูมิน้ำร้อนออกจากแผงที่ 1 และ 2 ค่าอุณหภูมิน้ำเย็นเข้า และค่าอุณหภูมิตั้งแวดล้อม เพื่อนำผลที่ได้ไปหาค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ระบบทำได้สูงสุดและต่ำสุด ค่าประสิทธิภาพของระบบ และผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าเมื่อมีการใช้เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ทดแทนเครื่องทำน้ำร้อนแบบใช้ไฟฟ้า จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอยู่ในช่วง 42.8 % ถึง 78.5% น้ำร้อนมีพลังงานสะสมอยู่ระหว่าง 23.83 - 11.29 MJ/d และอุณหภูมิสูงสุดที่ระบบสามารถทำน้ำร้อนได้ถึง 59.0 - 66.0 $^\circ\text{C}$ เมื่อความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยของแต่ละวันอยู่ในช่วง 306.79-408.68 W/m^2 จากการทดสอบในวันที่ 17 ม.ค. 2550 พบว่า ผลของประสิทธิภาพในแผงที่ 2 จะต่ำกว่าแผงที่ 1 เนื่องจากยังมีน้ำร้อนค้างอยู่ในถังเก็บที่ 2 ทำให้อุณหภูมิน้ำร้อนเริ่มต้นสูงกว่าแผงที่ 1 ดังนั้นจึงไม่สามารถหาประสิทธิภาพของแผงที่ 2 ได้

สมชาย มณีวรรณ และคณะ [14] ได้ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะทางความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ แบบใช้แผ่นปิดใสด้านบนและแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกันทั้งหมด 5 ระบบ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบของ ASHRAE Standard 93-77 ซึ่งแสดงสมรรถนะ ทางความร้อนในรูปสมการเส้นตรงคือ $\eta = F_R (\tau\alpha)_c - F_R U_L (T_n - T_a) / I_T$ โดย ค่า $F_R (\tau\alpha)_c$ เป็นค่าประสิทธิภาพสูงสุดของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ค่า $F_R U_L$ เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงการสูญเสียความร้อนรวมของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ผลการทดสอบพบว่า ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นปิดใส ด้านบนเป็น Low Iron Tempered Glass ความหนา 4.0 mm และใช้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เป็น Aluminum Fin ซึ่งมีค่า $F_R (\tau\alpha)_c = 0.65$ สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีค่าบ่งชี้การสูญเสียความร้อนรวมน้อยที่สุด คือ ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้ แผ่นปิดใสด้านบนเป็นแผ่น โพลีคาร์บอเนต ความหนา 1.0 mm และใช้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เป็น Aluminum Fin ซึ่งมีค่า $F_R U_L = 3.60 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีสมรรถนะ โดยรวมสูงสุด คือตัวรับรังสีอาทิตย์ใช้แผ่นปิดใสด้านบนเป็น

Tempered Glass ความหนา 4.0 mm และใช้แผ่นเคลือบรังสีอาทิตย์เป็น Aluminum extruded with selective surface ซึ่งมีค่า $F_R(\tau\alpha)_c = 0.62$ และมีค่า $F_R U_L = 10.37 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

จากตุงศ์ วาฤทธิ และคณะ [15] ได้ศึกษาและออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์รับน้ำนมดิบแบบ Cleaning In Place (CIP) ของบริษัทตัวอย่างในจังหวัดเชียงใหม่ เลือกระบบการทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีขนาด 4 m^2 มีถึงน้ำสะสมความร้อนขนาด 360 L อัตราการไหลแบบบังคับที่ 1 L/min ผลการทดสอบพบว่า ตัวเก็บรังสีให้พลังงานความร้อนสะสมตลอดช่วงเวลารับรังสี 8 ชั่วโมงที่ 42.5 MJ เมื่อติดตั้งที่ศูนย์รับน้ำนมดิบในเดือนกุมภาพันธ์ 2550 ระบบที่ออกแบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมได้ $30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ คลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎี 1.3% ชุดทดสอบใช้เงินลงทุนเริ่มต้น 80,000 บาท ลดค่าใช้จ่ายเพื่อทำความร้อนในการทำความสะอาดอุปกรณ์รับน้ำนมดิบได้ปีละ 21,900 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 3.7 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายในที่ 27.2%

ชาญวิทย์ วุฒิวงสานนท์ [16] ทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีที่ทำมาจากแผงระบายความร้อนในรถยนต์มีพื้นที่ขนาด 0.2 m^2 จำนวน 10 แผง มาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมและแบบขนานร่วมกัน โดยใช้อัตราการไหล 0.02 kg/sm^2 และได้เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบกันทั้ง 3 ระบบ โดยระบบที่ 1 เป็นระบบที่ทดสอบตามมาตรฐานของ ASHRAE 93-77 ได้ค่า $F_R(\tau\alpha)_c = 0.693$ และค่า $F_R U_L = 7.1764 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ ระบบที่ 2 เป็นระบบที่มีการป้อนน้ำเย็นเข้าผสมในช่วงที่ต่ออนุกรมของชุดระบายความร้อนตัวที่ 2 กับ 3, 3 กับ 4 และ 4 กับ 5 ที่อัตราการไหล 10% ของอัตราการไหลที่ออกจากตัวเก็บรังสีตามลำดับ ได้ค่า $F_R(\tau\alpha)_c = 0.6984$ และค่า $F_R U_L = 6.8086 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ และระบบที่ 3 เป็นสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่มีขายในประเทศซึ่งมีค่า $F_R(\tau\alpha)_c = 0.795$ และค่า $F_R U_L = 12.02 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ พบว่า ระบบมีสมรรถนะเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 37.32, 38.73 และ 34.63% ตามลำดับ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

งานวิจัยในต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ทำการศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีรูปแบบต่างๆ ที่มีผลต่อระบบทำน้ำร้อน

Oonk et al. [17] ได้ศึกษาถึงทฤษฎีสมรรถนะของตัวเก็บรังสี ที่นำมาต่อแบบอนุกรมกันหลายๆ ตัว โดยอาศัยข้อมูลของตัวเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์แต่ละตัวมาใช้คำนวณ จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีที่สองจะต่ำกว่าตัวแรก เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าของน้ำในตัวที่สองสูงกว่าตัวแรก ในทำนองเดียวกันตัวเก็บรังสีที่นำมาต่ออนุกรมในลำดับต่อไป ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีจะต่ำลงตามลำดับ

McCluney and Merriger [18] ได้ศึกษาปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นของระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์และได้เสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นมากคือ อุณหภูมิของน้ำไม่ได้ตามต้องการ โดยมีสาเหตุจากหลายประการ เช่น ตัวเก็บรังสี ระบบท่อเครื่องสูบน้ำ ถังสะสมน้ำ และอุปกรณ์ในการควบคุมต่างๆ

Selcuk [19] ได้ทำการศึกษาทดลองหาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่ใช้ผลิตน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง และเสนอวิธีการทดสอบ คือ การลดการสูญเสียความร้อนที่ด้านบน ในการทดลอง Selcuk ได้ใช้ Styrocel และ Tedlar 200 วางในลักษณะต่างๆ บนแผ่นดูดกลืนรังสี ในการทดลองนี้ ทำการทดสอบหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากตัวเก็บรังสีแต่ละแบบ ได้ทำการทดสอบในเวลากลางคืนโดยการนำเอาน้ำไหลผ่านตัวเก็บรังสีแต่ละตัว และวัดอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำ จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน ส่วนการทดสอบหาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีได้ทำการทดสอบในเวลากลางวัน จากผลการทดสอบพบว่า Styrocel สามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีเพิ่มขึ้น

Tripanagnostopoulos and Souliotis [20] นักวิจัยชาวกรีซ ได้ทำการศึกษาทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบเพิ่มผิวโค้งสะท้อนรังสีที่รวมถึงสะสมน้ำร้อนอยู่ภายใน (integrated collector storage solar hot water systems (ICS)) แบบถังคู่และรวม ไปถึงวิธีการออกแบบลักษณะการวางถังในตัวเก็บรังสีแบบต่างๆ ด้วย ซึ่งได้ทำการคำนวณเกี่ยวกับรัศมีที่วางถังที่สามารถมีมุมตกสะท้อนของรังสีอาทิตย์เข้ามาได้มากที่สุด และผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในถังเก็บสะสมทั้งคู่ตลอด 3 วันที่ทำการทดลอง จากผลการทดสอบปรากฏว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบรวมถังสะสมน้ำร้อนอยู่ภายในที่ทำการทดสอบทั้ง 6 แบบนั้น แบบที่ 1 คือ แบบที่ถังเก็บสะสมน้ำจะอยู่ภายในตัวเก็บรังสีข้างละในตัว จะทำอุณหภูมิภายในถังเก็บสูงที่สุด ส่วนแบบที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดคือ แบบที่ 2 จะมีลักษณะการวางถังที่ซ้อนกัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้ง 6 แบบมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำภายในถังใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพของตัวรับรังสีทั้ง 6 แบบแบบที่ 1 ก็จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเช่นกัน

สรุปงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งภายในประเทศไทยและต่างประเทศ พบว่า งานวิจัยทั้งหมดของประเทศไทยจะเป็นการวิจัยเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและตัวเก็บรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศแบบ Active โดยอาศัยปั๊มหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ ผลการทดสอบของนักวิจัยของแต่ละท่านจะ พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเก็บรังสีแบบท่อแก้วสุญญากาศที่อุณหภูมิน้ำเข้าแผงต่ำ แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าที่อุณหภูมิน้ำเข้าแผงสูง และมีการทดสอบสมรรถนะระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบในการผลิตน้ำร้อน แต่ไม่นิยมใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศในการผลิตน้ำร้อน ในส่วนงานวิจัย

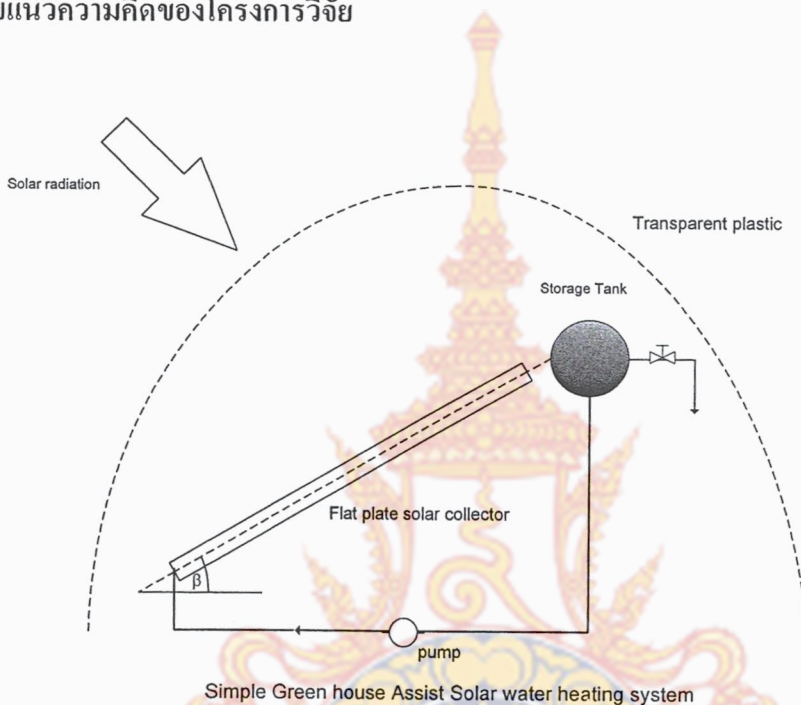
ของต่างประเทศ ส่วนใหญ่จะทำการวิจัยเพื่อทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ และศึกษาทดสอบในกรณีการสูญเสียความร้อนภายในตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ วิธีการลดการสูญเสียความร้อนในตัวเก็บรังสีคล้ายกับงานวิจัยภายในประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการผสมผสานเทคนิคระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์แบบ Active โดยอาศัยปั๊มหมุนเวียนน้ำร้อนในระบบ ร่วมกับ การทำงานภายใต้สภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งอาศัยคุณสมบัติของกระจก ที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ ผ่านลงมายังภายในได้ แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากโรงเรือนเอาไว้ จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในตู้กระจก จนมีอุณหภูมิสูงขึ้น พิจารณาว่าจากปัจจัยดังกล่าวจะช่วยลดเทอมการสูญเสียความร้อน U_L ผู้บรรยากาศ หรือลม จากการที่มีโรงเรือนขนาดเล็กมากคลุม และเป็นการเพิ่ม T_a ส่งผลให้ ลดความแตกต่างของอุณหภูมิ $T_n - T_a$ ลง ตามลำดับ โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่มีความนิยม

เพื่อหาศักยภาพทางความร้อน ข้อมูลสำหรับอ้างอิง และกำหนดกรอบเบื้องต้นในการประยุกต์ และออกแบบการใช้งานอุตสาหกรรมการผลิต และอุตสาหกรรมเกษตรทางภาคใต้ในทางตรงและอ้อมต่อไปในอนาคต เป็นวิชาการนำเอาพลังงานรังสีอาทิตย์มาใช้เป็นประโยชน์แล้ว ยังได้แนวทางการศึกษา และพัฒนาการนำพลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ในภูมิภาคทางภาคใต้ตอนล่าง มาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการทางความร้อนช่วงใดช่วงหนึ่งตามศักยภาพที่ทำได้จากรังสีอาทิตย์ ในอุตสาหกรรมทางการเกษตร หรือกระบวนการผลิตพลังงานความร้อนแบบผสมผสาน เพื่อลดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมดให้ลดน้อยลง นำไปสู่การส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียนอย่างเป็นรูปธรรม ตามแนวพระราชดำริ/หลักการทรงงานในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว* ในการใช้พลังงานอย่างประหยัด โดยใช้หลักการทำงานของระบบที่เรียบง่าย, ใช้ธรรมชาติช่วยธรรมชาติ ในรูปแบบของการใช้พลังงานหมุนเวียน (รังสีอาทิตย์) ในการผลิตพลังงานความร้อนสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อการพึ่งตนเองในส่วนของพลังงานทดแทน *ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการพิเศษเพื่อประสานงานโครงการอันเนื่องมาจากพระราชดำริ.2549.หลักการทรงงานในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ๖๐ ปี ครองราชย์ ประโยชน์สุข ประชาชน.กรุงเทพฯ.

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย



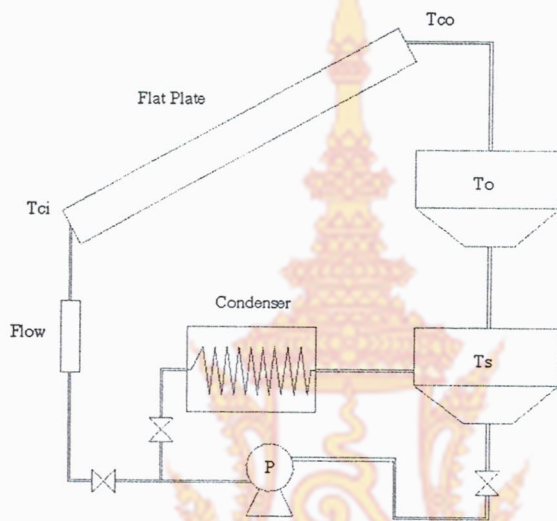
รูปที่ 3.1 แผนผังระบบทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมโรงเรือนกระจก

รูปแบบการทำงาน

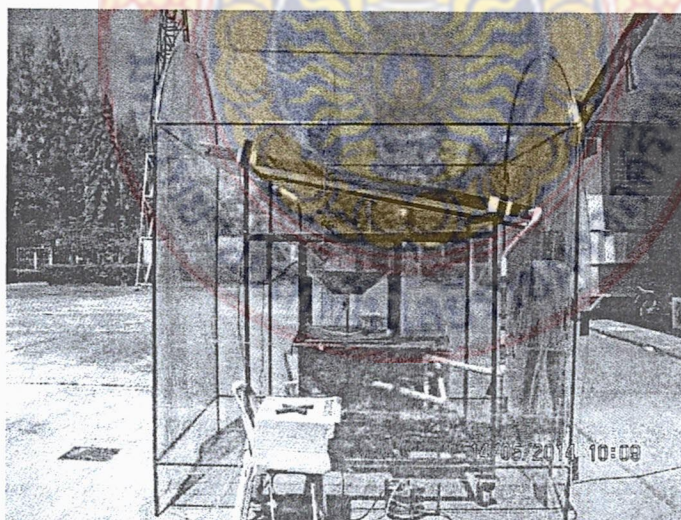
1. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) มีน้ำเป็นสารทำงาน ใช้ในการผลิตน้ำร้อนใช้งานโดยตรง ในช่วงเวลา 11.00-14.00 น. ในรูปความร้อนสะสมในถังกักเก็บความร้อน (Thermal Storage Tank) ขนาด 50 ลิตร
2. ถังกักเก็บความร้อน (Thermal Storage Tank) หุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อให้ระบบมีอุณหภูมิคงที่ ขนาด 50 ลิตร ติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ สำหรับตั้งอุณหภูมิทดสอบที่ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆ ได้
3. กรณีสารทำงาน หรือน้ำมีอุณหภูมิสูงเกินระดับที่ตั้งไว้ สามารถระบายความร้อนทิ้งโดยใช้ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนในระบบกับอากาศ จะใช้ แบบชุดครีระบายความร้อน

4. ใช้ป๊อมน้ำเป็นต้นกำลังในการหมุนเวียนสารทำงานในระบบ ที่อัตราการไหล 0.02 kg/s-m^2 โดยวัดจาก โรตาริเมตร ติดตั้ง ตัววัดค่ารังสีอาทิตย์ และเทอร์โมคัปเปิลที่จุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อนำค่าไปประเมินสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ต่อไป

5. โรงเรือนกระจก ทำจากผ้าใบพลาสติกใส ขนาด 1.5 เมตร x 2 เมตร x 2 เมตร

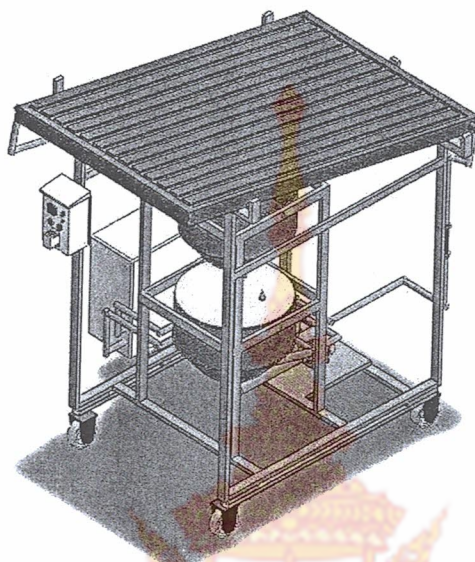


รูปที่ 3.2 จุดวัดอุณหภูมิของชุดทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์



รูปที่ 3.3 ระบบทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์

3.2 ออกแบบและดำเนินการสร้างชุดทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์



รูปที่ 3.4 แผนผังแนวคิดชุดทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

แนวทางหลักในการศึกษา คือ ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบโดยกำหนดเงื่อนไข คือ ในการทดลองจะทดลองตามมาตรฐาน ASHREA STANDARD 93-2003 ระบบที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย

3.2.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ขนาดพื้นที่รับรังสี 2.02 m^2

3.2.2 ถังเก็บสะสมน้ำร้อน 2 ถัง หุ้มฉนวนหนา 25.4 mm ขนาดบรรจุน้ำ 50 L โดยติดตั้งไว้ในระบบรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

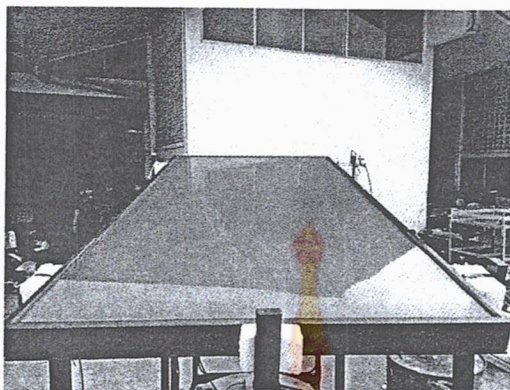
ในระบบรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

3.2.3 ระบบท่อเป็นท่อทองแดง ขนาด 6 inch ซึ่งต่อออกจากชุดรับรังสีไปยังถังเก็บน้ำร้อน

3.2.4 อุปกรณ์ทำความร้อน ขนาด 1200 W ซึ่งต่ออยู่กับชุดความคุมอุณหภูมิ

3.2.5 ชุดระบายความร้อน ขนาด 9500 W

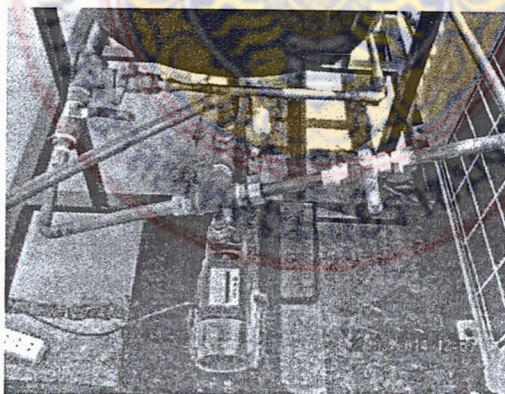
3.2.6 ข้อต่อท่อทองเหลืองสำหรับระบบท่อทองแดง ขนาด 6 inch



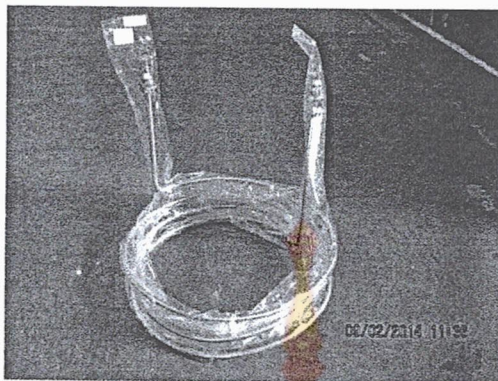
รูปที่ 3.5 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate)



รูปที่ 3.6 ถังสะสมเก็บน้ำ



รูปที่3.7 ระบบท่อน้ำร้อน



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ทำความร้อน (Heater 1200 W)



รูปที่ 3.9 ข้อต่อท่อทองเหลือง



รูปที่ 3.10 ชุดระบายความร้อน (12000 BTU)

3.3 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดสอบ

3.3.1 เครื่องบันทึกข้อมูลทางอุณหภูมิ (Data Logger) การบันทึกข้อมูลทางอุณหภูมิจากการทดลองจะใช้เครื่องบันทึกอุณหภูมิชนิด 20 จุด ความถูกต้อง $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ ใช้ในการวัดและบันทึกอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K เป็นตัวส่งสัญญาณ

3.3.2 เครื่องวัดค่ารังสีอาทิตย์ใช้วัดปริมาณความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวเก็บรังสี เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้เป็นชนิด Pyranometer รุ่น CM 11B ความละเอียด $8.73 \times 10^{-6} \text{ V/Wm}^{-2}$

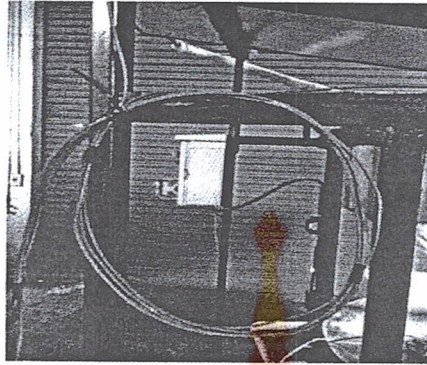
3.3.3 เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter) ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำที่ถูกบีบสูบลำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อควบคุมอัตราการไหลให้ได้เท่ากับ 2.4 ลิตรต่อนาที อ่านได้จากตำแหน่งที่ลูกลอยอยู่เหนือสเกลของเครื่องมือวัดค่าการใช้งานของตัวเก็บรังสี (0.02 kg/sm^2)

3.3.4 เครื่องวัดความเร็วลมใช้วัดความเร็วลมเหนือตัวรับรังสีอาทิตย์ เครื่องมือวัดความเร็วลมที่ใช้เป็นชนิด Digital Anemometer รุ่น Tasto 410-2 ความละเอียด $\pm 0.01 \text{ m/s}$

3.3.5 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิใช้ควบคุมอุณหภูมิของ Heater ให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการทดสอบความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.11 เครื่องมือบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ



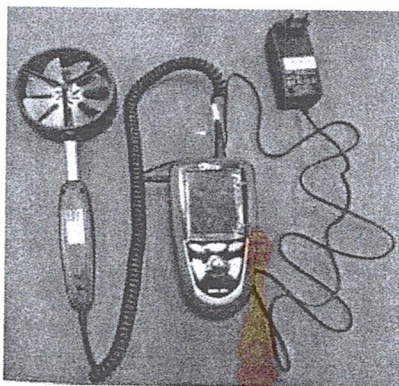
รูปที่ 3.12 สายเทอร์โมคัปเปิ้ล Type K



รูปที่ 3.13 เครื่องมือวัดค่าแรงสั่นอัด CMP 11



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter)



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดความเร็วลม อุณหภูมิและความชื้นในอากาศ



รูปที่ 3.16 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

3.4 การทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของ ASHRAE Standard 93-2003

ดำเนินการทดสอบ ตามมาตรฐานการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของ ASHRAE Standard 93-2003 ดังนี้

1. ทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไม่น้อยกว่า 30°C ความเร็วลมอยู่ระหว่าง $2.2 - 4.5 \text{ m/s}$ (สถานะของสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลอง)
2. เวลาทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 10.00-14.00 น. ค่ารังสีอาทิตย์ไม่ต่ำกว่า $790 \text{ W/m}^2 \pm 32 \text{ W/m}^2$ (สถานะของสิ่งแวดล้อมระหว่างการทดลอง)
3. วิศวกรทำงานหรือน้ำจากถังสะสมความร้อนเข้าสู่ตัวเก็บรังสีในอัตราการไหลคงที่ ในการทดสอบนี้ใช้อัตราการไหล 0.02 kg/s-m^2 การควบคุมอัตราการไหลทำได้โดยใช้วาล์วปรับอัตราการไหล

4. ควบคุมให้อุณหภูมิน้ำในถังสะสมความร้อนที่เข้าตัวเก็บรังสีมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ โดยอุณหภูมิน้ำเข้าต้องคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ก่อนทำการบันทึกค่าควรรอประมาณ 15 นาที ให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุล (Steady State) จึงบันทึกค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ คือ อุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fi}) อุณหภูมิน้ำออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (T_{fo}) และ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_a)

วิธีการหาอุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในการหาอุณหภูมิน้ำเข้านั้นอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมจะมีผลต่ออุณหภูมิน้ำเข้า คือ

$$(T_{fi}-T_a) = 0\%, 30\%, 60\%, 90\% \text{ สมมติ } T_a = 32^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Soln } (T_{fi}-T_a) = (T_{\text{max}}-T_a)$$

$$\text{For flat plate} = 80^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C} = 48^{\circ}\text{C}$$

$$\text{ดังนั้นที่ } 0\% \rightarrow 48^{\circ}\text{C} = 0^{\circ}\text{C}$$

$$30\% \rightarrow 48^{\circ}\text{C} = 14.4^{\circ}\text{C}$$

$$60\% \rightarrow 48^{\circ}\text{C} = 28.8^{\circ}\text{C}$$

$$90\% \rightarrow 48^{\circ}\text{C} = 43.2^{\circ}\text{C}$$

จากข้อมูลชุดแรกจะได้ T_{fi} ดังนี้

$$1. T_{fi}-T_a = 0^{\circ}\text{C} \quad T_{fi} = 0 + 32 = 32^{\circ}\text{C}$$

$$2. T_{fi}-T_a = 14.4^{\circ}\text{C} \quad T_{fi} = 14.4 + 32 = 46.6^{\circ}\text{C}$$

$$3. T_{fi}-T_a = 28.8^{\circ}\text{C} \quad T_{fi} = 28.8 + 32 = 60.8^{\circ}\text{C}$$

$$4. T_{fi}-T_a = 43.2^{\circ}\text{C} \quad T_{fi} = 43.2 + 32 = 75.2^{\circ}\text{C}$$

5. วัดอุณหภูมิของน้ำตรงทางเข้า (T_{fi}) – ออก (T_{fo}) ของตัวเก็บรังสี และสิ่งแวดล้อม (T_a)
6. การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่างๆ จะบันทึกทุก 1 นาที
7. ทำการบันทึกค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ (I_T) ด้วย Pyranometer บนระนาบตัวเก็บรังสี
8. ทำการอุ่นอุณหภูมิน้ำให้สูงขึ้นจากเดิม ก่อนเข้าตัวเก็บรังสี
9. ทำตามข้อ 3. ถึง 8. เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วให้ทำซ้ำที่อุณหภูมิเดิมหรือใกล้เคียงอย่างน้อย 4 ค่า

3.5 การวิเคราะห์สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93 - 2003

ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93 - 2003 ของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ โดยนำค่าของตัวแปรต่างๆ ตามหัวข้อที่ 3 มาคำนวณหาค่า Q_c หรือ อัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ของสารทำงาน จากสมการ $Q_c = \dot{m}C_p(T_{fo}-T_{fi})$ ในขณะที่ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีคำนวณจากสมการ

$$\eta_{th} = \frac{Q_c}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{I_T}$$

โดยทำการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $(T_{fi}-T_a)/I_T$ ซึ่งกราฟที่ได้สามารถวิเคราะห์เป็นสมการเส้นตรงที่ได้จากการ (fit curve) โดยแสดงสัมประสิทธิ์ต่างๆ ดังนี้ โดยที่จุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ η_{th} จะแสดงค่า $F_R (\tau\alpha)$ และค่าความชันของเส้นกราฟจะแสดงค่า $-F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำการเปรียบเทียบ ตามลำดับ ดำเนินการสรุปผล และวางกรอบการพัฒนา ระบบที่เหมาะสมในพื้นที่ต่อไป

3.6 ระยะเวลาทำการวิจัย และแผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
1. ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่ผ่านมา และออกแบบระบบ						
2. สร้าง และประกอบระบบที่ออกแบบไว้						
3. ดำเนินการทดลองเก็บผล						
4. ทำการประเมินสมรรถนะทางความร้อนของระบบที่ออกแบบ						
5. สรุป, เปรียบเทียบ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง พร้อมทั้งจัดทำรายงาน						

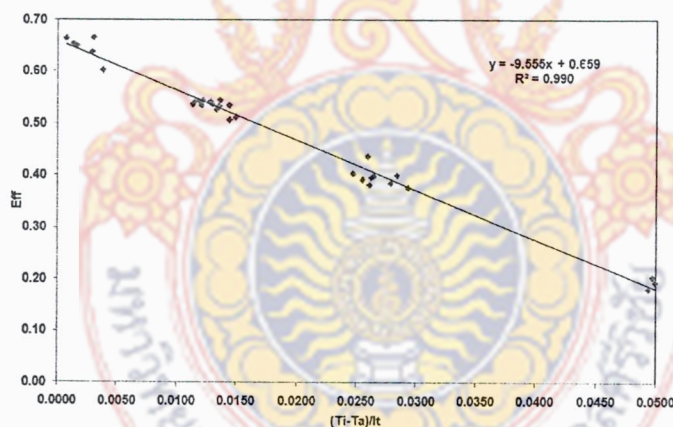
บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ASHRAE STANDARD 93-2003 ของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน ที่ติดตั้งในโรงเรือนกระจก กรณีทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (case: 1) และทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน (case: 2) เทียบกับระบบปกติ

4.1 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีระบบปกติ

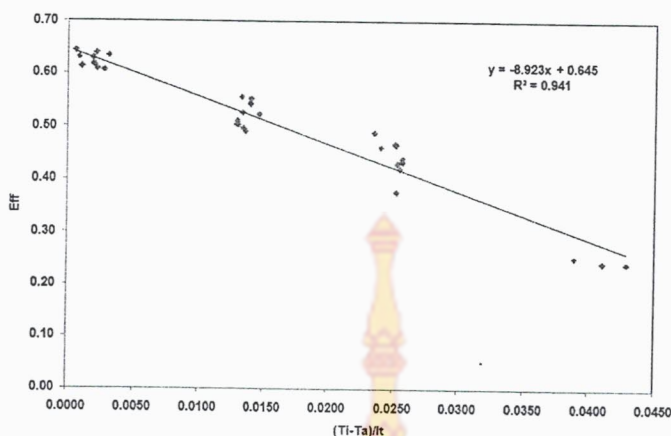
ในการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ความเร็วลม 0.5-3.0m/s โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ประมาณ 33, 47, 61, 75 °C ตามลำดับ นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency และ $(T_f - T_a)/I_T$ ได้ $F_R \tau \alpha = 0.659$ และ $F_R U_L = 9.555 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับที่ $R^2 = 0.9902$ โดยมีสมรรถนะ 65.9% ที่อุณหภูมิ 32 – 34 °C ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบกรณีระบบปกติ

4.2 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งในโรงเรือนกระจก ทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (case: 1)

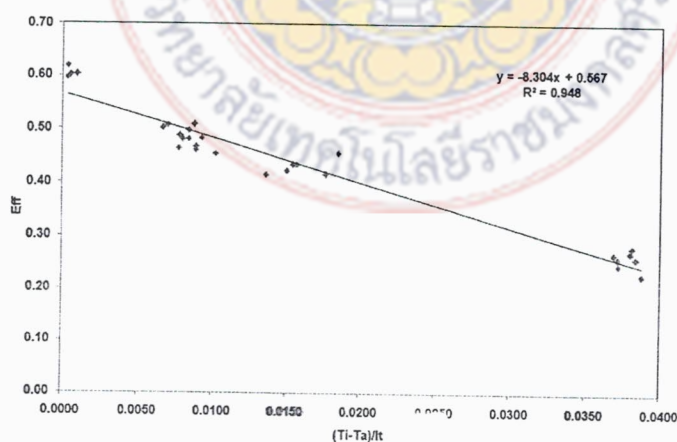
ในการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบกรณีครอบโรงเรือนกระจก. ความเร็วลม 0 m/s โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ประมาณ 33, 47, 61, 75 °C ตามลำดับ นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency และ $(T_f - T_a)/I_T$ ได้ $F_R \tau \alpha = 0.645$ และ $F_R U_L = 8.923 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับที่ $R^2 = 0.9417$ โดยมีสมรรถนะ 64.5% ที่อุณหภูมิ 32 – 34 °C ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งในโรงเรือน กระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (case: 1)

4.3 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งในโรงเรือนกระจก ทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน (case:2)

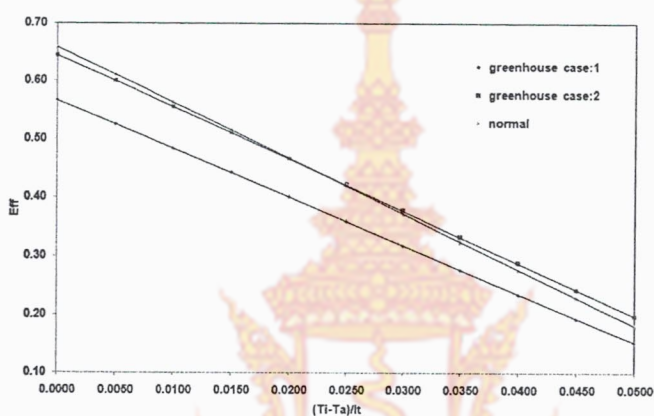
ในการทดสอบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบกรณีครอบโรงเรือนกระจก โดยใช้อุณหภูมิภายใน ความเร็วลม 0 m/s โดยควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแผงที่ประมาณ 40, 52, 64, 76 °C ตามลำดับ นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency และ $(T_f - T_a)/I_T$ ได้ $F_R \tau \alpha = 0.567$ และ $F_R U_L = 8.304 \text{ W/m}^2\text{K}$ ตามลำดับที่ $R^2 = 0.9487$ โดยมีสมรรถนะ 56.7 % ที่อุณหภูมิ 40 – 45 °C ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) กรณีติดตั้งในโรงเรือน กระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน (case: 2)

4.4 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) ทั้ง 3 กรณี

จากกราฟสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ ดังแสดงในรูป 4.4 พบว่าแบบที่ใช้โรงเรือนกระจก ทั้งกรณีที่ 1 และ 2 จะมีค่าความชันน้อยกว่ากรณีปกติ เนื่องจากโรงเรือนกระจกที่ครอบช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิสารทำงานเข้าแผงสูงขึ้น จึงมีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีปกติ (ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับความชันของกราฟ)



รูปที่ 4.4 กราฟสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Flat Plate) ทั้ง 3 กรณี



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ASHRAE กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $(T_f - T_a)/I_T$ โดยที่จุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ η_{th} จะแสดงค่าประสิทธิภาพเชิงรังสี (ค่าการส่งผ่าน และค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี) $F_R (\tau\alpha)$ และค่าความชันของเส้นกราฟจะแสดงค่าการสูญเสียความร้อน $-F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มีเรือนกระจกปิด (case:1) มีสมรรถนะสูงกว่า ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบปกติ (normal) และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มีเรือนกระจกปิด (case:2) เนื่องจากเรือนกระจกช่วยลดการสูญเสียความร้อนออกจากแผ่นดูดกลืนรังสี ตามลำดับ โดยเรือนกระจกปิดแผ่นดูดกลืนรังสีส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงรังสีลดลงเนื่องจากเรือนกระจกกั้นรังสีให้ตกกระทบลดลงเล็กน้อย โดยมีสมรรถนะดังนี้

กรณีปกติ มีสมรรถนะเท่ากับ $F_R \tau\alpha = 0.659$ และ $F_R U_L = 9.555 \text{ W/m}^2\text{K}$ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 65.9% ที่อุณหภูมิน้ำเข้า 33 °C

กรณีติดตั้งในโรงเรือนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (Case: 1) มีสมรรถนะเท่ากับ $F_R \tau\alpha = 0.645$ และ $F_R U_L = 8.923 \text{ W/m}^2\text{K}$ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 64.5% ที่อุณหภูมิน้ำเข้า 33 °C

กรณีติดตั้งในโรงเรือนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายใน (Case: 2) มีสมรรถนะเท่ากับ $F_R \tau\alpha = 0.567$ และ $F_R U_L = 8.304 \text{ W/m}^2\text{K}$ มีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 56.7% ที่อุณหภูมิน้ำเข้า 40 °C

จากกราฟสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์กรณีปกติ เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่กรณีติดตั้งร่วมโรงเรือนกระจกทดสอบอ้างอิงอุณหภูมิภายนอก (Case: 1) เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณของเรือนกระจก มีผลกระทบต่อสมรรถนะแนวทางใด

5.2.2 ควรมีการศึกษาวัสดุ โปร่งแสงตัวอื่นที่มีค่าส่งผ่านรังสีอาทิตย์สูงขึ้น มีผลกระทบต่อสมรรถนะแนวทางใด

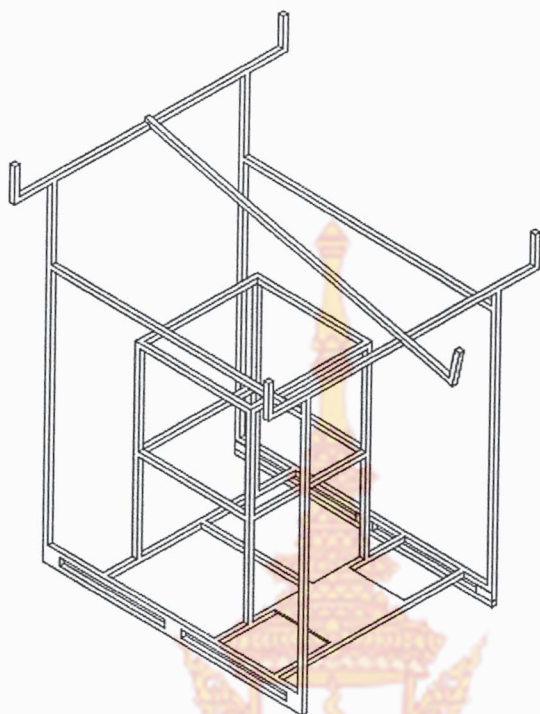
บรรณานุกรม

1. Master Plumbers and Mechanical Services Association of Australia (MPMSAA) and Sustainability Victoria (SV). Large Scale Solar Thermal Systems Design Handbook. Available from: [http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Large scale solar thermal systems handbook.pdf](http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Large%20scale%20solar%20thermal%20systems%20handbook.pdf) [10 Sep 2011].
2. Vorayos N, Wongsuwan W, Kiatsiroat T. Development of Solar Hot Water Systems in Thailand. *Engng.J.CMU*. 2009; 16 (2): 55-69. Thai.
3. Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004; 30:231–295.
4. Kalogirou SA. The potential of solar industrial process heat applications. *Apply Energy*. 2003; 76:337–61.
5. กอบสิน ทวีสิน, 2522, ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์การศึกษาเปรียบเทียบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
6. พลทรัพย์ บุญวานิช, 2523, เครื่องทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. สมณี ก บุญญาศาสตร์พันธุ์, 2527, ระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิสูงด้วยตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
8. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และกานดา แสงจันทร์, 2528, “การศึกษาตัวรับรังสีอาทิตย์แบบฮีทไปป์อย่างง่าย”, การประชุมทางวิชาการ, ครั้งที่ 3, 16-17 กุมภาพันธ์ 2528, ขอนแก่น, หน้า 14-32.
9. จารุวัฒน์ เจริญจิต, 2546, การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีรังสีอาทิตย์ในการกลั่นเอทานอล, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
10. วัฒนพงษ์ รัชวิเชียร, นิพนธ์ เกตุจ้อย, บงกช ประสิทธิ์ และฉัตรชัย ศิริสัมพันธ์, 2548, “การทดสอบสมรรถนะตัวรับรังสีรังสีอาทิตย์แผ่นราบตามมาตรฐาน ASHRAE”, วารสารวิจัยพลังงาน, ครั้งที่ 2, ฉบับปี 2548, หน้า 56-64.

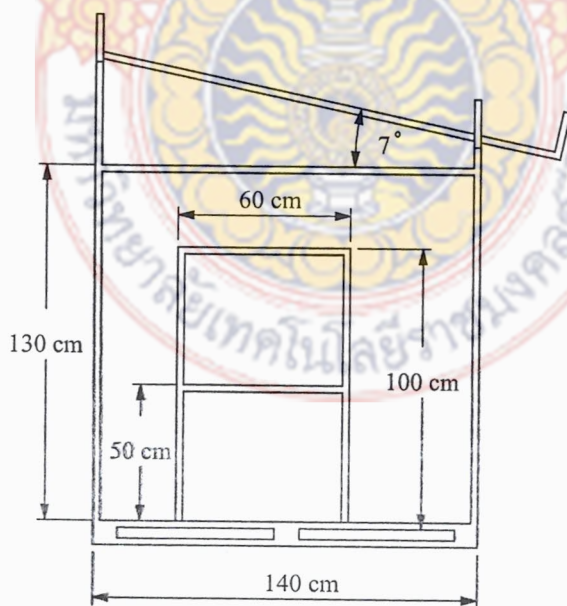
11. จอมภพ แวศักดิ์, 2546, “การหาสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่ติดตั้งบนหลังคา” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 15-17 ตุลาคม 2546, ปราจีนบุรี, หน้า 22-27.
12. ฉัตรณรงค์ ยลสวัสดิ์, ศิริชัย เทพา และพิชัย นามประกาย, “การศึกษาสมรรถนะของหลังคาทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์โดยใช้ฟังก์ชันใช้ประโยชน์”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 2, 27-29 กรกฎาคม 2549, นครราชสีมา, หน้า 41-45.
13. เบญจมาศ ปุ้ยอ็อก และวิทยา ยงเจริญ, “การหาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550, กรุงเทพฯ, หน้า 78-83.
14. สมชาย มณีวรรณ, ณรงค์ศักดิ์ พลแก้ว และนิพนธ์ เกตุจ้อย, “การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบแบบใช้แผ่น ปิดใต้อ่างบนและแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน”, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 3, 23-25 พฤษภาคม 2550, กรุงเทพฯ, หน้า 113-120.
15. จาตุพงศ์ วาฤทธิ, สมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ, ชานนท์ เวียนทอง, อานนท์ สุจริต และณัฐวุฒิ คุษฎี “ระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับการล้างแบบ Cleaning In Place ของศูนย์รับน้ำนมดิบ Cleaning In Place ของศูนย์รับน้ำนมดิบ”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร, ครั้งที่ 4, ตุลาคม - ธันวาคม 2550, ฉบับพิเศษ, ปีที่ 30, หน้า 623-632.
16. ชาญวิทย์ วุฒิวงสานนท์, 2545, การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนรังสีอาทิตย์แบบประหยัดพลังงาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 128 หน้า.
17. Oonk, R.L., Jones, D.E. and Cole-Appel, B.E., 1979, “Calculation of Performance of Collector in Series from Test Data on a Single Collector”, *Solar Energy*, Vol. 23, No.5, pp. 535-543.
18. McCluney, R. and Merriger, T., 1978, “Homeowner’s Guide to solar Water heater Troubles Shooting”, *Solar Energy*, Vol. 2, No. 1, pp. 1556-1561.
19. Selcuk, K.M., 1964, T., 1978, “Homeowner’s Guide to Solar Water Heater Troubles Shooting”, *Solar World Energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 84-86.
20. Tripanagnostopoulos, Y. and Souliotis M., 2006, “ICS Solar Systems with Two Water Tank”, *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 11, pp. 1698-1717.

ภาคผนวก ก
รูปโครงสร้างและส่วนประกอบตัวเครื่อง

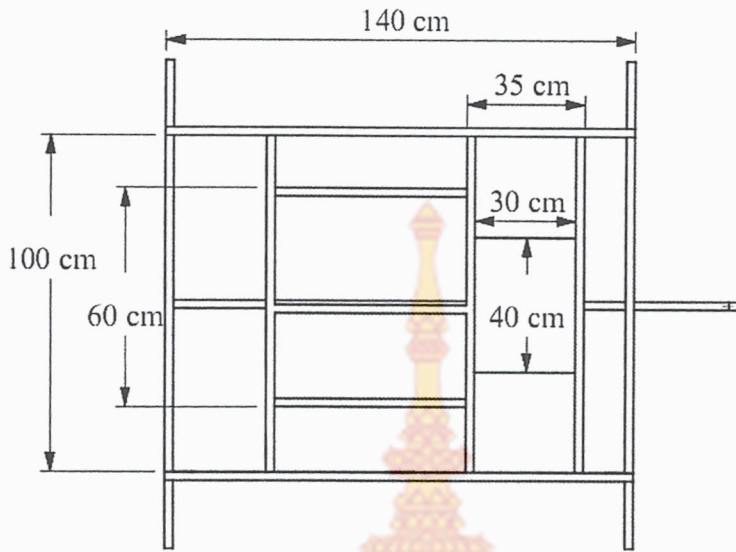




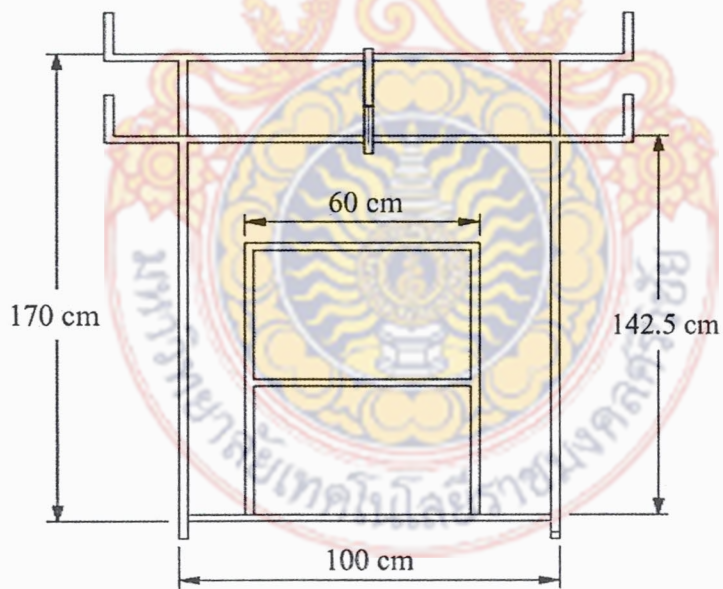
รูปที่ ก.1 รูปแสดงการร่างแบบ โครงสร้างเครื่องทดสอบสมรรถนะ



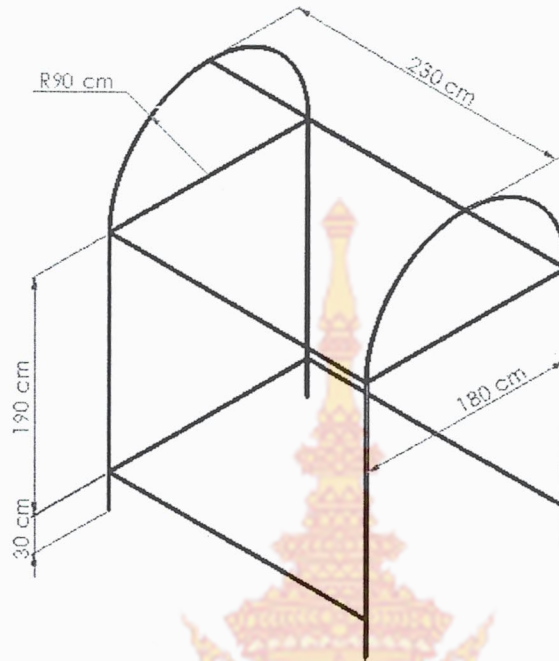
รูปที่ ก.2 โครงสร้างและขนาดส่วนด้านข้าง



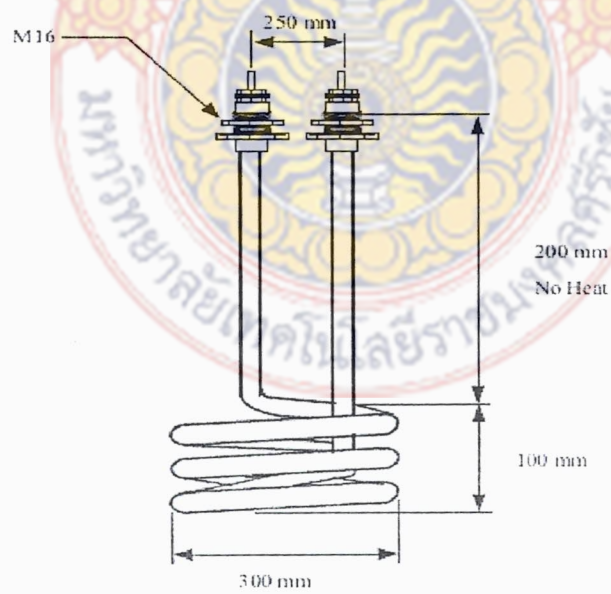
รูปที่ ก.3 โครงสร้างและขนาดส่วนด้านล่าง



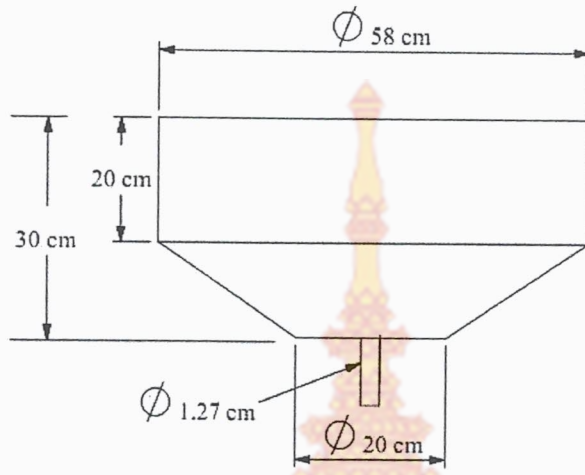
รูปที่ ก.4 โครงสร้างและขนาดส่วนด้านหน้า



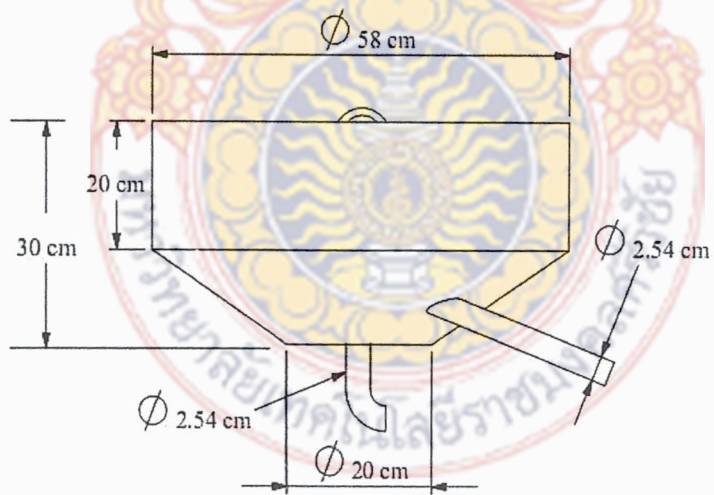
รูปที่ ก.5 โครงสร้างและขนาดโรงเรือน



รูปที่ ก.6 ฮีตเตอร์ (Heater)



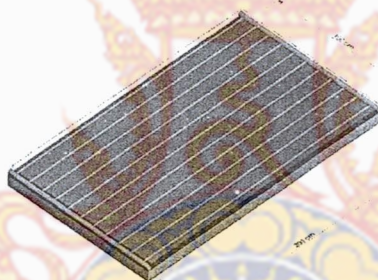
รูปที่ ก.7 ถังบนและขนาด



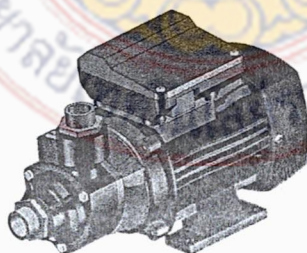
รูปที่ ก.8 ถังล่างและขนาด



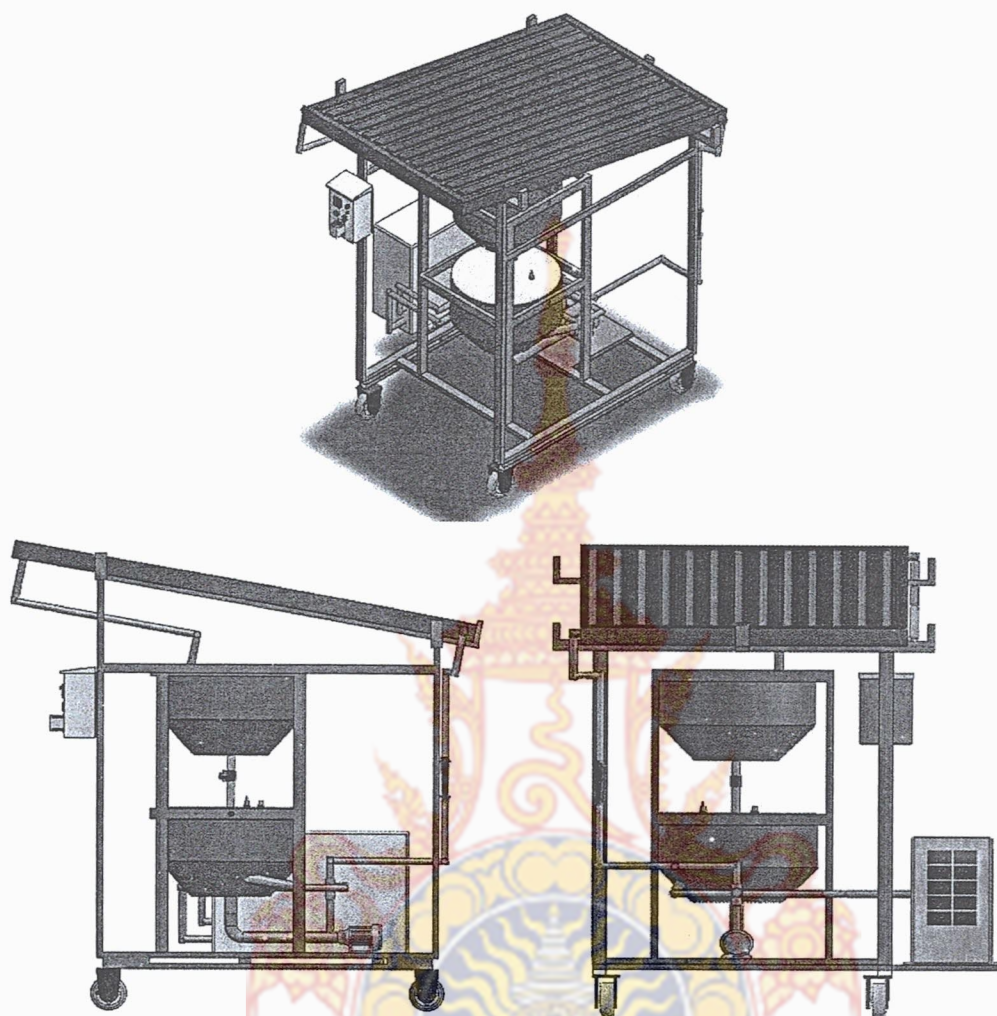
รูปที่ ก.9 โรตاميเตอร์



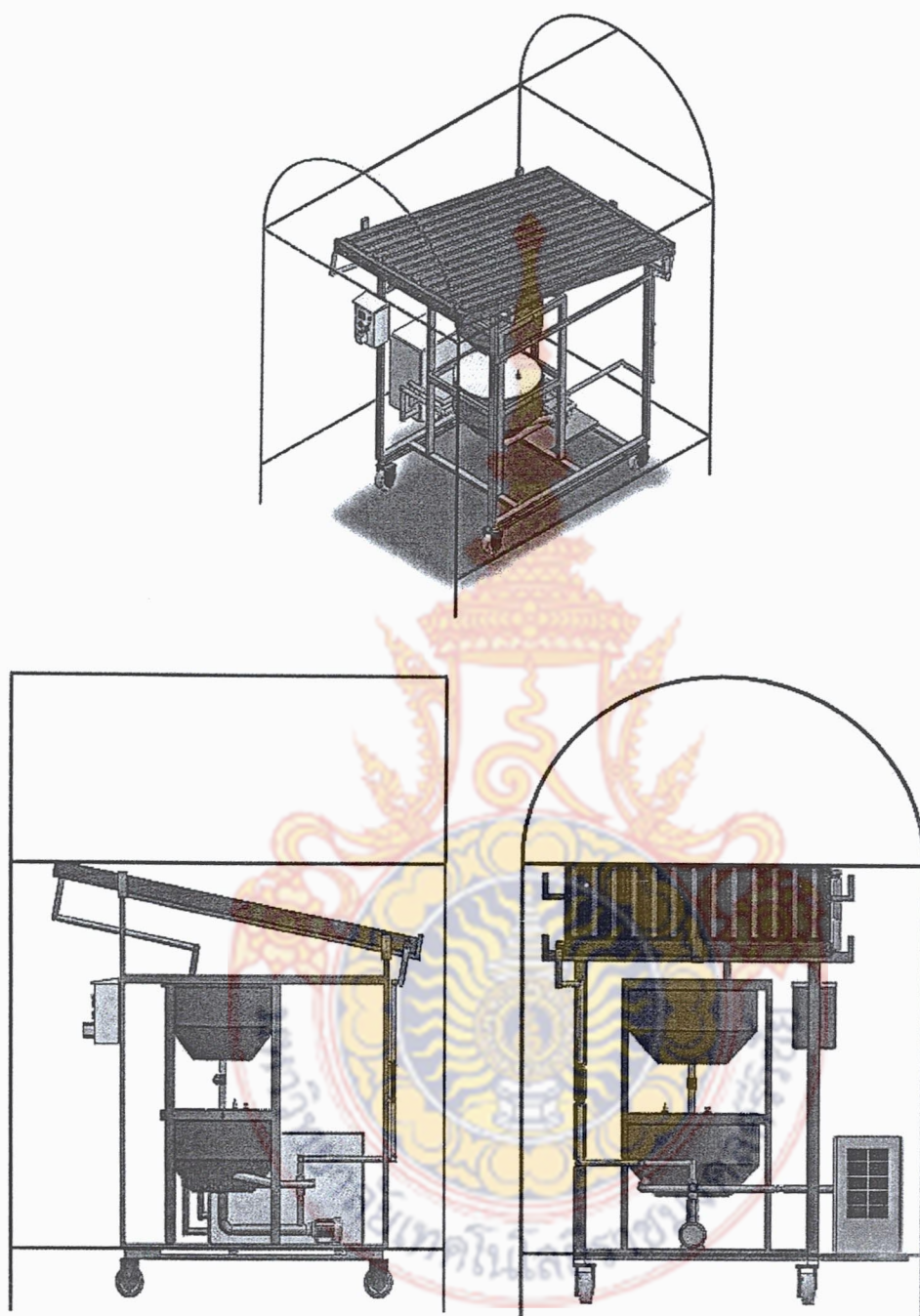
รูปที่ ก.10 แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ



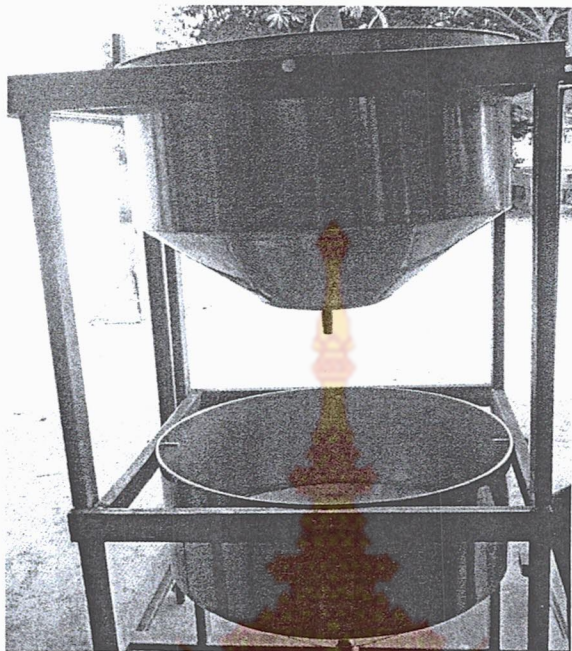
รูปที่ ก.11 ปั้มน้ำแบบ โใบพัดแผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ



รูปที่ ก.12 อุปกรณ์ต่างๆเมื่อติดเข้ากับโครง



รูปที่ ๓.13 อุปกรณ์ต่างๆเมื่อติดเข้ากับ โครงที่ประกอบด้วย โรงเรือน



รูปที่ ก.14 ถังสำหรับใส่น้ำ



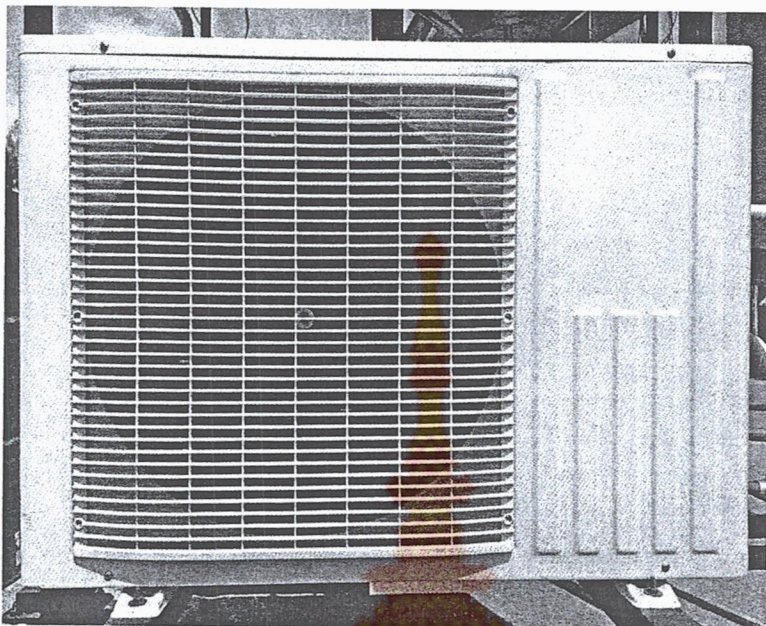
รูปที่ ก.15 ถังหุ้มฉนวนสำหรับใส่น้ำ



รูปที่ ก.16 แสดงการต่อท่อ และวาล์วเข้ากับระบบ



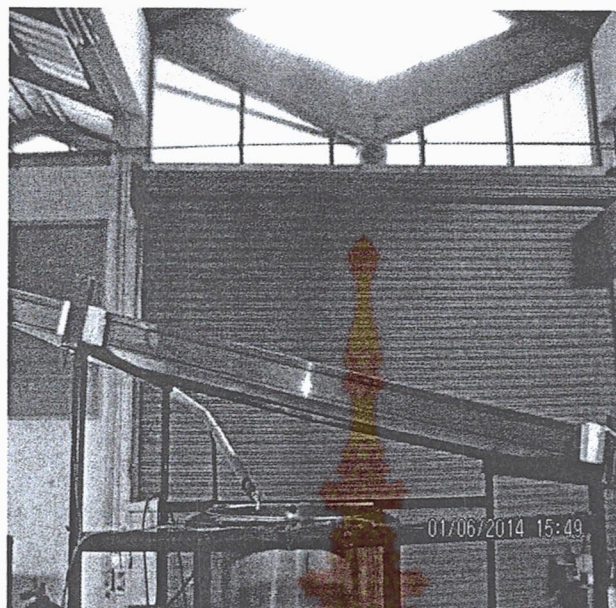
รูปที่ ก.17 การต่อ Rotarmeter



รูปที่ ก.18 ระบบระบายความร้อน



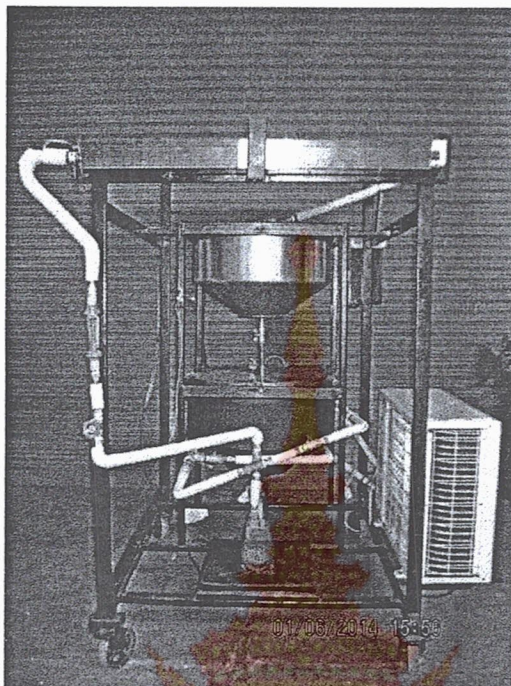
รูปที่ ก.19 ตู้ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ



รูปที่ ก.20 รูปแสดงการติดตั้งแผงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ทำมุม 7 องศา กับแนวระนาบ)



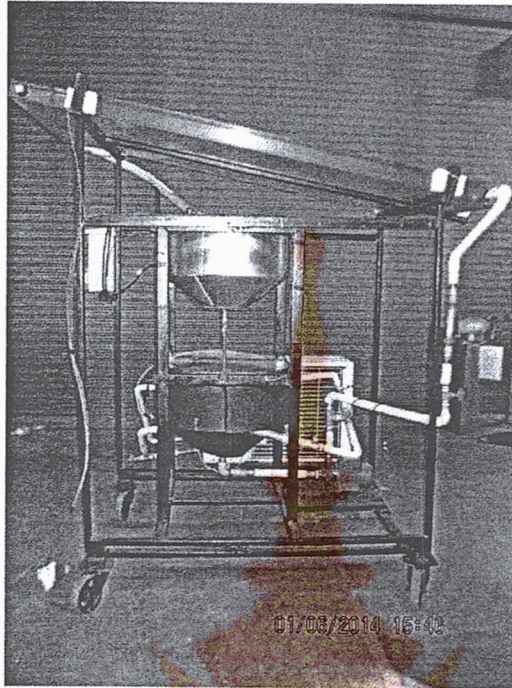
รูปที่ ก.21 รูปแสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ด้านหน้า)



รูปที่ ก.22 รูปแสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ด้านหลัง)



รูปที่ ก.23 รูปแสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ด้านซ้าย)



รูปที่ ก.24 รูปแสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ด้านขวา)



รูปที่ ก.25 รูปแสดงเครื่องทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ด้านบน)