การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ

นายภาสกร ชุ่มทิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2555

การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ

นายภาสกร ชุ่มทิ วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.รังสิต ศรจิตติ)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ. ดร.นริส ประทินทอง)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รศ. ดร.ศิริชัย เทพา)

.... กรรมการ
(ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ
หน่วยกิต 12
ผู้เขียน นายภาสกร ชุ่มทิ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร.นริส ประทินทอง
รศ. ดร.ศิริชัย เทพา
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงาน
สายวิชา เทคโนโลยีพลังงาน
คณะ พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ. 2555

บทคัดย่อ

การศึกษางานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์แผ่นโลหะหรือเมทัลชีทเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ต้นทุนต่ำโดยสร้างจากวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย ซึ่งใช้หลังคาเมทัลชีทเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อภายในแผงซึ่งอยู่ใต้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และใช้ฉนวนพอลิยูรีเทนและพอลิเอทิลีนเป็นฉนวนกันความร้อนด้านหลังแผง โดยสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 2 ชนิดซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งรูปร่างและสันลอน ซึ่งมีพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เท่ากับ 2 m^2 ใช้ชื่อแทนคือ CL-750D และ CL-825 จากนั้นทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 และทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 โดยทำการทดสอบ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานครฯ ประเทศไทย จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 และแบบ CL-750D มีประสิทธิภาพเท่ากับ 55.51% และ 49.09% ตามลำดับ และในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ CL-825 โดยมีความสามารถในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 $^{\circ}C$ เท่ากับ 61.88 Liters/m^2 สำหรับแบบ CL-750D และ 51.41 Liters/m^2 สำหรับแบบ CL-825 ในการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และแบบ CL-825 มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.68 ปี และ 5.14 ปี ตามลำดับ ในขณะที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ประมาณ 6 ปี

คำสำคัญ : ตัวเก็บรังสีอาทิตย์/ ต้นทุนต่ำ/ ระบบทำน้ำร้อน/แผ่นโลหะ

Thesis Title	Performance Study of Metal Sheet Solar Collector
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Phatsakron Choomti
Thesis Advisors	Asst. Prof. Dr. Naris Pratinthong
	Assoc. Prof. Dr. Sirichai Thepa
Program	Master of Engineering
Department	Energy Technology
Field of Study	Energy Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

The objective of this research is to design a low cost solar collector fabricated with local material parts in Thailand. The simple collector was made of a roof metal sheet served as an absorber. The aluminum tubes were located underneath the metal sheet. The back heat loss was protected using PU foam and the PE insulation. Two types of collector having the area of 2 m^2 were built according to the roof curls and shapes, namely, CL-750D and CL-825. The thermal performance of solar collector was performed by following the standard test ISO 9806-1. The test method for system performance was performed in accordance with the ISO 9459-2 standard, at KMUTT, Bangkok, Thailand. The experimental results showed that, the thermal performance of solar collector CL-825 and CL-750D were 55.51% and 49.09 %, respectively. The system performance testing with CL-750 D was higher than that with CL-825. The ability of producing hot water at 60 C was 61.88 Liters/m^2 for CL-750D and 51.41 Liters/m^2 for CL-825. Economical analysis revealed that the payback periods for CL-750D and CL-825 were 3.68 yrs and 5.14 yr, respectively, while the commercial solar domestic hot water system was about 6 yrs.

Keywords : Domestic Hot Water/Low Cost/Metal Sheet/Solar Collector

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร.นริส ประทินทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำเสนอแนวคิดต่างๆ ตลอดจนคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์และช่วยตรวจสอบการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.ศิริชัย เทพา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำในการทดสอบของงานวิจัยครั้งนี้ตลอดจน ช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ และช่วยตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณ ดร.รุ่งโรจน์ สงค์ประกอบ และ ดร.รังสิต ศรจิตติ ที่สละเวลามาร่วมเป็นกรรมการการสิบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อผู้วิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนช่วยตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องมากขึ้น

ข้าพเจ้าของขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนและให้โอกาสในการเรียนตั้งแต่เด็กจนถึงระดับมหาบัณฑิตของข้าพเจ้ามาโดยตลอด รวมไปถึงเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนใน Solar Lab ที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนข้อมูลต่างๆ ที่มีความสำคัญยิ่ง

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ล้วนเกิดมาจากทุกท่านที่กล่าวมาแล้วนี้ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้สำนึกในบุญคุณ จักขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ฎ
ราการรูปประกอบ	ฑ
รายการสัญลักษณ์	ถ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	บ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 พลังงานแสงอาทิตย์	4
2.1.1 ดวงอาทิตย์	4
2.1.2 ค่าคงที่แสงอาทิตย์	4
2.1.3 รังสีอาทิตย์	5
2.1.3.1 ทิศทางของรังสีตรง	6
2.1.3.2 ค่ารังสีตรงบนพื้นเอียง	10
2.1.4 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย	14
2.1.5 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์	16

หน้า

2.1.5.1	การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า	17
2.1.5.2	การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน	17
2.2	หลังคาเมทัลชีท	19
2.3	ฉนวนกันความร้อน	21
2.3.1	ฉนวนเยื่อกระดาษ	22
2.3.2	ฉนวนใยแก้ว	23
2.3.3	ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน	23
2.3.4	ฉนวนโฟมพอลิยูริเทน	24
2.4	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ	26
2.4.1	ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ	26
2.4.1.1	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์	26
2.4.1.2	ท่อน้ำของระบบ	28
2.4.1.3	ถังเก็บน้ำร้อน	28
2.4.2	การคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	29
2.4.2.1	สมดุลพลังงานบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ	29
2.4.2.2	สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	30
2.4.2.3	การกระจายอุณหภูมิระหว่างท่อและประสิทธิภาพมาตรฐานของครีบ	33
2.4.2.4	แฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	34
2.4.2.5	แฟคเตอร์การดึงความร้อนและแฟคเตอร์การไหล	35
2.4.2.6	ผลของการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์	36
2.4.3	ประโยชน์และระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน	37
2.5	การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์	38
2.5.1	ต้นทุนเริ่มแรก	38
2.5.2	ค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน	39
2.5.2.1	ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด	39
2.5.2.2	การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน	39
2.6	มาตรฐานการทดสอบ	40

หน้า

2.6.1 การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 6806-1 40
2.6.1.1 สภาวะการทดสอบ 40
2.6.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ 40
2.6.1.3 การคำนวณ 42
2.6.2 การทดสอบระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 43
2.6.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ 43
2.6.2.2 สภาวะการทดสอบ 44
2.6.2.3 การเตรียมการทดสอบ 44
2.6.2.4 วิธีการทดสอบ 45
2.6.2.5 การคำนวณสมรรถนะของระบบ 46
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 47

3. อุปกรณ์และการเตรียมงานวิจัย 53
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 53
3.2 การออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ 55
3.2.1 แผ่นรับรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 55
3.2.2 แผ่นรับรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D 57
3.3 การสร้างตัวต้นแบบของแผ่นรับรังสีแบบแผ่นโลหะ 59
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด 64
3.4.1 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 64
3.4.2 ถังสะสมความร้อน 66
3.4.3 ถังพักน้ำ 67
3.4.4 ปั๊มน้ำ 67
3.4.5 เครื่องวัดแรงดันน้ำ 68
3.4.6 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ 68
3.4.7 สายเทอร์โมคัปเปิล 69
3.4.8 เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ 69

หน้า

3.4.9	เครื่องระบายความร้อนจากน้ำร้อน	70
3.4.10	ถังน้ำร้อน	70
3.4.11	ถังพักน้ำสำหรับไหล	71
3.5	วิธีการทดสอบ	71
3.5.1	วิธีการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามาตรฐาน ISO 9806-1	71
3.5.1.1	สภาวะการทดสอบ	71
3.5.1.2	ขั้นตอนการทดสอบ	71
3.5.1.3	การวัดและตำแหน่งในการติดตั้งจุดวัด	72
3.5.1.4	พารามิเตอร์ในการทดสอบ	73
3.5.2	วิธีการทดสอบระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9459-2	74
3.5.2.1	สภาวะการทดสอบ	74
3.5.2.2	ขั้นตอนการทดสอบ	74
3.5.2.3	การวัดและตำแหน่งในการติดตั้งจุดวัด	75
3.5.2.4	พารามิเตอร์ในการทดสอบ	75
3.6	สถานที่เก็บขอมูล	77
4.	**ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ**	**78**
4.1	ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9806-1	78
4.1.1	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D	78
4.1.2	ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825	79
4.1.3	วิเคราะห์ค่าความร้อนในบริเวณครีบและท่อที่ได้จากการทดสอบ	81
4.2	ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2	84
4.2.1	ค่ารังสีอาทิตย์ของวันที่ทดสอบ	84
4.2.1.1	ค่ารังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด	84
4.2.1.2	ค่ารังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด	87
4.2.2	ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ	90

หน้า

4.2.2.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด 90
4.2.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด 93
4.2.3 ผลของค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบ 96
4.2.3.1 ค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด 97
4.2.3.2 ค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด 100
4.2.4 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนที่ได้จากการทดสอบ 103
4.2.4.1 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด 103
4.2.4.2 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด 105
4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ 108

5. สรุปและข้อเสนอแนะ **114**
5.1 สรุป 114
5.2 ข้อเสนอแนะ 115

เอกสารอ้างอิง **116**

ภาคผนวก
ก ข้อมูลประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย 120
ข ข้อมูลต้นทุนระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ 122
ค ตัวอย่างการคำนวณปริมาณความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ 125
ง ตัวอย่างการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO-9806-1 และประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO-9459-2 130
จ ตัวอย่างการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ 133
ฉ ข้อมูลประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 136
ช ข้อมูลประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 161

หน้า

ซ ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ 164

ประวัติผู้วิจัย **173**

รายการตาราง

ตาราง **หน้า**

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรังสีรายวันต่อรังสีนอกบรรยากาศ 12
2.2 ชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยของแต่ละเดือน โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1998) 12
2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ $a1$, $a2$, $b1$ และ $b2$ ที่สถานีวัดต่างๆของประเทศไทย 13
2.4 เป้าหมายของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2011 18
2.5 เปรียบเทียบคุณสมบัติของหลังคาเหล็กเมทัลชีทกับกระเบื้องคอนกรีต 21
2.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ 22
2.7 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเยื่อกระดาษ ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน และ ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน 25
2.8 ระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน 37
2.9 รายการที่บันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 41
2.10 รายการที่จดบันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9459-2 45
3.1 แสดงสิ่งที่วัดและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆในระบบดังรูปที่ 3.28 73
3.2 แสดงสิ่งที่วัดและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆในระบบดังรูปที่ 3.29 75
4.1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D 78
4.2 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 80
4.3 ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ 103
4.4 ปริมาณความร้อนที่ได้รับในแต่ละวัน ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ และความสามารถในการผลิตน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 60 °C ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละชนิด 108
4.5 ราคาต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ 109
4.6 ผลการประเมินเงินลงทุนเทียบเท่ารายปี 110
4.7 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C 110
4.8 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C 111

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

4.9 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาด ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C 111
ก.1 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มีจำหน่ายในประเทศไทย 121
ข.1 ข้อมูลตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุน 123
ข.2 ต้นทุนวัสดุของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นรายและถังสะสมความร้อน 124
ฉ.1 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 18 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 137
ฉ.2 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 138
ฉ.3 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 22 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 139
ฉ.4 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 23 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 140
ฉ.5 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 24 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 141
ฉ.6 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 25 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 142
ฉ.7 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 143
ฉ.8 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 144
ฉ.9 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 18 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 145
ฉ.10 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 146
ฉ.11 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 147

ตาราง (ต่อ) **หน้า**

ฉ.12 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 148
ฉ.13 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 149
ฉ.14 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 150
ฉ.15 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 151
ฉ.16 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 152
ฉ.17 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 153
ฉ.18 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 24 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด 154
ฉ.19 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 6 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 155
ฉ.20 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 7 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 156
ฉ.21 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 12 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 157
ฉ.22 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 13 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 158
ฉ.23 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 14 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 159
ฉ.24 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 15 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด 160
ช.1 ข้อมูลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 162
ช.2 ข้อมูลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 163

รายการรูปประกอบ

รูป **หน้า**

2.1 พื้นผิวรับแสงและมุมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวเอียง 10
2.2 มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบและพื้นเอียง 10
2.3 พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเมื่อเทียบกับประเทศต่างๆ 15
2.4 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) 16
2.5 ชั้นเคลือบโลหะผสมอลูซิงค์ของหลังคาเหล็กเมทัลชีท 20
2.6 ชั้นเคลือบเหล็กเคลือบสี Clean Colorband® Steel Layer 20
2.7 ฉนวนเยื่อกระดาษ 23
2.8 ฉนวนใยแก้ว 23
2.9 ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน 24
2.10 ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน 24
2.11 ลักษณะการหมุนเวียนน้ำภายในแผงท่อบนแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ 27
2.12 ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ 28
2.13 วงจรความร้อนของตัวเก็บรังสีที่มีแผ่นปิดใส 2 ชั้น 30
2.14 วงจรความร้อนสมมูลย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ 31
2.15 แผ่นรับรังสีอาทิตย์และท่อ 33
2.16 ระบบการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดโปร่งแสง 36
2.17 แผนผังการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์และเครื่องมือวัด
ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 44
3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 54
3.2 ภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-825 55
3.3 แบบแปลนแสดงขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น LL-825 56
3.4 ภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-750D 57
3.5 แบบแปลนแสดงขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-750D 58
3.6 ตัวยึดติดที่ทำการยึดติดท่ออะลูมิเนียมเข้ากับแผ่นดูดกลืนความร้อน
ของแผ่นดูดกลืนความร้อนในแต่ละรุ่น 59

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.7 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รุ่นต่างๆ ที่ผ่านการประกอบกับท่ออะลูมิเนียมโดยใช้แผ่นยึดติดเป็นตัวยึดติด ด้านหน้า 60

3.8 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รุ่นต่างๆ ที่ผ่านการประกอบกับท่ออะลูมิเนียมโดยใช้แผ่นยึดติดเป็นตัวยึดติด ด้านหลัง 61

3.9 แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีรองพื้น 62

3.10 แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีดำด้านทับสีรองพื้น 62

3.11 แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีดำด้านทับสีรองพื้นในระยะใกล้ 63

3.12 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นฉนวนพอลียูรีเทนที่มีความหนา 25 mm 63

3.13 ความหนาของฉนวนพอลิยูรีเทนขนาดความหนาประมาณ 25 mm และลักษณะของฉนวนพอลิยูรีเทน 64

3.14 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 แบบไม่มีกระจกปิด 64

3.15 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิด 65

3.16 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D แบบไม่มีกระจกปิด 65

3.17 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D แบบมีกระจกปิด 66

3.18 ถังสะสมความร้อน 66

3.19 ถังพักน้ำ 67

3.20 ปั๊มน้ำ 67

3.21 เครื่องวัดแรงดันน้ำ 68

3.22 เครื่องบันทึกข้อมูล 68

3.23 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ T 69

3.24 เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ 69

3.25 เครื่องระบายความร้อนจากน้ำร้อน 70

3.26 ถังทำน้ำร้อน 70

3.27 ถังพักน้ำสำหรับไหล 71

3.28 หลักการทำงานการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์และตำแหน่งการวัดค่าต่างๆ 72

3.29 รูปการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน IS0 9806-1 74

3.30 หลักการทำงานระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และตำแหน่งการวัดค่าต่างๆ 75

รูป (ต่อ) **หน้า**

3.31 รูปการทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (ด้านหน้า) 76
3.32 รูปการทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (ด้านข้าง) 76
4.1 กราฟประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D 79
4.2 กราฟประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 81
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนของค่าความร้อนจากครีบ ค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ และค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D 82
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนของค่าความร้อนจากครีบ ค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ และค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 82
4.5 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D แบบไม่มีกระจกปิด ของวันที่ 19 ธันวาคม 2555 และ 25 มกราคม 2556 84
4.6 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D แบบไม่มีกระจกปิดทั้ง 6 วัน 85
4.7 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 ของวันที่ 18 มกราคม 2556 และวันที่ 21 มกราคม 2556 86
4.8 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 แบบไม่มีกระจกปิดทั้ง 6 วัน 86
4.9 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิด ของวันที่ 21 มีนาคม 2556 และวันที่ 23 มีนาคม 2556 87
4.10 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D แบบครอบกรอบทั้ง 6 วัน 88
4.11 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิด ของวันที่ 07 มีนาคม 2556 และวันที่ 14 มีนาคม 2556 89
4.12 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิดทั้ง 6 วัน 89
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 91

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับ อุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 91
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 92
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับ อุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 93
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 94
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับ อุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 94
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 95
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับ อุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 96
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 97
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 98
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 99
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 99
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 100
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 101
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 102

รูป (ต่อ) **หน้า**

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 102
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด 104
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด 105
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด 106
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด 107
4.33 ราคาพลังงานที่นำไปใช้งาน ณ อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 C ที่ระยะเวลาการใช้งานของระบบที่อัตราดอกเบี้ย 7.5% 112
4.34 ระยะเวลาคุ้มทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ ที่ราคาพลังงานไฟฟ้าค่าต่างๆ 113
ข.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบและถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุน 123
ง.1 ประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบ 131

รายการสัญลักษณ์

a_1 คือ สัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

a_2 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของการสะสมความร้อน (MJ/K)

a_3 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อน ณ สภาวะเริ่มต้น (MJ)

A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี (m^2)

b คือ ปริมาตรของถังสะสมความร้อนต่อพื้นที่แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (L)

c คือ อัตราเร็วของแสงในสภาวะสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^8 m/s

C_b คือ ความต้านทานรอยต่อ

C_c คือ ค่าใช้จ่ายของแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่ (฿)

C_n คือ จำนวนเงินต่อหน่วยเวลา (฿)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg°C)

C_{pw} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ($kJ/kg \cdot K$)

C_t คือ ค่าใช้จ่ายของถังสะสมความร้อนต่อปริมาตร (฿)

C_w คือ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าติดตั้ง (฿)

CRF คือ ค่าการชดเชยต้นทุนในการลงทุน

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (mm)

E คือ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (kW)

F คือ ประสิทธิภาพมาตรฐานของครีบ

F' คือ แฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

G_b คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบ (W/m^2)

G_{bt} คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นเอียง (W/m^2)

G_{on} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลก (W/m^2)

G_{sc} คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์มีค่า 1,367 W/m^2

G_T	คือ	ความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลานั้น (W/m^2)
h_w	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยลม (W/m^2 °C)
h_{fi}	คือ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ (W/m^2 °C)
H	คือ	รังสีอาทิตย์รวมรายวัน (MJ/m^2day)
H_d	คือ	รังสีอาทิตย์กระจายรายวัน (MJ/m^2day)
H_0	คือ	รังสีอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศรายวัน (MJ/m^2day)
$\overline{H}$	คือ	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ (MJ/m^2day)
i	คือ	อัตราดอกเบี้ยต่อหน่วยเวลา
I	คือ	รังสีอาทิตย์รวมบนในแนวระดับ (W/m^2)
I_T	คือ	รังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียง (W/m^2)
I_d	คือ	รังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ (W/m^2)
k	คือ	ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
k_T	คือ	ดัชนีเมฆรายชั่วโมง
K_T	คือ	ดัชนีเมฆรายวัน
$\overline{K}_T$	คือ	ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน
L	คือ	ความหนาของฉนวน
L_{st}	คือ	เส้นแวงที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น
L_{loc}	คือ	เส้นแวงของตำแหน่งที่ตั้ง
m	คือ	มวลที่หายไป
m	คือ	ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (Liter/day)
$\dot{m}$	คือ	อัตราการไหลแต่ละตัวของตัวเก็บรังสี (kg/s)
M	คือ	ค่าบำรุงรักษาต่อปี (฿)
n	คือ	วันที่ของปี (Julian date), $1 \leq n \leq 365$
n	คือ	จำนวนหน่วยเวลา (year)
N	คือ	จำนวนกระจก
$\overline{N}$	คือ	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของความยาวนานของวัน

q'_{fin} คือ พลังงานที่นำเข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (kJ)

q'_{tube} คือ พลังงานที่สะสมเหนือบริเวณท่อ (kJ)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (MJ)

Q คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kJ)

Q_i คือ ความร้อนของน้ำที่ปล่อยออกทุกๆ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง (MJ)

Q_u คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)

R_b คือ รังสีตกกระทบพื้นราบ ($\mathrm{W/m^2}$)

S คือ รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน ($\mathrm{W/m^2}$)

S' คือ มูลค่าซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน (฿)

$\bar{S}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของชั่วโมงที่มีแดด

SFF คือ ตัวประกอบทุนจม

t คือ เวลาที่วัดหลังจากเที่ยงสุริยะ (Hr)

t_{in} คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

t_o คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)

T_b คือ อุณหภูมิของฉนวน (°C)

T_{c1} คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 1 (°C)

T_{c2} คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 2 (°C)

$t_{di}\left(Vi\right)$ คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำ ΔV_i , (°C)

T_{f0} คือ อุณหภูมิของไหลขาออก (°C)

T_{fi} คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้า (°C)

T_p คือ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนรังสี (°C)

T_{pm} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืน (°C)

t_{main} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อดันน้ำร้อนในถัง (K)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($\mathrm{W/m^2\,°C}$)

U_G คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($\mathrm{W/m^2\,°C}$)

U_t คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบน (W/m^2 °C)

U_b คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านหลัง (W/m^2 °C)

ΔV_i คือ ปริมาตรน้ำ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง (m^2)

W คือ ระยะห่างระหว่างท่อ (mm)

α คือ ค่าการดูดกลืนรังสี (°)

α_s คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (°)

β คือ มุมเอียงจากแนวระดับ (°)

ε_g คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นกระจก

ε_p คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนรังสี

η คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

η_G คือ ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

η_m คือ ความสามารถในการผลิตน้ำร้อน

η_{OG} คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ω คือ มุมชั่วโมง (°)

ω_s คือ มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (Sunset hour angle) (°)

ρ_c คือ ค่าการสะท้อนรังสี

ρ_g คือ ค่าการสะท้อนรังสีของพื้น

ρ_w คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำร้อน (kg/m^3)

δ คือ มุมเดคลิเนชั่น (°)

δ_p คือ ความหนาแผ่นดูดกลืน (mm)

ϕ คือ มุมละติจูด (°)

θ คือ มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นเอียง (°)

θ_z คือ มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นราบ (°)

τ คือ ค่าการส่องผ่านรังสี

γ คือ มุมอะซิมุท (°)

ประมวลศัพท์และคำย่อ

°C	คือ	celsius degree
Hr	คือ	hour
K	คือ	kelvin degree
kJ	คือ	kilojuule
kJ/kg°C	คือ	kilojuule per kilogram celsius
kg/m^3	คือ	kilogram per cubic meter
kg/s	คือ	kilogram per second
L	คือ	liter
m	คือ	meter
mm	คือ	milimeter
m^2	คือ	square meter
MJ	คือ	megajoule
MJ/K	คือ	megajoule per kelvin
MJ/m^2day	คือ	megajoule per square meter day
MW	คือ	megawatt
Pa	คือ	pascal
W	คือ	watt
W/m^2	คือ	watt per square meter
W/m.K	คือ	watt per meter kelvin

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาคเศรษฐกิจที่เติบโตมากขึ้น จากรายงานพลังงานประจำปีของกระทรวงพลังงาน พบว่า ปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 12 และเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552 ร้อยละ 5.3 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 70,247 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และมีการผลิตพลังงานจากแหล่งภายในประเทศรวมทั้งสิ้น 72,143 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2552 ร้อยละ 10.5 และมีการนำเข้าพลังงานรวมทั้งสิ้น 65,113 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปีก่อนร้อยละ 5.2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) พลังงานหลักที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากพลังงานสิ้นเปลืองที่เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ซึ่งมีราคาแพงและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมของโลก อีกทั้งสภาวการณ์ราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้น มีความผันผวนของราคาที่สูงและประกอบกับความต้องการใช้พลังงานภายในประเทศที่สูงขึ้น จึงต้องมีการนำเข้าพลังงานจากภายนอกประเทศเข้ามาทดแทน ส่งผลให้สูญเสียเงินตราออกนอกประเทศและความมั่นคงทางพลังงานภายในประเทศลดต่ำลง ดังนั้นทางกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจึงได้จัดทำแผนพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) โดยมีเป้าหมายคือ "เพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นร้อยละ 20 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศ ภายในปี พ.ศ. 2565" (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์นั้นเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่มีการคิดค้นและนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้ารวมทั้งประยุกต์ใช้พลังงานความร้อนจากรังสีอาทิตย์ในการผลิตน้ำร้อน เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีอยู่อย่างมหาศาล เป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ และเป็นพลังงานที่ไม่มีต้นทุนของค่าพลังงาน รวมทั้งที่ตั้งของประเทศไทยอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรซึ่งได้รับแสงอาทิตย์ตลอดทั้งปี จึงมีศักยภาพที่เพียงพอต่อการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งจากแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปีสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีเป้าหมายคือ "ส่งเสริมการผลิตไฟฟ้ารวม 500 MW และความร้อน 38 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ ภายในปี พ.ศ. 2565 ด้วยกลยุทธ์ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดต้นทุนการผลิตเสริมสร้างศักยภาพภาคอุตสาหกรรมให้สามารถแข่งขันได้และสนับสนุนการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งพื้นที่ชนบทห่างไกล และในเขต

เมือง ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน" (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) ดังจะได้เห็นได้ว่าอุปสรรคของพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันนั้นก็คือเรื่องราคา และต้นทุนการผลิตพลังงานที่สูง ซึ่งหากมีการพัฒนาและแก้ไขอุปสรรคเหล่านี้ได้ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยก็จะมีการพัฒนาที่ยั่งยืนขึ้น

จากอุปสรรคและข้อจำกัดข้างต้น ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบยังไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานในประเทศไทย โดยเฉพาะบ้านพักอาศัย ดังนั้นการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะกับการใช้งานในบ้านพักอาศัยในประเทศไทย ควรคำนึงถึงราคาและศักยภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย (Low cost flat plate solar collector) ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาผลิตน้ำร้อน เป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนอย่างหนึ่ง โดยทำการลดราคาต้นทุนการผลิตตัวเก็บรังสี แต่ยังคงอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงพอกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์นั้นๆ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่ายได้ถูกพัฒนามามากมาย ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ โดยภายในประเทศไทย ยุคแรกๆ ได้มีการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนถูกและสามารถสร้างได้ด้วยตนเอง ซึ่งประยุกต์ท่อน้ำพลาสติก (PVC) เป็นแผงรับรังสีอาทิตย์ และใช้เป็นถังสะสมความร้อน (ปรีดา จันทวงษ์, 2542) ต่อมา ได้มีการใช้แผ่นพลาสติกพอลิโพพิลีนทำหน้าที่เป็นท่อให้น้ำไหลภายในและเป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งส่งผลให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีน้ำหนักเบากว่าตัวเก็บรังสีทั่วไปครึ่งหนึ่ง (เกษม โพธิ์งาม, 2545) จากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิด คือ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด แผ่นสังกะสี และแผ่นกระเบื้องยิปซัม ซึ่งใช้เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ (สำรวย ภูบาล, 2550) และมีการทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อน โดยใช้กระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้วเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์โดยทำงานร่วมกับชุดสารดูดความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นของอากาศก่อนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ส่วนในต่างประเทศนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่าย ต้นทุนต่ำเรื่อยมา โดยมีการใช้แผ่นซีเมนต์คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยท่ออลูมิเนียมที่ถูกหล่อด้วยซีเมนต์ จะอยู่ด้านบนผิวของแผ่นซีเมนต์ (Chaurasia, 2000) ต่อมามีการศึกษาเปรียบเทียบแผงรังสีที่สร้างขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์และแผงรังสีที่ทำจากโลหะที่ขายตามท้องตลาด (Cristofari, at al., 2001) และมีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นอุปกรณ์เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแผ่นพอลิเมอร์ PVC เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยไม่ใช้กระจกครอบไว้ และถังเก็บน้ำร้อนจะเป็นถังที่สร้างจากพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยพอลิสไตรีน (Siqueira, et al., 2011)
ในงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แผ่นโลหะหรือหลังคาเมทัลชีท (Metal sheet) มาเป็นส่วนประกอบในการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย (Low cost flat plate solar

collector) โดยใช้วัสดุหลักคือแผ่นโลหะเมทัลชีท ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาถูก ไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรง เหนียว ทนทาน อายุการใช้งานที่สูง และสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่าย โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นหลังคาของตัวอาคาร และในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำมาใช้เป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ใช้ท่ออลูมิเนียมเป็นตัวลำเลียงตัวกลางในการรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งตัวกลางที่ใช้ก็คือ น้ำ โดยใช้ระบบการไหลของน้ำร้อนตามธรรมชาติ (Natural-circulation system)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย โดยประยุกต์ใช้แผ่นโลหะมาเป็นตัวรับรังสีหรือแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์
2. หาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นโลหะเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์
3. วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นโลหะเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยชิ้นนี้ใช้แผ่นโลหะมาสร้างเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย โดยมีขนาดพื้นที่แผงรับรังสีอาทิตย์ 2 m^2
2. ระบบการไหลของน้ำร้อนตามธรรมชาติเป็นการไหลเวียนของน้ำร้อนภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยใช้เทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) ทำหน้าที่เป็นวาล์วปิด-เปิด ทางเดินของน้ำ เพื่อนำไปเก็บสะสมภายในถังเก็บน้ำ
3. ทดสอบที่กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
4. หาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยทำการทดสอบที่สภาวะอากาศจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รูปแบบใหม่ ซึ่งประยุกต์ใช้แผ่นโลหะหรือเมทัลชีทเป็นตัวรับรังสี และเป็นต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย ที่มีราคาต้นทุนต่ำและใช้ได้กับบ้านพักอาศัย หรือโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

2.1.1 ดวงอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นกลุ่มก๊าซร้อนรูปทรงกลมที่มีความหนาแน่นสูง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.39×10^9 m และมีระยะห่างเฉลี่ยจากโลกประมาณ 1.5×10^{11} m โดยดวงอาทิตย์จะเปรียบเสมือนวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 5,777 K อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 8×10^6 K ถึง 40×10^6 K และมีความหนาแน่นประมาณ 100 เท่าของความหนาแน่นของน้ำ ดวงอาทิตย์เปรียบได้กับเตาปฏิกรณ์ที่เกิดปฏิกิริยาฟิวชันของก๊าซที่เป็นส่วนประกอบอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น พลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์เกิดจากปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ (Thermo-nuclear) หลายกระบวนการ ทุกกระบวนการเริ่มด้วยการเปลี่ยนธาตุเริ่มต้นคือไฮโดรเจนเป็นธาตุสุดท้ายคือฮีเลียม

ในปฏิกิริยา มวลรวมของอะตอมที่เข้าทำปฏิกิริยาจะน้อยกว่ามวลรวมหลังปฏิกิริยา มวลที่หายไปถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (และส่วนน้อยเป็นพลังงานจลน์ของอะตอมและอนุภาค) โดยมวลของดวงอาทิตย์ลดลงในอัตราประมาณ 4×10^9 kg/s ควบคู่การปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ในอัตรา 3.85×10^{23} kW (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541; กฤษณพงษ์ กีรติกร, 2547) เป็นไปตามสมการ

$$E = mc^2 \tag{2.1}$$

เมื่อ

E คือ พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (kW)

m คือ มวลที่หายไป (m)

c คือ อัตราเร็วของแสงในสภาวะสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^8 m/s

2.1.2 ค่าคงที่แสงอาทิตย์

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ไม่เป็นวงกลม ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างโลกและดวงอาทิตย์จึงมีค่าไม่เท่ากันที่เวลาใดๆ โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7 % ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกและดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ 1.495×10^{11} m ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่

ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลกที่เวลาต่างกันจึงมีค่าไม่เท่ากัน ค่าคงที่แสงอาทิตย์ (Solar constant, G_{sc}) คือค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าประมาณ 1,367 W/m^2 พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลก (Extraterestrial radiation) มีค่าไม่คงที่ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีที่ปลดปล่อยจากดวงอาทิตย์แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า $\pm$ 1.5 %) และอีกสาเหตุหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ให้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศโลกมีค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีอาทิตย์เหนือบรรยากาศจะอยู่ในช่วง $\pm$ 3 % สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลก G_{on} ที่วันลำดับที่ n ของปี และค่าคงที่แสงอาทิตย์ได้ดังสมการ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541; กฤษณพงษ์ กีรติกร, 2547)

$$G_{on} = G_{sc}\left[1 + 0.333\cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right] \tag{2.2}$$

เมื่อ

G_{on} คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยเหนือบรรยากาศโลก (W/m^2)

G_{sc} คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์ (W/m^2)

n คือ วันลำดับที่ n ของปี

2.1.3 รังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลกหรือรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นราบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. รังสีตรง (Direct or beam radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ได้จากดวงอาทิตย์โดยตรง ทำให้มีทิศทางที่แน่นอนสามารถนำไปใช้งานได้ดี เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีตรง คือ ไพเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer)
2. รังสีกระจาย (Diffuse radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ได้รับหลังจากที่มีการกระจาย หักเห และสะท้อนในชั้นบรรยากาศหรือสิ่งแวดล้อม ทำให้มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ เครื่องมือที่ใช้วัดรังสีกระจาย คือ ไพราโนมิเตอร์ชนิดที่มี shading ring
3. รังสีรวม (Total or global radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย หรืออาจหาได้จากการอินทิเกรตความเข้มของรังสีอาทิตย์ตลอดทุกๆ ช่วงความยาวคลื่น การหาค่ารังสีอาทิตย์รวมบนพื้นราบสามารถหาได้จากเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีรวม คือ ไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) หรือจากสมการเปรียบเทียบกับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

2.1.3.1 ทิศทางของรังสีตรง

สถานีบนพื้นโลกที่วัดค่ารังสีอาทิตย์ จะมีไพราโนมิเตอร์วัดค่ารังสีรวมที่ตกบนพื้นราบในแนวระดับ ในกรณีที่ต้องการค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นเอียง จากแนวระนาบที่มุมต่างๆ ซึ่งเป็นไปตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์เมื่อเทียบกับระนาบ สามารถอธิบายโดยใช้มุมต่างๆ ดังนี้

มุมซีนิธ (Zenith angle, θ_z) คือ มุมระหว่างแนวตั้งฉากกับระนาบระดับและแนวลำแสงอาทิตย์

มวลอากาศ (Air mass, m) คือ สัดส่วนของความหนาของบรรยากาศที่รังสีตรงส่องผ่านต่อความหนาของบรรยากาศเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ที่ตำแหน่งตรงศีรษะ นอกบรรยากาศกำหนดให้มวลอากาศเท่ากับ 0 สำหรับที่ระดับน้ำทะเล ค่ามวลอากาศได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$m = \sec\theta_z \tag{2.3}$$

โดย $0 \le \theta_z \le 70$

$$\begin{aligned} m &= \left[1229 + \left(614\sin\alpha_s\right)^2\right]^{1/2} - 614\sin\alpha_s \\ &= \left[\sin\alpha_s + 0.15\left(\alpha_s + 3.9\right)^{-1.253}\right]^{-1} \end{aligned} \tag{2.4}$$

โดย $\theta_z \ge 70$

เมื่อ

α_s คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

ละติจูด (Latitude, ϕ) คือ มุมที่อยู่ทางทิศเหนือหรือทิศใต้ของเส้นศูนย์สูตร เมื่อวัดไปทางทิศเหนือกำหนดให้มีค่าเป็นบวก และเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ ละติจูดมีค่าอยู่ระหว่าง -90° ถึง 90°

มุมเอียง (Slope, β) คือ มุมระหว่างพื้นผิวของระนาบรับรังสีกับแนวระดับ มีค่าอยู่ระหว่าง 0° ถึง 180°

มุมอะซิมุท (Azimuyh angle, γ) คือ มุมระหว่างทิศใต้กับทิศทางการหันหน้าของ แผงรับรังสีอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง $-180° \le \gamma \le 180°$ โดยเป็นศูนย์เมื่อหันไปทางทิศใต้ (γ = 0) เป็นบวกเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันตก γ = บวก (+), เป็นลบเมื่อหันหน้าไปทางทิศตะวันออก γ = ลบ (-)

มุมชั่วโมง (Hour angle) คือ มุมที่แทนตำแหน่งของดวงอาทิตย์จากเมอริเดียนท้องถิ่นไปทางตะวันออกหรือตะวันตก ซึ่งมีหน่วยวัดเป็นองศา (ของเส้นโค้งอิเควเตอร์) หรือเป็นชั่วโมง (วัดจาก

เที่ยงสุริยะ) เวลาที่ใช้ในการคำนวณ เกี่ยวกับรังสีอาทิตย์จะเป็นเวลาสุริยะ (Solar time) ซึ่งมีค่าแตกต่างจากเวลานาฬิกาท้องถิ่น (Standard time) ซึ่งตำแหน่งดวงอาทิตย์กำหนดโดยค่ามุมชั่วโมง (Hour angle, ω) โดยการโคจรของดวงอาทิตย์ จะใช้เวลา 4 นาทีในแต่ละองศา หรือ 15° ในแต่ละ 1 ชั่วโมง ช่วงบ่ายจะมีค่าเป็นบวก (+) ช่วงเช้า มีค่าเป็นลบ (-) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

$$\omega = \frac{t}{24} \times 360^{\circ} = 15t \tag{2.5}$$

เมื่อ

ω คือ มุมชั่วโมง

t คือ เวลาที่วัดหลังจากเที่ยงสุริยะ (Hr)

เวลาสุริยะ (Solar time)

เวลาสุริยะเป็นเวลาที่ถูกกับตำแหน่งเฉพาะของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ไม่ใช้เวลานาฬิกาท้องถิ่น (Local clock time) หรือเวลามาตรฐานท้องถิ่น (Standard time) ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$Solar\ Time\ =\ S\tan dard\ Time \pm 4\left(L_{st} - L_{loc}\right) + E \tag{2.6}$$

สำหรับเครื่องหมายบวกลบ ($\pm$) มีค่าเป็นบวก (+) สำหรับซีกโลกตะวันตก มีค่าเป็นลบ ($-$) สำหรับซีกโลกตะวันออก

ค่า E เป็นสมการเวลาสามารถหาได้จาก

$$E = 9.87\sin 2B - 7.53\cos B - 1.5\sin B \tag{2.7}$$

โดยที่ค่า B สามารถคำนวณได้จาก

$$B = \frac{360\left(n-81\right)}{365} \tag{2.8}$$

เมื่อ

L_{st} คือ เส้นแวงที่ใช้คำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น

L_{loc} คือ เส้นแวงของตำแหน่งที่ตั้ง (หน่วยเป็นองศาตะวันออก)

E คือ สมการเวลา

n คือ วันที่ของปี (Julian date), $1 \leq n \leq 365$

มุมเดคลิเนชัน (Declination angle, δ) คือ มุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์เมื่อเที่ยงสุริยะกับระนาบศูนย์สูตร กำหนดให้มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดไปทางทิศเหนือ และมีค่าเป็นลบเมื่อวัดไปทางทิศใต้ มุมเดคลิเน-ชันมีค่าเปลี่ยนไปทุกวันระหว่าง -23.45° ถึง 23.45° สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$\delta = 23.45\sin\left[360\frac{(284+n)}{365}\right] \tag{2.9}$$

เมื่อ

n คือ วันที่ของปี (Julian Date), $1 \leq n \leq 365$

มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle, α_s) คือ มุมระหว่างพื้นราบกับแนวลำแสงอาทิตย์ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$\sin\alpha_s = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \tag{2.10}$$

เมื่อ

α_s คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

ϕ คือ ละติจูด (Latitude)

δ คือ เดคลิเนชั่น (Declination angle)

ω คือ มุมชั่วโมง (Hour angle)

มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle, γ_s) คือ มุมระหว่างระนาบแนวดิ่งของดวงอาทิตย์และระนาบของเมอริเดียนท้องถิ่น โดยกำหนดให้วัดจากทิศใต้ของระนาบแนวดิ่งดวงอาทิตย์ไปทางตะวันตกมีค่าเป็นบวก วัดไปทางตะวันออกมีค่าเป็นลบ และมีค่าเป็นศูนย์ที่ทิศใต้ มุมอะซิมุธดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ในช่วง -180° ถึง 180° สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$\gamma_s = \frac{\cos\delta\sin\omega}{\cos\alpha_s} \tag{2.11}$$

เมื่อ

γ_s คือ มุมอะซิมุทดวงอาทิตย์ (Solar azimuth angle)

α_s คือ มุมอัลติจูดดวงอาทิตย์ (Solar altitude angle)

δ คือ เดคลิเนชั่น (Declination angle)

ω คือ มุมชั่วโมง (Hour angle)

สามารถหาค่ามุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (Sunset hour angle, ω_s) ได้จาก

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\tan\phi\tan\delta\right) \tag{2.12}$$

เมื่อ

δ คือ มุมเดคคลิชัน (Declination angle) ($^\circ$)

ω_s คือ มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตก (Sunset hour angle) ($^\circ$)

ϕ คือ มุมละติจูด (Latitude) ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตั้งอยู่ ($^\circ$)

มุมตกกระทบ (Incidence Angle, θ)

มุมตกกระทบ คือมุมระหว่างแนวลำแสงอาทิตย์บนพื้นผิวกับแนวตั้งฉากของพื้นผิว ความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมอื่นๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$\begin{aligned}\cos\theta = {} & \sin\delta\sin\phi\cos\beta \\ & -\sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma \\ & +\cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega \\ & +\cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega \\ & +\cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega\end{aligned} \tag{2.13}$$

กรณีพื้นราบ ($\beta = 0^\circ$) มุกตกกระทบ คือ มุม ซีนิธ

$$\cos\theta_z = \cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta \tag{2.14}$$

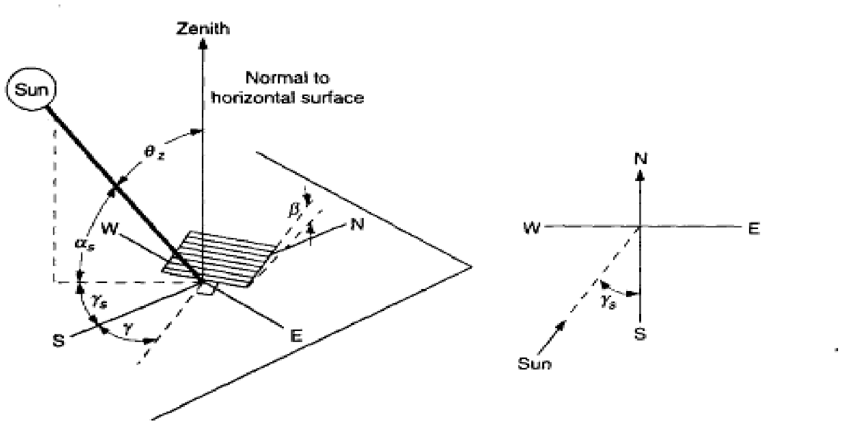
เมื่อ

θ = มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นเอียง ($^\circ$)

θ_z = มุมตกกระทบรังสีตรงบนพื้นราบ ($^\circ$)

β = มุมเอียงจากแนวระดับ ($^\circ$)

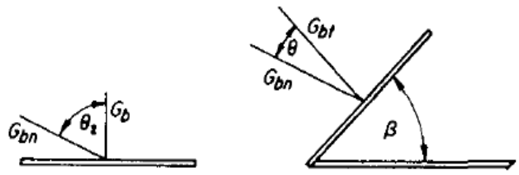
γ = มุมอะซิมุท (Azimuyh angle)



รูปที่ 2.1 พื้นผิวรับแสงและมุมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวเอียง (Duffie and Beckman, 1991)

2.1.3.2 ค่ารังสีตรงบนพื้นเอียง

อัตราส่วนรังสีตรงบนพื้นเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ



รูปที่ 2.2 มุมตกกระทบของรังสีตรงบนพื้นราบและพื้นเอียง (Duffie and Beckman, 1991)

โดยที่อัตราส่วนรังสีตรงที่ตกกระทบพื้นเอียงต่อรังสีตรงที่ตกกระทบพื้นราบ (R_b) ที่เวลาใดๆ สามารถหาได้จากสมการ

$$R_b = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bt}\cos\theta}{G_b\cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \qquad (2.15)$$

เมื่อ

R_b คือ รังสีตกกระทบพื้นราบ

G_b คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นราบ (W/m^2)

G_{bt} คือ รังสีตรงที่ตกกระทบบนพื้นเอียง (W/m^2)

ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นราบเมื่ออยู่นอกชั้นบรรยากาศโลกในแต่ละวันจากดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตกสามารถคำนวณได้จาก

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin\phi \sin\delta \right] \qquad (2.16)$$

เมื่อ

H_0 คือ รังสีอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศรายวัน ($\mathrm{MJ/m^2day}$)

G_{sc} คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์มีค่า 1,367 $\mathrm{W/m^2}$

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลรังสีอาทิตย์สามารถประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยเฉลี่ยได้โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงสถิติของรังสีอาทิตย์กับชั่วโมงที่มีแดด

$$\bar{H} = \bar{H}_0 \left[a + b\left(\frac{\bar{S}}{\bar{N}} \right) \right] \qquad (2.17)$$

เมื่อ

a,b คือ สัมประสิทธิ์ความถดถอย โดยแสดงในตารางที่ 2.1

$\bar{H}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบในแนวระดับ ($\mathrm{MJ/m^2day}$)

$\bar{N}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของความยาวนานของวัน

เมื่อ $N = \frac{2}{15}\cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta)$

$\bar{S}$ คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของชั่วโมงที่มีแดด โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1998) แสดงในตารางที่ 2.2

ดัชนีเมฆรายชั่วโมง (Hourly cloudiness index, k_T) คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงบนพื้นราย (I) ต่อค่ารายชั่วโมงของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ (I_0)

$$k_T = \frac{I}{I_0} \qquad (2.18)$$

ดัชนีเมฆรายวัน (Daily cloudiness index, K_T) คือ อัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายวันบนพื้นราบ (H) ต่อค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ (H_0)

$$K_T = \frac{H}{H_0} \qquad (2.19)$$

ดัชนีเมฆเฉลี่ยรายเดือน ($\bar{K}_T$) คือ อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีรวมบนพื้นราบ ($\bar{H}$) ต่อค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่ารายวันของรังสีอาทิตย์ในแนวราบเหนือบรรยากาศ ($\bar{H}_0$)

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b\left(\frac{\bar{S}}{\bar{N}}\right) \tag{2.20}$$

โดยที่ I , H และ $\bar{H}$ เป็นค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลรังสีอาทิตย์ สำหรับ I_0, H_0 และ $\bar{H}_0$ เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณ (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของรังสีรายวันต่อรังสีนอกบรรยากาศ และชั่วโมงที่มีแดดต่อความยาวนานของวัน โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานี

Station	Mean of $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$	Regression Coefficient		R^+	$RSME^{++}$
		a	b		
กรุงเทพ	0.5354	0.3097	0.3914	0.8776	0.0612
เชียงใหม่	0.5694	0.3579	0.3531	0.9049	0.0624
อุบลราชธานี	0.5534	0.2626	0.4526	0.9369	0.0695
หาดใหญ่	0.5271	0.2733	0.4344	0.8584	0.0416

R^+ คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (The correlation coefficient)

$RSME^{++}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

ตารางที่ 2.2 ชั่วโมงที่มีแดดเฉลี่ยของแต่ละเดือน โดยใช้ข้อมูลทางสถิติของกรุงเทพฯ (1991-1996)

Month	$\bar{S}$ (hrs)	Month	$\bar{S}$ (hrs)
January	8.16	July	5.17
February	8.29	August	4.65
March	8.60	September	4.65
April	7.44	October	5.05
May	6.54	November	5.53
June	4.98	December	7.88

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

จากรังสีอาทิตย์รายวันสามารถหาค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง โดยกำหนดค่าอัตราส่วนรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงต่อรังสีอาทิตย์รายวัน (r_t) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$r_t = \frac{I}{H} = \frac{\pi}{24}\left(a + b\cos\omega\right)\left[\frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \left(\frac{2\pi\omega_s}{360}\right)\cos\omega_s}\right] \quad (2.21)$$

โดยที่

$a = a1 + a2\sin\left(\omega_s - 60\right)$

$b = b1 + b2\sin\left(\omega_s - 60\right)$

ค่า $a1$, $a2$, $b1$ และ $b2$ ที่สถานีวัดต่างๆของประเทศไทยแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ $a1$, $a2$, $b1$ และ $b2$ ที่สถานีวัดต่างๆของประเทศไทย

สถานี	$a1$	$a2$	$b1$	$b2$
KMUTT	0.792	-0.250	0.189	0.471
เชียงใหม่	0.514	0.228	0.512	0.083
อุบลราชธานี	0.760	-0.031	0.207	0.238
หาดใหญ่	0.607	-0.124	0.417	0.007

ที่มา : Naris Pratinthong, 1996

อัตราส่วนรังสีอาทิตย์กระจายรายวัน (H_d) ต่อรังสีอาทิตย์รวมรายวัน (H) บนพื้นราบสามารถคำนวณได้จาก

$$H_d = -4.6408H + 26.5495\left(\frac{H}{H_0}\right)H - 28.3422\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 H - 31.4546\left(\frac{H}{H_0}\right)^3 H + 46.4421\left(\frac{H}{H_0}\right)^4 H \quad (2.22)$$

เมื่อ

H_d = รังสีอาทิตย์กระจายรายวัน ($\mathrm{MJ/m^2day}$)

H = รังสีอาทิตย์รวมรายวัน ($\mathrm{MJ/m^2day}$)

ค่ารังสีอาทิตย์กระจายรายชั่วโมง (I_{d}) สามารถคำนวณได้จาก

$$I_{\mathrm{d}} = H_{\mathrm{d}} \times \frac{\pi}{24}\left(\frac{\cos\omega\cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{2\pi\omega_s\cos\omega_s}{360}}\right) \tag{2.23}$$

โดยที่สามารถหาค่า I_{b} ได้จากสมการ

$$I_{\mathrm{b}} = I - I_{\mathrm{d}} \tag{2.24}$$

รังสีอาทิตย์ขณะที่ตกผ่านชั้นบรรยากาศมาที่ผิวโลก บางส่วนจะถูกดูดกลืน บางส่วนสะท้อนกลับสู่บรรยากาศ และบางส่วนทำให้รังสีกระจาย (Diffuse radiation) ทำให้ค่ารังสีตรง (Direct or beam radiation) ตกที่พื้นผิวโลกน้อยลง รังสีรวม (Global radiation) จะประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายที่มาจากก้อนเมฆและแอโรซอลหรือฝุ่นละอองดังนั้น ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นเอียง (L_{T}) (เกษม โพธิ์งาม, 2545) สามารถคำนวณได้จากสมการ (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

$$I_{\mathrm{T}} = I_{\mathrm{b}}R_{\mathrm{b}} + I_{\mathrm{d}}\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + I\rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \tag{2.25}$$

เมื่อ

I_{T} = รังสีอาทิตย์รวมบนระนาบเอียง ($\mathrm{W/m^2}$)

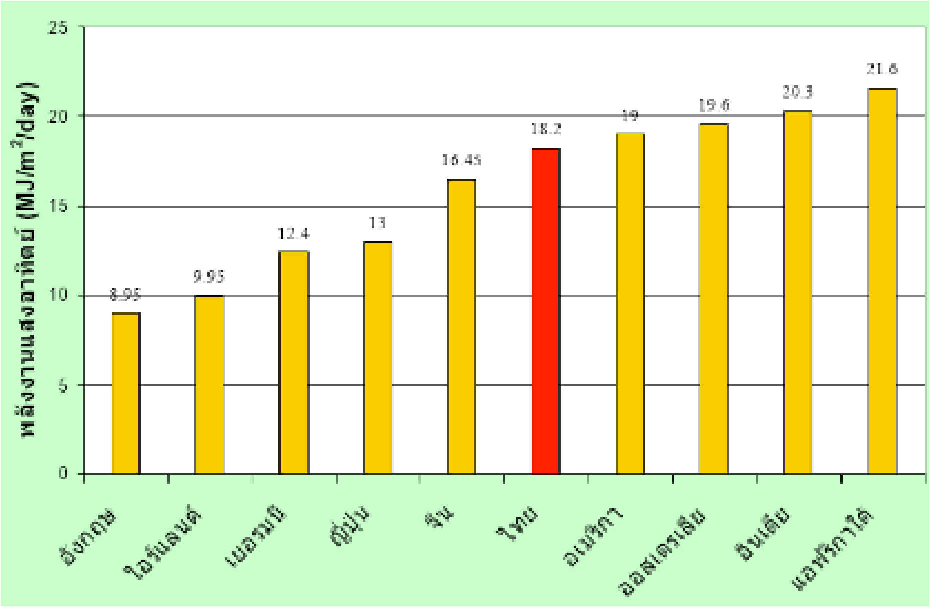
I = รังสีอาทิตย์รวมบนในแนวระดับ ($\mathrm{W/m^2}$)

I_{d} = รังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ ($\mathrm{W/m^2}$)

ρ_g = สภาพการสะท้อนรังสีของพื้น

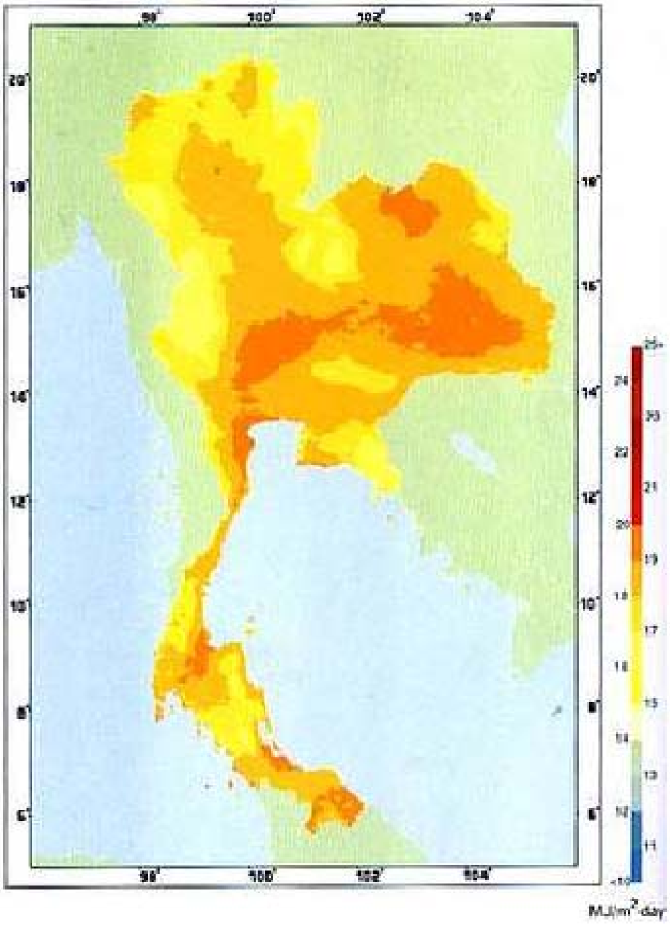
2.1.4 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง จากการคำนวณรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ 18.2 $\mathrm{MJ/m^2day}$ หรือ 5.05 $\mathrm{kWh/m^2/day}$ จัดอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับหลายๆ ประเทศ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 พลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยเมื่อเทียบกับประเทศต่างๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

การกระจายของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ตามบริเวณต่างๆ ในแต่ละเดือนของประเทศไทย ได้รับอิทธิพลสำคัญจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 24 MJ/m^{2}day เมื่อพิจารณาแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปี พบว่า บริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเฉลี่ยทั้งปีอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยครอบคลุมบางส่วนของจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี และอุดรธานี และบางส่วนของภาคกลางที่จังหวัดสุพรรณบุรี ชัยนาท อยุธยา และลพบุรี โดยได้รับรังสีอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี 19 ถึง 20 MJ/m^{2}day พื้นที่ดังกล่าวคิดเป็น 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่า 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปี ในช่วง 18 ถึง 19 MJ/m^{2}day โดยแสดงตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นแผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยของ พ.ศ. 2542 โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานแสงอาทิตย์และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)



รูปที่ 2.4 แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

2.1.5 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์

แนวโน้มการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยจะมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับแนวโน้มการใช้ของโลก คือ จะมีการขยายตัวในการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มาก แต่จะเป็นเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการเป็นหลัก สำหรับในภาคเกษตรก็จะมีการรวมกลุ่มโดยจะมีส่วนปกครองส่วนท้องถิ่น เช่น องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) หรือหัวหน้ากลุ่มในท้องถิ่นเป็นผู้ประสานงานนำเทคโนโลยีที่ต้องการเข้ามาในท้องถิ่น ซึ่งหน่วยงานที่รับผิดชอบเรื่องการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยคือ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) โดยให้มีเอกชนเข้ามามีโอกาสในการผลิตไฟฟ้าแล้วขายไฟฟ้า ต่อให้กับ EGAT และการผลิตไฟฟ้านี้ก็มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนซึ่งมีการผลิตไฟฟ้า จากพลังงานแสงอาทิตย์รวมอยู่ด้วย โดยการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ (ธาดา วรุณโชติกุล และคณะ, 2551)

2.1.5.1 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า

1. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถแปลงแสงอาทิตย์ให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำที่สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ส่วนมากใช้ซิลิคอน (Silicon) เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบ พื้นผิวจะถูกเปลี่ยนเป็นพาหะนำไฟฟ้าและถูกแยกเป็นประจุไฟฟ้าบวกและลบเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ไปต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าและสามารถทำงานได้ โดยการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็น 3 ระบบ โดยแบ่งตามลักษณะการใช้และการนำไฟฟ้ามาใช้ ได้แก่

- ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดติดตั้งอิสระ (Stand-alone solar system) สามารถใช้ผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ห่างไกลหรือในที่ซึ่งไม่มีไฟฟ้าใช้ หรือใช้ในพื้นที่ที่ระบบสายส่งไฟฟ้าหลักไปไม่ถึง
- ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่อเชื่อมระบบสายส่ง (Grid connected solar system) สามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้าที่ผลิตได้และจากระบบสายส่ง หรือขายคืนไฟฟ้าที่เกินความต้องการกลับสู่สายส่งการไฟฟ้าได้
- ระบบประจุแบตเตอรี่พลังงานแสงอาทิตย์ (Battery charging system) มีการเก็บไฟฟ้ากระแสตรงที่ผลิตได้จากแสงอาทิตย์ในเวลากลางวัน เพื่อไปใช้ในเวลากลางคืน โดยการนำไปเพิ่มการประจุของชุดแบตเตอรี่เก็บไฟที่ผลิตได้ไว้ในแบตเตอรี่ หลังจากนั้น จึงนำไฟฟ้าไปใช้งานตามความต้องการ (ธาดา วรุณโชติกุล และคณะ, 2551)

2. ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการรวมแสงอาทิตย์ให้มีความเข้มกว่ารังสีเดิมหลายๆเท่า แล้วทำการสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังส่วนที่รับรังสีอาทิตย์เพื่อส่งความร้อนไปยังตัวรับความร้อนซึ่งบรรจุของเหลวเพื่อดูดซับพลังงานความร้อนไว้เพื่อส่งไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันหรือนำไปกักเก็บไว้เพื่อใช้งานต่อไป โดยการรวมแสงจะใช้ทั้งระบบ Parabolic troughs ซึ่งมีลักษณะเป็นรางยาวโค้งมิติเดียว หรือ แบบ Power Tower โดยมีใช้แผงกระจกขนาดใหญ่จำนวนมากสะท้อนรังสีอาทิตย์ไปยังหอคอยรังความร้อน และแบบสุดท้ายเป็นแบบ Parabolic Dishes ประกอบด้วยตัวรับแสงรูปแบบจานพาราโบลิคที่มีจุดศูนย์รวมแสงตรงกลางสะท้อนไปยังตัวรับความร้อน (อโศก ศรีทองธรรม, 2551)

2.1.5.2 การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน ปัจจุบันมีการใช้งาน 2 ลักษณะคือ

1. พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนสำหรับการอบแห้ง เป็นระบบที่เครื่องอบแห้งทำงานโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ การหมุนเวียนของอากาศอาศัยหลักการขยายตัวของอากาศร้อนภายในเครื่องอบแห้งทำให้เกิดการหมุนเวียนของอากาศเพื่อช่วยถ่านเทอากาศชื้น (Passive) หรือมีเครื่องมือที่ช่วยให้อากาศไหลเวียนตามทิศทางที่ต้องการ (Active) ให้มีการไหลของอากาศผ่านระบบอากาศ ที่ไหลผ่านห้องอบจะมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าความชื้นของวัสดุจึงสามารถพาความชื้นจากเครื่อง

อบแห้งออกสู่ภายนอกทำให้วัสดุที่อบไว้แห้งได้ และยังมีการพัฒนาให้มีการอบแห้งระบบผสมผสาน (Hybrid) คือระบบที่อาศัยพลังงานในรูปอื่นๆ เข้าช่วยเพื่อให้ระยะเวลาในการอบวัสดุเร็วขึ้น (อโศก ศรีทองธรรม, 2551)

2. พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนสำหรับผลิตน้ำร้อน เป็นเทคโนโลยีที่ใช้พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ โดยอาศัยพื้นผิวหรือของเหลวที่สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์และเปลี่ยนเป็นความร้อน จากนั้นกักเก็บไว้และนำความร้อนที่ผลิตได้เพื่อใช้ต่อไป สำหรับการผลิตไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็จะถูกทำให้กลายเป็นไอเพื่อจ่ายให้เครื่องจักรหรือจ่ายความร้อนโดยตรงเพื่อทำให้เครื่องจักรร้อนและทำการผลิตไฟฟ้า เทคโนโลยีนี้จะให้กำลังไฟฟ้าสูงมากแต่ต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง Reflector แล้วยังขึ้นอยู่กับแสงอาทิตย์ที่ส่องตรงยังตัวรับพลังงานด้วยระบบผลิตความร้อนจากแสงอาทิตย์ มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ตัวเก็บรังสีความร้อน (Solar collector) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมพลังงานจากดวงอาทิตย์และแปลงความร้อนที่สามารถนำไปใช้งานอื่นๆ ต่อไป และ ถังเก็บน้ำ (Water storage) (ธาดา วรุณโชติกุล และคณะ, 2551)

ในปัจจุบันประเทศไทยผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ได้ 30 MW แต่ตามแผนพัฒนาทางด้านพลังงานของประเทศ ประเทศไทยมีเป้าหมายจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ 45 MW ภายในปี ค.ศ. 2011 ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 2.5 เมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนด้วยกันแล้วว่า พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจไม่มากนักจากแผนพัฒนาการใช้พลังงานของรัฐบาล (ธาดา วรุณโชติกุล และคณะ, 2551)

ตารางที่ 2.4 เป้าหมายของการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานหมุนเวียนของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2011

Energy Type	Current Renewable Energy Generation (MW)	Target of Renewable Energy Generation (MW)	Amount of Increased Capacity (MW)
Biomass	1,977	2,800	823
Municipal Solid Waste	4	100	96
Biogas	5	30	25
Hydro	44	156	112
Wind	1	115	114
Solar	30	45	15
Total	2,061	3,246	1,185

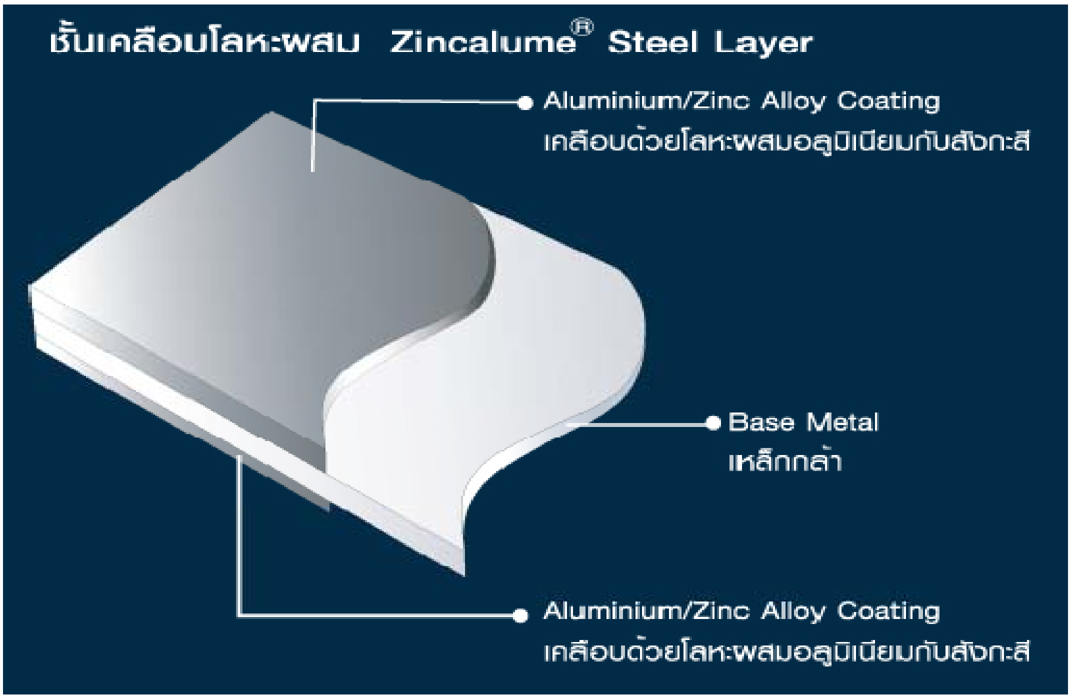
ที่มา : Narupat Amornkosit, 2007

2.2 หลังคาเมทัลชีท

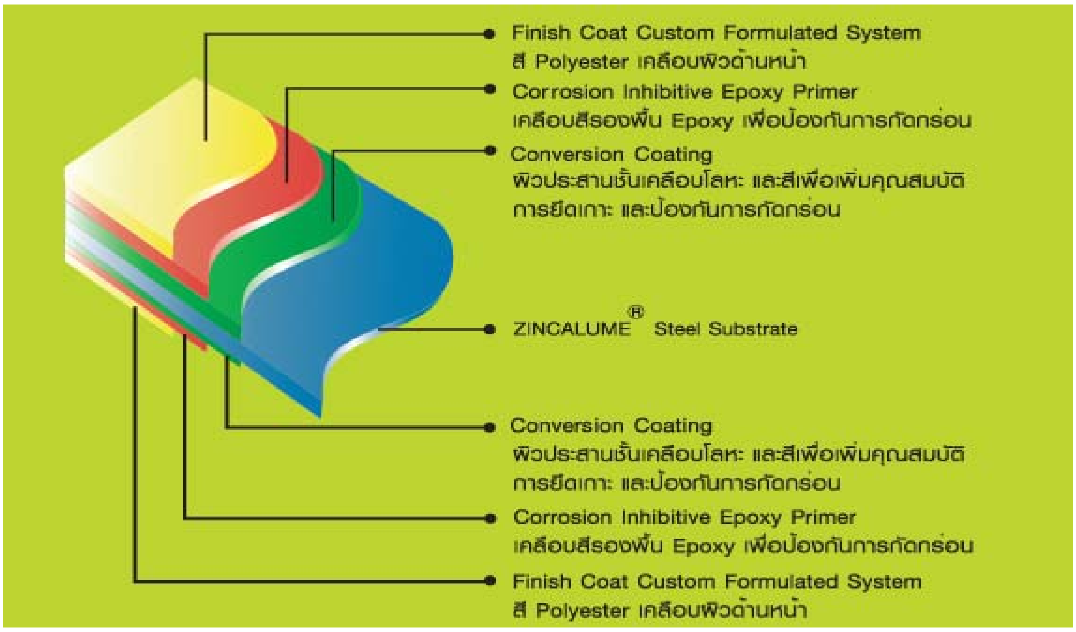
เมทัลชีท (Metal sheet) คือ แผ่นโลหะหรือแผ่นเหล็กโดยทั่วไป ซึ่งในงานหลังคานั้น จะหมายถึง แผ่นเหล็กที่มีลอนที่ใช้ทำหลังคา (Corrugate metal sheet) นั้นก็คือแผ่นหลังคาเหล็กนั่นเอง โดยแผ่นหลังคาเมทัลชีทมีคุณสมบัติเด่นๆเช่น เหนียว แข็งแรง ทนทาน น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนได้ดี ติดตั้งง่าน ดัดโค้งได้ อายุการใช้งานยาวนามมากกว่า 20 ปีและที่สำคัญราคาถูก จึงมีการนำแผ่นหลังคาเมทัลชีทมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันแทนสังกะสีและกระเบื้องหลังคา แผ่นหลังคาเมทัลชีทที่ใช้กันทั่วไปในประเทศไทย มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. แผ่นเหล็กอาบสังกะสีหรือแผ่นเหล็กเคลือบกัลป์วาไนซ์ (Gulvanized) เป็นการนำแผ่นเหล็กมาเคลือบสังกะสีเพียงอย่างเดียว
2. แผ่นเหล็กเคลือบอะลูซิงค์ (Aluzinc, AZ) เป็นการนำแผ่นเหล็กมาเคลือบด้วยอะลูมิเนียม (Al) และสังกะสี (Zn) บนแผ่นหลังคาเมทัลชีททำให้ได้แผ่นหลังคาเหล็กที่ทนทานต่อสภาพอากาศ สามารถป้องกันสนิมและป้องกันการกัดกร่อนได้ดี โดยอลูมิเนียมจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอากาศกับเนื้อเหล็ก ส่วนสังกะสีช่วยป้องการกัดกร่อนบริเวณขอบตัดและรอยขีดข่วนด้วยปฏิกิริยาอิเลคโตรด (Electrolytic reaction) สารประกอบสังกะสีจะสละตัวเอง เพื่อป้องกันการกัดกร่อนที่เนื้อเหล็ก

หลังคาเมทัลชีทถูกผลิตให้มีค่า Minimum Yield Strength สูงถึง 550 MPa ผ่านการชุบร้อนแบบต่อเนื่อง โดยเคลือบผิวเหล็กด้วย Zincalume โดยเป็นสารผสมประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) 55% สังกะสี (Zn) 43.5 % และซิลิกอน (Si) 1.5 % โดยมีบริมาณการเคลือบต่ำสุดคือ 150 g/m^2 ตามมาตรฐานออสเตรเลีย AS – 1397 ชั้นเคลือบเหล็กเคลือบโลหะผสม Zincalume Steel Layer Aluminium/Zinc Alloy Coating เคลือบด้วยโลหะผสมอลูมิเนียมกับสังกะสี แล้วนำไปเคลือบสารรองพื้นชั้นแรก (Conversion coating) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมี เพื่อให้ผิวเคลือบต่อไปติดแน่นขึ้น เพิ่มคุณสมบัติการยึดเกาะ และป้องกันการกัดกร่อน แล้วจึงเคลือบสีรองพื้น (Primer coating) โดยส่วนมากนิยมใช้สีอิพ๊อกซี (Epoxy) และขั้นสุดท้ายจึงเคลือบสีที่มีคุณภาพและความทนทานสูงบนตัวแผ่นตามมาตรฐาน AS - 2728 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ 2.6 ดังนั้นหลังคาเมทัลชีทจึงมีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับหลังคากระเบื้องทั่วไป ตามตารางที่ 2.5 (บริษัท เจริญพรอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, 2555; บริษัทแผ่นหลังคาเมทัลชีท.com, 2555)



รูปที่ 2.5 ชั้นเคลือบโลหะผสมอลูซิงค์ของหลังคาเมทัลชีท (บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด)



รูปที่ 2.6 ชั้นเคลือบเหล็กเคลือบสี Clean Colorband® Steel Layer (บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด)

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบสมบัติของหลังคาเมทัลชีทกับกระเบื้องคอนกรีต

หัวข้อ	แผ่นหลังคาเมทัลชีท	กระเบื้องคอนกรีต
ราคา (เปรียบโดยทั่วไป)	ถ้าพื้นที่มากจะถูกกว่า เมื่อคิดรวมโครงหลังคาแล้ว	แพงกว่า เพราะใช้โครงหลังคาและฐานรากมากกว่า
ความลาดชัน	1 - 5°	ไม่น้อยกว่า 15°
น้ำหนัก	4.2 – 6.2 kg/m^2	49 kg/m^2
ความร้อนและเรื่องอุณหภูมิ	สะท้อนความร้อนได้ดีกว่า ทำให้ภายในอาคารเย็นลงทันทีในตอนค่ำ	สะสมความร้อน ตอนค่ำตัวอาคารเย็นช้ากว่าเมทัลชีท
ความคงทน	มากกว่า 15 ปี	เริ่มแตกร้าวหลังการใช้งาน 5 ปี
การกันฝนและการรั่ว	กันฝนได้ดีเนื่องจากรอยต่อน้อยและสนิทกว่า	มักมีปัญหาเรื่องน้ำรั่ว จากหลายสาเหตุ
ด้านสี	สีสม่ำเสมอ	สีและขนาดไม่สม่ำเสมอ
ส่งผลต่อสุขภาพ	ไม่มี	อาจมีอันตรายจากเชื้อราและสีลอก
เสียงขณะฝนตก	ดังกว่าเล็กน้อย	เบากว่า

ที่มา : บริษัท เจริญพรอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, 2555

2.3 ฉนวนกันความร้อน

ฉนวน (Insulator) คือ วัสดุที่ต้านทานหรือป้องกันมิให้พลังงานความร้อนส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้สะดวก ฉนวนกันความร้อนที่ดีจะเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ซึ่งประกอบไปด้วยฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมาก ฟองอากาศดังกล่าว มีคุณสมบัติในการต้านทานกันความร้อน โดยสกัดกั้นความร้อนให้อยู่ในบริเวณฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมากนี้ จึงเป็นผลให้ไม่เกิดการพาความร้อนด้วย โดยฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าการต้านทานความร้อนที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งฉนวนที่ดีจะต้องต้านทานความร้อนที่ผ่านจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งให้ลดลงเหลือน้อยที่สุด ทั้งนี้ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อน (k) ยิ่งน้อย แสดงว่าเป็นฉนวนที่สามารถต้านทานความร้อนดีกว่า ซึ่งจากตารางเปรียบเทียบค่าความต้านทานค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆจะพบว่า โฟมฉีดมีค่าการนำความร้อนน้อยกว่าโฟมแผ่น ฉนวนใยแก้ว ไม้อัด แผ่นยิปซั่ม และกระเบื้องแผ่นเรียบ (บริษัท บางกอกอินซูเลท จำกัด)

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k; W/m^2)
โฟมฉีด	0.023
โฟมแผ่น	0.031
ฉนวนใยแก้ว	0.035
ไม้อัด	0.123
แผ่นยิปซั่ม	0.191
กระเบื้องแผ่นเรียบ	0.288

ที่มา : บริษัท บางกอกอินซูเลท จำกัด

ฉนวนกันความร้อนที่ใช้อยู่ทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ฉนวนกันความร้อนแบบมีมวล (Mass insulation) หมายถึง วัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่านเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยความเป็นฉนวนของวัสดุที่มีคุณสมบัติในการต้านทานความร้อนที่สูงของตัววัสดุเอง วัสดุส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นใย มีโพรง หรือช่องกลาง เช่น ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass) ฉนวนใยหิน (Rock fiber) ฉนวนใยเซลลูโลส (Cellulose fiber) โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene foam/PS) โฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam/PU) และโฟมพอลิเอทิลีน (Polyethelene foam/PE)

2. ฉนวนแบบสะท้อนความร้อน (Reflective sheet) หมายถึง วัสดุที่ใช้ป้องกันความร้อนที่ถ่ายเทผ่านวัสดุ โดยอาศัยสมบัติการสะท้อนรังสีความร้อนของวัสดุเพื่อที่จะลดค่าพลังงานความร้อนไม่ให้ถูกดูดซับและทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุ ส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางหรือมีผิวที่มีการสะท้อนสูง เช่น แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) เซรามิคโค้ทติ้ง (Ceramic coating) (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554) โดยฉนวนที่มีการนำมาใช้งานกับหลังคาเมทัลชีท มีหลักๆดังต่อไปนี้

2.3.1. ฉนวนเยื่อกระดาษ

ฉนวนเยื่อกระดาษเป็นฉนวนประเภทเซลลูโลส เป็นฉนวนที่ผลิตจากเยื่อไม้กระดาษ ดังนั้นจึงต้องใส่สารป้องกันการลามไฟ ส่วนใหญ่มักเป็นชนิดพ่นใต้ช่องว่างหรือฝ้าเพดาน มีสมบัติในการกันความร้อนดีพอๆกับฉนวนใยแก้ว แต่การติดตั้งค่อนข้างยุ่งยาก เพราะต้องพ่นเข้าไปในหลังคาให้มีความหนามากกว่า 2 นิ้ว และมีวัสดุหุ้มปิดป้องกันเศษกระดาษร่วงหล่นจากอายุการใช้งาน (บริษัท เทคโนโลยีมีเดีย จำกัด, 2553)

รูปที่ 2.7 ฉนวนเยื่อกระดาษ (บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

2.3.2. ฉนวนใยแก้ว

ฉนวนใยแก้ว (Fiber glass) เป็นฉนวนผลิตจากการหลอมแก้วแล้วปั่นออกมาเป็นเส้นใบสีขาว จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนเซลล์ปิด ใยแก้วมีความหนาแน่น 10 kg/m^3 ไปถึงมากกว่า 64 kg/m^3 โดยทั่วไปจะใช้ที่ความหนาแน่น 16 kg/m^3 อาจผลิตในรูปแผ่นแข็ง แบบม้วน หรือขึ้นเป็นรูปทรงต่างๆ กัน ตัวเส้นใยจะถูกเคลือบไว้ด้วยตัวประสาน (Binder) ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเส้นใยโดยมากจะเป็นฟีนอลฟอร์มัลดีไฮน์ ซึงจะติดไฟได้ ฉนวนใยแก้วมีข้อดีคือ มีค่าความต้านทานความร้อนสูง หาซื้อได้ง่าย ติดตั้งง่ายแต่ความต้านทานร้อนของใยแก้วจะลดลงเมื่อได้รับความชื้นจึงต้องมีวัสดุห่อหุ้ม เช่น อลูมิเนียมฟอยล์ หรือ ฟิล์มพลาสติก ซึ่งต้องพิจารณาเรื่องการติดไฟของวัสดุที่นำมาห่อหุ้มด้วย การติดตั้งฉนวนใยแก้ว ส่วนมากจะวางบนฝ้าเพดาน (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)

รูปที่ 2.8 ฉนวนใยแก้ว (บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

2.3.3. ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน

ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน (Polyethelene foam, PE foam) เป็นฉนวนแบบแผ่น มีฟองละเอียดของก๊าซอยู่ด้านใน จัดอยู่ในกลุ่มของฉนวนแบบเซลล์ปิด มีค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 33 – 45 kg/m^3 มีลักษณะอ่อนนุ่มจึงไม่ควรใช้กับงานที่มีการกดทับ ไม่ค่อยดูดซึมน้ำ แต่มีการเสื่อมสภาพจากรังสี UV

จึงควรมีวัสดุปิดผิว ข้อดีของฉนวนนี้คือ ค่าการนำความร้อนต่ำ เบา ติดตั้งง่าย อาจใช้ติดวัสดุมุงหลังคาด้านใน หรือวางบนฝ้าเพดานก็ได้ (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)

รูปที่ 2.9 ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน ((บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

2.3.4. ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน

ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane foam, PU foam) เป็นพลาสติกพอลิเมอร์ประเภทหนึ่ง พ่นให้เกิดเป็นโฟมมีลักษณะแข็ง จัดอยู่ในกลุ่มฉนวนแบบกึ่งเซลล์ปิด เซลล์ภายในจะบรรจุด้วยก๊าซฟลูออโรคาร์บอน ซึ่งเป็นก๊าซที่มีค่าการนำความร้อน ต่ำกว่าอากาศ ทำให้ฉนวนประเภทนี้มีสภาพการนำความร้อนต่ำ อย่างไรก็ตาม การนำความร้อนของฉนวนประเภทนี้เพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานเนื่องมาจากการแพร่กระจายของอากาศเข้าไปในเซลล์ โดยเฉพาะกรณีที่สัมผัสกับรังสี UV จะทำให้สีของฉนวนเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเสื่อมสภาพลง โดยเฉพาะโฟมที่ไม่ได้ปิดผิว การดูดซับน้ำจะมีบ้างเนื่องจากไม่ใช่เซลล์ปิดทั้งหมด และในกรณีเกิดเพลิงไหม้แม้ว่าจะมี การผสมสารป้องกันการติดไฟแล้ว แต่ก็ยังก่อให้เกิดก๊าซซึ่งเป็นอันตราย เนื้อฉนวนมีการขยายตัวและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หากใช้โครงสร้างปิด เช่น วัสดุปิดผิวที่แข็งแรงพอ ก็จะเป็นฉนวนที่ดีมาก (ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2554)

รูปที่ 2.10 ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน (บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน))

ตารางที่ 2.7 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉนวนเยื่อกระดาษ ฉนวนใยแก้ว ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน และ ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน

คุณสมบัติ	ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน	ฉนวนโฟมพอลิเอทิลีน	ฉนวนใยแก้ว	ฉนวนเยื่อกระดาษ
โครงสร้างเซลล์	เซลล์กึ่งปิด-เปิด	เซลล์ปิด	เซลล์เปิด	เซลล์เปิด
ความหนาแน่น	15-40 kg/m^3	33-45 kg/m^3	16-32 kg/m^3	38-40
ค่าการนำความร้อน	0.020-0.025 $W/n \cdot k$	0.030-0.037 $W/n \cdot k$	0.035-0.038 $W/n \cdot k$	0.039-0.045 $W/n \cdot k$
อุณหภูมิใช้งาน	-118 – 100 $^{\circ}C$	-80 – 80 $^{\circ}C$	-20 – 200 $^{\circ}C$	-75– 250 $^{\circ}C$
ความต้านทานต่อสารเคมี	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง	ทนกรด-ด่าง
การกลั่นตัวของไอน้ำรอบวัสดุที่หุ้ม	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ	ไม่เกิดไอน้ำ
การติดไฟ	ติดไฟแต่สามารถดับเองได้	ไม่ติดไฟ	ตัวประสานไฟติดดี	ติดไฟ
การป้องกันเสียง	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงได้ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี	ดูดซับเสียงดีมาก สะท้อนเสียงไม่ดี
การขนส่งและเก็บรักษา	เป็นชิ้นเดียวกับวัสดุที่ฉีด ง่ายต่อการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติด สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติด สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง	แยกกับวัสดุที่จะติด สิ้นเปลืองเนื้อที่ในการขนส่ง
การประกอบและติดตั้ง	ติดตั้งเสร็จในขั้นตอนเดียว	ติดตั้งสองขั้นตอน	ติดตั้งสองขั้นตอน	ติดตั้งสองขั้นตอน
ความแข็งแรง	เนื้อโฟมแข็ง สามารถรับแรงกดได้ 2,000 kg/m^2	อ่อนนุ่ม ต้องหลีกเลี่ยงในงานที่มีลักษณะกดทับ	อ่อนนุ่ม ยุบตัวง่าย	อ่อนนุ่ม ยุบตัวง่าย
ความสามารถในการป้องกันสนิม	สามารถป้องกันสนิมได้ดี	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้	ไม่สามารถป้องกันสนิมได้
ความสามารถในการป้องกันการซึม	มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม	ไม่มีคุณสมบัติการป้องกันการรั่วซึม

ที่มา : บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน)

2.4 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ (Flat plate solar collector) เป็นรูปแบบหนึ่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน โดยเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะถ่ายเทความร้อนจากของแข็งไปยังของไหล ซึ่งตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อมประมาณ 100 °C ทำหน้าที่รับรังสีรวม (Total radiation) ที่ตกกระทบ โดยไม่จำเป็นต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ นอกจากนี้แล้วตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก การนำไปใช้งานส่วนใหญ่จะถูกใช้ในการผลิตน้ำร้อน ทำความร้อนภายในอาคาร ระบบปรับอากาศ และกระบวนการที่ใช้ความร้อนในอุตสาหกรรม เป็นต้น (กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544; ธีระ นนทะภา, 2550; จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

2.4.1 ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

2.4.1.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

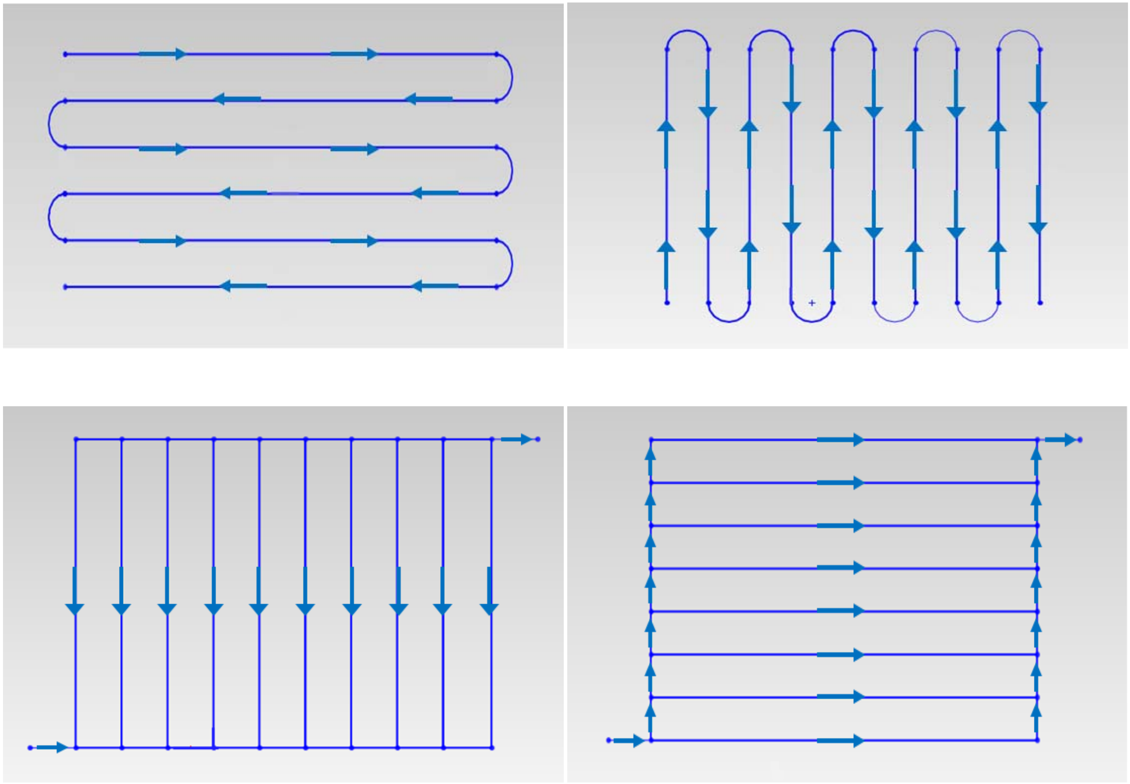
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดนเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับของไหลภายในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

1. แผ่นปิดใส (Transparent cover) จะวางไว้เหนือแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ซึ่งทำหน้าที่ช่วยลดการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศโดยการพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสี (Radiation) และทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปในแผงรับแสงอาทิตย์ด้วย โดยประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังขึ้นกับจำนวนชั้นของแผ่นปิดใสด้วย จึงต้องดูตามความเหมาะสมและควบคู่ไปกับความสามารถในการดูดกลืนความร้อนของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ ตัวอย่างวัสดุที่ใช่ เช่น กระจก (Glass) แผ่นพลาสติกใส (Plastic film) (กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544; ธีระ นนทะภา, 2550)
2. แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (Absorber plate) ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอาทิตย์แล้วถ่ายเทความร้อนที่สะสมในแผ่นดูดกลืนไปยังของไหลที่อยู่ภายในท่อ มีลักษณะเป็นแผ่นราบ (Flat) ลอนลูกฟูก (Collugated) ท่อ (Tube) แผ่นครีบ (Fin) เป็นต้น โดยทั่วไปจะฉาบไว้ด้วยสีดำ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ วัสดุที่ใช้ส่วนใหญ่จะต้องมีค่าสภาพการดูดกลืนรังสีที่สูง และถ่ายเทความร้อนได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของของเหลวและที่อุณหภูมิสูงได้ ซึ่งอาจจะเป็นทองแดง (Copper) อะลูมิเนียม (Aluminium) และเหล็กกล้า (Steel) (กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544; ธีระ นนทะภา, 2550)

3. ฉนวน (Insulation) จะอยู่ทางด้านข้างและด้านล่าง ทำหน้าที่ลดการสูญเสียความร้อนอันเนื่องจากการนำความร้อน (Conduction) โดยทั่วไปจะใช้เซรามิกส์ (Ceramic fiber) ใยแก้ว (Fiber glass) และโฟมพลาสติก (Plastic foam) (ธีระ นนทะภา, 2550)

4. กรอบโลหะรีดขึ้นรูป (Metal frame box) ทำหน้าที่เป็นที่เก็บรวบรวมของส่วนประกอบต่างๆ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ช่วยป้องกันฝุ่นละออง และความชื้นของอากาศ (ธีระ นนทะภา, 2550)

5. ท่อภายในแผง (Tube) ท่อภายในแผงส่วนใหญ่จะใช้เป็นท่อทองแดง ท่อเหล็กอาบสังกะสี ท่อเหล็กไร้สนิม วัสดุที่เป็นสื่อไฟฟ้าที่ดีมักเป็นตัวนำความร้อนทีดี เช่น เงิน ทองแดง ซึ่งทองแดงเป็นวัสดุที่นำความร้อนได้ดีกว่าอลูมิเนียม 2 เท่า ดีกว่าเหล็ก 10 เท่า ดีกว่าเหล็กไร้สนิม 10 เท่า และนอกจากนี้ยังมีความคงทนต่อแรงกดดัน ทนต่อการกัดกร่อนของสนิม และการเกิดหินปูนได้ดีมาก ท่อที่ใช้มักจะใช้เป็นท่อผนังบางๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/8 ″ - 1/2 ″ วางห่างกัน 3 - 6 ″ บนแผ่นดูดแสงอาทิตย์ ลักษณะการหมุนเวียนของน้ำภายในท่อบนแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีหลากลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11 (นฤมล สมพลเดช, 2535; กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544,)



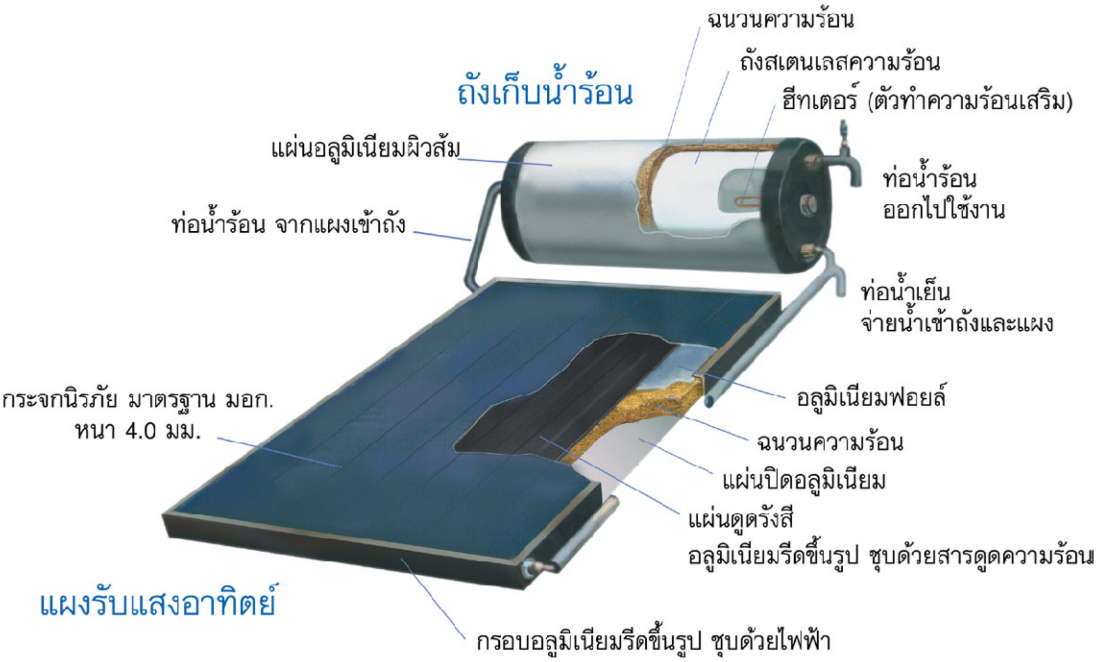
รูปที่ 2.11 ลักษณะการหมุนเวียนน้ำภายในแผงท่อบนแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์
(นฤมล สมพลเดช, 2535)

2.4.1.2 ท่อน้ำของระบบ

ท่อน้ำของระบบ (Piping) มีหน้าที่เป็นทางเดินของน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไปยังถังเก็บน้ำร้อน แล้วนำน้ำที่อุณหภูมิต่ำจากพังเก็บน้ำร้อนกลับเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นทางเดินของน้ำที่จะนำไปใช้งานและนำน้ำเย็นเข้าสู่ถังอีกด้วย (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

2.4.1.3 ถังเก็บน้ำร้อน

ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) มีความสำคัญมากต่อระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพราะเป็นตัวเก็บน้ำร้อนเพื่อนำไปใช้งานให้ได้ตามความต้องการ เก็บน้ำร้อนไว้ใช้ยามที่ไม่มีแสงแดดและช่วยให้แผงรับแสงอาทิตย์ทำงานได้อย่างเต็มที่ ไม่ร้อนจัดจนเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานต่ำลง มักจะเป็นถังแบบปิดทำด้วยสแตนเลสอย่างดีที่ไม่เป็นสนิม มีฉนวนหุ้มป้องกันการสูญเสียความร้อนหรือให้มีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ถังเก็บน้ำร้อนนี้จะถูกออกแบบภายในให้สามารถเก็บและจ่ายน้ำร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยน้ำร้อนจะอยู่ด้านบนของน้ำเย็นตามหลักของเทอร์โมไซฟอน ดังนั้นท่อน้ำร้อนเข้าถังจะต้องอยู่ส่วนบนของถังและท่อน้ำเย็นออกจากถังจะอยู่ส่วนล่างของถัง ทุกชิ้นส่วนจะถูกประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งเมื่อนำอุปกรณ์และส่วนประกอบต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกันเป็นดังรูปที่ 2.12 (เกษม โพธิ์งาม, 2545; กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544)



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน, 2551)

2.4.2 การคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2.4.2.1. สมดุลพลังงานบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ในสภาวะคงที่ สมรรถนะของตัวเก็บรังสีสามารถอธิบายโดยสมดุลพลังงานซึ่งชี้ให้เห็นถึงการกระจายของพลังงานแสงอาทิตย์ไปอยู่ในรูปของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ การสูญเสียทางความร้อน และการสูญเสียเชิงแสง รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสีต่อหน่วยพื้นที่ของแผ่นดูดกลืน S จะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบและการสูญเสียเชิงแสง พลังงานความร้อนสูญเสียจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้แก่สิ่งแวดล้อมโดยการนำ การพา และการแผ่รังสีในช่วงคลื่นอินฟราเรด สามารถเขียนอยู่ในรูปผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน $\mathrm{U_L}$ กับค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืน $\mathrm{T_{pm}}$ กับอุณหภูมิแวดล้อม T_a ในสภาวะคงที่ พลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ของตัวเก็บรังสีที่มีพื้นที่ $\mathrm{A_c}$ คือผลต่างระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนกับความร้อนที่สูญเสีย (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$Q_u = A_c\left[S - U_L\left(T_{pm} - T_a\right)\right] \tag{2.26}$$

เมื่อ

Q_u คือ พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (W)

A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี ($\mathrm{m^2}$)

S คือ รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน ($\mathrm{W/m^2}$)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($\mathrm{W/m^2\,^\circ C}$)

T_{pm} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืน (°C)

T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม (°C)

ในส่วนสมรรถนะของตัวเก็บรังสี (Collector performance) จะหาได้จากประสิทธิภาพการเก็บรังสี (Collector efficiency) ซึ่งกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ในช่วงเวลาที่พิจารณาต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีในช่วงเวลานั้นๆ

$$\eta = \frac{\int Q_u\,dt}{A_c\int G_T\,dt} \tag{2.27}$$

เมื่อ

η คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

G_T คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลานั้น ($\mathrm{W/m^2}$)

2.4.2.2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

พิจารณาวงจรความร้อนสำหรับระบบที่มีแผ่นปิดใส 2 ชั้น ดังรูปที่ 2.13 โดยจะทำการแปลงวงจรความร้อนในรูปที่ 2.13 ให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.14 (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541) กำหนดให้

T_p คือ อุณหภูมิของแผ่นดูดกลืนรังสี

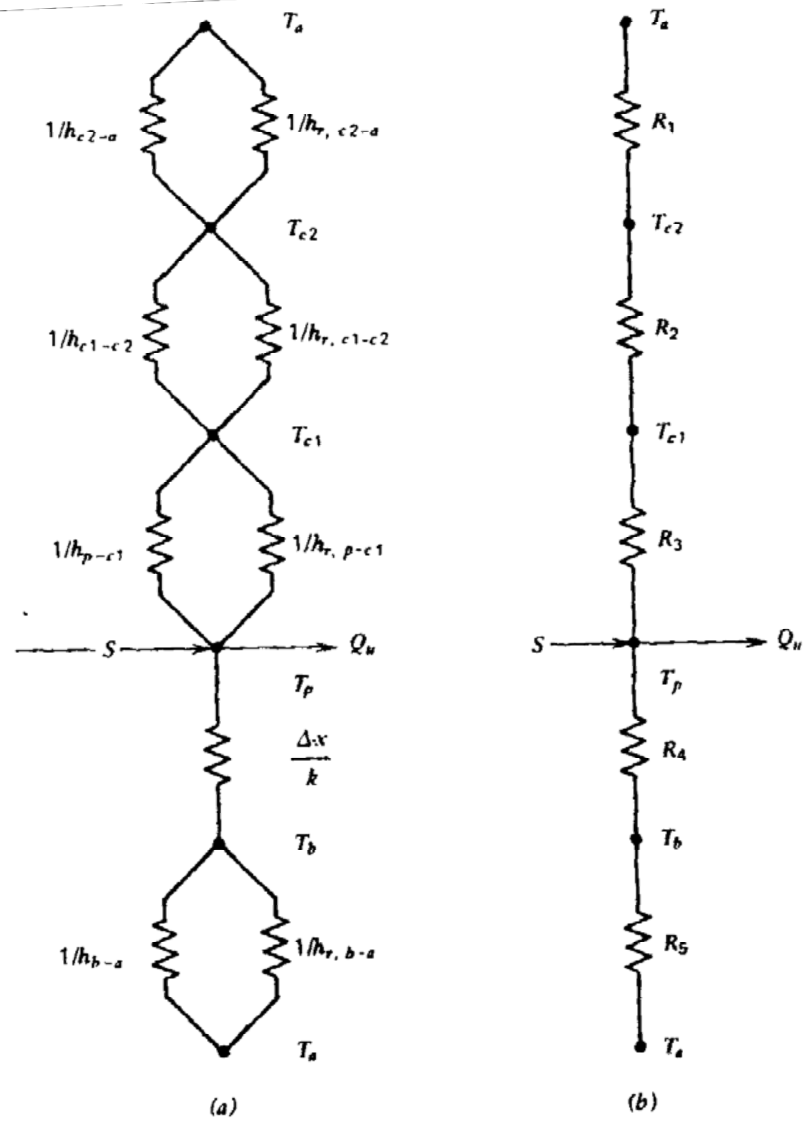
S คือ พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยแผ่นดูดกลืนรังสี

T_{c1} คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 1

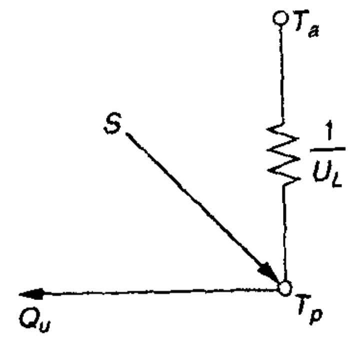
T_{c2} คือ อุณหภูมิของแผ่นปิดใสชั้นที่ 2

T_b คือ อุณหภูมิของฉนวน

T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.13 วงจรความร้อนของตัวเก็บรังสีที่มีแผ่นปิดใส 2 ชั้น (Duffie and Beckman, 1991)



รูปที่ 2.14 วงจรความร้อนสมมูลย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ (Duffie and Beckman, 1991)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบน (U_t) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการพาและการแผ่รังสีระหว่างแผ่นปิดใสทั้งสอง โดย

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c2-a}} \tag{2.28}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,c1-c2} + h_{r,c1-c2}} \tag{2.29}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{c,p-c1} + h_{r,p-c1}} \tag{2.30}$$

ดังนั้นจะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนได้จากสมการ

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \tag{2.31}$$

แต่จากสมการด้านบนนั้นมีความยุ่งยากในการหาค่าดังกล่าว ดังนั้นอาจใช้สมการที่ 2.31 หาค่าหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านบนแทนได้ ซึ่งง่ายและเหมาะกับการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์มากกว่า Duffie&Beckman (1991) ได้เสนอรายละเอียดของสมการเอ็มไพริคัล (Empirical) ซึ่งพัฒนาโดย Klein ในปี ค.ศ. 1979 ดังต่อไปนี้

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}}\left[\frac{(T_{pm}-T_a)}{(N+f)}\right]^{e}} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm}+T_a)(T_{pm}^{2}+T_a^{2})}{(\varepsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N+f-1+0.133\varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \tag{2.32}$$

โดย

$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$

$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$

$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$

เมื่อ

N คือ จำนวนกระจก

β คือ มุมเอียง

ε_g คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นกระจก

ε_p คือ ค่าการแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนรังสี

h_w สัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยลม ($W/m^2\,°C$)

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านหลัง (U_b) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการนำความร้อนผ่านทางฉนวนทางด้านหลังของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หาได้จากสมการ

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \tag{2.33}$$

เมื่อ

k คือ ค่าการนำความร้อน

L คือ ความหนาของฉนวน

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านข้าง (U_b) พลังงานที่สูญเสียเป็นผลมาจากการนำความร้อนผ่านทางฉนวนทางด้านข้างของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หาได้จากสมการ

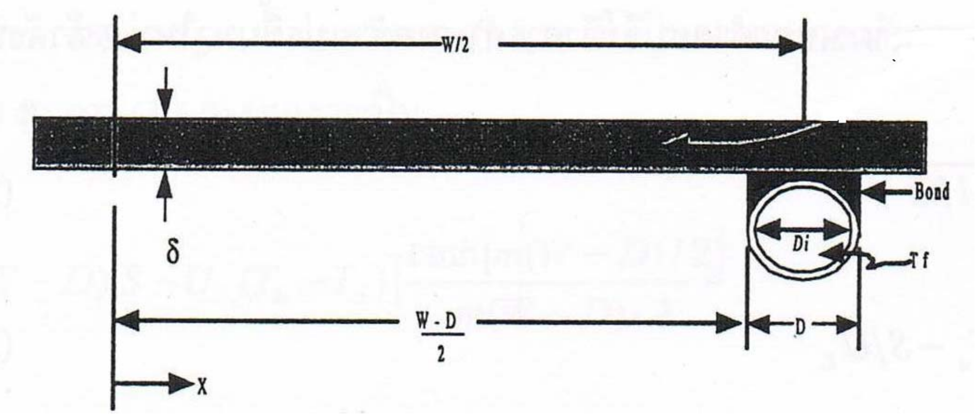
$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \tag{2.34}$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (U_L) เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การสูญเสียด้านบน ด้านหลัง และด้านข้าง

$$U_L = U_t + U_b + U_e \tag{2.35}$$

2.4.2.3 การกระจายอุณหภูมิระหว่างท่อและประสิทธิภาพมาตรฐานของครีบ

การกระจายของอุณหภูมิระหว่างท่อของไหลสองท่อที่สภาวะหนึ่งๆ สามารถหาค่าได้โดยสมมติว่าไม่มีผลของเกรเดียนต์อุณหภูมิในทิศทางการไหล โดยมีตัวแปรที่ต้องพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แผ่นรับรังสีอาทิตย์และท่อ (Duffie and Beckman, 1991)

โดยหาพลังงานที่นำเข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (q'_{fin}) จากสมการ

$$q'_{fin} = (W - D)F\left[S - U_L(T_b - T_a)\right] \tag{2.36}$$

เมื่อประสิทธิภาพมาตรฐานของครีบ (F) หาได้จากสมการ

$$F = \frac{\tanh\left[m(W - D)/2\right]}{m(W - D)/2} \tag{2.37}$$

โดย

$$m = \sqrt{U_L / k\delta} \tag{2.38}$$

เมื่อ

W คือ ระยะห่างระหว่างท่อ (mm)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (mm)

δ_p คือ ความหนาแผ่นดูดกลืนมี (mm)

T_b คือ อุณหภูมิ ณ แผ่นดูดกลืน (°C)

และยังสามารถหาพลังงานที่ใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะรวมถึงพลังงานที่สะสมเหนือบริเวณท่อ (q'_{tube})

$$q'_{tube} = D\left[S - U_L\left(T_b - T_a\right)\right] \tag{2.39}$$

และพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ได้จากท่อนำของไหลต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล สามารถหาได้จากสมการ

$$q'_u = \left[\left(W - D\right)F + D\right]\left[S - U_L\left(T_b - T_a\right)\right] \tag{2.40}$$

2.4.2.4 แฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

แฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector efficiency factor, F') แสดงถึงอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานที่ได้รับ เมื่อผิวของแผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของของไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งของตัวเก็บรังสี โดยเป็นค่าคงที่เมื่อออกแบบตัวรับรังสีแบบต่างๆ และอัตราการไหลของของไหล อัตราส่วนของ U_L ต่อ C_b อัตราส่วนของ U_L ต่อ h_{fi} และประสิทธิภาพของครีบ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการหาค่าแฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยหาได้จาก (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\dfrac{1}{U_L\left[D + \left(W - D\right)F\right]} + \dfrac{1}{C_b} + \dfrac{1}{\pi D_i h_{fi}}\right]} \tag{2.41}$$

เมื่อ

F' คือ แฟคเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม

W คือ ระยะห่างระหว่างท่อ (mm)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

C_b คือ ความต้านทานรอยต่อ

h_{fi} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในท่อ ($W/m^2\,°C$)

2.4.2.5 แฟคเตอร์การดึงความร้อนและแฟคเตอร์การไหล

แฟคเตอร์การดึงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Collector heat removal factor, F_R) คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้จริงต่อพลังงานใช้ประโยชน์เมื่อแผ่นดูดกลืนรังสีมีอุณหภูมิเท่ากับของไหลที่เข้าสู่ท่อ หาได้จาก (จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541)

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p \left(T_{fo} - T_{fi}\right)}{A_c \left[S - U_L \left(T_{fi} - T_a\right)\right]} \tag{2.42}$$

แฟคเตอร์การไหลของตัวเก็บรังสี (Collector Flow Factor, F'')

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p}\right)\right] \tag{2.43}$$

เมื่อ

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลแต่ละตัวของตัวเก็บรังสี (kg/s)

C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg°C)

A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสี (m^2)

S คือ รังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืน (W/m^2)

U_L คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ($W/m^2\,°C$)

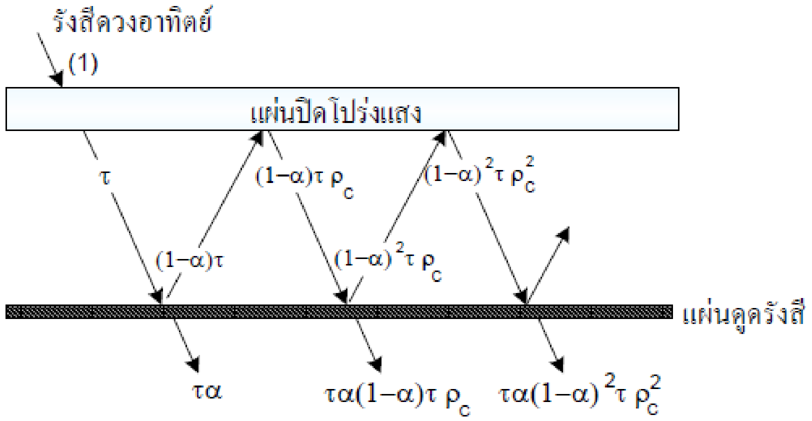
T_{f0} คือ อุณหภูมิของไหลขาออก (°C)

T_{fi} คือ อุณหภูมิของไหลขาเข้า (°C)

T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

2.4.2.6 ผลของการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นปิดโปร่งแสง ค่ารังสีอาทิตย์บางส่วนจะทะลุผ่านแผ่นปิดโปร่งแสง ซึ่งมีค่าดูดกลืนรังสี (α) และเมื่อตกกระทบผิววัตถุด้านล่าง บางส่วนจะถูกดูดกลืน ($\tau\alpha$) และบางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่แผ่นปิดโปร่งแสงอีก (1- α)τ ซึ่งจะมีการสะท้อนกลับไปมา ดังรูปที่ 2.16 (เกษม โพธิ์งาม, 2545)



รูปที่ 2.16 ระบบการส่องผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดโปร่งแสง (เกษม โพธิ์งาม, 2545)

ดังนั้น ผลคูณระหว่างค่าการส่องผ่านและค่าการดูดกลืนรังสี คิดเป็น

$$\tau\alpha = \tau\alpha\sum_{n=0}^{\infty}\left(\left(1-\alpha\right)\rho_c\right)^n$$

$$= \frac{\tau\alpha}{1-\left(1-\alpha\right)\rho_c} \cong 1.01\tau\alpha \qquad (2.44)$$

เมื่อ

τ คือ ค่าการส่องผ่านรังสี

α คือ ค่าการดูดกลืนรังสี

ρ_c คือ ค่าการสะท้อนรังสี

เนื่องจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแผ่นปิดโปร่งแสง จะทำให้อุณหภูมิของแผ่นปิดโปร่งแสงสูงขึ้น ทำให้การสูญเสียความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ลดลง ดังนั้นผลคูณของค่าส่องผ่านและค่าดูดกลืนรังสีอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกค่านี้ว่า ผลคูณประสิทธิภาพของค่าส่องผ่านและค่าดูดกลืนรังสี (Effective transmittance – absorption Product; $(\tau\alpha)_c$) ซึ่งค่า $(\tau\alpha)_c$ นี้จะสูงกว่า $(\tau\alpha)$ ประมาณ 1 – 2 % สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ทั่วไปที่มีแผ่นปิดโปร่งแสง 1 ชั้น และ 2 % สำหรับตัวรับรังสีอาทิตย์ที่มีแผ่นปิดโปร่งแสง 2 ชั้น

ค่าประสิทธิภาพของการส่องผ่านและการดูดกลืนในกรณีแผ่นปิดโปร่งแสงเป็นกระจก สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้กระจกแบบธรรมดาจะมีค่าประมาณ (Duffie and Beckman, 1991)

$$(\tau\alpha)_c \approx 1.02(\tau\alpha) \tag{2.45}$$

สำหรับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้กระจกแบบธรรมดาจะมีค่าประมาณ

$$(\tau\alpha)_c \approx 1.01(\tau\alpha) \tag{2.46}$$

2.4.3 ประโยชน์และระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน

สำหรับประโยชน์ของน้ำร้อนที่นำมาใช้สามารถแบ่งออกได้เป็นดังนี้

1. การใช้น้ำอุ่น อุณหภูมิของน้ำอุ่นจะถูกผสมระหว่างน้ำร้อนกับน้ำเย็นหรือน้ำอุ่นที่ไหลออกมาจากเครื่องทำนำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิของน้ำจะอยู่ในช่วง 32 $^{\circ}$C – 48 $^{\circ}$C ซึ่งสามารถใช้อาบล้างหน้า และข้อดีสำหรับการอาบน้ำหรือการแช่น้ำอุ่นนานๆจะทำให้รูขุมขนขยายตัวมากขึ้น ทำให้การขับถ่ายของเสียออกจากร่างกายได้ดีและผ่อนคลายความตึงเครียดของกล้ามเนื้อ เส้นประสาททำให้ไม่เมื่อยหรืออ่อนเพลียง่าย การไหลเวียนของเลือดในร่างกายดีขึ้น นอนหลับสบาย จะเห็นได้ว่าการอาบน้ำอุ่นมีผลดีต่อสุขภาพ สำหรับประเทศไทยในเขตร้อน หรือแม้แต่ในเมืองหนาวก็ตาม

2. การใช้น้ำร้อน ถูกนำมาใช้กับระบบทำความร้อนภายในอาคาร เฉพาะในเขตที่มีอากาศหนาว อุณหภูมิสูงสุดประมาณ 80 $^{\circ}$C ขึ้นไป ประโยชน์ที่ได้เช่น ซักผ้า ล้างจาน ฆ่าเชื้อโรค หรือแม้แต่การประกอบอาหารและกิจกรรมอื่นตามความต้องการ โดยระดับของอุณหภูมิในการใช้งานของน้ำร้อนเพื่อเหมาะสมแสดงในตารางต่อไปนี้ (ปรีดา จันทวงษ์, 2542)

ตารางที่ 2.8 ระดับอุณหภูมิการใช้งานน้ำร้อน

ประเภทของการใช้	อุณหภูมิของน้ำร้อน ($^{\circ}$C)
ฝักบัวใช้อาบ	32-40
อ่างน้ำใช้อาบ	40-48
ห้องครัว	60
ล้างจาน	60-77
ซักผ้า	82

ที่มา : ปรีดา จันทวงษ์, 2542

2.5 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

จุดประสงค์ส่วนใหญ่ของผู้ที่เลือกใช้ระบบผลิตน้ำร้อนคือ การได้ใช้ระบบที่เชื่อถือได้ในราคาที่ประหยัด ในกรณีที่มีการได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างเด่นชัดเช่นราคาระบบที่ถูกกว่า และมีอายุการใช้งานที่นานกว่าด้วยมูลค่าซากที่สูงกว่า ในกรณีดังกล่าวไม่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติมเพราะเห็นได้ชัดว่าต้องเลือกระบบดังกล่าวแน่ๆ แต่โดยทั่วไปมักไม่มีระบบใดที่มีความได้เปรียบในเชิงเศรษฐศาสตร์อย่างเด่นชัด ระบบหนึ่งอาจมีราคาถูกกว่าแต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในระบบสูงกว่า หรือมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่า ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ มีตัวแปรหลายตัวในการตัดสินใจ เช่น ต้นทุนการผลิต ประสิทธิภาพของระบบ อายุการใช้งาน สภาพอากาศของแต่ละท้องถิ่น ราคาพลังงานในท้องถิ่น ค่าบำรุงรักษา ระบบปฏิบัติงาน ซึ่งต้องใช้ในการตัดสินใจ ดังนั้นรายละเอียดของการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จึงขึ้นอยู่กับขอบเขตการศึกษา ซึ่งในเชิงเศรษฐศาสตร์มักจะเปรียบเทียบความได้เปรียบในลักษณะดังต่อไปนี้ (นฤมล สมพลเดช, 2535)

1. มูลค่าปัจจุบัน (Present worth)
2. มูลค่าเทียบเท่ารายปี (Annual equivalent)
3. อัตราผลตอบแทน (Rate of return)
4. ระยะเวลาคืนทุน (Payback period)

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์จะใช้วิธีการดังต่อไปนี้

2.5.1 ต้นทุนเริ่มแรก

ต้นทุนเริ่มแรก (Initial cost, C_i) หาได้จาก

$$C_i = C_c A + C_t bA + C_w A \tag{2.47}$$

เมื่อ

C_c คือ ค่าใช้จ่ายของแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ต่อพื้นที่ (฿)

A คือ พื้นที่แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (m^2)

C_t คือ ค่าใช้จ่ายของถังสะสมความร้อนต่อปริมาตร (฿)

b คือ ปริมาตรของถังสะสมความร้อนต่อพื้นที่แผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ (L)

C_w คือ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าติดตั้ง (฿)

2.5.2 ค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน

ค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน (Operating cost) คือ ค่าใช้จ่ายที่จ่ายในช่วงเวลา n ปีที่มีการใช้งาน โดยมูลค่าเทียบเท่ารายปีของค่าใช้จ่ายระหว่างอายุการใช้งาน (The annual operating cost) ของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ต้นทุนการลงทุนทั้งหมด

การคำนวณหาต้นทุนรายปี สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$
\begin{aligned}
C_n &= \left(C_c A + C_t bA + C_w A\right) CRF + M \\
&= \left(C_i \times CRF\right) + M - S'(SFF)
\end{aligned}
\quad (2.48)
$$

โดย

CRF คือ ค่าการชดเชยต้นทุนในการลงทุน (Capital recovery factor) หาได้จาก

$$
CRF = \frac{i(1+i)^n}{((1+i)^n - 1)} \quad (2.49)
$$

SFF คือ ตัวประกอบทุนจม (Sink fund factor) หาได้จาก

$$
SFF = \frac{i}{((1+i)^n - 1)} \quad (2.50)
$$

เมื่อ

C_n คือ ต้นทุนรายปี (฿)

i คือ อัตราดอกเบี้ยต่อหน่วยเวลา

n คือ จำนวนหน่วยเวลา (year)

M คือ ค่าบำรุงรักษาต่อปี (฿)

S' คือ มูลค่าซากเมื่อหมดอายุการใช้งาน (฿)

2.5.2.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

โดยการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนจะทำการวิเคราะห์จากค่าปริมาณความร้อนที่ได้ตลอดปีเปรียบเทียบกับค่าพลังงานชนิดอื่น เช่นการใช้ไฟฟ้า แล้วหาผลตอบแทนการลงทุน ซึ่งมีค่าเท่ากับราคาพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงอื่นลบค่าใช้จ่ายของการใช้พลังงานแสงอาทิตย์รายปี หาได้จาก

$$P_1(CRF) - S(SFF) + \alpha = Ca\left[\frac{365 \times Q}{3.6 \times \eta_E}\right] \qquad (2.51)$$

เมื่อ

α คือ ค่าบำรุงรักษาตลอดปี (฿)

η_E คือ ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า (%)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ได้รับต่อปี (MJ/year)

Ca คือ ราคาของพลังงานไฟฟ้า (฿/kW.hr)

2.6 มาตรฐานการทดสอบ

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์และระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน ISO 9806-1 และ ISO 9459-2 โดยมีรายละเอียดการทดสอบในแต่ละมาตรฐานดังต่อไปนี้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

2.6.1 การทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

2.6.1.1 สภาวะการทดสอบ

1. ไพรานอมิเตอร์จะต้องเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยการวางกลางแจ้งอย่างน้อย 30 นาที ก่อนทำการเริ่มต้นเก็บข้อมูล

2. รังสีอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าอย่างน้อย 800 W/m^2 ค่ามุมตกกระทบจะต้องไม่น้อยกว่า $\pm$2% ของค่ารังสีตั้งฉากกับหน้าแผงหรือมุมตกกระทบไม่เกิน 30 $^{\circ}C$

3. ค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 m/s ถึง 4 m/s

4. อัตราการไหลของสารทำงานควรมีค่าอยู่ประมาณ 0.02 $kg/s \cdot m^2$ ของพื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm$1% ในขณะที่ทำการวัดค่าการทดสอบ และไม่เกิน $\pm$10% ระหว่างจุดข้อมูลใหม่

2.6.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และมีค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ในขณะที่ทำการทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 800 W/m^2

2. ติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยให้มีมุมเอียงเท่ากับเส้นรุ้งของสถานที่นั้นๆ และตัวเก็บรังสีอาทิตย์หันหน้าไปทางเส้นศูนย์สูตร (ทิศใต้)

3. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลาประมาณ 09.00 น. โดยเริ่มป้อนน้ำเข้าสู้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในอัตราการไหลคงที่ (ในการทดสอบนี้ใช้อัตราการไหล 0.02 $kg/s{\times}m^2$ ของพื้นที่รวมหรือประมาณ 1.20 $Liters/min{\times}m^2$ โดยส่วนมากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ประมาณ 2 m^2 ดังนั้นค่าอัตราการไหลจะอยู่ประมาณ 2.4 Liters/min) และการควบคุมอัตราการไหลทำได้โดยใช้วาล์วปรับอัตรา

การไหลซึ่งอัตราการไหลต้องคงที่ โดยมีค่าความเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±1% ในขณะที่ทำการวัดค่าการทดสอบ)

4. ปรับอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม โดยอาจจะใช้ฮีทเตอร์หรือเครื่องทำน้ำเย็น และต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบและมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ±1 °C

5. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องเป็นข้อมูลที่ตัวเก็บรังสีอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State) ดังนั้นการทดสอบจะต้องรอให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวก่อนประมาณ 15 min โดยใน 15 min ค่ารังสีอาทิตย์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงเกิน ±50 W/m^2 จากค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่กำหนดไว้ (ไม่น้อยกว่า 800 W/m^2)

6. หลังจากระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (อย่างน้อยประมาณ 15 min) และอยู่ในสภาวะคงตัวอย่างน้อย 15 min จึงเริ่มจดบันทึกค่าที่จุดวัดต่างๆ โดยบันทึกทุก 10 sec ซึ่งค่าที่ถูกบันทึกมีดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 รายการที่บันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1

รายการ	ผลการทดสอบ
อุณหภูมิน้ำขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Tin)	องศาเซลเซียส (°C)
อุณหภูมิน้ำขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Tout)	องศาเซลเซียส (°C)
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Tamb)	องศาเซลเซียส (°C)
ความดันขาเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์	กิโลปาสคาล (kPa)
ความดันขาออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	กิโลปาสคาล (kPa)
รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ	วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)
ความเร็วลม	เมตรต่อวินาที (m/s)

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

7. ในการทดสอบต้องปรับอุณหภูมิขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อีก 3 ค่า (รวมทั้งหมด 4 ค่า) โดยอาจจะใช้ฮีทเตอร์หรือเครื่องทำน้ำเย็น และต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบและมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน ±0.1 % ซึ่งค่าอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตังเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบสมควรอยู่ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมไปจนถึงอุณหภูมิทำงานสูงสุดของตัวเก็บรังสีประมาณ 70 °C และคำที่ใช้นั้นควรมีระยะห่างระหว่างอุณหภูมิที่เท่ากัน (ซึ่งในการทดสอบนี้สามารถสรุปค่าที่ใช้คือ 40, 50, 60 และ 70 °C)

8. สำหรับค่าอุณหภูมิน้ำเข้าแต่ละค่าจะต้องทำการทดสอบตามที่กล่าวมาข้างต้นไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมด 16 ค่า (หมายเหตุ: ควรทำการทดสอบวันละหนึ่งค่าอุณหภูมิ ซึ่งหมายถึงควรทำการทดสอบอย่างน้อยเป็นเวลา 4 วัน และในแต่ละวันต้องได้ข้อมูลชุดที่อุณหภูมิขาเข้าเดียวกัน

2.6.1.3 การคำนวณ

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ให้ใช้สูตรการคำนวณดังต่อไปนี้

การคำนวณหาความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้จากสมการด้านล่าง

$$Q = \dot{m}C_p\left(t_o - t_{in}\right) \qquad (2.52)$$

โดย

Q คือ ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (kJ)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kgK)

t_{in} คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

t_o คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (°C)

การคำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_G = \frac{Q}{A_G G} \qquad (2.53)$$

โดย

η_G คือ ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

A_G คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

G คือ ความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง (W/m^2)

หาค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชิงแสงและสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

$$\eta_G = \eta_{OG} - U_G(t_{in} - t_a)/G \qquad (2.54)$$

โดย

η_{OG} คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์

U_G คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($W/m^2.K$)

t_a คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (°C)

ทำการทดลองสำหรับอุณหภูมิของของไหลตรงทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หลายๆค่าและพล๊อตกราฟระหว่าง η_G และ $(t_{in} - t_a)/G$ สามารถหาค่าคงที่ η_{OG} และ U_G ได้ โดย η_{OG} คือจุดตัดบนแกน y และ U_G คือค่าความชัน

การคำนวณหาประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะทำการคำนวณตามสภาวะที่กำหนด ซึ่งเป็นสภาวะมาตรฐาน ISO 9806-1 เพื่อใช้เปรียบเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์อื่นๆ

1. ความเข้มรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง มีค่า 800 $\mathrm{W/m^2}$
2. อุณหภูมิอากาศแวดล้อม มีค่า 35 $^\circ C$
3. อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ มีค่า 50 $^\circ C$

$$\eta_G = \eta_{OG} - U_G(t_{in} - t_a)/G \tag{2.55}$$

เมื่อ

η_G คือ ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

2.6.2 การทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2

2.6.2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับบ้านพักอาศัย ต้องมีมาตรฐานดังต่อไปนี้

1. ไพรานอมิเตอร์ใช้วัดรังสีรวม สามารถเปลี่ยนการตอบสนองได้มากกว่า ±1%
2. เครื่องมีวัดอุณหภูมิสภาวะแวดล้อมจะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±0.2 °C มีความแม่นยำไม่เกิน ±0.5 °C
3. เครื่องมือวัดอุณหภูมิน้ำเข้าจะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±0.1 °C มีความแม่นยำไม่เกิน ± 0.1 °C
4. เครื่องมือวัดอุณหภูมิสำหรับวัดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำเข้าและน้ำร้อนทางออกของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์จะต้องมีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±0.1 K และมีความแม่นยำไม่เกิน ±0.1 K
5. เครื่องมือวัดอัตราการไหลจะต้องมีความแม่นยำของการวัดเท่ากับหรือไม่เกิน ±1% ของการวัดคำมวลต่อเวลา เมื่อทำการทดสอบระบบกับปั๊มน้ำหมุนเวียน เครื่องมือวัดอัตราการไหลควรติดตั้งใน Collector Loop การวัดมีค่าแปรผัน ±5%
6. เครื่องมือวัดมวลควรมีค่าความแม่นยำ ±1%
7. เครื่องมือบันทึกข้อมูล แบบ Analog และ Digital ควรมีค่าความแม่นยำ ±0.5% ของ Full scale และมี time constant 1 sec หรือน้อยกว่า Peak signal ควรแสดงระหว่าง 50 – 100 % ของ Full scale

2.6.2.2 สภาวะการทดสอบ

สภาวะการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์รายละเอียดดังต่อไปนี้

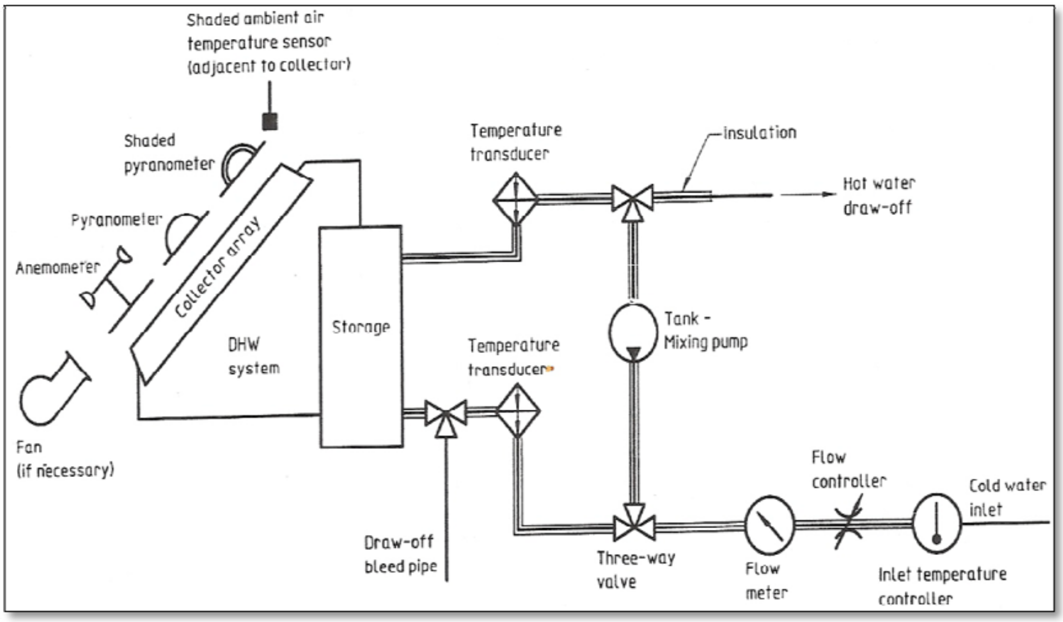
1. การทดสอบต้องทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ซึ่งมีค่าความเข้มข้นรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวันประมาณ 8 MJ/m^2 ถึง 25 MJ/m^2

2. ไม่มีสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุใดๆ มาบังหรือทำให้เกิดเงาบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์

2.6.2.3 การเตรียมการทดสอบ

มาตรฐานการติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับบ้านพักอาศัย

1. ติดตั้งระบบผลิตน้ำร้อนและเครื่องมือวัดตามรูปวงจรของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ใช้ทดสอบ ตามรูป 2.17



รูปที่ 2.17 แผนผังการติดตั้งระบบผลิน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์และเครื่องมือวัดตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

2. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ควรวัดโดยใช้ Shaded aspirated sampling สูง 1 m จากพื้น และติดตั้งห่างจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างน้อย 1.5 m แต่ไม่เกิน 10 m อุณหภูมิผิวตัวเก็บรังสีอาจใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3. หุ้มฉนวนที่ทำน้ำร้อนเพื่อลดความร้อนสูญเสียให้น้อยกว่า 2 W/K

4. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ควรถูกติดตั้งเพื่อให้ลมที่มีความเร็วระดับ 3 m/s และ 5 m/s ผ่านพื้นที่รับแสงตลอดจนบริเวณด้านข้างและด้านหลังตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยค่าความเร็วลมนี้วัดที่ระยะ 50 mm ใน

แนวระนาบเดียวกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และความเร็วสมควรแปรผันได้ ±25% จากค่าเฉลี่ย (ถ้าความเร็วลมที่กำหนดข้างต้นไม่สามารถเกิดได้ตามธรรมชาติสมควรใช้ความเร็วลมที่ใช้จากเครื่องกำหนดลม ควรจะอยู่ในช่วง ±1 °C ของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม)

5. ก่อนเริ่มการทดสอบในแต่ละวัน ควรนำสิ่งกำบังไปปิดไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อให้ไม่โดนรังสีอาทิตย์ และปรับสภาวะเริ่มต้นของระบบ โดยการหมุนเวียนน้ำเย็นที่อุณหภูมิที่กำหนดตาม T_{main} ให้ไหลเวียนภายในระบบ อย่างน้อย 15 min เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในระบบสม่ำเสมอกันทั้งหมดและไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิน้ำในถังกักเก็บความร้อน เมื่ออุณหภูมิของน้ำในระบบคงที่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งระบบแล้ว ให้หยุดการหมุนเวียนของน้ำ แต่ในกรณีของระบบที่ใช้ปั๊มให้ปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบต่อไป (สำหรับระบบผลิตน้ำร้อนที่ใช้ระบบการไหลเวียนโดยใช้ปั๊ม ให้ใช้ปั๊มของระบบระบบผลิตน้ำร้อนหมุนเวียนน้ำเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ เมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกและทางเข้าของระบบน้อยกว่า 1 K น้ำในระบบสามารถสมมติให้สม่ำเสมอเท่ากันทั้งระบบ)

2.6.2.4 วิธีการทดสอบ

1. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 06.00 น. – 18.00 น. (6 ชั่วโมงก่อนและหลังเวลาเที่ยงสุริยะ) รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง โดยให้ระบบทำงานตามปกติ (ถ้าเป็นระบบเทอร์โมไซฟอนปล่อยให้ระบบทำงานอย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการใช้ปั๊ม ส่วนระบบไหลแบบบังคับให้ใช้ปั๊มตามที่โรงงานที่ผลิตระบบแนะนำ)

2. ในช่วงการทดสอบ จดบันทึกค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกๆ ชั่วโมง ค่าที่จดบันทึกมีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.10 รายการที่จดบันทึกข้อมูลจากการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9459-2

รายการ	หน่วย
รังสีอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสง	W/m^2
รังสีอาทิตย์กระจายที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสง	W/m^2
อุณหภูมิอากาศแวดล้อมบริเวณทดสอบ	°C
ความเร็วของอากาศรอบๆ (ถ้าใช้อุปกรณ์กำเนิดลม ใช้ค่าที่วัดเพียงครั้งเดียวเป็นค่าเฉลี่ยของวัน)	m/s

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554

3. หลังจากการทดสอบ (6 ชั่วโมงหลังเวลาเที่ยงสุริยะ) ควรหาสิ่งกำบังตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีอาทิตย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบ หลังจากนั้นระบายออกจากถังเก็บน้ำโดยให้อัตราการไหลคงที่ที่ 600 Liters/Hr และในเวลาเดียวกันควรมีการป้อนน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิคงที่

เท่ากับ T_{main} หรือมีค่าเบี่ยงเบนไม่เกิน $\pm$ 0.25 K จาก T_{main} เข้าไปในระบบ (T_{main} ที่ป้อนในช่วงเช้าต้องเท่ากับ T_{main} ที่ป้อนในช่วงเย็นของวันนั้น)

4. ก่อนที่จะทำการระบายน้ำออกเพื่อป้อนน้ำเย็นเข้าสู่ระบบ น้ำเย็นที่ท่อทางเข้าควรถูกปล่อยผ่ายทางท่อ Bleed-off เพื่อที่จะให้แน่ใจว่า น้ำเย็นทางเข้ามีอุณหภูมิเท่ากับ T_{main} ตามที่ต้องการ โดยการวัดอุณหภูมิน้ำนี้ควรทำประมาณ 10-20 min ก่อนการระบายน้ำออก

2.6.2.5 การคำนวณสมรรถนะของระบบ

การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ได้รับในแต่วันคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{Q}_i = \Delta V_i \rho_w C_{pw} \left(t_{di} \left(Vi \right) - t_{main} \right) \tag{2.56}$$

โดย

Q_i คือ ความร้อนของน้ำที่ปล่อยออกทุกๆ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง (MJ)

ΔV_i คือ ปริมาตรน้ำ 1 ใน 10 ของปริมาตรถัง (m^2)

ρ_w คือ ความหนาแน่นเฉลี่ยของน้ำร้อน ($\mathrm{kg/m^3}$)

C_{pw} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kg°C)

$t_{di}\left(Vi\right)$ คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำ (ΔV_i, °C)

t_{main} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อดันน้ำร้อนในถัง (°C)

การคำนวณหาความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

$$\dot{Q} = a_1 H + a_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + a_3 \tag{2.57}$$

เมื่อ

Q คือปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อน (MJ/day)

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \dot{Q}_i \tag{2.58}$$

เมื่อ

$t_{a(day)}$ คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดวัน (°C)

t_{main} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อดันน้ำร้อนในถัง (°C)

H คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (MJ/day)

a_1 คือ สัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

a_2 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของการสะสมความร้อน (MJ/°C)

a_3 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อน ณ สภาวะเริ่มต้น (MJ)

การหาค่า a_1, a_2 และ a_3 หาได้จากผลการทดลองและใช้วิธี Least Squares Fitting
หลังจากคำนวณปริมาณความร้อนตามสมการที่ 1 แล้วทำการคำนวณหาปริมาณน้ำร้อนจากสมการ

$$m = \frac{Q}{C_p(T_{out} - T_{main})} \tag{2.59}$$

เมื่อ

m คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (kg/day)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คำนวณจากสมการ (1) (kJ/day)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.K)

T_{out} คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้ (°C)

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta_m = \frac{m}{A_G} \tag{2.60}$$

เมื่อ

η_m คือ ความสามารถในการผลิตน้ำร้อน(kg/m^2day)

A_G คือ พื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

m คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (kg/day)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรีดา จันทวงษ์ (2542) ทำการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนที่มีราคาต้นทุนถูกและสามารถสร้างได้ด้วยตนเอง โดยชุดทดลองชุดแรกใช้วัสดุท่อน้ำดื่มพลาสติก (PVC) ขนาด 40 mm เป็นแผงรับรังสีจากรังสีอาทิตย์และใช้เป็นถังสะสมความร้อนขนาดความจุ 35 L โดยใช้ฟางข้าวเป็นฉนวนด้านหลังเครื่องทำน้ำร้อนและฝาปิดถึงสะสมความร้อนในตอนเย็น โดยทดสอบผลความแตกต่างของสีและ ตำแหน่งในการติดตั้ง ชุดทดลองชุดที่สองใช้หลังซีแพคโมเนีย (CPAC) เป็นแผ่นฉนวนกันความร้อนด้านหลังเครื่องทำน้ำร้อน จากการทดลองในชุดที่สองได้อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ 72 °C โดยมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 34 °C

เกษม โพธิ์งาม (2545) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผนเรียบน้ำหนักเบาและราคาประหยัด โดยทำการประยุกต์ใช้แผ่นพลาสติกพอลิโพพิลีนทำหน้าที่เป็นท่อให้น้ำไหลภายในและเป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ โดยมีขนาดแผง 2.72 m^2 (1.172 m × 2.326 m) น้ำหนักรวมของตัวเก็บรังสีที่สร้างมีน้ำหนักที่เบากว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำขายตามท้องตลาดทั่วไป 50 % โดยได้อุณหภูมิน้ำที่ทางออกของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่า 100 °C

ชาญวิทย์ วุฒิวงศานนท์ (2545) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบให้มีราคาประหยัดจากชุดระบายความร้อนของระบบปรับอากาศรถยนต์มาประยุกต์ใช้เป็นแผ่นดูดกลืนรังสี ซึ่งใช้ชุดระบายความร้อนขนาด 0.35 × 0.53 mm^2 จำนวนทั้งหมด 10 ตัว โดยนำมาต่อแบบผสมผสานเป็นแบบอนุกรมและแบบขนานร่วมกัน โดยกรณีที่ 1 ทำการทดสอบกลางแจ้งตามมาตรฐาน ASHARE 93-77 กรณีที่ 2 ทำการทดสอบกลางแจ้งโดยนำน้ำเย็นป้อนผสมในช่วงที่ต่ออนุกรมของชัดระบายความร้อนที่ 2 กับ 3, 3 กับ 4 และ 4 กับ 5 ซึ่งจากการทดสอบพบว่า การป้อนน้ำเย็นเข้าผสมในตัวเก็บรังสีจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนลดลงจึงทำให้สมรรถนะสูงขึ้น

สำรวย ภูบาล (2550) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นดูดกลืนรังสีในตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบแผ่นดูดกลืนรังสีที่ทาสีดำด้าน จากวัสดุ 3 ชนิด คือ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด แผ่นสังกะสี และแผ่นกระเบื้องยิปซัม โดยจากผลการทดสอบพบว่าแผ่นสังกะสีมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงที่สุด รองลงมาเป็นแผ่นฟิวเจอร์บอร์ด และแผ่นประเบื้องยิปซัม แต่แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมีการสะสมพลังงานความร้อนได้นานที่สุด

ธีระ นนทะภา (2550) ศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อน โดยใช้กระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้วเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ชุดที่หนึ่งจะบรรจุวัสดุเก็บสะสมความร้อนไว้ภายในกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้ว ส่วนชุดที่สองไม่มีการบรรจุวัสดุเก็บสะสมความร้อน ซึ่งอากาศจะไหลผ่านช่องระหว่างแผ่นปิดกับกระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้ว จากผลการทดสอบภาคสนามพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบที่มีวัสดุเก็บสะสมความร้อนมีสมรรถนะสูงกว่าแบบที่ไม่มีวัสดุเก็บสะสมความร้อนประมาณ 16.02% หลังจากนั้นได้ทำการสอบโดยทำการเพิ่ม ชุดสารดูดความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นของอากาศก่อนให้ไหลผ่านเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าได้อัตราการคืนตัวของซิลิกาเจลสูงสุดเท่ากับ 221.385 g/Hr มีประสิทธิภาพของการคืนรูป เท่ากับ 64.81 %

Chaurasia (2543) ออกแบบและสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่ายโดยใช้แผ่นซีเมนต์คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยท่ออลูมิเนียมที่ถูกหล่อด้วยซีเมนต์ จะอยู่ด้านบนผิวของแผ่นซีมเนต์ การ

ทดลองครั้งนี้ไม่ใช้กระจกคลุมด้านบนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และเปรียบเทียบสีที่ทาทับคอนกรีตแผ่น โดยเปรียบเทียบสองสีคือ สีดำ และสีขาว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสีดำจะร้อนเร็วกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าสีขาว โดยอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุดคือ 58 °C

Cristofari, et al. (2544) ศึกษาสมรรถนะแผงรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ โดยทำการเปรียบเทียบแผงรังสีที่สร้างขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์และแผงรังสีที่ทำจากโลหะที่ขายตามท้องตลาด โดยจากการสร้างแผงรังสีที่สร้างจากวัสดุพอลิเมอร์จะมีน้ำหนักเบากว่าแผงรังสีที่ทำจากโลหะมากถึง 50% และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของตัวแปรต่าง เช่น ความหนาของฉนวน อัตราการไหลของของไหล และชั้นความหนาของของไหล รวมทั้งมีการหาค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยประจำปีได้ประมาณ 56.5% ในที่ไม่มีลม และประมาณ 49.0% ในที่มีความเร็วลม 5 m/s

Siqueira, et al. (2554) งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย แนวคิดคือสร้างเครื่องทำน้ำร้อนโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์ทั้งหมด ซึ่งใช้ราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าและยังสามารถสร้างได้เอง โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์ PVC เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยไม่ใช้กระจกครอบไว้ ในส่วนของถังเก็บน้ำร้อนจะเป็นถังทีสร้างจากพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยพอลิสไตรีน โดยผลการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ธรรมดาที่ขายตามท้องตลาด ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายมีประสิทธิภาพทางความร้อนที่ยอดเยี่ยม แม้ว่าประสิทธิภาพนี้ยังไม่เทียบเท่าเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดทั่วไปก็ตาม โดยเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 40.2 % อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 43.7 °C และ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดทั่วไปมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 43.8 % อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 45.5 °C

Ilha and Ribeiro (2555) งานวิจัยนี้เป็นแนวทางสำหรับการรวมการผลิต เครื่องทำน้ำร้องพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายในบ้านอยู่อาศัยที่มีรายได้ต่ำกับการศึกษาด้านสิ่งแวดล้อมของกลุ่มประชากรที่ศึกษา เพื่อแก้ไขให้กลุ่มประชากรรายได้ต่ำหันมาพึ่งพิงเทคโนโลยีทีประหยัดพลังงานและดีต่อสิ่งแวดล้อม โดยเลือกชุมชน Campinas SP ในประเทศบราซิล เป็นชุมชนที่ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่าย ซึ่งสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์เกือบทั้งหมด เช่น ถังเก็บน้ำร้อนใช้ถังพอลิเอทิลีน และใช้แถวของท่อ PVC ที่ทาสีดำเป็นตัวรับความร้อนจากแสงอาทิตย์ แล้วทำการเก็บสถิติการใช้งานรวมทั้งความคิดเห็นของบ้านที่ติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนดังกล่าว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าทางชุมชนได้ทำการรวมโปรแกรมลดการสูญเสียพลังงานและสร้างแรงจูงใจต่อทางเลือกใหม่ในการผลิตน้ำร้อนเพื่อใช้ในบ้านเรือน

พลทรัพย์ บุญวานิช (2523) ศึกษาเปรียบเทียบชุดรับรังสีในเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้แผ่นทองแดงพ่นสีดำกับชุดรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นอลูมิเนียมทำอะโนไดซ์สีดำ เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยขนาดของแผ่นดูดกลืนมีขนาด 1.2×1.2 m^2 ซึ่งจากการทดสอบพบว่าเครื่องทำน้ำร้อนที่ใช้แผ่นรับรังสีทำด้วยทองแดงมีประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าแผ่นรับรังสีที่ทำด้วยอะลูมิเนียมทำอะโนไดซ์สีดำเล็กน้อย ซึ่งอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศเท่ากับ 40 °C

นฤมล สมพลเดช (2535) ประยุกต์ใช้เครื่องทำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นเป็นฉนวน โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นฉนวนหุ้มถังสะสมความร้อนระหว่างแกลบ เส้นใยมะพร้าว และไมโครไฟเบอร์ เพื่อศึกษาอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้และหาประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ตัวรับรังสีแผ่นเรียบขนาด 1×2 m^2 ซึ่งทำจากแผ่นสังกะสีและท่อทองแดงพ่นสีดำ ซึ่งมีต้นทุนในการสร้างเครื่องโดยใช้ไมโครไฟเบอร์เป็นฉนวนคิดเป็นเงิน 3,923 บาท และต้นทุนในการสร้างเครื่องโดยใช้เส้นใยมะพร้าวและแกลบเป็นฉนวนคิดเป็นเงิน 3,823 บาท ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า แกลบเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนได้ดีที่สุด และมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานได้มากที่สุดอีกด้วย

กิตติ สถาพรประสาธน์ (2541) การออกแบบผนังทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ผลิตน้ำร้อนในบ้านพักอาศัย ลดการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกผ่านผนังเข้ามาในบ้านพักอาศัย และก่อให้เกิดการระบายอากาศตามธรรมชาติ โดนผนังน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วย แผ่นพลาสติก ช่องว่างอากาศระหว่างแผงรับรังสีอาทิตย์กับแผ่นพลาสติก ถังสะสมความร้อน และฉนวน โดยจะอยู่รวมไว้เป็นชุดเดียวกันและหันหน้าไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงสุด ผลิตได้ประมาณ 40 – 45 °C และสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมผ่าผนังลงได้ประมาณ 60 – 70 % ก่อให้เกิดการระบายอากาศตามธรรมชาติประมาณ 0.001 – 0.018 kg/s

กันยารัตน์ เรืองเดช และคณะ (2544) ศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน เพื่อผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง โดยตัวกักเก็บความร้อนใช้แผ่นสแตนเลสเงาในการรวมแสงเข้าสู่ท่อที่มีลักษณะ 2 ชั้น ทำจากทองแดง โดยมีพื้นที่รับแสงของเครื่องทำน้ำร้อนทั้งหมด 0.936 m^2 และถังเก็บน้ำร้อนมีความจุ 63 L จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนขึ้นอยู่กับมุมเอียง และอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 60 – 65 °C และอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยทั้งวันมีค่าเท่ากับ 57 °C

อโศก ศรีทองธรรม (2553) นำเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรังแสงอาทิตย์ในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติ โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของระบบ การออกแบบการทดลองทำโดยติดตั้งลิ้น เปิด – ปิด ที่ท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบนภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน 5 แบบ โดยจากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 34.39 % ซึ่งเป็นการทดสอบในแบบที่ 3

Khalifa and Jabbar (2009) ศึกษาเปรียบเทียบถึงสมรรถนะระหว่างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทำการรวมตัวเก็บรังสีอาทิตย์และถังสำสมน้ำร้อนเป็นชิ้นเดียวกัน เปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วๆไป โดยศึกษาผลของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม ความร้อนสะสม และประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 58 °C ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนที่สร้างขึ้นสูงถึง 0.4 – 0.78 มากกว่าเครื่องทำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ทั่วๆไปซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 0.21 – 0.35 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมเท่ากับ 7.40 – 8.60 $W/m^2{}^\circ C$ สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนที่สร้างขึ้น

Lima et al. (2005) พัฒนาหาต้นแบบของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมกับบ้านพักอาศัย เนื่องจากเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดนั้นมีขนาดที่เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรมมากกว่าอาคารบ้านเรือน โดยจะทำการหาตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสม เช่น ขนาดของแผ่นรับรังสี มุมเอียงของแผ่นรับรังสี และปริมาณของน้ำร้อนที่ระบบผลิตได้โดยใช้ถังเก็บน้ำแนวนอนที่มีลวดความต้านทานไฟฟ้าอยู่ภายในถังเก็บน้ำ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (TRNSYS) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้สูงสุดในการผลิตน้ำร้อนให้ได้พลังงานสูงสุดโดยมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด แต่ว่าค่าใช้จ่ายของพลังงานเสริมระหว่างการใช้ของระบบนี้กลับมีค่าสูงกว่าระบบอื่นๆ ซึ่งเป็นอุปสรรคในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งต้องใช้การลงทุนเริ่มแรกที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทั่วๆ ไป โดยขนาดของแผงรับแสงอาทิตย์ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ 2.14 – 3.62 m^2 โดยมุมเอียงของแผ่นรับรังสีจะขึ้นอยู่กับละติจูด โดยมีค่ามุมเอียง (β) = ละติจูด (ϕ) + 15°

Ho et al. (2005) ศึกษาเพื่อทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยท่อขดรูปทรงสี่เหลี่ยมรวมถึงกระบวนการรีไซเคิล โดยทำการค้นหาในหลายๆสิ่ง ซึ่งอุปกรณ์ที่นำมารีไซเคิลจะถูกออกแบบตรงบริเวณปลายของท่อเพื่อเพิ่มกายถ่ายเทมวลและความร้อน ในกระบวนการรีไซเคิลภายนอกจะเป็นการปรับปรุงอัตราการถ่ายเทความร้อนจากรังสีอาทิตย์ไปยังอากาศร้อนภายในเครื่องทำน้ำร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนสูงขึ้น โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะทำกาทดสอบทั้งทางทฤษฎีและจากการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพการรีไซเคิลพลังงานที่ได้จาก

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบนี้ รวมทั้งค่าต่างๆดังต่อไปนี้ อัตราส่วนการไหลของท่อขดรูปทรงสี่เหลี่ยม ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้าและออก จำนวนการขดของท่อ อัตราส่วนการรีไซเคิล และอัตราการไหลของน้ำที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี เป็นต้น จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นถ้าใช้จำนวนขดของท่อหนึ่งขดซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ จะดีกว่าท่อที่ไม่มีการขดและเป็นท่อตรงอย่างเดียวซึ่งไม่มีเกิดการรีไซเคิล โดยอัตราการไหลของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน อีกทั้งยังเป็นการความเร็วของๆ ไหล สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แต่อาจทำให้อุณหภูมิน้ำออกลดลงไป

Dagdougui et al. (2010) งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบในกรณีต่างกัน โดยกรณีที่ 1 เป็นการศึกษาแบบจำลองเพื่อหาการสูญเสียความร้อนและสมรรถนะทางความร้อนจากความแตกต่างของจำนวนและชนิดของแผ่นปิดใสด้านบน ซึ่งเป็นการศึกษาควบคู่ไปกับค่าใช้จ่าย และกรณีที่ 2 เป็นการศึกษาหาตัวเก็บรังสีต้นแบบที่เหมาะสม โดยทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำและพื้นที่ของแผงรังรังสีควบคู่กันเพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำตรงทางออกที่สูงและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ดีด้วย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าการสูญเสียความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะลดลงตามจำนวนของแผ่นปิดใส และพบว่าการรวมแผ่นกระจกใสและแผ่นพลาสติกใส (Plexiglas) จะไปเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ ผลจากการออกแบบตัวต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้นพบว่าผลของพื้นที่รับแสงนั้นแทบจะไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบ แต่อัตราการไหลของน้ำนั้นกลับมีผลมากกว่า

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านพบว่า มีการศึกษาและมีการพัฒนาอุปกรณ์การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์มาอย่างต่อเนื่อง และมีความพยายามที่จะลดต้นทุนของการผลิตเพื่อให้เกิดแรงดึงดูดต่อผู้อยู่อาศัยตามบ้านให้หันมาใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตน้ำร้อนมากขึ้น แต่ยังมีปัญหาในบางประการ คือ ความคงทนแข็งแรงและอายุการใช้งานที่ต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด รวมทั้งประสิทธิภาพที่ได้ยังไม่เทียบเท่า งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างตัวต้นแบบของเครื่องทำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีราคาถูก และสามารถใช้งานได้จริง อายุการใช้งานที่นานพอๆกับเครื่องเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด รวมทั้งจะมีการพัฒนาให้มีสมรรถนะให้สูงพอๆกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาดอีกด้วย

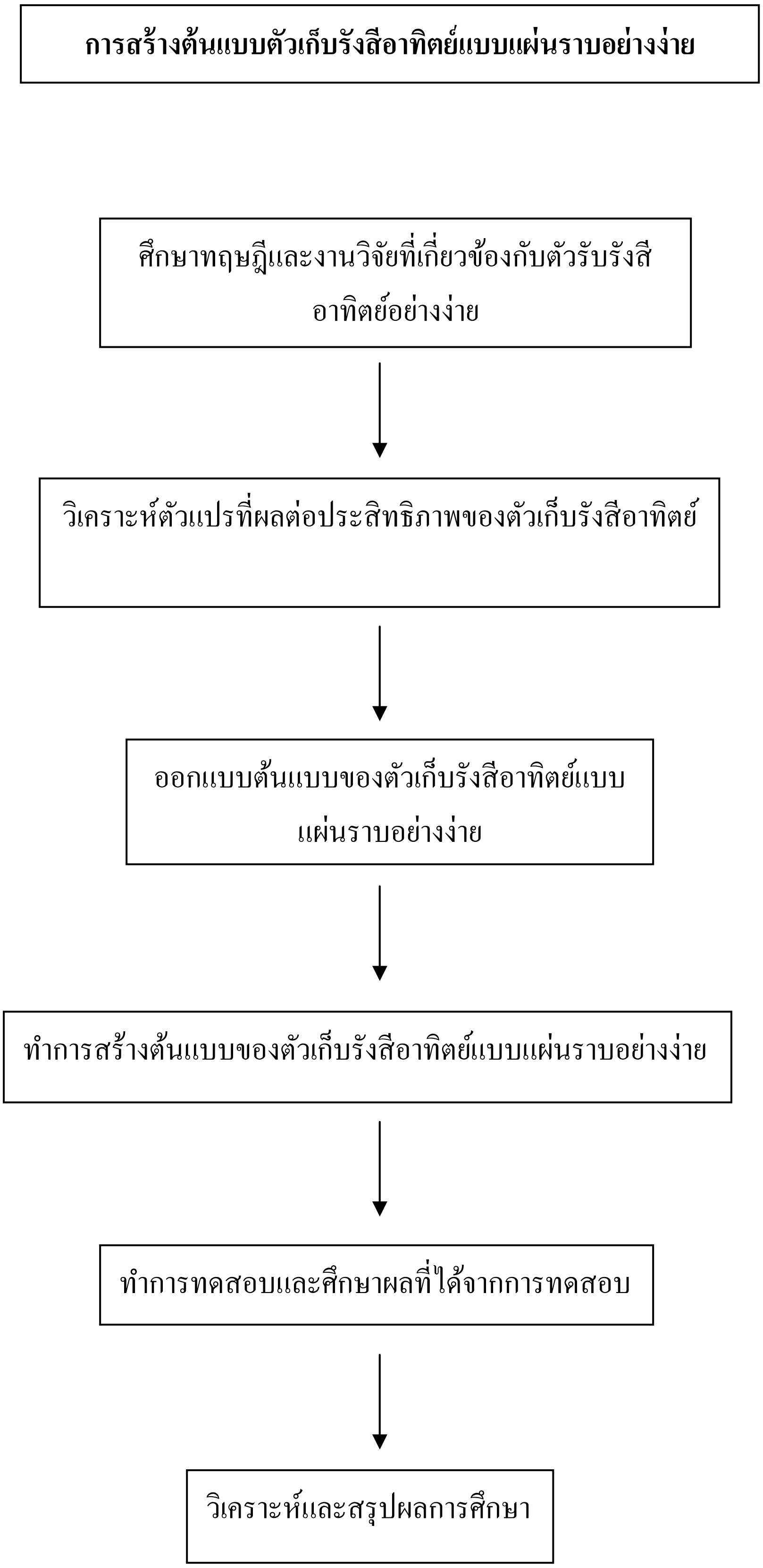
บทที่ 3 อุปกรณ์และการเตรียมงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย จากการประยุกต์ใช้แผ่นโลหะหรือเมทัลชีท (Metal sheet) มาเป็นตัวรับรังสี โดยจะใช้แบบลอนของแผ่นโลหะที่มีขายตามท้องตลาด เพื่อจะเป็นการลดต้นทุนด้านวัสดุและการผลิตตัวต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้ ซึ่งตัวรับรังสีหรือแผ่นโลหะจะเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์แล้วสะสมความร้อน จากนั้นถ่ายความร้อนเข้าสู่ของไหลคือ น้ำ ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าถังเก็บน้ำร้อน เพื่อนำมาใช้กับบ้านพักอาศัย หรือโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนดำเนินการเพื่อสร้างต้นแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย โดยการประยุกต์ใช้แผ่นโลหะดังรูปที่ 3.1 มีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยเน้นไปยังการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่ายจากในอดีต
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพลังงานแสงอาทิตย์ ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์ควบคู่ไปกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์
3. รวบรวมข้อมูลและทำความเข้าใจกับแผ่นโลหะหรือเมทัลชีท รวมทั้งฉนวนกันความร้อน และทำการศึกษาชนิดของลอนแผ่นโลหะ เพื่อช่วยในการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวรับรังสีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ
4. วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมและทำให้ต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน
5. ทำการออกแบบตัวต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่าย โดยมีแผ่นโลหะเป็นตัวรับรังสี
6. เตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ เพื่อสร้างตัวต้นแบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้
7. ทำการทดสอบและศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่าย โดยทำการทดสอบในสภาวะอากาศจริง ที่กรุงเทพมหานคร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
8. วิเคราะห์ผลการศึกษาและสรุปผลการศึกษา

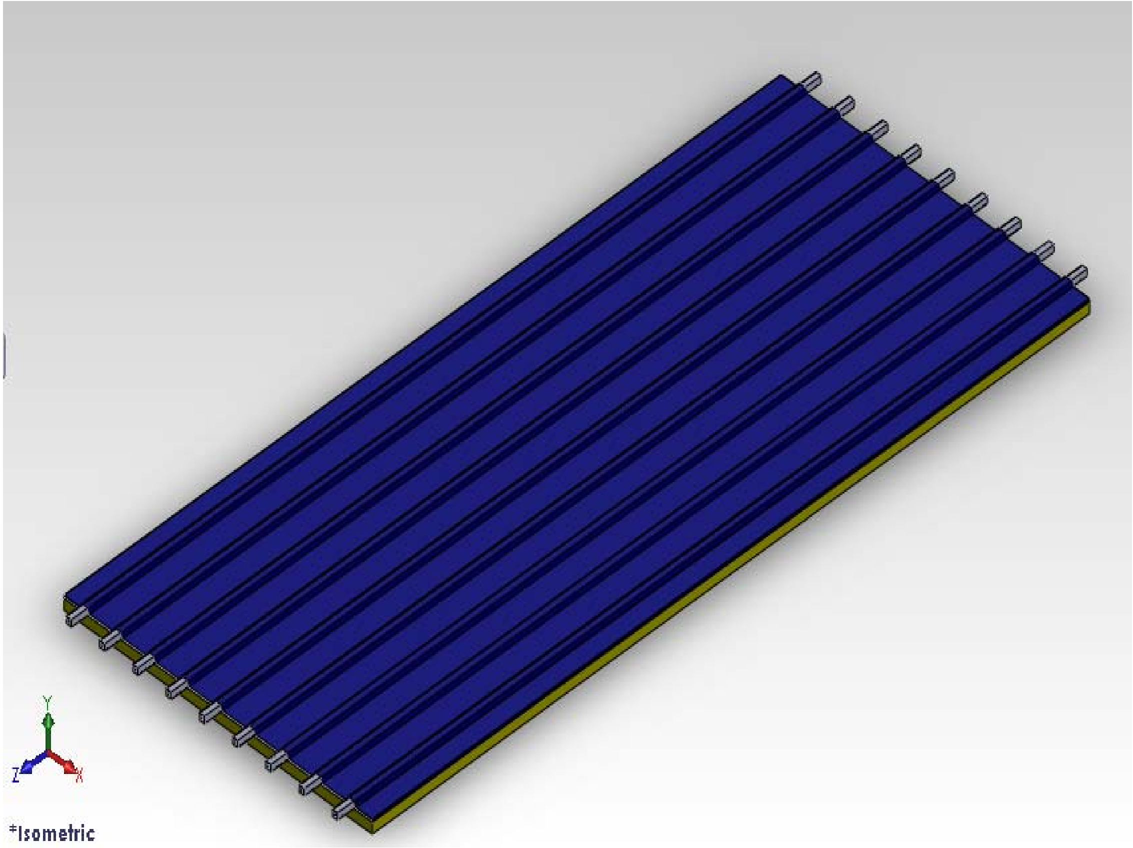


รูปที่ 3.1 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

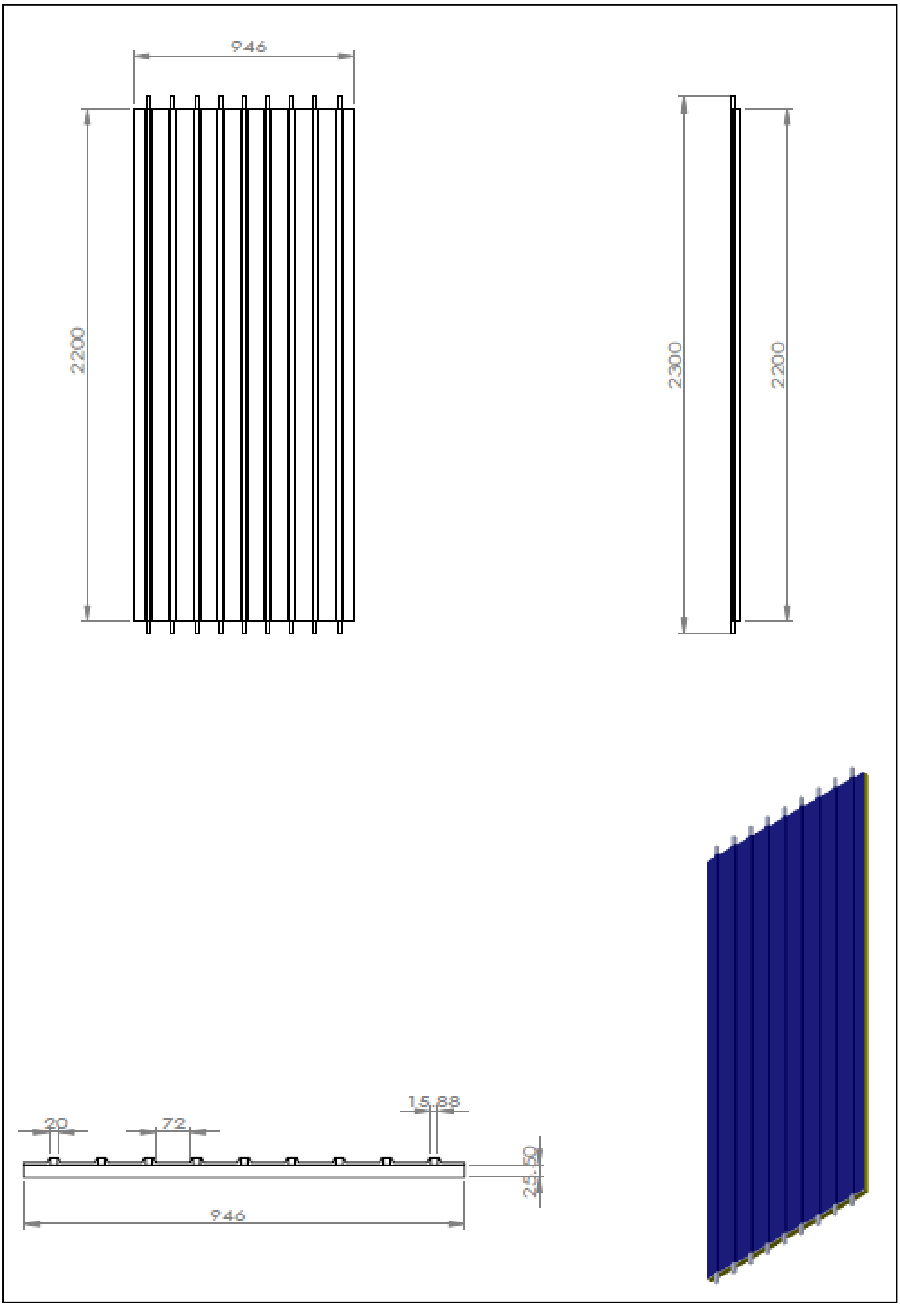
3.2 การออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ

3.2.1 แผ่นรับรังสีอาทิตย์แบบ CL-825

ในการออกแบบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-825 จะนำแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 จากบริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด นำมาต่อกันให้มีความกว้าง 946 mm และมีความยาว 2200 mm ใช้ท่ออะลูมิเนียมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15.88 mm × 15.88 mm โดยใช้ตัวยึดทำการยึดท่ออะลูมิเนียมกับแผ่นดูดกลืนความร้อนที่ทำด้วยแผ่นโลหะ แล้วยึดตัวยึดกับแผ่นดูดกลืนความร้อนด้วยตะปูยิง (Rivet) จากนั้นทำการหุ้มฉนวนด้านหลังด้วยฉนวนโพลียูรีเทน ซึ่งมีความหนา 25.4 mm โดยมีภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกในรูปที่ 3.2 และแสดงแปลนรวมทั้งขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-825 ในรูปที่ 3.3



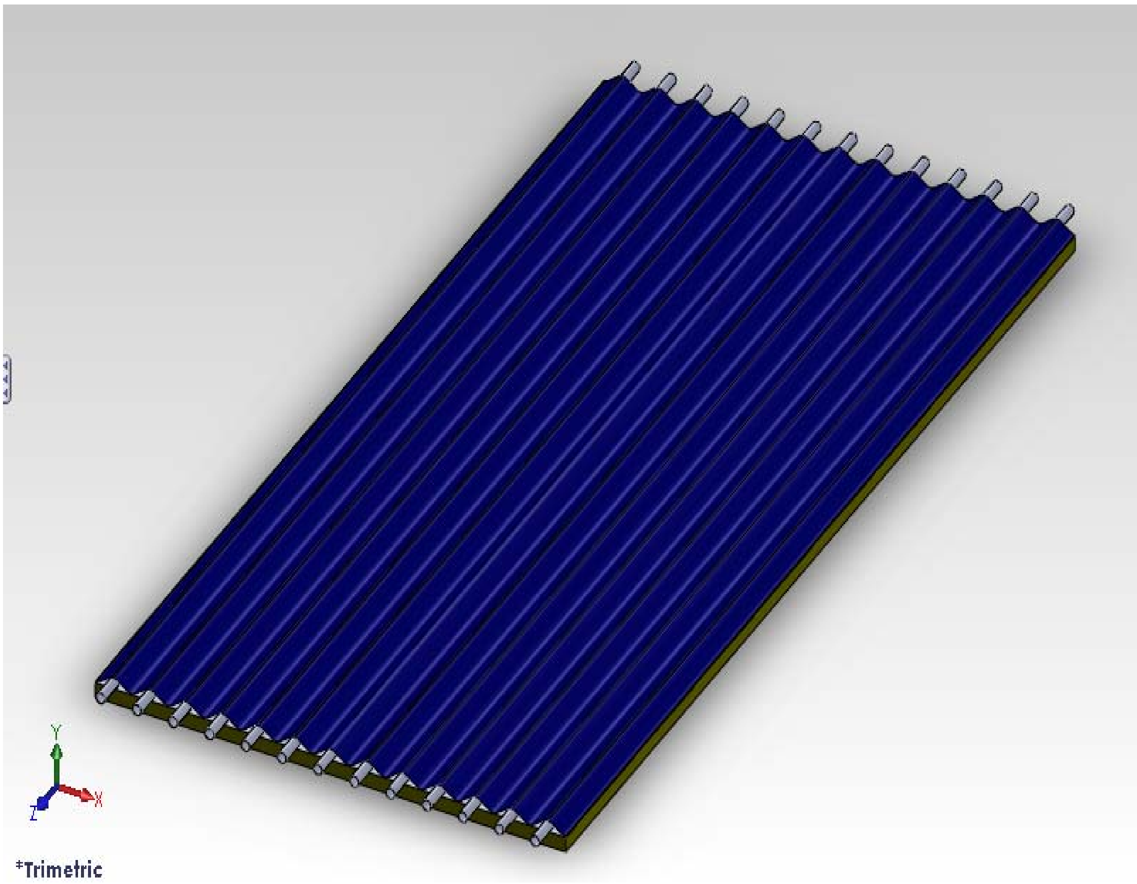
รูปที่ 3.2 ภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-825



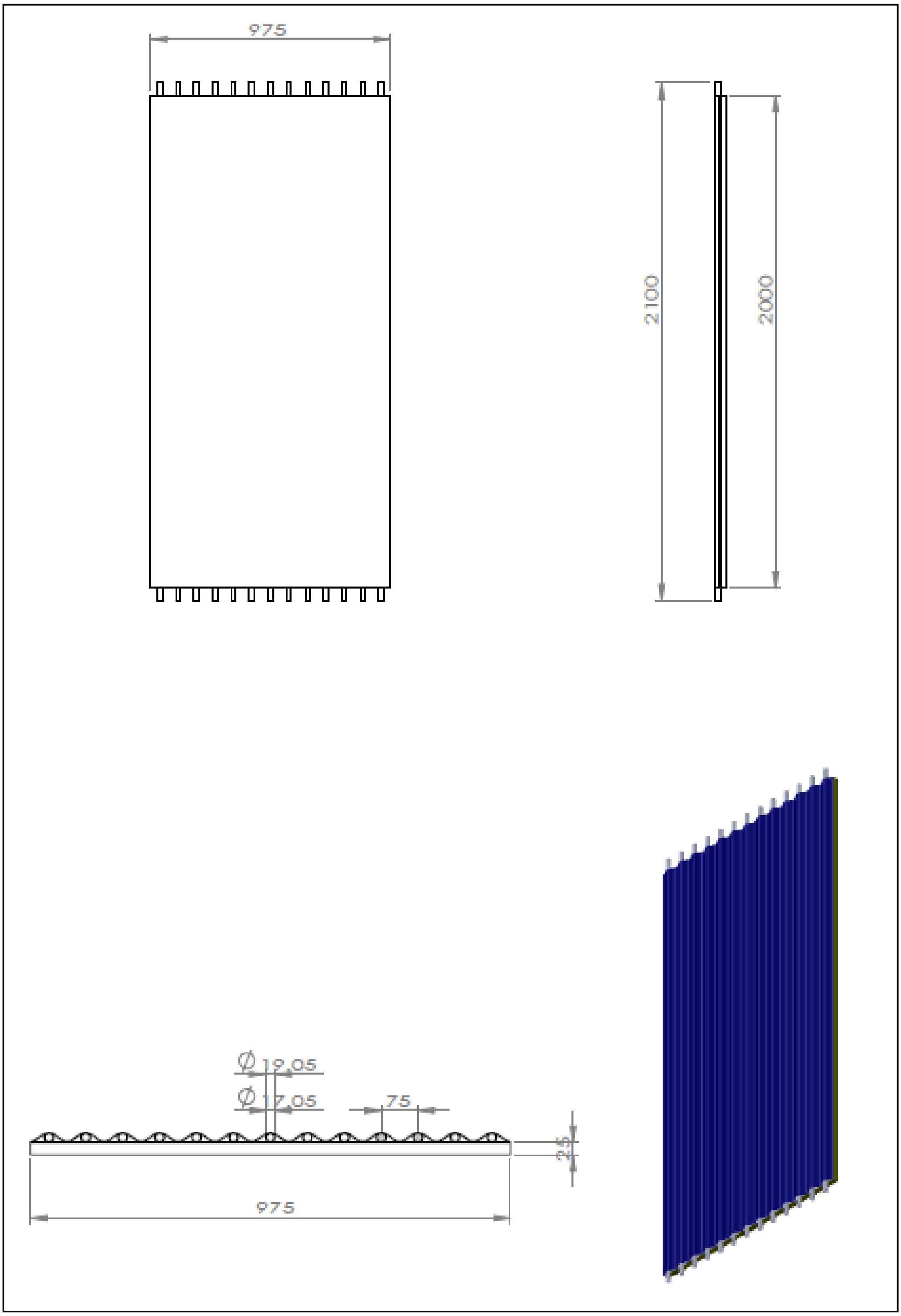
รูปที่ 3.3 แบบแปลนแสดงขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น LL-825

3.2.2 แผ่นรับรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D

ในการออกแบบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น L-750D จะนำแผ่นโลหะ รุ่น L-750D จาก บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด นำมาต่อกันให้มีความกว้าง 975 mm และมีความยาว 2100 mm ใช้ท่ออะลูมิเนียมกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 mm โดยใช้ตัวยึดทำการยึดท่ออะลูมิเนียมกับแผ่นดูดกลืนความร้อนที่ทำด้วยแผ่นโลหะ แล้วยึดตัวยึดกับแผ่นดูดกลืนความร้อนด้วยตะปูยิง (Rivet) จากนั้นทำการหุ้มฉนวนด้านหลังด้วยฉนวนโพลียูรีเทน ซึ่งมีความหนา 25.4 mm โดยมีภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกในรูปที่ 3.4 และแสดงแปลนรวมทั้งขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-750D ในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองในมุมมองไอโซเมตริกของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-750D



รูปที่ 3.5 แบบแปลนแสดงขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะรุ่น CL-750D

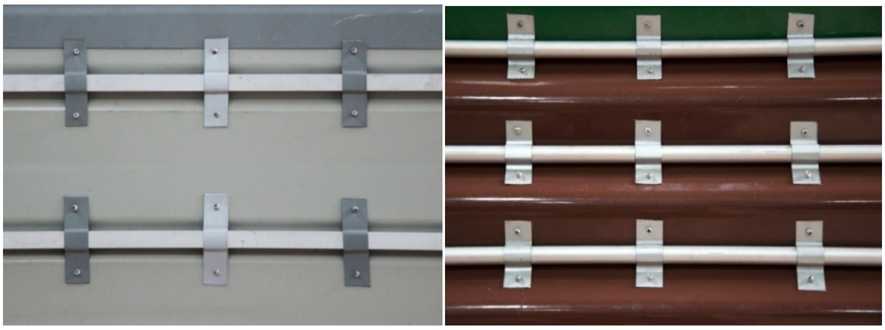
3.3 การสร้างตัวต้นแบบของแผ่นรับรังสีแบบแผ่นโลหะ

1. เตรียมท่อภายในแผ่น โดยใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อภายในแผ่นที่นำความร้อนจากแผ่นดูดกลืนแล้วถ่ายเทไปสู่น้ำที่อยู่ภายในท่อโดย

- แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 จะใช่ท่อหลักเป็นท่ออะลูมิเนียมกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.23 mm แล้วใช้ท่อของไหลเป็นท่ออะลูมิเนียมแบบเหลี่ยมขนาด 12.7×12.7 mm^2
- แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL750D จะใช่ท่อหลักเป็นท่ออะลูมิเนียมกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22.23 mm แล้วใช้ท่อของไหลเป็นท่ออะลูมิเนียมแบบกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 mm

2. ทำการเชื่อมท่ออะลูมิเนียมของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ทั้งสองรุ่น

3. วัดแผ่นโลหะในแต่ละรุ่นแล้วทำการประกอบ โดยใช้ตัวยึดติดที่ทำมาจากเศษของแผ่นโลหะ ทำโดยการดัดให้ได้รูปกับท่อและลอนของแผ่นโลหะในแต่ละรุ่น ให้มีการแนบกับท่อและยึดท่อให้แนบและแน่นกับแผ่นดูดกลืนให้มากที่สุด แล้วทำการยึดติดโดยใช้ตะปูยิง (Rivet) ให้แน่น ซึ่งให้มีระยะห่างของตะปูยิงแต่ละตัวประมาณ 10 cm จากรูปของตัวยึดติดในแต่ละรุ่นของแผ่นดูดกลืน ดูได้จากรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7, 3.8 แสดงแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการประกอบกับท่อโดยใช้แผ่นยึดติดเป็นตัวยึดติดแล้ว ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง



a.) b.)

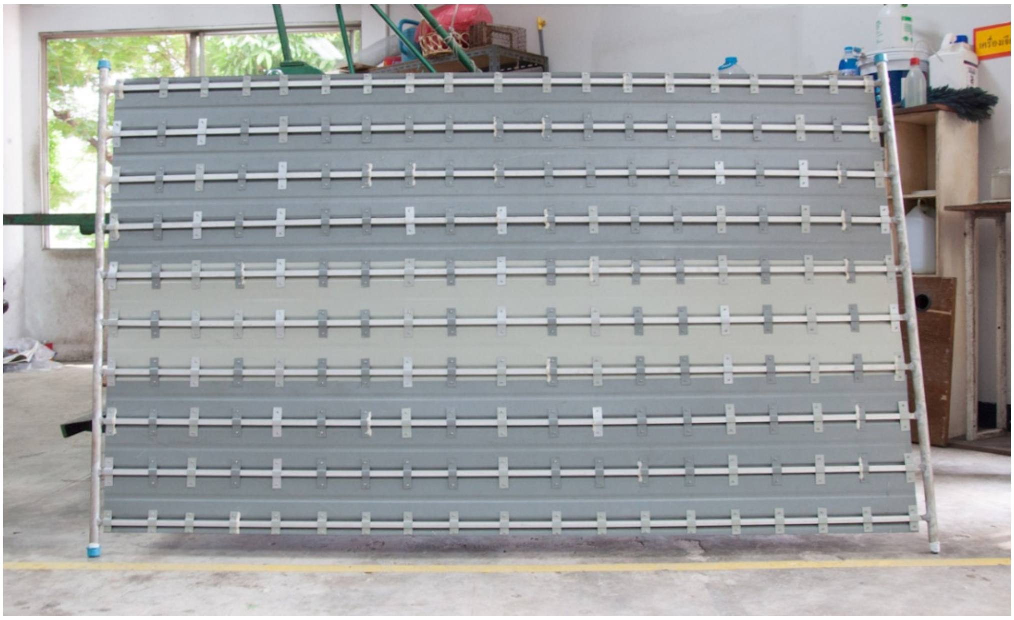
รูปที่ 3.6 ตัวยึดติดที่ทำการยึดติดท่ออะลูมิเนียมเข้ากับแผ่นดูดกลืนความร้อน ของแผ่นดูดกลืนความร้อนในแต่ละรุ่น a.) CL-825 และ b.) CL-750D

a.)

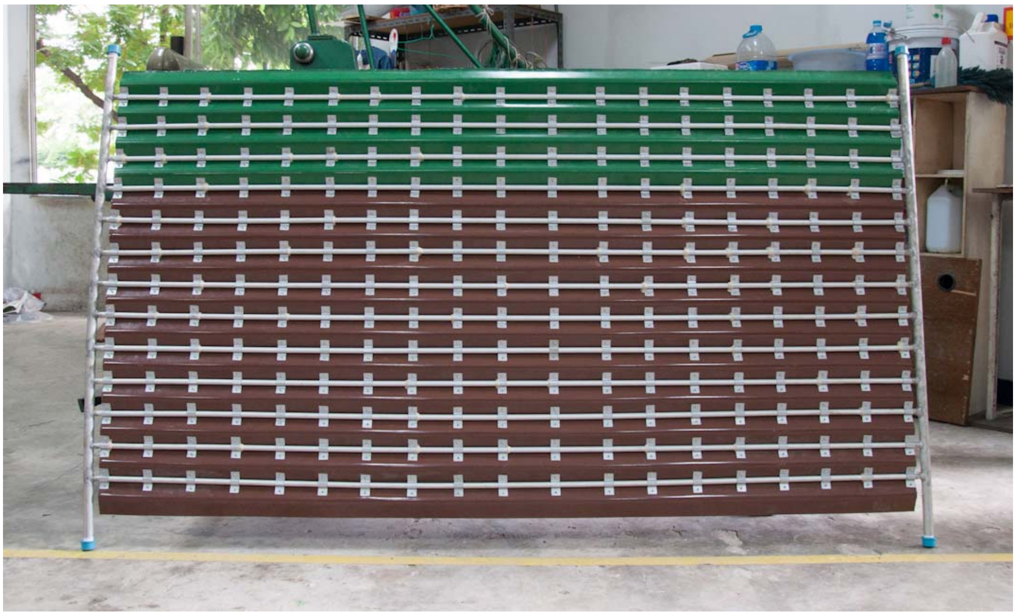
b.)

รูปที่ 3.7 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รุ่นต่างๆ ที่ผ่านการประกอบกับท่ออะลูมิเนียมโดยใช้แผ่นยึดติดเป็นตัวยึดติด ด้านหน้า a.) CL-825 และ b.) CL-750D

a.)



b.)



รูปที่ 3.8 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รุ่นต่างๆ ที่ผ่านการประกอบกับท่ออะลูมิเนียมโดยใช้แผ่นยึดติดเป็นตัวยึดติด ด้านหลัง a.) CL-825 และ b.) CL-750D

เนื่องจากแผ่นที่ได้และลักษณะลอนแตกต่างจากการที่ออกแบบทำให้ขนาดของแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์รุ่นต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงจากที่ออกแบบไว้ โดยมีขนาดดังต่อไปนี้

- แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 มีขนาด 111x190 cm^2
- แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D มีขนาด 108x190 cm^2

4. พ่นสีด้วยสีพ่น โดยทำการพ่นสีรองพื้นก่อนชั้นหนึ่งทั้งด้านหน้าและด้านหลัง แล้วทำการพ่นสีดำด้านทับไปอีกสองชั้น ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ดังรูปที่ 3.9 และ 3.10

รูปที่ 3.9 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีรองพื้น

รูปที่ 3.10 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีดำด้านทับสีรองพื้น

รูปที่ 3.11 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นสีด้วยสีดำด้านทับสีรองพื้นในระยะใกล้

5. นำแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในรุ่นต่างๆไปทำการพ่นฉนวนพอลิยูรีเทน โดยเป็นพอลิยูรีเทนที่ได้ความอนุเคราะห์มาจาก **บริษัท พี.ยู. โฟม อินซูเลชั่น แอนด์เทรดดิ้ง จำกัด** ความหนาของฉนวนหนาประมาณ 2.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.13

รูปที่ 3.12 แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ผ่านการพ่นฉนวนพอลียูรีเทนที่มีความหนา 25 mm

a.) b.)

รูปที่ 3.13 a.) ความหนาของฉนวนพอลิยูรีเทนขนาดความหนาประมาณ 2.5 mm

b.) ลักษณะของฉนวนพอลิยูรีเทน

3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือวัด

3.4.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

โดยการทดสอบนี้จะทำการทดสอบแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาเป็นตัวต้นแบบจากหัวข้อที่ 3.3 โดยแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์จะมีหน้าที่รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ แล้วนำความร้อนที่ถูกดูดกลืนถ่ายเทไปยังท่อภายในแผ่นดูดกลืนและท่อภายในก็จะนำความร้อนไปยังน้ำที่อยู่ภายในท่ออีกต่อหนึ่ง มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์ทั้งหมดประมาณ 2 m^2 โดยมี 2 รุ่นดังต่อไปนี้

- แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825

รูปที่ 3.14 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 แบบไม่มีกระจกปิด

รูปที่ 3.15 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิด

- ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D

รูปที่ 3.16 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D แบบไม่มีกระจกปิด

รูปที่ 3.17 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ รุ่น CL-750D แบบมีกระจกปิด

3.4.2 ถังสะสมความร้อน (Storage Tank)

ถังสะสมความร้อนทำหน้าที่สะสมความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แล้วส่งต่อน้ำไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นระบบปิด ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการเทอร์โมไซฟอน โดยทำมาจากอะลูมิเนียมและมีฉนวนอยู่ด้านในถัง มีขนาด 150 L มีความยาวของถังเท่ากับ 110 cm เส้นผ่านศูนย์กลางยาว 56 cm ตั้งสูงจากพื้นเท่ากับ 125 cm ใช้สำหรับการทดสอบตามาตรฐาน ISO-9459-2 เท่านั้น

รูปที่ 3.18 ถังสะสมความร้อน

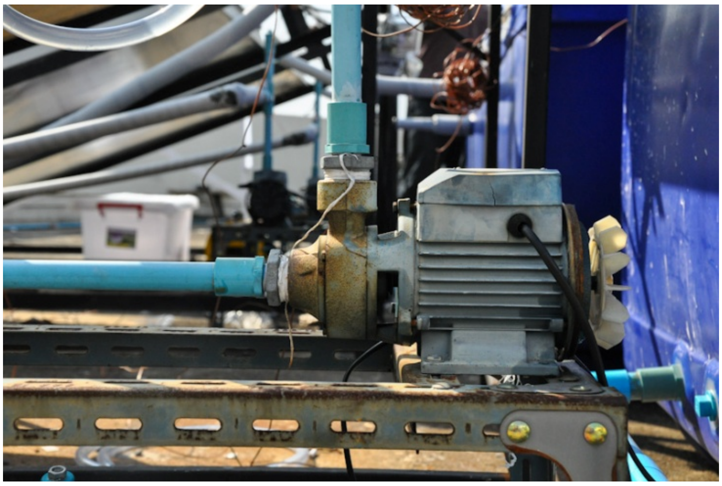
3.4.3 ถังพักน้ำ

ทำหน้าที่พักน้ำเย็นเอาไว้เพื่อทำการไล่น้ำที่ค้างอยู่ในแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์

รูปที่ 3.19 ถังพักน้ำ

3.4.4 ปั๊มน้ำ

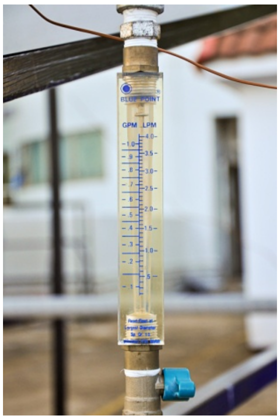
ปั๊มน้ำยี่ห้อ Fujika ขนาด 0.5 HP (375 W) ปั๊มน้ำได้ความสูงเท่ากับ 26 m อัตราการไหลสูงสุดเท่ากับ 30 L/min ทำหน้าที่ปั๊มน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ระบบทำน้ำร้อน ในช่วงที่ทำการทดสอบแล้ว โดยจะทำการขับน้ำร้อนที่ค้างอยู่ในแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถังพักน้ำร้อนให้หมดไปจนกว่าอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกจะเท่ากัน และเท่ากับอุณหภูมิน้ำในถังพัก เพื่อที่จะทำให้พร้อมสำหรับการทดสอบในรอบต่อไป



รูปที่ 3.20 ปั๊มน้ำ

3.4.5 เครื่องวัดแรงดันน้ำ (Flow meter)

เครื่องวัดแรงดันน้ำจะทำการวัดแรงดันน้ำที่จากปั๊มน้ำเข้าสู่ถังสะสมความร้อน โดยจะใช้ในระหว่างการขับน้ำร้อนที่ค้างอยู่ในระบบ โดยในการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 จะใช้ เครื่องวัดแรงดันน้ำที่วัดแรงดันน้ำได้สูงสุด 4 Liter/min และการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9459-2 จะใช้เครื่องวัดแรงดันน้ำได้สูงสุด 18 Liter/min



รูปที่ 3.21 เครื่องวัดแรงดันน้ำ

3.4.6 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data Logger)

เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ยี่ห้อ YOKOGAWA รหัสรุ่น DX2040-2-4-2 มีช่องสัญญาณ 30 ช่องสัญญาณ ค่าความคลาดเคลื่อน ±1% ความละเอียดในการวัด 0.1 ° เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าแล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่อง ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และ ความดัน เป็นต้น ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลที่บันทึกไว้ โดยบันทึกผ่านเมมโมรี่การ์ด แล้วนำออกมาแสดงผลในรูปของกราฟ หรือตารางได้

รูปที่ 3.22 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ

3.4.7 สายเทอร์โมคัปเปิล

สายเทอร์โมคัปเปิลมีหน้าที่รับข้อมูลและส่งข้อมูลที่ได้ไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งการทดสอบนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ T มีค่าความเคลื่อนในการวัดเป็น ±1 % วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง –185 – 300 °C และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง –250 – 400 ° °C

รูปที่ 3.23 สายเทอร์โมคัปเปิลแบบ T

3.4.8 เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ (Pyranometer)

เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์หรือไพราโนมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีรวม ประกอบด้วยตัวรับแสง (Light detector or Receiver) ที่เป็นเทอร์โมไพล์ (Thermopile) หลายชุดต่ออนุกรมกัน ซึ่งตัวรับแสงบรรจุอยู่ใต้โดมควอทซ์ หรือแก้วในรูปครึ่งทรงกลม ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ไพราโนมิเตอร์ยี่ห้อ KIPP and ZONEN ชนิด CM11 มีค่า Sensitivity = 5.191x10^{-6} V/Wgm^{-2} ใช้วัดความเข้มรังสีอาทิตย์โดยแปลงค่าที่วัดได้ในรูปของแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (mV) จากนั้นส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติโดยผ่านสายเทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 3.24 เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์

3.4.9 เครื่องระบายความร้อนจากน้ำร้อน

ใช้กรอบของคอนเดนเซอร์ที่ใช้กับเครื่องปรับอากาศตามบ้านทั่วไป โดยภายในจะประกอบไปด้วยคอยล์เย็น และพัดลมไล่อากาศ เพื่อทำการลดอุณหภูมิที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เพื่อให้อุณหภูมิน้ำเย็นลงก่อนที่จะวนเข้าสู่ระบบอีกครั้งหนึ่ง จะใช้ทำการทดสอบเฉพาะการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 เท่านั้น

รูปที่ 3.25 เครื่องระบายความร้อนจากน้ำร้อน

3.4.10 ถังทำน้ำร้อน

ถังน้ำร้อนจะทำหน้าผลิตน้ำร้อนโดยเครื่องทำความร้อนสองตัวขนาด 3,000 W และ 1,000 W มีขนาดของถัง 250 Liter จะรับน้ำจากเครื่องระบายความร้อนจากน้ำร้อน แล้วทำการต้มน้ำให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด แล้วทำการสูบน้ำด้วยปั๊มขึ้นไปยังถังพักน้ำสำหรับไหลเข้าไปในระบบ ใช้สำหรับทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 เท่านั้น

รูปที่ 3.26 ถังทำน้ำร้อน

3.4.11 ถังพักน้ำสำหรับไหล

ทำหน้าที่เก็บน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้นของการทดสอบแล้วทำการปล่อยน้ำลงมาตามแรงโน้มถ่วงลงไปสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และทำให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวก่อนนำน้ำเข้าระบบ ใช้สำหรับทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9806-1 เท่านั้น

รูปที่ 3.27 ถังพักน้ำสำหรับไหล

3.5 วิธีการทดสอบ

3.5.1 วิธีการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

เป็นการทดสอบหาประสิทธิภาพของแผ่นรับรังสีอาทิตย์ มีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.1.1 สภาวะการทดสอบ

1. เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ต้องเข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยการวางกลางแจ้งเป็นเวลาอย่างน้อย 30 min ก่อนการเก็บข้อมูล

2. รังสีอาทิตย์เฉลี่ยบนพื้นที่รับแสงของตัวเก็บรังสีมีค่าอย่างน้อย 800 W/m^2

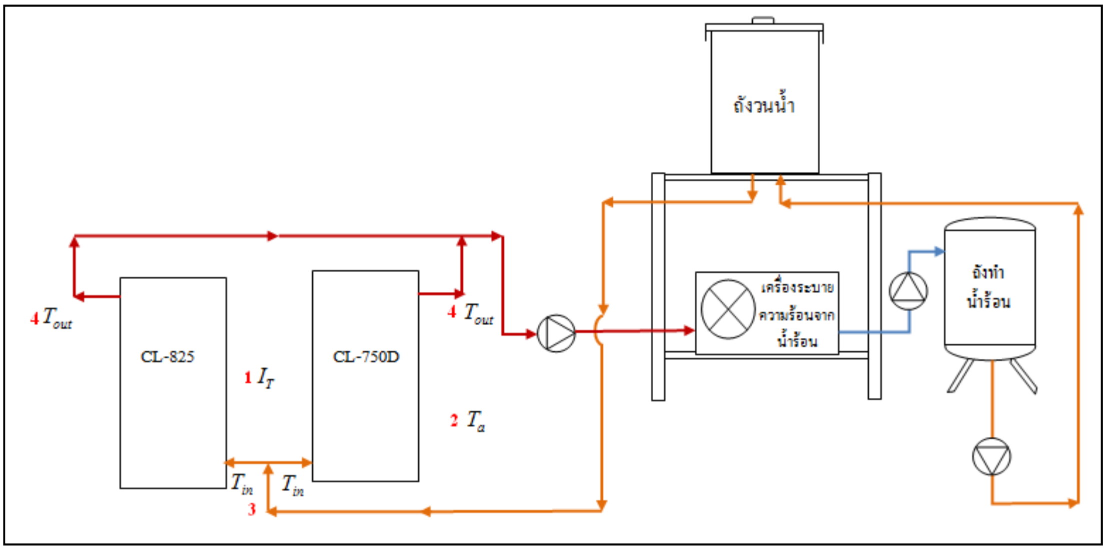
3. ค่าความเร็วลมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 – 4 m/s

4. อัตราการไหลของสารทำงานอยู่ประมาณ 0.02 $kg/s{\times}m^2$ ของพื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ หรือประมาณ 1.2 $Liters/min \cdot m^2$ เมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีพื้นที่รับแสงประมาณ 2 m^2 ดังนั้นค่าอัตราการไหลจะอยู่ที่ประมาณ 2.4 Liters/min มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm1\%$ ในขณะทำการทดสอบ และไม่เกิน $\pm10\%$ ระหว่างจุดข้อมูลใหม่

3.5.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส และมีค่าความเข้มข้นของรังสีอาทิตย์ในขณะทำการทดสอบต้องไม่น้อยกว่า 800 W/m^2 โดยทำการติดตั้งตัววัดค่ารังสีอาทิตย์ให้มีมุมเอียงเท่ากับเส้นรุ้งของสถานที่นั้นๆ และหันหน้าไปทางทิศใต้
2. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 9:00 น. โดยเริ่มป้อนน้ำเข้าสู่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในอัตราการไหลคงที่ (2.4 $Liters/min \cdot m^2$ ในกรณีที่มีพื้นที่แผ่น 2 m^2)
3. ปรับอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้คงที่เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม โดยอาจจะใช้เครื่องทำน้ำร้อน และต้องควบคุมให้อุณหภูมิน้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ
4. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องเป็นข้อมูลที่ตัวเก็บรังสีอยู่ในสภาวะคงตัว ดังนั้นการทดสอบจะต้องรอให้ระบบอยู่ในสภาวะคงตัวก่อนประมาณ 15 min โดยในช่วงดังกล่าวค่ารังสีอาทิตย์ต้องไม่เปลี่ยนแปลงเกิน ± 50 W/m^2 จากค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ไม่น้อยกว่า 800 W/m^2
5. หลังจากระบบเป็นไปดังข้อที่ (4.) จึงเริ่มจดบันทึกที่จุดวัดค่าต่างๆ โดยบันทึกทุกๆ 10 sec
6. ในการทดสอบต้องปรับอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์อีก 3 ค่า รวมทั้งหมดเป็น 4 ค่า ซึ่งค่าอุณหภูมิน้ำขาเข้าของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการทดสอบสมควรอยู่ระหว่างอุณหภูมิแวดล้อมไปจนถึงอุณหภูมิทำงานสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประมาณ 70 °C และค่าที่ใช้นั้นควรมีระยะห่างระหว่างอุณหภูมิที่เท่ากัน ซึ่งในการทดสอบงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ที่ค่า 40, 50, 60 และ 70 °C
7. สำหรับค่าอุณหภูมิน้ำขาเข้าแต่ละค่าจะต้องทำการทดสอบตามที่กล่าวมาข้างต้นไม่น้อยกว่า 4 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่นำมาวิเคราะห์ทั้งหมด 16 ค่า

3.5.1.3 การวัดและตำแหน่งในการติดตั้งจุดวัด



รูปที่ 3.28 หลักการทำงานของการทดสอบหาค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์และตำแหน่งการวัดค่าต่างๆ

ตารางที่ 3.1 แสดงสิ่งที่วัดและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆในระบบดังรูปที่ 3.28

ตำแหน่งที่	สิ่งที่วัด	สัญลักษณ์	หน่วย
1	ค่ารังสีอาทิตย์	I_T	W/m^2
2	อุณหภูมิบรรยากาศ	T_a	°C
3	อุณหภูมิน้ำเข้าถังตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_{in}	°C
4	อุณหภูมิน้ำออกตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T_{out}	°C

3.5.1.4 พารามิเตอร์ในการทดสอบ

1. พารามิเตอร์ที่ควบคุมในการทดลอง

- ใช้แผ่นรับรังสีแบบแผ่นราบ พื้นที่รับแสง 2 m^2 เอียง 14 ° และหันไปทางทิศใต้
- ค่ารังสีอาทิตย์ตลอดระยะเวลาในการทดลอง ควรไม่น้อยไปกว่า 800 W/m^2 (±50)
- ทำการทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ไม่มีเมฆบัง ตอนใกล้เที่ยง (10.00 – 14.00 น.)
- ต้องควบคุมอุณหภูมิน้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าคงที่อย่างน้อย 15 นาที ก่อนเก็บข้อมูลเพื่อให้ระบบอยู่ในสถานะคงตัว
- การทดสอบจะต้องคลอบคลุมอุณหภูมิของน้ำที่เข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์หลายค่า
- ใช้อัตราการไหลเวียนของน้ำในระบบเพื่อหาค่าพลังงานที่อัตราการไหล 0.02 $kg/s \times m^2$
- ค่าของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ มีความคลาดเคลื่อน ±1 °C
- การทดสอบจะต้องทดสอบด้วยการไหลหมุนเวียนแบบบังคับ (Forced circulation)

2. พารามิเตอร์สำคัญที่เปลี่ยนแปลงในการทดลอง

- การเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์ในช่วงการทดสอบ
- ความเร็วลมระหว่างการทดสอบ
- การเปลี่ยนแปลงของพลังงานงาน ที่อัตราการไหลของน้ำในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพ 0.02 $kg/s \times m^2$

รูปที่ 3.29 รูปการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน IS0 9806-1

3.5.2 วิธีการทดสอระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9459-2

เป็นการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ มีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

3.5.2.1 สภาวะการทดสอบ

1. การทดสอบต้องทดสอบในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส ซึ่งมีค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์ประมาณ 8 – 25 MJ/m^2

2. ระหว่างการทดสอบจะต้องไม่มีเงามาเกิดบนตัวเก็บรังสีอาทิตย์

3.5.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

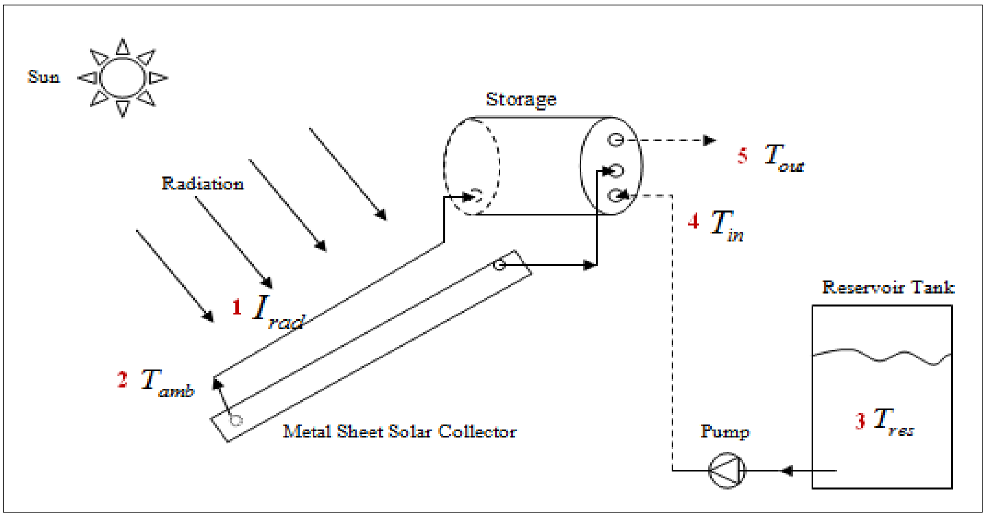
1. ก่อนการทดสอบในแต่ละวัน ควรนำสิ่งที่กำบังไปปิดไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อให้ไม่โดนรังสีอาทิตย์ และปรับสภาวะเริ่มต้นของระบบ โดยการหมุนเวียนน้ำเย็นที่อุณหภูมิที่กำหนดตาม T_{main} ให้ไหลเวียนภายในระบบ อย่างน้อย 15 min เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในระบบสม่ำเสมอกันทั้งหมดและไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิน้ำในถังกักเก็บความร้อน เมื่ออุณหภูมิของน้ำในระบบคงที่สม่ำเสมอเท่ากันทั้งระบบแล้ว ให้หยุดการหมุนเวียนของน้ำและปล่อยให้เกิดเป็นระบบเทอร์โมไซฟอน

2. ทำการทดสอบตั้งแต่เวลา 06.00 – 18.00 น. หรือ 6 ชั่วโมงก่อนและหลังเวลาเที่ยงสุริยะ รวมเป็นเวลาทั้งสิ้น 12 ชั่วโมง โดยให้ระบบทำงานตามปกติ โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะทำการทดสอบในระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon)

3. ในช่วงการทดสอบ จดบันทึกค่าต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทุกๆ ชั่วโมง

4. หลังจากการทดสอบ ควรหาสิ่งกำบังมาบังตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีอาทิตย์มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบ หลังจากนั้นระบายน้ำออกจากถังเก็บน้ำโดยให้อัตราการไหลคงที่ 600 Liters/Hr และในเวลาเดียวกันควรมีการป้อนน้ำเย็นซึ่งมีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ T_{main} ที่ป้อนในช่วงเช้า

3.5.2.3 การวัดและตำแหน่งในการติดตั้งจุดวัด



รูปที่ 3.30 หลักการทำงานระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และตำแหน่งการวัดค่าต่างๆ

ตารางที่ 3.2 สิ่งที่วัดและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆในระบบดังรูปที่ 3.30

ตำแหน่งที่	สิ่งที่วัด	สัญลักษณ์	หน่วย
1	ค่ารังสีอาทิตย์	I_{rad}	MJ
2	อุณหภูมิบรรยากาศ	T_{amb}	°C
3	อุณหภูมิถังพักน้ำ	T_{res}	°C
4	อุณหภูมิน้ำเข้าถังสะสมความร้อน	T_{in}	°C
5	อุณหภูมิน้ำเข้าถังสะสมความร้อน	T_{out}	°C

3.5.2.4 พารามิเตอร์ในการทดสอบ

1. พารามิเตอร์ที่ควบคุมในการทดลอง

- ใช้แผ่นรับรังสีแบบแผ่นราบ พื้นที่รับแสง 2 m^2 เอียง 14 ° และหันไปทางทิศใต้
- ค่าเฉลี่ยรังสีอาทิตย์ตลอดระยะเวลาในการทดลอง 12 ชั่วโมง อยู่ในช่วง 8 – 25 MJ/m^2
- ปริมาตรน้ำในถังสะสมความร้อนเท่ากับ 150 Liters
- การทำงานระบบหมุนเวียนของไหลในระบบเป็นแบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon Systeme)
- ใช้อัตราการไหลเวียนของน้ำในระบบเพื่อหาค่าพลังงานที่อัตราการไหล 10 Liters/min
- ใช้การไหลเวียนในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพ โดยใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 450 Liters (3 เท่าของความจุของถังสะสมความร้อน)

- ค่าของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ มีความคลาดเคลื่อน ±1 °C

2. พารามิเตอร์สำคัญที่เปลี่ยนแปลงในการทดลอง

- การเปลี่ยนแปลงของรังสีแสงอาทิตย์ตลอดทั้งวัน

- การเปลี่ยนแปลงของพลังงานงาน ที่อัตราการไหลของน้ำในระบบเพื่อหาประสิทธิภาพ 10 Liters/min

รูปที่ 3.31 การทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (ด้านหน้า)

รูปที่ 3.32 การทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 (ด้านข้าง)

3.6 สถานที่เก็บข้อมูล

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้อิทธิพลของความเข้มของพลังงานรังสีอาทิตย์ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 และ ISO 9459-2 ได้ทำการทดลอง ณ บริเวณชั้นดาดฟ้าของอาคารคณะพลังงาน, สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ละติจูดที่ 13.65 ° ลองติจูดที่ 100.49 ° โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดนี้ได้ทำการติดตั้งและหันหน้าไปทางทิศใต้

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO-9806-1

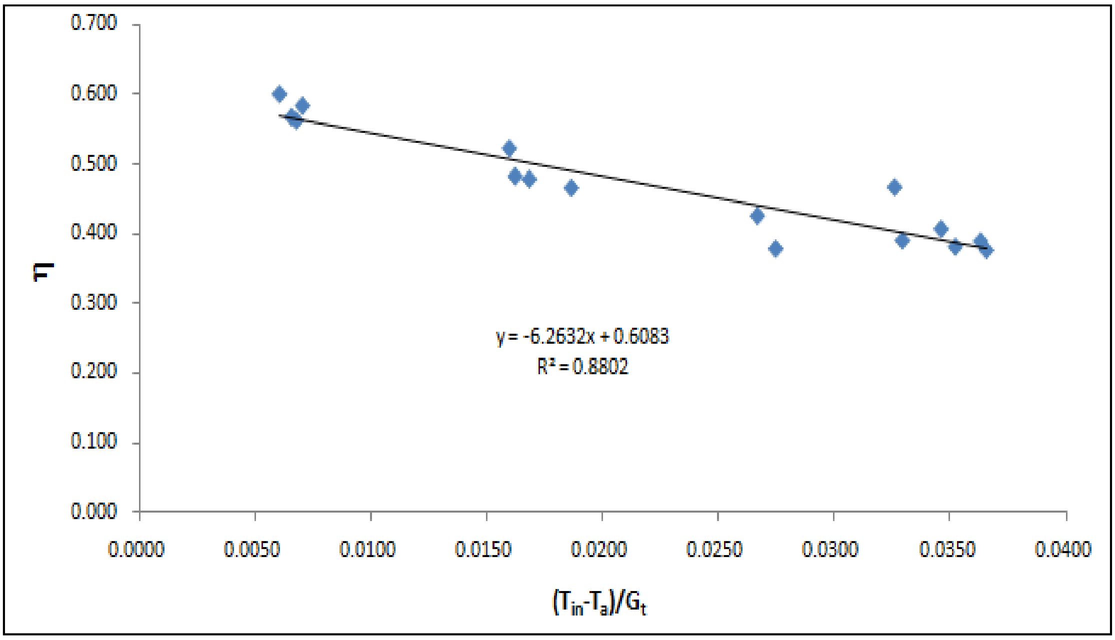
4.1.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 โดยทำการทดสอบในวันที่ 14 – 16 มีนาคม พ.ศ. 2556 ช่วงเวลาตั้งแต่ 10:00 – 14.00 น. ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 °C โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D

Temp. (°C)	Date (DD/MM/YY)	Time (h:min:ss)	Radiation (G) (W/m^2)	T_a (°C)	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	Q (kJ/min)	η (%)
40°C	14/5/2556	10:59:31	847.24	35.5	40.6	47.9	61.00	60.0
40°C	14/5/2556	11:16:31	877.16	34.4	40.6	47.9	61.46	58.39
40°C	14/5/2556	11:39:31	904.13	34.8	40.7	47.9	61.60	56.77
40°C	14/5/2556	11:57:31	903.97	34.4	40.5	47.9	61.04	56.27
50°C	14/5/2556	13:15:33	890.52	35.4	49.7	56.3	55.91	52.32
50°C	14/5/2556	13:30:33	859.47	36.4	50.3	56.3	49.91	48.40
50°C	14/5/2556	13:45:33	823.03	36.6	50.5	56.2	47.40	48.00
50°C	14/5/2556	14:00:33	785.11	35.8	50.4	55.7	44.06	46.76
60°C	15/5/2556	10:27:26	848.46	32.8	60.7	65.5	39.91	39.20
60°C	15/5/2556	10:44:26	759.13	34.5	59.2	64.3	42.70	46.87
60°C	15/5/2556	11:30:26	908.14	35.6	59.8	65.4	46.61	42.77
60°C	15/5/2556	11:46:26	911.96	35.4	60.5	65.5	41.59	38.00
70°C	16/5/2556	12:39:28	948.89	36.9	69.8	75.3	46.54	40.87
70°C	16/5/2556	12:54:08	948.89	36.9	70.3	75.5	43.60	38.29
70°C	16/5/2556	13:09:28	899.54	37.6	70.5	75.6	42.63	37.79
70°C	16/5/2556	13:24:28	901.27	37.3	70.1	75.1	42.21	39.10

เมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 4.1 นำมาพล็อตกราฟหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D โดยเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของแต่ละค่าอุณหภูมิกับอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิและค่ารังสีอาทิตย์ โดยเมื่อได้กราฟตามรูปที่ 4.1 แล้ว สามารถหาค่าประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (FR($\tau\alpha$)) ได้จากจุดตัดบนแกน y โดยจากผลการทดสอบมีค่าประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดเท่ากับ 0.6083 และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (U_L) หาได้จากความชันของกราฟ โดยจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 6.2632 W/m^2K และเมื่อนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ตามสมการที่ 2.55 ในบทที่ 2 จะได้เท่ากับ 49.09 %



รูปที่ 4.1 กราฟประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D

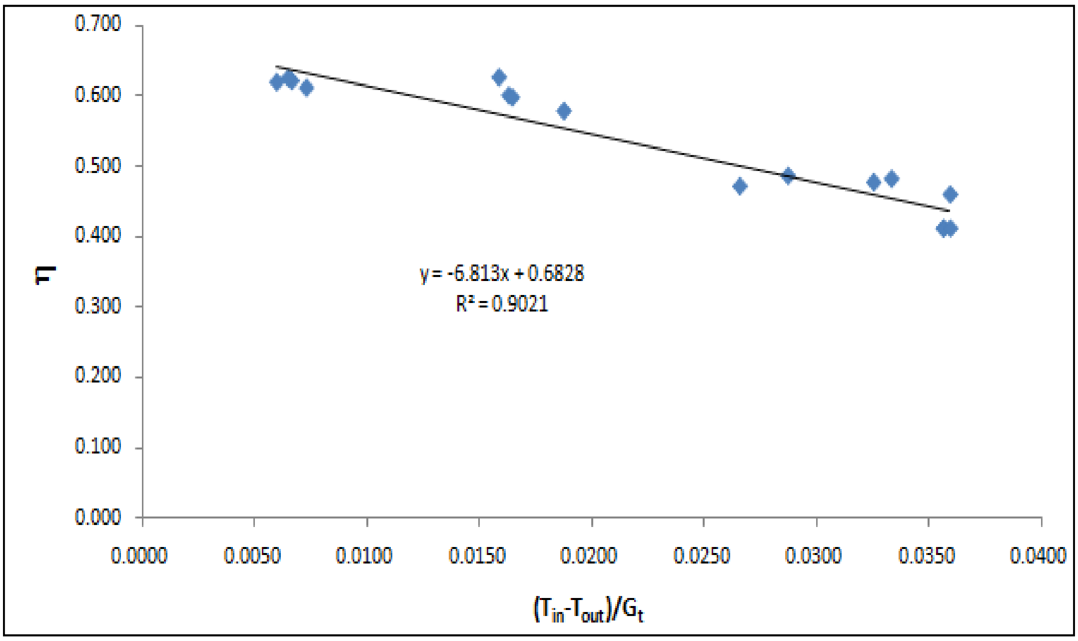
4.1.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 โดยทำการทดสอบในวันที่ 14 – 16 มีนาคม พ.ศ. 2556 ช่วงเวลาตั้งแต่ 10:00 – 14.00 น. ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 °C โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825

Temp. (°C)	Date (DD/MM/YY)	Time (h:min:ss)	Radiation (G) (W/m^2)	T_a (°C)	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	Q (kJ/min)	η (%)
40°C	14/5/2556	11:07:31	879.76	35.0	40.8	48.6	65.50	62.04
40°C	14/5/2556	11:24:31	901.66	34.2	40.8	48.7	66.06	61.05
40°C	14/5/2556	11:39:31	904.13	34.8	40.8	48.7	67.73	62.43
40°C	14/5/2556	11:59:31	902.84	34.2	40.6	48.6	67.03	61.87
50°C	14/5/2556	13:15:33	888.43	35.4	49.5	57.5	66.67	62.54
50°C	14/5/2556	13:30:33	856.53	36.1	50.1	57.5	61.65	59.98
50°C	14/5/2556	13:45:33	821.81	36.9	50.4	57.4	58.86	59.69
50°C	14/5/2556	14:00:33	782.64	35.7	50.3	56.8	54.26	57.77
60°C	15/5/2556	10:27:26	848.46	32.8	60.4	66.2	48.58	47.72
60°C	15/5/2556	10:43:26	753.16	34.8	59.9	65.1	43.56	48.19
60°C	15/5/2556	11:25:26	898.06	35.7	59.6	65.6	50.81	47.15
60°C	15/5/2556	11:41:26	856.55	35.4	60.0	66.0	49.98	48.62
70°C	16/5/2556	12:41:38	891.38	37.6	69.7	75.5	49.19	45.98
70°C	16/5/2556	12:57:38	932.03	37.0	70.2	75.7	46.11	41.23
70°C	16/5/2556	13:12:38	917.61	37.5	70.2	75.6	45.28	41.12
70°C	16/5/2556	13:27:38	896.26	37.6	69.8	75.1	44.30	41.19

เมื่อนำผลที่ได้จากตารางที่ 4.2 นำมาพล็อตกราฟหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 โดยเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของแต่ละค่าอุณหภูมิกับอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิและค่ารังสีอาทิตย์ โดยเมื่อได้กราฟตามรูปที่ 4.2 แล้ว สามารถหาค่าประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (FR($\tau\alpha$)) ได้จากจุดตัดบนแกน y โดยจากผลการทดสอบมีค่าประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดเท่ากับ 0.6828 และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (U_L) หาได้จากความชันของกราฟ โดยจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 6.813 W/m^{2}K และเมื่อนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ตามสมการที่ 2.54 ในบทที่ 2 จะได้เท่ากับ 55.51 %

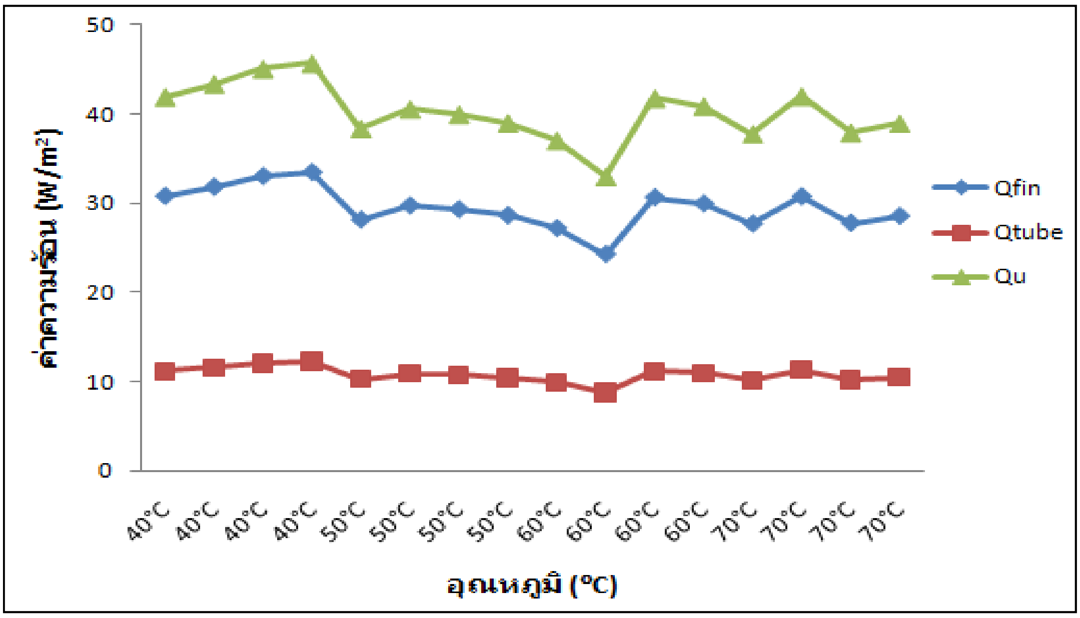


รูปที่ 4.2 กราฟประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825

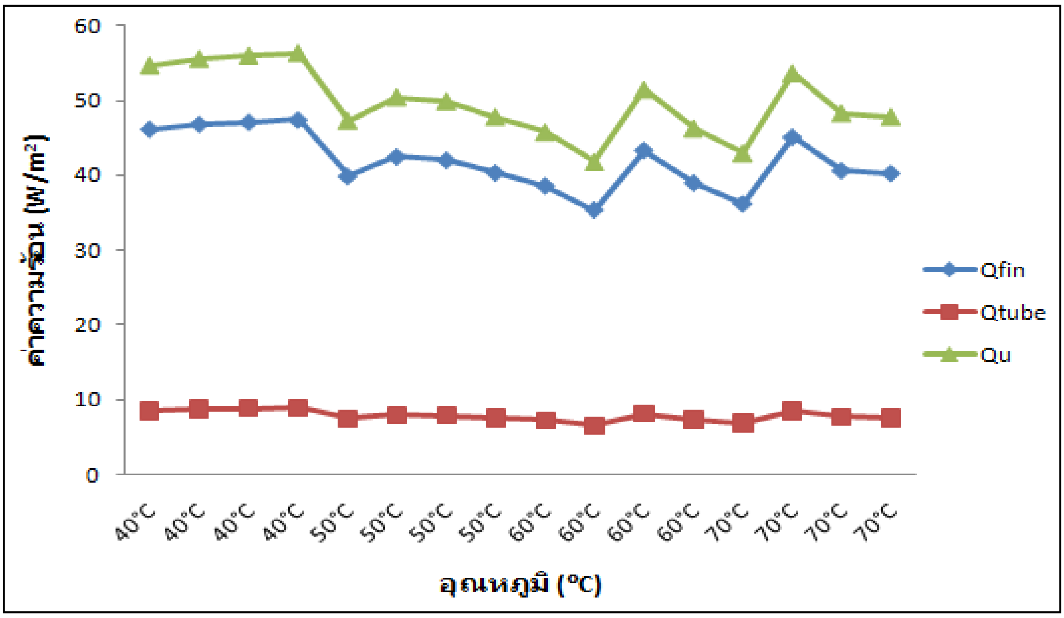
จากตารางของภาคผนวก ก.1 ที่แสดงประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาดในประเทศไทย พบว่า ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงสุด เท่ากับ 82.82 % ส่วนต่ำที่สุดเท่ากับ 50.30 % และค่าประสิทธิภาพเฉลี่ย เท่ากับ 68.27 % ดังจะเห็นได้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 นั้นมีค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลอด ซึ่งผลการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ของงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ต้นทุนที่ต่ำและสร้างง่าย แต่ค่าประสิทธิภาพที่ได้ใกล้เคียงกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาด

4.1.3 วิเคราะห์ค่าความร้อนในบริเวณครีบและท่อที่ได้จากการทดสอบ

จากการคำนวณหาค่าความร้อนที่เข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (q'_{fin}) ตามสมการที่ 2.36, ค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ (q'_{tube}) ตามสมการที่ 2.39 และพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (q'_u) ตามสมการที่ 2.40 ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นการคำนวณหาจากท่อนำของไหลต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล โดยนำค่าที่ได้มาเขียนรูปกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งเป็นของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และ CL-825 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนของค่าความร้อนจากครีบ ค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ และค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนของค่าความร้อนจากครีบ ค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ และค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 ที่ได้จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีค่าความร้อนที่ทางเข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (q'_{fin}) ที่สูงกว่า CL-750D เพราะว่า CL-825 นั้นมีความยาวของครีบที่ยาวกว่า คือ 102 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร่วมที่เล็กกว่านั่นคือ 14 mm ทำให้มีความแตกต่างระหว่างความยาวครีบและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่มากกว่าและส่งผลให้ค่าความร้อนที่เข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศการไหล (q'_{fin}) ที่สูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีความยาวของครีบเท่ากับ 75 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 19 mm เมื่อมาพิจารณาถึงค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ (q'_{tube}) ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่คิดในส่วนที่ท่อจะรับความร้อนจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยแผ่นรับรังสีอาทิตย์จะพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อใหญ่กว่าก็จะมีค่าความร้อนสะสมเหนือบริเวณท่อ (q'_{tube}) ที่สูงกว่า แบบ CL-825 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เล็กกว่า และเมื่อมาพิจารณาค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (q'_u) ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่ได้จากการรวมกันของค่าความร้อนที่เข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (q'_{fin}) และค่าความร้อนที่สะสมเหนือบริเวณท่อ (q'_{tube}) จะพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ค่าความร้อนที่เข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศทางการไหล (q'_{fin}) ที่สูงกว่า แบบ CL-750D มาก จึงทำให้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีค่าความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (q'_u) สูงกว่า แบบ CL-750D ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 และสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่แบบ CL-825 ที่มีค่าสูงกว่าแบบ CL-750D

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุด พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีค่าสูงกว่า แบบ CL-750D และสอดคล้องกับค่าความร้อนที่เข้าสู่ท่อต่อหน่วยความยาวในทิศการไหล (q'_{fin}) เนื่องมาจากความแตกต่างของความกว้างของครีบ และค่าประสิทธิภาพเชิงแสงสูงสุดที่มีค่ามากกว่านั้น ส่งผลให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงกว่าแบบ CL-750D และเมื่อมาพิจารณาถึงสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนที่ต่ำกว่า แบบ CL-825 โดยคาดการณ์ว่ายิ่งครีบมีระยะยาวมากยิ่งทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนได้ง่ายกว่า เพราะมีพื้นที่ในการสูญเสียความร้อนให้กับอากาศที่มากกว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศแวดล้อมเย็นลงดังเช่นในช่วงเช้าหรือช่วงเย็นของวัน

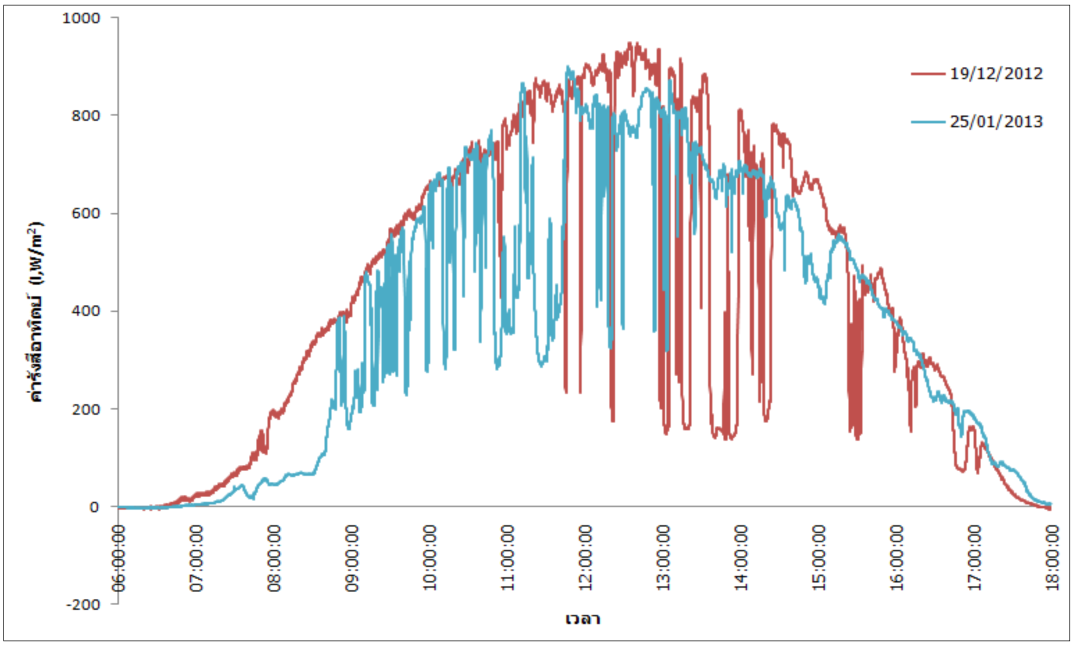
4.2 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2

4.2.1 ค่ารังสีอาทิตย์ของวันที่ทดสอบ

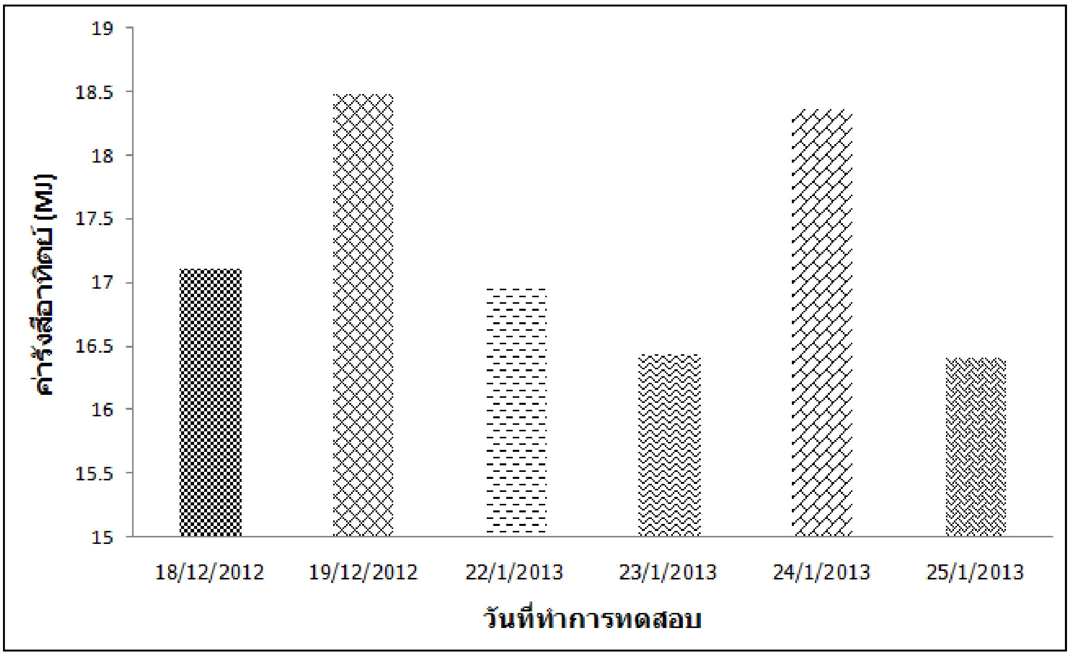
ค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้สำหรับการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 ต้องมีค่ารังสีอาทิตย์รวมอยู่ในช่วงระหว่าง 8 – 25 MJ/m^2 day โดยคิดเวลาในการทดสอบ คือตั้งแต่เวลา 06.00 – 18.00 น.

4.2.1.1 ค่ารังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อน ด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D ที่ยังไม่มีกระจกปิด ซึ่งจากการทดสอบพบว่า วันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมมากที่สุดคือวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2555 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเท่ากับ 18.48 MJ/m^2 day และวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมน้อยที่สุดคือวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเท่ากับ 16.41 MJ/m^2 day ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเป็นค่าที่ได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟจากรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์และเวลา และค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่ทำการทดสอบอื่นๆ นั้นสามารถดูได้จากรูปที่ 4.6

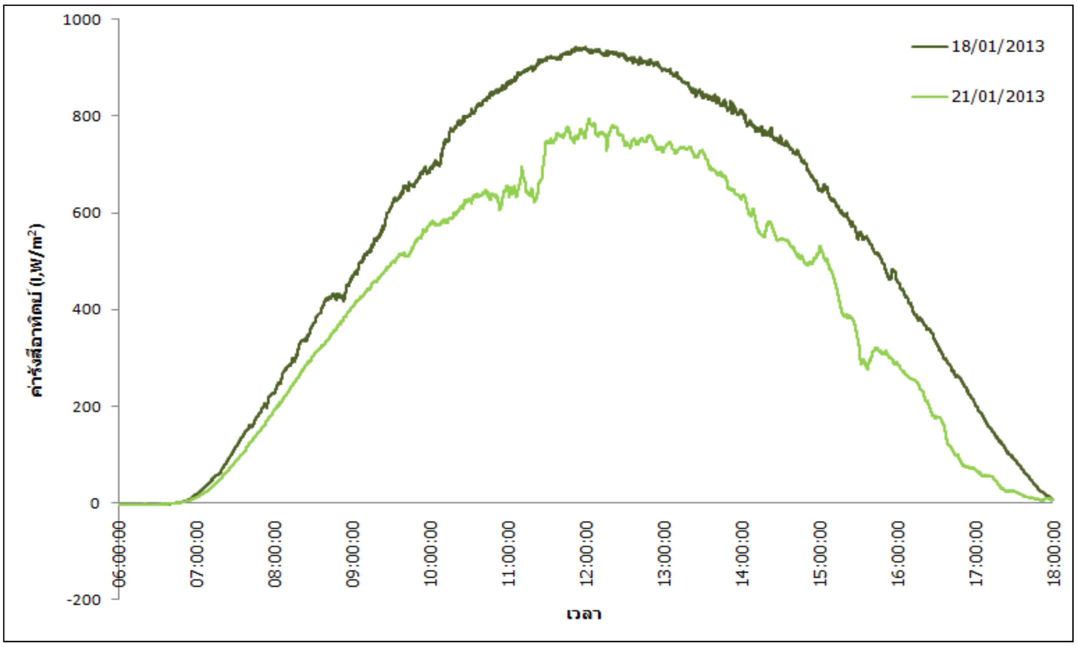


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D แบบไม่มีกระจกปิด ของวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2555 และ 25 มกราคม พ.ศ. 2556

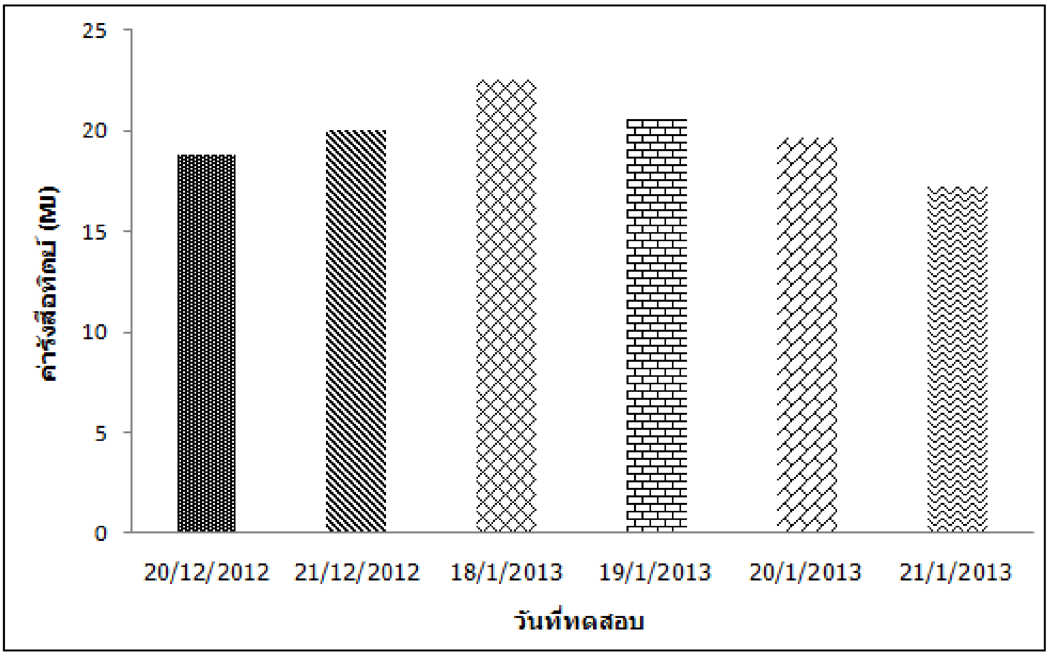


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์รวมและวันที่ทดสอบทั้ง 6 วัน จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D แบบไม่มีกระจกปิด

ต่อมา เป็นค่ารังสีอาทิตย์รวมที่ได้จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ยังไม่มีกระจกปิด พบว่าวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมมากที่สุดคือวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเท่ากับ 22.58 MJ/m^2 day และวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมน้อยที่สุดคือวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเท่ากับ 17.21 MJ/m^2 day ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยค่ารังสีอาทิตย์รวมในวันที่ทำการทดสอบอื่นๆ จะแสดงในรูปที่ 4.8 ต่อไป และจะสังเกตได้ว่าวันที่ทำการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมสูงกว่า แบบ CL-750D อยู่มาก ซึ่งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ค่ารังสีอาทิตย์รวมสูงสุดยังมีค่าพอๆ กับค่ารังสีอาทิตย์รวมที่ต่ำที่สุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D



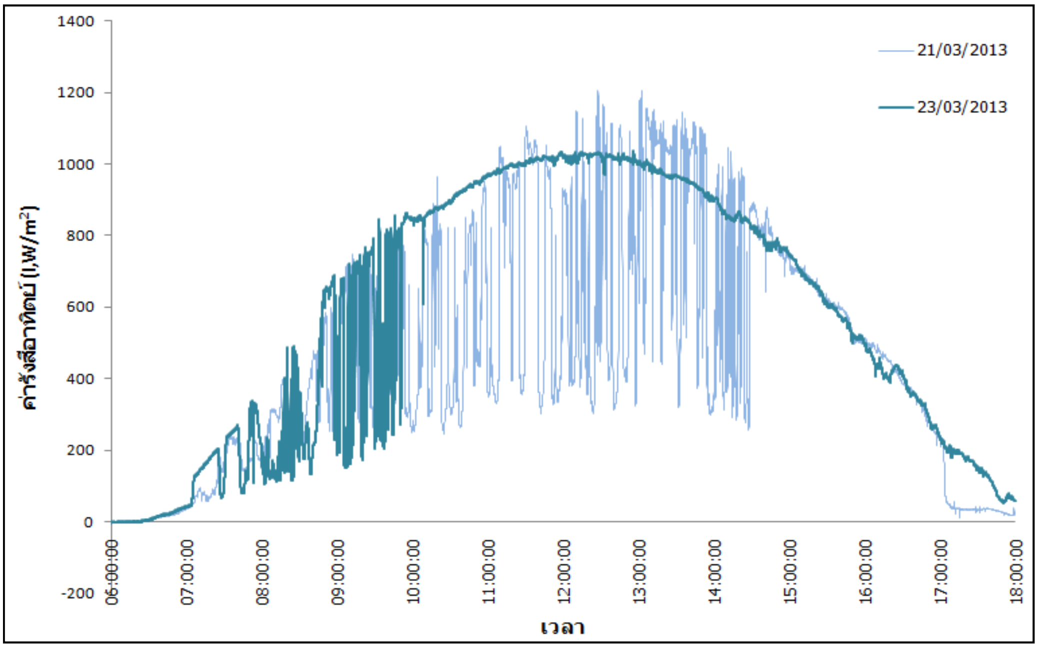
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-825 แบบไม่มีกระจกปิดของวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 และวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2556



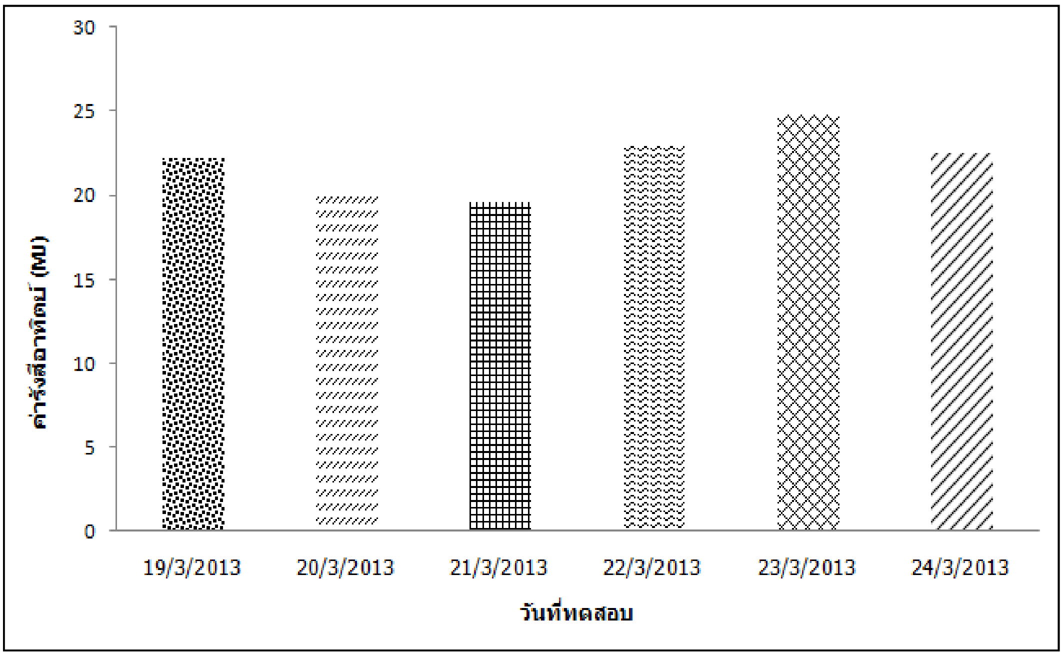
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์รวมและวันที่ทดสอบทั้ง 6 วัน จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-825 แบบไม่มีกระจกปิด

4.2.1.2 ค่ารังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด

จากรูปที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดวันซึ่งได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D ที่มีกระจกปิด พบว่าวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมมากที่สุดคือวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดวันเท่ากับ 24.75 MJ/m^2 day และวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมน้อยที่สุดคือวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดวันเท่ากับ 19.63 MJ/m^2 day โดยค่ารังสีอาทิตย์รวมในวันที่ทำการทดสอบวันอื่นสามารถดูได้จากรูปที่ 4.10

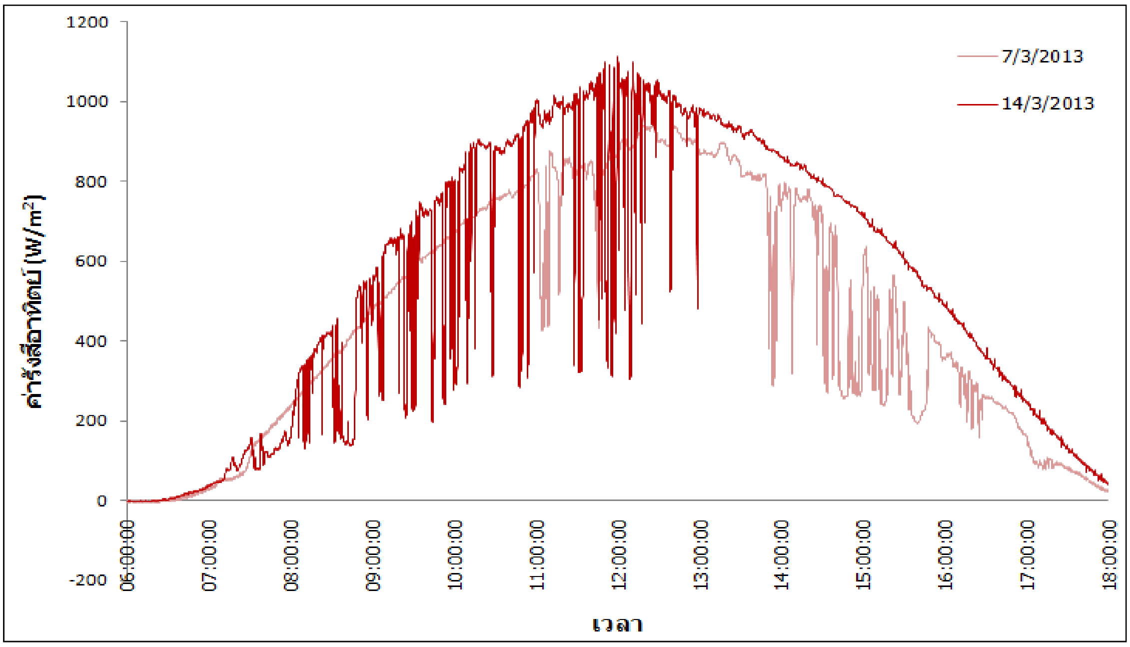


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-750D แบบมีกระจกปิด ของวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 และวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556

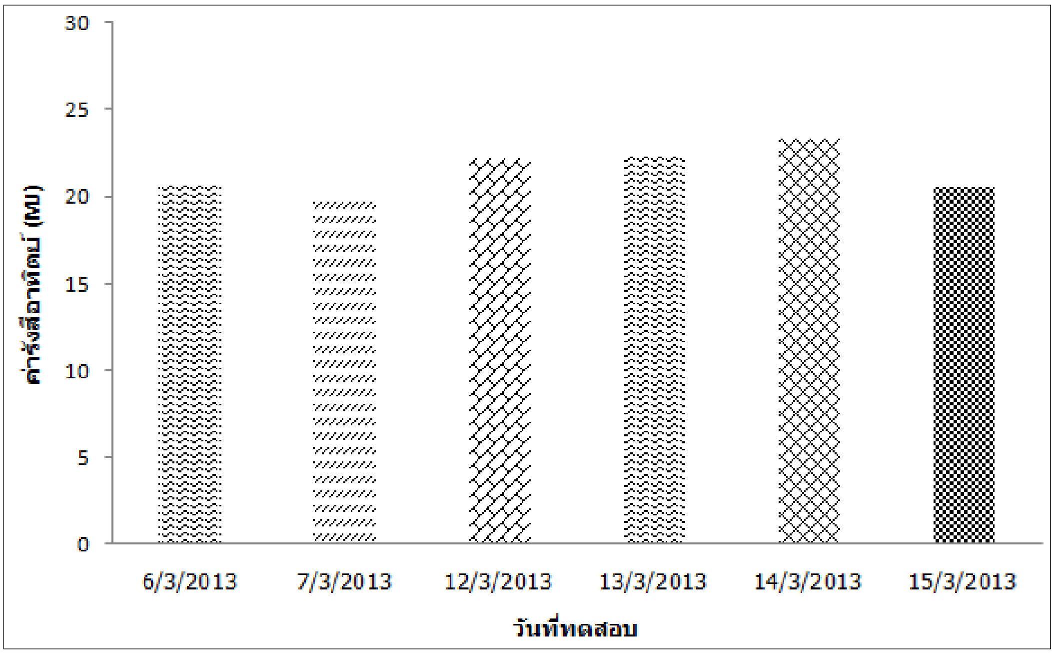


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์รวมและวันที่ทดสอบทั้ง 6 วัน จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-750D แบบมีกระจกปิด

ในการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-825 ที่มีกระจกปิดแล้ว พบว่าวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมมากที่สุดคือวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดวันเท่ากับ 23.35 MJ/m^2 day และวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมน้อยที่สุดคือวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดวันเท่ากับ 19.99 MJ/m^2 day ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และค่ารังสีอาทิตย์ในวันที่เหลือจากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่นนี้ จะแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบที่มีกระจกปิดทั้งสองแบบพบว่าค่ารังสีอาทิตย์รวมส่วนใหญ่จะมีค่าสูงกว่า 20 MJ/m^2 day เกือบทั้งหมด และค่ารังสีอาทิตย์รวมที่สูงที่สุดและค่ารังสีอาทิตย์รวมที่ต่ำที่สุดนั้นก็มีค่าที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิด ของวันที่ 07 มีนาคม 2556 และวันที่ 14 มีนาคม 2556



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-825 แบบมีกระจกปิดทั้ง 6 วัน

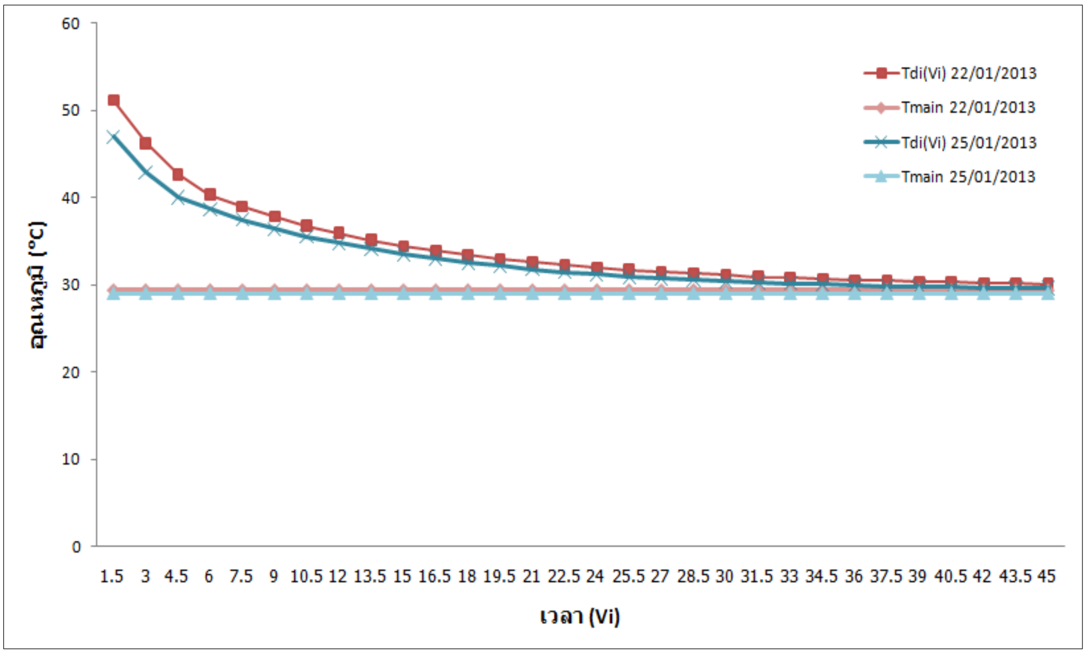
4.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบ

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ด้วยมาตรฐาน ISO 9459-2 โดยทำการปล่อยให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับรังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวันและกำหนดระบบหมุนเวียนน้ำเป็นระบบเทอร์โมไซฟอน จนกระทั่งครบตามเวลาที่ทำการทดสอบคือ 12 ชั่วโมง ก็ทำการดันน้ำเพื่อหาค่าความร้อนสะสมตลอดทั้งวันเป็นเวลา 45 นาทีหรือสามเท่าของปริมาตรถังสะสมความร้อน โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 1 แบบ จะทำการทดสอบอย่างน้อย 6 วัน อุณหภูมิน้ำร้อนที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนที่ได้รับในแต่ละวันจะเป็นอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของน้ำที่ปล่อยออกทุกๆ 1 ใน 10 ของปริมาตรถังสะสมความร้อน ($t_{di}\left(Vi\right)$) หรือทุกๆ 15 ลิตรที่ทำการดันน้ำ และหาความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำโดยเอามาเทียบกับอุณหภูมิน้ำป้อน (t_{main})

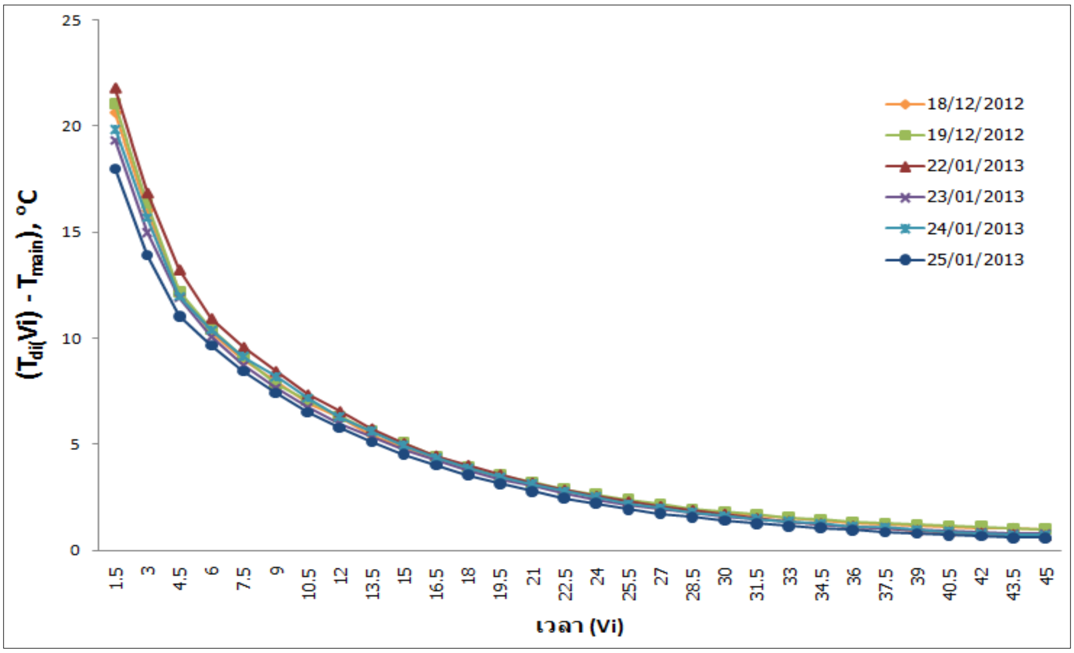
4.2.2.1 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีกระจกปิด

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด พบว่า วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2555 เป็นวันที่ทำอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำสูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิน้ำร้อนเท่ากับ 51.16 °C และมีอุณหภูมิน้ำในถังพักน้ำเท่ากับ 29.4 °C และวันที่มีค่าอุณหภูมิน้ำร้อนต่ำที่สุดเป็นวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 โดยมีอุณหภูมิน้ำร้อนเพียง 46.98 °C และมีอุณหภูมิน้ำในถังพักน้ำเท่ากับ 29.0 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และจะเห็นแนวโน้มในการลดลงของอุณหภูมิที่สะสมได้ตลอดทั้งวัน โดยสังเกตจากความชันของกราฟ และสังเกตได้ว่า เมื่อผ่านไปประมาณ 10 นาที หรือน้ำถูกขับออกไป 100 Liters อุณหภูมิของน้ำร้อนจะลดลงต่ำกว่า 35 °C ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและอุณหภูมิน้ำป้อน จะให้ผลการทดสอบสอดคล้องกัน โดยวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงที่สุดยังคงเป็นวันที่ 22 ธันวาคม 2555 และวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยที่สุดก็คือวันที่ 25 มกราคม 2556

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำได้ พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด ทำน้ำร้อนสูงที่สุดในวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2556 แต่ค่ารังสีอาทิตย์รวมของวันนี้ มีค่าเท่ากับ 16.99 MJ/m^2 day ซึ่งไม่ได้สูงที่สุด โดยวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงที่สุดคือวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำป้อนเป็นอันดับสองรองจากวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2556 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากวันที่ทำการทดสอบมีความเร็วลมในการพัดที่ไม่เท่ากันซึ่งอาจส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนได้ เนื่องจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ยังไม่มีกระจกปิด



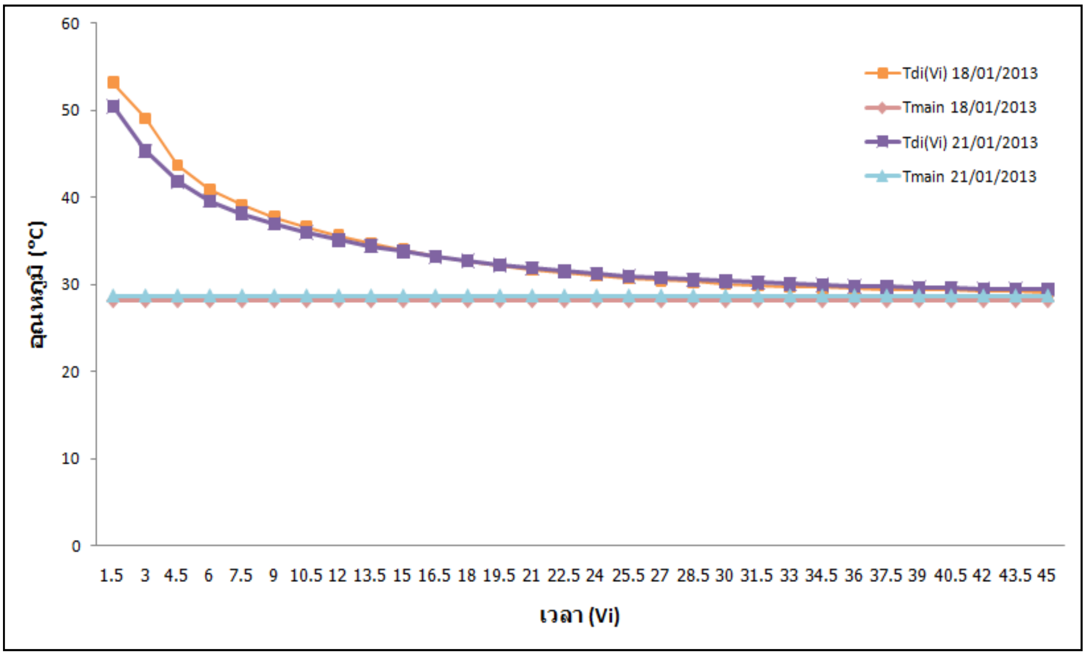
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด



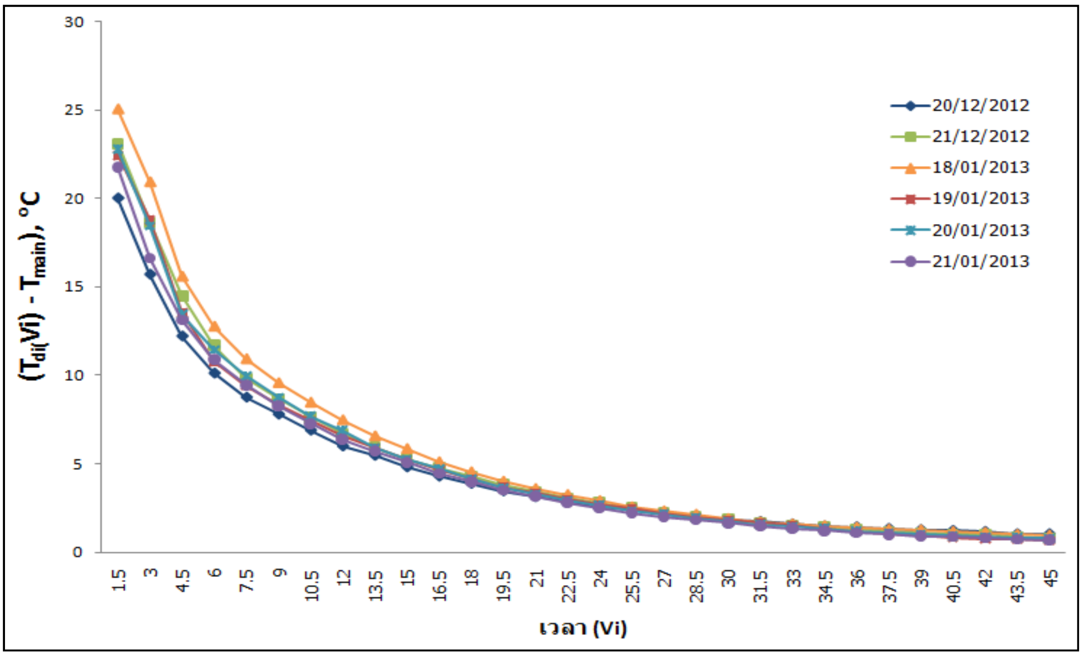
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

จากรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นผลของการทดสอบการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด พบว่า วันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 เป็นวันที่ทำอุณหภูมิน้ำร้อนได้สูงที่สุด โดยมีอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำที่สูงที่สุดเท่ากับ 53.16 °C และมีอุณหภูมิน้ำป้อนเท่ากับ 28.1 °C ในขณะที่วันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2556 มีอุณหภูมิน้ำน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 50.45 °C โดยผลจากกราฟนี้สอดคล้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำป้อนดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งวันที่ 18 มกราคม 2556 เป็นวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิสูงที่สุด และวันที่ 21 มกราคม 2556 เป็นวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่ารังสีอาทิตย์รวมและอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด ทำน้ำร้อนสูงที่สุดได้ในวันเดียวกับวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมสูงที่สุด นั่นก็คือวันที่ 18 มกราคม 2556



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

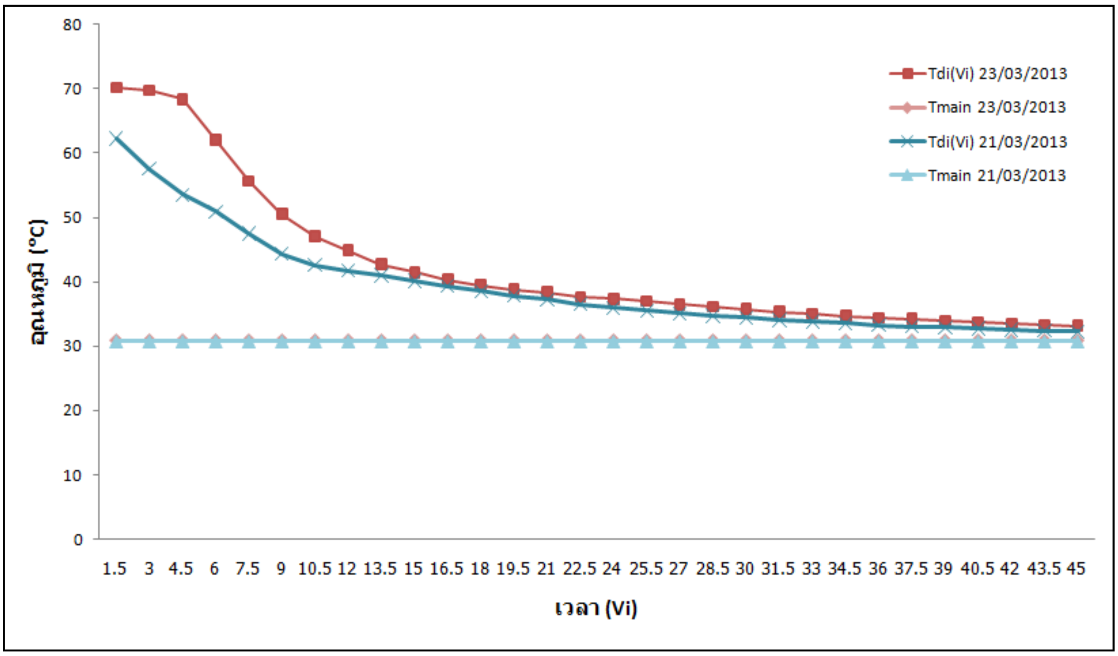


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

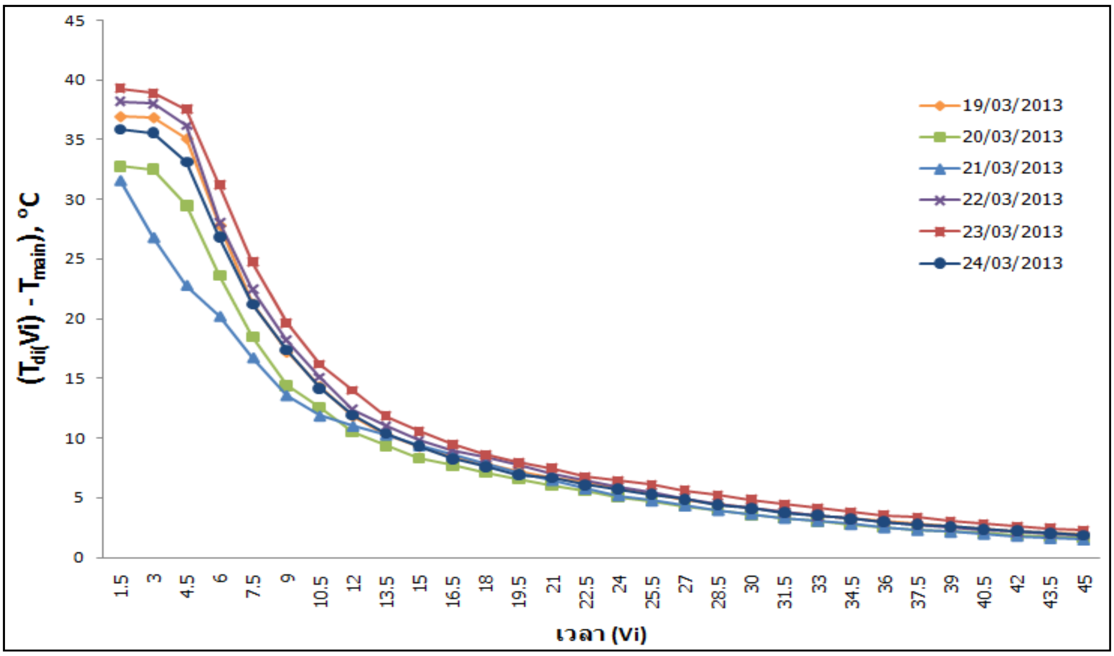
4.2.2.2 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีกระจกปิด

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D พบว่า วันที่ 23 มีนาคม 2556 เป็นวันที่สามารถทำอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำได้สูงที่สุด เท่ากับ 70 °C สอดคล้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำป้อน ที่เป็นวันเดียวกัน และวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 เป็นวันที่มีค่าอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำต่ำที่สุด โดยมีค่าอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำเท่ากับ 62.3 °C และยังเป็นวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

โดยวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556 เป็นวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์สูงที่สุดของการทดสอบส่งผลให้วันนี้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด สามารถทำน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำสูงที่สุดของการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้ และในวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 เป็นวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมและอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำต่ำที่สุดอีกด้วย

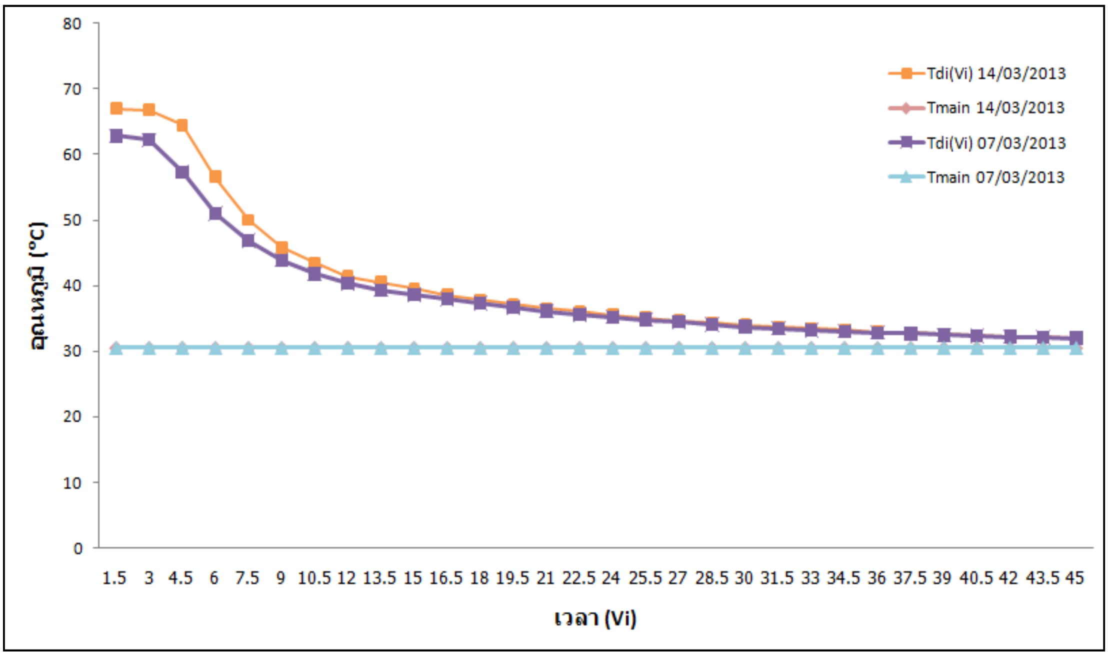


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

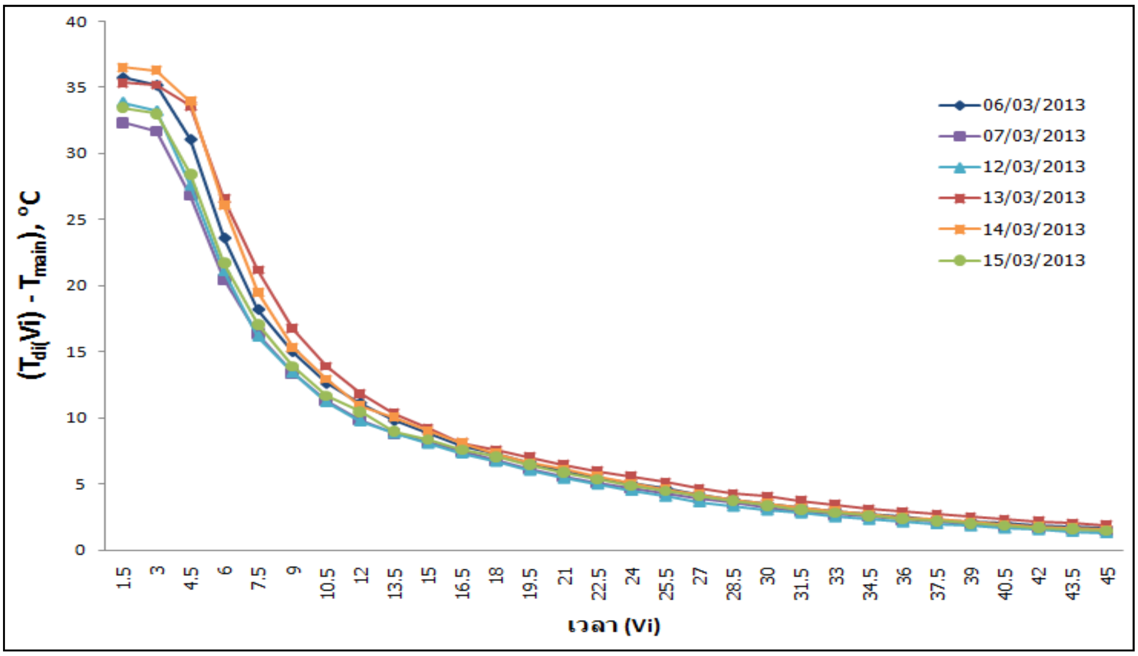


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

และจากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงถึงการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด พบว่า วันที่ 14 มีนาคม 2556 เป็นวันที่มีค่าอุณหภูมิความร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำสูงที่สุด คือเท่ากับ 67.0 °C และยังมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำป้อนสูงที่สุดอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับวันที่มีค่ารังสีอาทิตย์รวมสูงที่สุด และในวันที่ 7 มีนาคม 2556 เป็นวันที่มีค่าอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรต่ำที่สุด คือเท่ากับ 62.82 °C ซึ่งเป็นวันเดียวกับวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิและค่ารังสีอาทิตย์รวมต่ำที่สุด



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ จากการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีกระจกปิด พบว่าอุณหภูมิน้ำร้อนเพิ่มขึ้นจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ไม่มีกระจกปิดถึง 20 °C ซึ่งเป็นผลจากการลดอัตราการสูญเสียความร้อนด้านบน และเพิ่มความสามารถในการสะสมความร้อนได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและ ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D มีความสามารถในการทำน้ำร้อนได้สูงกว่า ทั้งมีกระจกปิดและไม่มีกระจกปิด จากที่กล่าวข้างต้นแล้วว่าค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 จะมีค่าสูงกว่า แบบ CL-750D ทำให้ในช่วงที่ค่ารังสีอาทิตย์ไม่สูง โดยเฉพาะช่วงเย็นที่อุณหภูมิบรรยากาศลดลง ทำให้การสูญเสียความร้อนยิ่งเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 จึงมีความสามารถในการสะสมความร้อนของน้ำร้อนได้ต่ำกว่าแบบ CL-750D

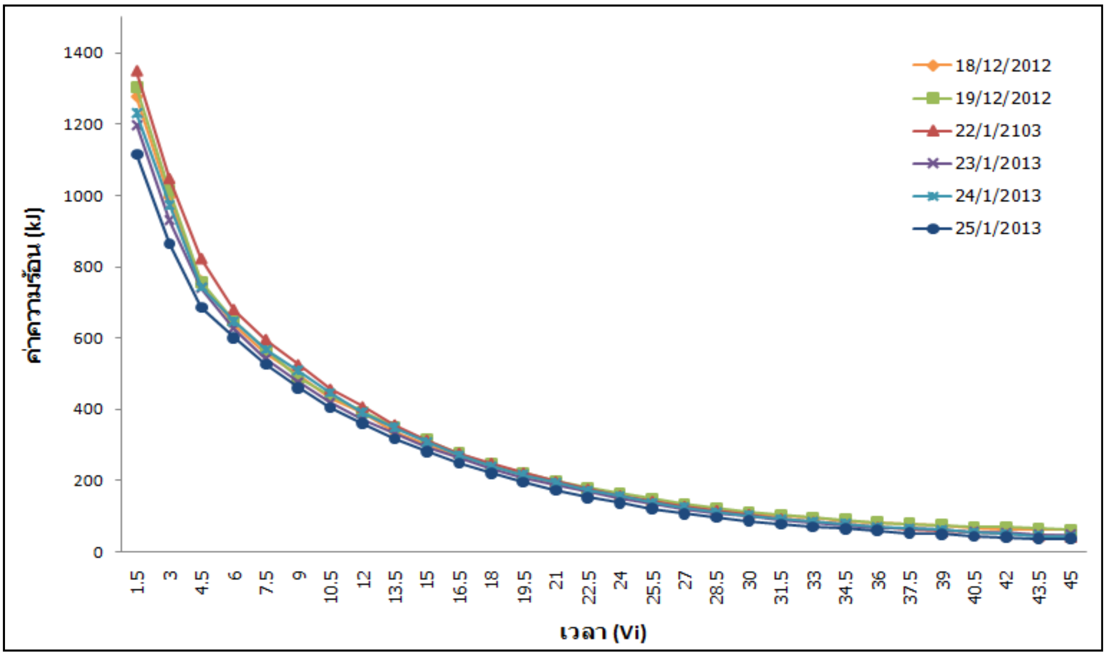
4.2.3 ผลของค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบ

ค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 จะใช้การคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ได้รับในแต่ละวันจากสมการ 2.54 โดยจะใช้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำและอุณหภูมิน้ำป้อน

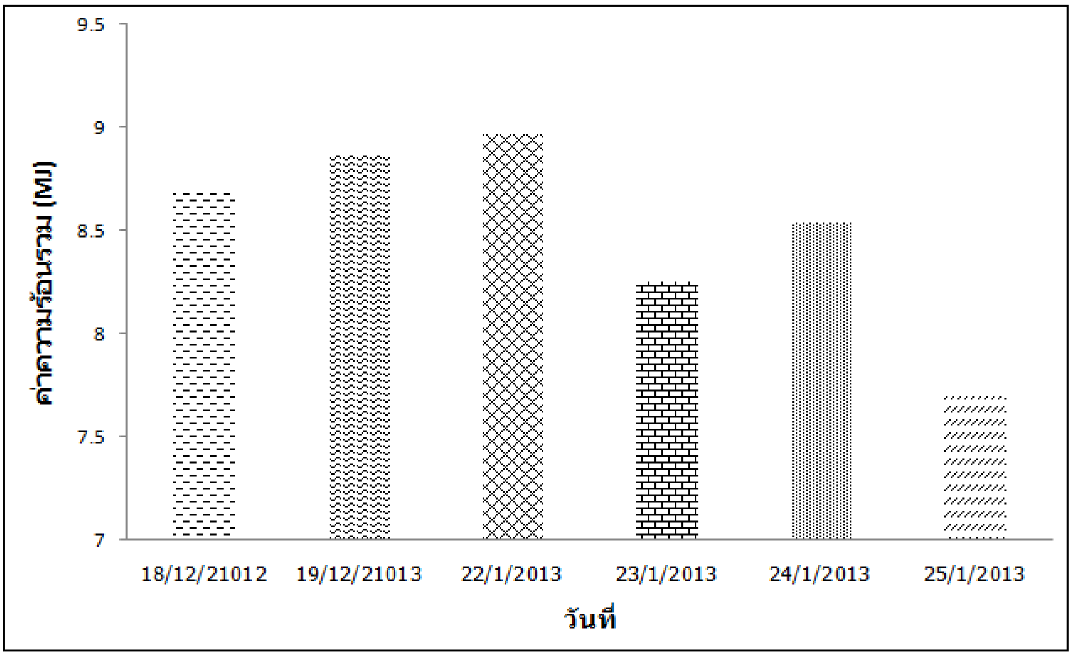
4.2.3.1 ค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด

ค่าความร้อนที่ได้จากทดสอบครั้งนี้เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการป้อนน้ำเป็นเวลา 45 นาที และนำข้อมูลมาคิดทุกๆ 15 Liters หรือทุกๆ 1.5 นาทีในอัตราการไหล 10 L/min ซึ่งจากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด จากรูปที่ 4.21 พบว่าวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่าความร้อนใน 1.5 นาทีแรกสูงที่สุด และมีค่าความร้อนรวม 45 นาที เท่ากับ 8.96 MJ ซึ่งมีค่าสูงที่สุดจากการทดสอบทั้ง 6 วัน และวันที่มีค่าความร้อนรวมต่ำที่สุดคือวันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีค่าความร้อนรวมเพียงแค่ 7.69 MJ โดยค่าความร้อนรวมของวันอื่นๆ จะแสดงในรูปที่ 4.22

โดยวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2556 ยังเป็นวันที่มีค่าความร้อนรวมสูงที่สุดเป็นผลจากมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่สูงที่สุดดังรูปที่ 4.14 และอีกด้านหนึ่ง วันที่ 25 มกราคม พ.ศ. 2556 ก็เป็นวันที่มีค่าทั้งสองต่ำที่สุด



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

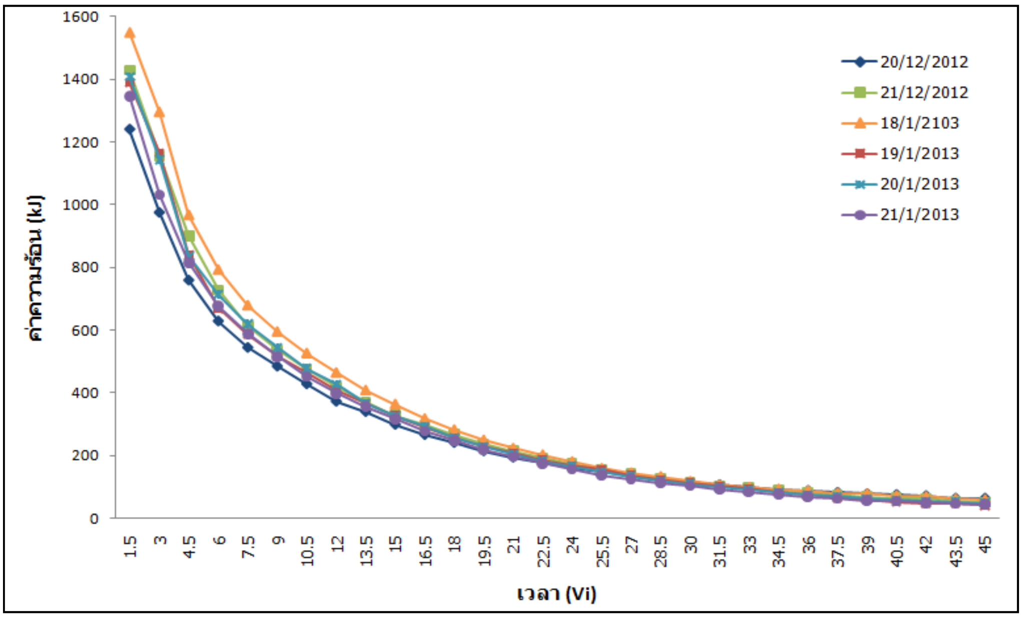


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับวันที่ทดสอบ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

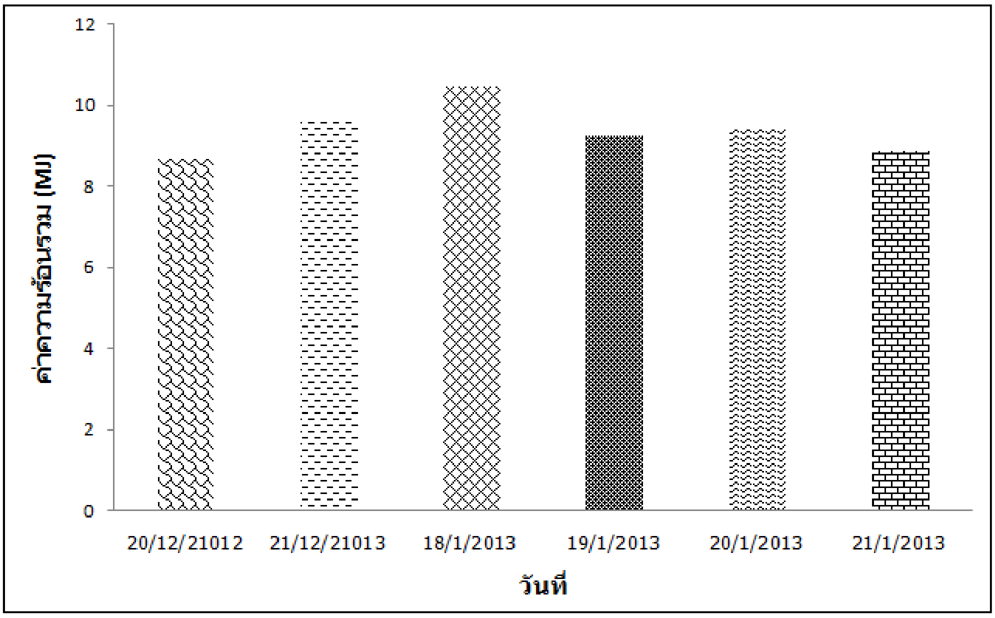
เมื่อนำผลการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิดทั้ง 6 วันมาหาสมการปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนตามสมการ 2.57 ในบทที่ 2 ทำให้ได้สมการปริมาณความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด ดังนี้

$$Q = 0.483036H + 0.231836\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + (-0.01556) \quad (4.1)$$

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจก จากรูปที่ 4.19 พบว่าวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่าความร้อนใน 1.5 นาทีแรกสูงที่สุด และมีค่าความร้อนรวมสูงที่สุด เท่ากับ 10.45 MJ และวันที่มีค่าความร้อนรวมต่ำที่สุดคือวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2555 โดยมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 8.66 MJ เช่นเดียวกันกับ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจก พบว่าวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 เป็นวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อน และค่าความร้อนรวมสูงที่สุด และวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2555 เป็นวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนและค่าความร้อนรวมต่ำที่สุด



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลาของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด



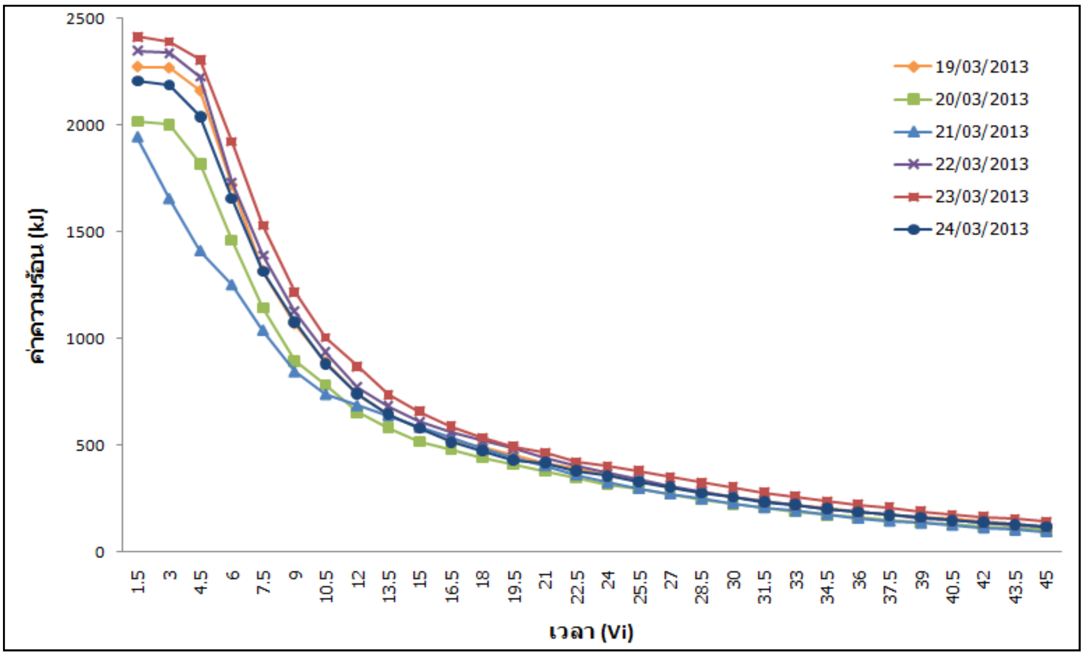
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

เมื่อนำผลการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิดทั้ง 6 วันมาหาสมการปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนตามสมการ 2.57 ในบทที่ 2 จะได้สมการปริมาณความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด ดังนี้

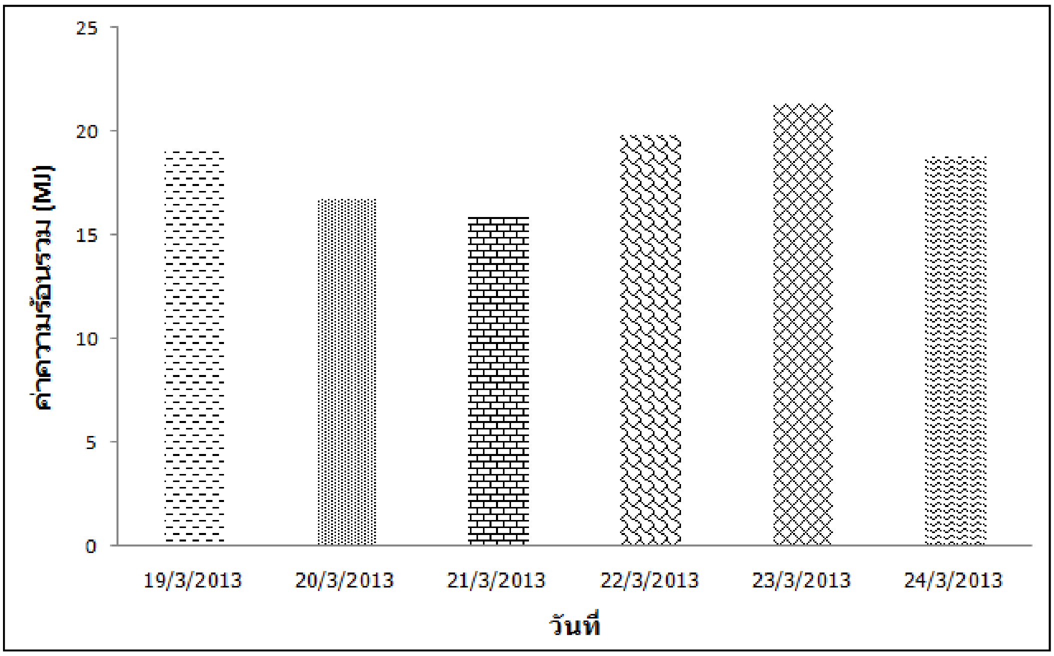
$$Q = 0.461624H + 0.144756\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + (-0.03331) \qquad (4.2)$$

4.2.3.2 ค่าความร้อนที่ได้จากกทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด พบว่า วันทดสอบในวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556 ค่าความร้อนใน 1.5 นาทีแรกและค่าความร้อนรวมสูงที่สุด ซึ่งมีค่าสูงที่สุด โดยค่าความร้อนรวมมีค่าเท่ากับ 21.33 MJ และวันที่มีค่าความร้อนรวมต่ำสุดเป็นวันทดสอบในวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 มีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 15.81 MJ ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 สอดคล้องกับวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่สูงที่สุดและต่ำที่สุด คือวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556 และ วันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา
ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

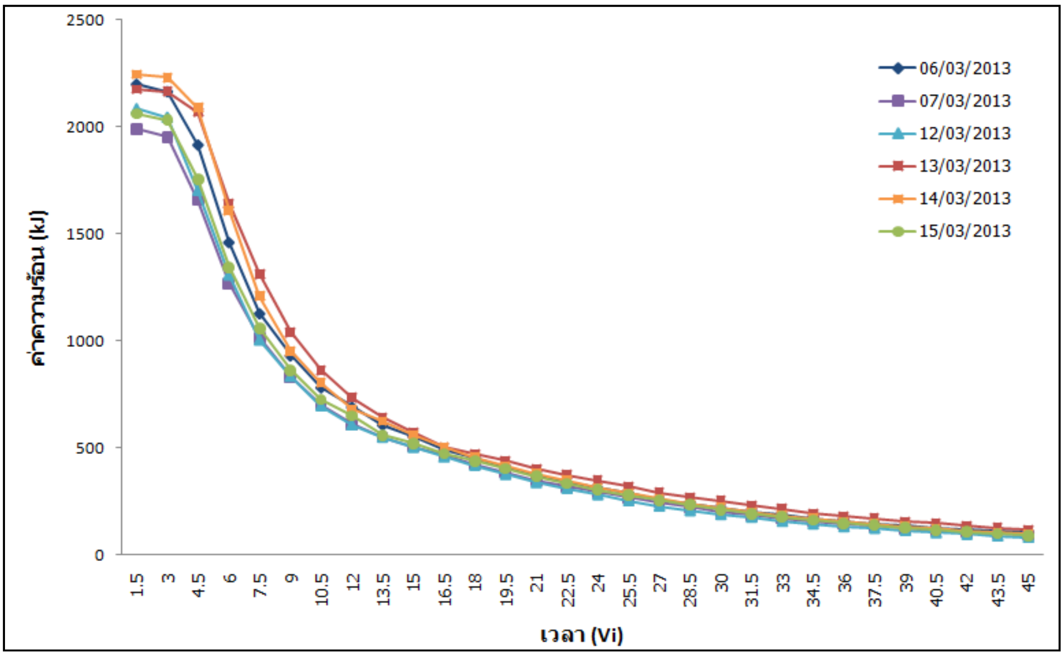


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

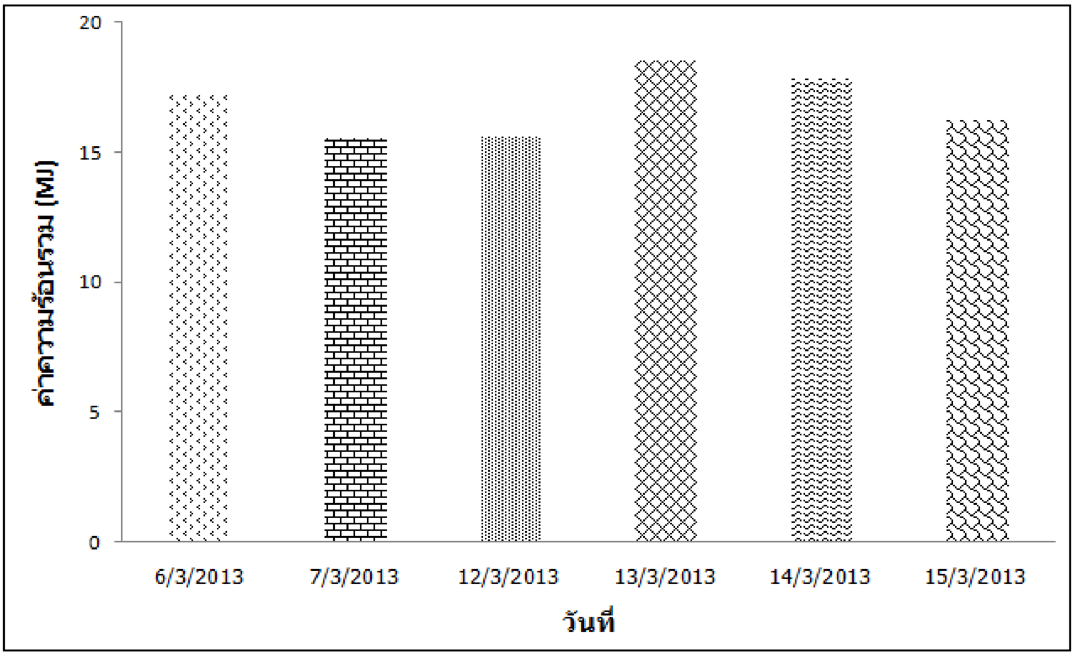
เมื่อนำผลการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิดทั้ง 6 วันมาหาสมการปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนตามสมการ 2.57 ในบทที่ 2 และได้สมการปริมาณความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ดังต่อไปนี้

$$Q = 0.794069H + 0.86986\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + \left(0.042679\right) \quad (4.3)$$

ในส่วนของการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิดพบว่า วันที่มีค่าความร้อนสูงสุดคือวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีค่าความร้อนรวม 18.54 MJ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 และตรงกับวันที่มีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่สูงที่สุดและวันที่ 7 มีนาคม พ.ศ. 2556 ก็คือวันที่มีค่าความร้อนรวมวันและมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนเฉลี่ยของปริมาตรน้ำกับอุณหภูมิน้ำป้อนที่ต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 15.55 MJ ในส่วนค่าความร้อนรวมในวันอื่นๆ จะแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนของน้ำทุกๆ 15 ลิตรกับเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนรวมที่ได้รับในแต่ละวันกับวันที่ทดสอบ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด

เมื่อนำผลการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิดทั้ง 6 วันมาหาสมการปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนตามสมการ 2.57 ในบทที่ 2 และได้สมการปริมาณความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด ดังต่อไปนี้

$$Q = 0.790801H + \left[\left(-0.14644\right)\left(t_{a(day)} - t_{main}\right)\right] + \left(-0.03683\right) \qquad (4.4)$$

หาค่าปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 2 แบบ ทั้งมีและไม่มีกระจกปิด โดยกำหนดค่าตัวแปรดังต่อไปนี้

ค่ารังสีอาทิตย์ (H) = 18 MJ

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($t_{a(day)}$) = 35 °C

อุณหภูมิน้ำป้อน (t_{main}) = 29 °C

แล้วนำไปแทนค่าในสมการ 4.1 – 4.4 ได้ค่าปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนตามตารางที่ 4.3

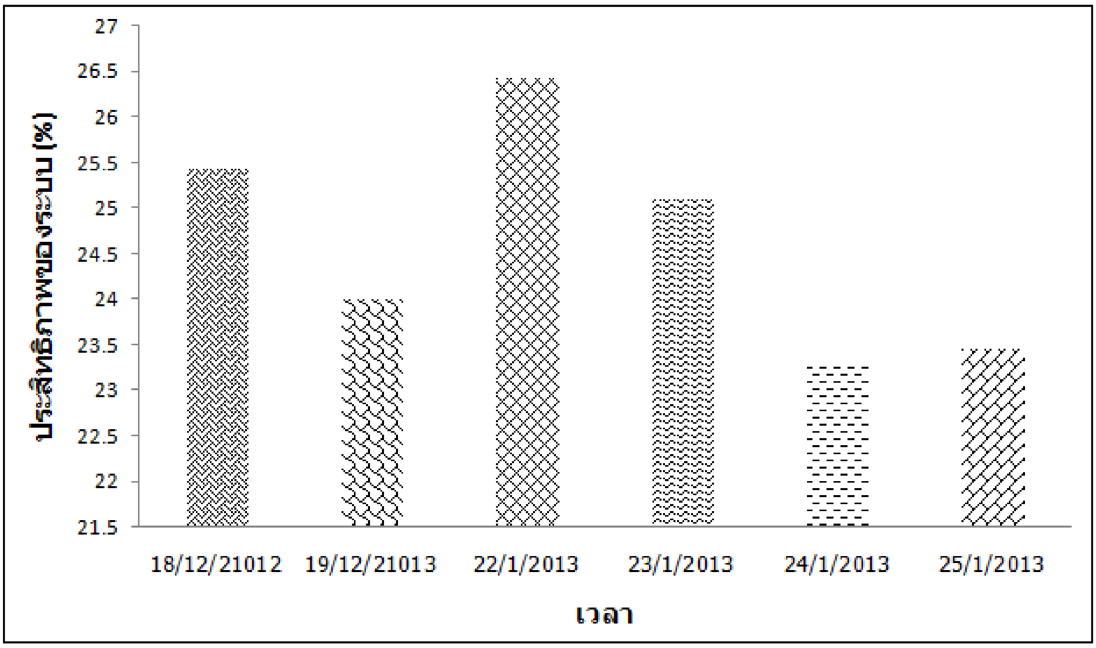
ตารางที่ 4.3 ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์

ตัวแปร	CL-750D ไม่มีกระจกปิด	CL-825 ไม่มีกระจกปิด	CL-750D มีกระจกปิด	CL-825 มีกระจกปิด
Q (MJ/day)	9.14	8.57	30.76	13.32

4.2.4 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนที่ได้จากการทดสอบ

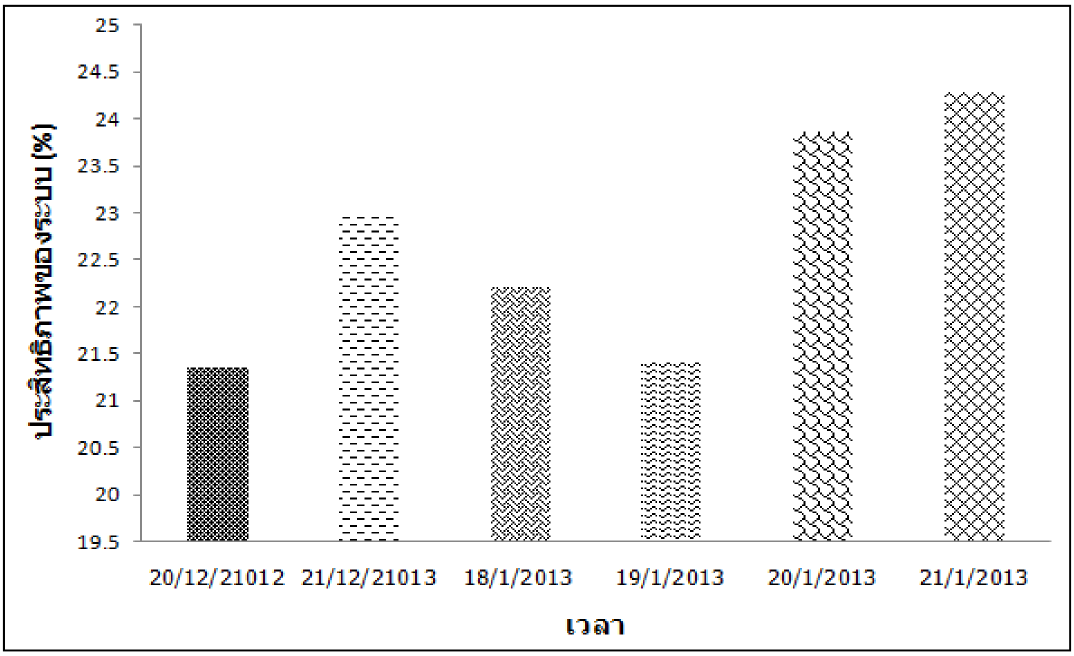
4.2.4.1 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ไม่มีกระจกปิด

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด เป็นเวลาในการทดสอบทั้งหมด 6 วัน พบว่าวันที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือวันที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 26.42 % ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนรวมที่สูงที่สุดที่เป็นวันเดียวกัน และวันที่มีค่าประสิทธิภาพของระบบต่ำที่สุด คือวันที่ 24 มกราคม พ.ศ. 2556 มีค่าเท่ากับ 23.26 %



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

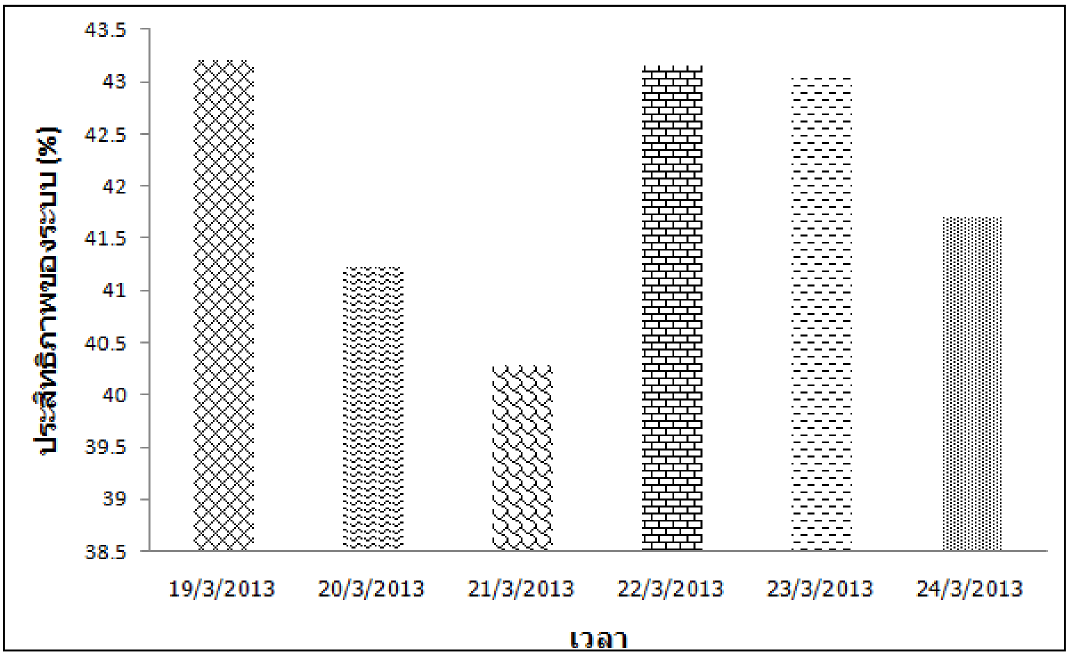
ในส่วนค่าประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 วันที่มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด คือวันที่ 21 มกราคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าเท่ากับ 24.28 % ซึ่งจากผลของค่าความร้อนรวม พบว่า วันนี้ไม่ได้เป็นวันที่มีค่าความร้อนรวมสูงที่สุด แต่กลับมีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเป็นผลจาก ค่ารังสีอาทิตย์ที่ต่ำแต่ยังสามารถสะสมความร้อนและทำอุณหภูมิน้ำร้อนได้ดี จึงมีค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นตามไปด้วย ในทางกลับกัน วันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2556 ที่มีค่าความร้อนสูงที่สุด แต่ก็มีค่ารังสีอาทิตย์สูงที่สุดด้วย เมื่อพิจารณาถึงสมการการหาค่าประสิทธิภาพ ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าความร้อนที่สะสมได้ตลอดวันกับพื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์คูณกับค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งถ้าค่ารังสีอาทิตย์สูงแต่กลับมีความสามารถในการสะสมความร้อนที่ต่ำจึงทำให้ได้ค่าความร้อนที่ต่ำ และค่าประสิทธิภาพของระบบก็จะต่ำลงไปด้วย



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

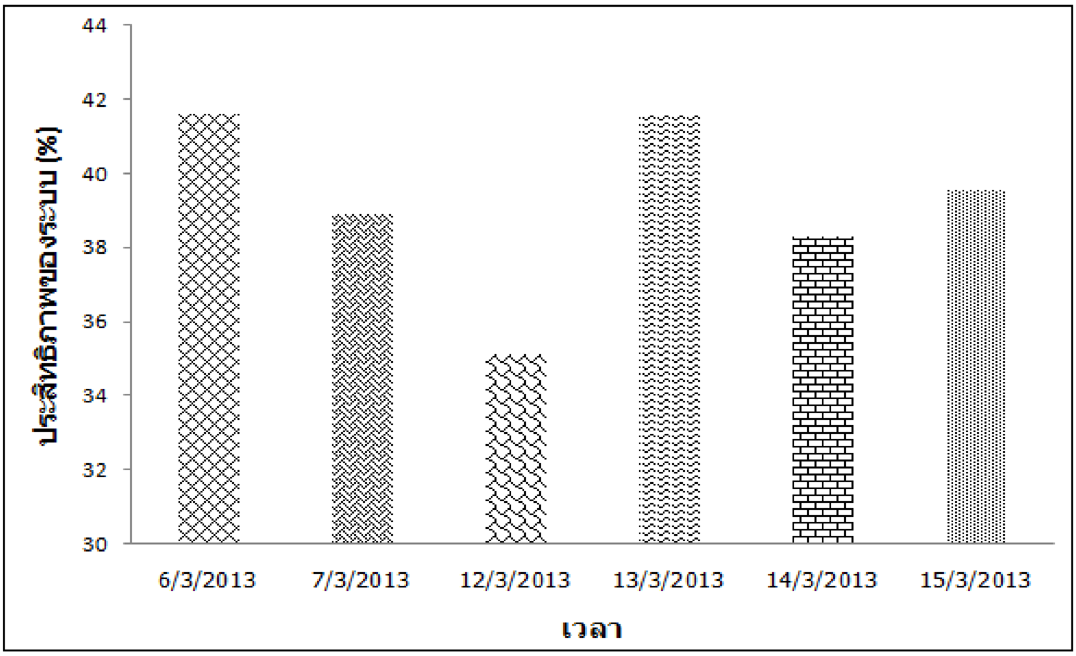
4.2.4.2 ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่มีกระจกปิด

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด พบว่าค่าประสิทธิภาพสูงกว่าตอนที่ไม่มีกระจกปิดอย่างเห็นได้ชัด โดยวันที่มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าเท่ากับ 43.20 % ซึ่งใกล้เคียงกับวันที่ 22 และ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งทั้งสามวันมีค่าความร้อนรวมและค่ารังสีอาทิตย์ที่ใกล้เคียงกันจึงได้ผลตามรูปที่ 4.31 และวันที่มีค่าประสิทธิภาพของระบบต่ำที่สุดคือวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าเท่ากับ 40.27 %



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

จากรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด โดยวันที่มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าเท่ากับ 41.6 % และ 41.54 % ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองวันเป็นวันที่มีค่าความร้อนที่สูงใกล้เคียงกัน และสูงกว่าวันอื่นๆ และค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุดคือวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2556 โดยมีค่าเท่ากับ 35.12 % ซึ่งเป็นวันที่มีค่าความร้อนรวมต่ำที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์กับวันที่ทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด

เมื่อได้ค่าความร้อนจากการคำนวณสมการ 4.1 – 4.4 เราสารถนำมาหาค่าปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (m) จากสมการที่ 2.59 และ หาความสามารถในการผลิตน้ำร้อน (η_m) จากสมการที่ 2.60 ในบทที่ 2 โดยคิดอุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้เท่ากับ 60 °C โดยทั้งสองค่าแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิดสามารถผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ได้เท่ากับ 133.75 Liters ซึ่งยังต่ำกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดที่ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ได้เท่ากับ 151.54 Liters โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ได้เท่ากับ 102.83 Liters ความสามารถในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดมีค่าสูงที่สุด รองลงมาก็คือ แบบ CL-750D และสุดท้ายคือแบบ CL-825 โดยมีค่าเท่ากับ 75.77, 66.88 และ 51.41 Liters/m^2

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความร้อนที่ได้รับในแต่ละวัน ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (m) และความสามารถมา-รถในการผลิตน้ำร้อน (η_m) ที่อุณหภูมิ 60 °C ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละชนิด

ตัวแปร	CL-750D ไม่มีกระจกปิด	CL-825 ไม่มีกระจกปิด	CL-750D มีกระจกปิด	CL-825 มีกระจกปิด	ทั่วไป
Q (MJ/day)	9.11	8.57	17.36	13.35	19.68
m (Liters)	75.47	70.84	133.75	102.83	151.54
η_m (Liters/m^2)	36.39	35.42	66.88	51.41	75.77

หมายเหตุ: ทั่วไปหมายถึงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั่วไปโดยอ้างอิงราคาจากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ราคาประหยัด

4.3 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

ข้อมูลเกี่ยวกับทางเศรษฐศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด โดยใช้วิธีเปรียบเทียบเงินลงทุนเทียบรายปีเป็นหลัก และเปรียบเทียบค่าทางเศรษฐศาสตร์แบบระยะเวลาคืนทุน ซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับเงินลงทุนดำเนินการขั้นแรกของระบบ พิจารณาจากราคาวัสดุ ค่าใช้จ่ายในการใช้งาน ค่าซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายอื่นๆ มีดังนี้

1. เงินทุนดำเนินการขั้นแรกของระบบ (P_1) พิจารณาจากราคาวัสดุ และค่าใช้จ่ายในการประกอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ดังแสดงในตารางที่ 4.5
2. มูลค่าซากของระบบเมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว (S) คิดเป็น 10% ของเงินลงทุนเบื้องต้น
3. อัตราดอกเบี้ยปีต่อปี (i) กำหนดให้เป็น 7.5% ต่อปี
4. อายุการใช้งานระบบ (n) กำหนดให้เป็น 10 ปี
5. ปริมาณความร้อนที่ระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ผลิตได้ต่อวันเมื่อ

ค่ารังสีอาทิตย์ (H)	=	18 MJ
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($t_{a(day)}$)	=	35 °C
อุณหภูมิน้ำป้อน (t_{main})	=	29 °C

6. ค่าใช้สอยและค่าซ่อมบำรุง (α) เป็นค่าซ่อมบำรุงประจำปีประมาณ 3% ต่อระบบต่อปี

ตารางที่ 4.5 ราคาต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ

ชนิดตัวรับรังสี / ราคา / อุปกรณ์ (฿)	CL-750D	CL-825	ทั่วไป
แผ่นดูดกลืนรังสี (แผ่นโลหะ)	400	390	2088
ท่อหลัก (อลูมิเนียม)	200	200	2800
ท่อร่วม (อลูมิเนียม)	320	250	1500
ฉนวน (พียูโฟม)	540	540	-
ค่างานประกอบ			
- ค่าริเวท	300	200	-
- ค่าเชื่อมท่อหลักและท่อร่วม	780	600	-
สี (สีพ่นดำด้าน)	300	300	-
ระบบท่อน้ำ วาล์ว และข้อต่อ	150	150	600
กาวอุดรอยรั่ว	70	70	100
ฉนวนแอโรเทป	75	75	-
วัสดุปลีกย่อย	-	-	1092
รวม	3135	2775	8180
กรอบ	800	800	3000
กระจก	600	600	760
ฉนวนกันความร้อนด้านล่าง	200	200	271
รวม	4735	4375	12211
ถังเก็บน้ำร้อน	15000	15000	18500
ค่าแรงในการสร้างถัง	2000	2000	5000
รวมระบบทั้งหมด	21730	21375	35711

หมายเหตุ: ข้อความในวงเล็บแสดงถึงวัสดุที่ใช้กับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และ CL-825 และทั่วไปหมายถึงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั่วไปโดยอ้างอิงราคาจากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ราคาประหยัด โดยเปลี่ยนรายละเอียดบางส่วนตามเห็นสมควร

ตารางที่ 4.6 ผลการประเมินเงินลงทุนเทียบเท่ารายปี

รายการ	CL-750D	CL-825	ทั่วไป
1. เงินลงทุนเบื้องต้น (฿)	21735	21375	35711
2. อัตราดอกเบี้ย[(1)] (%)	7.5	7.5	7.5
3. มูลค่าซากวัสดุเมื่อครบอายุ 10 ปี คิดเป็น 10%[(2)] ของเงินลงทุนเบื้องต้น, s (฿)	2173.5	2137.5	3571.1
4. ค่าใช้สอยและซ่อมบำรุง คิดเป็น 3%[(3)] ของเงินลงทุนเบื้องต้น, α (฿/year)	652.05	641.25	1071.33
5. เงินลงทุนเทียบเท่ารายปี, C_a (฿/year)	3664.89	3604.19	6021.49
6. อุณหภูมิน้ำใช้งาน (°C)	60	60	60
7. ประสิทธิภาพของระบบ (%)	54.31	38.6	76.61
8. ความร้อนที่ผลิตได้ (MJ/year)	6336.708	4871.483	7183.2
9. พลังงานที่ผลิตได้ (kW.hr/year)	1760.20	1353.19	1995.3

หมายเหตุ: ทั่วไปหมายถึงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั่วไป โดยอ้างอิงราคาจากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ราคาประหยัด

ที่มา: [(1)], [(2)] และ [(3)] (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C

อายุการใช้งาน	CRF	P(CRF)	SFF	S(SFF)	รายจ่ายต่อปี (฿/year)	ต้นทุนการผลิตความร้อนต่อหน่วย (฿/kW.hr)
5	0.25	5372.13	0.17	374.20	5649.98	3.21
10	0.15	3166.48	0.07	153.64	3664.90	2.08
15	0.11	2462.30	0.04	83.22	3031.13	1.72
20	0.10	2132.03	0.02	50.19	2733.89	1.55
25	0.09	1949.86	0.01	31.97	2569.94	1.46

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C

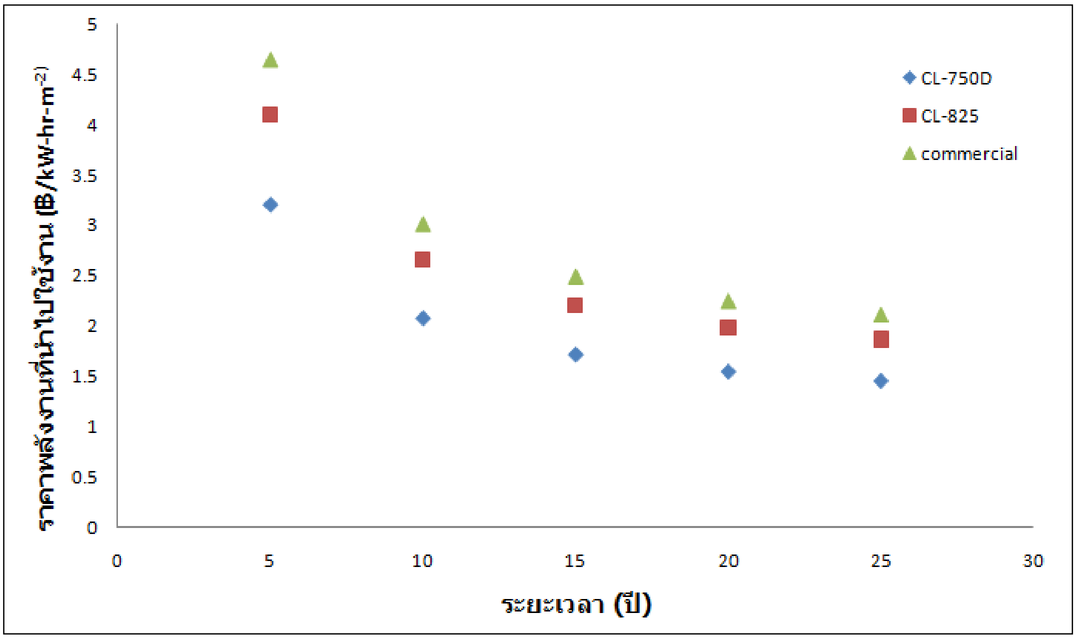
อายุการใช้งาน	CRF	P(CRF)	SFF	S(SFF)	รายจ่ายต่อปี (฿/year)	ต้นทุนการผลิตความร้อนต่อหน่วย (฿/kW.hr)
5	0.25	5283.15	0.17	368.00	5556.39	4.11
10	0.15	3114.04	0.07	151.09	3604.20	2.66
15	0.11	2421.51	0.04	81.84	2980.93	2.20
20	0.10	2096.72	0.02	49.36	2688.61	1.99
25	0.09	1917.57	0.01	31.44	2527.37	1.87

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาด ที่อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C

อายุการใช้งาน	CRF	P(CRF)	SFF	S(SFF)	รายจ่ายต่อปี (฿/year)	ต้นทุนการผลิตความร้อนต่อหน่วย (฿/kW.hr)
5	0.25	8826.50	0.17	614.82	9283.01	4.65
10	0.15	5202.59	0.07	252.43	6021.49	3.02
15	0.11	4045.60	0.04	136.73	4980.20	2.50
20	0.10	3502.97	0.02	82.46	4491.84	2.25
25	0.09	3203.66	0.01	52.53	4222.45	2.12

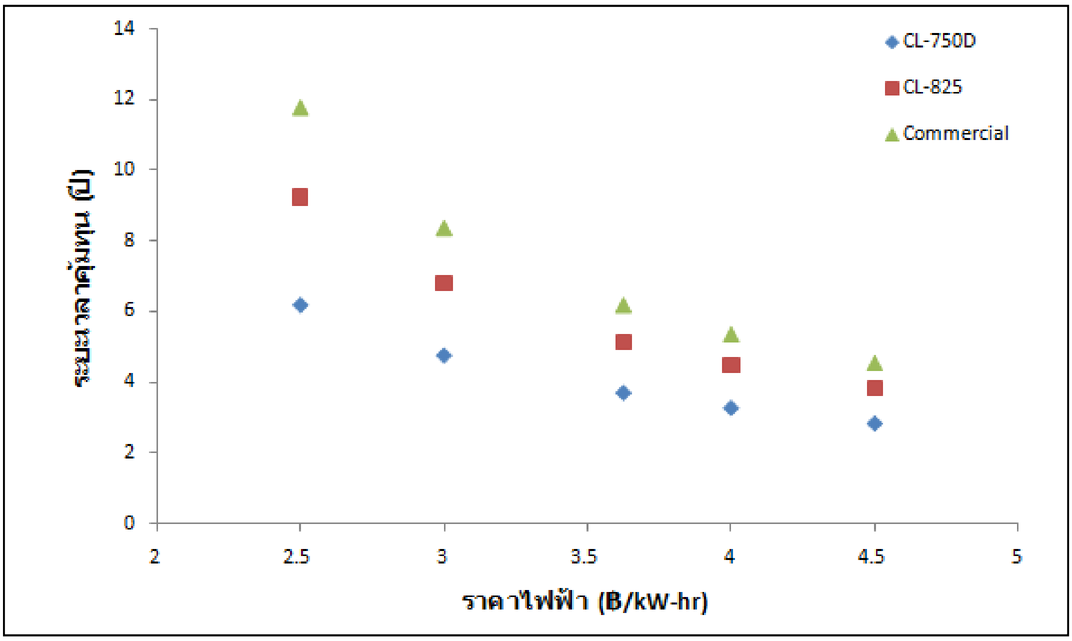
จากตารางที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบอายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D, แบบ CL-825 และตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดตามลำดับ โดยคิดที่อุณหภูมิน้ำใช้งานเท่ากับ 60 °C พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาดมีราคาค่าใช้จ่ายต่อปีที่สูงที่สุด คือเท่ากับ 6021.49 ฿/year เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการใช้งาน 10 ปี รองลงมาเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีราคาค่าใช้จ่ายต่อปีเท่ากับ 3664.90 ฿/year และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีราคาค่าใช้จ่ายต่อปีถูกที่สุด เท่ากับ 3604.20 ฿/year และจากราคาต้นทุนการผลิตความร้อนพบว่า ที่อายุการใช้งาน 5 ปี ราคาต้นทุนการผลิตความร้อนนั้นมีราคาที่แพงกว่าราคาไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งหากเป็นเช่นนี้จะ

พบว่า ยังไม่มีความคุ้มทุนพอในการนำไปใช้งาน แต่ถ้าหากมาพิจารณาที่อายุการใช้งาน 10 ปี พบว่ามีราคาต้นทุนการผลิตความร้อนที่ต่ำกว่าราคาไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีต้นทุนการผลิตความร้อนถูกที่สุด สอดคล้องกับค่าพลังงานที่ผลิตได้สูงที่สุด รองลงคือแบบ CL-825 และสุดท้ายเป็นแบบที่ขายตามท้องตลาด โดยมีค่าเท่ากับ 2.08, 2.66 และ 3.02 ฿/kW-hr ดังแสดงในรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาพลังงานที่นำไปใช้งาน ณ อุณหภูมิน้ำใช้งาน 60 °C กับระยะเวลาการใช้งานของระบบที่อัตราดอกเบี้ย 7.5%

และจากรูปที่ 4.34 จากการคำนวณหาระยะเวลาคุ้มทุนพบว่า เมื่อคิดที่ราคาไฟฟ้า 3.6246 ฿/kW-hr ซึ่งเป็นราคาไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง และเปรียบเทียบกับเครื่องทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90% พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีระยะเวลาคุ้มทุนเป็น 3 ปี 8 เดือน 4 วัน ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด รองลงมาเป็น ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีระยะเวลาคุ้มทุนเป็น 5 ปี 1 เดือน 20 วัน และเมื่อเทียบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขาตามท้องตลาดพบว่า มีระยะเวลาคุ้มทุนเท่ากับ 6 ปี 2 เดือน 12 วันและเมื่อคิดที่ราคาไฟฟ้าต่างๆ จะได้ผลการคำนวณตามรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาคุ้มทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบต่างๆ กับราคาพลังงานไฟฟ้าค่าต่างๆ

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการประยุกต์ใช้แผ่นโลหะมาเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ ในตัวเก็บรังสีอาทิตย์สองแบบ คือ CL-750D และ CL-825 แล้วนำไปทำการทดสอบหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ตามมาตรฐาน ISO 9806-1 และ ISO 9459-2 ตามลำดับ โดยจากการศึกษาได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. ออกแบบและสร้างตัวต้นแบบของรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย โดยประยุกต์ใช้แผ่นโลหะมาเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ โดยได้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สองแบบ คือแบบ CL-750D ลักษณะเป็นลอนโค้งคล้ายหลังคาสังกะสี โดยท่อร่วมเป็นท่ออะลูมิเนียม หน้าตัดเป็นวงกลม มีจำนวน 13 ท่อ และแบบ CL-825 ลักษณะลอนเป็นเหลี่ยม และใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อร่วมหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีจำนวนท่อร่วม 10 ท่อ
2. ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 55.51% ซึ่งสูงกว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 49.09%
3. จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 ในกรณีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไม่มีกระจกปิด พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D สามารถทำความร้อนได้มากกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ซึ่งมีค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 9.11 MJ/day และ 8.57 MJ/day ตามลำดับ และสอดคล้องกับความสามารถในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D สามารถผลิตได้เท่ากับ 36.39 Liters/m^2 โดยมีค่าสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีค่าเท่ากับ 35.42 Liters/m^2 ในกรณีที่ตัวเก็บเก็บรังสีอาทิตย์มีกระจกปิดพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 17.36 MJ/day และมีความสามารถในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เท่ากับ 66.88 Liters/m^2 ซึ่งสูงกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 โดยแบบ CL-825 มีค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 13.35 MJ/day และมีค่าความสามารถในการผลิตน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เท่ากับ 51.41 Liters/m^2
4. การสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีต้นทุนโดยคิดค่าใช้จ่ายสำหรับถังสะสมความร้อนรวมเข้าไปด้วย พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด มีค่าต้นทุนเท่ากับ 21,730 บาท และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด มีค่าต้นทุนเท่ากับ 21,735 บาท และเมื่อเทียบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาดซึ่งคิดรวมกับถังสะสมความร้อน มีราต้นทุนเท่ากับ 35,711 บาท ซึ่งจากราคาต้นทุนนับได้ว่าเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่ายที่มีต้นทุนต่ำ และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

พบว่าที่อายุการใช้งาน 10 ปี ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีราคาพลังงานถูกที่สุด เท่ากับ 2.08 ฿/kW-hr รองลงมาเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 มีราคาพลังงานเท่ากับ 2.66 ฿/kW-hr สุดท้ายเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีขายตามท้องตลาดมีราคาพลังงานเท่ากับ 3.02 ฿/kW-hr และเมื่อมาพิจารณาที่ระยะเวลาคืนทุน พบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีระยะเวลาคืนทุนเพียง 0.64 ปี ซึ่งน้อยกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด คือ 3 ปี 8 เดือน 4 วัน ลองมาเป็นแบบ CL-825 มีระยะเวลาคุ้มทุนเป็น 5 ปี 1 เดือน 20 วัน และทั้งสองแบบมีระยะเวลาคืนทุนที่น้อยกว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ขายตามท้องตลาด ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 6 ปี 2 เดือน 12 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยอาจเปลี่ยนจากท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อทองแดงเนื่องจากท่อทองแดงมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่า แล้วทำการเปรียบเทียบหาระยะเวลาคืนทุนระหว่างท่อทั้งสอง
2. ควรลองสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยใช้แผ่นโลหะ โดยหันท่อน้ำภายในแผงมารับรังสีอาทิตย์แล้วทำการเปรียบเทียบดูว่ามีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หรือไม่
3. ในการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แต่ละแบบควรคำนึงถึงระยะห่างของครีบที่เหมาะสม และพื้นที่สัมผัสในการรับความร้อนระหว่างแผ่นรับรังสีอาทิตย์และท่อน้ำภายในแผง เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ให้ดีขึ้น
4. เนื่องจากการเชื่อมท่ออะลูมิเนียมยังมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นหากต้องการลดค่าใช้จ่ายลงในส่วนนี้ ควรหาวิธีการเชื่อมหรือการต่อกันระหว่างท่อร่วมและท่อหลักให้หลากหลายกว่านี้ และประเมินว่าอายุการใช้งานของท่อน้ำภายในแผงแบบใดที่มีอายุการใช้งานสูงที่สุด

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2555, **รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2553** [Online], Available: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/6may54_circular/energy_53_2.pdf [23 มกราคม 2555].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555, **แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี** [Online], Available: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/y51_y65.pdf [23 มกราคม 2555].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554, **รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ราคาประหยัด**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

กัณยารัตน์ เรืองเดช, 2544, **เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ระบบเทอร์โมไซฟอน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร, หน้า 9-11.

กิตติ สถาพรประสาธน์, 2541, **การพัฒนาการใช้ผนังทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับประเทศไทย**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-3, 26-45.

เกษม โพธิ์งาม, 2545, **การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์น้ำหนักเบาที่ใช้ในบ้านพักอาศัย,** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1–12.

กฤษณพงศ์ กีรติกร, 2547, **รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-8.

จงจิตร์ หิรัญลาภ, 2541, **กระบวนการพลังงานแสงอาทิตย์ในรูปความร้อน**, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 5-12.

ชาญวิทย์ วุฒิวงศานนท์, 2545, **การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบประหยัด**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 1-4, 34-54.

ธาดา วรุณโชติกุล, ประภัสสร ว่องชิงชัย และ พงษ์พันธ์ สุขสาร, สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, สำนักนโยบายและแผนยุทธศาสตร์ สำนักปลัดกระทรวงพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2551, **โครงการการจัดทำระบบฐานข้อมูลพลังงานเพื่อการวิเคราะห์และวางแผนยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศไทย พลังงานจากแสงอาทิตย์ (Solar Energy)**, [Online], Available: http://www.thaienergydata.in.th/econtent/upload_pic/1190198489.pdf [30 มกราคม 2555].

ธีระ นนทะภา, 2550, **การศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้แผ่นดูดกลื่นรังสีที่ผลิตจากกระป๋องอะลูมิเนียมใช้แล้วที่มีและไม่มีวัสดุเก็บสะสมความร้อนร่วมกับชุดสารดูดความชื้น**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, หน้า 6-7.

นฤมล สมพลเดช, 2535, **การประยุกต์เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับใช้ในครัวเรือน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัยพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, หน้า 15-20.

บริษัท เจริญพรอินเตอร์กรุ๊ป จำกัด, **หลังคาเมทัลชีท (Metal Sheet)** [Online], Available: http://charoenpornintergroup.com/หลังคาเมทัลชีทหรือกันสาดเมทัลชีท.html [3 กุมภาพันธ์ 2555].

บริษัท เทคโนโลยี มีเดีย จำกัด, 2553, **ฉนวนกันความร้อน เพื่อบ้านอยู่สบาย ประหยัดพลังงาน** [Online], Available: http://www.totacademy.com/upload-elearning/STjnhY15txdubqDc/41/mainmedia/19_Heat_ Protection.pdf [3 กุมภาพันธ์ 2555].

บริษัท บางกอกอินซูเลท จำกัด, **ฉนวนกันความร้อนได้อย่างไร?** [Online], Available: http://www.bangkok-insulate.com/download/howto.pdf, [3 กุมภาพันธ์ 2555].

บริษัท แผ่นหลังคาเมทัลชีท.com, **มารู้จักแผ่นหลังคาเหล็กเมทัลชีท** [Online], Available: http://www.xn--42cfk5cbhu7b7ae4dzdel4c4ki1k.com/Steel_Metal_Sheet_Roof/Aluzinc_Metal_Sheet_Roofing.html, [3 กุมภาพันธ์ 2555].

บริษัท เลิศลอย เมทัลชีท จำกัด, **หลังคาเมทัลชีท (Brochures)** [Online], Available: http://www.lertloy.com/pdf/roof.pdf, [3 กุมภาพันธ์ 2555].

บริษัท สตีลอินเตอร์เทค จำกัด (มหาชน), **Metal Sheet Products Solutions Provider**, หน้า 15.

ปรีดา จันทวงษ์, 2542, **การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อใช้ในบ้าน**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 9-16.

พลทรัพย์ บุญวานิช, 2523, **การศึกษาเปรียบเทียบเครื่องทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 2-8, 37-65.

ภัทริน จินดาวัฒนานนท์, 2551, **การศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มทุนในการใช้ฉนวนกันความร้อนที่หลังคาของบ้านพักอาศัยในกรุงเทพฯ และเชียงใหม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม ภาควิชาสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร, หน้า 17-20.

สำรวย ภูบาล, 2550, “การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นดูดรังสีเพื่อทำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ”, **วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**, หน้า 52-62.

อโศก ศรีทองธรรม, 2551, **การปรับปรุงสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์ในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดไหลเวียนตามธรรมชาติ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, หน้า 1-5.

Churasia, P.B.L., 2000, “Solar Water Heaters Based on Concrete Collectors”, **Energy,** Vol. 25, No. 8, pp. 703-716.

Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P. and Louche, A., 2001, “Modelling and Performance of a Copolymer Solar Water Heating Collector”, **Solar Energy,** Vol. 72, No. 2, pp. 99-112.

Dagdougui, H., Ouammi, A., Robba, M. and Sacile, R., 2010, "Thermal analysis and Performance Optimization of Solar Water Heater Flat plate Collector: Application to Tétouan (Morocco)", **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 15, No. 1, pp. 630-638.

Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991, **Solar Engineering and Thermal Process**, New York, John Willey and Sons, pp. 11-97, 229-322.

Ho, C.D., Chen, T.C. and Tsai, C.J., 2010, "Experimental and Theoretical Studies of Recycle Flat-plate Solar Water Heaters Equipped with Rectangle Cunduits", **Renewable Energy**, Vol. 35, No. 10, pp. 2297-2787.

Khalifa, A.D.J. and Jabbar, R.A.A., 2009, "Conventional Versus Storage Domestic Solar Hot Water System: A Comparative Performance Study", **Energy Conversion and Management**, Vol. 51, No. 2, pp. 265-270.

Lima, J.B.A., Prado, R.T.A. and Taborianski, V.M., 2005, "Optimization of Tank and Flat-plate Collector of Solar Water Heating System for Single-family Households to Assure Economic Efficiency Through the TRNSYS Program", **Renewable Energy**, Vol. 31, No. 10, pp. 1581-1595.

Marina S. de Oliveira Ilha and Marilia Ferraz Ribeiro, 2012, "Adoption of Technology by the Low-income Population Segment: The Low-cost Hot Water Heater case", **Habitat International,** Vol. 36, No. 1, pp. 185-191.

Naris Pratinthong, 1996**, Long Term Simulation of Concrete Solar Collector**, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, pp. 18-22.

Narupat Amornkosit, 2007, "Renewable Energy Policy: Recent Policies on SPP/VSPP", **Reneable Energy Asia 2007 Conference**, Bangkok BITEC

Siqueira, D.A., Vieira, L.G.M. and Damasceno, J.J.R., 2011, "Analysis and Performance of Low-cost Solar Heater", **Renewable Energy**, Vol. 36, No. 9, pp. 2538-2546.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย

ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบที่มีจำหน่ายในประเทศไทย

บริษัท	พื้นที่รับแสง (m^2)	ประสิทธิภาพสูงสุด (%)	FR($\tau\alpha$)	FR(U_L)
บริษัท GS	1.77	54.97	0.55	6.59
บริษัท A	1.81	80.18	0.80	8.95
บริษัท SS	1.83	73.59	0.74	9.80
บริษัท I	1.85	50.30	0.50	4.23
บริษัท S_1	1.86	73.68	0.74	5.03
บริษัท R_1	1.87	66.16	0.66	5.76
บริษัท S_2	1.88	71.37	0.71	7.74
บริษัท P_1	1.89	76.15	0.76	6.84
บริษัท O	1.90	59.73	0.60	6.06
บริษัท C_1	1.90	62.32	0.62	6.15
บริษัท V_1	1.90	82.82	0.83	7.22
บริษัท LEK	1.90	72.68	0.73	8.22
บริษัท V_2	1.90	67.25	0.67	7.31
บริษัท Q	1.91	71.24	0.71	6.38
บริษัท U	1.91	62.88	0.63	8.97
บริษัท C_2	1.91	63.95	0.64	6.17
บริษัท W_1	2.07	67.69	0.68	6.41
บริษัท W_2	2.07	75.32	0.75	8.20
บริษัท P_2	2.14	66.73	0.67	5.47
บริษัท R_2	2.14	73.34	0.73	7.55
บริษัท L	2.36	62.67	0.63	6.29
บริษัท P_3	2.50	78.68	0.79	6.03
บริษัท R_3	2.59	67.39	0.67	5.21
ค่าเฉลี่ย		**68.74**	**0.69**	**6.81**
Max		**82.82**	**0.83**	**9.80**
Min		**50.30**	**0.50**	**4.23**

ภาคผนวก ข

ข้อมูลต้นทุนระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุน

Components	**Materials and Dimension**	**Unit**
Overall Collector Dimensions	1806×1090×80	mm
Weight of Collector	30	kg
Aperture Area	2	m^2
Number of Risers	8	
Fluid Capacity	2.25	liters
Riser Tube	Φ10×δ0.45 mm copper tube	
Header Tube	Φ25 or Φ22×δ0.6 mm copper tube	
Insulation Material	Micro fiber and Aluminum foil	
Insulation Thickness-Base	50	mm
Insulation Thickness-Sides	50	mm
Absorber Material	Black Coated Aluminum	
Effective Absorber Surface Area	2	m^2
Absorber Plate Thickness	0.15	mm
Absorber Plate Dimensions	1806×1090	mm
Glazing Type	Tempered Low Iron	
Glazing Thickness	4	mm
Glazing Transmittance	0.87 min	
Glazing Iron Oxide Content	$<$ 0.03	%
Stainless Steel Storage Tank	(304 grade A) 2.5	mm
dia.	480	mm
length	1250	mm

รูปที่ ข.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แผ่นราบและถังสะสมความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุน

ตารางที่ ข.2 ต้นทุนวัสดุของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบและถังสะสมความร้อน

Item	Type of material	Specification	Quantity	Cu – Cu GS Tank	Al – Cu GS Tank	Al – Cu SS Tank
1	**Collector (Dimension 1806 mm × 1090 mm × 80 mm)**					
1.1	Plain Window Glass (clear)	4 mm	2.00 m2	1650	1650	1650
1.2	Aluminum sheet	26 swg (0.46 mm)	2.00 m2	-	420	420
1.3	Copper sheet	32 swg	2.00 m2	11668	-	-
1.4	Glass wool insulation		25.0 kg	271	271	271
1.5	Copper tube 22 swg	12.5 mm dia.	15 m	1200	1200	1200
1.6	Copper tube 20 swg	25 mm dia.	3 m	700	700	700
1.7	Aluminum Hox	4” x 2”	1	800	800	800
1.8	Rubber sheet	1m x 2m (1 mm)	1	2800	2800	2800
1.9	Cap	25 mm dia.	2	100	100	100
1.10	Elbow	25 mm dia.	4	82	82	82
1.11	Union	25 mm dia.	2	770	770	770
1.12	Socket	25 mm dia.	1	136	136	136
1.13	Socket	12.5 mm dia.	1	20	20	20
1.14	Nuts, bolts, screws etc.			500	500	500
Materials cost for collector				**20,697**	**9,449**	**9,449**
2.	**Storage Tank (200 Liters: 480 mm dia. 1250 mm length)**					
2.1	Galvanized steel sheet	20 swg (0.9 mm)	5.75 m2	1440	1440	-
2.2	Galvanized steel sheet	18 swg (1.2 mm)	3.60 m2	870	870	-
2.3	G.S. tubes “B” class	25 mm dia.	3.00 m	494	494	-
2.4	Stainless steel 304 A 1mm	304 A 1 mm	5.75 m2	-	-	1440
2.5	Stainless steel 304 A 2.5mm	304 A 2.5 mm	5.75 m2	-	-	5427
2.6	Copper tube 20 swg	25 mm dia.	3.00 m	1400	1400	1400
2.7	Glass wool insulation		20.00 kg	208	208	208
2.8	Mild steel strip	31 x 31 x 4 mm2	16.80 m	996	996	996
2.9	Mild steel strip	50 mm x 6 mm	2.0 m	50	50	50
2.10	Sealing Material		500 gm	100	100	100
Material Cost for Storage				**5,558**	**5,558**	**9,621**
Total Material Costs				**26,255**	**15,007**	**19,070**
Fabrication and Installation cost (30 % of cost)				**3,168**	**7,877**	**4,502**
Overhead expenses (15%)				**3,938**	**2,251**	**2,861**
Total cost				**38,070**	**21,760**	**27,652**
Rounded				**38,000**	**22,000**	**28,000**
Cost fraction (in %)			**:Collector**	**79 %**	**63 %**	**50 %**
			:Storage	**21 %**	**37 %**	**50 %**

ภาคผนวก ค.

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ได้จาก
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

ตัวอย่างการคำนวณ ปริมาณความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

วันที่ 14 พฤษภาคม 2556 ที่เวลา 13:30 น.

อุณหภูมิแผ่นรับรังสีอาทิตย์ (Tp) = 54.8 °C

อุณหภูมิผิวกระจก (Tg) = 71.7 °C

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (Ta) = 35.7 °C

$$Tav = \frac{(54.8+71.7)}{2}$$

$$= 63.25\ ^{\circ}C$$

$$\beta' = \frac{1}{T_{av}+273.15}$$

$$= \frac{1}{63.25+273.15}$$

$$= 0.0029$$

จากคารางสมบัติอากาศ Pr = 0.7194

จากคารางสมบัติอากาศ k = 0.0283 W/m.K

จากคารางสมบัติอากาศ α = 2.680 x 10^{-5} m^2/s

จากคารางสมบัติอากาศ ν = 1.928 x 10^{-5} m^2/s

จากสมการ

$$R_a = G_r P_r = \frac{g\beta'\Delta TL^3}{\nu\alpha}$$

$$= \frac{9.81\times 0.0029\times(71.7-54.8)\times 0.025^3\times(0.7194)}{(1.928\times 10^{-5})(2.680\times 10^{-5})}$$

$$= 14984.40$$

จากสมการ

$$N_u = 1+1.44\left[1-\frac{1708}{Ra\cos\beta}\right]^{+}\left(1-\frac{\sin(1.8\beta)^{1.6}1078}{Ra\cos\beta}\right)+\left[\left(\frac{Ra\cos\beta}{5830}\right)^{1/3}-1\right]^{+}$$

$$=1+1.44\left[1-\frac{1708}{17870.883\times\cos 14}\right]^{+}\left(1-\frac{\sin(1.8\times 14)^{1.6}1078}{17870.883\times\cos 14}\right)+\left[\left(\frac{14984.40\times\cos 14}{5830}\right)^{1/3}-1\right]^{+}$$

$$= 2.8294$$

จากสมการ $h_{1c} = \frac{N_u k}{L}$

$$= \frac{2.8294\times 0.0283}{0.025}$$

$$= 3.2 \ W/m^2.°C$$

จากสมการ $h_{2c} = 2.8+3V$

$$= 2.8+(3\times 1.48)$$

$$= 7.24 \ W/m^2.°C$$

จากสมการ $\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_p}+\frac{1}{\varepsilon_g}-1\right]^{-1}$

$$= \left[\frac{1}{0.94}+\frac{1}{0.88}-1\right]^{-1}$$

$$= 0.8332$$

จากสมการ $h_{1r} = \varepsilon_{eff}\sigma\frac{\left[(T_p+273)^4-(T_g+273)^4\right]}{(T_p-T_g)}$

$$= 0.8332\times 5.669\times 10^{-8}\frac{\left[(54.8+273)^4-(71.7+273)^4\right]}{(71.7-54.8)}$$

$$= 7.19 \ W/m^2.°C$$

จากสมการ $T_{sky} = 0.0552(Ta+273)^{1.5}-273$

$$= 0.0552(35.7+273)^{1.5}-273$$

$$= 26.3 \ °C$$

จากสมการ $h_{2r} = \varepsilon_{eff}\sigma\frac{\left[(T_g+273)^4-(T_{sky}+273)^4\right]}{(T_g-T_{sky})}$

$$= 0.88 \times 5.669 \times 10^{-8} \frac{\left[(71.7+273)^4 - (26.3+273)^4\right]}{(71.7-26.3)}$$

$$= 6.34\ W/m^2.°C$$

จากสมการ $h_1 = h_{1c} + h_{1r}$

$$= 3.2+7.24$$

$$= 10.44\ W/m^2.°C$$

จากสมการ $h_2 = h_{2c} + h_{2r}$

$$= 7.19+6.34$$

$$= 13.53\ W/m^2.°C$$

จากสมการที่ 2.30 $U_t = \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}\right]^{-1}$

$$= \left[\frac{1}{10.44} + \frac{1}{13.53}\right]^{-1}$$

$$= 5.894\ W/m^2.°C$$

จากสมการที่ 2.33 $U_b = \left[\frac{k_{PU}}{L_{PU}}\right] \times \left[\frac{k_{PE}}{L_{PE}}\right]$

$$= \left[\frac{0.022}{0.025}\right] + \left[\frac{0.03}{0.01}\right]$$

$$= 3.88\ W/m^2.°C$$

จากสมการที่ 2.34 $U_e = U_b \left[\frac{A_e}{A_c}\right]$

$$= \left[\frac{0.03}{0.01}\right] \times \left[\frac{0.012}{2}\right]$$

$$= 0.018\ W/m^2.°C$$

จากสมการที่ 2.35 $U_L = U_t + U_b + U_e$

$$= 5.894+3.88+0.018$$

$$= 9.79\ W/m^2.°C$$

จากสมการที่ 2.38 $$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}}$$

$$= \sqrt{\frac{9.79}{\left(80.2\times4\times10^{-4}\right)+\left(188.83\times1\times10^{-4}\right)}}$$

$$= 17.47$$

จากสมการที่ 2.37 $$F = \frac{\tanh\left[m\left(W-D\right)/2\right]}{m\left(W-D\right)/2}$$

$$= \frac{\tanh\left[17.47\left(0.075-0.019\right)/2\right]}{17.47\left(0.075-0.019\right)/2}$$

$$= 0.927$$

จากสมการที่ 2.36 $$q'_{fin} = \left(W-D\right)F\left[S-U_L\left(T_b-T_a\right)\right]$$

$$= \left(0.075-0.019\right)\times0.927\times\left[759.08-9.79\times\left(54.8-35.7\right)\right]$$

$$= 29.7 \text{ W}$$

จากสมการที่ 2.39 $$q'_{tube} = D\left[S-U_L\left(T_b-T_a\right)\right]$$

$$= 0.019\times\left[759.08-9.79\left(54.8-35.7\right)\right]$$

$$= 10.87 \text{ W}$$

จากสมการที่ 2.40 $$q_u = \left[\left(W-D\right)F+D\right]\left[S-U_L\left(T_b-T_a\right)\right]$$

$$= \left[\left(0.075-0.019\right)0.927+0.019\right]\left[759.08-9.79\left(54.8_b-35.7\right)\right]$$

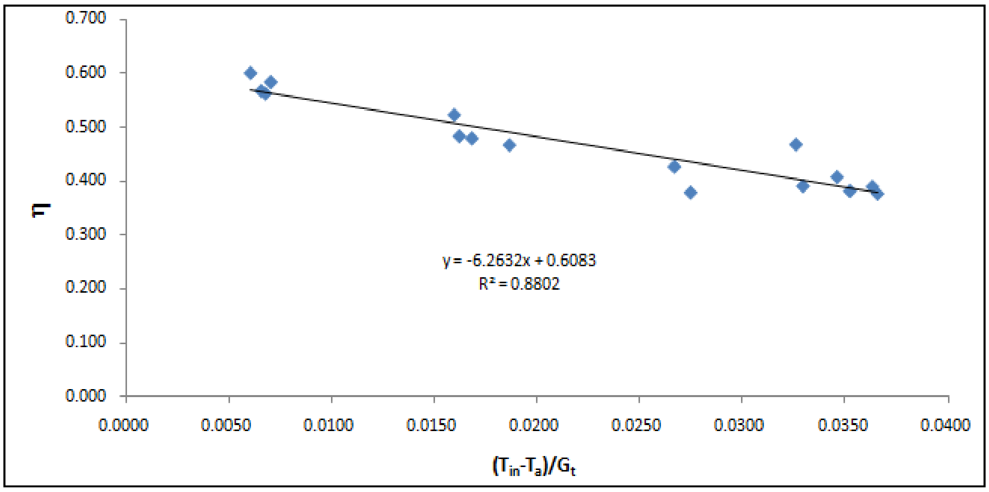
$$= 40.57 \text{ W}$$

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO-9806-1 และประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO-9459-2

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด ตามมาตรฐาน ISO 9806-1

พื้นที่รวมรับรังสีอาทิตย์	A_c	=	2 m2
อัตราการไหลของน้ำป้อนในการทดสอบ	m	=	2 L/min
ช่วงความเข้มรังสีอาทิตย์ในขณะทดสอบ		=	$023.03 - 948.89\ W/m^2$
อุณหภูมิแวดล้อมขณะทดสอบ		=	$34.4 - 37.6\ °C$
มุมเอียงของตัวเก็บรังสีอาทิตย์		=	14°



รูปที่ ง.1 ประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการทดสอบ

จากสมการที่ 2.55	η_G	=	$\eta_{OG} - U_G(t_{in} - t_a)/G$
ซึ่งจากกราฟสามารถหาค่า	η_{OG}	=	0.6083
	U_G	=	$6.26\ W/m^2.K$

หาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 50 °C

สภาวะความเข้มรังสีอาทิตย์	G	=	$800\ W/m^2$
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	t_a	=	$35\ °C$
อุณหภูมิอากาศตัวเก็บรังสี	t_m	=	$50\ °C$

$$\eta_G = 0.6083 - 6.26\left(\frac{50-35}{800}\right)$$

$$= 49.087\ \%$$

ตัวอย่างการคำนวณ ค่าประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

ความเข้มรังสีอาทิตย์	H	=	18 MJ/m^2day
อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ย	$t_{a(day)}$	=	35 $°C$
อุณหภูมิน้ำป้อนระบบทดสอบ	t_{main}	=	29 $°C$
พื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	A_G	=	2 m^2
ปริมาตรถังสะสมน้ำร้อน		=	150 Liters

จากสมการที่ 2.58

$$Q = a_1H + a_2(t_{a(day)} - t_{main}) + a_3$$

เมื่อ

$$a_1 = 0.8228 \ m^2$$

$$a_2 = 0.4154 \ MJ/K$$

$$a_3 = 0.0583 \ MJ$$

แทนค่า a_1, a_2 และ a_3 จะได้

$$Q = (0.8228 \times 18) + 0.4154(35 - 29) + 0.0583$$

$$= 17.36 \ MJ/day$$

$$= 6336.708 \ MJ/year$$

หาปริมาณน้ำร้อนที่ระบบสามารถผลิตได้ จากอุณหภูมิ 29 $°C$ เป็น 60 $°C$

จากสมการที่ 2.60

$$\text{m} = \frac{Q}{C_p(T_{out} - T_{main})}$$

$$= \frac{17.36}{4.1829(60-29)}$$

$$= 133.75 \text{ kg}$$

หาความสามารถในการผลิตน้ำร้อนของระบบทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 $°C$

จากสมการที่ 2.61

$$\eta_{\text{m}} = \frac{m}{A_G}$$

$$= \frac{133.75}{2}$$

$$= 66.88 \ kg/m^2$$

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีหาต้นทุนรายปี

ตัวอย่างการคำนวณ วิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีหาต้นทุนรายปี

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ที่ใส่กรอบ

ต้นทุนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์	P_1	=	21735 ฿
ราคาซากวัสดุเมื่อครบอายุ 10 ปี	S	=	10%
		=	2173.5 ฿
ปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้รับทั้งปี		=	6336.708 $MJ / year$
ค่าบำรุงรักษาตลอดปี	α	=	3%
		=	652.05 ฿
อัตราค่าดอกเบี้ยร้อยละ (เมษายน 2556)		=	7.5%

จากสมการที่ 2.50

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{((1+i)^n - 1)}$$

$$= \frac{0.075(1+0.075)^{10}}{\left[(1+0.075)^{10} - 1\right]}$$

$$= 0.15$$

เงินลงทุนครั้งแรกต่อปี

$$= P_1 \times CRF$$

$$= 21735 \times 0.15$$

$$= 3166.48 \text{ ฿}$$

จากสมการที่ 2.51

$$SFF = \frac{i}{[(1+i)^n - 1]}$$

$$= \frac{0.075}{\left[(1+0.075)^{10} - 1\right]}$$

$$= 0.07$$

เงินสะสมปลายเวลาต่อปี

$$= S(SFF)$$

$$= 2173.5 \times 0.07$$

$$= 153.64 \text{ ฿}$$

เงินค่าใช้จ่ายต่อปี Ca = เงินลงทุนครั้งแรกต่อปี – เงินสะสมปลายเวลาต่อปี + ค่าบำรุงรักษา

$$= 3166.48 - 153.64 + 650.05$$

$= \quad 3970.17$ ฿

การวิเคราะห์ราคาพลังงานเมื่ออายุการใช้งานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ครบ 10 ปี

ราคาต่อหน่วยพลังงานที่ผลิตได้ = (3.6 × Ca)/ 365×ปริมาณความร้อนที่ได้ในแต่ละวัน)

$$= \frac{(3.6 \times 3970.17)}{(365 \times 17.36)}$$

$$= 2.08 \quad ß/\text{kW.hr}$$

วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ด้วยวิธีหาจุดคุ้มทุน

จากสมการที่ 2.52
$$P_1(CRF) - S(SFF) + \alpha = C\left[\frac{365 \times Q}{3.6 \times \eta_E}\right]$$

$$\left[21735 \times \frac{\left(0.075 \times (1+0.075)\right)^n}{(1+0.075)^n - 1}\right] - \left[2173.5 \frac{0.075}{\left((1+0.075)^n - 1\right)}\right] + 652.05 = 3.6246\left[\frac{365 \times 17.36}{3.6 \times 0.9}\right]$$

$\therefore$ จำนวนปีที่คุ้มทุนของระบบ = 3.68 ปี

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 18 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.6444	4.182178	50.88889	30.3	20.61058	1276.981
2	0.015	989.6221	4.181263	46.31333	30.3	16.03502	995.2625
3	0.015	991.2472	4.180003	42.50667	30.3	12.22835	760.0074
4	0.015	992.076	4.179213	40.53333	30.3	10.25502	637.7747
5	0.015	992.5744	4.178848	39.23778	30.3	8.959465	557.4334
6	0.015	992.9344	4.178648	38.23778	30.3	7.959465	495.372
7	0.015	993.2976	4.178446	37.22889	30.3	6.950577	432.7193
8	0.015	993.5568	4.178302	36.50889	30.3	6.230577	387.9824
9	0.015	993.8512	4.178138	35.69111	30.3	5.412799	337.1455
10	0.015	994.0496	4.178028	35.14	30.3	4.861688	302.871
11	0.015	994.2294	4.178081	34.59556	30.3	4.317243	269.0055
12	0.015	994.3816	4.178176	34.12	30.3	3.841688	239.416
13	0.015	994.5068	4.178254	33.72889	30.3	3.450577	215.0728
14	0.015	994.6262	4.178329	33.35556	30.3	3.077243	191.8296
15	0.015	994.7087	4.17838	33.09778	30.3	2.819465	175.777
16	0.015	994.8054	4.178441	32.79556	30.3	2.517243	156.9527
17	0.015	994.8737	4.178484	32.58222	30.3	2.30391	143.6625
18	0.015	994.9363	4.178523	32.38667	30.3	2.108354	131.4779
19	0.015	995.0074	4.178567	32.16444	30.3	1.886132	117.6297
20	0.015	995.0515	4.178595	32.02667	30.3	1.748354	109.0427
21	0.015	995.0941	4.178621	31.89333	30.3	1.615021	100.7318
22	0.015	995.124	4.17864	31.8	30.3	1.521688	94.91371
23	0.015	995.1667	4.178667	31.66667	30.3	1.388354	86.60144
24	0.015	995.2008	4.178688	31.56	30.3	1.281688	79.95104
25	0.015	995.22	4.1787	31.5	30.3	1.221688	76.20996
26	0.015	995.2385	4.178712	31.44222	30.3	1.16391	72.60728
27	0.015	995.2698	4.178731	31.34444	30.3	1.066132	66.51009
28	0.015	995.2833	4.17874	31.30222	30.3	1.02391	63.87707
29	0.015	995.2833	4.17874	31.3	30.3	1.02391	63.87707
30	0.015	995.298	4.178749	31.3	30.3	0.977785	61.0006
				η	**0.254306**	**ΣQ (kJ)**	**8699.696**
				η (%)	**25.43063**	**ΣQ (MJ)**	**8.699696**

ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.6471	4.182176	50.88222	29.8	21.03957	1303.563
2	0.015	989.6759	4.181238	46.19111	29.8	16.34845	1014.766
3	0.015	991.4497	4.17981	42.02444	29.8	12.18179	757.2329
4	0.015	992.1871	4.179108	40.26889	29.8	10.42623	648.4788
5	0.015	992.6792	4.178789	38.94667	29.8	9.10401	566.4784
6	0.015	993.1424	4.178532	37.66	29.8	7.817343	486.6152
7	0.015	993.4136	4.178381	36.90667	29.8	7.06401	439.8258
8	0.015	993.6912	4.178227	36.13556	29.8	6.292899	391.9092
9	0.015	993.9352	4.178092	35.45778	29.8	5.615121	349.7731
10	0.015	994.1334	4.178021	34.89556	29.8	5.052899	314.809
11	0.015	994.3311	4.178144	34.27778	29.8	4.435121	276.3829
12	0.015	994.4854	4.178241	33.79556	29.8	3.952899	246.3763
13	0.015	994.6163	4.178323	33.38667	29.8	3.54401	220.9244
14	0.015	994.7251	4.178391	33.04667	29.8	3.20401	199.7548
15	0.015	994.8296	4.178456	32.72	29.8	2.877343	179.4103
16	0.015	994.9064	4.178504	32.48	29.8	2.637343	164.4603
17	0.015	994.9882	4.178555	32.22444	29.8	2.381788	148.5383
18	0.015	995.06	4.1786	32	29.8	2.157343	134.5521
19	0.015	995.1261	4.178641	31.79333	29.8	1.950677	121.6717
20	0.015	995.1752	4.178672	31.64	29.8	1.797343	112.1141
21	0.015	995.2122	4.178695	31.52444	29.8	1.681788	104.9105
22	0.015	995.2605	4.178725	31.37333	29.8	1.530677	95.48943
23	0.015	995.289	4.178743	31.28444	29.8	1.441788	89.94715
24	0.015	995.3231	4.178764	31.17778	29.8	1.335121	83.29594
25	0.015	995.3466	4.178779	31.10444	29.8	1.261788	78.72293
26	0.015	995.3622	4.178789	31.05556	29.8	1.212899	75.67412
27	0.015	995.3878	4.178805	30.97556	29.8	1.132899	70.68492
28	0.015	995.3914	4.178807	30.96444	29.8	1.121788	69.99195
29	0.015	995.4177	4.178824	30.9	29.8	1.039565	64.86381
30	0.015	995.435	4.178834	30.8	29.8	0.985604	61.49811
				η	**0.239957**	**ΣQ (kJ)**	**8872.716**
				η (%)	**23.99571**	**ΣQ (MJ)**	**8.872716**

ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 22 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	**Q**
1	0.015	987.5324	4.182234	51.16889	29.4	21.76623	1348.448
2	0.015	989.6427	4.181253	46.26667	29.4	16.86401	1046.736
3	0.015	991.1921	4.180055	42.63778	29.4	13.23512	822.5438
4	0.015	992.1591	4.179134	40.33556	29.4	10.9329	679.977
5	0.015	992.668	4.178796	38.97778	29.4	9.575121	595.7865
6	0.015	993.0792	4.178567	37.83556	29.4	8.432899	524.9034
7	0.015	993.476	4.178347	36.73333	29.4	7.330677	456.4542
8	0.015	993.7616	4.178188	35.94	29.4	6.537343	407.1578
9	0.015	994.0528	4.178026	35.13111	29.4	5.728454	356.8694
10	0.015	994.2806	4.178113	34.43556	29.4	5.032899	313.6163
11	0.015	994.4676	4.17823	33.85111	29.4	4.448454	277.2575
12	0.015	994.6106	4.178319	33.40444	29.4	4.001788	249.4595
13	0.015	994.7528	4.178408	32.96	29.4	3.557343	221.7905
14	0.015	994.8772	4.178486	32.57111	29.4	3.168454	197.5728
15	0.015	994.9868	4.178554	32.22889	29.4	2.826232	176.2554
16	0.015	995.0785	4.178612	31.94222	29.4	2.539565	158.3945
17	0.015	995.1617	4.178664	31.68222	29.4	2.279565	142.1917
18	0.015	995.2328	4.178708	31.46	29.4	2.057343	128.3408
19	0.015	995.2918	4.178745	31.27556	29.4	1.872899	116.8428
20	0.015	995.3494	4.178781	31.09556	29.4	1.692899	105.6203
21	0.015	995.4134	4.178821	30.89556	29.4	1.492899	93.14914
22	0.015	995.4582	4.178849	30.75556	29.4	1.352899	84.41823
23	0.015	995.4945	4.178872	30.64222	29.4	1.239565	77.34969
24	0.015	995.5315	4.178895	30.52667	29.4	1.12401	70.14194
25	0.015	995.562	4.178914	30.43111	29.4	1.028454	64.18122
26	0.015	995.594	4.178934	30.33111	29.4	0.928454	57.94281
27	0.015	995.6147	4.178947	30.26667	29.4	0.86401	53.92226
28	0.015	995.636	4.17896	30.2	29.4	0.797343	49.76286
29	0.015	995.6566	4.178973	30.1	29.4	0.732899	45.74192
30	0.015	995.6743	4.178984	30.1	29.4	0.677778	42.30256
				η	**0.264277**	**ΣQ (kJ)**	**8965.13**
				η (%)	**26.42773**	**ΣQ (MJ)**	**8.96513**

ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 23 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	988.6424	4.181708	48.54	29.2	19.3195	1198.064
2	0.015	990.5351	4.180681	44.20222	29.2	14.98172	930.6144
3	0.015	991.8268	4.179451	41.12667	29.2	11.90616	740.3177
4	0.015	992.5544	4.178859	39.29333	29.2	10.07283	626.6929
5	0.015	993.0392	4.178589	37.94667	29.2	8.726163	543.1386
6	0.015	993.4256	4.178375	36.87333	29.2	7.65283	476.4925
7	0.015	993.7632	4.178187	35.93556	29.2	6.715052	418.2264
8	0.015	994.0328	4.178037	35.18667	29.2	5.966163	371.6716
9	0.015	994.2465	4.178092	34.54222	29.2	5.321719	331.6005
10	0.015	994.4399	4.178212	33.93778	29.2	4.717274	294.0028
11	0.015	994.59	4.178306	33.46889	29.2	4.248386	264.8253
12	0.015	994.7471	4.178404	32.97778	29.2	3.757274	234.2542
13	0.015	994.8815	4.178488	32.55778	29.2	3.337274	208.1008
14	0.015	994.9839	4.178552	32.23778	29.2	3.017274	188.169
15	0.015	995.087	4.178617	31.91556	29.2	2.695052	168.0939
16	0.015	995.1823	4.178676	31.61778	29.2	2.397274	149.5376
17	0.015	995.2627	4.178727	31.36667	29.2	2.146163	133.8862
18	0.015	995.3288	4.178768	31.16	29.2	1.939497	121.0027
19	0.015	995.39	4.178806	30.96889	29.2	1.748386	109.0872
20	0.015	995.4433	4.17884	30.80222	29.2	1.581719	98.69446
21	0.015	995.4895	4.178868	30.65778	29.2	1.437274	89.68635
22	0.015	995.5251	4.178891	30.54667	29.2	1.326163	82.75638
23	0.015	995.562	4.178914	30.43111	29.2	1.210608	75.54861
24	0.015	995.604	4.17894	30.3	29.2	1.079497	67.36981
25	0.015	995.6132	4.178946	30.27111	29.2	1.050608	65.5676
26	0.015	995.6367	4.17896	30.19778	29.2	0.977274	60.99257
27	0.015	995.6588	4.178974	30.12889	29.2	0.908386	56.6946
28	0.015	995.6765	4.178985	30.07333	29.2	0.85283	53.22833
29	0.015	995.7	4.179	30.0	29.2	0.779497	48.65264
30	0.015	995.7028	4.179002	30.0	29.2	0.770801	48.11005
				η	**0.251056**	**ΣQ (kJ)**	**8255.08**
				η (%)	**25.10559**	**ΣQ (MJ)**	**8.25508**

ตารางที่ ฉ.5 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 24 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	988.4204	4.181809	49.04444	29.2	19.84785	1230.582
2	0.015	990.2523	4.18095	44.87556	29.2	15.67896	973.7094
3	0.015	991.8147	4.179462	41.15556	29.2	11.95896	743.5936
4	0.015	992.448	4.178918	39.58889	29.2	10.39229	646.5085
5	0.015	992.9032	4.178665	38.32444	29.2	9.127849	568.073
6	0.015	993.248	4.178473	37.36667	29.2	8.170072	508.6189
7	0.015	993.6088	4.178273	36.36444	29.2	7.167849	446.3673
8	0.015	993.9296	4.178095	35.47333	29.2	6.276738	390.9842
9	0.015	994.1647	4.17804	34.79778	29.2	5.601183	348.9812
10	0.015	994.3731	4.178171	34.14667	29.2	4.950072	308.488
11	0.015	994.5636	4.17829	33.55111	29.2	4.354516	271.4328
12	0.015	994.7165	4.178385	33.07333	29.2	3.876738	241.6938
13	0.015	994.8495	4.178468	32.65778	29.2	3.461183	215.8193
14	0.015	994.9597	4.178537	32.31333	29.2	3.116738	194.3665
15	0.015	995.0707	4.178607	31.96667	29.2	2.770072	172.7697
16	0.015	995.1567	4.17866	31.69778	29.2	2.501183	156.0146
17	0.015	995.2541	4.178721	31.39333	29.2	2.196738	137.0399
18	0.015	995.3146	4.178759	31.20444	29.2	2.007849	125.2651
19	0.015	995.3871	4.178804	30.97778	29.2	1.781183	111.1332
20	0.015	995.4376	4.178836	30.82	29.2	1.623405	101.2949
21	0.015	995.4838	4.178865	30.67556	29.2	1.47896	92.28696
22	0.015	995.5201	4.178888	30.56222	29.2	1.365627	85.21854
23	0.015	995.5528	4.178908	30.46	29.2	1.263405	78.8426
24	0.015	995.599	4.178937	30.31556	29.2	1.11896	69.83229
25	0.015	995.6154	4.178947	30.26444	29.2	1.067849	66.64379
26	0.015	995.6431	4.178964	30.17778	29.2	0.981183	61.23694
27	0.015	995.6765	4.178985	30.07333	29.2	0.876738	54.72053
28	0.015	995.7028	4.179004	29.99111	29.2	0.794516	49.59026
29	0.015	995.7284	4.179036	29.9	29.2	0.714516	44.59849
30	0.015	995.732	4.17904	29.9	29.2	0.703405	43.90517
				η	**0.232602**	**ΣQ (kJ)**	**8539.611**
				η (%)	**23.26017**	**ΣQ (MJ)**	**8.539611**

ตารางที่ ฉ.6 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 25 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	989.3249	4.181398	46.98889	29.0	17.98134	1115.767
2	0.015	991.0708	4.180171	42.92667	29.0	13.91912	864.9712
3	0.015	992.286	4.179013	40.03333	29.0	11.02578	685.8219
4	0.015	992.7776	4.178735	38.67333	29.0	9.665783	601.4854
5	0.015	993.2152	4.178492	37.45778	29.0	8.450228	526.0446
6	0.015	993.592	4.178282	36.41111	29.0	7.403561	461.0391
7	0.015	993.9152	4.178103	35.51333	29.0	6.505783	405.2465
8	0.015	994.169	4.178043	34.78444	29.0	5.776894	359.9306
9	0.015	994.388	4.17818	34.1	29.0	5.09245	317.3665
10	0.015	994.57	4.178294	33.53111	29.0	4.523561	281.9721
11	0.015	994.7372	4.178398	33.00889	29.0	4.001339	249.468
12	0.015	994.8844	4.17849	32.54889	29.0	3.541339	220.8263
13	0.015	995.0159	4.178572	32.13778	29.0	3.130228	195.2204
14	0.015	995.1311	4.178644	31.77778	29.0	2.770228	172.7915
15	0.015	995.2349	4.178709	31.45333	29.0	2.445783	152.5728
16	0.015	995.3132	4.178758	31.20889	29.0	2.201339	137.3362
17	0.015	995.3999	4.178812	30.93778	29.0	1.930228	120.4343
18	0.015	995.466	4.178854	30.73111	29.0	1.723561	107.5478
19	0.015	995.5187	4.178887	30.56667	29.0	1.559117	97.29262
20	0.015	995.5727	4.17892	30.39778	29.0	1.390228	86.75896
21	0.015	995.6168	4.178948	30.26	29.0	1.25245	78.16473
22	0.015	995.6559	4.178972	30.13778	29.0	1.130228	70.54009
23	0.015	995.6815	4.178988	30.05778	29.0	1.050228	65.54905
24	0.015	995.7106	4.179015	29.96222	29.0	0.954672	59.58715
25	0.015	995.7417	4.17906	29.85111	29.0	0.843561	52.65421
26	0.015	995.756	4.17908	29.8	29.0	0.79245	49.46486
27	0.015	995.7821	4.179117	29.70667	29.0	0.699117	43.64051
28	0.015	995.7921	4.179132	29.67111	29.0	0.663561	41.42161
29	0.015	995.8108	4.179158	29.6	29.0	0.596894	37.261
30	0.015	995.812	4.17916	29.6	29.0	0.59245	36.98361
				η	**0.234465**	**ΣQ (kJ)**	**7695.161**
				η (%)	**23.44654**	**ΣQ (MJ)**	**7.695161**

ตารางที่ ฉ.7 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.9653	4.182017	50.08667	30.1	20.00255	1239.665
2	0.015	989.8588	4.181155	45.77556	30.1	15.69144	974.1451
3	0.015	991.3396	4.179915	42.28667	30.1	12.20255	758.4586
4	0.015	992.2216	4.179075	40.18667	30.1	10.10255	628.3639
5	0.015	992.7232	4.178765	38.82444	30.1	8.740332	543.8702
6	0.015	993.0696	4.178572	37.86222	30.1	7.778109	484.1422
7	0.015	993.3952	4.178392	36.95778	30.1	6.873665	427.9675
8	0.015	993.7168	4.178213	36.06444	30.1	5.980332	372.4515
9	0.015	993.9072	4.178107	35.53556	30.1	5.451443	339.5691
10	0.015	994.1384	4.178024	34.88	30.1	4.795887	298.7982
11	0.015	994.3062	4.178129	34.35556	30.1	4.271443	266.1754
12	0.015	994.4356	4.17821	33.95111	30.1	3.866998	241.0084
13	0.015	994.5715	4.178295	33.52667	30.1	3.442554	214.5888
14	0.015	994.676	4.17836	33.2	30.1	3.115887	194.2498
15	0.015	994.7706	4.178419	32.90444	30.1	2.820332	175.8435
16	0.015	994.8516	4.17847	32.65111	30.1	2.566998	160.0635
17	0.015	994.9071	4.178504	32.47778	30.1	2.393665	149.265
18	0.015	994.9761	4.178548	32.26222	30.1	2.178109	135.8341
19	0.015	995.0387	4.178587	32.06667	30.1	1.982554	123.6476
20	0.015	995.0877	4.178617	31.91333	30.1	1.82922	114.091
21	0.015	995.1247	4.17864	31.79778	30.1	1.713665	106.8882
22	0.015	995.1674	4.178667	31.66444	30.1	1.580332	98.5765
23	0.015	995.2079	4.178692	31.53778	30.1	1.453665	90.67964
24	0.015	995.2207	4.1787	31.49778	30.1	1.413665	88.18575
25	0.015	995.2499	4.178719	31.40667	30.1	1.322554	82.50493
26	0.015	995.2712	4.178732	31.34	30.1	1.255887	78.34799
27	0.015	995.2868	4.178742	31.29111	30.1	1.206998	75.29943
28	0.015	995.3053	4.178753	31.23333	30.1	1.14922	71.69646
29	0.015	995.3466	4.178779	31.1	30.1	1.020332	63.65849
30	0.015	995.3465	4.178779	31.1	30.1	1.020649	63.67829
				η	**0.229733**	**ΣQ (kJ)**	**8661.714**
				η (%)	**22.97333**	**ΣQ (MJ)**	**8.661714**

ตารางที่ ฉ.8 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 ธันวาคม 2555 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.1707	4.182415	52.07333	29.0	23.07141	1428.844
2	0.015	989.0413	4.181527	47.63333	29.0	18.63141	1155.81
3	0.015	990.8328	4.180397	43.49333	29.0	14.49141	900.3675
4	0.015	992.006	4.17928	40.7	29.0	11.69808	727.4807
5	0.015	992.7152	4.178769	38.84667	29.0	9.844742	612.5883
6	0.015	993.1496	4.178528	37.64	29.0	8.638075	537.7077
7	0.015	993.5152	4.178325	36.62444	29.0	7.62252	474.6424
8	0.015	993.844	4.178142	35.71111	29.0	6.709187	417.8906
9	0.015	994.1192	4.178012	34.94	29.0	5.938075	369.9518
10	0.015	994.334	4.178146	34.26889	29.0	5.266964	328.2219
11	0.015	994.4961	4.178248	33.76222	29.0	4.760298	296.7035
12	0.015	994.6525	4.178345	33.27333	29.0	4.271409	266.2797
13	0.015	994.7997	4.178437	32.81333	29.0	3.811409	237.6437
14	0.015	994.9228	4.178514	32.42889	29.0	3.426964	213.7037
15	0.015	995.0401	4.178588	32.06222	29.0	3.060298	190.8644
16	0.015	995.129	4.178643	31.78444	29.0	2.78252	173.5578
17	0.015	995.2186	4.178699	31.50444	29.0	2.50252	156.1092
18	0.015	995.2925	4.178745	31.27333	29.0	2.271409	141.7044
19	0.015	995.3729	4.178796	31.02222	29.0	2.020298	126.0502
20	0.015	995.4298	4.178831	30.84444	29.0	1.84252	114.9659
21	0.015	995.4916	4.17887	30.65111	29.0	1.649187	102.91
22	0.015	995.5265	4.178892	30.54222	29.0	1.540298	96.11913
23	0.015	995.5663	4.178916	30.41778	29.0	1.415853	88.35749
24	0.015	995.6026	4.178939	30.30444	29.0	1.30252	81.28824
25	0.015	995.6431	4.178964	30.17778	29.0	1.175853	73.3866
26	0.015	995.6723	4.178983	30.08667	29.0	1.084742	67.70251
27	0.015	995.6922	4.178995	30.02444	29.0	1.02252	63.82047
28	0.015	995.7	4.179	30	29.0	0.998075	62.29534
29	0.015	995.7373	4.179053	29.9	29.0	0.864742	53.97599
30	0.015	995.7537	4.179077	29.8	29.0	0.806409	50.33601
				η	0.240108	ΣQ (kJ)	9611.278
				η (%)	24.01076	ΣQ (MJ)	9.611278

ตารางที่ ฉ.9 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 18 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	986.7324	4.182634	53.16889	28.1	25.02322	1549.115
2	0.015	988.4165	4.181811	49.05333	28.1	20.90766	1296.287
3	0.015	990.7385	4.180487	43.71778	28.1	15.57211	967.4413
4	0.015	991.9257	4.179356	40.89111	28.1	12.74544	792.5647
5	0.015	992.6376	4.178812	39.06222	28.1	10.91655	679.2355
6	0.015	993.1264	4.178541	37.70444	28.1	9.558775	595.0078
7	0.015	993.5232	4.17832	36.60222	28.1	8.456552	526.58
8	0.015	993.8824	4.178121	35.60444	28.1	7.458775	464.5952
9	0.015	994.196	4.17806	34.7	28.1	6.55433	408.3817
10	0.015	994.425	4.178203	33.98444	28.1	5.838775	363.8937
11	0.015	994.6632	4.178352	33.24	28.1	5.09433	317.5846
12	0.015	994.8452	4.178466	32.67111	28.1	4.525441	282.1789
13	0.015	995.0145	4.178572	32.14222	28.1	3.996552	249.2493
14	0.015	995.1482	4.178655	31.72444	28.1	3.578775	223.2286
15	0.015	995.2563	4.178723	31.38667	28.1	3.240997	202.1847
16	0.015	995.3665	4.178792	31.04222	28.1	2.896552	180.7201
17	0.015	995.4788	4.178862	30.69111	28.1	2.545441	158.8343
18	0.015	995.5507	4.178907	30.46667	28.1	2.320997	144.8411
19	0.015	995.6118	4.178945	30.27556	28.1	2.129886	132.9243
20	0.015	995.6908	4.178994	30.02889	28.1	1.883219	117.5407
21	0.015	995.7442	4.179063	29.84222	28.1	1.696552	105.8974
22	0.015	995.7765	4.179109	29.72667	28.1	1.580997	98.6888
23	0.015	995.8027	4.179147	29.63333	28.1	1.487663	92.86602
24	0.015	995.8269	4.179181	29.54667	28.1	1.400997	87.45879
25	0.015	995.8593	4.179228	29.43111	28.1	1.285441	80.2486
26	0.015	995.8692	4.179242	29.39556	28.1	1.249886	78.02996
27	0.015	995.8954	4.179279	29.30222	28.1	1.156552	72.20573
28	0.015	995.9091	4.179299	29.25333	28.1	1.107663	69.15478
29	0.015	995.9427	4.179347	29.1	28.1	0.987663	61.6656
30	0.015	995.952	4.17936	29.1	28.1	0.95433	59.58516
				η	**0.231492**	**ΣQ (kJ)**	**10458.19**
				η (%)	**23.14916**	**ΣQ (MJ)**	**10.45819**

ตารางที่ ฉ.10 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.568	4.182216	51.08	28.7	22.42523	1389.318
2	0.015	989.1284	4.181487	47.43556	28.7	18.78078	1165.167
3	0.015	991.3844	4.179872	42.18	28.7	13.52523	840.6996
4	0.015	992.5072	4.178885	39.42444	28.7	10.76967	670.02
5	0.015	992.9888	4.178617	38.08667	28.7	9.431892	587.0391
6	0.015	993.392	4.178393	36.96667	28.7	8.311892	517.5129
7	0.015	993.704	4.17822	36.1	28.7	7.445226	463.679
8	0.015	994.0296	4.178039	35.19556	28.7	6.540781	407.4672
9	0.015	994.2465	4.178092	34.54222	28.7	5.887448	366.8516
10	0.015	994.4506	4.178219	33.90444	28.7	5.24967	327.1882
11	0.015	994.6454	4.178341	33.29556	28.7	4.640781	289.3041
12	0.015	994.8118	4.178445	32.77556	28.7	4.120781	256.9369
13	0.015	994.9583	4.178536	32.31778	28.7	3.663004	228.4324
14	0.015	995.065	4.178603	31.98444	28.7	3.32967	207.6706
15	0.015	995.1788	4.178674	31.62889	28.7	2.974115	185.5191
16	0.015	995.274	4.178734	31.33111	28.7	2.676337	166.9627
17	0.015	995.3402	4.178775	31.12444	28.7	2.46967	154.0816
18	0.015	995.4298	4.178831	30.84444	28.7	2.18967	136.6266
19	0.015	995.4973	4.178873	30.63333	28.7	1.978559	123.4638
20	0.015	995.5535	4.178908	30.45778	28.7	1.803004	112.5163
21	0.015	995.6054	4.178941	30.29556	28.7	1.640781	102.3989
22	0.015	995.6516	4.17897	30.15111	28.7	1.496337	93.38933
23	0.015	995.7019	4.179003	29.99333	28.7	1.338559	83.54698
24	0.015	995.7473	4.179068	29.83111	28.7	1.176337	73.42627
25	0.015	995.7852	4.179122	29.69556	28.7	1.040781	64.96829
26	0.015	995.812	4.17916	29.6	28.7	0.945226	59.00559
27	0.015	995.8437	4.179205	29.48667	28.7	0.831892	51.93299
28	0.015	995.868	4.17924	29.4	28.7	0.745226	46.52412
29	0.015	995.8705	4.179244	29.4	28.7	0.736337	45.96935
30	0.015	995.8917	4.179274	29.3	28.7	0.660443	41.2325
				η	**0.224649**	**ΣQ (kJ)**	**9258.851**
				η (%)	**22.46495**	**ΣQ (MJ)**	**9.258851**

ตารางที่ ฉ.11 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.4044	4.182298	51.48889	28.7	22.75454	1409.514
2	0.015	989.2467	4.181433	47.16667	28.7	18.43232	1143.671
3	0.015	991.3863	4.17987	42.17556	28.7	13.44121	835.4786
4	0.015	992.2207	4.179076	40.18889	28.7	11.45454	712.4552
5	0.015	992.768	4.17874	38.7	28.7	9.965655	620.1407
6	0.015	993.2072	4.178496	37.48	28.7	8.745655	544.4318
7	0.015	993.5936	4.178281	36.40667	28.7	7.672322	477.7762
8	0.015	993.8816	4.178121	35.60667	28.7	6.872322	428.0657
9	0.015	994.2209	4.178076	34.62222	28.7	5.887877	366.8675
10	0.015	994.4292	4.178206	33.97111	28.7	5.236766	326.376
11	0.015	994.5999	4.178312	33.43778	28.7	4.703433	293.1943
12	0.015	994.7869	4.178429	32.85333	28.7	4.118988	256.8177
13	0.015	994.9356	4.178522	32.38889	28.7	3.654544	227.8988
14	0.015	995.0572	4.178598	32.00889	28.7	3.274544	204.2306
15	0.015	995.1745	4.178672	31.64222	28.7	2.907877	181.3864
16	0.015	995.2577	4.178724	31.38222	28.7	2.647877	165.1841
17	0.015	995.3558	4.178785	31.07556	28.7	2.341211	146.0697
18	0.015	995.422	4.178826	30.86889	28.7	2.134544	133.1858
19	0.015	995.4916	4.17887	30.65111	28.7	1.916766	119.6071
20	0.015	995.5492	4.178906	30.47111	28.7	1.736766	108.3822
21	0.015	995.6054	4.178941	30.29556	28.7	1.561211	97.43304
22	0.015	995.6474	4.178967	30.16444	28.7	1.4301	89.25489
23	0.015	995.6808	4.178988	30.06	28.7	1.325655	82.73953
24	0.015	995.7187	4.179027	29.93333	28.7	1.198988	74.83729
25	0.015	995.7454	4.179065	29.83778	28.7	1.103433	68.87547
26	0.015	995.7709	4.179101	29.74667	28.7	1.012322	63.19055
27	0.015	995.7946	4.179135	29.66222	28.7	0.927877	57.92126
28	0.015	995.812	4.17916	29.6	28.7	0.865655	54.0384
29	0.015	995.822	4.179174	29.6	28.7	0.8301	51.81954
30	0.015	995.8394	4.179199	29.5	28.7	0.767829	47.93339
				η	**0.23875**	Σ**Q (kJ)**	**9388.777**
				η **(%)**	**23.87504**	Σ**Q (MJ)**	**9.388777**

ตารางที่ ฉ.12 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 มกราคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่ไม่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	987.8196	4.18209	50.45111	28.7	21.74415	1347.426
2	0.015	990.0572	4.181065	45.32444	28.7	16.61749	1031.82
3	0.015	991.5291	4.179734	41.83556	28.7	13.1286	816.1382
4	0.015	992.448	4.178918	39.58889	28.7	10.88193	676.9691
5	0.015	992.9648	4.178631	38.15333	28.7	9.446376	587.9282
6	0.015	993.388	4.178396	36.97778	28.7	8.27082	514.9538
7	0.015	993.752	4.178193	35.96667	28.7	7.259709	452.1442
8	0.015	994.0696	4.178017	35.08444	28.7	6.377487	397.3084
9	0.015	994.2877	4.178117	34.41333	28.7	5.706376	355.5857
10	0.015	994.4876	4.178242	33.78889	28.7	5.081931	316.7474
11	0.015	994.6895	4.178368	33.15778	28.7	4.45082	277.4761
12	0.015	994.8388	4.178462	32.69111	28.7	3.984153	248.4257
13	0.015	994.9917	4.178557	32.21333	28.7	3.506376	218.6732
14	0.015	995.1041	4.178628	31.86222	28.7	3.155264	196.8019
15	0.015	995.2172	4.178698	31.50889	28.7	2.801931	174.7864
16	0.015	995.3132	4.178758	31.20889	28.7	2.501931	156.0895
17	0.015	995.4077	4.178817	30.91333	28.7	2.206376	137.6655
18	0.015	995.4732	4.178858	30.70889	28.7	2.001931	124.9187
19	0.015	995.5329	4.178896	30.52222	28.7	1.815264	113.2787
20	0.015	995.5876	4.17893	30.35111	28.7	1.644153	102.6073
21	0.015	995.6403	4.178963	30.18667	28.7	1.479709	92.35034
22	0.015	995.6858	4.178991	30.04444	28.7	1.337487	83.47847
23	0.015	995.7218	4.179031	29.92222	28.7	1.215264	75.8535
24	0.015	995.7554	4.179079	29.80222	28.7	1.095264	68.36652
25	0.015	995.7815	4.179116	29.70889	28.7	1.001931	62.54285
26	0.015	995.8101	4.179157	29.60667	28.7	0.899709	56.16406
27	0.015	995.8176	4.179168	29.58	28.7	0.873042	54.49995
28	0.015	995.84	4.1792	29.5	28.7	0.793042	49.50742
29	0.015	995.8556	4.179222	29.4	28.7	0.737487	46.0402
30	0.015	995.868	4.17924	29.4	28.7	0.693042	43.26633
				η	**0.257941**	**ΣQ (kJ)**	**8879.813**
				η **(%)**	**25.79409**	**ΣQ (MJ)**	**8.879813**

ตารางที่ ฉ.13 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 19 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	978.9893	4.189516	67.52667	30.6	36.96382	2274.102
2	0.015	979.0249	4.189463	67.43778	30.6	36.87494	2268.687
3	0.015	979.7307	4.188404	65.67333	30.6	35.11049	2161.143
4	0.015	983.956	4.184363	58.40667	30.6	27.84382	1719.591
5	0.015	987.2649	4.182368	51.83778	30.6	21.27494	1317.697
6	0.015	988.9748	4.181557	47.78444	30.6	17.2216	1068.287
7	0.015	990.2429	4.180959	44.89778	30.6	14.33494	890.235
8	0.015	991.2901	4.179962	42.40444	30.6	11.8416	735.9949
9	0.015	991.9295	4.179353	40.88222	30.6	10.31938	641.7039
10	0.015	992.3448	4.178975	39.87556	30.6	9.312713	579.2951
11	0.015	992.6648	4.178797	38.98667	30.6	8.423824	524.1487
12	0.015	992.8656	4.178686	38.42889	30.6	7.866047	489.5285
13	0.015	993.092	4.17856	37.8	30.6	7.237158	450.4799
14	0.015	993.2816	4.178455	37.27333	30.6	6.710491	417.7665
15	0.015	993.4296	4.178372	36.86222	30.6	6.29938	392.2232
16	0.015	993.612	4.178271	36.35556	30.6	5.792713	360.7337
17	0.015	993.7808	4.178177	35.88667	30.6	5.323824	331.5831
18	0.015	993.9552	4.17808	35.40222	30.6	4.83938	301.4565
19	0.015	994.0752	4.178014	35.06889	30.6	4.506047	280.7217
20	0.015	994.191	4.178057	34.71556	30.6	4.152713	258.7423
21	0.015	994.2941	4.178121	34.39333	30.6	3.830491	238.6941
22	0.015	994.3923	4.178183	34.08667	30.6	3.523824	219.6093
23	0.015	994.4648	4.178228	33.86	30.6	3.297158	205.5003
24	0.015	994.5523	4.178283	33.58667	30.6	3.023824	188.4835
25	0.015	994.6163	4.178323	33.38667	30.6	2.823824	176.0299
26	0.015	994.6945	4.178372	33.14222	30.6	2.57938	160.8064
27	0.015	994.7364	4.178398	33.01111	30.6	2.448269	152.6399
28	0.015	994.8026	4.178439	32.80444	30.6	2.241602	139.7658
29	0.015	994.8559	4.178472	32.6	30.6	2.074935	129.3819
30	0.015	994.9049	4.178503	32.5	30.6	1.92194	119.8487
				η	**0.432003**	**ΣQ (kJ)**	**19194.88**
				η (%)	**43.20032**	**ΣQ (MJ)**	**19.19488**

ตารางที่ ฉ.14 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 20 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	980.9733	4.187027	63.37778	30.6	32.75424	2018.003
2	0.015	981.124	4.186876	63.12667	30.6	32.50313	2002.767
3	0.015	982.928	4.185072	60.12	30.6	29.49646	1820.061
4	0.015	986.3076	4.182846	54.23111	30.6	23.60757	1460.921
5	0.015	988.4028	4.181817	49.08444	30.6	18.46091	1144.572
6	0.015	990.1863	4.181006	45.03111	30.6	14.40757	894.7049
7	0.015	990.9551	4.180281	43.20222	30.6	12.57868	781.6024
8	0.015	991.824	4.179453	41.13333	30.6	10.5098	653.491
9	0.015	992.3048	4.178997	39.98667	30.6	9.363129	582.4108
10	0.015	992.6888	4.178784	38.92	30.6	8.296462	516.2347
11	0.015	992.8984	4.178668	38.33778	30.6	7.71424	480.0948
12	0.015	993.1232	4.178543	37.71333	30.6	7.089795	441.3193
13	0.015	993.308	4.17844	37.2	30.6	6.576462	409.4319
14	0.015	993.4992	4.178334	36.66889	30.6	6.045351	376.4293
15	0.015	993.672	4.178238	36.18889	30.6	5.565351	346.5932
16	0.015	993.8536	4.178137	35.68444	30.6	5.060906	315.2279
17	0.015	993.9728	4.178071	35.35333	30.6	4.729795	294.6347
18	0.015	994.1206	4.178013	34.93556	30.6	4.312017	268.6462
19	0.015	994.2415	4.178088	34.55778	30.6	3.93424	245.1442
20	0.015	994.3532	4.178158	34.20889	30.6	3.585351	223.4336
21	0.015	994.4349	4.178209	33.95333	30.6	3.329795	207.5274
22	0.015	994.5331	4.178271	33.64667	30.6	3.023129	188.4359
23	0.015	994.6141	4.178321	33.39333	30.6	2.769795	172.6614
24	0.015	994.6803	4.178363	33.18667	30.6	2.563129	159.7906
25	0.015	994.7521	4.178408	32.96222	30.6	2.338684	145.8104
26	0.015	994.8004	4.178438	32.81111	30.6	2.187573	136.3967
27	0.015	994.8488	4.178468	32.66	30.6	2.036462	126.9819
28	0.015	994.9	4.1785	32.5	30.6	1.876462	117.0121
29	0.015	994.9405	4.178525	32.4	30.6	1.749795	109.1186
30	0.015	994.9772	4.178548	32.3	30.6	1.635158	101.974
				η	**0.41228**	**ΣQ (kJ)**	**16741.43**
				η (%)	**41.228**	**ΣQ (MJ)**	**16.74143**

ตารางที่ ฉ.15 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 21 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	981.6173	4.186383	62.30444	30.8	31.55352	1945.003
2	0.015	984.4747	4.184017	57.54222	30.8	26.7913	1655.324
3	0.015	986.5813	4.182709	53.54667	30.8	22.79574	1411.028
4	0.015	987.6204	4.18219	50.94889	30.8	20.19796	1251.39
5	0.015	989.1059	4.181497	47.48667	30.8	16.73574	1038.271
6	0.015	990.4847	4.180729	44.32222	30.8	13.5713	842.9705
7	0.015	991.2015	4.180046	42.61556	30.8	11.86463	737.3751
8	0.015	991.5599	4.179705	41.76222	30.8	11.0113	684.5329
9	0.015	991.8669	4.179412	41.03111	30.8	10.28019	639.2355
10	0.015	992.2487	4.179049	40.12222	30.8	9.371297	582.8931
11	0.015	992.532	4.178871	39.35556	30.8	8.60463	535.3366
12	0.015	992.8152	4.178714	38.56889	30.8	7.817964	486.5147
13	0.015	993.0872	4.178563	37.81333	30.8	7.062408	439.6007
14	0.015	993.2976	4.178446	37.22889	30.8	6.477964	403.296
15	0.015	993.5496	4.178306	36.52889	30.8	5.777964	359.7956
16	0.015	993.7608	4.178188	35.94222	30.8	5.191297	323.3233
17	0.015	993.9136	4.178104	35.51778	30.8	4.766853	296.9278
18	0.015	994.0624	4.178021	35.10444	30.8	4.353519	271.2164
19	0.015	994.1889	4.178056	34.72222	30.8	3.971297	247.4382
20	0.015	994.2934	4.178121	34.39556	30.8	3.64463	227.1121
21	0.015	994.3965	4.178185	34.07333	30.8	3.322408	207.0578
22	0.015	994.4797	4.178237	33.81333	30.8	3.062408	190.8725
23	0.015	994.5651	4.178291	33.54667	30.8	2.795741	174.269
24	0.015	994.6497	4.178344	33.28222	30.8	2.531297	157.8006
25	0.015	994.7236	4.17839	33.05111	30.8	2.300186	143.4054
26	0.015	994.7748	4.178422	32.89111	30.8	2.140186	133.4381
27	0.015	994.8239	4.178452	32.73778	30.8	1.986853	123.885
28	0.015	994.8836	4.17849	32.55111	30.8	1.800186	112.2536
29	0.015	994.9405	4.178525	32.4	30.8	1.622408	101.1746
30	0.015	994.9807	4.17855	32.2	30.8	1.496901	93.35221
				η	**0.402781**	**ΣQ (kJ)**	**15816.09**
				η (%)	**40.27807**	**ΣQ (MJ)**	**15.81609**

ตารางที่ ฉ.16 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 22 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	978.5138	4.190229	68.71556	30.5	38.21008	2350.033
2	0.015	978.5884	4.190117	68.52889	30.5	38.02341	2338.668
3	0.015	979.32	4.18902	66.7	30.5	36.19452	2227.261
4	0.015	983.8533	4.184431	58.57778	30.5	28.0723	1733.549
5	0.015	986.8151	4.182592	52.96222	30.5	22.45674	1390.335
6	0.015	988.5759	4.181738	48.69111	30.5	18.18563	1127.682
7	0.015	989.9438	4.181116	45.58222	30.5	15.07674	936.0556
8	0.015	991.0783	4.180164	42.90889	30.5	12.40341	770.7857
9	0.015	991.6681	4.179602	41.50444	30.5	10.99897	683.8241
10	0.015	992.1759	4.179118	40.29556	30.5	9.790078	608.9067
11	0.015	992.4784	4.178901	39.50444	30.5	8.998967	559.844
12	0.015	992.7064	4.178774	38.87111	30.5	8.365634	520.5469
13	0.015	992.9272	4.178652	38.25778	30.5	7.7523	482.4757
14	0.015	993.18	4.178511	37.55556	30.5	7.050078	438.8688
15	0.015	993.3992	4.178389	36.94667	30.5	6.441189	401.0422
16	0.015	993.5856	4.178286	36.42889	30.5	5.923411	368.8643
17	0.015	993.768	4.178184	35.92222	30.5	5.416745	337.3667
18	0.015	993.9344	4.178092	35.46	30.5	4.954523	308.6234
19	0.015	994.0904	4.178005	35.02667	30.5	4.521189	281.6688
20	0.015	994.2102	4.178069	34.65556	30.5	4.150078	258.5838
21	0.015	994.3297	4.178144	34.28222	30.5	3.776745	235.3546
22	0.015	994.4243	4.178203	33.98667	30.5	3.481189	216.9602
23	0.015	994.5053	4.178253	33.73333	30.5	3.227856	201.1904
24	0.015	994.5885	4.178305	33.47333	30.5	2.967856	185.0025
25	0.015	994.6596	4.17835	33.25111	30.5	2.745634	171.1643
26	0.015	994.735	4.178397	33.01556	30.5	2.510078	156.4932
27	0.015	994.7912	4.178432	32.84	30.5	2.334523	145.5575
28	0.015	994.8474	4.178467	32.66444	30.5	2.158967	134.6203
29	0.015	994.9007	4.1785	32.5	30.5	1.9923	124.2357
30	0.015	994.9466	4.178529	32.4	30.5	1.84887	115.2978
				η	**0.431519**	**ΣQ (kJ)**	**19810.86**
				η (%)	**43.15191**	**ΣQ (MJ)**	**19.81086**

ตารางที่ ฉ.17 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 23 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	977.9	4.1911	70.16667	30.9	39.27918	2414.772
2	0.015	978.0871	4.190869	69.78222	30.9	38.89473	2391.463
3	0.015	978.6364	4.190045	68.40889	30.9	37.5214	2307.865
4	0.015	981.756	4.186244	62.07333	30.9	31.18584	1922.546
5	0.015	985.6173	4.183255	55.63778	30.9	24.75029	1530.714
6	0.015	987.7831	4.182108	50.54222	30.9	19.65473	1217.91
7	0.015	989.2907	4.181413	47.06667	30.9	16.17918	1003.91
8	0.015	990.2476	4.180955	44.88667	30.9	13.99918	869.3867
9	0.015	991.1501	4.180095	42.73778	30.9	11.85029	736.4542
10	0.015	991.6905	4.17958	41.45111	30.9	10.56362	656.7694
11	0.015	992.1544	4.179139	40.34667	30.9	9.459176	588.3159
12	0.015	992.4896	4.178895	39.47333	30.9	8.585843	534.148
13	0.015	992.7232	4.178765	38.82444	30.9	7.936954	493.8797
14	0.015	992.892	4.178671	38.35556	30.9	7.468065	464.7716
15	0.015	993.1432	4.178532	37.65778	30.9	6.770287	421.4382
16	0.015	993.264	4.178464	37.32222	30.9	6.434731	400.5928
17	0.015	993.3944	4.178392	36.96	30.9	6.072509	378.0858
18	0.015	993.5616	4.178299	36.49556	30.9	5.608065	349.2196
19	0.015	993.7072	4.178218	36.09111	30.9	5.20362	324.0757
20	0.015	993.836	4.178147	35.73333	30.9	4.845843	301.8276
21	0.015	993.9752	4.178069	35.34667	30.9	4.459176	277.7775
22	0.015	994.0888	4.178006	35.03111	30.9	4.14362	258.146
23	0.015	994.196	4.17806	34.7	30.9	3.812509	237.5466
24	0.015	994.2877	4.178117	34.41333	30.9	3.525843	219.7085
25	0.015	994.3475	4.178155	34.22667	30.9	3.339176	208.091
26	0.015	994.4435	4.178215	33.92667	30.9	3.039176	189.4166
27	0.015	994.5174	4.178261	33.69556	30.9	2.808065	175.0275
28	0.015	994.5779	4.178299	33.50667	30.9	2.619176	163.2654
29	0.015	994.6362	4.178335	33.3	30.9	2.436954	151.9169
30	0.015	994.6843	4.178365	33.2	30.9	2.286422	142.5409
				η	**0.430814**	**ΣQ (kJ)**	**21331.58**
				η (%)	**43.08139**	**ΣQ (MJ)**	**21.33158**

ตารางที่ ฉ.18 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 24 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	979.1173	4.189324	67.20667	31.0	36.17854	2225.979
2	0.015	979.2347	4.189148	66.91333	31.0	35.88521	2208.102
3	0.015	980.3173	4.187683	64.47111	31.0	33.44298	2059.381
4	0.015	984.0987	4.184268	58.16889	31.0	27.14076	1676.376
5	0.015	986.9787	4.182511	52.55333	31.0	21.52521	1332.857
6	0.015	988.5661	4.181743	48.71333	31.0	17.68521	1096.641
7	0.015	989.9683	4.181105	45.52667	31.0	14.49854	900.177
8	0.015	990.942	4.180293	43.23333	31.0	12.20521	758.3879
9	0.015	991.5823	4.179684	41.70889	31.0	10.68076	663.9963
10	0.015	992.0219	4.179265	40.66222	31.0	9.634095	599.1331
11	0.015	992.4448	4.17892	39.59778	31.0	8.56965	533.1197
12	0.015	992.6816	4.178788	38.94	31.0	7.911873	492.3012
13	0.015	992.9336	4.178648	38.24	31.0	7.211873	448.8439
14	0.015	993.0144	4.178603	38.01556	31.0	6.987428	434.9059
15	0.015	993.224	4.178487	37.43333	31.0	6.405206	398.7407
16	0.015	993.364	4.178409	37.04444	31.0	6.016317	374.5772
17	0.015	993.5176	4.178324	36.61778	31.0	5.58965	348.0595
18	0.015	993.6664	4.178241	36.20444	31.0	5.176317	322.3638
19	0.015	993.8328	4.178148	35.74222	31.0	4.714095	293.6208
20	0.015	993.9336	4.178092	35.46222	31.0	4.434095	276.2051
21	0.015	994.0696	4.178017	35.08444	31.0	4.056317	252.7029
22	0.015	994.1398	4.178025	34.87556	31.0	3.847428	239.7068
23	0.015	994.238	4.178086	34.56889	31.0	3.540762	220.6255
24	0.015	994.3155	4.178135	34.32667	31.0	3.298539	205.551
25	0.015	994.3859	4.178179	34.10667	31.0	3.078539	191.8571
26	0.015	994.4492	4.178218	33.90889	31.0	2.880762	179.5446
27	0.015	994.5188	4.178262	33.69111	31.0	2.662984	165.9848
28	0.015	994.5679	4.178292	33.53778	31.0	2.50965	156.4364
29	0.015	994.6241	4.178328	33.4	31.0	2.334095	145.5028
30	0.015	994.6788	4.178362	33.2	31.0	2.163177	134.8566
				η	**0.42955**	**ΣQ (kJ)**	**19336.54**
				η (%)	**42.95503**	**ΣQ (MJ)**	**19.33654**

ตารางที่ ฉ.19 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 6 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	980.064	4.187936	64.89333	29.1	35.75566	2201.357
2	0.015	980.4053	4.187595	64.32444	29.1	35.18677	2166.91
3	0.015	982.8693	4.185131	60.21778	29.1	31.0801	1917.69
4	0.015	986.9013	4.182549	52.74667	29.1	23.60899	1461.785
5	0.015	989.1733	4.181467	47.33333	29.1	18.19566	1128.912
6	0.015	990.5612	4.180656	44.14	29.1	15.00232	931.9134
7	0.015	991.5729	4.179692	41.73111	29.1	12.59344	782.8967
8	0.015	992.1936	4.179101	40.25333	29.1	11.11566	691.3624
9	0.015	992.6936	4.178781	38.90667	29.1	9.768991	607.8632
10	0.015	993.0104	4.178605	38.02667	29.1	8.888991	553.2595
11	0.015	993.3744	4.178403	37.01556	29.1	7.87788	490.4829
12	0.015	993.5936	4.178281	36.40667	29.1	7.268991	452.6597
13	0.015	993.8344	4.178148	35.73778	29.1	6.600102	411.0926
14	0.015	994.0768	4.178013	35.06444	29.1	5.926769	369.2317
15	0.015	994.2429	4.178089	34.55333	29.1	5.415658	337.4525
16	0.015	994.3695	4.178168	34.15778	29.1	5.020102	312.851
17	0.015	994.4876	4.178242	33.78889	29.1	4.651213	289.9015
18	0.015	994.654	4.178346	33.26889	29.1	4.131213	257.5404
19	0.015	994.767	4.178417	32.91556	29.1	3.77788	235.5443
20	0.015	994.8595	4.178475	32.62667	29.1	3.488991	217.5558
21	0.015	994.9619	4.178539	32.30667	29.1	3.168991	197.6256
22	0.015	995.0308	4.178582	32.09111	29.1	2.953435	184.1977
23	0.015	995.1055	4.178628	31.85778	29.1	2.720102	169.6599
24	0.015	995.1773	4.178673	31.63333	29.1	2.495658	155.6737
25	0.015	995.2456	4.178716	31.42	29.1	2.282324	142.3776
26	0.015	995.279	4.178737	31.31556	29.1	2.17788	135.8673
27	0.015	995.3338	4.178771	31.14444	29.1	2.006769	125.2005
28	0.015	995.3722	4.178795	31.02444	29.1	1.886769	117.719
29	0.015	995.4049	4.178816	30.9	29.1	1.784546	111.3453
30	0.015	995.4468	4.178842	30.8	29.1	1.653629	103.1818
				η	**0.416028**	Σ**Q (kJ)**	**17261.11**
				η **(%)**	**41.60284**	Σ**Q (MJ)**	**17.26111**

ตารางที่ ฉ.20 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 7 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	981.3027	4.186697	62.82889	30.5	32.31409	1991.396
2	0.015	981.68	4.18632	62.2	30.5	31.6852	1953.215
3	0.015	984.5907	4.18394	57.34889	30.5	26.83409	1658.132
4	0.015	987.6098	4.182195	50.97556	30.5	20.46075	1267.659
5	0.015	989.3796	4.181373	46.86444	30.5	16.34964	1014.568
6	0.015	990.6676	4.180555	43.88667	30.5	13.37186	830.7016
7	0.015	991.5524	4.179712	41.78	30.5	11.2652	700.3128
8	0.015	992.1665	4.179127	40.31778	30.5	9.802974	609.7043
9	0.015	992.5432	4.178865	39.32444	30.5	8.809641	548.0967
10	0.015	992.7912	4.178727	38.63556	30.5	8.120752	505.3467
11	0.015	993.0352	4.178592	37.95778	30.5	7.442974	463.268
12	0.015	993.272	4.17846	37.3	30.5	6.785196	422.4138
13	0.015	993.5016	4.178332	36.66222	30.5	6.147418	382.7856
14	0.015	993.7088	4.178217	36.08667	30.5	5.571863	347.0099
15	0.015	993.8808	4.178122	35.60889	30.5	5.094085	317.302
16	0.015	994.0256	4.178041	35.20667	30.5	4.691863	292.2852
17	0.015	994.1647	4.17804	34.79778	30.5	4.282974	266.8503
18	0.015	994.2792	4.178112	34.44	30.5	3.925196	244.5913
19	0.015	994.3951	4.178184	34.07778	30.5	3.562974	222.0499
20	0.015	994.506	4.178254	33.73111	30.5	3.216307	200.4708
21	0.015	994.59	4.178306	33.46889	30.5	2.954085	184.1444
22	0.015	994.6732	4.178358	33.20889	30.5	2.694085	167.9533
23	0.015	994.73	4.178394	33.03111	30.5	2.516307	156.8807
24	0.015	994.7976	4.178436	32.82	30.5	2.305196	143.7301
25	0.015	994.8474	4.178467	32.66444	30.5	2.149641	134.0388
26	0.015	994.9142	4.178509	32.45556	30.5	1.940752	121.0231
27	0.015	994.9583	4.178536	32.31778	30.5	1.802974	112.4371
28	0.015	994.9939	4.178559	32.20667	30.5	1.691863	105.5124
29	0.015	995.023	4.178577	32.1	30.5	1.600752	99.83361
30	0.015	995.0635	4.178602	32.0	30.5	1.474327	91.95318
				η	**0.388985**	**ΣQ (kJ)**	**15555.67**
				η (%)	**38.89845**	**ΣQ (MJ)**	**15.55567**

ตารางที่ ฉ.21 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 12 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	980.6213	4.187379	63.96444	30.1	33.8563	2085.328
2	0.015	981.0147	4.186985	63.30889	30.1	33.20075	2045.578
3	0.015	984.388	4.184075	57.68667	30.1	27.57852	1703.837
4	0.015	987.5129	4.182244	51.21778	30.1	21.10964	1307.748
5	0.015	989.6397	4.181255	46.27333	30.1	16.16519	1003.358
6	0.015	990.8188	4.180411	43.52667	30.1	13.41852	833.6989
7	0.015	991.7493	4.179524	41.31111	30.1	11.20297	696.5514
8	0.015	992.348	4.178973	39.86667	30.1	9.758525	607.0284
9	0.015	992.6824	4.178788	38.93778	30.1	8.829636	549.4076
10	0.015	992.9616	4.178632	38.16222	30.1	8.05408	501.2724
11	0.015	993.2208	4.178488	37.44222	30.1	7.33408	456.5643
12	0.015	993.4472	4.178363	36.81333	30.1	6.705191	417.497
13	0.015	993.6952	4.178225	36.12444	30.1	6.016302	374.6847
14	0.015	993.9168	4.178102	35.50889	30.1	5.400747	336.414
15	0.015	994.0744	4.178014	35.07111	30.1	4.962969	309.1873
16	0.015	994.2259	4.178079	34.60667	30.1	4.498525	280.3
17	0.015	994.3724	4.17817	34.14889	30.1	4.040747	251.8188
18	0.015	994.5018	4.178251	33.74444	30.1	3.636302	226.6477
19	0.015	994.6092	4.178318	33.40889	30.1	3.300747	205.7583
20	0.015	994.7016	4.178376	33.12	30.1	3.011858	187.7699
21	0.015	994.7713	4.17842	32.90222	30.1	2.79408	174.2069
22	0.015	994.868	4.17848	32.6	30.1	2.491858	155.3811
23	0.015	994.9277	4.178517	32.41333	30.1	2.305191	143.7514
24	0.015	994.9932	4.178558	32.20889	30.1	2.100747	131.0121
25	0.015	995.0337	4.178584	32.08222	30.1	1.97408	123.1184
26	0.015	995.0877	4.178617	31.91333	30.1	1.805191	112.5922
27	0.015	995.1411	4.178651	31.74667	30.1	1.638525	102.2033
28	0.015	995.1788	4.178674	31.62889	30.1	1.520747	94.86102
29	0.015	995.2179	4.178699	31.5	30.1	1.398525	87.24099
30	0.015	995.2513	4.17872	31.4	30.1	1.294032	80.72577
				η	**0.351238**	Σ**Q (kJ)**	**15585.54**
				η **(%)**	**35.12383**	Σ**Q (MJ)**	**15.58554**

ตารางที่ ฉ.22 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 13 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	979.6613	4.188508	65.84667	30.5	35.35518	2176.104
2	0.015	979.7316	4.188403	65.67111	30.5	35.17962	2165.399
3	0.015	980.5587	4.187441	64.06889	30.5	33.5774	2068.048
4	0.015	984.7573	4.183828	57.07111	30.5	26.57962	1642.643
5	0.015	987.328	4.182336	51.68	30.5	21.18851	1312.418
6	0.015	989.2085	4.181451	47.25333	30.5	16.76185	1039.987
7	0.015	990.4595	4.180753	44.38222	30.5	13.89073	862.7951
8	0.015	991.3321	4.179922	42.30444	30.5	11.81296	734.2386
9	0.015	991.9519	4.179332	40.82889	30.5	10.3374	642.8358
10	0.015	992.4128	4.178937	39.68667	30.5	9.195179	572.0179
11	0.015	992.8128	4.178715	38.57556	30.5	8.084068	503.0734
12	0.015	992.9968	4.178613	38.06444	30.5	7.572957	471.3426
13	0.015	993.188	4.178507	37.53333	30.5	7.041846	438.3594
14	0.015	993.3992	4.178389	36.94667	30.5	6.455179	401.9132
15	0.015	993.5744	4.178292	36.46	30.5	5.968512	371.6692
16	0.015	993.72	4.178211	36.05556	30.5	5.564068	346.5278
17	0.015	993.8784	4.178123	35.61556	30.5	5.124068	319.1689
18	0.015	994.044	4.178031	35.15556	30.5	4.664068	290.5584
19	0.015	994.1711	4.178044	34.77778	30.5	4.28629	267.0589
20	0.015	994.2458	4.178091	34.54444	30.5	4.052957	252.5427
21	0.015	994.3524	4.178158	34.21111	30.5	3.719623	231.8011
22	0.015	994.4406	4.178213	33.93556	30.5	3.444068	214.6507
23	0.015	994.5487	4.17828	33.59778	30.5	3.10629	193.623
24	0.015	994.612	4.17832	33.4	30.5	2.908512	181.3082
25	0.015	994.6689	4.178356	33.22222	30.5	2.730734	170.2373
26	0.015	994.7428	4.178402	32.99111	30.5	2.499623	155.8428
27	0.015	994.7955	4.178435	32.82667	30.5	2.335179	145.5991
28	0.015	994.8531	4.178471	32.64667	30.5	2.155179	134.385
29	0.015	994.8993	4.1785	32.5	30.5	2.010734	125.385
30	0.015	994.9417	4.178526	32.4	30.5	1.878077	117.1185
				η	0.415448	ΣQ (kJ)	18548.65
				η (%)	41.5448	ΣQ (MJ)	18.54865

ตารางที่ ฉ.23 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 14 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	979.1964	4.189205	67.00889	30.5	36.50896	2246.427
2	0.015	979.2916	4.189063	66.77111	30.5	36.27119	2231.937
3	0.015	980.3307	4.187669	64.44889	30.5	33.94896	2090.561
4	0.015	985.0627	4.183625	56.56222	30.5	26.0623	1611.093
5	0.015	988.001	4.182	49.99778	30.5	19.49785	1208.424
6	0.015	989.8333	4.181167	45.83333	30.5	15.33341	951.896
7	0.015	990.8599	4.180372	43.42889	30.5	12.92896	803.308
8	0.015	991.7055	4.179566	41.41556	30.5	10.91563	678.6627
9	0.015	992.0779	4.179212	40.52889	30.5	10.02896	623.7167
10	0.015	992.4744	4.178903	39.51556	30.5	9.01563	560.8787
11	0.015	992.8088	4.178717	38.58667	30.5	8.086741	503.238
12	0.015	993.0864	4.178563	37.81556	30.5	7.31563	455.3622
13	0.015	993.3368	4.178424	37.12	30.5	6.620074	412.1574
14	0.015	993.528	4.178318	36.58889	30.5	6.088963	379.1545
15	0.015	993.7136	4.178215	36.07333	30.5	5.573407	347.1075
16	0.015	993.9168	4.178102	35.50889	30.5	5.008963	312.0097
17	0.015	994.0632	4.17802	35.10222	30.5	4.602296	286.715
18	0.015	994.1967	4.17806	34.69778	30.5	4.197852	261.5564
19	0.015	994.3233	4.17814	34.30222	30.5	3.802296	236.9451
20	0.015	994.4065	4.178192	34.04222	30.5	3.542296	220.7641
21	0.015	994.5196	4.178262	33.68889	30.5	3.188963	198.7695
22	0.015	994.5999	4.178312	33.43778	30.5	2.937852	183.1346
23	0.015	994.6653	4.178353	33.23333	30.5	2.733407	170.4032
24	0.015	994.7514	4.178407	32.96444	30.5	2.464518	153.6557
25	0.015	994.799	4.178437	32.81556	30.5	2.31563	144.3808
26	0.015	994.8588	4.178474	32.62889	30.5	2.128963	132.7512
27	0.015	994.9142	4.178509	32.45556	30.5	1.95563	121.9508
28	0.015	994.9676	4.178542	32.28889	30.5	1.788963	111.5646
29	0.015	995.0003	4.178563	32.2	30.5	1.686741	105.1937
30	0.015	995.0405	4.178588	32.1	30.5	1.560944	97.35287
				η	**0.382773**	**ΣQ (kJ)**	**17841.07**
				η (%)	**38.27733**	**ΣQ (MJ)**	**17.84107**

ตารางที่ ฉ.24 ข้อมูลจากการทดลองวันที่ 15 มีนาคม 2556 ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Time	Δv_i	ρ_w	C_{pw}	$t_{di}(Vi)$	t_{main}	$(t_{di}(Vi)-t_{main})$	Q
1	0.015	980.6013	4.187399	63.99778	30.5	33.47195	2061.622
2	0.015	980.88	4.18712	63.53333	30.5	33.0075	2033.458
3	0.015	983.6227	4.184585	58.96222	30.5	28.43639	1755.685
4	0.015	987.1084	4.182446	52.22889	30.5	21.70306	1344.025
5	0.015	989.055	4.18152	47.60222	30.5	17.07639	1059.356
6	0.015	990.4427	4.180769	44.42222	30.5	13.89639	863.135
7	0.015	991.376	4.17988	42.2	30.5	11.67417	725.6369
8	0.015	991.8903	4.17939	40.97556	30.5	10.44972	649.7893
9	0.015	992.4792	4.1789	39.50222	30.5	8.97639	558.4398
10	0.015	992.6968	4.17878	38.89778	30.5	8.371945	520.9352
11	0.015	992.98	4.178622	38.11111	30.5	7.585278	472.1026
12	0.015	993.172	4.178516	37.57778	30.5	7.051945	438.982
13	0.015	993.3888	4.178395	36.97556	30.5	6.449723	401.5698
14	0.015	993.5984	4.178279	36.39333	30.5	5.867501	365.3867
15	0.015	993.7832	4.178176	35.88	30.5	5.354167	333.4737
16	0.015	993.9568	4.17808	35.39778	30.5	4.871945	303.4854
17	0.015	994.1057	4.178004	34.98222	30.5	4.45639	277.636
18	0.015	994.2294	4.178081	34.59556	30.5	4.069723	253.5827
19	0.015	994.3389	4.178149	34.25333	30.5	3.727501	232.2883
20	0.015	994.4499	4.178219	33.90667	30.5	3.380834	210.7119
21	0.015	994.5551	4.178284	33.57778	30.5	3.051945	190.2369
22	0.015	994.6269	4.178329	33.35333	30.5	2.827501	176.2613
23	0.015	994.7059	4.178379	33.10667	30.5	2.580834	160.8992
24	0.015	994.7748	4.178422	32.89111	30.5	2.365278	147.4723
25	0.015	994.8246	4.178453	32.73556	30.5	2.209723	137.7816
26	0.015	994.8836	4.17849	32.55111	30.5	2.025278	126.2896
27	0.015	994.9427	4.178527	32.36667	30.5	1.840834	114.7961
28	0.015	994.9875	4.178555	32.22667	30.5	1.700834	106.0711
29	0.015	995.0259	4.178579	32.1	30.5	1.580834	98.59173
30	0.015	995.069	4.178606	32.0	30.5	1.445906	90.18121
				η	**0.395607**	**ΣQ (kJ)**	**16209.88**
				η (%)	**39.56072**	**ΣQ (MJ)**	**16.20988**

ภาคผนวก ช

ข้อมูลประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D และตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825

ตารางที่ ช.1 ข้อมูลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีกระจกปิด

Temp	**DDMMYY**	**Local Time**	**Radiation (G) (J/min.m^2)**	**T_a (°C)**	**T_{in} (°C)**	**T_{out} (°C)**	**T_p (°C)**	**T_g (°C)**	**U_L (W/m^2°C)**	**F**	**q'_{fin} (kJ)**	**Q (kJ)**	**η (%)**
40°C	14/5/2556	10:59:31	847.24	35.5	40.6	47.9	54.3	65.8	8.5461	0.9357	30.7812	61.0	57.6
40°C	14/5/2556	11:16:31	877.16	34.8	40.7	48.0	53.2	65.8	9.0145	0.9577	32.6651	61.04	57.69
40°C	14/5/2556	11:39:31	904.13	34.7	40.6	47.8	51.7	65.9	9.6099	0.9845	35.0085	61.87	56.17
40°C	14/5/2556	11:57:31	903.97	34.6	40.4	47.6	50.9	66.1	9.5384	0.9814	35.3538	58.53	54.86
50°C	14/5/2556	13:15:33	890.52	35.5	49.7	56.2	60.6	75.1	9.7857	0.9922	30.0844	54.37	51.51
50°C	14/5/2556	13:30:33	859.47	35.7	50.3	56.2	54.8	71.7	9.7923	0.9925	31.7958	49.36	48.23
50°C	14/5/2556	13:45:33	823.03	36.3	50.6	56.1	52.9	70.8	9.8149	0.9935	31.3807	46.01	46.97
50°C	14/5/2556	14:00:33	785.11	36.2	50.4	55.6	51.5	69.6	9.4341	0.9767	30.0441	43.50	46.32
60°C	15/5/2556	10:27:26	848.46	33.1	60.5	65.2	57.3	77.2	9.4294	0.9765	28.5204	39.36	38.13
60°C	15/5/2556	10:44:26	759.13	33.5	59.1	64.1	57.7	74.9	8.6013	0.9384	24.3137	41.86	46.87
60°C	15/5/2556	11:30:26	908.14	35.4	59.8	65.3	58.4	78.5	9.3305	0.9721	32.0042	46.05	44.37
60°C	15/5/2556	11:46:26	911.96	35.5	60.6	65.5	58.5	78.1	9.9311	0.9985	32.2707	41.03	37.70
70°C	16/5/2556	12:39:28	948.89	36.8	69.9	75.1	66.6	88.3	10.1939	1.0097	30.2093	43.60	42.50
70°C	16/5/2556	12:54:08	948.89	33.5	70.5	75.4	57.7	74.9	10.1319	1.0070	33.4590	41.09	40.05
70°C	16/5/2556	13:09:28	899.54	37.4	70.3	75.5	62.2	86.7	10.3841	1.0176	30.5931	43.60	39.25
70°C	16/5/2556	13:24:28	901.27	37.6	70.1	74.8	62.4	86.5	9.9406	0.9989	30.7728	39.41	35.61

ตารางที่ ช.2 ข้อมูลจากการทดสอบหาประสิทธิภาพตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีกระจกปิด

Temp	**DDMMYY**	**Local Time**	**Radiation (G) (J/min.m2)**	**T_a (°C)**	**T_{in} (°C)**	**T_{out} (°C)**	**T_p (°C)**	**T_g (°C)**	**U_L (W/m^2°C)**	**F**	**q'_{fin} (kJ)**	**Q (kJ)**	**η (%)**
40°C	14/5/2556	11:07:31	879.76	35.0	40.7	48.6	54.3	65.8	8.5436	0.8539	46.6552	66.06	62.30
40°C	14/5/2556	11:24:31	901.66	34.2	40.7	48.2	53.2	65.8	9.0109	0.8703	48.6113	62.71	59.27
40°C	14/5/2556	11:39:31	904.13	34.8	40.7	48.3	51.7	65.9	9.6101	0.8901	50.4919	66.06	59.97
40°C	14/5/2556	11:59:31	902.84	34.2	40.4	48.6	50.9	66.1	9.5353	0.8877	50.6034	66.89	62.70
50°C	14/5/2556	13:15:33	888.43	35.4	49.6	56.8	60.6	75.1	9.7847	0.8956	43.0566	60.25	57.08
50°C	14/5/2556	13:30:33	856.53	36.1	50.2	57.5	54.8	71.7	9.7960	0.8959	45.9309	61.09	59.70
50°C	14/5/2556	13:45:33	821.81	36.9	50.4	57.3	52.9	70.8	9.8191	0.8967	45.4809	57.75	58.96
50°C	14/5/2556	14:00:33	782.64	35.7	50.3	56.7	51.5	69.6	9.4299	0.8842	42.7674	53.56	57.04
60°C	15/5/2556	10:27:26	848.46	32.8	60.0	65.7	57.3	77.2	9.4272	0.8842	40.9212	47.74	46.26
60°C	15/5/2556	10:43:26	753.16	34.8	59.0	64.9	57.7	74.9	8.6075	0.8562	35.8247	49.42	55.34
60°C	15/5/2556	11:25:26	898.06	35.7	59.8	66.0	58.4	78.5	9.3322	0.8810	45.7583	51.93	50.03
60°C	15/5/2556	11:41:26	856.55	35.4	60.5	65.8	58.5	78.1	9.9307	0.9001	42.4167	44.40	40.79
70°C	16/5/2556	12:41:38	891.38	37.6	69.6	75.2	66.6	88.3	10.2001	0.9084	39.8861	46.95	45.76
70°C	16/5/2556	12:57:38	932.03	37.0	70.3	75.8	57.7	74.9	10.1612	0.9072	49.6757	46.11	41.51
70°C	16/5/2556	13:12:38	917.61	37.5	70.1	75.7	62.2	86.7	10.3851	0.9139	45.2117	46.95	42.43
70°C	16/5/2556	13:27:38	896.26	37.6	69.9	75.2	62.4	86.5	9.9403	0.9004	43.8489	44.44	41.41

ภาคผนวก ซ

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

การประยุกต์ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะสำหรับกระบวนการผลิตน้ำร้อน
A Simple of Metal Sheet Solar Collector for Producing Hot Water

ภาสกร ชุ่มทิ*[1], นริส ประทินทอง[1] และศิริชัย เทพา[1]

Phatsakron Choomti*[1], Naris Pratinthong[1] and Sirichai Thepha[1]

[1] สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

[1] Division of Energy Technology, School of Energy Environment and Materials, King Mongkut's University of Thonburi.

126. ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

126. Pracha Uthit Road, Bang mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand.

*ผู้ติดต่อ: phatsakron.big@gmail.com เบอร์โทร: 086-9229128

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์แผ่นโลหะหรือเมทัลชีทเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ต้นทุนต่ำ โดยสร้างจากวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย ใช้หลังคาเมทัลชีทเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อภายในแผงซึ่งอยู่ใต้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์เพื่อลำเลียงตัวกลางรับความร้อนและใช้ฉนวนโฟมพอลิยูรีเทนเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ยังไม่ได้ใส่กรอบกระจก ทำการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3 ชนิด ซึ่งมีความแตกต่างกันทั้งรูปร่างและสันลอน โดยใช้ชื่อแทนคือ CL-825 CL-750D และ CL-720 มีพื้นที่ของแผงเท่ากับ 2 m^2 งานวิจัยนี้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 มีระบบการไหลเวียนของน้ำร้อนเป็นแบบเทอร์โมไซฟอน ทำการทดลองในสภาวะอากาศที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้พบว่า ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของตัวรับรังสีแบบ CL-825 และ CL-750D มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 25.38 % และ 23.8 ตามลำดับ และตัวรับรังสีแบบ CL-720 มีประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนที่ต่ำที่สุด เท่ากับ 17.38 %.

คำหลัก: แผ่นโลหะ (เมทัลชีท), ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ, กระบวนการผลิตน้ำร้อน, ต้นทุนต่ำ.

Abstract

The objective of this research is to design a low cost solar collector fabricated with local material parts in Thailand. The simple collector without glazing was made of a roof metal sheet served as an absorber. The aluminum tubes were located underneath the metal sheet and insulated with PU foam. Three types of collector having the area of 2 m^2 were built according to the roof curls and shapes, namely, CL-825, CL-750D and CL-720. The performance test was performed in accordance with the ISO 9459-2 standard, at KMUTT, Bangkok, Thailand. The experimental results showed that, the efficiency of the metal sheet solar collectors CL-825 for producing the hot water is close to CL-750D type which is 25.38 % and 23.8 % respectively, while CL-720 type is less than the others that is 17.38 %.

Keywords: Metal Sheet, Flat Plate Solar Collector, Hot Water Process, Low Cost.

1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาคเศรษฐกิจที่เติบโตมากขึ้น จากรายงานพลังงานประจำปีของกระทรวงพลังงาน พบว่า ปี 2553 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นปีที่ 12 และเพิ่มขึ้นจากปี 2552 ร้อยละ 5.3 มีปริมาณรวมทั้งสิ้น 70,247 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ [1] พลังงานหลักที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่

มาจากพลังงานสิ้นเปลืองที่เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ซึ่งมีราคาแพงและส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมของโลก และประเทศไทยยังต้องมีการนำเข้าพลังงานจากภายนอกประเทศเข้ามาทดแทน ส่งผลให้สูญเสียเงินตราออกนอกประเทศและความมั่นคงทางพลังงานภายในประเทศลดต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (2555-2564) ซึ่งสำหรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีเป้าหมายในปี 2564 คือ 2,000 MW ปัจจุบันมีกำลังการผลิตรวม 75.48 MW [2]

ดังจะเห็นได้ว่าอุปสรรคของพลังงานแสงอาทิตย์ในปัจจุบันนั้นคือเรื่อง ราคา และต้นทุนการผลิตพลังงานที่สูง ทำให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบยังไม่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหมาะกับการใช้งานในประเทศไทย ควรคำนึงถึงราคาและศักยภาพที่เหมาะสมกับการใช้งาน โดยออกแบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย (Low cost flat plate solar collector) ซึ่งเป็นการใช้ความร้อนจากรังสีอาทิตย์มาผลิตน้ำร้อน เป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตน้ำร้อนอย่างหนึ่ง โดยทำการลดราคาต้นทุนการผลิตตัวเก็บรังสี แต่ยังคงอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้สูงพอกับการใช้งานตามวัตถุประสงค์นั้นๆ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่ายได้ถูกพัฒนามามาก จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ จากภายในประเทศไทย ในยุคแรกได้มีการพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนถูกและสามารถสร้างได้ด้วยตนเอง ซึ่งประยุกต์ท่อน้ำพลาสติก (PVC) เป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และใช้เป็นถังสะสมความร้อน [3] ต่อมา ได้มีการใช้แผ่นพลาสติกพอลิโพพิลีนทำหน้าที่เป็นท่อให้น้ำไหลภายในและเป็นแผ่นดูดกลืนความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งส่งผลให้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีน้ำหนักเบากว่าตัวเก็บรังสีทั่วไปครึ่งหนึ่ง [4] จากนั้นได้มีการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุ 3 ชนิด คือ แผ่นฟิวเจอร์บอร์ด แผ่นสังกะสี และแผ่นกระเบื้องยิปซัม ซึ่งใช้เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ [5] และมีการทำการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำอากาศร้อน โดยใช้กระป๋องอลูมิเนียมที่ใช้แล้วเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์โดยทำงานร่วมกับชุดสารดูดความชื้นเพื่อดูดซับความชื้นของอากาศก่อนเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ส่วนในต่างประเทศนั้นก็ได้มีการคิดค้นและพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์อย่างง่าย ต้นทุนต่ำเรื่อยมา โดยมีการใช้แผ่นซีเมนต์คอนกรีตเป็นตัวดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยท่ออลูมิเนียมที่ถูกหล่อด้วยซีเมนต์ จะอยู่ด้านบนผิวของแผ่นซีเมนต์ [6] ต่อมามีการศึกษาเปรียบเทียบแผงรังสีที่สร้างขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์และแผงรังสีที่ทำจากโลหะที่ขายตามท้องตลาด [7] และมีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นอุปกรณ์เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแผ่นพอลิเมอร์ PVC เป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยไม่ใช้กระจกครอบไว้ และถังเก็บน้ำร้อนจะเป็นถังที่สร้างจากพอลิเอทิลีนเคลือบด้วยพอลิสไตรีน [8]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้แผ่นโลหะ (Metal sheet) มาเป็นส่วนประกอบในการสร้างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบอย่างง่าย (Low cost flat plate solar collector) โดยใช้วัสดุหลักคือแผ่นโลหะหรือเมทัลชีทมาทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ ซึ่งมีข้อดีคือ ราคาถูก ไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรง เหนียว ทนทาน อายุการใช้งานที่สูง มาเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์โดยแผ่นโลหะมีแผ่นเหล็กเป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีค่าความจุความร้อนจำเพาะที่สูง และเหมาะที่จะเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ อีกทั้งยังเคลือบสังกะสีเพื่อกันสนิม และสังกะสีนี้เองที่จะมีหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนไปยังท่อท่ออลูมิเนียมที่ใช้ลำเลียงตัวกลางในการรับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ซึ่งตัวกลางที่ใช้ก็คือ น้ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณหาความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ [9]

$$\dot{Q} = a_1 H + a_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + a_3 \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อน (MJ/day)

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \dot{Q}_i \quad (2)$$

เมื่อ $t_{a(day)}$ คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเฉลี่ยตลอดวัน (K)

t_{main} คือ อุณหภูมิน้ำเย็นหรือน้ำร้อนที่ป้อนเพื่อดันน้ำร้อนในถัง (K)

H คือ พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (MJ/day)

a_1 คือ สัมประสิทธิ์เชิงพื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

a_2 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อนของการสะสมความร้อน (MJ/K)

a_3 คือ สัมประสิทธิ์เชิงความร้อน ณ สภาวะเริ่มต้น (MJ)

การหาค่า a_1, a_2 และ a_3 หาได้จากผลการทดลองและใช้วิธี Least Squares Fitting

หลังจากคำนวณปริมาณความร้อนตามสมการที่ 1 แล้วทำการคำนวณหาปริมาณน้ำร้อนจากสมการ

$$m=\frac{Q}{C_p(T_{out}-T_{main})} \quad (3)$$

เมื่อ m คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (Liter/day)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ คำนวณจากสมการ (1) (kJ)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg.K)

T_{out} คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้ (°C)

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพพลังงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta_m = \frac{m}{A_G} \quad (4)$$

เมื่อ η_m คือ ความสามารถในการผลิตน้ำร้อน

A_G คือ พื้นที่รวมของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2)

m คือ ปริมาณน้ำร้อนที่ผลิตได้ (Liter/day)

การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จากปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อน จากสูตรการคำนวณดังนี้

$$\eta = \frac{Q}{A_G H} \quad (5)$$

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1 ตัวรับรังสีอาทิตย์

ตัวรับรังสีอาทิตย์จะมีหน้าที่รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ แล้วนำความร้อนที่ได้ถ่ายเทไปยังท่อภายในตัวรับรังสีอาทิตย์ และท่อภายในตัวรับรังสีอาทิตย์ก็จะนำความร้อนที่ได้ส่งผ่านไปยังน้ำที่อยู่ภายในท่ออีกต่อหนึ่ง โดยพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ของตัวรับรังสีอาทิตย์มีขนาดประมาณ 2 m^2 โดยมี 3 แบบดังต่อไปนี้

- ตัวรับรังสีอาทิตย์อาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-825

CL-825 มีสันลอนรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 20 mm ความสูงของสันลอนสูง 10 mm ระยะห่างระหว่างสันลอน 102 mm โดย 1 แผ่นมีหน้ากว้าง 825 mm มีจำนวนสันลอน 8 ลอน ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-825

- ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-750D

CL-750D มีสันลอนโค้งคล้ายหลังคาสังกะสี ความสูงของสันลอนสูง 18 mm ระยะห่างระหว่างสันลอน 75 mm โดย 1 แผ่นมีหน้ากว้าง 750 mm มีจำนวนลอน 11 ลอน ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-750D

- ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-720

CL-720 มีสันลอนเป็นลอนรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ในส่วนฐานกว้าง 60 mm ความสูงของลอนสูง 29 mm ระยะห่างระหว่างลอน 180 mm โดย 1 แผ่นมีหน้ากว้าง 720 mm มีจำนวนลอน 8 ลอน ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 ตัวรับรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะ CL-720

การสร้างตัวต้นแบบตัวรับรังสีอาทิตย์มีต้นทุนการสร้างตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าต้นทุนตัวต้นแบบของตัวรับรังสีอาทิตย์ชนิดต่างๆ

ชนิดตัวรับรังสี / ราคาอุปกรณ์ (฿)	CL-720	CL-750D	CL-825
แผ่นโลหะ	460	400	390
ท่อหลัก (อลูมิเนียม)	200	200	200
ท่อร่วม(อลูมิเนียม)	140	320	250
ฉนวนพียูโฟม	540	540	540
ค่างานประกอบ			
- ค่าริเวท	114	247	190
-ค่าเชื่อมท่อหลักและท่อร่วม	360	780	600
สีดำด้านพ่น	300	300	300
รวม	2114	2787	2470

3.2 ถังสะสมความร้อน (Storage Tank)

ถังสะสมความร้อนทำหน้าที่สะสมความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แล้วส่งต่อน้ำไปยังตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นระบบปิด ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการเทอร์โมไซฟอน โดยทำมาจากสแตนเลสและมีฉนวนอยู่ด้านนอกถังมีขนาด 150 L

3.3 ถังพักน้ำ (Reservoir Tank)

ทำหน้าที่พักน้ำเอาไว้เพื่อทำการไล่น้ำที่ค้างอยู่ในแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์ โดยใช้ถังขนาด 800 L

3.4 ปั๊มน้ำ

ปั๊มน้ำยี่ห้อ Fujika ทำหน้าที่ปั๊มน้ำจากถังพักน้ำเข้าสู่ระบบทำน้ำร้อน ในช่วงที่ทำการทดสอบ โดยจะทำการขับน้ำร้อนที่ค้างอยู่ในแผงดูดกลืนรังสีอาทิตย์และถังพักน้ำร้อนให้หมดไปจนกว่าอุณหภูมิน้ำเข้าและน้ำออกจะเท่ากัน และเท่ากับอุณหภูมิน้ำในถังพัก เพื่อที่จะทำให้พร้อมสำหรับการทดสอบในรอบต่อไป

3.5 เครื่องวัดแรงดันน้ำ (Flow Meter)

เครื่องวัดแรงดันน้ำจะทำการวัดแรงดันน้ำจากปั๊มน้ำเข้าสู่ถังสะสมความร้อน โดยจะใช้ในระหว่างการขับน้ำร้อนที่ค้างอยู่ในระบบ

4. วิธีการทดลอง

การทดลองครั้งนี้จะเป็นการทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ISO 9459-2 โดยมีวิธีการต่อระบบดังรูปที่ 4 มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

4.1 ก่อนเริ่มทดสอบในแต่ละวัน ควรนำสิ่งกำบังไปปิดไว้ที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อให้ไม่โดนรังสีอาทิตย์ และปรับสภาวะเริ่มต้นของระบบ โดยการหมุนเวียนน้ำเย็นที่อุณหภูมิประมาณ 10-35 $^{\circ}C$ โดยมีอัตราการไหลอย่างน้อย 600 L/Hr เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในระบบสม่ำเสมอกันทั้งหมดและไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิน้ำในถังกักเก็บน้ำร้อน พร้อมบันทึกอุณหภูมิน้ำนี้ให้เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของการทดสอบ

4.2 หลังจากได้อุณหภูมิเริ่มต้นให้นำสิ่งกำบังออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อทำการทดสอบระบบ

4.3 ทดสอบระบบโดยให้ระบบทำงานต่อเนื่องตลอดทั้งวันเป็นเวลา 12 Hr โดยเป็น 6 Hr ก่อนและหลังเวลาเที่ยงสุริยะ

4.4 ในระหว่างทำการทดสอบระบบค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงของค่าเฉลี่ยต่างๆ ดังต่อไปนี้

- รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ
- อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม

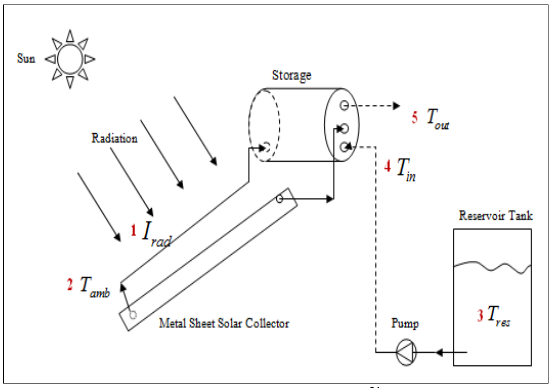
4.5 ในตอนท้ายของวัน (หลังจาก 6 Hr ชั่วโมงหลังเวลาเที่ยงสุริยะ) ใช้น้ำที่อุณหภูมิ t_{main} ดันน้ำออกจากระบบโดยให้อัตราการไหลคงที่ที่ 600 L/Hr และในเวลาเดียวกันควรป้อนน้ำเย็นเข้าไปในระบบซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของการทดสอบในตอนเช้า โดยปริมาณน้ำทิ้งนั้นจะต้องมีค่าอย่างน้อย 3 เท่าของปริมาตรถังที่ทำการทดสอบ

4.6 อุณหภูมิของน้ำที่เริ่มถูกระบายออก ทำการวัดอย่างน้อยทุกๆ 15 s และควรบันทึกค่าเฉลี่ยอย่างน้อยทุก 10 ส่วนของปริมาตรน้ำในถังที่ถูกระบายทิ้งและจะทำการบันทึกข้อมูลต่างๆ ไปจนกว่าอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากถังมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแต่ต้องไม่น้อยกว่า 3 เท่าของปริมาตรถังที่ทำการทดสอบ

4.7 ทำการทดสอบซ้ำตามวิธีการทดสอบที่กล่าวมาข้างต้น ไม่น้อยกว่า 6 วัน

4.8 เลือกค่าที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีๆ ละ 3 ค่ามาทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบ

รูปที่ 4 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะที่พร้อมทดสอบ



รูปที่ 5 หลักการทำงานระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์และตำแหน่งการวัดค่าต่างๆ

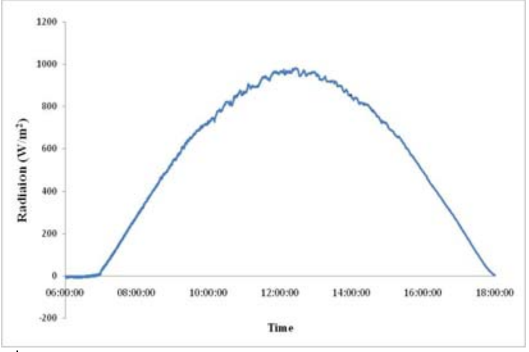
ตารางที่ 2 แสดงสิ่งที่วัดและตำแหน่งที่ทำการวัดค่าต่างๆ ในระบบดังรูปที่ 5

ตำแหน่งที่	สิ่งที่วัด	สัญลักษณ์	หน่วย
1	ค่ารังสีอาทิตย์	I_{rad}	MJ
2	อุณหภูมิบรรยากาศ	T_{amb}	°C
3	อุณหภูมิถังพักน้ำ	T_{res}	°C
4	อุณหภูมิน้ำเข้าถังสะสมความร้อน	T_{in}	°C
5	อุณหภูมิน้ำเข้าถังสะสมความร้อน	T_{out}	°C

5. ผลการทดลอง

5.1 ค่ารังสีอาทิตย์

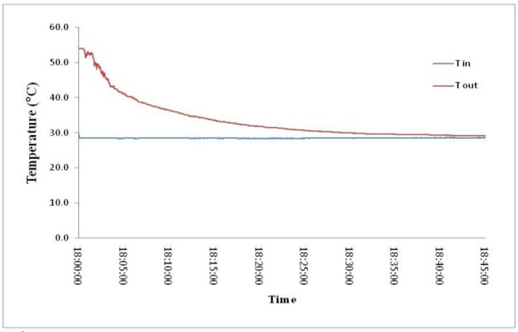
ค่ารังสีอาทิตย์ที่ใช้ได้สำหรับวันทดสอบต้องมีค่ารังสีอาทิตย์รวมกันตลอดทั้งวันอยู่ในช่วง 8 - 25 MJ ตามมาตรฐาน ISO 9459-2 จากรูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ตลอดทั้งวันของวันที่ 14 มกราคม 2556 มีค่ารังสีอาทิตย์รวมตลอดทั้งวันเท่ากับ 24 MJ ซึ่งสูงที่สุดในวันที่ทำการทดลองทั้งหมด



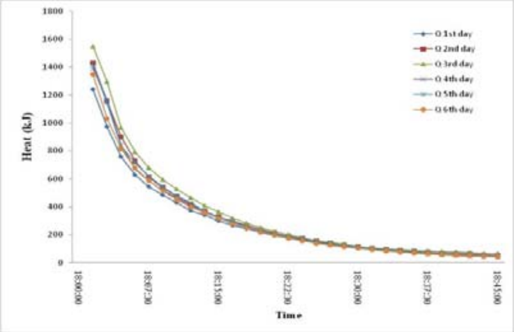
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าปริมาณรังสีอาทิตย์และเวลา

5.2 ประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนที่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825

จากการทดลองหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 สามารถทำอุณหภูมิน้ำได้ร้อนสูงสุดอยู่ที่ 53.9 °C ในวันที่ 18 มกราคม 2556 และอุณหภูมิน้ำที่ใช้ดันน้ำอยู่ที่ 28.1 °C จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนและน้ำเย็นที่ใช้ดันน้ำ ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิจะนำมาหาค่าความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 สะสมได้ตลอดทั้งวัน จากรูปที่ 8 แสดงค่าความร้อนของตัวเก็บรังสีชนิดนี้ ซึ่งสอดคล้องกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลง โดยการทดลองในวันที่ 3 ของการทดลอง หรือวันที่ 18 มกราคม 2556 มีค่าความร้อนสูงสุด ใน 15 Liter แรก มีค่าความร้อนเท่ากับ 1549.115 kJ และมีค่าความร้อนสะสมตลอดทั้งวันเท่ากับ 10.458 MJ

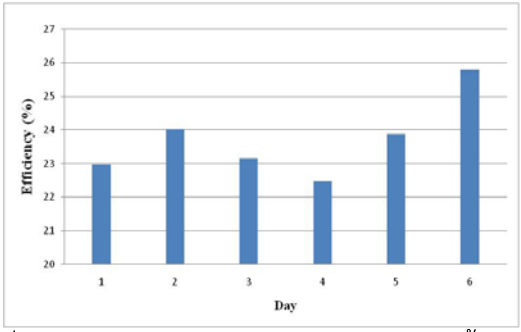


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนได้จากการสะสมความร้อนตลอดทั้งวันและเวลา ของแผงแบบ CL-825

ประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ได้แสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งแสดงค่าประสิทธิภาพของการทดลองทั้ง 6 วัน โดยวันที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือวันที่ทำการทดสอบวันที่ 6 หรือวันที่ 21 มกราคม 2556 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 25.79 % และวันที่มีค่าประสิทธิภาพของระบบต่ำที่สุดคือวันที่ทำการทดสอบวันที่ 4 หรือวันที่ 19 มกราคม 2556 โดยมีค่าประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 22.46 %



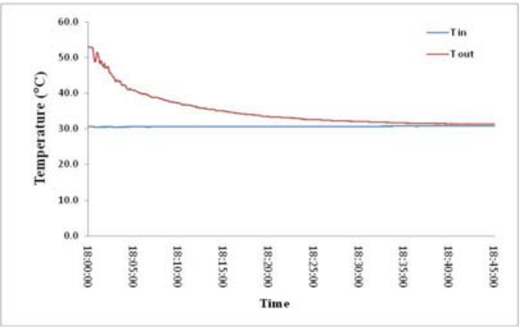
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนที่ได้ในแต่ละวัน ของแผงแบบ CL-825

จากผลการทดลองทั้ง 6 วัน สามารถนำมาหาค่า a_1, a_2 และ a_3 ได้โดยใช้วิธี Least Squares Fitting ซึ่งจะได้สมการค่าปริมาณความร้อนทีได้รับจากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-825 ดังนี้

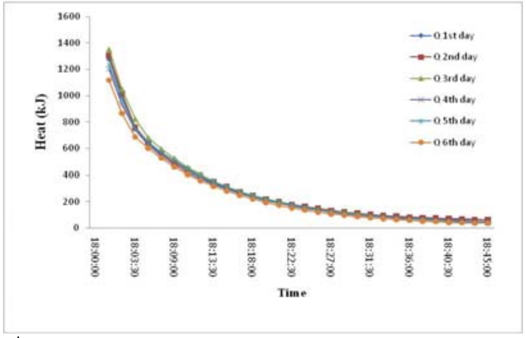
$$Q = 0.461624H + 0.144756\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + (-0.03331) \quad (6)$$

5.3 ประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด CL-750D

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D สามารถทำอุณหภูมิน้ำร้อนได้สูงที่สุด เท่ากับ 53 °C โดยมีอุณหภูมิน้ำเย็นเท่ากับ 30.3 °C ซึ่งเป็นวันที่ทำการทดสอบที่ 1 หรือวันที่ 18 ธันวาคม 2555 ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมินำมาหาค่าความร้อนได้ดังรูปที่ 11 ซึ่งมีค่าความร้อนสูงสุดที่ได้คือวันที่ 3 ของการทดลองหรือวันที่ 22 มกราคม 2556 มีค่าความร้อนใน 15 Liter แรกเท่ากับ1348.45 kJ และมีค่าความร้อนสะสมตลอดทั้งวันเท่ากับ 8.97 MJ

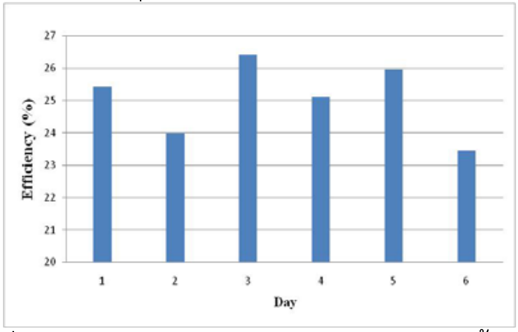


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนได้จากการสะสมความร้อนตลอดทั้งวันและเวลา ของแผงแบบ CL-750D

จากรูปที่ 12 ได้แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ในแต่ละวันของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D พบว่าวันที่ทำการทดลองที่ 3 หรือวันที่ 22 มกราคม 2556 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 26.42 % ซึ่งมีค่ามากสุด และวันที่ทำการทดลองวันที่ 2 หรือวันที่ 19 ธันวาคม 2555 มีค่าประสิทธิภาพต่ำสุด เท่ากับ 23.99 %



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนที่ได้ในแต่ละวัน ของแผงแบบ CL-750D

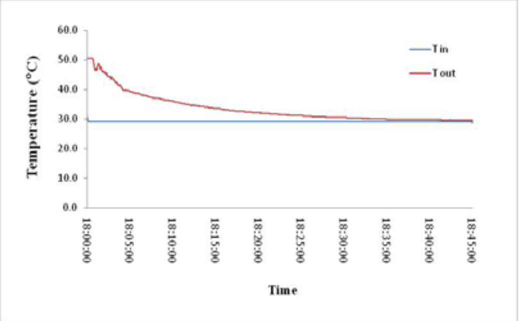
จากผลการทดลองทั้ง 6 วัน สามารถนำมาหาค่า a_1, a_2 และ a_3 ได้โดยใช้วิธี Least Squares Fitting ซึ่งจะได้สมการค่าปริมาณความร้อนทีได้รับจากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-750D ดังนี้

$$Q = 0.483036H + 0.231836\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + (-0.01556) \quad (7)$$

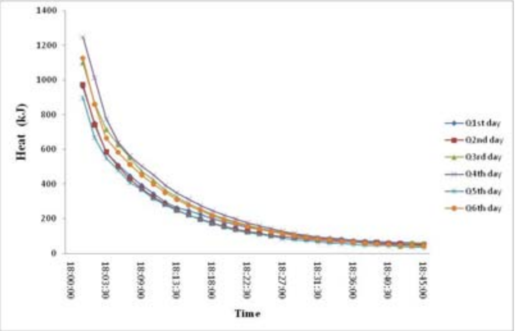
5.4 ประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิด CL-720

จากการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-720 พบว่าสามารถทำอุณหภูมิน้ำร้อนได้สูงสุดเท่ากับ 50.5 °C โดยมีอุณหภูมิน้ำป้อนเพื่อดันน้ำเท่ากับ 28.82 °C ซึ่งเป็นผลการทดลองในวันที่ 14 มกราคม 2556 ดังแสดงในรูปที่ 12 แล้วนำค่าความแตกต่างของอุณหภูมิไปหาค่าความร้อนที่ได้จากการสะสมความร้อนตลอดทั้งดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าความร้อนที่ได้จากการทดสอบทั้ง 6 วัน พบว่า การทดลองในวันที่ 4 นั้น

ได้ค่าความร้อนใน 15 L แรกสูงที่สุด เท่ากับ 1246.52 kJ และความร้อนสะสมทั้งระบบมีค่าเท่ากับ 8.66 MJ

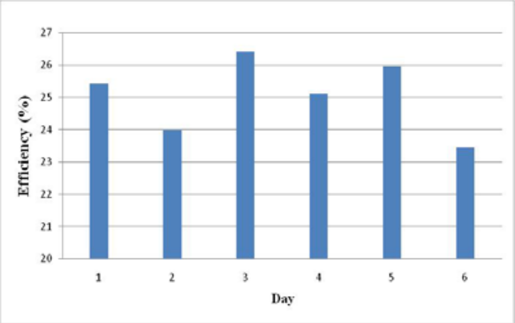


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-720



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของค่าความร้อนได้จากการสะสมความร้อนตลอดทั้งวันและเวลา ของแผงแบบ CL-720

จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-720 พบว่า มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกันตลอดทั้ง 6 วัน โดยวันที่ทำการทดลองวันที่ 3 หรือวันที่ 10 มกราคม 2556 มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่ากับ 20.1 % และวันที่ทำการทดลองวันที่ 2 หรือวันที่ 25 ธันวาคม 2555 มีค่าประสิทธิภาพต่ำสุดเท่ากับ 16.15 % ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพระบบทำน้ำร้อนที่ได้ในแต่ละวัน ของแผงแบบ CL-720

จากผลการทดลองทั้ง 6 วัน สามารถนำมาหาค่า a_1, a_2 และ a_3 ได้โดยใช้วิธี Least Squares Fitting ซึ่งจะได้สมการค่าปริมาณความร้อนที่ได้รับจากระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ แบบ CL-720 ดังนี้

$$Q = 0.371356H + (-0.09623)\left(t_{a(day)} - t_{main}\right) + (-0.04999) \quad (8)$$

5.5เปรียบเทียบผลจากการทดสอบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 ชนิด

จากตารางที่ 3 พบว่า ถึงแม้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีค่าความร้อนสะสมที่ได้จากการทดลองสูงที่สุด คือเท่ากับ 10.46 MJ แต่ก็เป็นค่าความร้อนที่ดีเพียงวันเดียว เมื่อเทียบกับค่าความร้อนที่สูงที่สุดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D ที่มีค่าความร้อนที่สูงใกล้เคียงกัน ดังนั้น เมื่อทำการคำนวณหาค่าความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อนด้วยการคำนวณสมการ (6), (7) และ (8) โดยแทนค่าตัวแปรดังต่อไปนี้

H = 18 MJ

T_{main} = 30 $^{\circ}C$

$t_{a(day)}$ = 32 $^{\circ}C$

พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 9.14 MJ และยังมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในบรรดาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ โดยค่าประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีค่าเท่ากับ 26.42% ส่วนตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-720 จะมีค่าความร้อนที่ได้จากการทดลองต่ำที่สุด รวมทั้งมีค่าประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนต่ำที่สุดอีกด้วย เนื่องจาก ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-750D มีท่อร่วมจำนวน 13 ท่อซึ่งมีจำนวนท่อมากที่สุด จึงสามารถรับพลังงานความร้อนจากตัวรับรังสีอาทิตย์ได้มากที่สุด แล้วรองลงมาด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-825 ที่มีท่อร่วม 10 ท่อ และสุดท้ายตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ CL-720 ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดมีจำนวนท่อร่วมแค่ 6 ท่อซึ่งน้อยที่สุด

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ

ตัวแปร	CL-825	CL-750D	CL-720
ΔT_{max} ($^{\circ}C$)	25.5	22.5	21.4
Q_{max} (MJ)	10.46	8.97	8.66
η_{max} (%)	25.79	26.42	20.1
Q_{cal}* (MJ)	8.57	9.14	6.26
η_{cal}* (%)	23.80	25.38	17.38

หมายเหตุ: Q_{cal} และ η_{cal} คือ ค่าความร้อนและค่าประสิทธิภาพที่ได้จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ มาจากการคำนวณสมการที่ (6), (7) และ (8)

6. สรุปผลการทดลอง

จากการประยุกต์แผ่นโลหะเป็นตัวรับรังสีอาทิตย์ต้นทุนต่ำ โดย ใช้หลังคาเมทัลชีทเป็นแผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นท่อภายในแผงซึ่งอยู่ใต้แผ่นดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และมีฉนวนโฟมพอลิยูรีเทนเป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ยังไม่ได้ใส่กรอบกระจก ทำการทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ 3 ชนิด ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รุ่น CL-750D มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุด เท่ากับ 25.38 % รองลงมาคือ CL-825 มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 23.8 % และรุ่น CL-720 มีค่าประสิทธิภาพต่ำที่สุด เท่ากับ 17.38 % ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนที่ได้จากระบบทำน้ำร้อน พบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รุ่น CL-750D มีค่าความร้อนสูงที่สุด เท่ากับ 9.14 MJ รองลงมาคือ รุ่น CL- 825 และต่ำที่สุดคือ CL-720 โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 8.57 MJ และ 6.26 MJ ตามลำดับ

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ บริษัทเลิศลอยเมทัลชีท จำกัด และ บริษัท พี.ยู. โฟม อินซูเลชั่น แอนด์เทรดดิ้ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์แผ่นหลังคาเมทัลชีทและฉนวนโฟมพอลิยูรีเทน ตามลำดับ ในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, "รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2553," [บทความออนไลน์]. สืบค้นได้จาก:< http://www.dede.go.th/dede/images/stories/6may54_circular/energy_53_2.pdf>. January 23, 2555.

[2] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, "แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (2555-2564)," [บทความออนไลน์]. สืบค้นได้จาก: <www.dede.go.th/dede/images/stories/aedp25.pdf>. March 19, 2556.

[3] ปรีดา จันทวงษ์, "การออกแบบเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์อย่างง่ายเพื่อใช้ในบ้าน," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2542: 9-16.

[4] เกษม โพธิ์งาม, "การพัฒนาเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์น้ำหนักเบาที่ใช้ในบ้านพักอาศัย," วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2545: 1-12.

[5] สำรวย ภูบาล, การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผ่นดูดรังสีเพื่อทำตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ, วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550: 52-62.

[6] Churasia, P.B.L Solar Water Heaters Based on Concrete Collectors. Energy 2000; 25(8): 703-716.

[7] Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P. and Louche, A., Modelling and Performance of a Copolymer Solar Water Heating Collector. Solar Energy 2001; 72(2): 99-112.

[8] Siqueira, D.A., Vieira, L.G.M. and Damasceno, J.J.R., Analysis and Performance of Low-cost Solar Heater. Renewable Energy 2011; 36(9): 2538-2546.

[9] International Standard ISO 9459-2 (1995E) Solar Heating – Domestic Water Heating Sysytems, Part 2: Outdoor Test Methods for System Performance Characterization and Yearly Performance Prediction of Solar only System. Geneve: International Organization for Standardization.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นาย ภาสกร ชุ่มทิ
วัน เดือน ปีเกิด	23 กรกฎาคม 2530

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย พ.ศ. 2549
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2553
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2555
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	ภาสกร ชุ่มทิ, นริส ประทินทอง และ ศิริชัย เทพา, 2556, “การประยุกต์ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นโลหะสำหรับกระบวนการผลิตน้ำร้อน” **การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9,** วันที่ 8-10 พฤษภาคม พ.ศ. 2556, จ. นครนายก