



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ: คุณภาพพลังงานน้ำร้อนจากเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ชนิดถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ
Exergy of Hot Water from Solar Hot Water System
with Stratified Thermal Storage Tank

โดย
ดร.สุขฤดี สุขใจ และคณะ

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วันลงทะเบียน..... ๑๙ มิ.ย. ๒๕๖๐
เลขทะเบียน..... ๑-๗๑๒๓๑๔๐
เลขเรียกหนังสือ..... ๐-๖๕๖๑.๗

๖๔๕๑
๒๕๖๐

มกราคม ๒๕๖๐

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

คุณภาพพลังงานน้ำร้อนจากเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์
ชนิดถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ
Exergy of Hot Water from Solar Hot Water System
with Stratified Thermal Storage Tank

คณะผู้วิจัย สังกัดวิทยาลัยพลังงานทดแทน

1. ดร.สุขฤดี สุขใจ
2. นายยอดธง เม่นสิน
3. นายไพฑูรย์ เหล่าดี
4. นายวิภาณต์ วันสูงเนิน



สนับสนุนโดยงบประมาณรายได้ มหาวิทยาลัยนเรศวร

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายได้ ประจำปี 2559 มหาวิทยาลัยนเรศวร คณะผู้ดำเนินการวิจัยใคร่ขอขอบคุณอย่างยิ่งที่มหาวิทยาลัยนเรศวรได้มีนโยบายในการสนับสนุนให้บุคลากรทำการวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาองค์ความรู้ด้านพลังงานทดแทนและอื่นๆ รวมทั้งขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่วิทยาลัยพลังงานทดแทนที่มีส่วนช่วยเหลือทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย
มกราคม 2560



ABSTRACT

The objective of this research is to analyze and compare the exergy of the stratified thermal storage tank (STST) which was designed for five levels. The height of stratified thermal storage tank is 1.25 meter. This storage tank was used for solar hot water system which has flow controlling of water injection to the tank by using solenoid valve. The setting temperature controlling for on-off solenoid valve was 60°C . The system test was performed to compare the exergy of hot water between using solar flat plate and evacuated tube collectors. The necessary parameters were collected for 1 hour interval from 9:00 am. - 4:00 pm. And the overall exergy and efficiency of the water heater was analyzed. The results showed that the average different temperature of hot water between each level was about 5.1°C . The different temperature of hot water between the top and the bottom of the tank was 12.4°C . The highest temperature in STST was 69.5°C . The average efficiency of STST with all levels is 8.20%. The overall system efficiency is obtained as 41.0%. The average exergy of STST while using evacuated tube solar collector and evacuated tubes are 4.37 kW and 4.24 kW respectively. This STST can be used for prototype in industries. In order to reduce energy use from the boiler. STST can increase the exergy of the system.

Keywords : Exergy, Efficiency, Stratified Thermal Storage, Solar Hot Water Heater, Evacuated Tube Collector

สารบัญ (ต่อ)

เนื้อหา	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	33
ภาคผนวก.....	34
ก. ตัวอย่างข้อมูลถังน้ำร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ	
ข. บทความเผยแพร่งานวิจัย	



สารบัญภาพ

รูปที่

หน้า

1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat – Plate Solar Collector).....	3
2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector).....	3
3 การประจุและจ่ายความร้อนของถังบัฟเฟอร์ชนิดไม่มีการแบ่งชั้นความร้อน.....	4
4 การประจุความร้อนแบบมีการแบ่งชั้นความร้อนที่ใช้หัวฉีด 2 ชุด.....	6
5 ถังชนิดประจุความร้อนเข้าถังเพื่อแบ่งชั้นความร้อน“Stratos”ของบริษัท SOLVI เยอรมนี.	7
6 การจ่ายน้ำเข้าถังเพื่อแบ่งชั้นความร้อนโดยใช้ “แท่งประจุความร้อน”.....	7
7 ถังเก็บสะสมความร้อนที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำ.....	8
8 แสดงการรับและสูญเสียพลังงานในถังน้ำร้อนที่โหนด 1 – 5.....	10
9 ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ.....	19
10 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมวาล์วน้ำอัตโนมัติ.....	20
11 ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดของระบบ.....	21
12 ถังน้ำร้อนที่ติดตั้งร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อนที่ไหลเข้าถัง....	22
13 วาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติ (Solenoid valve).....	22
14 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Recorder) และชุดควบคุมการทำงานของวาล์วไฟฟ้า.....	23
15 ถังน้ำร้อนที่ติดตั้งร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศ.....	23
16 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังฯ ทั้ง 5 ระดับชั้น ณ เวลาต่างๆ.....	24
17 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	25
18 แสดงระดับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บสะสมความร้อน.....	26
19 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังฯ ทั้ง 5 ระดับชั้น ณ เวลาต่างๆ.....	27
20 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำขาเข้าและขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์.....	28
21 แสดงระดับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บสะสมความร้อน.....	29
22 กราฟแสดงค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ.....	30
23 กราฟแสดงค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ.....	30

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ในปี พ.ศ.2556 อัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจไทยขยายตัวร้อยละ 2.9 เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของทั้งอุปสงค์ภายในประเทศและภายนอกประเทศ ส่งผลให้การใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจากปี 2555 ร้อยละ 2.6 และพบว่ามีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น เกือบทุกสาขาเศรษฐกิจ โดยสาขาอุตสาหกรรม และสาขาขนส่ง เป็นสาขาเศรษฐกิจที่มีการใช้พลังงานมากที่สุด ซึ่งสัดส่วนการใช้พลังงานในสาขาอุตสาหกรรม คิดเป็นร้อยละ 36.2 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาประกอบด้วยสาขาขนส่ง บ้านอยู่อาศัย ธุรกิจการค้า และเกษตรกรรม คิดเป็น ร้อยละ 35.8 15.1 7.7 และ 5.2 ตามลำดับ [1] จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่จะต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ดังนั้นเทคโนโลยีและอุปกรณ์ประกอบทางด้านเทคโนโลยีพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ หากได้รับการพัฒนาและออกแบบเพื่อให้มีความเหมาะสมหรือเกิดการยอมรับในการนำไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยให้เกิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางด้านพลังงานทดแทนมากขึ้น

เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Hot Water) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อน โดยทั่วไปตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ที่นิยมนำมาใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาอยู่ในรูปของความร้อน สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ (1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) เหมาะกับการนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิในช่วง 40 – 60 °C (2) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) เหมาะกับการประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิสูงกว่า 80 °C) แต่อย่างไรในการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ยังคงมีอุปกรณ์ที่สำคัญอีกชนิด คือ ถังเก็บสะสมความร้อน (Storage Tank) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บสะสมพลังงานความร้อนที่ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ โดยถังเก็บสะสมความร้อนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นถังเก็บสะสมความร้อนแบบไม่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิ ซึ่งส่งผลให้การกักเก็บอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้ไม่สูงมากพอต่อความต้องการใช้งานในกระบวนการอุตสาหกรรม จึงทำให้ต้องเพิ่มอุปกรณ์ทำความร้อนเสริม (Auxiliary Heat) เพื่อช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามความต้องการใช้งาน อีกทั้งจะส่งผลให้คุณภาพของพลังงาน (Exergy) ที่จะนำไปใช้ลดลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและเปรียบเทียบคุณภาพพลังงานน้ำร้อนของเครื่องผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ ซึ่งติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์แตกต่างกันระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบหลอดแก้วสุญญากาศ สำหรับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อช่วยให้คุณภาพของพลังงานเพิ่มขึ้น และยังก่อให้เกิดการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพพลังงาน (Exergy Analysis) ของน้ำร้อน จากถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ได้ผลิตขึ้นระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบหลอดแก้วสุญญากาศ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ออกแบบ และสร้างถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิแบบมีหัวฉีดสั่งการจากภายนอก

1.3.2 ทดสอบถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยติดตั้งร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แบบเต็มระบบ เพื่อนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (Exergy)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม

1.4.2 ได้ผลงานวิจัยสำหรับการนำเสนอในงานประชุมวิชาการในระดับประเทศ อย่างน้อย 1 ฉบับ

1.5 แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

1.5.1 นำเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการระดับประเทศ

1.6 สถานที่ทำการทดลอง

สวนพลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก

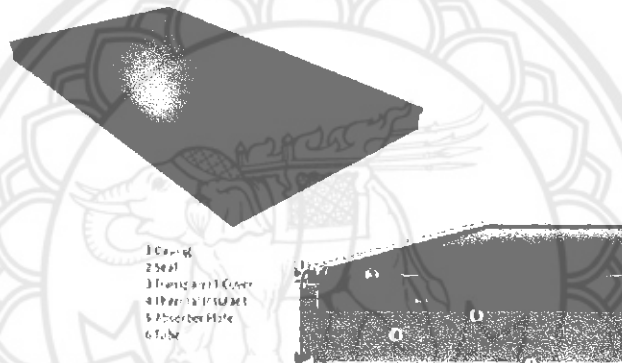
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

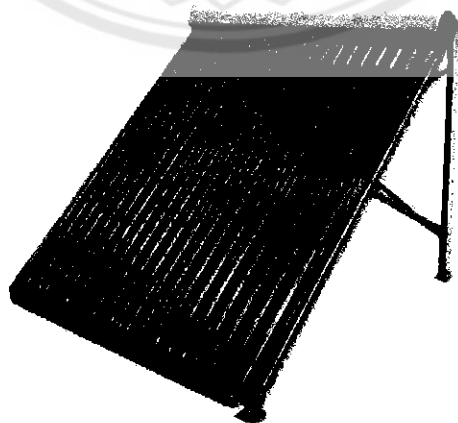
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรังสีอาทิตย์ไปเป็นพลังงานความร้อน คือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collectors) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์เปลี่ยนเป็นความร้อนถ่ายเทให้กับของไหลทำงานให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อนที่จะถูกดึงนำไปใช้งานต่อไป ทั้งนี้สามารถแบ่งชนิดของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ได้เป็น 2 แบบ คือ

(1) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat – Plate Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้จะสามารถผลิตน้ำร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง ($40 - 60^{\circ}\text{C}$) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat – Plate Solar Collector)

(2) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดนี้สามารถผลิตน้ำร้อนอยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิมากกว่า 80°C) แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ (Evacuated Tube Solar Collector)

2.2 การประจุและการจ่ายความร้อนของถังเก็บน้ำร้อน [2]

2.2.1 การประจุความร้อนเข้าถังเก็บน้ำร้อน

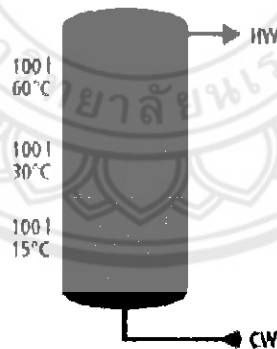
ในการประจุความร้อนเข้าถังเก็บน้ำร้อน (น้ำร้อนไหลเข้าถังเก็บ) ต้องไม่รบกวนการแบ่งชั้นความร้อน (Stratification) ภายในถัง (น้ำเย็นอยู่ด้านล่างและน้ำร้อนอยู่ด้านบนของถัง) หรือรบกวนให้น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ พยายามทำให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนระหว่างการประจุความร้อนเข้าถัง และเพื่อให้เกิดลักษณะนี้ ต้องใช้ถังเก็บน้ำร้อนทรงสูง (แม้ว่ารูปทรงนี้จะไม่ใช่วิธีที่สามารถลดการสูญเสียความร้อนให้ต่ำที่สุดก็ตาม)

การแบ่งชั้นความร้อนในถังเป็นสิ่งที่ดี เพราะทำให้น้ำที่ไหลออกจากส่วนบนของถังมีอุณหภูมิสูงสุด และทำให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หากไม่มีการแบ่งชั้นความร้อน อุณหภูมิน้ำจากถังจะต่ำทำให้ต้องใช้ความร้อนเสริมบ่อยครั้งขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีอาทิตย์ระหว่างวัน (ที่อัตราการไหลคงที่) ทำให้เกิดความผันผวนของอุณหภูมิในท่อวงจรรังสีอาทิตย์ ดังนั้น การแบ่งชั้นความร้อนจะเกิดได้ยากหากไม่มีมาตรการพิเศษสำหรับกระบวนการประจุความร้อน ในทำนองเดียวกัน กระบวนการจ่ายความร้อนออกจากถังเก็บน้ำร้อนก็ต้องไม่รบกวนการแบ่งชั้นอุณหภูมิเช่นกัน

2.2.2 ถังบัพเฟอร์แบบไม่มีการแบ่งชั้นความร้อนและมีปั๊มชนิดไร้การควบคุม

ในถังชนิดไม่มีการประจุความร้อนเข้าถังเพื่อแบ่งชั้นความร้อน ท่อน้ำร้อนจากวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะต่อเข้าส่วนบนของถังบัพเฟอร์ (ดังรูปที่ 3) ด้านเย็นจะอยู่บริเวณตอนล่างของถัง ถ้าค่ารังสีอาทิตย์บนตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีความผันผวน อุณหภูมิน้ำร้อนป้อนเข้าถังก็จะผันผวนด้วยเช่นกัน และแม้ว่าน้ำร้อนป้อนจะหาจุดแบ่งชั้นความร้อนที่เหมาะสมของมันเองได้ในที่สุด ก็ยังเกิดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งอยู่มาก (ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ) และเกิดการถ่ายเทความร้อน (ส่งผลให้ระดับอุณหภูมิของน้ำร้อนลดลงจากการผสมกัน)



รูปที่ 3 การประจุและจ่ายความร้อนของถังบัพเฟอร์ชนิดไม่มีการแบ่งชั้นความร้อน

มีเพียงชั้นอุณหภูมิด้านล่างของถังบัพเฟอร์เท่านั้นที่แทบจะไม่ถูกรบกวนเลย แต่ก็ยังเป็นเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่อน้ำที่ไหลกลับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนฝั่งจ่ายความร้อน (Discharge Heat Exchanger) มีความเย็นเพียงพอเท่านั้น มิฉะนั้น (เช่น ถ้ามีผู้ใช้จำนวนมากและใช้อุณหภูมิน้ำต่างกันบ่อยครั้ง) ก็ต้องติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนเข้ากับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านจ่ายเพื่อรักษาระดับความแตกต่างของอุณหภูมิ (จากด้านบนถึงด้านล่างของถังให้เป็นไปตามที่ต้องการ)

การรบกวนการแบ่งชั้นความร้อนจะก่อให้เกิดสิ่งต่อไปนี้

- ทำให้ไม่ได้อุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุด (จากวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์) ที่ด้านบนของถัง บัฟเฟอร์จึงทำให้ไม่มีน้ำร้อนอุณหภูมิสูงสุดไปใช้
- บริเวณที่น้ำผสมกันที่อุณหภูมิปานกลาง (Mixing Zone) จะเกิดการขยายพื้นที่มากขึ้น
- ประสิทธิภาพของถังลดลง ทำให้อุปกรณ์ทำความร้อนเสริม (เช่น หม้อไอน้ำ) ต้องทำความร้อนมากขึ้นเพื่อรองรับความต้องการใช้น้ำร้อน แม้ว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์อาจให้พลังงานได้เพียงพอแล้วก็ตาม

บริเวณผสมที่ขยายพื้นที่มากขึ้นนี้เป็นจุดต้อย เพราะทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอต่อความต้องการผู้ใช้ ทำให้อุปกรณ์ทำความร้อนเสริมต้องชดเชยความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ลดลงของน้ำร้อนป้อน (จากวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์) และน้ำร้อนจ่าย (ไปยังผู้ใช้) ในทางวิทยาศาสตร์ ถ้าการแบ่งชั้นความร้อนถูกรบกวน จะไม่มีพลังงานสูญเสีย แต่จะทำให้คุณภาพของพลังงานที่จ่าย (Exergy) ลดลง (และ Entropy ก็เพิ่มขึ้นจากการผสมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ)

อย่างไรก็ตาม ถ้าจำเป็นต้องใช้หม้อไอน้ำสำหรับทำความร้อนเสริม ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบก็จะลดลงเล็กน้อย แม้ว่าถังเก็บน้ำร้อนจะมีการแบ่งชั้นความร้อนที่สมบูรณ์ก็ตาม เพราะในเวลาส่วนใหญ่จะมีการใช้หม้อไอน้ำเพียงไม่มากนักของความสามารถที่ทำได้ ซึ่งจะทำให้ค่าสัดส่วนรังสีอาทิตย์ลดลงเล็กน้อยที่เป็นปัญหามากก็คือ ระบบทำความร้อนหรือเครือข่ายทำความร้อนที่พึ่งพาพลังงานรังสีอาทิตย์ เนื่องจากระบบต้องการอุณหภูมิทำงานจากรังสีอาทิตย์ที่ค่อนข้างสูง (ซึ่งอย่างน้อยต้องสูงกว่าอุณหภูมิในท่อน้ำร้อนไหลกลับเล็กน้อย) ปัญหาดังกล่าวไม่ค่อยพบในระบบผลิตน้ำร้อนครัวเรือน เนื่องจากน้ำที่ไหลเข้าระบบ (น้ำประปาครัวเรือน) มักจะมีอุณหภูมิต่ำพอเสมอ

การผสมใดๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของถังมักทำให้อุณหภูมิที่ด้านล่างของถังเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และทำให้อุณหภูมิในวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์สูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน

ในทางกลับกัน การผสมใดๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนล่างของถังเนื่องจากน้ำไหลเข้าที่อุ่น (หรือร้อน) จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านจ่ายจะเป็นปัญหามากกว่า อุณหภูมิที่ด้านล่างของถังจะสูงขึ้นเกินความจำเป็นและอุณหภูมิในวงจรตัวเก็บรังสีอาทิตย์ก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพและปริมาณพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ใช้งานได้ลดลง

การประจุความร้อนเข้าถังแบบแบ่งชั้นความร้อนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบที่มีระดับอุณหภูมิแปรปรวน เช่นเดียวกับกรณีระบบทำความร้อนธรรมดาทั่วไป โปรแกรมจำลองการทำงาน (ที่ไม่สามารถวิเคราะห์การแบ่งชั้นความร้อนแบบบังคับได้) สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างจำกัดเท่านั้น

ในระบบรังสีอาทิตย์ขนาดเล็ก (และมีถังเก็บน้ำร้อนขนาดเล็ก) สำหรับผลิตน้ำร้อนในครัวเรือนการประจุความร้อนเพื่อให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนมีข้อได้เปรียบไม่มาก ในที่นี้การประจุเพื่อให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนจะสมเหตุสมผลก็ต่อเมื่อไม่มีมาตรการอื่นๆ (เช่น การติดตั้งปั๊มควบคุมการทำงาน) มาทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (คือ อุณหภูมิที่ด้านล่างของถังต่ำเพียงพอ)

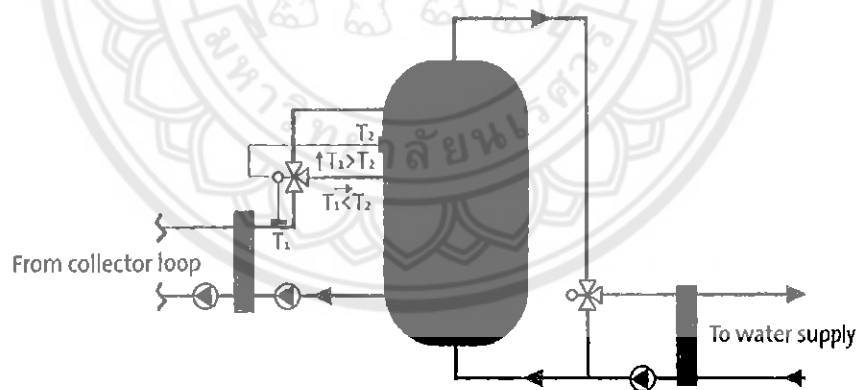
2.2.3 ถังบัฟเฟอร์แบบมีการแบ่งชั้นความร้อนและปั๊มควบคุม (ระบบที่มีอัตราการไหลแบบปรับได้ Matched-Flow System)

ระบบผลิตความร้อนรังสีอาทิตย์สามารถติดตั้งร่วมกับปั๊มควบคุมได้ ความเร็วรอบปั๊มจะลดลง ทุกครั้งที่ปริมาณรังสีอาทิตย์ลดลง หรือเมื่อค่าแตกต่างของอุณหภูมิในวงจรรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิจาก ท่อไหลกลับ ต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ (เช่น 4 °C) ด้วยวิธีนี้ น้ำในวงจรรังสีอาทิตย์จะใช้เวลานานขึ้นในการไหล ครบหนึ่งรอบ ดังนั้นจึงมีเวลามากขึ้นในการเพิ่มอุณหภูมิในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และเป็นการป้องกันไม่ให้น้ำที่ยัง ร้อนไม่มากพอไหลเข้าถังบัฟเฟอร์

อย่างไรก็ตาม พิสัยการทำงานของปั๊มในระบบ Matched-Flow จะถูกจำกัด โดยจะถึงขีดจำกัดในช่วงที่มีปริมาณรังสีอาทิตย์ต่ำและเมื่อค่าแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างส่วนบนและส่วนล่างในถังถึงค่าสูงสุด

2.2.3.1 ถังบัฟเฟอร์แบบมีหัวฉีดสังการจากภายนอก

เพื่อช่วยให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนในถัง อาจใช้วิธีติดตั้งหัวฉีดหลายชุดเข้ากับถังบัฟเฟอร์ได้ แสดงดังรูปที่ 4 ตัวอย่างการติดตั้งหัวฉีด 2 ชุดแบบสังการโดยวาล์วสวิทช์ ถ้าอุณหภูมิน้ำเข้า (T_1) สูงกว่าอุณหภูมิที่จุดวัด (T_1 ระหว่างหัวฉีดทั้งสอง) วาล์วตัวบนก็จะเปิด และในทางกลับกัน วาล์วตัวล่างจะเปิดเมื่ออุณหภูมิน้ำเข้า T_1 ต่ำกว่าอุณหภูมิที่จุดวัด T_2 และเราอาจเลือกใช้ปั๊มชนิดควบคุมการจ่ายน้ำอย่างอิสระได้ (หนึ่งปั๊มต่อหนึ่งหัวฉีด) ยิ่งติดตั้งหัวฉีดจำนวนมากเท่าไรกับถังบัฟเฟอร์ ค่าใช้จ่ายของระบบควบคุมก็จะสูงมากขึ้นเท่านั้น และการทำงานของระบบอาจมีข้อผิดพลาดมากขึ้น การใช้หัวฉีด เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ปั๊ม วาล์ว ที่ทำงานด้วยไฟฟ้า และอุปกรณ์ย่อยๆ จำนวนมากอาจช่วยให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงควรพิจารณาถึงอัตราส่วนของค่าใช้จ่ายต่อประโยชน์ที่จะได้รับอยู่เสมอ ยิ่งจำนวนของอุปกรณ์มากขึ้นเท่าไร โอกาสของความผิดพลาดก็เพิ่มมากขึ้นเท่านั้น

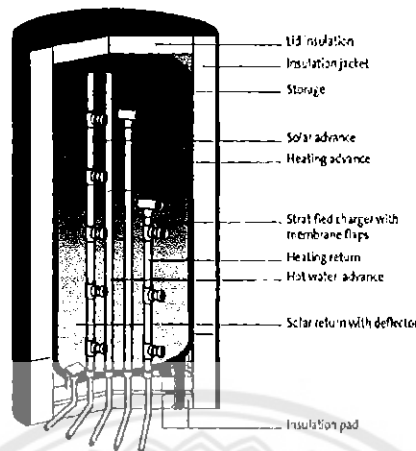


รูปที่ 4 การประจุความร้อนแบบมีการแบ่งชั้นความร้อนที่ใช้หัวฉีด 2 ชุด

2.2.3.2 ถังบัฟเฟอร์ที่มีอุปกรณ์แบ่งชั้นความร้อนติดตั้งภายใน

อุปกรณ์แบ่งชั้นความร้อนติดตั้งภายในช่วยให้ชั้นความร้อนสามารถก่อตัวขึ้นมาได้เองภายใน ถังดังรูปที่ 5 น้ำร้อนจะไหลเข้าถังผ่านท่อพลาสติก (ที่เรียกว่า “แท่งประจุความร้อน” หรือ Charging Lance ทำจากโพลีเอทิลีน) (ดังรูปที่ 6) ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนติดตั้งอยู่เป็นระยะๆ ตามแนวดิ่ง ถ้าน้ำร้อนเข้ามีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำในถังบัฟเฟอร์ น้ำร้อนนั้นก็จะมีความหนาแน่นและความดันที่ต่ำกว่าด้วย ทำให้แผ่นเมมเบรนยังคงปิด

อยู่ แต่ถ้าอุณหภูมิภายในและโดยรอบท่อเท่ากัน แผ่นเมมเบรนจะเปิดออก และน้ำก็จะถูกจ่ายเข้าไปโดยตรงตามชั้นความร้อนที่เหมาะสม วิธีการนี้จะช่วยทำให้เกิดการแบ่งชั้นความร้อนในถังได้ดี



รูปที่ 5 ถังชนิดประจุความร้อนเข้าถังเพื่อแบ่งชั้นความร้อน “Stratos” ของบริษัท SOLVIS เยอรมนี



รูปที่ 6 การจ่ายน้ำเข้าถังเพื่อแบ่งชั้นความร้อนโดยใช้ “แท่งประจุความร้อน”

ต้องจำกัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอุปกรณ์ประจุความร้อนที่ทำงานด้วยหลักการนี้ เพราะถ้าความดันของน้ำที่ไหลเข้าถังสูงเกินไป แผ่นเมมเบรนในตำแหน่งที่ “ปิด” ก็อาจเปิดออกทำให้สูญเสียการแบ่งชั้นความร้อน ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง

อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านแท่งประจุความร้อนชุดหนึ่งจำกัดไว้ที่ 1,000 L/hr ซึ่งเป็นอัตราที่จะทำให้ประมาณร้อยละ 70 ของน้ำถูกฉีดไปที่ชั้นต่างๆ อย่างถูกต้อง และที่อัตราการไหล 700 L/hr การฉีดน้ำเข้าไปที่ชั้นความร้อนจะถูกต้องเกือบร้อยละ 100 ดังนั้น ระบบผลิตความร้อนรังสีอาทิตย์ขนาดใหญ่จึงจำเป็นต้องใช้แท่งประจุความร้อนหลายแท่ง (ต่อขนาดกัน) แต่เราไม่แนะนำให้ใช้ถังปั๊มหลายถังต่อกันแบบขนาน (แต่ละถังมีแท่งประจุความร้อนแท่งเดียว) เพราะจะมีผลต่อความพร้อมเพรียงกันในการประจุและการจ่ายความร้อน

จากการใช้งานจริงพบว่า การใช้แท่งประจุความร้อนมีประโยชน์ในการผลิตน้ำร้อนอุณหภูมิสูงได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะสำหรับระบบขนาดกลางที่มีค่าสัดส่วนรังสีอาทิตย์สูง และยังพบว่าผลผลิตความ

ร้อนรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากติดตั้งระบบควบคุมที่ปรับแต่งค่ามาอย่างรอบคอบ (สำหรับการจ่ายความร้อน และการให้ความร้อนเสริม)

สำหรับระบบรังสีอาทิตย์ที่มีค่าสัดส่วนรังสีอาทิตย์ต่ำ การใช้อุปกรณ์เพื่อแบ่งชั้นความร้อนในถังจะทำให้ต้นทุนสูงขึ้นประมาณร้อยละ 15 – 20 ซึ่งยอมรับได้เมื่อพิจารณาถึงผลประโยชน์ระยะยาวในการใช้เชื้อเพลิงสำหรับทำความร้อนเสริม

2.2.4 ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำ (Stratification)

ถังเก็บสะสมความร้อน เป็นอุปกรณ์การเก็บพลังงานอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ โดยตัวกลางเก็บความร้อนที่นิยมใช้คือ น้ำ น้ำเป็นวัสดุอุดมคติในการกักเก็บพลังงานความร้อนเนื่องจากน้ำเป็นทั้งตัวกลางและสารที่เก็บพลังงานความร้อน เป็นการลดการสูญเสียความร้อนในระหว่างการส่งถ่ายพลังงานจากตัวกลางมายังสารที่เก็บพลังงานความร้อน การเก็บสะสมพลังงานความร้อนของน้ำนั้นจะเก็บในลักษณะการเก็บพลังงานความร้อนแบบสัมผัส (Sensible heat) คือ ใช้คุณสมบัติเกี่ยวกับความจุความร้อนของตัวเก็บพลังงาน หรือน้ำ โดยอุณหภูมิของตัวเก็บพลังงาน หรือน้ำจะเปลี่ยนในระหว่างการประจุความร้อนเข้า-ออก น้ำมีคุณสมบัติในการเก็บสะสมพลังงานได้ดี โดยพลังงานความร้อนที่สามารถทำให้น้ำ 1 กิโลกรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส คือ 4,187 จูล นอกจากนี้น้ำยังมีคุณสมบัติไม่เป็นสารอันตราย ไม่ติดไฟ ฉะนั้นระบบเก็บสะสมพลังงานส่วนใหญ่จึงนิยมใช้น้ำเป็นสารทำงาน ถังเก็บสะสมความร้อนโดยทั่วไปจะมีการแบ่งชั้นของน้ำที่มีอุณหภูมิต่างกัน ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ โดยอาศัยหลักการ เมื่อน้ำได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นลดลง ดังนั้นน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจึงลอยสู่ด้านบนของน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิออกเป็นชั้น (Node) ต่างๆ จนกระทั่งถึงกันถึงซึ่งเป็นจุดที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ถังเก็บสะสมความร้อนที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำ

คุณสมบัติของถังเก็บสะสมความร้อนที่ดีคือต้องทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เข้าและบรรจุนอยู่ในถังลดลงน้อยที่สุด โดยพิจารณาจากคุณสมบัติดังนี้คือ

1. ความจุความร้อนต่อปริมาตร
2. ช่วงของอุณหภูมิสูงสุดในการทำงาน ซึ่งอุณหภูมิเกิดจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในระบบ
3. ความร้อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ต้องมีความสัมพันธ์กับผลต่างของอุณหภูมิ
4. อุณหภูมิที่กักเก็บต้องแบ่งออกเป็นชั้นของระดับอุณหภูมิ
5. ความร้อนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงต้องเพียงพอต่อกำลังงานที่ต้องการ
6. ถังกักเก็บหรือโครงสร้างโดยละเอียดมีส่วนในการกักเก็บความร้อนของระบบ
7. ต้นทุนในการสร้าง

ถังเก็บสะสมความร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ มีการรับและสูญเสียพลังงานในถังน้ำร้อนดังรูปที่ 7 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังเก็บสะสมความร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิของ Duffie and Beckman [3] สามารถแสดงเป็นสมการโดยใช้ Euler Integration ซึ่งเป็นการเขียนข้อกำหนดของผลต่างของอุณหภูมิภายในถังเก็บสะสมความร้อน ณ จุดสุดท้ายของช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนี้

$$T_{s,j}^* = T_{s,i} + \frac{\Delta t}{m_i} \left[\left(\frac{UA}{C_p} \right) (T_a - T_{s,i}) + F_i^c m_c' (T_{co} - T_{s,i}) + F_i^L m_L' (T_{L,r} - T_{s,i}) \right] + B \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad B &= \dot{m}_{m,i} (T_{s,i-1} - T_{s,i}) & \text{ถ้า } \dot{m}_{m,i} > 0 \\ B &= \dot{m}_{m,i+1} (T_{s,i} - T_{s,i+1}) & \text{ถ้า } \dot{m}_{m,i} < 0 \end{aligned}$$

เมื่อ	F_i^c	คือ	ฟังก์ชันการควบคุมการไหลเข้าของน้ำจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์
	F_i^L	คือ	ฟังก์ชันการควบคุมการไหลกลับของน้ำ
	T_{co}	คือ	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{L,r}$	คือ	อุณหภูมิของน้ำที่ไหลกลับหลังจากการใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{s,i}$	คือ	อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนที่โหนด i ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{s,i}^*$	คือ	อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนที่โหนด i ที่เปลี่ยนไป ณ เวลาใด ($^{\circ}\text{C}$)
	Δt	คือ	ช่วงเวลาใดๆ
	$\dot{m}_c$	คือ	อัตราการไหลเข้าของน้ำจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s)
	$\dot{m}_L$	คือ	อัตราการไหลออกของน้ำไปใช้ประโยชน์ (kg/s)
	$\dot{m}_{m,i}$	คือ	อัตราการไหลสุทธิไปโหนด i จากโหนด $i - 1$ (kg/s)
	m_i	คือ	มวลของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อน (kg)
	UA	คือ	ผลคูณของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมและพื้นที่ของถังเก็บสะสมความร้อน ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$)

ฟังก์ชันการควบคุม F_i^c น้ำที่เข้าสู่ถังเก็บสะสมความร้อน โดยน้ำจะไหลไปยังโหนดที่มีความหนาแน่น หรืออุณหภูมิของน้ำในถังใกล้เคียงกัน

$$F_i^c = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } i = 1 \text{ และ } T_{co} > T_{s,i} \\ 1 & \text{ถ้า } T_{s,i-a} \geq T_{co} \geq T_{s,i} \\ 0 & \text{ถ้า } i = 0 \text{ และ } i = N + 1 \\ 0 & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ N คือ จำนวนโหนดภายในถังเก็บความร้อน

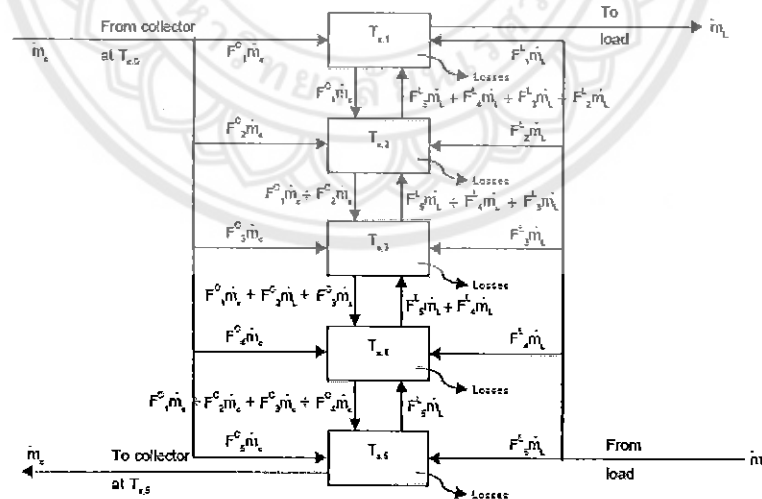
ฟังก์ชันการไหลกลับหลังจากใช้งาน F_i^L เข้าสู่ถังเก็บสะสมความร้อน โดยน้ำจะไหลกลับไปยังโหนดความหนาแน่น หรืออุณหภูมิของน้ำในถังใกล้เคียงกัน

$$F_i^L = \begin{cases} 1 & \text{ถ้า } i = N \text{ และ } T_{L,r} < T_{S,N} \\ 1 & \text{ถ้า } T_{S,i+1} \geq T_{L,r} > T_{S,i} \\ 0 & \text{ถ้า } i = 0 \text{ หรือถ้า } i = N + 1 \\ 0 & \text{ในกรณีอื่นๆ} \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ $T_{S,N}$ คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บความร้อนที่โหนด N ($^{\circ}\text{C}$) อัตราการไหลสุทธิระหว่างโหนด

ฟังก์ชันการไหลกลับหลังจากใช้งาน F_i^L เข้าสู่ถังเก็บสะสมความร้อน โดยน้ำจะไหลกลับไปยังโหนดความหนาแน่น หรืออุณหภูมิของน้ำในถังใกล้เคียงกัน

$$\begin{aligned} \dot{m}_{m,1} &= 0 \\ \dot{m}_{m,i} &= \dot{m}_c \sum_{j=1}^{i-1} F_j^c - \dot{m}_L \sum_{j=i+1}^N F_j^L \\ \dot{m}_{m,N+1} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$



รูปที่ 8 แสดงการรับและสูญเสียพลังงานในถังน้ำร้อนที่โหนด 1 – 5

2.3 พลังงานความร้อนที่ถึงเก็บสะสมความร้อน

เนื่องจากถังเก็บสะสมความร้อนที่ใช้เป็นชนิดที่มีการแบ่งอุณหภูมิ โดยการศึกษาที่ตั้งสมมุติฐานให้น้ำในถังแบ่งออกเป็น 3 โหนด ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่ถึงเก็บสะสมความร้อนสามารถผลิตได้ จะขึ้นอยู่กับมวลและอุณหภูมิของน้ำในถังที่เวลาต่างๆ

$$Q_{storage} = m_i C_p (T_{s,i,1} - T_{s,1}) \quad (5)$$

เมื่อ	$Q_{storage}$ คือ	พลังงานความร้อนที่ได้รับจากถังเก็บสะสมความร้อน (W)
	$T_{s,i,1}$ คือ	อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนที่โหนด i ที่เปลี่ยนไป ณ เวลาใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)
	$T_{s,1}$ คือ	อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนที่เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลาที่โหนด i ($^{\circ}\text{C}$)

2.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานไม่ว่าจะเป็นพลังงานในรูปแบบใดสามารถอธิบายได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantity) และคุณภาพ (Quality) ดังนั้นในการวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบถึงค่าเอนทัลปี (Enthalpy) และเอนโทรปี (Entropy) ซึ่งเอนทัลปีจะบอกให้ทราบถึงปริมาณความร้อนที่นำไปใช้งานและปริมาณความร้อนที่สูญเสีย ส่วนเอนโทรปีจะสามารถบอกได้ถึงคุณภาพของพลังงานที่ได้รับ

2.4.1 สมดุลมวล (Mass Balance)

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้นในกระบวนการ สมดุลมวลสามารถแสดงในรูปของสมการดังต่อไปนี้

$$m_i - m_o = m_{Accumulation} + m_{Generation} - m_{Consumption} \quad (6)$$

เมื่อ	m_i	คือ	มวลขาเข้าของระบบ
	m_o	คือ	มวลขาออกของระบบ
	$m_{Accumulation}$	คือ	มวลสะสมภายในระบบ
	$m_{Generation}$	คือ	มวลที่เกิดขึ้นภายในระบบ
	$m_{Consumption}$	คือ	มวลที่ใช้ไปของระบบ

ถ้าไม่มีการใช้หรือเกิดมวลขึ้น จะเขียนสมการได้ดังสมการที่ (7)

$$m_i = m_o + m_{Accumulation} \quad (7)$$

นอกจากนี้ถ้าเป็นสภาวะที่เรียกว่า “สภาวะคงตัว (Steady – State)” จะไม่มีการสะสมของมวลเกิดขึ้นภายในขอบเขตของระบบสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$m_i = m_o \quad (8)$$

2.4.2 สมดุลพลังงาน (Energy Balance)

พลังงานอาจอยู่ได้หลายรูปแบบ เช่น ความร้อน พลังงานจลน์ พลังงานเคมี พลังงานศักย์ แต่การแยกพลังงานแต่ละอย่างออกมาทำได้ไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามการใช้สมดุลของพลังงานในการหาค่าต้นทุนและลักษณะคุณภาพของการแปรรูปก็ยังเป็นที่นิยม ในทำนองเดียวกันกับสมดุลมวล สมดุลพลังงานในระบบที่ไม่มีการสร้างพลังงานและไม่มีการใช้พลังงานจะได้สมการดังต่อไปนี้ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535)

$$E_i = E_o + E_{Accumulation} \quad (9)$$

เมื่อ	E_i	คือ	พลังงานขาเข้าของระบบ
	E_o	คือ	พลังงานขาออกของระบบ
	$E_{Accumulation}$	คือ	พลังงานสะสมภายในระบบ

2.4.3 เอนทัลปี (Enthalpy)

เอนทัลปี (H) เป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งที่แตกต่างกันจากพลังงานภายใน ความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีและพลังงานภายในสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H = E + PV \quad (10)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานภายในระบบ (J)
	P	คือ	ความดันสมบูรณ์ (N/m^2)
	V	คือ	ปริมาตรของระบบ (m^3)

สำหรับกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยที่ความดันของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง การเพิ่มขึ้นของเอนทัลปีของระบบจะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ให้เข้าไป และสามารถหาค่าเอนทัลปี (H) ได้ดังสมการ (11)

$$\Delta H = q_p \quad (11)$$

เอนทัลปีเป็นฟังก์ชันของ E, P และ V ซึ่งต่างก็เป็นฟังก์ชันของสถานะทำให้ ΔH เป็นฟังก์ชันของสถานะด้วย เมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV) \quad (12)$$

ถ้า ΔH มีค่าเป็นบวกแสดงว่าระบบจะรับความร้อนเข้าไป แต่ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบแสดงว่าระบบจะคายความร้อนออกมา ปริมาณความร้อน (q) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของวัตถุมวลใดๆ (m) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (13)$$

เมื่อ	c_p	คือ	ค่าความร้อนเพาะ (kJ/kg °C)
	ΔT	คือ	ความดันสมบูรณ์ (N/m ²)

จากที่กล่าวมาสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ความดันคงที่ในเทอมของความร้อนจำเพาะได้ดังนี้

$$q_p = \Delta H = \dot{m} c_p \Delta T \quad (14)$$

การคิดเอนทัลปีจะเลือกสถานะอ้างอิงสำหรับองค์ประกอบทั้งหมดที่เข้าและออกจากระบบ นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของค่าเอนทัลปีขององค์ประกอบจากสถานะอ้างอิงไปเป็นสถานะปัจจุบัน โดยพิจารณาารูปของค่าเอนทัลปีสมบูรณ์ของระบบอุณหภูมิอ้างอิง (T_0)

เอนทัลปีที่เข้าสู่ระบบ = เอนทัลปีที่ออกจากระบบ + เอนทัลปีที่สูญเสีย

หรือ
$$\Delta H_i = \Delta H_o + \Delta H_L \quad (15)$$

ประสิทธิภาพเอนทัลปี (Enthalpy Efficiency, η) ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์สามารถหาได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\text{ปริมาณพลังงานที่ใช้ประโยชน์}}{\text{ปริมาณพลังงานที่ป้อนเข้า}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{\text{Enthalpy Output}}{\sum \text{Enthalpy Input}} \times 100\% \quad (16)$$

2.4.4 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี (Exergy Analysis)

หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์พลังงาน โดยกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างงานและความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการทางอุตสาหกรรม แต่ไม่ได้กำหนดทิศทางของการถ่ายเทของงานและความร้อน คือ ทิศทางการถ่ายเทจะเป็นแบบใดก็ได้ซึ่งอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง สำหรับกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะมีการกำหนดทิศทางการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นได้จริง ดังนั้นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้จริงต้องเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 และกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ (สิทธิพร พิงใหญ่, 2542) ในอดีตการวิเคราะห์พลังงาน โดยเฉพาะพลังงานความร้อนจะทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของพลังงานโดยใช้กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะหมายถึงเอนทัลปี ส่วนการวิเคราะห์หาคุณภาพของพลังงานจะต้องใช้กฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะหมายถึงเอนโทรปี ทั้งเอนทัลปีและเอนโทรปีสามารถสร้างความสัมพันธ์กันได้ เรียกว่า เอ็กเซอร์ยี ซึ่งการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีสามารถบอกได้ว่าที่ใดในกระบวนการผลิตมีการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพและสามารถคำนวณหาปริมาณการสูญเสียที่แท้จริงได้ (Dineer และ Cengel, 2001)

2.4.4.1 เอนโทรปี (Entropy)

เอนโทรปี (S) เป็นตัวแปรสำคัญในการบอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการต่างๆ โดยกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี เป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อหนึ่งหน่วยอุณหภูมิสัมบูรณ์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$dS = \frac{dq}{T} \quad (17)$$

เมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะจาก 1 ไปเป็น 2 ภายใต้อุณหภูมิคงที่ สมการที่ 17 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_2 - S_1 \\ \Delta S &= \frac{q}{T} \end{aligned} \quad (18)$$

จากนิยามของเอ็กเซอร์ยีที่ว่า เอ็กเซอร์ยี คือ งานที่สามารถได้จากกระบบโดยตรงมีค่าของอุณหภูมิแวดล้อมเป็นค่ามาตรฐาน ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\Delta E_x = \Delta H - T_o \Delta S \quad (19)$$

สำหรับสมการสมดุลเอ็กเซอร์ยี คือ

$$\begin{aligned} \text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้าสู่ระบบ} &= (\text{เอ็กเซอร์ยีที่ไหลออกจากระบบ}) + (\text{เอ็กเซอร์ยีที่สูญเสีย}) \\ &+ (\text{เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลายเนื่องจากการย้อนกลับไม่ได้}) \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad \Delta E_{x,i} = \Delta E_{x,o} + \Delta E_{x,L} + Irreversibility \quad (20)$$

การคำนวณหาประสิทธิภาพของเอ็กเซอร์ยี (Exergy Efficiency, ε) สามารถหาได้ดังสมการนี้

$$\varepsilon = \frac{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ใช้ประโยชน์}}{\text{เอ็กเซอร์ยีที่ป้อนเข้า}} \times 100$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Exergy Output}}{\sum \text{Exergy Input}} \times 100 \quad (21)$$

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

จรีรัตน์ กุศลวิริยะวงศ์ (2552) [4] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาขนาดของถังเก็บสะสมความร้อนและสภาวะที่เหมาะสมของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืน ชนิด Single – effect ที่ทำงานด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ศึกษาเป็นแบบหลอดสุญญากาศ ซึ่งต่อแบบอนุกรมขนาดพื้นที่ 72 ตารางเมตร และระบบทำความเย็นแบบดูดกลืนมีขนาด 10 ตัน (35 kW_{th}) และใช้สารละลายลิเทียมโบรไมด์-น้ำ (LiBr/H₂O) เป็นสารทำงาน ซึ่งระบบติดตั้ง ณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิ การแยกชั้นของอุณหภูมิของน้ำภายในถังเก็บสะสมความร้อน และพลังงานความร้อนที่ออกจากถังเก็บสะสมความร้อนเพื่อป้อนแก่ระบบปรับอากาศ (Q_{solar}) และทำการหาขนาดถังที่เหมาะสม และสภาวะการทำงานของระบบ รวมถึงทำการประเมินสมรรถนะรวมของระบบ ในเทอมเศษส่วนรังสีอาทิตย์ (Solar Fraction) จากผลการศึกษา พบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ไหลแตกต่างกันภายในถังเก็บสะสมความร้อนจะลดลง เมื่อถังเก็บสะสมความร้อนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในโหมดที่ 1 มีอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 70.2, 68.9, 67.8 และ 66.7 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ถังเก็บสะสมความร้อนขนาด 800 1,000 1,200 และ 1,400 ลิตร ตามลำดับ และเมื่อทำการหาพลังงานความร้อนที่ได้จากถังเก็บสะสมความร้อน (Q_{storage}) พบว่า ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิขนาด 1,200 ลิตร จะทำให้ระบบได้รับพลังงานความร้อนสูงสุดเท่ากับ 78.7 kW และหากเพิ่มขนาดของถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำในถัง จากเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีขนาด 400 ลิตร เป็นขนาดที่เหมาะสม 1,200 ลิตร จะทำให้ระบบได้รับพลังงานความร้อนที่ออกจากถังเก็บสะสมความร้อนเพื่อป้อนแก่ระบบปรับอากาศ (Q_{solar}) เพิ่มขึ้นจากเดิมมีค่าเท่ากับ 13.14 kW เป็น 23.56 kW เนื่องจากการแยกชั้นของอุณหภูมิของน้ำชั้นบนสูงขึ้น และใกล้เคียงอุณหภูมิการทำงานของเครื่องทำความเย็นซึ่งมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 70 – 95 องศาเซลเซียส ซึ่งมีผลให้สมรรถนะของระบบในเทอมเศษส่วนรังสีอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 88% และส่งผลให้สัดส่วนการใช้พลังงานความร้อนเสริมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12%

ฟิลิฐ์ สวงวตรการกุล [5] ทำการพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้กับโรงฆ่าสัตว์ โดยโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยชุดสมการของตัวเก็บรังสีอาทิตย์, ถังเก็บน้ำร้อน, ข้อมูลสภาพอากาศลักษณะการใช้ น้ำร้อนของโรงฆ่าสัตว์ และค่าใช้จ่ายเริ่มต้นทางเศรษฐศาสตร์ และนำข้อมูลต่างๆ เหล่านี้ไปคำนวณหาค่าสัดส่วนของพลังงานที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต่อภาระงานทั้งหมด (Solar Fraction, SF), ปริมาณความร้อนที่ใช้ในระบบเดิมและความร้อนที่ใช้เสริม, ปริมาณแก๊สที่ใช้ในระบบเดิมและปริมาณแก๊สที่ใช้เสริม และค่าใช้จ่ายทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากนั้นได้ทำการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยการเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ที่ได้กับโปรแกรม TRNSYS พบว่า ค่าสัดส่วนของพลังงานที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ต่อภาระงานทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณได้จากโปรแกรม TRNSYS 14.00 – 16.28 % จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น จะเห็นได้ว่าถังเก็บน้ำร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิในระบบผลิตความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนา และเพิ่มสมรรถนะของถังเก็บสะสมความร้อนให้มีประโยชน์สูงสุด รวมทั้งมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษา แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาดังกล่าวยังไม่รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีอาทิตย์ ขนาดของถัง อัตราการไหลเข้าออกของน้ำ และการต่อตัวเก็บรังสีชนิดแผ่นราบแบบอนุกรม งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาอิทธิพลและความสัมพันธ์ของปัจจัยที่กล่าวมาต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำในตำแหน่งต่างๆในถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์และถังเก็บสะสมความร้อนเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิของน้ำในตำแหน่งต่างๆของถังเก็บสะสมความร้อน และนำข้อมูลที่ได้มาศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้โปรแกรมที่ได้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อ รวมทั้งใช้ประโยชน์ในการทำนายอุณหภูมิของน้ำเพื่อออกแบบถังต่อไป

Cristofari, et al. [6] ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำและการแยกชั้นของอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนจำนวน 10 ชั้น โดยใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบขนาด 2 m^2 และถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิขนาด 150 Liter ซึ่งจากการทดลอง พบว่า หากกำหนดให้มีอัตราการไหลเชิงมวลเท่ากับ $2.65 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ จะทำให้เกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อน และมีอุณหภูมิของน้ำสูงสุดถึง 71.2°C แต่หากกำหนดให้มีอัตราการไหลเชิงมวลสูงขึ้น $30 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ จะไม่เกิดการแบ่งชั้นของอุณหภูมิของน้ำและมีอุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าถังเก็บน้ำร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ คือเท่ากับ 69.7°C ในช่วงเวลาเดียวกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อน พบว่าระบบทำน้ำร้อนที่ประกอบด้วยถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นของอุณหภูมิมิสมรรถนะสูงกว่าระบบทำน้ำร้อนที่ใช้ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่ไม่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยพิจารณาจากพลังงานที่ประหยัดได้ ซึ่งระบบทำน้ำร้อน ที่ประกอบด้วยถังเก็บสะสมความร้อนชนิดที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิจะประหยัดพลังงานได้ถึง 5.25 % ในหนึ่งปี เมื่อเทียบกับระบบที่ประกอบด้วยถังเก็บน้ำร้อนชนิดที่ไม่มีการแบ่งชั้นของอุณหภูมิ

Y.M. Han, et al. [7] ได้ทำการศึกษา และรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับการแบ่งชั้นของอุณหภูมิในถังชนิดต่างๆ รวมทั้งที่มาของปัญหาด้านประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน และประโยชน์ของการแบ่งชั้นอุณหภูมิ ตลอดจนการออกแบบโครงสร้างของถังตามทฤษฎีเพื่อใช้ในการทำนายการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำในถัง การเปรียบเทียบผลจากการออกแบบกับการทดลองจริงการพัฒนาวิธีการทำนายเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและนำไปใช้ในการออกแบบถังที่ใช้การแบ่งชั้นของอุณหภูมิที่มีประสิทธิภาพเพื่อนำมาวิเคราะห์ของถัง

ชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิรวมถึงการใช้งาน ส่วนประกอบโครงสร้างของถัง ตลอดจนการทำนายเพื่อหาประสิทธิภาพสูงสุดของถังเพื่อให้เกิดการพัฒนา และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต

Zalman Lavan and James Thomson [8] ทำการศึกษาการแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำร้อนของระบบกักเก็บความร้อนในถังพลาสติกทรงกระบอกขนาด 300 และ 1,900 ลิตร โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า – ออกจากถังเก็บสะสมความร้อน และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำไปยังถังเก็บสะสมความร้อน รวมทั้งศึกษาผลกระทบของโครงสร้างทางเข้า – ออกของน้ำ พบว่า การแบ่งชั้นอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังเก็บสะสมความร้อน เพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนที่เข้าถังและน้ำเย็นที่ออกจากถังเก็บสะสมความร้อนซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของน้ำชั้นล่างสุดของถังเก็บสะสมความร้อน และเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของทางที่น้ำเข้า – ออกจากถังเก็บสะสมความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำจะทำให้การแบ่งชั้นของอุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนลดลง จากการศึกษาสามารถนำข้อมูลที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบถังสะสมความร้อนที่เหมาะสมได้

M. Mazloumi, et al. [9] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืนโดยใช้ LiBr – Water โดยใช้รางพาราโบลาเป็นตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Parabolic Trough) และใช้ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิที่มีน้ำเป็นตัวเก็บสะสมความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยสมมติให้อุณหภูมิเริ่มต้นของถังเก็บสะสมความร้อนอุณหภูมิที่ไหลเข้าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ เท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม พบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ลดลงมีแนวโน้มทำให้การแบ่งชั้นของอุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มสมรรถนะของระบบโดยรวม และเมื่อเวลาของการใช้งานเพิ่มขึ้นจะทำให้การแบ่งชั้นของอุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีที่สูงทำให้การแบ่งชั้นอุณหภูมิของถังเก็บสะสมความร้อนมีแนวโน้มจะผสมเข้ากันทั้งถัง (Well Mixed Situation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเพิ่มอัตราการไหลให้สูงขึ้น และลดขนาดถังให้เล็กลงแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และขนาดของถังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ

Shin, et al. [10] ได้ทำการศึกษาการทดสอบเชิงคณิตศาสตร์ในการออกแบบระบบการกักเก็บความร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงกลไกการแบ่งชั้นของอุณหภูมิของถังกักเก็บความร้อนและนำไปออกแบบถังที่สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการไหลของของเหลวภายในถัง โดยใช้ Patankars SIMPLE algorithm ทำการทดสอบความใช้ได้ของโปรแกรมโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในสเกลของห้องปฏิบัติการ การศึกษาระบบการแบ่งชั้นอุณหภูมิถูกนำมาเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบและหาค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ขนาดของถัง, เวลาในการใช้งาน, รูปร่างของการแพร่กระจาย, แบบจำลองของการปั่นป่วน และความเร็วของอัตราการไหลเข้า หรือ Fr.No. พิจารณาประสิทธิภาพของถังที่ได้รับผลกระทบจากการไหลวนและการปั่นป่วน แบบจำลองที่เสนอ กำหนดให้มีการผสมระหว่างน้ำร้อนและน้ำเย็นน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการประเมินสมรรถนะของระบบการกักเก็บโดยมีสมมติฐานของการไหลแบบ Uniform plug-type

โดยทั่วไปในระบบกักเก็บความร้อนขนาดใหญ่จะมีสมรรถนะในการกักเก็บดีกว่าขนาดเล็ก ส่วนการเพิ่มเวลาของภาระ (Loading Time) นั้น การแบ่งชั้นอุณหภูมิจะต่ำลง ในขณะที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา และการแพร่กระจายของอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นพบว่าการแพร่กระจายในรูปโค้ง (Curve type) ให้สมรรถนะของการแบ่งชั้นอุณหภูมิได้ดีกว่าการกระจายแนวราบ (Flat type) สำหรับถังกัก

เก็บความร้อนขนาดใหญ่ ผลกระทบของ Fr.No. หรือความเร็วของอัตราการไหลเข้าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อการแบ่งชั้นของอุณหภูมิเมื่อเปรียบเทียบกับถังที่มีขนาดเล็ก การคำนวณผลแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองชนิด Plug flow สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินสมรรถนะของระบบการกักเก็บโดยให้สถานะอ้างอิงของการแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ดีที่สุด หรือมีการผสมน้อยที่สุด ในกรณีของระบบขนาด Full Scale ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับการทดลองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบในขนาดห้องปฏิบัติการ และความสัมพันธ์ของการลดลงของการถ่ายเทความร้อนโดยเพิ่มการไหลของน้ำในระบบ Full Scale แบบจำลองแบบปั่นป่วน 2 แบบซึ่งมีค่าคงที่ K-E และ RNG K-E ไม่แตกต่างในการศึกษา

Sumathy [11] ทำการศึกษาผลของการแยกชั้นของอุณหภูมิในถังเก็บสะสมความร้อนที่มีต่อสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืนที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งในระบบปรับอากาศนี้ประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบขนาด 40 ตารางเมตร ถังเก็บสะสมความร้อนขนาด 2,750 ลิตร และเครื่องทำความเย็นขนาด 4.7 kW โดยระบบมีอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเท่ากับ 0.38 kg/s และเจนเนอเรเตอร์ทำงานเมื่ออุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 88 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการทำงาน ค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็น (Coefficient of Performance, COP) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำสูงขึ้น แต่หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การทำความเย็นลดลง เนื่องจากอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ จะไปทำลาย Thermocline ทำให้อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมความร้อนไม่เกิดการแบ่งแยกชั้น และได้แนะนำว่าหากระบบมีการใช้ถังเก็บสะสมความร้อนที่มีขนาดเล็กเกินไป จะส่งผลให้ระบบปรับอากาศมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะสามารถทำงานได้ ในช่วงเย็นซึ่งเป็นเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ หรือช่วงเวลามีแสงอาทิตย์น้อย นอกจากนี้ในวันที่ค่ารังสีอาทิตย์ไม่คงที่ และระบบไม่มีพลังงานความร้อนเสริมถังเก็บสะสมความร้อนจะไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวปรับเปลี่ยน (Thermal buffer) ได้ จะทำให้เครื่องทำความเย็นถูกเปิด - ปิดอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียความร้อนขึ้นได้ในระบบ นอกจากนี้ จากการศึกษาพบว่า เมื่อถังเก็บสะสมความร้อนมีการแบ่งแยกชั้นของอุณหภูมิของน้ำ จะทำให้อุณหภูมิของน้ำถึงอุณหภูมิที่เครื่องทำความเย็นสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งความร้อนเสริม (75 องศาเซลเซียส) เร็วกว่าถังเก็บสะสมความร้อนแบบปกติที่ไม่มีการแบ่งแยกชั้นของอุณหภูมิถึง 2 ชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมาย คือ วิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณภาพพลังงาน (Exergy Analysis) ของน้ำร้อน จากถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ได้ผลิตขึ้นระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบกับแบบ หลอดแก้วสุญญากาศ โดยมีขั้นตอนของการดำเนินงานดังนี้

3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ ไม่ว่าจะเป็นการสร้าง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบเพื่อนำมาใช้งานจริง

3.2 ออกแบบและสร้างถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ

ออกแบบถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และ สร้างถังเก็บน้ำร้อนฯ ต้นแบบ โดยใช้หลักการออกแบบดังต่อไปนี้

3.2.1 การเก็บข้อมูลน้ำร้อนภายในถัง

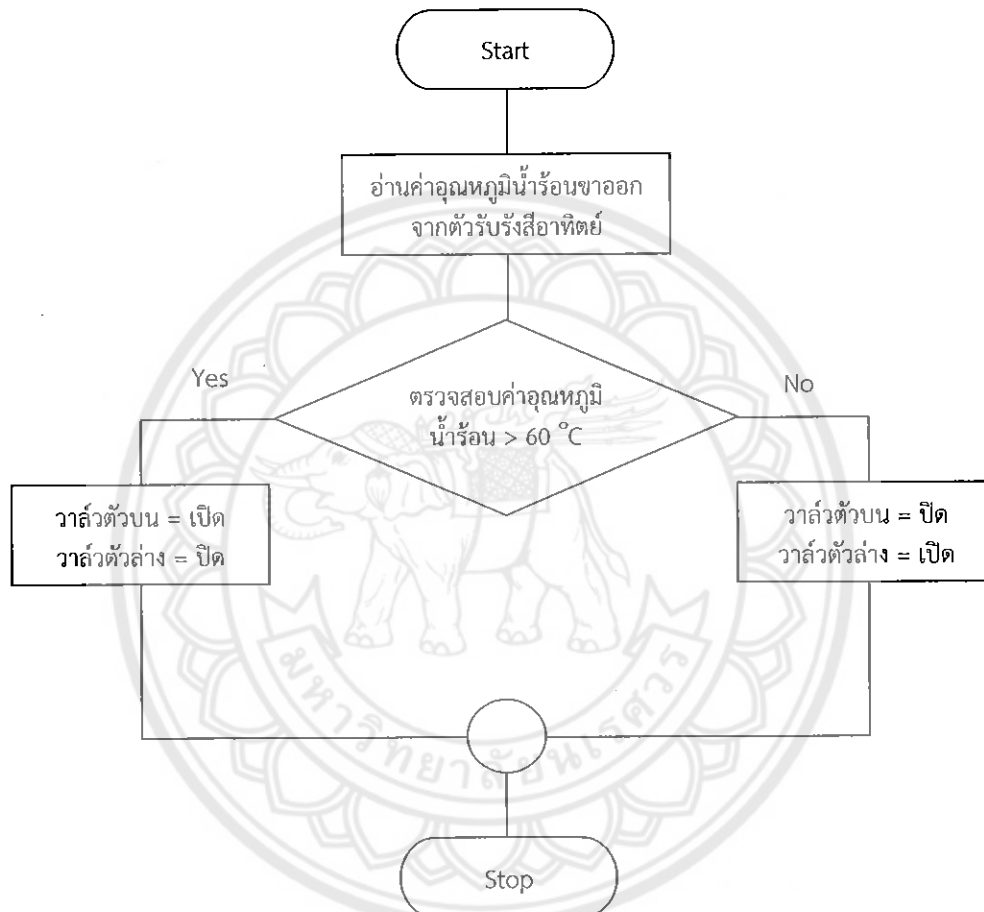
ถังน้ำร้อนที่ได้พัฒนาขึ้นจะมีการวัดอุณหภูมิของน้ำร้อนภายในถัง โดยจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับชั้นจากความสูงของถังน้ำร้อนที่ 1.25 เมตร และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสี อาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบและตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ บันทึกข้อมูลผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Recorder)



รูปที่ 9 ถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิ

3.2.2 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ไหลเข้าถัง

ผู้วิจัยได้มีการพัฒนาชุดควบคุมการไหลของน้ำร้อนเข้าสู่ถังเก็บสะสมความร้อน โดยมีวาล์วไฟฟ้า (Solenoid valve) เป็นอุปกรณ์สำหรับเปิด-ปิด การไหลเข้าของน้ำร้อน โดยมีชุดสั่งการจากภายนอก ซึ่งจะใช้อุณหภูมิที่ 60°C เป็นอุณหภูมิควบคุมสำหรับสั่งการทำงานของการทำงานของเปิดปิดวาล์วน้ำอัตโนมัติ โดยมีรูปแบบการสั่งการดังนี้

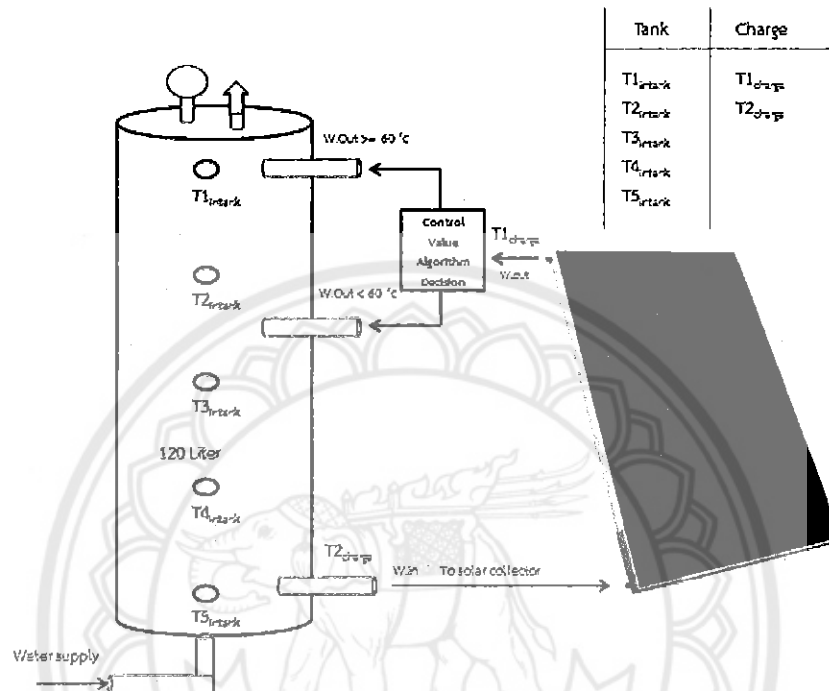


รูปที่ 10 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดควบคุมวาล์วน้ำอัตโนมัติ

โดยรูปแบบการไหลเข้าของน้ำร้อนจะมีอยู่ 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ ช่วงอุณหภูมิที่น้ำร้อนสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ในชุดควบคุม (60°C) วาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติด้านบนจะทำการเปิดพร้อมกับวาล์วด้านล่างจะถูกสั่งให้ปิดโดยอัตโนมัติและในทางกลับกันถ้าช่วงอุณหภูมิน้ำร้อนต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ รูปแบบการสั่งการจะปิดวาล์วด้านบนและเปิดวาล์วด้านล่าง

3.3 ทดสอบสมรรถนะถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ

ในการพัฒนาถังเก็บสะสมความร้อนชนิดแยกชั้นอุณหภูมินี้ ผู้วิจัยได้นำถังดังกล่าวไปติดตั้งร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบและตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศแบบเต็มระบบ และทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 11 ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดของระบบ

ตารางที่ 1 แสดงค่าต่างๆ ที่มีการเก็บข้อมูลในระบบ

ประเภทข้อมูล	ชนิดข้อมูล
สภาพแวดล้อม	TA (อุณหภูมิแวดล้อม)
	S1 (ค่ารังสีอาทิตย์)
ถังน้ำร้อน	T5intank (อุณหภูมิน้ำร้อนชั้นที่ 5; สูงสุด)
	T4intank (อุณหภูมิน้ำร้อนชั้นที่ 4)
	T3intank (อุณหภูมิน้ำร้อนชั้นที่ 3)
	T2intank (อุณหภูมิน้ำร้อนชั้นที่ 2)
	T1intank (อุณหภูมิน้ำร้อนชั้นที่ 1; ต่ำสุด)
ตัวเก็บรังสีอาทิตย์	T1charge (อุณหภูมิน้ำร้อนขาออก)
	T2charge (อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้า)

โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดและบันทึกนั้น ผู้วิจัยจะทำการวัดค่าระดับน้ำร้อนภายในถังจำนวน 5 ระดับ พร้อมกับอุณหภูมิน้ำร้อนของขาเข้า และขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รวมถึงค่าอุณหภูมิแวดล้อม และค่ารังสีอาทิตย์



รูปที่ 12 ถังน้ำร้อนที่ติดตั้งร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ไหลเข้าถัง



รูปที่ 13 วาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติ (Solenoid valve)



รูปที่ 14 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data Recorder) และชุดควบคุมการทำงานของวาล์วไฟฟ้า



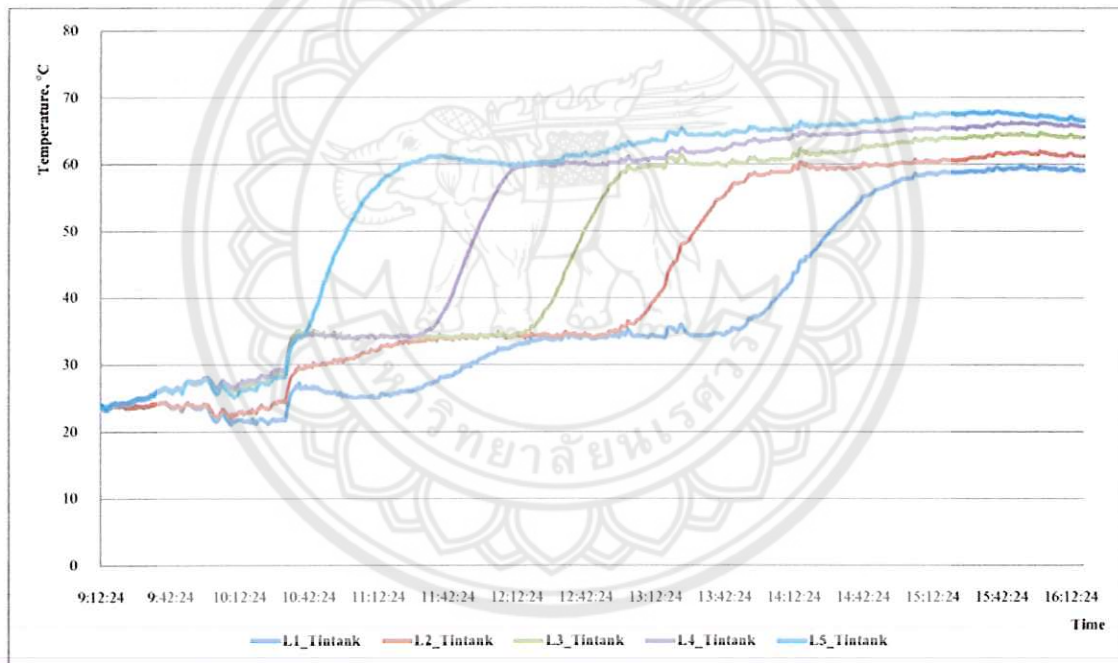
รูปที่ 15 ถังน้ำร้อนที่ติดตั้งร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบสุญญากาศ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังน้ำร้อนที่ได้พัฒนาขึ้น โดยจะทำการบันทึกข้อมูลตั้งแต่เวลา 9:00 น. – 16:00 น. โดยผู้วิจัยจะขออภิปรายผลการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ทำการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (อุณหภูมิในถังมีค่าเท่ากัน) และส่วนที่ 2 คือ ทำการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำร้อนในถังจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม และมีการแยกชั้นอุณหภูมิในถังกันอย่างชัดเจน

4.1 ผลของอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ



รูปที่ 16 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังฯ ทั้ง 5 ระดับชั้น ณ เวลาต่างๆ

จากกราฟ (รูปที่ 16) พบว่าอุณหภูมิของน้ำในถังเริ่มต้นจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25 °C ทั้ง 5 ระดับชั้น ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่ข้างใน ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำร้อนที่ผลิตได้จะถูกส่งเข้าสู่ถังโดยมีชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดย ณ เวลา 9:00 – 10:30 น. อุณหภูมิของน้ำร้อนชั้นที่ 3 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนไหลออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าไม่ถึง 60.0 °C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวล่างทำงาน เปิดให้น้ำร้อนไหลผ่านซึ่งเป็นตำแหน่งของน้ำร้อนไหลเข้าในบริเวณของชั้นที่ 3 และค่าอุณหภูมิของชั้นที่ 4-5 สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมา



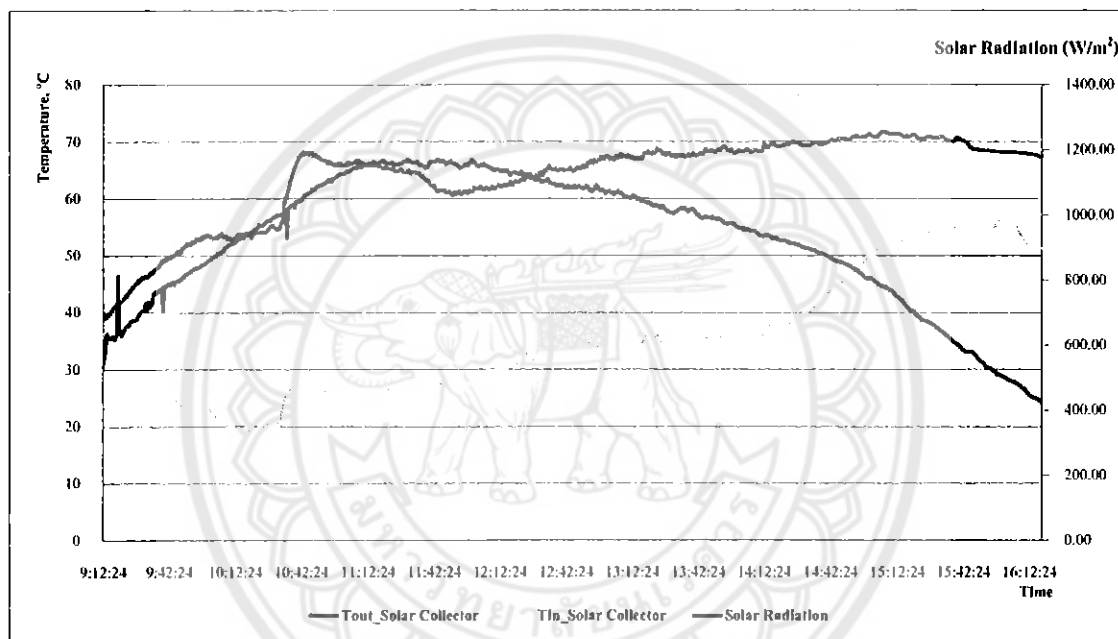
จากการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิของชั้นที่ 3 และในชั้นที่ 1-2 ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจาก น้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าจึงเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ที่สูง

สำนักหอสมุด

จ. ๒๒ ๕๕๖

จ. TH
6561.7
2A51

หลังจากเวลา 10:40 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้มีค่ามากกว่า 60.0 °C (รูปที่ 17) ส่งผลให้ชุดควบคุมการทำงานของวาล์วไฟฟ้าสั่งการให้วาล์วตัวล่างปิดการทำงาน และเปิดการทำงานของวาล์วไฟฟ้าตัวบนเพื่อให้น้ำร้อนไหลผ่านเข้าสู่ถังฯ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อวาล์วไฟฟ้าตัวบนเปิดการทำงาน อุณหภูมิของน้ำร้อนของชั้นที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกส่งเข้าสู่ถังฯ ในด้านบนสุด เพื่อลดการผสมผสานของน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันและ ณ เวลาต่อมา น้ำร้อนอุณหภูมิในชั้นที่ 5 ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นที่ 4 ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 ตามลำดับ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 10:40 – 16:00 น. ส่งผลให้อุณหภูมิชั้นดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ

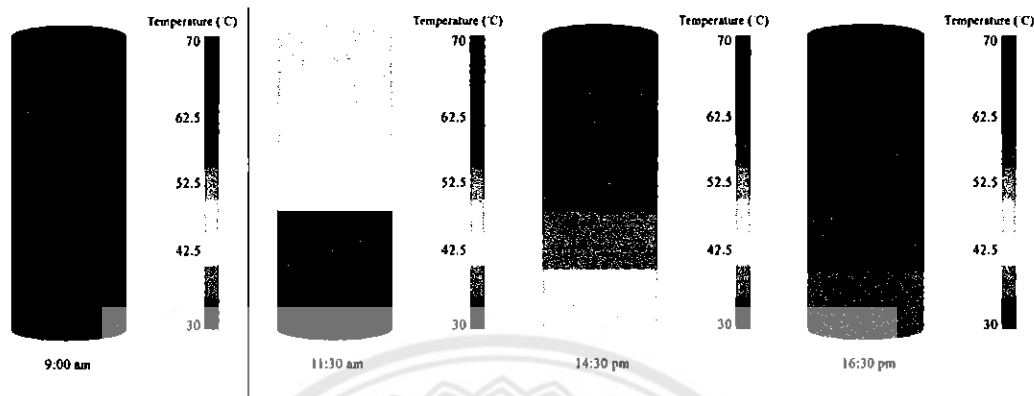


รูปที่ 17 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้าและขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

กราฟที่ 17 เป็นผลการบันทึกข้อมูลของค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ (Tout_Solar Collector) โดยค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ผลิตได้จะสัมพันธ์กับค่ารังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ผลการตรวจวัดข้อมูลพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดแผ่นเรียบ (Flat Plate Solar Collector) ที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถผลิตน้ำร้อนได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 39.1°C – 71.7°C และอุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 22.3°C – 39.8°C จากผลการทดสอบพบว่าน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 72.0 °C ณ เวลา 15:05 น. โดยมีค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 1168.19 W/m² อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 41.0 °C ซึ่งอุณหภูมิ น้ำร้อนสูงสุดในถังฯ มีค่าเท่ากับ 67.9 °C

อุณหภูมิของน้ำในถังเริ่มต้นจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 30 °C ทั้ง 5 ระดับชั้น เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับรังสีอาทิตย์ น้ำร้อนที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ถังฯ โดยมีชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดย ณ เวลา 9:00 – 11:00 น. อุณหภูมิของน้ำร้อนชั้นที่ 3 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนขาออก

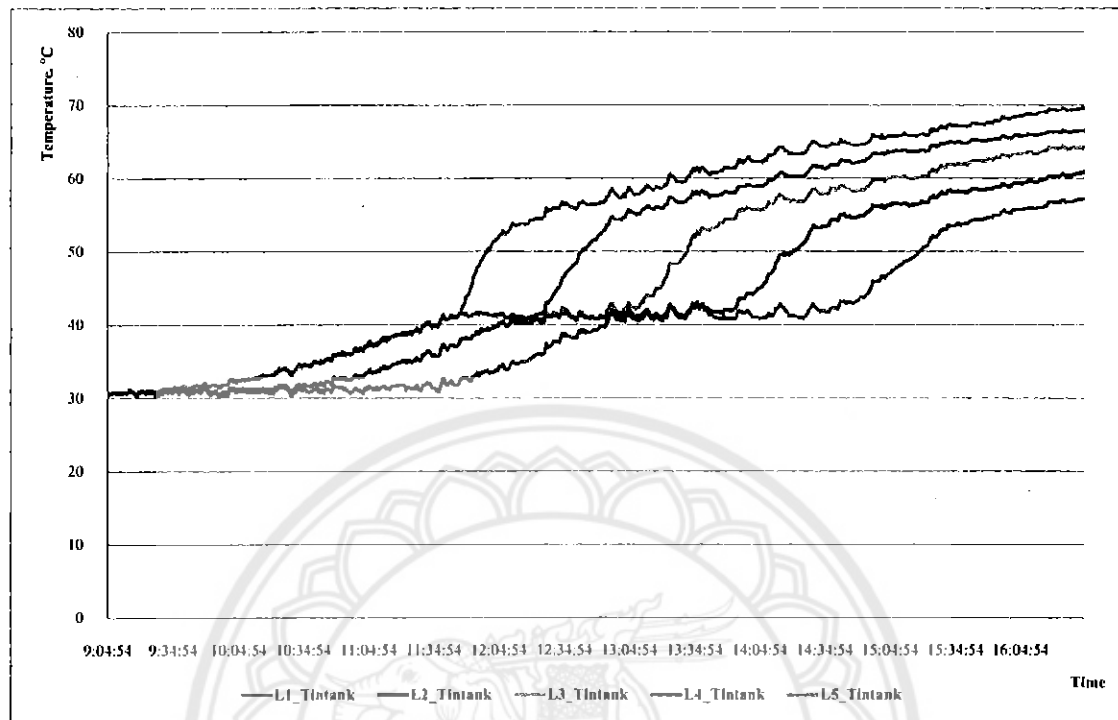
จากแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าไม่ถึง 60°C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวล่างเปิดการทำงานให้น้ำร้อนไหลผ่าน โดยจะมีค่าอุณหภูมิของชั้นที่ 4-5 สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิของชั้นที่ 1-2 จะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ตามรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงระดับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บสะสมความร้อน

หลังจากเวลา 11:00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของน้ำร้อนที่แผงรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้มีค่ามากกว่า 60°C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวบนของถังเปิดให้น้ำร้อนไหลผ่าน ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของชั้นที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และ ณ เวลาต่อมา น้ำร้อนอุณหภูมิในชั้นที่ 5 ก็มีการถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นที่ 4 ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 ตามลำดับ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 11:00 – 16:00 น. ส่งผลให้อุณหภูมิชั้นดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ น้ำร้อนได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 64.5°C ณ เวลา 15:39 น. ค่ารังสีดวงอาทิตย์ 923.4 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อม 31.56°C

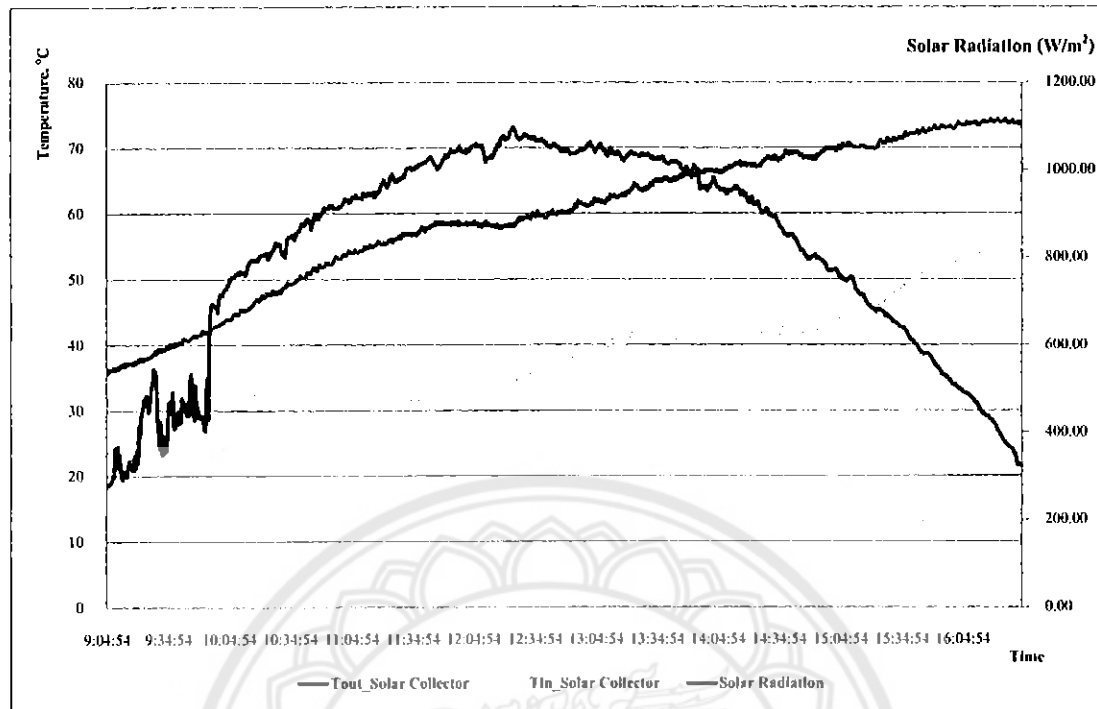
4.2 ผลของอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบหลอดแก้วสุญญากาศ



รูปที่ 19 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังฯ ทั้ง 5 ระดับชั้น ณ เวลาต่างๆ

จากกราฟ (รูปที่ 19) พบว่าอุณหภูมิของน้ำในถังเริ่มต้นจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 30 °C ทั้ง 5 ระดับชั้น ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนและถ่ายเทให้กับน้ำที่อยู่ข้างใน ส่งผลให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยน้ำร้อนที่ผลิตได้จะถูกส่งเข้าสู่ถังโดยมีชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดย ณ เวลา 9:00 – 11:30 น. อุณหภูมิของน้ำร้อนชั้นที่ 3 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าไม่ถึง 60.0 °C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวล่างทำงาน เปิดให้น้ำร้อนไหลผ่านซึ่งเป็นตำแหน่งของน้ำร้อนขาเข้าในบริเวณของชั้นที่ 3 และค่าอุณหภูมิของชั้นที่ 4-5 สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากอุณหภูมิของชั้นที่ 3 และในชั้นที่ 1-2 ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าจึงเกิดการลอยตัวขึ้นสู่ที่สูง

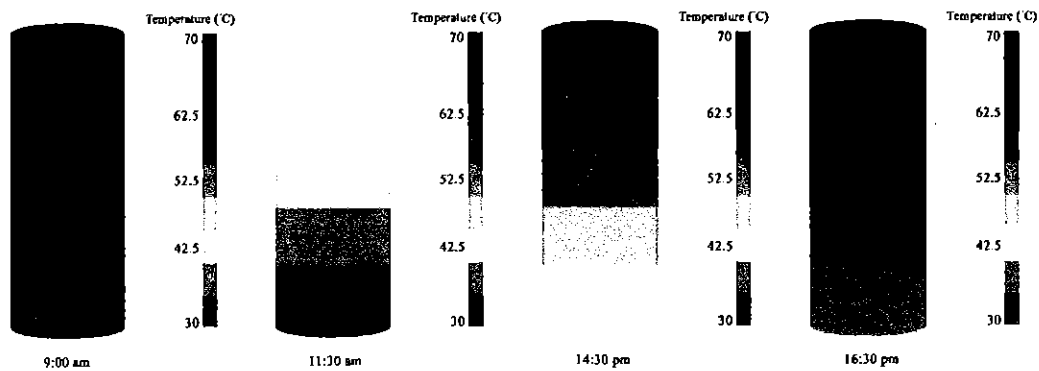
หลังจากเวลา 11:30 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้มีค่ามากกว่า 60.0 °C (รูปที่ 20) ส่งผลให้ชุดควบคุมการทำงานของวาล์วไฟฟ้าสั่งการให้วาล์วตัวล่างปิดการทำงาน และเปิดการทำงานของวาล์วไฟฟ้าตัวบนเพื่อให้ น้ำร้อนไหลผ่านเข้าสู่ถังฯ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อวาล์วไฟฟ้าตัวบนเปิดการทำงาน อุณหภูมิน้ำร้อนของชั้นที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะถูกส่งเข้าสู่ถังฯ ในด้านบนสุด เพื่อลดการผสมผสานของน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันและ ณ เวลาต่อมา น้ำร้อนอุณหภูมิในชั้นที่ 5 ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นที่ 4 ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 ตามลำดับ ในช่วงเวลาตั้งแต่ 11:30 – 16:00 น. ส่งผลให้อุณหภูมิชั้นดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ



รูปที่ 20 กราฟแสดงค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิน้ำเข้าและขาออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์

กราฟที่ 20 เป็นผลการบันทึกข้อมูลของค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้ (Tout_Solar Collector) โดยค่าอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จะสัมพันธ์กับค่ารังสีอาทิตย์ (Solar Radiation) ผลการตรวจวัดข้อมูลพบว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ชนิดหลอดสุญญากาศ ที่ผู้วิจัยนำมาใช้ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตน้ำร้อนได้อยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 35.7°C – 74.3°C และอุณหภูมิแวดล้อมอยู่ในช่วง 29.9°C – 41.1°C จากผลการทดสอบพบว่า น้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ผลิตได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 74.3°C ณ เวลา 16:22 น. โดยมีค่ารังสีดวงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 1096.81 W/m^2 อุณหภูมิอากาศแวดล้อม 41.1°C ซึ่งอุณหภูมิ น้ำร้อนสูงสุดในถังมีค่าเท่ากับ 69.6°C

อุณหภูมิของน้ำในถังเริ่มต้นจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 30°C ทั้ง 5 ระดับชั้น เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ตกกระทบกับแผงรับรังสีอาทิตย์ น้ำร้อนที่ได้จะถูกส่งเข้าสู่ถังโดยมีชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้ โดย ณ เวลา 9:00 – 11:00 น. อุณหภูมิของน้ำร้อนชั้นที่ 3 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากน้ำร้อนขาออกจากแผงรับแสงอาทิตย์มีค่าไม่ถึง 60°C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวล่างเปิดการทำงานให้น้ำร้อนไหลผ่าน โดยจะมีค่าอุณหภูมิของชั้นที่ 4-5 สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิของชั้นที่ 1-2 จะสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ตามรูปที่ 21

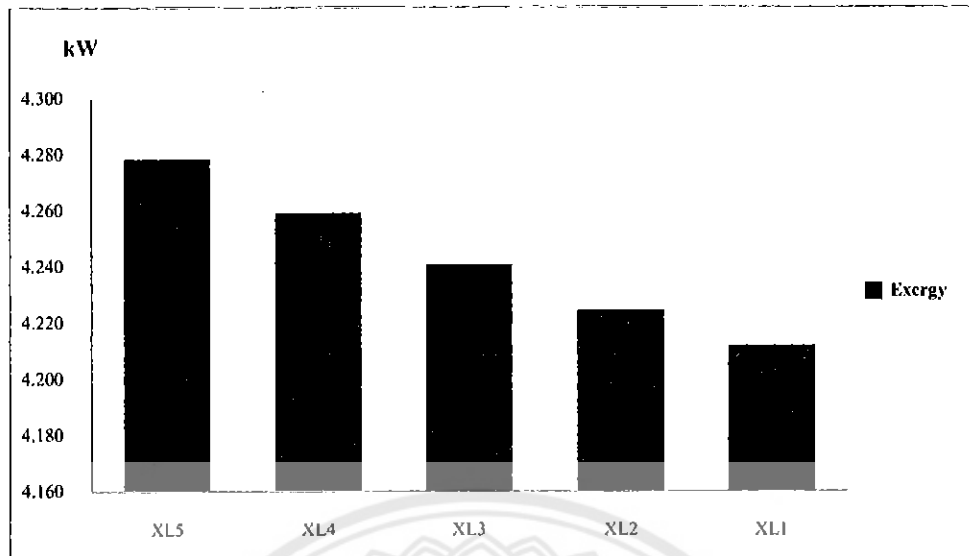


รูปที่ 21 แสดงระดับอุณหภูมิน้ำร้อนในถังเก็บสะสมความร้อน

หลังจากเวลา 11:00 น. เป็นต้นไป อุณหภูมิของน้ำร้อนที่แผงรับรังสีอาทิตย์ผลิตได้มีค่ามากกว่า 60°C ส่งผลให้วาล์วไฟฟ้าตัวบนของถังเปิดให้น้ำร้อนไหลผ่าน ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิน้ำร้อนของชั้นที่ 5 จะมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และ ณ เวลาต่อมา น้ำร้อนอุณหภูมิในชั้นที่ 5 ก็มีการถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นที่ 4 ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 ตามลำดับ ในช่วงเวลาดังกล่าว ตั้งแต่ 11:00 – 16:00 น. ส่งผลให้อุณหภูมิชั้นดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ น้ำร้อนได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 69.6°C ณ เวลา 16:23 น. ค่ารังสีดวงอาทิตย์ 810.5 W/m^2 อุณหภูมิแวดล้อม 38.6°C

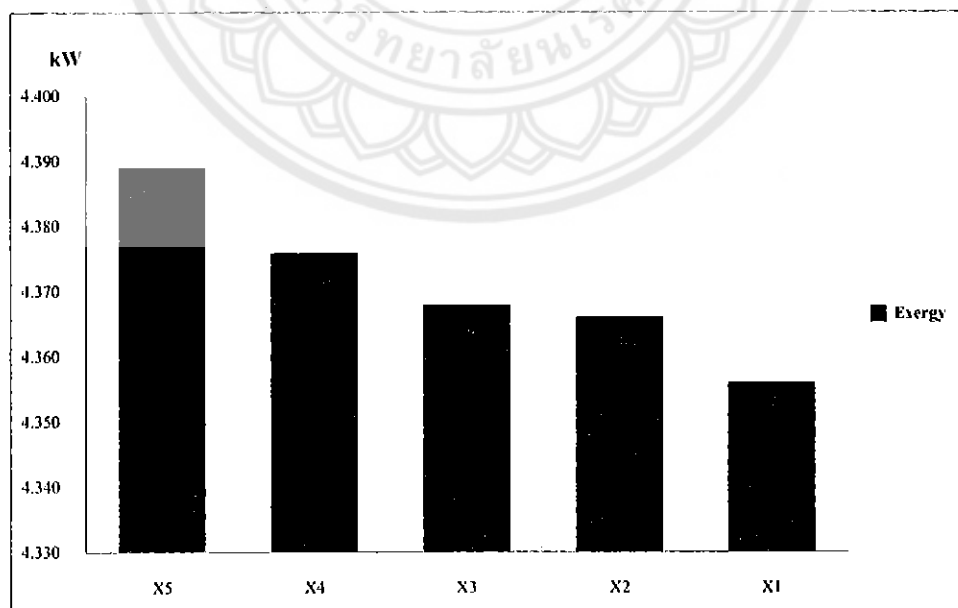
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพพลังงานของถังเก็บสะสมความร้อน

ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) จากถังน้ำร้อนที่ได้มีการพัฒนาขึ้น โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ ซึ่งการคำนวณค่าเอ็กเซอร์ยีจากการผสมผสานของน้ำร้อนในแต่ละชั้นของถังฯ ซึ่งพบว่า ค่าเอ็กเซอร์ยีของน้ำร้อนในชั้นที่ 5 (ชั้นบนสุด) มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 4 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 เป็นลำดับชั้นสุดท้าย โดยในชั้นที่ 5 มีค่าเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 4.278 kW ซึ่งชั้นดังกล่าวมีการผสมผสานของน้ำร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันน้อยมาก เป็นผลมาจากการทำงานของชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่งผลให้ค่าความเอนโทรปีของระบบ (Entropy) ลดลง ค่าเอ็กเซอร์ยีจึงมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 22



รูปที่ 22 กราฟแสดงค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

ผลการวิเคราะห์ค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) จากถังน้ำร้อนที่ได้มีการพัฒนาขึ้น โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ ซึ่งการคำนวณค่าเอ็กเซอร์ยีจากการผสมผสานของน้ำร้อนในแต่ละชั้นของถังฯ ซึ่งพบว่า ค่าเอ็กเซอร์ยีของน้ำร้อนในชั้นที่ 5 (ชั้นบนสุด) มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ ชั้นที่ 3 ชั้นที่ 4 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 เป็นลำดับชั้นสุดท้าย โดยในชั้นที่ 5 มีค่าเอ็กเซอร์ยีเท่ากับ 4.389 kW ซึ่งชั้นดังกล่าวมีการผสมผสานของน้ำร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกันน้อยมาก เป็นผลมาจากการทำงานของชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของระบบ (Entropy) ลดลง ค่าเอ็กเซอร์ยีจึงมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 กราฟแสดงค่าคุณภาพพลังงาน (Exergy) โดยใช้ตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศ

ในส่วนของการคำนวณค่าเอ็กเซอร์ยีของอุณหภูมิในถังน้ำร้อนของชั้นที่ 3 นั้น แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนของการผสมผสานน้ำร้อนที่เกิดจากการส่งผ่านน้ำร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60°C ผ่านทางวาล์วไฟฟ้าอัตโนมัติ (Solenoid valve) โดยในชั้นดังกล่าว จะเกิดการแปรปรวนของระบบมากเนื่องจากอุณหภูมิน้ำในถังเริ่มต้นคือ อุณหภูมิแวดล้อม จะเกิดการผสมผสานกับน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์โดยจะมีค่าความแตกต่างกันของอุณหภูมิก่อนข้างมาก ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก และในส่วนที่ 2 คือ กรณีที่อุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่ามากกว่า 60°C ทำให้วาล์วไฟฟ้าตัวบนเปิด การไหลเข้าของน้ำร้อนในชั้นที่ 3 ก็จะหยุดลง แต่จะเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากชั้นที่ 4 ลงสู่ชั้นที่ 3 แทน โดยค่าความแปรปรวนที่มีในกรณีนี้จะมีค่าไม่สูงมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิในชั้นที่ 3 ณ เวลาดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้นแล้วจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ในส่วนของชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะไม่มีการไหลเข้าของน้ำร้อนที่ผลิตจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์เลย จะเกิดเพียงการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากชั้นที่ 3 ลงสู่ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 เพียงอย่างเดียว โดยความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำร้อนจะมีค่ามากกว่าชั้นที่ 3 ถึง ชั้นที่ 5 ซึ่งอุณหภูมิในถังจะมีค่าสูงขึ้นได้จากการทำงานของวาล์วไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ในชั้นที่ 2 และชั้นที่ 1 จะไม่มีการส่งผ่านน้ำร้อนเข้าสู่ชั้นนั้นๆ เลย เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนเพิ่มมากขึ้นด้วย



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปลผลการวิจัย

ถึงเก็บสะสมความร้อนที่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิ (Stratified Thermal Storage Tank) ที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนี้ สามารถทำให้น้ำร้อนที่อยู่ในถังเกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิได้อย่างชัดเจน ซึ่งการแบ่งชั้นความร้อนในถังเป็นสิ่งที่ดี เพราะทำให้น้ำที่ไหลออกจากส่วนบนของถังมีอุณหภูมิสูงสุด และทำให้กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมากที่สุดถึงเก็บสะสมความร้อนที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ยังคงช่วยเพิ่มคุณภาพพลังงานภายในถังๆ เนื่องจากถังน้ำร้อนดังกล่าวมีชุดควบคุมการส่งจ่ายน้ำร้อนจากภายนอก ทำให้ลดการผสมผสานของน้ำร้อนในช่วงอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ทำให้คุณภาพของพลังงานมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การกักเก็บอุณหภูมิน้ำร้อนที่ผลิตได้มีค่าสูงมากพอต่อความต้องการใช้งาน จึงลดการเพิ่มอุปกรณ์ทำความร้อนเสริม (Auxiliary Heat) ที่จะช่วยเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามความต้องการลงได้ โดยถึงเก็บสะสมความร้อนที่พัฒนาขึ้นนี้มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน จากผลการวิจัยพบว่าตัวเก็บรังสีแบบหลอดแก้วสุญญากาศมีค่าเฉลี่ยของคุณภาพพลังงาน (Exergy) มากกว่าตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ โดยมีค่าเฉลี่ยของคุณภาพพลังงานเท่ากับ 4.371 kW และ 4.243 kW ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการพัฒนายังสามารถนำถังเก็บน้ำร้อนแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิสำหรับระบบผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าวไปเป็นต้นแบบ (Prototype) เพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป เป็นการช่วยลดการใช้พลังงานในส่วนของการใช้พลังงานจากหม้อไอน้ำ (Boiler) และยังช่วยให้อุณหภูมิของพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดการใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ดังเก็บสะสมความร้อนชนิดแบ่งชั้นอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นนี้ ในกรณีที่น่าไปใช้งานให้ได้คุณภาพพลังงานสูงสุด ผลการวิจัยพบว่าดังเก็บสะสมความร้อนจะมีความเหมาะสมมากที่สุด ในกรณีที่น้ำร้อนภายในถังเริ่มต้นควรจะเป็นน้ำที่ไม่มีการแบ่งชั้นอุณหภูมิหรือเป็นน้ำที่อุณหภูมิแวดล้อม
2. ในกรณีที่จะนำถังเก็บสะสมความร้อนดังกล่าวไปเป็นต้นแบบและใช้ในงานอุตสาหกรรม ควรศึกษาถึงความสูงของถังเก็บสะสมความร้อน ค่าอุณหภูมิ น้ำร้อนภายในถังฯ และชุดควบคุมการไหลเข้าของน้ำร้อนภายในถังฯ เพราะ 3 ส่วนนี้ จะมีความสัมพันธ์กันในแง่ของการเพิ่มคุณภาพพลังงานให้สูงขึ้นได้
3. ในการพัฒนาชุดควบคุมการไหลของน้ำร้อนเข้าสู่ถังฯ จะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของอุณหภูมิ น้ำร้อนขาเข้า และส่วนของอุณหภูมิ น้ำร้อนที่อยู่ในถัง โดยหลักการถ่ายเทความร้อนนั้น จำเป็นที่จะต้องทำการกำหนดให้ค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนขาเข้า ต้องมีค่ามากกว่าอุณหภูมิ น้ำร้อนในถังฯ เสมอ จึงจะเกิดการไหลของน้ำร้อนเข้าสู่ถังได้ และมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. รายงานการอนุรักษ์พลังงานของประเทศไทย 2556. สืบค้นเมื่อ 23 มิถุนายน 2558, จาก http://www4.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/report13/thailand%20energy%20efficiency%20situation%202013.pdf
- [2] Felix A. Peuser, et al. (2011). Solar Thermal Systems - Expert Knowledge for Successful Planning and Construction. Competence Center Solar energy, University of Applied Sciences Trier, Germany.
- [3] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. (1991). Solar engineering of thermal processes (2nd ed). United States: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] จีรัตน์ กุศลวิริยะวงศ์ (2552), การหาขนาดของถังเก็บสะสมความร้อนและสภาวะที่เหมาะสมต่อการประเมินสมรรถนะของระบบปรับอากาศแบบดูดกลืนชนิด Single effect ที่ทำงานด้วยพลังงานแสงอาทิตย์, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [5] พิสิษฐ์ สงวนตระกูล. (2549). การเลือกขนาดระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์สำหรับโรงฆ่าสัตว์. วิทยานิพนธ์ วศ.ม., มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.
- [6] Cristofari, C., Notton, G., Poggi, P. and Louche, A. (2003). Influence of the flow rate and the tank stratification degree on the performances of a solar flat-plate collector. International journal of thermal sciences, 42, 455-469.
- [7] Han, Y.M. and Wang, R.Z. (2008). Thermal stratification within the water tank. Renewable and sustainable energy reviews, (2008), 1-13.
- [8] Lavan, Z. and Thomson, J. (1976). Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks. Solar energy, 19, 519-524.
- [9] Mazloumi, M., Naghashadegan, M. and Javaherdeh, K. (2008). Simulation of solar lithium bromide-water absorption cooling system with parabolic trough collector. Energy conversion and management, (2008), 1-13.
- [10] Shin, M., Kim H., Jang, D., Lee, S., Lee, Y. and Yoon, H. (2004). Numerical and experimental study on the design of a stratified thermal storage system. Applied thermal engineering, 24, 17-27.
- [11] Sumathy, Z. F. Li, K. (2002). Performance study of a partitioned thermally stratified storage tank in a solar powered absorption air conditioning system. Applied Thermal Engineering. 22, 1207-1216.



ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

Time	L1 (°C)	L2 (°C)	L3 (°C)	L4 (°C)	L5 (°C)	Irr (W/m ²)	Tout (°C)
9:34:54	27.2	27.4	27.3	27.1	30.9	414.20	39.4
9:35:54	27.4	27.6	27.5	27.3	31.1	559.97	40.6
9:36:54	27.3	27.6	27.3	27.4	31.2	615.26	41.4
9:37:54	26.8	27.1	26.8	27.1	30.8	533.83	42.3
9:38:54	27	27.3	27.1	27.3	30.7	633.36	43.4
9:39:54	27	27.2	27.1	27.3	30.9	627.32	44.3
9:40:54	27.3	27.4	27.4	27.6	31	632.35	46.1
9:41:54	27.5	27.6	27.6	27.8	31.2	631.35	47
9:42:54	27.5	27.7	27.7	28	30.8	604.20	48
9:43:54	27.7	27.9	27.9	28.2	31	596.16	48.8
9:44:54	27.2	27.4	27.6	28	29.5	657.48	48.8
9:45:54	27.4	27.6	28.1	28.3	29.8	645.42	49.6
9:46:54	26.9	27.3	27.8	28.3	29.1	638.38	50.1
9:47:54	27	27.3	28	28.3	29.4	644.42	50.5
9:48:54	27.6	27.8	28.5	28.6	30	612.24	51.2
9:49:54	27.7	27.9	28.8	28.9	29.9	604.20	51.6
9:50:54	27.9	28.1	29.2	29.3	29.9	399.12	51.9
9:51:54	27.7	27.7	29	29.5	29.9	654.47	51.4
9:52:54	27.6	27.8	29.1	29.6	29.7	688.65	51.1
9:53:54	27.6	27.7	29.3	29.8	29.8	688.65	51.4
9:54:54	27.8	28	29.5	29.8	29.7	680.61	52
9:55:54	27.7	27.9	29.8	29.9	29.9	687.64	52.3
9:56:54	27.9	28	30.1	30.2	30.2	690.66	52.8
9:57:54	28.1	28.2	30.4	30.4	30.4	687.64	53.3
9:58:54	28	28	30.2	30.4	30.3	686.64	53.2
9:59:54	27.6	27.8	30.4	30.5	30.5	687.64	53.1
10:00:54	27.1	27.3	30.1	30.3	30.2	690.66	52.8
10:01:54	27.1	27.3	30.3	30.5	30.5	685.63	53
10:02:54	26.8	27.1	30.3	30.5	30.4	687.64	53.3
10:03:54	27.5	27.6	31.1	31.1	31.1	688.65	53.7
10:04:54	27.7	27.9	31.1	31.3	31.2	682.62	53.8
10:05:54	27.9	28.1	31.4	31.5	31.6	699.71	54
10:06:54	27.9	28.1	31.5	31.7	31.6	712.78	54
10:07:54	27.7	27.9	31.5	31.7	31.6	697.70	54.1
10:08:54	27.3	27.7	31.5	31.6	31.5	667.54	54
10:09:54	27.3	27.6	31.5	31.7	31.7	680.61	54
10:10:54	27.8	27.9	32	32.2	32.1	720.82	54.2
10:11:54	28.1	28.2	32.3	32.3	32.4	732.88	54.5

10:12:54	27.6	27.8	31.9	32.1	32.1	741.93	54.4
10:13:54	27.4	27.6	32	32.2	32.2	746.96	54.5
10:14:54	27.7	28	32.5	32.4	32.4	747.96	55.2
10:15:54	28.1	28.3	32.7	32.8	32.8	741.93	55.8
10:16:54	28.1	28.3	32.9	32.8	32.9	723.84	55.6
10:17:54	27.9	28.2	32.9	32.9	32.9	755.00	55.5
10:18:54	28	28.3	33	33	33.2	754.00	55.8
10:19:54	27.9	28.3	33.1	33.2	33.2	766.06	56.1
10:20:54	28.1	28.4	33.3	33.4	33.4	767.07	56
10:21:54	27.8	28.1	33.2	33.3	33.4	773.10	55.8
10:22:54	27.4	27.9	33	33.3	33.1	784.16	55.6
10:23:54	27.8	28.3	33.4	33.7	33.6	790.19	56.1
10:24:54	27.6	28.2	33.4	33.7	33.6	798.23	56.1
10:25:54	27.5	28.1	33.5	33.7	33.8	811.30	56.3
10:26:54	28.2	28.6	34.2	34.3	34.3	812.31	56.8
10:27:54	27.8	28.5	33.9	34.2	34.1	817.33	57.1
10:28:54	27.7	28.5	34.2	34.3	34.3	817.33	56.9
10:29:54	27.9	28.8	34.4	34.5	34.5	819.34	57.4
10:30:54	28.3	29.2	34.9	34.8	34.9	831.41	57.4
10:31:54	28.2	29.3	34.8	34.8	34.9	818.34	57.8
10:32:54	28	29.3	34.7	34.8	34.9	818.34	57.3
10:33:54	27.6	29	34.7	34.8	34.8	834.42	57.5
10:34:54	28.2	29.6	35.2	35.1	35.3	837.44	57.7
10:35:54	28.1	29.5	35.1	35.2	35.3	835.43	57.7
10:36:54	27.6	29.4	34.9	35	35	800.24	57.4
10:37:54	27.6	29.5	35	35.2	35.2	803.26	57.5
10:38:54	28.2	30.3	35.6	35.7	35.7	827.39	57.9
10:39:54	28.3	30.6	35.9	35.9	36	808.28	57.8
10:40:54	28	30.3	35.7	35.8	35.8	841.46	58
10:41:54	27.5	30.1	35.6	35.8	35.6	843.47	57.2
10:42:54	28.1	30.7	36	36	36.1	860.56	58.1
10:43:54	27.9	30.7	36	36	36	867.60	57.7
10:44:54	27.6	30.8	36	36.1	36.1	866.59	57.9
10:45:54	27.8	30.9	36.2	36.2	36.2	856.54	57.8
10:46:54	28.3	31.6	36.8	36.8	36.8	858.55	57.1
10:47:54	28.3	31.6	36.7	36.7	37.1	883.68	57.8
10:48:54	27.9	31.5	36.6	36.8	37	892.73	57.8
10:49:54	27.4	31.2	36.3	36.7	36.6	886.70	57.2
10:50:54	27.3	31.3	36.4	36.7	36.8	888.71	55.5
10:51:54	27.9	32	36.8	37	37.7	891.73	55.1
10:52:54	27.8	32.1	36.8	36.9	38.3	891.73	54.5
10:53:54	27.8	32.2	36.8	36.9	39.4	900.77	54.2

10:54:54	27.8	32.5	37	37.1	40.2	906.81	54.1
10:55:54	27.5	32.3	36.8	36.9	40.7	907.81	53.9
10:56:54	27.6	32.6	36.8	36.9	41.5	903.79	53.8
10:57:54	27.1	32.3	36.3	36.5	41.7	914.85	53.2
10:58:54	26.9	32.3	36.1	36.3	42.2	919.88	52.9
10:59:54	26.8	32.3	36.1	36.3	42.6	918.87	52.8
11:00:54	27.7	33.2	36.7	36.7	43.6	919.88	53.4
11:01:54	28	33.8	37.2	37.1	44.5	922.89	53.9
11:02:54	28.2	34.2	37.4	37.3	45.1	927.92	54.1
11:03:54	27.8	34	37	37	45.3	937.97	54.1
11:04:54	28.2	34.4	37.3	37.1	45.8	936.97	54.5
11:05:54	28	34.4	37.1	37.1	46	955.06	54.5
11:06:54	28.3	35	37.6	37.3	46.8	958.08	54.9
11:07:54	28.2	35	37.4	37.2	46.8	959.08	55
11:08:54	28.6	35.5	38	37.8	47.5	956.07	55.5
11:09:54	28.5	35.4	37.6	37.5	47.7	952.05	55.3
11:10:54	28.5	35.6	37.6	37.4	47.9	946.01	55.1
11:11:54	28.7	35.8	37.6	37.5	48.3	951.04	55.1
11:12:54	28.5	35.7	37.5	37.4	48.7	957.07	55.1
11:13:54	28.5	35.9	37.5	37.4	48.9	958.08	55.1
11:14:54	28.8	36	37.4	37.3	48.9	959.08	55.2
11:15:54	28.3	35.8	37	37.1	49	962.10	55.4
11:16:54	28.1	35.7	36.9	37	49	966.12	55.1
11:17:54	28.6	36.1	37.3	37.2	49.6	967.13	55.2
11:18:54	29.3	36.8	37.8	37.6	50.2	970.14	55.8
11:19:54	29	36.5	37.4	37.5	50.2	962.10	55.7
11:20:54	29.8	37.1	37.8	37.7	50.7	966.12	56.6
11:21:54	30	37.2	37.9	37.7	50.8	961.09	56.4
11:22:54	29.8	37.1	37.7	37.6	50.9	964.11	56.2
11:23:54	29.6	36.9	37.5	37.6	51	964.11	56
11:24:54	29.7	36.8	37.3	37.5	50.8	947.02	56.4
11:25:54	29.3	36.3	36.9	37.2	50.7	955.06	55.7
11:26:54	29.1	36.2	36.7	37.2	50.9	954.06	55.4
11:27:54	30.2	36.9	37.5	37.6	51.4	960.09	56.2
11:28:54	31	37.4	37.9	38	51.9	968.13	56.6
11:29:54	31.1	37.4	37.8	38.3	52.1	967.13	56.7
11:30:54	30.4	36.8	37.2	37.9	51.7	970.14	56.4
11:31:54	30.5	36.8	37.3	38.1	51.7	971.15	56.6
11:32:54	31.3	37.2	37.4	38.5	52.3	975.17	56.8
11:33:54	31.5	37.3	37.6	38.9	52.5	969.14	57.1
11:34:54	31.7	37.5	37.8	39.3	52.6	976.17	57.1
11:35:54	31.8	37.3	37.6	39.4	52.5	983.21	56.8

11:36:54	31.4	36.9	37.3	39.6	52.3	992.26	57
11:37:54	31.8	36.9	37.3	40.1	52.5	990.25	56.9
11:38:54	31.7	36.9	37.1	40.4	52.4	996.28	57.1
11:39:54	31.8	36.9	37.2	40.9	52.6	996.28	57
11:40:54	32.1	37.2	37.3	41.5	52.8	993.26	57.5
11:41:54	32.3	37.1	37.3	42	53	992.26	57.5
11:42:54	32.9	37.4	37.5	42.6	53.3	994.27	57.9
11:43:54	32.6	37.1	37.3	42.9	53.2	992.26	58
11:44:54	32.7	37.1	37.4	43.4	53.3	984.22	58
11:45:54	33.3	37.4	37.6	44	53.7	990.25	58.4
11:46:54	33.2	37.2	37.4	44.3	53.6	994.27	58.1
11:47:54	33.6	37.3	37.5	44.9	53.8	999.30	58.4
11:48:54	33.5	37.2	37.5	45.3	53.8	997.29	58.4
11:49:54	33.9	37.4	37.6	45.7	54.1	1000.30	58.6
11:50:54	33.4	36.9	37.2	45.9	53.7	993.26	58.7
11:51:54	33.5	36.9	37.2	46.2	53.9	992.26	58
11:52:54	33.8	37	37.1	46.6	54	995.27	58.1
11:53:54	34	37.1	37.2	47	54.1	984.22	58
11:54:54	34.1	36.9	37.1	47.1	54	985.22	58
11:55:54	34.3	36.9	37	47.5	54.1	973.16	58
11:56:54	34.6	37.2	37.4	48.1	54.4	977.18	58.2
11:57:54	35.7	37.9	38.1	48.8	55.1	983.21	59.5
11:58:54	35.6	37.8	38	49	55	988.24	59.1
11:59:54	35.3	37.4	37.6	49	54.8	983.21	59.2
12:00:54	35.9	37.8	38	49.6	55.2	980.20	59.4
12:01:54	36.1	38	38.3	49.9	55.4	977.18	59.5
12:02:54	36.6	38.3	38.5	50.3	55.8	980.20	60
12:03:54	36.7	38.2	38.4	50.5	55.8	978.18	60.4
12:04:54	37	38.3	38.5	50.7	55.8	964.11	60.4
12:05:54	36.6	38	38.3	50.7	55.7	964.11	60
12:06:54	35.9	37.3	37.9	50.6	55.4	973.16	59.7
12:07:54	36	37.4	37.9	50.6	55.5	983.21	59.7
12:08:54	36	37.5	38.2	51.1	55.8	992.26	60.3
12:09:54	36.6	37.9	38.6	51.4	56.1	988.24	60.6
12:10:54	37.7	38.4	39.4	51.8	56.9	988.24	61.6
12:11:54	37.3	38.1	39.1	52	56.6	997.29	61.1
12:12:54	36.9	37.7	38.8	51.7	56.4	1009.35	61.1
12:13:54	36.5	37.5	38.7	51.9	56.4	1009.35	61.1
12:14:54	37.1	37.9	39.2	52.1	56.7	1006.33	61.5
12:15:54	37.3	38.1	39.5	52.5	57.1	1006.33	62.1
12:16:54	37.2	38	39.7	52.7	57.2	1011.36	62
12:17:54	36.9	37.7	39.6	52.7	57.2	1006.33	62.4

12:18:54	36.3	37.2	39.5	52.4	56.8	1001.31	61.8
12:19:54	36.6	37.5	40	52.8	57.3	993.26	62.3
12:20:54	37.2	37.9	40.7	53.1	57.6	992.26	62.7
12:21:54	37.2	37.9	40.8	53.2	57.8	988.24	62.4
12:22:54	37.1	37.7	41	53.3	57.8	985.22	62.6
12:23:54	37	37.7	41.3	53.3	57.7	986.23	62.4
12:24:54	37.1	37.7	41.7	53.4	57.8	982.21	62.3
12:25:54	37.9	38.3	42.5	54	58.5	976.17	63.1
12:26:54	37.4	38.1	42.7	53.9	58.2	969.14	62.6
12:27:54	38.1	38.4	43.1	54.1	58.8	977.18	62.8
12:28:54	37.5	38	43.1	54	58.5	980.20	62.8
12:29:54	37	37.6	43.2	54	58.3	965.12	62.6
12:30:54	37.3	38	43.8	54.3	58.6	974.16	62.5
12:31:54	37.4	37.9	44.2	54.3	58.6	964.11	62.9
12:32:54	37.9	38.3	45.2	54.8	59.1	965.12	63.4
12:33:54	37.6	38.1	45.2	54.5	58.9	966.12	63
12:34:54	38.3	38.6	46	54.9	59.3	964.11	63.5
12:35:54	37.8	38.1	45.8	54.7	59.1	961.09	63.5
12:36:54	38.2	38.5	46.8	55.1	59.4	958.08	63.4
12:37:54	37.6	38.1	46.7	54.9	59.1	968.13	63.1
12:38:54	37.2	37.8	46.7	54.7	58.8	970.14	63.3
12:39:54	37.7	38.3	47.4	55.1	59.3	967.13	63.2
12:40:54	37.4	38.1	47.5	55.1	59.2	965.12	63.2
12:41:54	37.2	38	47.7	55.2	59.3	960.09	63.5
12:42:54	37.3	38	48.1	55.2	59.3	953.05	63.3
12:43:54	37.7	38.3	48.6	55.5	59.6	950.04	63.5
12:44:54	37.6	38.3	49	55.8	59.5	949.03	63.7
12:45:54	37.6	38.4	49.4	55.8	59.9	950.04	63.4
12:46:54	37.1	38.2	49.1	55.6	59.5	952.05	63.4
12:47:54	37.7	38.6	49.7	55.8	59.8	949.03	63.5
12:48:54	38	38.8	50	56	60	944.00	63.6
12:49:54	37.1	38.3	49.8	55.8	59.6	946.01	63.6
12:50:54	36.8	38.1	49.7	55.7	59.4	938.98	62.9
12:51:54	36.7	38.2	49.9	55.8	59.5	943.00	62.8
12:52:54	37.1	38.6	50.4	55.9	59.7	944.00	63.5
12:53:54	37.3	38.8	50.7	56.2	59.9	945.01	63.4
12:54:54	37.1	38.8	50.8	56.2	60	945.01	63.6
12:55:54	37.8	39.5	51.4	56.8	60.3	936.97	63.8
12:56:54	37.8	39.8	51.7	56.9	60.5	945.01	64.1
12:57:54	37.9	39.9	51.8	57	60.4	933.95	64.3
12:58:54	38.1	40.3	52.1	57.2	60.6	933.95	64.3
12:59:54	37.9	40.5	52.2	57.3	60.5	939.98	64.5

13:00:54	37.6	40.4	52.1	57.2	60.4	933.95	63.9
13:01:54	38	40.8	52.3	57.3	60.6	924.90	64.4
13:02:54	37.6	40.8	52.2	57.4	60.5	919.88	64
13:03:54	37.2	40.6	52.1	57.3	60.3	917.86	63.5
13:04:54	37.1	40.8	52.3	57.3	60.3	920.88	63.9
13:05:54	36.9	40.8	52.2	57.3	60.2	921.89	63.5
13:06:54	37.7	41.9	53	57.9	60.7	914.85	64.6
13:07:54	37.8	42.1	53	58.1	61.1	903.79	64.3
13:08:54	37.8	42.3	53	58	61	907.81	64.7
13:09:54	37.3	42.3	52.9	58	60.6	913.84	64
13:10:54	37	42.3	52.8	57.9	60.5	920.88	64.1
13:11:54	37.3	42.7	53.2	58.2	60.7	921.89	64
13:12:54	37.8	43.6	53.8	58.6	61.1	922.89	64.7
13:13:54	37.5	43.6	53.6	58.5	61	930.93	64.4
13:14:54	37.4	43.8	53.5	58.4	60.8	930.93	64.2
13:15:54	36.9	43.8	53.2	58.2	60.6	927.92	64.3
13:16:54	37.8	44.9	54.2	58.8	61.3	921.89	64.8
13:17:54	38.2	45.3	54.3	59	61.5	915.85	65.1
13:18:54	38	45.5	54.2	58.9	61.4	907.81	65.1
13:19:54	37.8	45.8	54.3	59	61.6	891.73	65
13:20:54	37.2	45.5	53.9	58.8	61	850.51	64.9
13:21:54	37	45.6	53.9	58.7	61	847.49	64.3
13:22:54	37.1	46	54	58.8	61.2	867.60	64.4
13:23:54	37.4	46.6	54.4	59	61.3	910.83	64.1
13:24:54	37.8	47.1	54.9	59.4	61.7	909.82	64.9
13:25:54	39	48.3	55.8	59.9	62.4	910.83	65.5
13:26:54	38.9	48.5	55.7	59.9	62.2	904.80	66
13:27:54	38.3	48.3	55.1	59.6	61.8	898.76	65.2
13:28:54	38.3	48.3	55	59.5	61.8	898.76	65.7
13:29:54	38.3	48.6	55.3	59.7	61.8	898.76	65.3
13:30:54	38.3	48.8	55.4	59.8	61.8	891.73	65.7
13:31:54	38.2	48.9	55.3	59.7	61.8	897.76	65.2
13:32:54	37.8	48.7	55	59.5	61.4	900.77	64.9
13:33:54	37.7	48.8	55	59.4	61.5	896.75	64.7
13:34:54	37.8	49	55.2	59.5	61.6	895.75	64.6
13:35:54	38	49.3	55.3	59.6	61.7	890.72	65
13:36:54	37.8	49.3	55.2	59.4	61.5	890.72	64.4
13:37:54	37.7	49.4	55.2	59.4	61.5	892.73	64.6
13:38:54	38.1	49.8	55.5	59.6	61.7	885.69	64.7
13:39:54	39	50.8	56.3	60.3	62.3	887.70	65.4
13:40:54	38.8	50.6	56	60.1	62.1	887.70	65.6
13:41:54	38.9	50.8	56.1	60.1	62.1	883.68	65.5

13:42:54	39.3	51.2	56.5	60.3	62.5	880.67	65.5
13:43:54	40.1	51.8	57.1	60.7	62.8	877.65	66.1
13:44:54	40.1	51.8	57	60.6	62.7	880.67	66.5
13:45:54	40.6	52.1	57.2	60.7	62.9	879.66	66
13:46:54	39.8	51.6	56.7	60.3	62.2	879.66	65.6
13:47:54	39.4	51.3	56.3	60.2	61.9	875.64	65.6
13:48:54	40.1	51.9	57	60.4	62.3	873.63	65.7
13:49:54	40.3	52.1	57	60.5	62.4	868.60	65.7
13:50:54	40.3	52	57.1	60.5	62.3	872.62	65.8
13:51:54	40.6	52.2	57.3	60.6	62.4	870.61	66.1
13:52:54	40.4	52.1	57.1	60.5	62.2	872.62	65.7
13:53:54	40.2	51.8	56.8	60.2	61.8	867.60	65.4
13:54:54	41.6	52.8	57.6	60.9	62.8	860.56	66.5
13:55:54	42.1	53.2	57.9	61.1	63	860.56	66.4
13:56:54	42.2	53.2	58.1	61.1	63.1	849.50	66.3
13:57:54	42.5	53.4	58.1	61.2	63.2	843.47	66.8
13:58:54	42.3	53.2	57.9	61	62.9	836.43	66.2
13:59:54	42.4	53.3	57.9	60.9	62.9	837.44	66.1
14:00:54	43	53.5	58.2	61.1	62.9	841.46	66.4
14:01:54	43.1	53.6	58.1	61	63	837.44	66.5
14:02:54	42.9	53.2	57.9	60.8	62.7	836.43	65.8
14:03:54	42.8	53.1	57.6	60.7	62.6	834.42	65.7
14:04:54	43.8	53.8	58.4	61.2	63.1	831.41	66.3
14:05:54	44.1	54.1	58.7	61.4	63.2	831.41	66.4
14:06:54	44.2	54	58.6	61.3	63	824.37	66.1
14:07:54	44.3	53.9	58.5	61.2	62.9	823.36	66
14:08:54	44.8	54.1	58.6	61.3	62.9	819.34	66.6
14:09:54	44.7	54	58.6	61.3	62.9	820.35	66.2
14:10:54	45.1	54.2	58.8	61.4	63.1	813.31	65.8
14:11:54	45	54	58.5	61.3	62.9	809.29	65.6
14:12:54	44.9	53.8	58.4	61.3	62.6	813.31	65.9
14:13:54	45.5	54.2	58.8	61.4	63	806.27	65.8
14:14:54	45.6	54.2	58.8	61.5	62.9	806.27	65.7
14:15:54	45.7	54.3	58.8	61.4	62.8	808.28	65.8
14:16:54	45.9	54.3	58.7	61.4	63	805.27	66.2
14:17:54	46.2	54.3	58.8	61.5	63	808.28	65.9
14:18:54	46.7	54.5	59	61.6	63.1	183.98	66
14:19:54	46.7	54.5	58.9	61.6	63.1	801.25	66
14:20:54	46.9	54.5	59	61.7	63.1	798.23	65.8
14:21:54	47	54.6	59	61.8	63.2	798.23	66.1
14:22:54	47.3	54.7	59.2	61.8	63.3	776.11	66.6
14:23:54	47.4	54.7	59.3	61.8	63.3	745.95	66.4

14:24:54	47.6	54.9	59.4	61.8	63.3	218.16	66.9
14:25:54	48.3	55.1	59.6	61.9	63.3	790.19	66.2
14:26:54	48.3	55.1	59.5	61.8	63.2	793.20	66.2
14:27:54	48.2	54.9	59.3	61.8	63.2	791.19	66.4
14:28:54	48.9	55.5	59.7	61.9	63.5	783.15	66.2
14:29:54	49	55.5	59.7	62	63.4	785.16	65.9
14:30:54	48.8	55.2	59.5	61.8	63.2	784.16	66.1
14:31:54	48.6	54.9	59.2	61.7	62.8	776.11	65.7
14:32:54	48.6	54.8	58.9	61.5	62.5	772.09	65.5
14:33:54	48.5	54.9	59.2	61.6	62.7	765.05	65.7
14:34:54	48.7	54.8	59	61.5	62.5	763.04	66.1
14:35:54	48.9	54.8	59.1	61.5	62.6	755.00	65.8
14:36:54	49	55	59.2	61.6	62.7	758.02	66.3
14:37:54	49.4	55.3	59.5	61.8	63	749.97	66.1
14:38:54	49.5	55.2	59.5	61.8	62.9	755.00	66.3
14:39:54	50.5	56.1	60.3	62.3	63.5	748.97	67.2
14:40:54	50.7	56.3	60.3	62.4	63.6	748.97	67.1
14:41:54	50.7	56.2	60.3	62.4	63.6	747.96	67.3
14:42:54	50.7	56.2	60.1	62.3	63.6	740.93	67.2
14:43:54	51.1	56.4	60.3	62.4	63.7	737.91	67.4
14:44:54	51.5	56.7	60.6	62.6	63.9	730.87	68
14:45:54	51.4	56.5	60.4	62.5	63.8	729.87	67.4
14:46:54	51.2	56.3	60.3	62.3	63.6	725.85	67.5
14:47:54	51.4	56.5	60.3	62.4	63.8	720.82	67.3
14:48:54	51.8	56.9	60.5	62.7	64	716.80	67.4
14:49:54	51.7	56.9	60.6	62.5	63.8	713.78	67.7
14:50:54	52.1	57.2	60.8	62.7	64.1	711.77	67.4
14:51:54	52.1	57.2	60.8	62.7	64	707.75	67.7
14:52:54	52.2	57.2	60.7	62.7	64	698.70	67.5
14:53:54	52.2	57.2	60.6	62.7	63.9	681.61	67.3
14:54:54	52.4	57.2	60.8	62.8	64.1	669.55	67.8
14:55:54	52.3	57.1	60.6	62.7	64	653.46	67.2
14:56:54	52	56.9	60.4	62.5	63.8	647.43	66.9
14:57:54	51.9	56.8	60.3	62.3	63.7	659.50	67.1
14:58:54	52.3	57.1	60.5	62.5	63.7	643.41	66.6
14:59:54	52.9	57.6	61.1	62.9	64.2	625.31	67.1
15:00:54	53.3	58	61.3	62.9	64.4	633.36	67.2
15:01:54	53.1	57.8	61.1	62.8	64.1	621.29	67
15:02:54	52.8	57.5	60.9	62.6	63.9	619.28	66.4
15:03:54	52.8	57.5	60.8	62.5	63.8	632.35	66.3
15:04:54	52.6	57.2	60.4	62.4	63.5	642.40	66.5
15:05:54	53	57.6	60.9	62.6	63.9	640.39	66.2

15:06:54	52.9	57.6	60.8	62.7	63.9	637.38	66.6
15:07:54	53.1	57.6	60.9	62.7	64	637.38	66.4
15:08:54	53.3	57.8	61	62.8	64	633.36	67.1
15:09:54	53.1	57.8	61	62.8	64	633.36	66.7
15:10:54	53.6	58.2	61.3	62.9	64.1	634.36	66.9
15:11:54	53.5	58.1	61.3	62.8	64.1	631.35	67.3
15:12:54	53.5	58.1	61.1	62.7	63.9	626.32	66.7
15:13:54	53.6	58.1	61.2	62.8	63.9	617.27	66.9
15:14:54	54	58.4	61.4	62.9	64.1	613.25	67.2
15:15:54	53.7	58.2	61.2	62.8	63.8	609.23	66.6
15:16:54	53.1	57.6	60.9	62.5	63.5	609.23	66.7
15:17:54	53.9	58.2	61.3	62.7	63.8	605.21	66.7
15:18:54	54	58.3	61.5	62.9	64	598.17	67.1
15:19:54	53.9	58.1	61.3	62.8	63.7	599.18	66.6
15:20:54	53.4	57.9	60.9	62.6	63.4	591.13	66.5
15:21:54	53.2	57.6	60.7	62.2	63.2	583.09	65.8
15:22:54	53.5	57.9	60.9	62.4	63.4	580.07	66.1
15:23:54	54.2	58.5	61.6	62.9	63.9	574.04	66.5
15:24:54	54.3	58.6	61.6	62.9	64	570.02	66.3
15:25:54	54.1	58.4	61.4	62.8	63.7	567.01	66.6
15:26:54	54	58.4	61.3	62.7	63.6	561.98	66
15:27:54	54.1	58.4	61.3	62.7	63.6	555.95	66.4
15:28:54	54.2	58.5	61.4	62.7	63.7	550.92	66
15:29:54	54.1	58.5	61.4	62.8	63.7	546.90	66.3
15:30:54	54.5	58.7	61.6	62.8	63.8	543.88	66.1
15:31:54	54.3	58.6	61.5	62.8	63.8	539.86	66.4
15:32:54	55.1	59.2	62	63.2	64.1	533.83	66.3
15:33:54	54.9	59	61.8	63	64	529.81	66.1
15:34:54	54.8	58.8	61.8	62.9	63.9	524.78	66.4
15:35:54	55.1	59	61.8	63	63.9	518.75	66.1
15:36:54	54.7	58.8	61.7	62.9	63.6	519.75	65.7
15:37:54	54.8	58.8	61.7	62.9	63.6	513.72	65.7
15:38:54	54.4	58.6	61.5	62.7	63.4	506.69	65.8
15:39:54	54.7	58.8	61.6	62.8	63.5	503.67	65.4
15:40:54	55.3	59.2	61.9	63.1	63.7	496.63	65.8
15:41:54	55	59	61.8	63	63.6	493.62	65.9
15:42:54	55.4	59.2	61.9	63	63.7	471.50	65.5
15:43:54	55.1	59	61.7	63.1	63.6	332.76	65.6
15:44:54	55	58.8	61.6	62.9	63.4	199.05	65.1
15:45:54	55.1	58.9	61.7	62.9	63.4	179.95	65.3
15:46:54	55.2	59.1	61.9	63.2	63.5	173.92	64.7
15:47:54	55.2	59.1	61.9	63.1	63.3	170.91	64.4

15:48:54	54.9	58.8	61.6	62.9	63.3	168.90	63.1
15:49:54	55.1	58.8	61.7	62.8	63.3	166.88	62.6
15:50:54	55.5	59.2	61.8	63.1	63.3	164.87	62.4
15:51:54	55.3	59.1	61.7	63.1	63.3	163.87	61.4
15:52:54	55.2	59.1	61.8	63.1	63.2	160.85	61.2
15:53:54	54.9	58.8	61.5	62.7	63.1	160.85	59.9
15:54:54	54.8	58.6	61.3	62.6	62.8	158.84	58.3
15:55:54	54.6	58.5	61.2	62.6	62.8	158.84	58.2
15:56:54	54.7	58.5	61.3	62.6	62.8	155.83	58.4
15:57:54	54.7	58.6	61.4	62.6	62.9	155.83	58.1
15:58:54	54.7	58.6	61.3	62.6	62.8	154.82	58.3
15:59:54	55.2	58.8	61.8	63	63.2	153.82	57.9
16:00:54	54.7	58.6	61.4	62.6	62.8	155.83	57.9
16:01:54	54.5	58.4	61.2	62.5	62.7	155.83	57.1
16:02:54	54.7	58.7	61.5	62.7	62.9	154.82	57.5
16:03:54	55.2	59	61.7	62.8	63.2	154.82	57.2
16:04:54	55.2	58.9	61.6	62.7	63.1	152.81	57.5
16:05:54	55.1	58.8	61.6	62.7	63	151.80	57.6
16:06:54	54.7	58.5	61.3	62.5	62.8	148.79	57.8
16:07:54	54.6	58.4	61.1	62.5	62.7	146.78	57.8
16:08:54	54.7	58.4	61.2	62.4	62.8	146.78	58
16:09:54	54.8	58.8	61.4	62.8	62.9	145.77	58.3
16:10:54	54.9	58.8	61.6	62.8	63	144.77	59
16:11:54	55.2	58.8	61.6	62.7	63.1	142.76	58.8
16:12:54	55.1	58.8	61.5	62.7	63	140.75	59.1
16:13:54	55.1	58.8	61.7	62.8	63	140.75	59
16:14:54	54.8	58.8	61.4	62.7	62.9	138.74	59.6
16:15:54	54.8	58.6	61.2	62.5	62.8	138.74	59.4

ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิน้ำร้อนภายในถังโดยใช้ตัวเก็บรังสีดวงอาทิตย์หลอดแก้วสุญญากาศ

Time	L1 (°C)	L2 (°C)	L3 (°C)	L4 (°C)	L5 (°C)	Irr (W/m ²)	Tout (°C)
9:04:54	30.5	30.6	30.6	30.5	30.5	281.49	35.7
9:05:54	30.4	30.6	30.6	30.5	30.5	279.48	36.2
9:06:54	30.6	30.7	30.6	30.5	30.5	285.51	36.1
9:07:54	30.6	30.7	30.6	30.6	30.6	300.59	36.1
9:08:54	30.4	30.6	30.5	30.5	30.5	362.92	36.1
9:09:54	30.6	30.7	30.6	30.6	30.6	364.93	36.2
9:10:54	30.4	30.6	30.6	30.6	30.5	347.84	36.4
9:11:54	30.5	30.7	30.8	30.7	30.7	295.57	36.6
9:12:54	30.5	30.7	30.7	30.6	30.6	310.65	36.7
9:13:54	30.6	30.8	30.8	30.7	30.7	300.59	36.7
9:14:54	30.9	31.1	31.1	31	31.1	316.68	37
9:15:54	30.7	30.8	30.7	30.7	30.7	333.77	37
9:16:54	30.6	30.8	30.7	30.7	30.7	313.66	37.2
9:17:54	30.4	30.5	30.5	30.5	30.5	312.66	37.3
9:18:54	30.6	30.8	30.8	30.7	30.8	317.68	37.5
9:19:54	30.7	30.8	30.8	30.7	30.8	329.75	37.7
9:20:54	30.7	30.8	30.9	30.8	30.9	389.06	37.8
9:21:54	30.6	30.8	30.8	30.8	30.9	445.36	37.8
9:22:54	30.7	30.9	31	30.9	31	474.51	37.8
9:23:54	30.6	30.7	30.9	30.9	30.9	483.56	37.9
9:24:54	30.7	30.9	31	31	31	445.36	38
9:25:54	30.6	30.8	30.9	30.9	30.9	469.49	38.1
9:26:54	30.2	30.5	30.7	30.7	30.7	508.70	38.3
9:27:54	30.2	30.6	30.9	30.9	30.7	522.77	38.6
9:28:54	30.5	30.7	30.9	30.9	30.9	495.63	38.7
9:29:54	30.5	30.8	31.1	31.1	31.1	397.10	38.9
9:30:54	30.8	31	31.2	31.2	31.2	423.24	39
9:31:54	30.8	31	31.2	31.1	31.2	347.84	39
9:32:54	30.9	31.1	31.3	31.3	31.3	352.87	39.3
9:33:54	30.6	30.8	31.1	31.1	31.1	356.89	39.8
9:34:54	30.7	30.9	31.2	31.1	31.2	466.47	39.4
9:35:54	31	31.1	31.4	31.3	31.4	468.48	40.1
9:36:54	30.7	31	31.3	31.3	31.3	489.59	39.6
9:37:54	30.8	31.1	31.4	31.4	31.4	408.16	40.2
9:38:54	30.9	31.1	31.4	31.4	31.5	427.26	39.9
9:39:54	30.9	31	31.3	31.4	31.5	447.37	40.3
9:40:54	30.6	30.8	31.3	31.3	31.3	421.23	40.3
9:41:54	30.4	30.8	31.3	31.3	31.2	457.42	40.8

9:42:54	30.6	30.9	31.5	31.5	31.5	465.47	40.9
9:43:54	30.7	30.9	31.4	31.5	31.5	436.31	40.6
9:44:54	30.8	31	31.5	31.5	31.5	437.32	40.6
9:45:54	30.8	31	31.6	31.6	31.6	532.82	40.9
9:46:54	30.7	30.8	31.4	31.5	31.5	449.38	41.2
9:47:54	30.8	31	31.6	31.7	31.7	506.69	41.3
9:48:54	31.1	31.3	31.7	31.7	31.9	457.42	41.3
9:49:54	31	31.3	31.8	31.8	31.8	435.31	41.4
9:50:54	30.6	30.9	31.6	31.6	31.6	436.31	41.5
9:51:54	30.4	30.8	31.6	31.6	31.5	423.24	42.1
9:52:54	30.5	30.7	31.6	31.6	31.7	403.14	41.8
9:53:54	30.6	30.9	31.7	31.7	31.8	522.77	41.9
9:54:54	30.4	30.6	31.6	31.6	31.6	630.34	41.8
9:55:54	30.1	30.4	31.3	31.4	31.4	688.65	42.2
9:56:54	30.3	30.6	31.5	31.7	31.7	687.64	42.6
9:57:54	30.4	30.8	31.7	31.8	31.8	686.64	42.8
9:58:54	30.3	30.6	31.7	31.7	31.7	673.57	42.8
9:59:54	30.5	30.8	32	31.8	31.9	709.76	42.9
10:00:54	31.1	31.3	32.4	32.4	32.5	710.77	43.2
10:01:54	31	31.2	32.3	32.2	32.4	719.82	43.4
10:02:54	30.9	31.2	32.2	32.2	32.3	725.85	43.7
10:03:54	30.9	31.2	32.3	32.3	32.4	734.89	43.8
10:04:54	31.1	31.2	32.4	32.4	32.4	744.95	43.7
10:05:54	30.8	31.1	32.4	32.4	32.4	752.99	43.9
10:06:54	30.9	31.2	32.4	32.4	32.5	754.00	44.5
10:07:54	30.8	31.2	32.4	32.4	32.4	759.02	44.7
10:08:54	30.8	31.2	32.5	32.6	32.6	762.04	44.5
10:09:54	30.7	31	32.4	32.4	32.4	760.03	44.9
10:10:54	30.8	31.1	32.6	32.6	32.6	763.04	45.3
10:11:54	30.8	31.2	32.5	32.6	32.7	764.05	45.1
10:12:54	30.9	31.1	32.7	32.7	32.8	760.03	45.2
10:13:54	30.8	31.1	32.6	32.8	32.8	780.13	45.3
10:14:54	30.9	31.2	32.7	32.9	33	790.19	45.6
10:15:54	31	31.3	33	33	33.1	793.20	45.8
10:16:54	30.7	31.1	33	33	32.9	793.20	46.3
10:17:54	30.6	31.2	33	33	33	790.19	46.7
10:18:54	30.9	31.2	33	33.1	33.1	791.19	46.7
10:19:54	30.5	31	33	33.1	33	803.26	46.8
10:20:54	30.5	31	33	33.1	33.1	802.25	47.4
10:21:54	30.9	31.3	33.2	33.3	33.4	807.28	47.1
10:22:54	31.3	31.5	33.6	33.6	33.8	803.26	47.7
10:23:54	31.5	31.7	33.8	33.8	34	795.21	47.7

10:24:54	31.3	31.7	33.8	33.8	33.9	803.26	47.5
10:25:54	31.7	31.7	33.8	33.9	34.1	813.31	48
10:26:54	31.1	31.5	33.6	33.7	33.8	819.34	47.8
10:27:54	30.9	31.3	33.5	33.7	33.7	832.41	47.7
10:28:54	30.3	30.7	33	33.3	33.3	828.39	48.1
10:29:54	30.5	31	33.3	33.5	33.6	829.40	47.8
10:30:54	30.7	31.3	33.7	33.8	33.8	807.28	48.5
10:31:54	31	31.7	34.1	34.1	34.2	807.28	48.6
10:32:54	31.3	31.8	34.4	34.5	34.6	828.39	49
10:33:54	30.9	31.6	34.1	34.2	34.3	845.48	49.1
10:34:54	31.1	31.6	34.3	34.4	34.5	846.49	49.1
10:35:54	30.9	31.6	34.3	34.4	34.4	848.50	49.3
10:36:54	30.8	31.6	34.3	34.3	34.4	839.45	49.5
10:37:54	30.8	31.5	34.2	34.3	34.4	849.50	49.7
10:38:54	30.9	31.7	34.3	34.5	34.6	860.56	49.9
10:39:54	31.1	31.9	34.8	34.9	35	869.61	50.5
10:40:54	31.2	31.8	34.8	34.9	34.8	876.65	50.1
10:41:54	30.8	31.7	34.6	34.8	34.9	871.62	50.1
10:42:54	31.1	32	35	35	35.1	886.70	50.8
10:43:54	30.7	31.7	34.7	34.9	35	885.69	50.8
10:44:54	31.1	31.9	35	35	35.2	862.57	50.9
10:45:54	31.1	32.2	35.2	35.2	35.3	878.66	51.6
10:46:54	31	32.1	35.1	35.2	35.2	897.76	51.4
10:47:54	30.7	31.7	35	35	35.1	893.74	51.2
10:48:54	31.7	32.8	35.7	35.7	35.9	891.73	52.1
10:49:54	31.4	32.5	35.6	35.6	35.7	897.76	51.8
10:50:54	31.3	32.6	35.7	35.7	36	909.82	51.8
10:51:54	31.4	32.6	35.7	35.8	36.1	909.82	52.1
10:52:54	31.2	32.6	35.7	36	36.1	910.83	52.5
10:53:54	31.3	32.7	35.8	35.9	36.1	917.86	52.2
10:54:54	31	32.5	35.8	35.9	36	915.85	52.3
10:55:54	30.7	32.4	35.8	35.9	35.9	909.82	52.6
10:56:54	30.7	32.4	35.8	36	35.9	911.83	53.3
10:57:54	31	32.7	36.3	36.2	36.3	909.82	53.2
10:58:54	31.2	33.1	36.5	36.6	36.8	912.84	53.1
10:59:54	30.9	32.8	36.3	36.6	36.7	917.86	53.2
11:00:54	31	33	36.5	36.6	36.8	923.90	53.7
11:01:54	30.6	32.8	36.4	36.7	36.4	929.93	53.5
11:02:54	31	33.1	36.8	36.8	36.9	929.93	53.9
11:03:54	31.3	33.4	37.1	37	37.2	930.93	54.2
11:04:54	31.5	33.6	37.3	37.3	37.5	932.94	53.9
11:05:54	31.3	33.5	37.1	37.2	37.4	934.96	54

11:06:54	31	33.3	36.9	37.2	37.4	941.99	54.1
11:07:54	31	33.4	37.1	37.3	37.4	933.95	54
11:08:54	31	33.5	37.1	37.5	37.3	934.96	54.3
11:09:54	31.1	33.6	37.4	37.5	37.5	932.94	54.2
11:10:54	31.4	34	37.7	37.8	38	945.01	54.6
11:11:54	31.6	34.3	38.1	38.1	38.2	938.98	54.6
11:12:54	31.2	34	37.7	37.9	38.2	940.99	54.6
11:13:54	31.3	34.1	37.9	38	38.2	945.01	55.2
11:14:54	31.3	34.2	38.2	38.2	38.3	944.00	54.8
11:15:54	31.5	34.5	38.2	38.3	38.4	936.97	55
11:16:54	31.6	34.6	38.6	38.4	38.6	947.02	55.3
11:17:54	31.5	34.7	38.5	38.6	38.6	946.01	55.7
11:18:54	31.7	34.8	38.4	38.5	38.6	960.09	55.3
11:19:54	31.7	34.9	38.6	38.6	38.8	969.14	55.3
11:20:54	31.7	35	38.8	38.8	38.9	970.14	55.4
11:21:54	31	34.7	38.4	38.6	38.6	959.08	55.4
11:22:54	31.4	34.9	38.7	38.8	38.9	967.13	55.8
11:23:54	31.3	35	38.7	39	39	983.21	56
11:24:54	31.1	34.9	38.7	38.8	38.9	982.21	55.6
11:25:54	31.1	35	39	39	39.1	971.15	56.1
11:26:54	31.7	35.4	39.3	39.3	39.5	977.18	56
11:27:54	31	35	38.8	39.1	39.1	975.17	56.5
11:28:54	30.9	35.2	39	39.3	39.3	981.20	56.2
11:29:54	31.7	35.9	39.7	39.7	39.9	985.22	56.9
11:30:54	31.7	36	39.9	40	40.1	992.26	56.6
11:31:54	32	36.3	40.1	40	40.3	1002.31	56.7
11:32:54	31.9	36.2	40	40.1	40.3	1001.31	56.8
11:33:54	31.3	35.7	39.5	39.9	39.9	1001.31	56.6
11:34:54	31.2	35.9	39.8	39.9	40	999.30	57
11:35:54	30.9	35.6	39.6	39.7	39.8	1006.33	56.6
11:36:54	30.8	35.7	39.6	39.9	39.8	1005.33	56.9
11:37:54	31.6	36.4	40.5	40.4	40.6	1012.37	57
11:38:54	32.6	37.2	41	40.9	41.3	1011.36	57.7
11:39:54	32.2	37	40.7	40.8	41	1013.37	57.5
11:40:54	31.7	36.5	40.6	40.7	40.7	1015.38	57.2
11:41:54	32	37	40.8	40.8	40.8	1019.40	57.8
11:42:54	32.3	37.2	41	41.1	41.3	1026.44	57.7
11:43:54	31.7	37	40.9	40.8	40.9	1027.45	58.1
11:44:54	31.7	37	40.9	40.9	40.8	1016.39	58.1
11:45:54	31.7	37.1	41	41.1	41.2	1009.35	58.6
11:46:54	32.4	37.8	41.4	41.4	41.6	1000.30	58.6
11:47:54	32.6	38	41.5	41.4	42.3	1005.33	58.3

11:48:54	32.6	38	41.3	41.3	42.9	1013.37	58.3
11:49:54	32.7	38.1	41.4	41.3	43.9	1023.42	58.3
11:50:54	32.3	38	41.1	41.1	44.2	1034.48	58.6
11:51:54	32.3	38	41	41.2	45.1	1027.45	58.4
11:52:54	32.9	38.5	41.4	41.4	46.4	1037.50	58.4
11:53:54	33	38.6	41.4	41.4	47	1042.53	58.2
11:54:54	33.3	39	41.5	41.5	47.9	1042.53	58.6
11:55:54	33.1	39	41.5	41.5	48.4	1041.52	58.7
11:56:54	33.4	39	41.4	41.4	48.8	1042.53	58.2
11:57:54	33.6	39.3	41.4	41.5	49.5	1051.57	58.2
11:58:54	33.5	39.2	41.4	41.4	49.8	1041.52	58.4
11:59:54	33.5	39.3	41.2	41.3	50.1	1039.51	58.4
12:00:54	33.4	39.4	41.2	41.3	50.5	1044.54	58.3
12:01:54	33.5	39.6	41.3	41.2	51.2	1045.54	58.2
12:02:54	33.7	39.8	41.4	41.4	51.4	1043.53	58.5
12:03:54	33.6	39.7	41.1	41.3	51.6	1052.58	58.6
12:04:54	34.3	40.2	41.4	41.5	52.2	1053.58	58.3
12:05:54	34.3	40.2	41.3	41.3	52.3	1055.59	58.3
12:06:54	34.3	40.2	41.2	41.3	52.6	1053.58	58.5
12:07:54	33.8	39.8	40.8	40.9	52.4	1055.59	58.2
12:08:54	33.8	39.8	40.8	40.9	52.6	1055.59	57.9
12:09:54	34.4	40.3	41.1	41.2	53.1	1041.52	58.1
12:10:54	34.8	40.7	41.4	41.4	53.7	1017.39	58.7
12:11:54	34.7	40.4	41	41.2	53.6	1025.43	58.1
12:12:54	34.5	40.2	40.8	41.1	53.4	1027.45	58.1
12:13:54	34.7	40.3	40.8	41.1	53.6	1026.44	58.2
12:14:54	34.9	40.4	40.9	41.1	53.8	1036.49	58.3
12:15:54	34.9	40.3	40.8	41	53.8	1045.54	57.8
12:16:54	34.9	40.1	40.7	40.9	53.6	1059.62	57.8
12:17:54	35	40.2	40.6	40.9	53.8	1067.66	58
12:18:54	35.3	40.4	40.8	41	54.2	1069.67	58.1
12:19:54	35.4	40.3	40.7	41	54.3	1074.70	58
12:20:54	35.7	40.5	40.8	41.2	54.3	1070.67	58
12:21:54	35.8	40.6	40.8	41.2	54.4	1071.68	58.4
12:22:54	36	40.6	40.8	41.4	54.4	1088.77	58.3
12:23:54	35.8	40.3	40.7	41.4	54.4	1096.81	58.4
12:24:54	35.9	40.3	40.8	41.6	54.6	1089.78	58.1
12:25:54	36.7	41	41.4	42.5	55.4	1073.69	58.6
12:26:54	37.1	41.3	41.5	43	55.6	1068.66	59.3
12:27:54	37.1	41.1	41.4	43.2	55.7	1070.67	59.1
12:28:54	37.1	41	41.3	43.5	55.6	1073.69	59.1
12:29:54	37.7	41.4	41.7	44.2	56	1077.71	59.2

12:30:54	37.6	41.2	41.5	44.6	55.8	1077.71	59.7
12:31:54	37.7	41.1	41.3	45	55.9	1072.69	59.2
12:32:54	37.9	41.3	41.6	45.4	56.1	1068.66	59.5
12:33:54	38.7	42	42.3	46.4	56.7	1070.67	60
12:34:54	38.3	41.4	41.6	46.6	56.3	1067.66	59.4
12:35:54	38.5	41.7	42	47.1	56.5	1067.66	60.3
12:36:54	38.3	41.2	41.4	47.4	56.1	1065.65	59.6
12:37:54	38.2	41	41.2	47.7	56	1069.67	59.7
12:38:54	38.1	40.9	41.1	48.1	56	1065.65	59.6
12:39:54	38.3	40.8	40.9	48.3	55.8	1062.63	59.4
12:40:54	38.2	40.7	40.8	48.6	55.8	1054.59	59.7
12:41:54	39.2	41.4	41.7	49.7	56.6	1053.58	59.8
12:42:54	39	41.2	41.4	49.9	56.6	1053.58	59.9
12:43:54	39.1	41.2	41.4	50.2	56.6	1058.61	60.1
12:44:54	39.1	41.1	41.2	50.5	56.5	1054.59	59.8
12:45:54	38.9	40.9	41	50.8	56.3	1048.56	60.2
12:46:54	38.9	40.9	41.1	51.2	56.4	1045.54	60
12:47:54	39.2	40.8	41.1	51.4	56.4	1041.52	60.4
12:48:54	39.3	40.8	41	51.6	56.4	1046.55	60
12:49:54	39.2	40.7	40.8	51.8	56.4	1041.52	60.2
12:50:54	39.5	40.8	41	52.2	56.4	1044.54	60.1
12:51:54	39.7	40.9	41.2	52.4	56.7	1035.49	60.1
12:52:54	39.7	40.9	41.2	52.8	56.6	1037.50	60.6
12:53:54	39.7	40.8	41.2	53	56.9	1036.49	60.6
12:54:54	40.3	41.3	41.7	53.5	57.4	1038.50	60.9
12:55:54	41.4	42.3	42.7	54.4	58.2	1039.51	61.8
12:56:54	41.8	42.6	42.9	54.7	58.5	1043.53	61.5
12:57:54	41.2	42	42.3	54.4	58	1042.53	61.4
12:58:54	40.6	41.4	41.8	54.3	57.6	1046.55	61.3
12:59:54	40.6	41.3	41.6	54.3	57.4	1050.57	61.1
13:00:54	40.5	41	41.5	54.3	57.3	1059.62	61.2
13:01:54	40.8	41.5	42	54.6	57.8	1062.63	61.3
13:02:54	40.4	41	41.7	54.6	57.4	1053.58	61.3
13:03:54	41.2	41.7	42.5	55.2	58.2	1044.54	62.2
13:04:54	41.3	42	42.8	55.5	58.6	1046.55	61.9
13:05:54	40.9	41.6	42.4	55.4	58.2	1054.59	61.7
13:06:54	40.7	41.2	42.3	55.2	57.8	1058.61	62
13:07:54	40.6	41	42.1	55	57.7	1045.54	61.6
13:08:54	40.5	41	42.3	55	57.7	1046.55	61.7
13:09:54	40.8	41.2	42.7	55.2	57.9	1039.51	62
13:10:54	41	41.5	43.2	55.7	58.3	1036.49	62.1
13:11:54	41.4	41.8	43.7	55.8	58.6	1049.56	62.8

13:12:54	41.4	42	44	56.1	59	1035.49	62.5
13:13:54	41	41.5	43.8	56	58.7	1035.49	62.8
13:14:54	40.8	41.2	43.9	55.8	58.5	1035.49	62.3
13:15:54	40.6	41	44	55.7	58.3	1038.50	62.7
13:16:54	41.1	41.5	44.9	56	58.8	1030.46	62.8
13:17:54	40.8	41.2	44.9	56	58.6	1023.42	63.1
13:18:54	40.6	41	45	55.8	58.5	1023.42	62.6
13:19:54	40.5	40.9	45.3	55.8	58.7	1032.47	63.3
13:20:54	40.9	41.4	46.2	56.3	59.1	1035.49	63.1
13:21:54	40.8	41.3	46.5	56.3	59	1041.52	63.8
13:22:54	42.3	42.5	48	57.3	60.3	1036.49	64
13:23:54	42.3	42.4	48.3	57.3	60.3	1034.48	64
13:24:54	41.9	42.3	48.4	57.2	60.2	1034.48	64.3
13:25:54	41.4	41.7	48.3	56.9	59.6	1029.46	63.6
13:26:54	41	41.5	48.4	56.8	59.5	1035.49	63.7
13:27:54	41	41.3	48.6	56.7	59.5	1033.48	63.5
13:28:54	40.9	41.2	48.9	56.6	59.3	1032.47	63.5
13:29:54	40.8	41.2	49.3	56.7	59.5	1034.48	64
13:30:54	41.1	41.3	49.8	56.9	59.7	1031.47	64
13:31:54	41.7	41.9	50.7	57.3	60.3	1029.46	64.3
13:32:54	41.8	42	51.2	57.3	60.6	1022.42	64.9
13:33:54	42.8	42.9	52.2	58.1	61.3	1024.43	65.1
13:34:54	42.2	42.3	51.9	57.7	60.9	1028.45	64.8
13:35:54	42.6	43	52.7	58.2	61.4	1023.42	65.2
13:36:54	42.1	42.3	52.3	57.7	60.8	1025.43	65.1
13:37:54	42.6	42.7	53	58.2	61.4	1026.44	65.1
13:38:54	42.3	42.5	53.1	58.1	61.2	1017.39	65.1
13:39:54	42.1	42.3	53	58	61	1013.37	65.5
13:40:54	41.6	42.1	52.9	57.7	60.7	1014.38	64.8
13:41:54	41.3	41.8	53	57.4	60.4	1018.40	64.9
13:42:54	41.2	41.7	53.1	57.6	60.8	1016.39	65.4
13:43:54	40.9	41.7	53.2	57.6	60.7	1017.39	65
13:44:54	40.9	41.8	53.4	57.6	60.8	1015.38	65.4
13:45:54	40.8	41.8	53.8	57.7	60.9	1014.38	65.5
13:46:54	40.8	41.6	53.8	57.7	61	1001.31	65.7
13:47:54	41.1	41.9	54.1	58	61.4	997.29	65.7
13:48:54	40.8	42	54.3	58.1	61.4	1006.33	66
13:49:54	40.8	42	54.3	58	61.4	1000.30	65.8
13:50:54	40.8	41.8	54.3	58	61.3	996.28	66
13:51:54	40.8	41.9	54.3	57.9	61.3	997.29	65.5
13:52:54	40.7	42.1	54.4	57.9	61.4	1009.35	66.1
13:53:54	41.1	42.5	54.9	58.3	61.8	1001.31	65.8

13:54:54	41.9	43.5	55.6	58.8	62.5	1001.31	66.6
13:55:54	41.6	43.4	55.4	58.8	62.2	955.06	66.1
13:56:54	41.5	43.5	55.5	58.8	62.1	959.08	66.5
13:57:54	41.5	43.7	55.7	58.8	62.3	962.10	66.1
13:58:54	41.9	44.2	56	59	62.8	953.05	66.4
13:59:54	41.5	44.2	55.9	59.1	62.7	963.10	66.7
14:00:54	41.2	44.1	55.8	58.9	62.3	962.10	66.4
14:01:54	41	44.3	55.8	58.8	62.3	971.15	66.4
14:02:54	41	44.5	55.7	58.9	62.2	976.17	66.5
14:03:54	41	44.9	55.8	58.9	62.3	962.10	66.7
14:04:54	40.8	45	55.6	58.9	62.3	958.08	66.2
14:05:54	40.8	45.1	55.6	58.8	62.1	952.05	66.1
14:06:54	41	45.7	55.8	59.1	62.5	956.07	66.4
14:07:54	40.9	45.9	56	59.2	62.4	955.06	66.8
14:08:54	41.5	46.8	56.7	59.7	63.2	943.00	67
14:09:54	41.2	46.9	56.5	59.7	63	952.05	66.8
14:10:54	41.2	47.3	56.6	59.9	63.3	954.06	66.9
14:11:54	41.6	47.7	56.8	59.9	63.3	953.05	67.1
14:12:54	42.2	48.6	57.3	60.3	63.8	961.09	67.6
14:13:54	42.4	49.3	57.7	60.6	64.2	961.09	67.7
14:14:54	42.5	49.5	57.5	60.7	64.2	956.07	67.5
14:15:54	42.3	49.6	57.4	60.6	64.1	940.99	67.4
14:16:54	42	49.7	57.2	60.4	63.7	950.04	67.7
14:17:54	41.5	49.7	57	60.3	63.6	939.98	67.7
14:18:54	41.2	49.7	56.9	60.2	63.3	935.96	67.2
14:19:54	41.2	49.9	56.9	60.3	63.4	932.94	67.4
14:20:54	41.1	50	56.9	60.3	63.3	927.92	67.3
14:21:54	41.1	50.3	56.8	60.2	63.3	933.95	67.4
14:22:54	40.9	50.4	56.8	60.2	63.2	920.88	67.6
14:23:54	41	50.8	56.8	60.3	63.3	921.89	67.2
14:24:54	40.8	51	56.8	60.3	63.3	920.88	67.1
14:25:54	41.1	51.3	57	60.4	63.4	906.81	67.2
14:26:54	41.4	51.8	57.4	60.7	63.9	899.77	67.9
14:27:54	42.1	52.7	57.9	61.2	64.5	903.79	68.3
14:28:54	42.5	53	58.4	61.5	64.8	910.83	68.3
14:29:54	42.4	53.3	58.4	61.7	64.8	895.75	68.5
14:30:54	42.2	53.2	58.1	61.5	64.8	893.74	68.6
14:31:54	41.9	53.2	58	61.5	64.5	891.73	68.3
14:32:54	41.7	53.2	57.7	61.4	64.3	893.74	68.2
14:33:54	41.9	53.4	57.9	61.5	64.4	881.67	68.6
14:34:54	41.7	53.3	57.7	61.2	64.2	870.61	68.2
14:35:54	41.6	53.5	57.9	61.4	64.3	865.59	68.3

14:36:54	41.9	53.8	58.1	61.6	64.4	856.54	68.6
14:37:54	42.2	54.3	58.6	61.9	64.7	853.52	69.5
14:38:54	42.3	54.3	58.5	61.9	64.6	847.49	69.1
14:39:54	42.2	54.3	58.5	61.8	64.5	852.52	69
14:40:54	42.3	54.3	58.5	61.9	64.6	850.51	69.4
14:41:54	43.2	55	58.9	62.4	65.2	843.47	69.2
14:42:54	43.1	54.9	58.9	62.4	64.9	841.46	69.2
14:43:54	43	54.8	58.7	62.3	64.8	831.41	69.4
14:44:54	42.9	54.7	58.5	62.2	64.8	821.35	68.7
14:45:54	43.1	54.8	58.5	62.3	64.7	817.33	69
14:46:54	43	54.5	58.3	62	64.5	811.30	68.4
14:47:54	42.9	54.5	58.1	62	64.5	801.25	68.7
14:48:54	43.1	54.6	58.2	62.1	64.4	794.21	68.4
14:49:54	43.2	54.7	58.3	62.1	64.5	795.21	68.7
14:50:54	43.5	54.8	58.3	62.2	64.5	800.24	68.3
14:51:54	43.8	54.9	58.5	62.3	64.7	801.25	68.3
14:52:54	43.7	54.9	58.4	62.2	64.6	797.23	68.3
14:53:54	44	55.3	58.8	62.5	64.8	798.23	68.8
14:54:54	44.2	55.3	58.9	62.6	64.9	794.21	69.2
14:55:54	44.8	55.6	59.3	62.9	65.2	791.19	69.3
14:56:54	45.9	56.3	59.8	63.3	65.9	784.16	69.7
14:57:54	45.8	56.1	59.7	63.4	65.7	774.10	69.8
14:58:54	45.9	56.2	59.8	63.3	65.6	769.08	69.8
14:59:54	45.9	56.1	59.7	63.3	65.5	770.08	69.9
15:00:54	46.6	56.3	59.8	63.4	65.9	770.08	69.8
15:01:54	46.4	55.9	59.5	63.2	65.4	772.09	69.7
15:02:54	46.7	56.1	59.7	63.3	65.5	770.08	69.5
15:03:54	46.9	56.3	60	63.5	65.8	757.01	70.3
15:04:54	47.1	56.3	60	63.5	65.7	756.01	69.8
15:05:54	47.4	56.4	60.1	63.6	65.7	748.97	70.6
15:06:54	47.6	56.5	60.2	63.7	65.7	747.96	70.2
15:07:54	47.8	56.5	60.1	63.7	65.7	744.95	70.2
15:08:54	48	56.5	60.1	63.7	65.8	749.97	70.7
15:09:54	48.2	56.4	60	63.7	65.8	754.00	70.4
15:10:54	48.6	56.6	60.3	63.8	66.1	748.97	70.2
15:11:54	48.6	56.4	60	63.7	65.9	732.88	70.2
15:12:54	48.8	56.4	60	63.6	65.8	722.83	70
15:13:54	48.9	56.3	60.1	63.6	65.8	717.80	70
15:14:54	49.1	56.3	59.9	63.5	65.8	712.78	70.3
15:15:54	49.3	56.5	60	63.6	65.8	713.78	70.3
15:16:54	49.5	56.4	60.1	63.5	65.8	702.72	70
15:17:54	49.9	56.5	60.1	63.7	65.8	694.68	69.9

15:18:54	50.2	56.8	60.3	63.8	66	689.66	70
15:19:54	50.5	56.7	60.3	63.8	66	682.62	70
15:20:54	50.6	56.6	60.3	63.6	65.8	681.61	69.8
15:21:54	50.8	56.6	60.3	63.7	65.8	675.58	70
15:22:54	51.5	57.2	60.8	64.1	66.3	678.60	70.3
15:23:54	51.7	57.3	60.9	64.3	66.4	678.60	71.1
15:24:54	52	57.5	61.1	64.5	66.7	676.59	70.7
15:25:54	51.9	57.3	60.9	64.2	66.4	671.56	70.6
15:26:54	52.3	57.6	61.3	64.5	66.7	669.55	71
15:27:54	52.8	57.9	61.6	64.7	67	663.52	71.4
15:28:54	52.9	57.9	61.6	64.7	67	659.50	70.9
15:29:54	52.9	57.9	61.5	64.7	66.9	655.47	71
15:30:54	53.5	58.2	61.9	64.9	67.2	651.45	71.5
15:31:54	53.6	58.3	61.9	64.9	67.3	648.44	71.1
15:32:54	53.4	58.1	61.8	64.9	67.1	645.42	71.3
15:33:54	53.4	58.1	61.8	64.8	67.1	640.39	71.6
15:34:54	53.7	58.2	61.9	64.9	67.2	639.39	71.4
15:35:54	53.9	58.2	62	64.9	67.2	636.37	71.7
15:36:54	53.5	58	61.8	64.8	67	630.34	72.2
15:37:54	53.7	58.1	61.9	64.8	67.1	621.29	71.9
15:38:54	53.8	58.1	61.9	64.8	67.1	612.24	72.2
15:39:54	53.8	58	61.8	64.8	67.1	609.23	72.2
15:40:54	54	58.2	62.1	64.9	67.2	605.21	72.1
15:41:54	54.2	58.5	62.3	65.1	67.5	600.18	72.3
15:42:54	54.3	58.5	62.3	65.1	67.4	592.14	72.3
15:43:54	54.3	58.5	62.4	65.2	67.4	585.10	72.3
15:44:54	54.3	58.4	62.3	65.1	67.4	580.07	72.7
15:45:54	54.3	58.4	62.3	65.1	67.4	578.06	72.4
15:46:54	54.3	58.4	62.3	65	67.3	579.07	72.4
15:47:54	54.3	58.3	62.3	65	67.3	579.07	72.7
15:48:54	54.5	58.5	62.5	65.1	67.5	573.04	72.6
15:49:54	54.6	58.5	62.6	65.2	67.5	566.00	72.8
15:50:54	54.7	58.6	62.6	65.2	67.5	555.95	73.3
15:51:54	54.6	58.5	62.4	65.2	67.5	549.91	72.8
15:52:54	54.9	58.7	62.6	65.3	67.8	545.89	72.9
15:53:54	55	58.8	62.8	65.4	67.8	537.85	73.2
15:54:54	54.9	58.7	62.7	65.4	67.8	529.81	73.3
15:55:54	55.3	58.9	63	65.5	68	529.81	73
15:56:54	55.5	59.1	63.1	65.7	68.2	526.79	73.1
15:57:54	55.4	59	63	65.5	68.2	519.75	73.2
15:58:54	55.3	58.9	63	65.5	68.1	514.73	73.2
15:59:54	55.2	58.8	63	65.4	68.2	507.69	72.9

16:00:54	55.6	59.1	63.2	65.6	68.3	508.70	73.1
16:01:54	55.7	59.3	63.3	65.7	68.4	502.66	73.5
16:02:54	55.6	59.2	63.3	65.8	68.3	499.65	73.7
16:03:54	55.7	59.4	63.4	65.9	68.5	495.63	73.5
16:04:54	55.7	59.2	63.3	65.7	68.5	491.61	73.4
16:05:54	55.7	59.3	63.3	65.8	68.5	489.59	73.5
16:06:54	55.8	59.4	63.4	65.8	68.7	487.58	73.8
16:07:54	55.9	59.6	63.6	66	68.8	483.56	73.6
16:08:54	56	59.7	63.6	65.9	68.8	477.53	73.7
16:09:54	55.9	59.6	63.5	65.9	68.7	473.51	73.7
16:10:54	55.8	59.5	63.3	65.9	68.7	468.48	73.9
16:11:54	55.9	59.4	63.3	65.8	68.7	461.45	73.5
16:12:54	56	59.6	63.5	65.9	68.9	453.40	73.5
16:13:54	56	59.8	63.6	66	69	445.36	73.8
16:14:54	56	59.7	63.6	66	69	440.33	74.1
16:15:54	56.2	59.9	63.8	66.1	69	437.32	73.9
16:16:54	56.4	60.1	63.9	66.2	69.1	436.31	73.9
16:17:54	56.8	60.3	64.1	66.3	69.4	430.28	74
16:18:54	56.8	60.3	64.1	66.3	69.3	428.27	74.1
16:19:54	56.7	60.3	64.1	66.3	69.3	422.24	74.1
16:20:54	56.7	60.3	64	66.3	69.3	416.21	74
16:21:54	56.7	60.3	64	66.3	69.3	405.15	74.3
16:22:54	56.7	60.4	64.1	66.3	69.3	397.10	74
16:23:54	57	60.6	64.4	66.5	69.6	390.07	73.9
16:24:54	56.9	60.4	64.1	66.4	69.4	382.02	74
16:25:54	56.8	60.3	64	66.3	69.3	375.99	74.3
16:26:54	56.8	60.4	64.1	66.3	69.3	369.96	73.8
16:27:54	56.8	60.4	64.1	66.3	69.3	366.94	73.7
16:28:54	56.9	60.5	64.2	66.4	69.4	362.92	74
16:29:54	57	60.6	64.2	66.4	69.4	354.88	73.8
16:30:54	57.1	60.7	64.1	66.4	69.5	345.83	73.8
16:31:54	57.1	60.7	64.2	66.5	69.5	324.72	74
16:32:54	57.2	60.7	64.1	66.5	69.5	325.73	73.5



ภาคผนวก ข
บทความเผยแพร่งานวิจัย
เรื่อง “Comparative Analysis of Exergy and Efficiency for Stratified Thermal
Storage Tank with Solar Flat Plate and Evacuated Tube Collectors”
ตีพิมพ์ใน : Applied Mechanics and Material, ISSN: 1662-7482, Vol.855, 2016,
pp.114-118

Applied Mechanics and Materials
ISSN: 1662-7482, Vol. 833, pp 114-118
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.833.114
© 2017 Trans Tech Publications, Switzerland

Submitted: 2016-06-19
Revised: 2016-08-17
Accepted: 2016-08-23
Online: 2016-10-25

Comparative Analysis of Exergy and Efficiency for Stratified Thermal Storage Tank with Solar Flat Plate and Evacuated Tube Collectors

Sukruedee Sukchai*, Yodthong Mensin and Wikarn Wansungnern

School of Renewable Energy Technology, Naresuan University, Thailand

sukruedee@hotmail.com

Keywords: Exergy, Efficiency, Stratified Thermal Storage Tank, Flat Plate Collector, Evacuated Tube Collector

Abstract. In recent years, solar water heating technology has got the major importance in water heating applications. For the efficient and effective working of solar water heaters, storage of the hot water is the main issue in this water heating technologies. This paper mainly presents the exergy and efficiency comparison between the solar flat plate water heater and evacuated tube water heater. A five level stratified thermal storage tank is designed and developed for this analysis. At each level of the tank, temperature of the water is collected for each one hour interval from 9:00 to 16:00 hours in both cases and the overall exergy and efficiency of the two water heaters were calculated. The average efficiency of all the levels for flat plate and evacuated tube collectors are 7.91% and 8.20% respectively. The overall system efficiency is obtained as 39.54% for flat plate and 41.00% for evacuated tube solar collector. At each level exergy is calculate for both systems and the average exergy of all the levels for flat plate collector is 4.243 kW and for evacuated tube solar collector is 4.371 kW.

Introduction

In recent years, solar water heating technology has got the major importance in water heating applications throughout the world countries. Many renewable energy systems and technologies were developed for water heating applications to reduce the fossil fuel consumption and greenhouse house gases emissions into the environment. Based on the type of solar collector, there are two main classifications of solar water heaters namely flat plate solar water heaters and evacuated tube solar water heaters [1]. Based on the area of application and the range of operating temperature solar water heaters are classified as swimming pool water heaters, built in storage type water heaters, domestic solar water heaters and large size solar water heaters for industrial and community applications [2]. There are many advantages of flat plate collectors like, both beam and diffused radiation is used, simple installation, no need of tracking and easy operation and maintenance but at high operating temperatures thermal losses are more for flat plate collectors [3]. Evacuated tube solar collectors are further classified as direct flow tubes and heat pipe tubes. To reduce and eliminate conduction and convection losses respectively, evacuated tube collectors consist of a row of parallel evacuated glass tubes [4].

From past few years, many researchers performing the research to enhance the performance of storage tanks, effective designing of solar collectors and optimizing the controller to improve the efficiency of the solar water heating systems [5]. Marco Manzan developed a model for the tank in tank storage system for solar water heaters. The system contains two tanks in which the smaller tank contains hot water and is placed in a larger tank. The larger tank is filled with buffer and heating circuit [6]. Mevlut Arslan presented a paper on Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters. This study is used to predict the performance of the vertical solar storage tank during discharging and consumption. From the results of this work it is showed that for the higher Grashof number the pre established thermal stratification is well preserved to supply the useful hot water for usage [7]. The present research paper is about the exergy and efficiency comparison between the solar flat plate water heater and the evacuated tube water heater. A stratified thermal storage tank is

developed with five levels and the temperature is collected at each level for both the water heater systems. Efficiency and exergy of the both systems are calculated for a day from morning 9:00 A.M to 4:00 P.M with one hour interval of time.

Materials and Methods

In the experimental procedure: For the experimental procedure, a solar flat plate collector and the evacuated tube solar collectors are considered. The surface area of the flat plate collector is 2 m² [8]. The evacuated tube solar collector consists of 22 parallel evacuated glass tubes. A stratified thermal storage tank was developed for the storage purpose and which consists of five levels from L1 to L5. L1 is the lower level of the tank and L5 is the upper level of the storage tank. The length of each level in the stratified thermal storage tank is calculated from the equation 1 [8-9].

$$q_c = \frac{h_c A \Delta T}{\Delta X} \quad (1)$$

where,

- q_c = rate of heat transfer, W
- h_c = convective heat transfer coefficient, $W/m^2 K$
- A = surface area of solar collector, m^2
- ΔT = temperature difference in the tank, $^{\circ}K$
- ΔX = length of each level, m

Mathematical Formulation: For the both considered solar collectors efficiency η of the overall system is calculated with the following equation 2.

$$\eta = \frac{m C_p (\Delta T)}{A_c G_t} \quad (2)$$

where,

- m = mass of water in the tank, m^3
- ΔT = water temperature at between the top and bottom of the tank, $^{\circ}K$
- C_p = specific heat capacity of water, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$
- A_c = surface area of solar collector, m^2
- G_t = daily solar radiation per square meter, MJ/m^2

The efficiency at each level of the tank is also calculated for all the time intervals and the average efficiency of each level is also calculated. The efficiency at each level is calculated from equation (3).

$$\eta_j = \frac{m_j C_p (T_{j-1} - T_j)}{A_c G_t} \quad (3)$$

where,

- η_j = efficiency of j^{th} level of the tank, %
- m_j = mass of water j^{th} level of the tank, m^3
- T_{j-1} = water temperature of $(j-1)^{th}$ level of the tank, $^{\circ}K$
- T_j = water temperature of j^{th} level of the tank, $^{\circ}K$

Exergy of the both considered solar collectors was calculated from the average exergy of all the levels of the thermal storage tank. For the exergy analysis, the mass flow rate for both the collectors

is considered as constant around 0.02 kg/s. The exergy at each level is calculated from the following equation (4). The values of h and s are taken from the steam tables.

$$X_j = m_j[(h_j - h_o) - T_o(s_j - s_o)] \quad (4)$$

Where,

- X_j = exergy of j^{th} level of the tank
- m_j = mass flow rate at j^{th} level of the tank
- h_j = enthalpy of the water at j^{th} level of the tank
- h_o = enthalpy of the water at reference or ambient temperature
- s_j = entropy of the water at j^{th} level of the tank
- s_o = entropy of the water at reference or ambient temperature
- T_o = ambient temperature, K

Experimental setup and data collection: The stratified thermal storage tank with 1.25 meters divided into five levels from L1 to L5 is connected to data recorder at each level. To control the flow of hot water into the storage tank is controlled by two solenoid valves. The solenoid valves are having automatic control over the temperature of the water. If the temperature of the hot water is more than 60°C, the upper solenoid valve will be open by closing the lower solenoid valve. If the temperature is lower than the preset temperature lower valve is opened by closing upper valve. The thermal storage tank and the solenoid valve controlling mechanism are shown in figure 1 and 2 [8].

The thermal storage tank is connected to flat plate collector first and after the experiment was done with it, evacuated tube collector is connected to the thermal storage tank. The solenoid valve controlling and the mathematical formulation is same for the both solar collectors considered for this analysis. Different parameters from the environment, storage tank and from the solar collector were recorded with the help of data recorder and are mentioned in table 1.

The schematic diagram of solar collector with storage tank is shown in figure 3 [8].



Fig. 1 Stratified thermal storage tank



Fig. 2 Solenoid valve controlling mechanism

Table 1 List of parameters to be recorded

Positions	Parameters
Environment	T_A (Ambient)
	S_1 (Solar radiation)
Tank	$T5_{\text{intank}}$ (Level 5; Top)
	$T4_{\text{intank}}$ (Level 4)
	$T3_{\text{intank}}$ (Level 3)
	$T2_{\text{intank}}$ (Level 2)
	$T1_{\text{intank}}$ (Level 1; lower)
Solar Collector	$T1_{\text{charge}}$ (water out)
	$T2_{\text{discharge}}$ (water in)

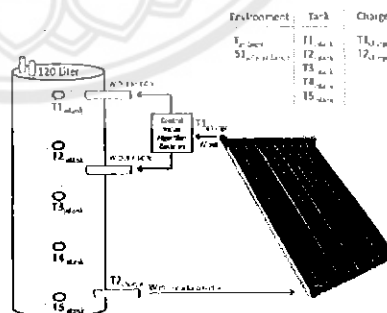


Fig. 3 Schematic view of storage tank with solar collector

Results and Discussion

The experiment was conducted at School Renewable Energy Technology (SERT), Naresuan University, Thailand in the month of March 2016. Temperature at the all the levels of tank is collected from 9:00A.M to 4:00P.M with one hour regular intervals of time. From the obtained data, exergy and efficiency of both the solar collectors are calculated and represented in graphs as shown below.

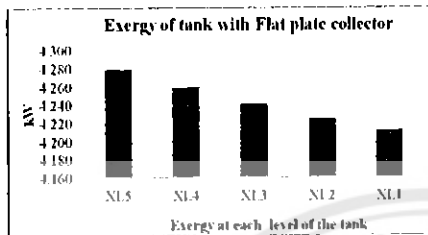


Fig 4.a Exergy of tank with Flat plate collector

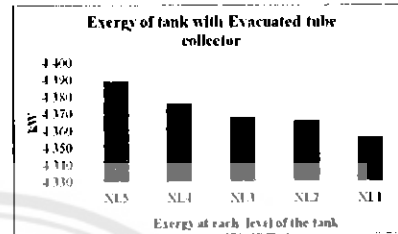


Fig 4.b Exergy of tank with evacuated tube collector

The exergy at each level of thermal storage tank for flat plate solar water heater and evacuated tube collector is mentioned in the above figure 4. Figure 4.a shows the exergy for flat plate collector and the average exergy value of the flat plate system is 4.243kW. Figure 4.b shows the exergy for evacuated tube collector and the average exergy of evacuated tube system is 4.371kW.

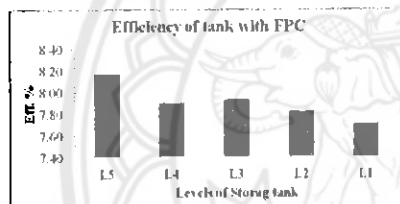


Fig 5.a Efficiency of storage tank with FPC

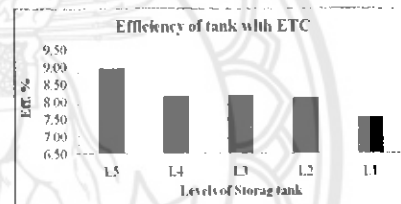


Fig 5.b Efficiency of storage tank with ETC

The efficiency of the stratified thermal storage tank is calculated and the results were shown in figure 5.a and 5.b for flat plate collector and evacuated tube collector respectively. For flat plate collector combined storage tank, the efficiencies of each level from 1 to 5 are 7.71%, 7.82%, 7.93%, 7.90% and 8.17%. Similarly, for evacuated tube combined storage tank the efficiencies are 7.57%, 8.11%, 8.20%, 8.18% and 8.96% respectively from level 1 to 5. The overall efficiency of both the systems is calculated with the help of equation (2) with mass of the water taken as 120 liters. The flat plate collector system efficiency 39.54% and the evacuated tube collector system efficiency is 41.00% which is nearly 1% more than that of flat plate solar collector.

The exergy and efficiency of the each level of storage tank with FPC and ETC are compared separately for easy analysis in the figure 6.a and 6.b.

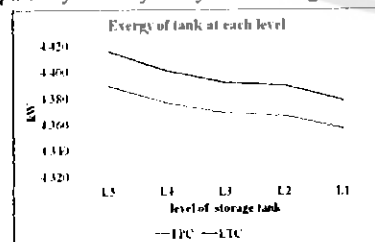


Fig 6.a Exergy of storage tank with FPC and ETC at each level

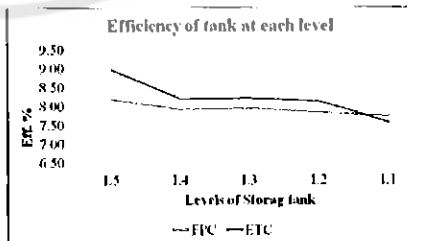


Fig 6.b Efficiency of storage tank with FPC and ETC at each level

The average exergy and efficiency of tank from all the levels are 4.243 kW and 7.91% respectively for the stratified thermal storage tank with flat plate solar collector and with evacuated tube solar collector the average exergy and efficiency of the storage tank for all the levels are 4.371kW and 8.20% respectively.

Conclusion

The present paper discussed about the main solar water heating technologies like flat plate and evacuated tube solar water heaters with stratified thermal storage tank. Design considerations, required parameters for the data collection, Mathematical formulation to calculate the exergy and efficiency of the both water heaters and the control flow chart of the solenoid valve are mentioned. The average exergy and efficiency of the storage tank combined with flat plate collector are 4.243 kW and 7.91% respectively and with evacuated tube collector are 4.371 kW and 8.20% respectively. The efficiencies at each level of the tank from 1 to 5 with flat plate collector are 7.71%, 7.82%, 7.93%, 7.90% and 8.17%. Efficiencies for levels 1 to 5 of stratified thermal storage tank with evacuated tube collector are 7.57%, 8.11%, 8.20%, 8.18% and 8.96% respectively. The overall efficiency of solar flat plate collector combined thermal storage tank is 39.54% and solar evacuated tube collector combined thermal energy tank efficiency is 41.00%. From the results it is concluded that, stratified thermal storage tank with evacuated tube collector is having more efficiency and the performance of this system is more effective than that of storage tank with flat plate collector.

Acknowledgement

The researchers would like to thank to Naresuan University for the financial support and School of Renewable Energy Technology (SERT), Naresuan University providing assistance during the research.

References

- [1] Tiwari, G. and S. Suneja, *Solar Thermal Engineering Systems*. 1997, New Delhi: Narosa Publishing House
- [2] Garg, H.P. and J. Prakash, *Solar energy : fundamentals and applications*. 2000: New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing, c2000.
- [3] Weiss, W., *Process Heat Collectors: State of the Art Within Task 33/IV; IEA SHC-Task 33 and SolarPACES-Task IV: Solar Heat for Industrial Processes*. 2008; ABE INTEC.
- [4] Kumar, R., et al., *Thermal performance of a solar pressure cooker based on evacuated tube solar collector*. *Applied Thermal Engineering*, 2001. 21(16): p. 1699-1706.
- [5] Li, S., et al., *Study on Performance of Storage Tanks in Solar Water Heater System in Charge and Discharge Progress*. *Energy Procedia*, 2014. 48: p. 384-393.
- [6] Padovan, R., et al., *Model Development and Validation for a Tank in Tank Water Thermal Storage for Domestic Application*. *Energy Procedia*, 2015. 81: p. 74-81.
- [7] Arslan, M. and A.A. Igcı, *Thermal performance of a vertical solar hot water storage tank with a mantle heat exchanger depending on the discharging operation parameters*. *Solar Energy*, 2015. 116: p. 184-204.
- [8] Sukruedee Sukchai, Y.M., Tawat Suriwong, Wikran Wangsungnern, *Energy and exergy analysis of stratified thermal storage tank combine with solar flat plate collector*.
- [9] Saranyanıt, S., *heat transfer*, T.P.A.T.-. Japan), Editor. 2002: Bangkok.