

การเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์  
แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติโดยการลดอัตราการไหล  
ของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์

**An Improvement in Efficiency of a Thermosyphon Solar  
Water Heater by Minimizing Water Flow Rate  
in Riser Tube Inside Solar Collector**

อโศก ศรีทองธรรม และพิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
Asoke Shithongtum and Pisit Techarungpaisan  
Faculty of Engineering, Ubon Rajathanee University

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอ วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของแผงรับแสงอาทิตย์ในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติ โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ต่อประสิทธิภาพของระบบที่ได้รับจากอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลทำได้โดยการติดตั้งลิ้น เปิด-ปิด ที่ท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบน (Top header) ภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ แบบที่ 1 เปิดวาล์ว 100% ทุกท่อ แบบที่ 2 เปิดวาล์วสลับระหว่าง 100% และ 50% แบบที่ 3 เปิดวาล์วสลับระหว่าง 100% และ 0% จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของระบบต่ำสุดเท่ากับ 22.63% ในการทดลองแบบที่ 1 และสูงที่สุดเท่ากับ 34.39% ในการทดลองแบบที่ 2 ผลการศึกษาสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนชนิดนี้ที่มีจำหน่ายทั่วไปเชิงพาณิชย์ โดยบีบท่อน้ำที่บริเวณใกล้ท่อรวมด้านบน เพื่อลดอัตราการไหลของน้ำในท่อ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นต่อไป

**คำสำคัญ:** การเพิ่มประสิทธิภาพ การไหลเวียนตามธรรมชาติ เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ แผงรังสีแสงอาทิตย์

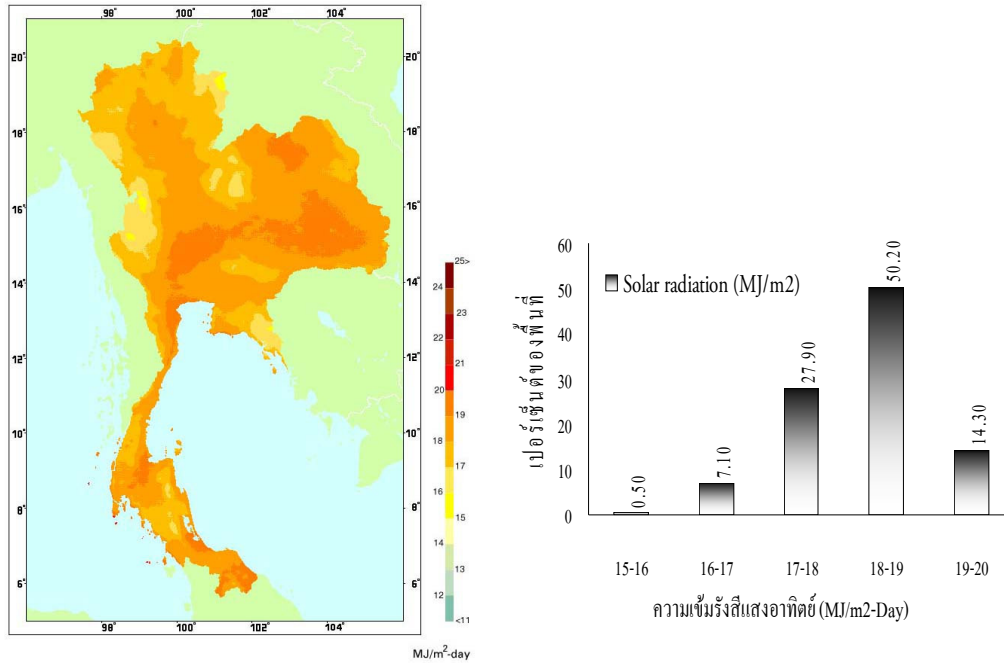
## Abstract

This paper presents a method to improve the efficiency of solar collection in thermosyphon solar water heaters by studying the influence of water flow rates in the riser tubes, located inside a solar collector, on the efficiency of the system stemming from the water flow rate inside the riser tube inside different solar collectors. Three experiments were conducted by adjusting the regulating valves lining in every riser at the top header of solar collectors. Mode I had 100% valve opening in every riser. Mode II had the valve at odd number risers at 100% opening, and the valve at even numbers at 50% opening. Mode III had the valve at odd number risers at 100% opening, and the valve at even numbers at 0% opening. The results show that the lowest efficiency was Mode I (at 22.63%) and the highest efficiency was Mode II (34.39%). This suggests a new design for thermosyphon solar water heaters by reducing the diameter at the end of the riser near the top header in solar collectors.

**Keywords:** *efficiency, natural circulation, solar water heater, solar collector*

## บทนำ

ปริมาณความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของระบบเศรษฐกิจของประเทศในหลาย ๆ ด้านทั้งในภาคอุตสาหกรรม การบริการ และในชีวิตประจำวัน จากข้อมูลการใช้พลังงานในปัจจุบัน พบว่า การใช้พลังงานในรูปของเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือ ไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินซึ่งเป็นพลังงานสิ้นเปลืองมีปริมาณที่สูงมากเมื่อเทียบกับพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) ได้แก่ พลังงานน้ำ แสงอาทิตย์ และลม เป็นต้น ในปัจจุบัน การค้นคว้าวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียน ณ ปัจจุบันสามารถพัฒนาจนถึงขั้นใช้งานได้จริง เช่น พลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จากข้อมูลศักยภาพพลังแสงอาทิตย์ในประเทศไทยโดยโครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทยดังแสดงในภาพที่ 1



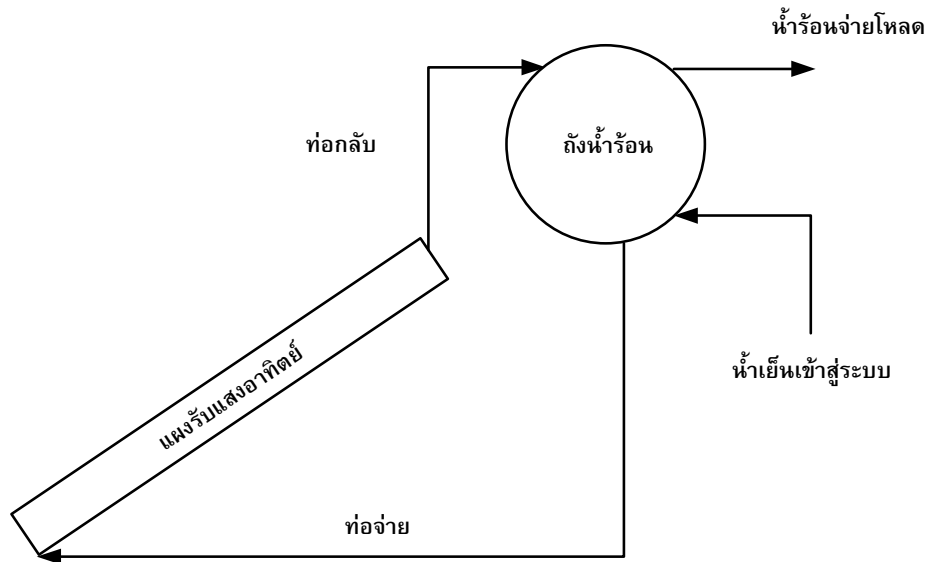
### ภาพที่ 1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2542-2544)

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยแบ่งเป็นบริเวณกว้างทางตอนล่างของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและตอนบนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รวมทั้งบางส่วนของภาคกลาง เมื่อทำการจำแนกเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ตามความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์จะได้ผลดังกราฟแท่ง พบว่า 14.3% ของพื้นที่ทั้งหมดของประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์สูงคือได้รับรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีอยู่ระหว่าง 19-22 MJ/m<sup>2</sup> และ 50.2% ของพื้นที่ทั้งหมดได้รับรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีอยู่ระหว่าง 18-19 MJ/m<sup>2</sup> ซึ่งถือว่าศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูงเมื่อทำการเฉลี่ยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ทั่วประเทศพบว่าค่ารังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีมีค่าเท่ากับ 18.2 MJ/m<sup>2</sup> (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2542-2544) ดังนั้นการศึกษาพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นเรื่องเหมาะสมกับประเทศไทย สำหรับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติถือเป็นผลผลิตอย่างหนึ่งจากการค้นคว้าและวิจัยเพื่อใช้ประโยชน์จากพลังงานหมุนเวียนจากพลังงานแสงอาทิตย์ แต่การใช้งานเครื่องทำน้ำร้อนชนิดนี้ยังไม่

แพร่หลายมากขึ้น ดังนั้นการค้นคว้าและวิจัยจึงมีความสำคัญเพื่อเพิ่มศักยภาพให้มีการใช้งานอย่างแพร่และเพื่อเป็นทางเลือกในการประหยัดพลังงานต่อไป

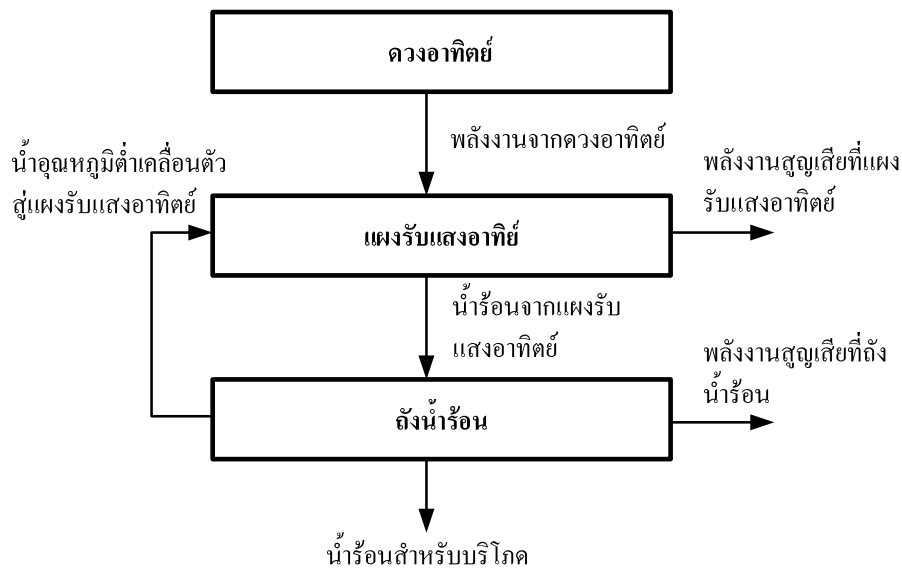
โดยทั่วไปองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) ถังเก็บน้ำร้อน (Storage tank) ระบบท่อ (Pipes and fitting) ที่ต่อเชื่อม ระหว่างแผงรับแสงอาทิตย์กับถังเก็บน้ำร้อนผ่านท่อกลับ (Return pipe) และท่อจ่าย (Supply pipe) และท่อที่จะนำน้ำร้อนไปใช้ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการหมุนเวียนของน้ำตามธรรมชาติ (Domestic solar water heater with natural circulation)

การจำแนกชนิดของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ อาศัยลักษณะการหมุนเวียนของน้ำในระบบที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบการหมุนเวียนของน้ำแบบธรรมชาติ (Natural circulation) ซึ่งเป็น Passive system เรียกว่าการไหลเวียนแบบ Thermosyphon และแบบการหมุนเวียนของน้ำโดยใช้ปั๊ม (Forced circulation) ซึ่งเป็น Active system บทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนแบบการหมุนเวียนของน้ำตามธรรมชาติ (Natural circulation) เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและสามารถผลิตใช้งานเองได้ การหมุนเวียนของน้ำในระบบเริ่มจากน้ำที่ด้านล่างสุดของถังน้ำซึ่งเป็นส่วนที่ระดับอุณหภูมิของน้ำต่ำที่สุดและไหลเข้าแผงรับแสงอาทิตย์ (Solar collector) โดยผ่านท่อจ่าย

(Supply pipe) เข้าที่ท่อรวมด้านล่างของแผงรับแสงอาทิตย์ (Bottom header) แล้วผ่านท่อน้ำในแผงรับแสงอาทิตย์ (Riser tubes) ไปยังท่อรวมด้านบน (Top header) ความร้อนที่ได้รับจากรังสีแสงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของน้ำที่ท่อน้ำในแผงรับแสงอาทิตย์ (Riser tubes) เพิ่มขึ้นขณะที่ความหนาแน่นของน้ำลดต่ำลงเป็นผลให้น้ำที่ร้อนขึ้นเกิดการขยายตัวและลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์ไปรวมตัวกันที่ท่อรวมด้านบน (Top header) และไหลไปยังถังเก็บน้ำร้อนโดยผ่านท่อกลับ (Return pipe) ที่อยู่ระหว่างด้านบนของแผงรับแสงอาทิตย์กับด้านบนของถังน้ำที่ด้านล่างสุดของถังน้ำจะถูกแทนที่ด้วยน้ำร้อนที่เคลื่อนตัวจากแผงรับแสงอาทิตย์ (มารีน่า มะหิณี, 2542) กระบวนการทำงานของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้ แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการผลิตน้ำร้อนของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาตินำเสนอครั้งแรกโดย Close ในปีค.ศ.1962 หลังจากนั้นมึงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มมากขึ้นแต่ส่วนใหญ่อยู่บนพื้นฐานงานวิจัยของ Close ซึ่งเขาได้เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับสมการทางคณิตศาสตร์ ระหว่างอัตราการไหลของของเหลวที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของเหลวภายในระบบ (Thermosyphon) และอุณหภูมิภายในระบบ อุณหภูมิภายในถังน้ำร้อน อุณหภูมิที่ท่อจ่าย – ท่อกลับ ของแผงรับแสงอาทิตย์ นอกจากนี้

งานวิจัยของ Close แล้วงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เช่น Shariah และ Lof ปี ค.ศ.1996 ที่ศึกษาเกี่ยวกับค่าที่เหมาะสมระหว่างปริมาณของถังเก็บน้ำร้อนกับพื้นที่ของแผงรับแสงอาทิตย์ พบว่า ถังเก็บน้ำร้อนที่สูงมากกว่า 1 เมตร จะไม่มีผลกระทบต่อ Solar fraction (B. M. Santos และ คณะ, 2005) หมายถึง อัตราส่วนความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์ต่อพลังงานที่ต้องการในกระบวนการ) นอกจากถังน้ำร้อนที่สูงน้อยกว่า 1 เมตรและการใช้งานในปริมาณสูง งานวิจัยที่ศึกษาอิทธิพลของชนิดของท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ต่อสมรรถนะของระบบระหว่างท่อเหล็กกับท่อโพลีโพรพิลีน โดย Riazi และ Razavi (1997) พบว่า ท่อโพลีโพรพิลีนให้ประสิทธิภาพสูงกว่าท่อเหล็ก งานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของเครื่องนำเสนอ โดย Helwa และคณะ (1995) พบว่า ในพื้นที่ที่ปริมาณแสงอาทิตย์ต่ำ บางครั้งการติดตั้งใช้งานก็มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพลังงานความร้อนสำรองแก่ระบบเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการใช้งาน

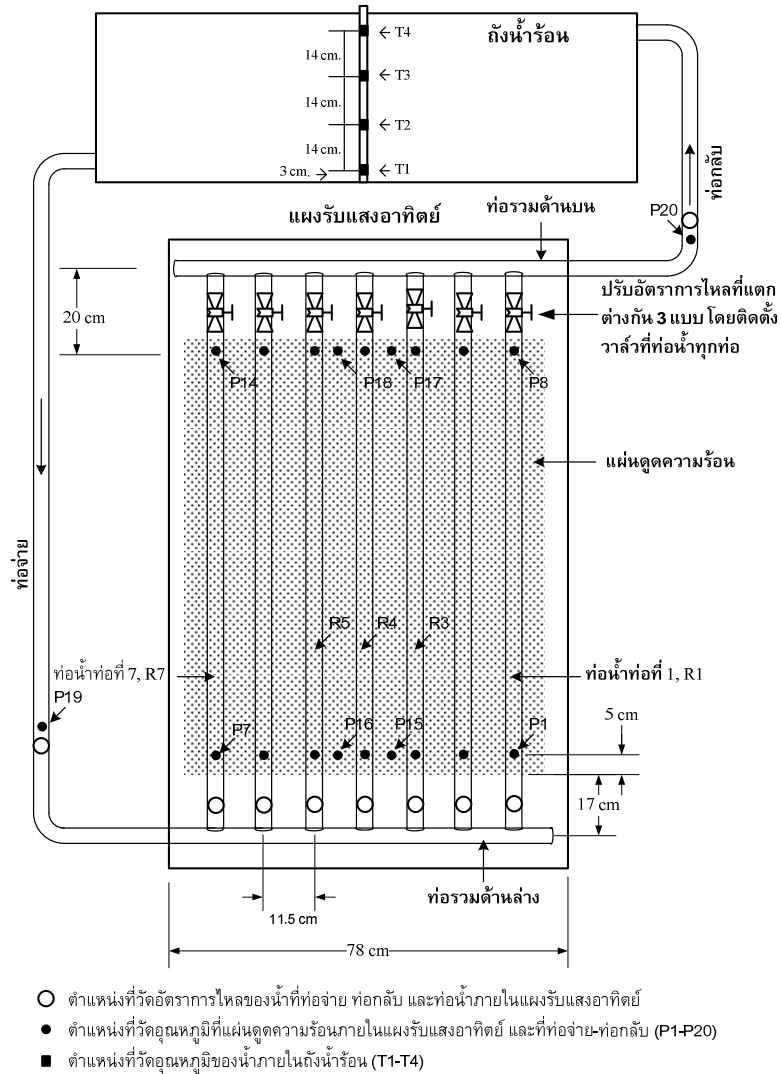
งานวิจัยที่เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของระบบนั้น Khalifa และ Mehdi (1999) แสดงสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมอุณหภูมิภายในถังเก็บน้ำร้อน Gupta และ Garg (1968) ได้ศึกษาเกี่ยวกับขนาดที่แตกต่างกันของท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ พบว่า ท่อน้ำที่ขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราการไหลที่สูงกว่าแต่ความแตกต่างของอุณหภูมิในถังน้ำระหว่างด้านบนกับด้านล่างของถังมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับท่อน้ำที่มีขนาดเล็กกว่า Shitzer และคณะ (1979) ได้วิจัยเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายทั่วไปเชิงพาณิชย์ พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แผ่นดูดความร้อนและภายในถังน้ำร้อนมีลักษณะเป็นเชิงเส้น Morrison (1980) เสนอสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของอุณหภูมิของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะของระบบ ยกตัวอย่างเช่น พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ (2547) ได้ศึกษาค่าตำแหน่งของท่อน้ำร้อนจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์เข้าถังที่กึ่งกลางกับด้านบนของถังน้ำร้อน พบว่า การต่อท่อกลับด้านบนของถังให้สมรรถนะที่ดีกว่า การศึกษาอัตราการไหลที่ท่อ เข้า-ออกและท่อน้ำภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ Pisit Techarungpaisan และคณะ (2005) โดยเปรียบเทียบระบบที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 แบบพบว่า ระบบที่มีอัตราการไหลต่ำ สมรรถนะของการทำน้ำร้อนที่ได้รับสูงกว่าระบบที่อัตราการไหลสูงกว่า Techarungpaisan และ Teeboonma (2006) พบว่า การลด

อัตราการไหลของท่อน้ำบางท่อภายในแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ช่วยเพิ่มสมรรถนะของระบบได้เช่นกัน

## การเตรียมการทดลองและวิธีการทดลอง

### การเตรียมการทดลอง

สร้างชุดทดลองโดยอ้างอิงกับเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์ทั่วไปในประเทศไทย เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อการสะสมความร้อนของน้ำในท่อน้ำ รวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำโดยการติดตั้งวาล์ว เปิด-ปิด ที่ท่อน้ำ (Riser tubes) ใกล้ท่อรวมด้านบน (Top header) ทุกท่อ เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำในหลายๆ ชั่วโมง ที่ท่อจ่าย ท่อกลับ และท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ วัดอุณหภูมิทุก 5 นาที ที่ท่อจ่าย ท่อกลับและแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำ และวัดอุณหภูมิในถังน้ำร้อนทุก 5 นาที ซึ่งแตกต่างกันเนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลน้ำในท่อโดยลิ้น เปิด-ปิด ที่ท่อน้ำ (Riser tubes) ดังแสดงในภาพที่ 4



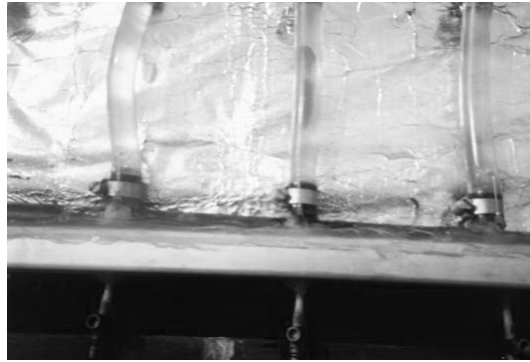
ภาพที่ 4 แผนผังชุดทดลอง

### 1. การเตรียมชุดทดลองสำหรับวัดอัตราการไหล

การวัดอัตราการไหลใช้วิธี Dry trace inject (Close, 1962 และ Pannigul, 1999) โดยการตัดแผ่นดูความร้อน 15 cm. ตามความยาวของท่อน้ำ ตัดท่อน้ำทุกท่อความยาว 12 cm. แทนที่ด้วยท่อใยโอสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.975 cm. เชื่อมต่อระหว่างท่อน้ำและท่อจ่ายด้านล่างติดตั้งชุดเข็มฉีดยาที่ท่อใยโอสทุกท่อเช่นเดียวกัน ตัดท่อจ่ายและท่อกลับความยาว 15 cm. แทนที่ด้วยท่อใยโอสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.95 cm. และติดตั้งชุดเข็มฉีดยาที่ท่อใยโอสที่ท่อจ่ายและท่อกลับ สารสีที่ใช้ในการทดลองคือ น้ำยาอุทัยทิพย์ ซึ่งไม่มีพิษและมีความหนาแน่น



0.9722 (ตามข้อมูลจากผู้ผลิต) เดิมสารสีในถุงน้ำเกลือซึ่งสูงกว่าด้านบนสุดของถังน้ำร้อน ปล่อยสารสีผ่านท่ออย่างขนาดเล็กซึ่งต่อระหว่างชุดเข็มฉีดยา ควบคุมอัตราการไหลโดยวาล์วพลาสติกที่ชุดเข็มฉีดยาแต่ละชุด ดังแสดงในภาพที่ 5 ขณะที่ตำแหน่งที่วัดอัตราการไหลแสดงในรูปที่ 4 วัดอัตราการไหลโดยนาฬิกาจับเวลาเมื่อเคลื่อนที่ ด้วยความยาว 5 cm. ในท่อน้ำทุกท่อ ท่อจ่าย และท่อกลับ ทุกชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 8:00 น. ถึงเวลา 16:00 น. ปรับตั้งเครื่องโดยวัดอัตราการไหลระหว่าง 0.03-0.5 cm<sup>3</sup>/s มีความแม่นยำ  $\pm 5\%$



ภาพที่ 5 ชุดทดลองสำหรับวัดอัตราการไหลโดยวิธี Dry trace inject  
(Close, 1962 และ Pannigul, 1999)

## 2. การเตรียมชุดทดลองสำหรับวัดอุณหภูมิ

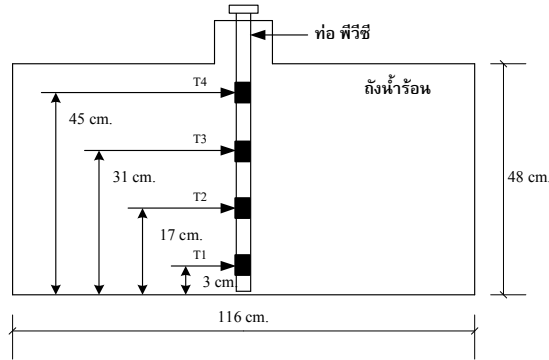
วัดอุณหภูมิโดย Thermocouple ชนิด K (ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.5\%$ ) อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนวัดที่ผิวของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่าง อุณหภูมิของท่อจ่ายและท่อกลับวัดที่ผิวของท่อจ่ายและท่อกลับ จากนั้นจึงปิดทับ Thermocouple ด้วยแผ่นสติ๊กเกอร์อะลูมิเนียม และวัดอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนโดย Thermocouple ชนิด K เช่นเดียวกัน ตำแหน่งที่วัดแสดงในภาพที่ 3 เก็บข้อมูลการวัดอุณหภูมิทุก 5 นาทีโดย Data logger (Cambell รุ่น CRX23) ขนาด 24 ช่อง

## 3. การวัดพลังงานแสงอาทิตย์

วัดปริมาณแสงอาทิตย์ในระหว่างวันที่ทำการทดลองโดยใช้ไพราโนมิเตอร์ NovaLynx Corporation รุ่น 240-8101 Star Pyranometer ความแม่นยำ  $\pm 2\%$

#### 4. การวัดอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อน

วัดอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในตำแหน่งที่แตกต่างกันตามแนวตั้งรวมทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง T1 ถึง T4 ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของน้ำภายในถังน้ำร้อน

จากผลการวัดอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนทั้ง 4 ตำแหน่ง สามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพของระบบได้โดยค่า  $T_1, T_2, T_3, T_4$  ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในถังน้ำร้อน (Water mean tank temperature,  $T_{sm}$ ) จากสมการที่ (1) คำนวณหามวลของน้ำในแต่ละส่วน  $m_1, m_2, m_3, m_4$  (พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, 2547) ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเท่ากับ อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่น้ำได้รับต่อพลังงานจากรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนระนาบของตัวรับรังสี (Pannigul, 1999)

$$T_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^4 T_i m_i}{\sum_{i=1}^4 m_i} \quad (1)$$

เมื่อกำหนด  $T_{sm}$  หมายถึง อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อน,  $T_i$  หมายถึง อุณหภูมิของน้ำในตำแหน่ง 1 ถึงตำแหน่งที่ 4 และ  $m_i$  หมายถึง มวลของน้ำในส่วนที่ 1 ถึงส่วนที่ 4

ประสิทธิภาพของระบบ  $\eta_{sys}$  คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$\eta_{sys} = \frac{\sum Q_w}{\sum I_t A_c} \quad (2)$$

โดย  $Q_w$  หมายถึง ความร้อนที่น้ำได้รับ และ  $I_t A_c$  หมายถึง รังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนระนาบของตัวรับรังสี ดังนั้น พลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ได้  $Q_w$  คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\Sigma Q_w = \sum_{t=6:00}^{16:00} m C_p (T_{sm,t+1} - T_{sm,t}) \quad (3)$$

เช่นเดียวกันรังสีแสงอาทิตย์รวมที่ตกกระทบบนระนาบของตัวรับรังสี  $I_t A_c$  คำนวณได้จากสมการที่ 4

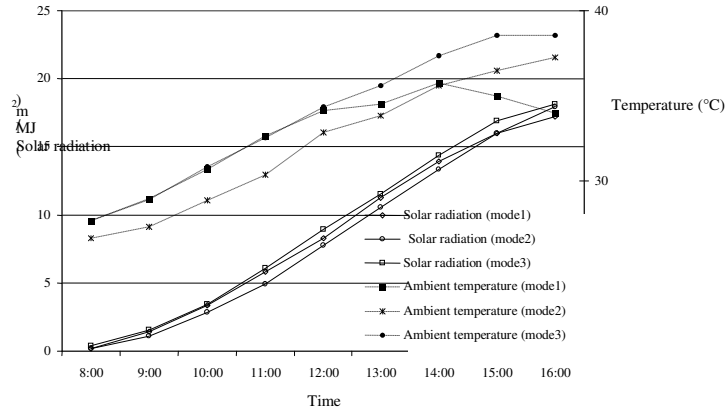
$$\Sigma I_t A_c = \Sigma (I_t A_c)_t \quad (4)$$

### วิธีการทดลอง

เพื่อที่จะศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของแผงรับแสงอาทิตย์ในเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างชุดทดลองตามรายละเอียดในตารางที่ 1 (ตามรายละเอียดในภาคผนวก ก) วิธีการทดลองดำเนินการ โดยก่อนเริ่มทดลองเติมน้ำที่แผงรับแสงอาทิตย์และถึงน้ำร้อนให้เต็มในตอนเช้า เตรียมอุปกรณ์สำหรับวัดค่าต่างๆ ให้พร้อมก่อนการทดลอง บันทึกข้อมูลอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อน อุณหภูมิน้ำทุก 5 นาที และอัตราการของน้ำทุกชั่วโมง การทดลองแต่ละครั้งใช้เวลา 1 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละวันจะปล่อยน้ำออกจากระบบ

### ผลการทดลองและวิจารณ์

เนื่องจากการทดลองแต่ละแบบนั้นใช้เครื่องมือชุดเดียวกัน ดังนั้นตัวแปรที่ไม่อาจควบคุมได้ที่เกิดขึ้นกับการทดลองแต่ละแบบอันประกอบด้วย ค่ารังสีแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ผู้วิจัยจึงพยายามควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้มีค่าใกล้เคียงกันในการทดลองแต่ละแบบเพื่อสามารถนำผลของการทดลองแต่ละแบบมาเปรียบเทียบกันได้ โดยทำการทดลองแต่ละแบบหลายครั้ง (หลายวัน) แล้วเลือกวันที่การทดลองแต่ละแบบมีค่ารังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิของอากาศแวดล้อมใกล้เคียงกันมาเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยนำการทดลองแบบที่ 1 ในวันที่ 23 มีนาคม 2551 นำการทดลองแบบที่ 2 ในวันที่ 21 มีนาคม 2551 และนำการทดลองแบบที่ 3 ในวันที่ 20 มีนาคม 2551 ซึ่งปริมาณแสงอาทิตย์รวมระหว่างวันที่ทำการทดลองเท่ากับ  $17.22 \text{ MJ/m}^2$ ,  $17.91 \text{ MJ/m}^2$  และ  $21.54 \text{ MJ/m}^2$  ตามลำดับมาเปรียบเทียบกัน เริ่มการทดลองในแต่ละวันที่เวลา 8:00 น. ถึง 16:00 น. ในระหว่างการทดลองไม่มีการถ่ายเทน้ำออกนอกระบบ

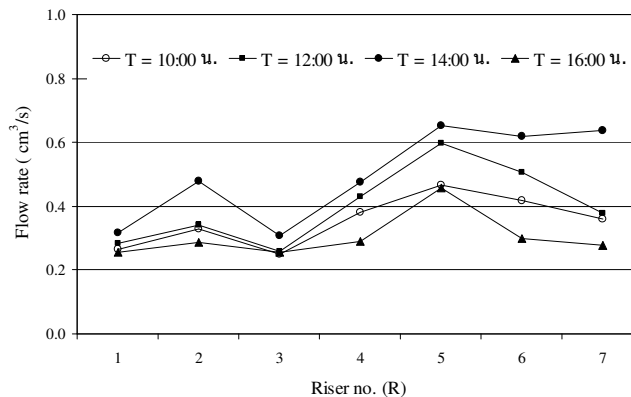


รูปที่ 7 ปริมาณแสงอาทิตย์และอุณหภูมิแวดล้อมในระหว่างวันที่ทำการทดลอง

### 1. อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์

#### 1.1 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 1

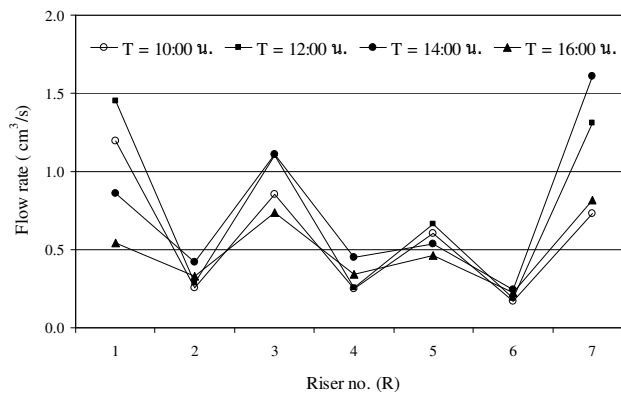
แม้ว่าจะเปิดวาล์วที่ท่อน้ำ 100% เท่ากันทุกท่อ แต่อัตราการไหลของน้ำที่ท่อน้ำแต่ละท่อในแต่ละช่วงเวลาที่ทำการวัดมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากท่อน้ำแต่ละท่อได้รับปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับแสงอาทิตย์แตกต่างกันตามทิศการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก ดังผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่า อัตราการไหลที่วัดได้อยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.65  $\text{cm}^3/\text{s}$  เนื่องจากปริมาณแสงอาทิตย์สูงสุดอยู่ที่เวลา 14:00 น. และต่ำสุดอยู่ที่เวลาเวลา 16:00 น. ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำสูงสุดจึงเกิดขึ้นที่เวลา 14:00 น. และต่ำสุดที่เวลา 16:00 น.



ภาพที่ 8 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 1

## 1.2 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 2

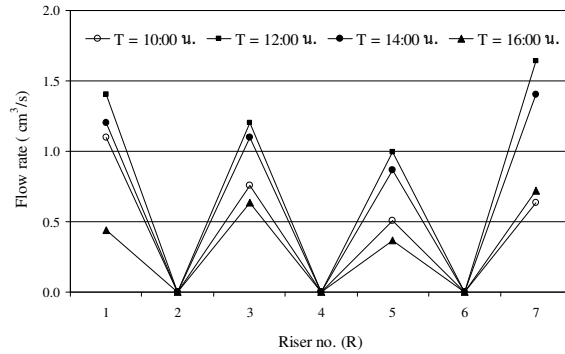
เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำที่ท่อน้ำ R1, R3, R5 และ R7 ซึ่งเปิดวาล์ว 100% และท่อน้ำ R2, R4 และ R6 ซึ่งเปิดวาล์ว 50% ในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากท่อน้ำแต่ละท่อได้รับปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับแสงอาทิตย์แตกต่างกันตามทิศการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำยังขึ้นอยู่กับปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ดังนั้นในระหว่างวันที่ทำการทดลองในแบบที่ 2 ที่ปริมาณแสงอาทิตย์สูงสุดอยู่ที่เวลา 14:00 น. และต่ำสุดอยู่ที่เวลา 10:00 น. อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำสูงสุดจึงเกิดขึ้นที่เวลา 14:00 น. และต่ำสุดที่เวลา 10:00 น. และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.17 ถึง 1.60  $\text{cm}^3/\text{s}$  ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 2

## 1.3 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 3

เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 และแบบที่ 2 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำที่ท่อน้ำ R1, R3, R5 และ R7 ซึ่งเปิดวาล์ว 100% ในแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากท่อน้ำแต่ละท่อได้รับปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนแผงรับแสงอาทิตย์แตกต่างกันตามทิศการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำยังขึ้นอยู่กับปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ดังนั้นในระหว่างวันที่ทำการทดลองในแบบที่ 3 ที่ปริมาณแสงอาทิตย์สูงสุดอยู่ที่เวลา 12:00 น. และต่ำสุดอยู่ที่เวลา 16:00 น. อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำสูงสุดจึงเกิดขึ้นที่เวลา 12:00 น. และต่ำสุดที่เวลา 16:00 น. และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.36 ถึง 1.63  $\text{cm}^3/\text{s}$  ดังแสดงในภาพที่ 10



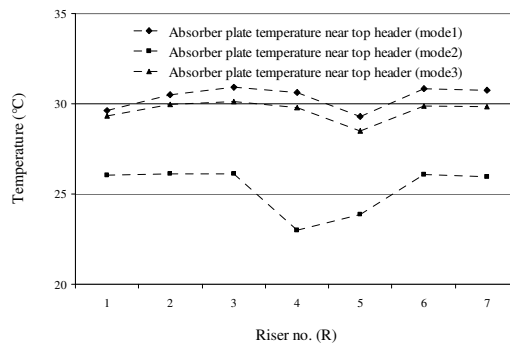
ภาพที่ 10 อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองแบบที่ 3

อัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์จากการทดลองทั้ง 3 การทดลองแสดงในรูปที่ 8 ถึง 10 เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำพบว่า อัตราการไหลโดยเฉลี่ยของน้ำในท่อน้ำในการทดลองแบบที่ 3 มีค่าน้อยที่สุด ตามมาด้วยการทดลองในแบบที่ 2 และการทดลองในแบบที่ 1 ตามลำดับ เนื่องจากการเปิดวาล์วที่แตกต่างกันตามรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 1 (ตามรายละเอียดในภาคผนวก ก)

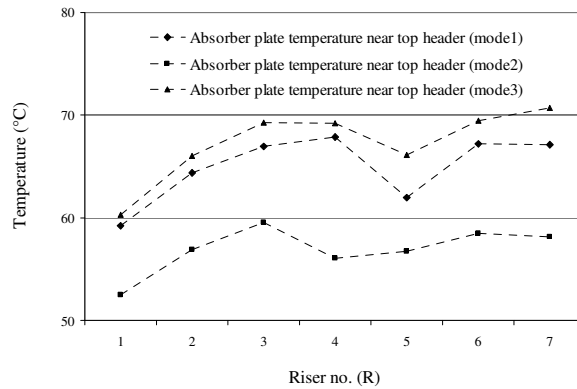
## 2 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนใกล้ท่อรวมน้ำบน

### 2.1 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนใกล้ท่อรวมน้ำบน ที่เวลา 8:00 น. และ 10:00 น.

อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำใกล้ท่อรวมน้ำบน ที่เวลา 8:00 น. ในการทดลองแบบที่ 1, 2 และ 3 แสดงในรูปที่ 11 ณ ช่วงเวลานี้ปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับค่อนข้างต่ำ ดังนั้น อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่วัดได้จึงค่อนข้างราบเรียบในทุกการทดลอง อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนในการทดลองทั้ง 3 แบบอยู่ระหว่าง 20°C ถึง 33°C



ภาพที่ 11 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่เวลา 8:00 น.

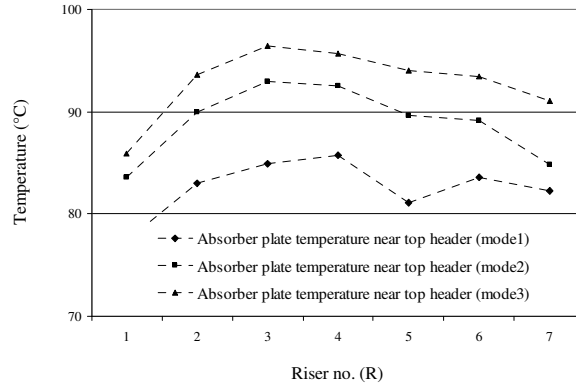


ภาพที่ 12 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่เวลา 10:00 น.

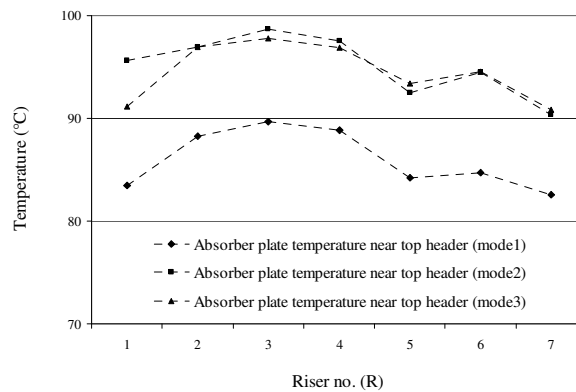
ที่เวลา 10:00 น. อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนเพิ่มสูงขึ้นในทุกการทดลองตามปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนในการทดลองทั้ง 3 แบบมีค่าอยู่ระหว่าง  $50^{\circ}\text{C}$  ถึง  $72^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 12 และพบว่า อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่มีค่าสูงจะเชื่อมมาที่ตำแหน่งท่อน้ำ R7 เพราะเป็นตำแหน่งที่รับรังสีแสงอาทิตย์ได้ดีที่สุดในช่วงเช้าและตรงข้ามกัน ที่ตำแหน่งท่อน้ำ R1 เช่นเดียวกับการทดลองในแบบที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 แบบ พบว่า อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนสูงที่สุดเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3

## 2.2 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนใกล้ท่อรวมด้านบน ที่เวลา 12:00 น. และ 14:00 น.

ที่เวลา 12:00 น. อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง  $78^{\circ}\text{C}$  ถึง  $96^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในรูปที่ 13 เมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ช่วงเวลาที่ผ่านมา พบว่า อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งท่อน้ำ R7 สูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งท่อน้ำ R1 เช่นเดิม แต่อุณหภูมิสูงสุดไม่ได้เชื่อมมาที่ตำแหน่งท่อน้ำ R7 แต่อยู่กึ่งกลางระหว่างท่อน้ำ R1 และ R7 เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 แบบ พบว่า อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนสูงเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 การทดลองแบบที่ 2 และ 1 ตามลำดับ



ภาพที่ 13 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่เวลา 12:00 น.



ภาพที่ 14 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่เวลา 14:00 น.

ที่เวลา 14:00 น. อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำไกล้ที่อรวม ด้านบนแสดงในภาพที่ 14 เช่นเดียวกับอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่เวลา 12:00น. อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งท่อน้ำ R7 สูงกว่าอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งท่อน้ำ R1 เช่นเดิม แต่อุณหภูมิสูงสุดไม่ได้เชื่อมมาที่ตำแหน่งท่อน้ำ R7 แต่อยู่ที่กลางระหว่างท่อน้ำ R1 และ R7 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนในช่วงเวลานี้มีค่าอยู่ระหว่าง 82°C ถึง 98°C เมื่อเปรียบเทียบการทดลองทั้ง 3 แบบ พบว่า อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนสูงเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 การทดลองแบบที่ 2 และ 1 ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการทดลองที่เวลา 12:00 น.

ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำไกล้ที่อรวม ด้านบน จากการทดลองทั้ง 3 แบบ แสดงในภาพที่ 11 ถึง 14 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนในทุกการทดลองส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่าง 80°C ถึง 90°C การทดลองแบบที่ 1 มี



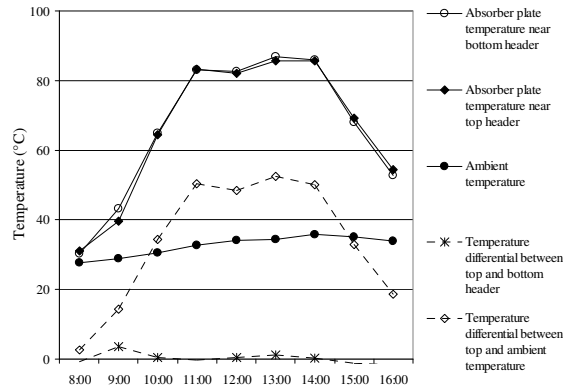
ช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 4 ชั่วโมง การทดลองแบบที่ 2 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 2 ชั่วโมง การทดลองแบบที่ 3 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่อยู่ระหว่าง 90°C ถึง 100°C การทดลองแบบที่ 2 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 3 ชั่วโมง การทดลองแบบที่ 3 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 4 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 80°C ขึ้นไป พบว่า การทดลองแบบที่ 2 และ 3 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 5 ชั่วโมงและการทดลองแบบที่ 1 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 90°C ขึ้นไป พบว่า การทดลองแบบที่ 2 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 3 ชั่วโมง การทดลองแบบที่ 3 มีช่วงระยะเวลาดังกล่าวเท่ากับ 2 ชั่วโมง ขณะที่การทดลองแบบที่ 1 ไม่มีช่วงระยะเวลาดังกล่าว เนื่องจากการไม่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ให้ไหลช้าลงเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 และ 3 เป็นผลให้ในการทดลองทั้ง 2 แบบ น้ำในท่อน้ำสะสมความร้อนได้มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งของท่อน้ำใกล้ท่อรวมด้านบน

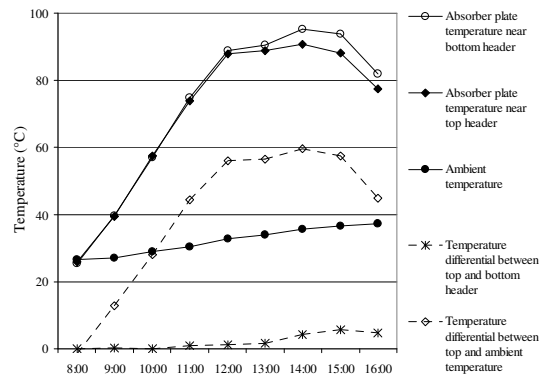
| การทดลอง             | อุณหภูมิใกล้ท่อรวมด้านบน<br>ระหว่าง 80°C-90°C |                          | อุณหภูมิใกล้ท่อรวมด้านบน<br>ระหว่าง 90°C-100°C |                          | อุณหภูมิสูงกว่า<br>80°C  |
|----------------------|---|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|
|                      | ช่วงเวลา (น.)                                 | รวมระยะเวลา<br>(ชั่วโมง) | ช่วงเวลา (น.)                                  | รวมระยะเวลา<br>(ชั่วโมง) | รวมระยะเวลา<br>(ชั่วโมง) |
| การทดลอง<br>แบบที่ 1 | 11:00-14:00                                   | 4                        | -  | 0                        | 4                        |
| การทดลอง<br>แบบที่ 2 | 12:00, 16:00                                  | 2                        | 13:00-15:00                                    | 3                        | 5                        |
| การทดลอง<br>แบบที่ 3 | 11:00   | 1                        | 12:00-15:00                                    | 4                        | 5                        |

### 3. อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่าง

อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่างในการทดลองแบบที่ 1 แบบที่ 2 และแบบที่ 3 แสดงในภาพที่ 15, 16 และ 17 ตามลำดับ

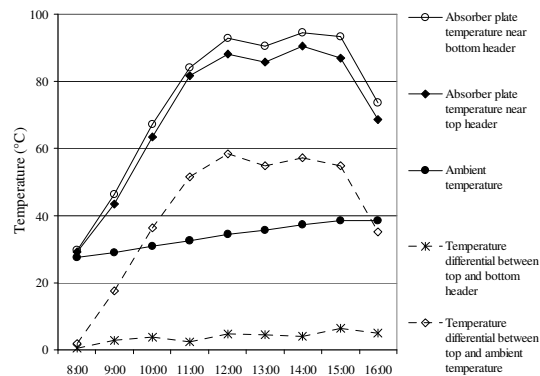


ภาพที่ 15 อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่ง



ภาพที่ 16 อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่ง

ใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่างในการทดลองแบบที่ 1 ใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่างในการทดลองแบบที่ 2



ภาพที่ 17 อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่างในการทดลองแบบที่ 3

เนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำให้ช้าลงในการทดลองแบบที่ 2 และ 3 และในการทดลองแบบที่ 3 มีอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำน้อยที่สุดเป็นผลให้น้ำภายในที่แผงรับแสงอาทิตย์ของการทดลองแบบที่ 3 สะสมความร้อนได้มากที่สุด ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่าง พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิดังกล่าวมากที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ  $6.43^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 15:00น. การทดลองแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $5.67^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 15:00น. และการทดลองแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $3.58^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 9:00น. ดังแสดงในรูปที่ 15, 16 และ 17 และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิแวดล้อมจากการทดลองในแบบทั้ง 3 แบบ พบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมিরะหว่างอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนที่ตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนกับอุณหภูมิแวดล้อมโดยเฉลี่ยมากที่สุดเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ  $40.88^{\circ}\text{C}$  การทดลองแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $39.80^{\circ}\text{C}$  และน้อยที่สุดในการทดลองแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $33.82^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงในตารางที่ 2

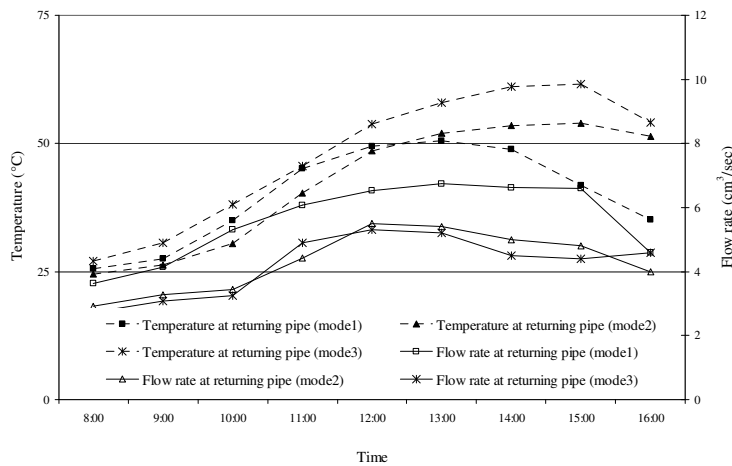
**ตารางที่ 2** อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนระหว่างตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนกับอุณหภูมิแวดล้อม

| การทดลอง         | ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อนระหว่างตำแหน่งใกล้ท่อรวมด้านบนกับอุณหภูมิแวดล้อม ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|------------------|---|
| การทดลองแบบที่ 1 | 33.82   |
| การทดลองแบบที่ 2 | 39.80   |
| การทดลองแบบที่ 3 | 40.88   |

#### 4. อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำที่ท่อกลับ

อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำที่ท่อกลับจากการทดลองทั้ง 3 การทดลอง แสดงในภาพที่ 18 พบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ท่อกลับในการทดลองแบบที่ 3 มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำที่ท่อกลับมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นผลต่อเนื่องจากอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ที่มีค่าน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน เพราะน้ำร้อนที่ผลิตได้จากแผงรับแสงอาทิตย์ซึ่งสะสมความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ภายในแผงรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดในการทดลองแบบที่ 3 ดังแสดงในหัวข้อที่ ผ่านมาในแนวทำนองเดียวกันอุณหภูมิของน้ำที่ท่อ

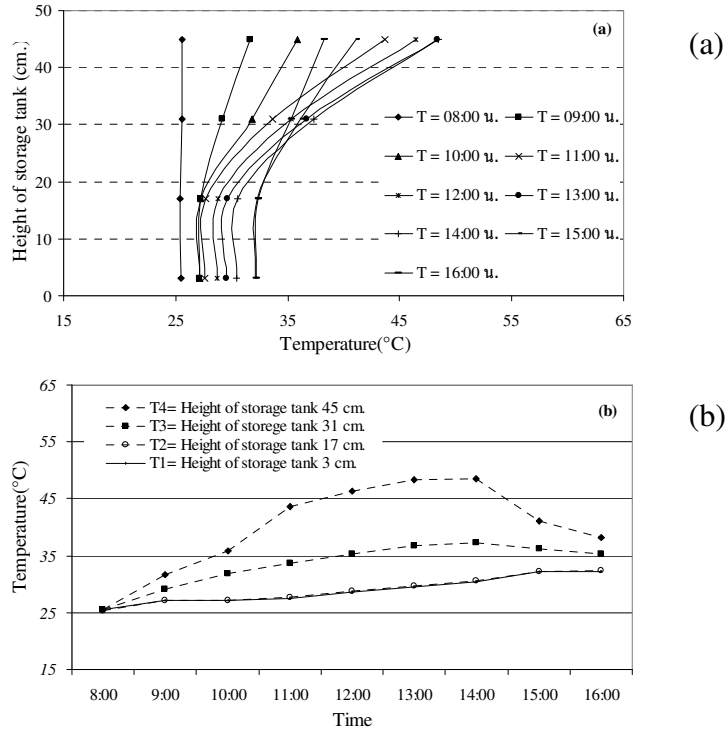
กลับสูงที่สุดในลำดับรองลงมาเกิดในการทดลองแบบที่ 2 และอุณหภูมิของน้ำที่ท่อกลับต่ำที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 1 ขณะที่เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำพบว่า การทดลองแบบที่ 1 มีอัตราการไหลของน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือการทดลองแบบที่ 2 และการทดลองแบบที่ 3 มีอัตราการไหลของน้ำต่ำที่สุด ซึ่งอัตราการไหลของน้ำ หมายถึงความสามารถในการผลิตน้ำร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ในการทดลองทั้ง 3 การทดลองและมีผลกระทบต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนรวมทั้งประสิทธิภาพของระบบ



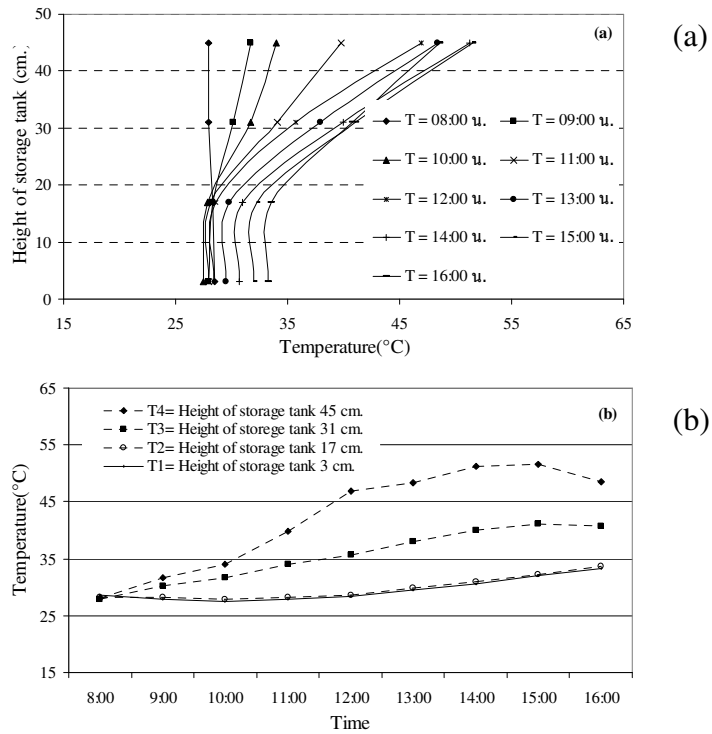
ภาพที่ 18 อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำที่ท่อกลับ

### 5. อุณหภูมิของน้ำภายในถังน้ำร้อน

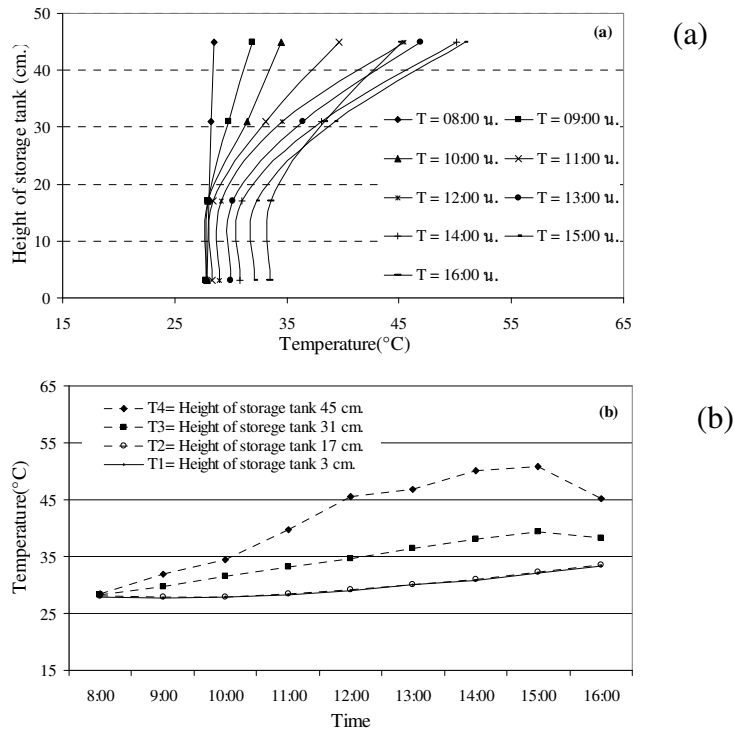
การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 1 การทดลองแบบที่ 2 และการทดลองแบบที่ 3 แสดงในภาพที่ 19, 20 และ 21 ตามลำดับ ช่วงแรกของการทดลองอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T1 ถึง T4 ใกล้เคียงกัน เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับสูงขึ้นอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ตำแหน่งๆ เริ่มแตกต่างกันชัดเจนและสูงที่สุดที่ตำแหน่ง T4 เนื่องจากที่ตำแหน่ง T4 เป็นตำแหน่งที่ได้รับน้ำร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์โดยตรงและกระจายความร้อนไปที่ตำแหน่ง T3, T2 และ T1 ลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ตำแหน่ง T4 พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ตำแหน่งนี้สูงสุดเกิดที่การทดลองแบบที่ 3 มีค่าเท่ากับ  $58.82^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 15:00 น. การทดลองแบบที่ 2 มีค่าเท่ากับ  $51.54^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 15:00 น. และการทดลองแบบที่ 1 มีค่าเท่ากับ  $48.49^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา 14:00 น. ดังแสดงในรูปที่ 19(a), 20(a) และ 21(a) ตามลำดับ



รูปที่ 19 การกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 1



รูปที่ 20 การกระจายตัวของอุณหภูมิน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 2



ภาพที่ 21 การกระจายตัวของอุณหภูมิในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 3

ในภาพที่ 19(b), 20(b) และ 21(b) เป็นการการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ช่วยอธิบายถึงการแบ่งชั้นของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง T1 ถึง T4 ในการทดลองทั้ง 3 แบบ จากภาพที่ 19(b) ซึ่งแสดงผลการทดลองแบบที่ 1 พบว่า ที่ตำแหน่ง T1 ถึง T4 พบว่า อุณหภูมิของน้ำในถังแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นที่ 1 ตำแหน่ง T1 และ T2 ชั้นที่ 2 ตำแหน่ง T3 และชั้นที่ 3 ตำแหน่ง T4 อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 1 อยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 2 อยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 11:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 11:00 น. ถึง 16:00 น. อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 3 อยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 10:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 10:00 น. ถึง 11:00 น. และ 15:00 น. ถึง 16:00 น. อุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 45°C ขึ้นไปเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12:00 น. ถึง 14:00 น. ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 1

| ชั้นอุณหภูมิ | อุณหภูมิระหว่าง<br>25°C ถึง 35°C | อุณหภูมิระหว่าง<br>35°C ถึง 45°C             | อุณหภูมิ<br>มากกว่า 45°C   | ระยะเวลารวม<br>(ชั่วโมง) | อุณหภูมิที่<br>ตำแหน่งท่อน้ำ |
|--------------|----------------------------------|--|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| ชั้นที่ 1    | 9 ชั่วโมง<br>(8:00-16:00)        | -  | -                          | 9                        | T1,T2                        |
| ชั้นที่ 2    | 4 ชั่วโมง<br>(8:00-11:00)        | 5 ชั่วโมง<br>(11:00-16:00)                   | -                          | 9                        | T3                           |
| ชั้นที่ 3    | 2 ชั่วโมง<br>(8:00-10:00)        | 4 ชั่วโมง<br>(10:00-11:00),<br>(15:00-16:00) | 3 ชั่วโมง<br>(12:00-14:00) | 9                        | T4                           |

เช่นเดียวกันในภาพที่ 20(b) แสดงผลการทดลองในแบบที่ 2 และพบว่า อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 1 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 2 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 11:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 11:00 น. ถึง 16:00 น. อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 3 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 10:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่เวลา 11:00 น. อุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 45°C ขึ้นไปเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12:00 น. ถึง 16:00 น. ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 2

| ชั้นอุณหภูมิ | อุณหภูมิระหว่าง<br>25°C ถึง 35°C | อุณหภูมิระหว่าง<br>35°C ถึง 45°C | อุณหภูมิ<br>มากกว่า 45°C   | ระยะเวลารวม<br>(ชั่วโมง) | อุณหภูมิที่<br>ตำแหน่งท่อน้ำ |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| ชั้นที่ 1    | 9 ชั่วโมง<br>(8:00-16:00)        | -                                | -                          | 9                        | T1,T2                        |
| ชั้นที่ 2    | 4 ชั่วโมง<br>(8:00-11:00)        | 5 ชั่วโมง<br>(11:00-16:00)       | -                          | 9                        | T3                           |
| ชั้นที่ 3    | 3 ชั่วโมง<br>(8:00-10:00)        | 1 ชั่วโมง<br>(11:00)             | 5 ชั่วโมง<br>(12:00-16:00) | 9                        | T4                           |

ขณะที่ภาพที่ 21(b) แสดงผลการทดลองในแบบที่ 3 อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 1 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 2 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 11:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 11:00 น. ถึง 16:00 น. อุณหภูมิของน้ำในชั้นที่ 3 จะอยู่ระหว่าง 25°C ถึง 35°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8:00 น. ถึง 10:00 น. อยู่ระหว่าง 35°C ถึง 45°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่เวลา 11:00 น. อุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ 45°C ขึ้นไปเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 12:00 น. ถึง 16:00 น. ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนในการทดลองแบบที่ 3

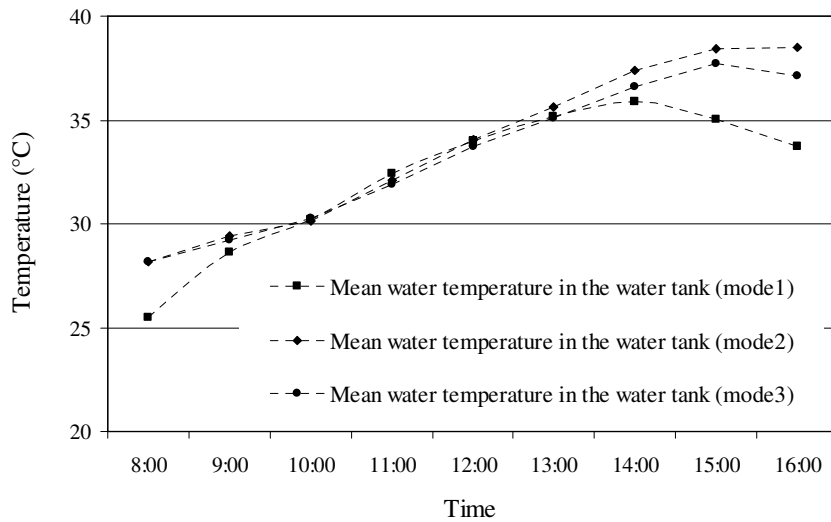
| ชั้นอุณหภูมิ | อุณหภูมิระหว่าง 25°C ถึง 35°C | อุณหภูมิระหว่าง 35°C ถึง 45°C | อุณหภูมิ มากกว่า 45°C      | ระยะเวลารวม (ชั่วโมง) | อุณหภูมิที่ ตำแหน่งท่อน้ำ |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| ชั้นที่ 1    | 9 ชั่วโมง<br>(8:00-16:00)     | -                             | -                          | 9                     | T1,T2                     |
| ชั้นที่ 2    | 4 ชั่วโมง<br>(8:00-11:00)     | 5 ชั่วโมง<br>(11:00-16:00)    | -                          | 9                     | T3                        |
| ชั้นที่ 3    | 3 ชั่วโมง<br>(8:00-10:00)     | 1 ชั่วโมง<br>(11:00)          | 5 ชั่วโมง<br>(12:00-16:00) | 9                     | T4                        |

การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ตำแหน่ง T1 ถึง T4 ในการทดลองทั้ง 3 แบบ แสดงในภาพที่ 19(b), 20(b) และ 21(b) สังเกตได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนที่ตำแหน่ง T1, T2 และ T3 จะเพิ่มสูงขึ้นในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นความลาดชันของเส้นกราฟจะแปรตามอุณหภูมิของน้ำร้อนและปริมาณแสงอาทิตย์ที่ได้รับ ณ ช่วงเวลานั้นๆ ยกเว้นอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่ง T4 และพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลองแบ่งเป็นการทดลองละ 3 ชั้น ดังนี้ ชั้นที่ 1 (ที่ตำแหน่ง T1, T2), ชั้นที่ 2 (ที่ตำแหน่ง T3) และชั้นที่ 3 (ที่ตำแหน่ง T4) ดังแสดงในตารางที่ 4 ถึง 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนดีที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 2 มี ลำดับรองลงมาเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 และ 1 ตามลำดับ และมีผลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อน



## 6. อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในถังน้ำร้อน

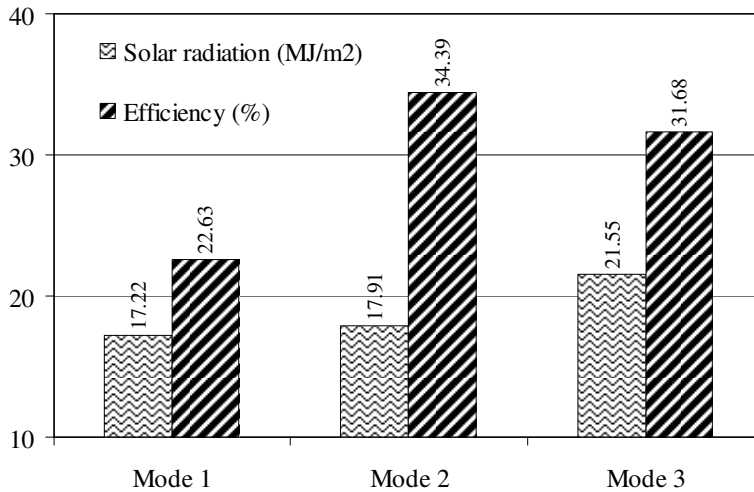
อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนที่แตกต่างกันในการทดลองทั้ง 3 แบบเป็นผลจากอุณหภูมิของน้ำร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์และอัตราการไหลของน้ำที่ท่อกลับซึ่งแตกต่างกัน อุณหภูมิของน้ำร้อนที่ท่อกลับสูงสุดเกิดในการทดลองแบบที่ 3 เนื่องจากน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์สะสมความร้อนได้มากที่สุด ในทำนองเดียวกัน อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ท่อกลับสูงสุดเกิดในการทดลองแบบที่ 1 รองลงมาเกิดในการทดลองแบบที่ 2 และต่ำสุดในการทดลองแบบที่ 3 เนื่องจากการทดลองแบบที่ 2 ได้รับความร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ในปริมาณที่เหมาะสมกับระบบที่ถังน้ำร้อนขนาด 200 ลิตร มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 การทดลองที่เหลือ จึงมีการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนดีที่สุด เมื่อคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อน โดยสมการที่ (1) พบว่า การทดลองแบบที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในถังน้ำร้อนสูงสุด และรองลงมาในการทดลองแบบที่ 3 และ 1 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 22 ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อน



ภาพที่ 22 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำภายในถังน้ำร้อน

## 7. ประสิทธิภาพของระบบ

ประสิทธิภาพของระบบแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพของระบบและปริมาณแสงอาทิตย์ในระหว่างวันที่ทำการทดลอง

ประสิทธิภาพของระบบคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ (1) ถึง (4) พบว่า ประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุดเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 2 ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของน้ำที่กลับสูงที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 18 แต่เนื่องจากอัตราการไหลของน้ำร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์ในการทดลองดังกล่าวอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้นการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนจึงต่ำกว่าการทดลองในแบบที่ 2 เป็นผลให้เมื่อคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนจากหัวข้อที่ผ่านมามีค่าสูงสุดจึงไม่เกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 แต่เกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 2 แบบที่ 3 และแบบที่ 1 ตามลำดับ และเมื่อแทนค่าผลการคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนที่ได้เพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพของระบบ จึงพบว่า ประสิทธิภาพของระบบที่คำนวณได้สูงที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 2 รองลงมาคือในการทดลองแบบที่ 3 และต่ำที่สุดเกิดในการทดลองแบบที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพของระบบ

| การทดลอง         | วันที่ทำการทดลอง | ปริมาณแสงอาทิตย์<br>MJ/m <sup>2</sup> | ประสิทธิภาพ<br>ของระบบ% |
|------------------|------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| การทดลองแบบที่ 1 | 23 มีนาคม 51     | 17.22                                 | 22.62                   |
| การทดลองแบบที่ 2 | 21 มีนาคม 51     | 17.91                                 | 34.39                   |
| การทดลองแบบที่ 3 | 20 มีนาคม 51     | 21.54                                 | 31.67                   |

## สรุป

การควบคุมอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ให้ช้าลงในการทดลองแบบที่ 2 และ 3 ทำให้น้ำในท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์สะสมความร้อนได้มากขึ้น เพราะฉะนั้นอุณหภูมิของแผ่นดูดความร้อนใกล้ท่อรวมด้านบน อุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดความร้อน ใกล้ท่อรวมด้านบนและด้านล่าง และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ท่อกลับ จึงเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองแบบที่ 1 และมีค่าสูงที่สุดใน การทดลองแบบที่ 3 เนื่องจากมีอัตราการไหลของน้ำในท่อน้ำต่ำกว่าการทดลองแบบที่ 2

ประสิทธิภาพของระบบและอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนซึ่งแตกต่างกันในการทดลองแต่ละแบบ เนื่องจากการควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนดังแสดงในภาพที่ 17 ถึง 19 พบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิของน้ำในถังน้ำร้อนดีที่สุดที่เกิดในการทดลองแบบที่ 2 มี ลำดับรองลงมาเกิดขึ้นในการทดลองแบบที่ 3 และ 1 ดังนั้นประสิทธิภาพของระบบและอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำในถังน้ำร้อนสูงสุดจึงเกิดในการทดลองแบบที่ 2 แบบที่ 3 และแบบที่ 1 เนื่องจากปริมาณน้ำร้อนที่ได้รับจากแผงรับแสงอาทิตย์ของการทดลองแบบที่ 2 มีค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับถังน้ำร้อนที่ทำการวิจัย

รูปแบบของการปรับวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ที่ท่อน้ำภายในแผงรับแสงอาทิตย์ของการทดลองแบบที่ 2 สามารถเพิ่มสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดนี้ได้มากที่สุด จึงน่าจะใช้เป็นแนวทางสำหรับออกแบบแผงรับแสงอาทิตย์เพื่อพัฒนาของสมรรถนะให้สูงขึ้น โดยแนวการออกแบบใหม่คือการบีบที่ปลายด้านบนในแผงรับแสงอาทิตย์ โดยบีบที่ลงครึ่งหนึ่งในตำแหน่ง ท่อเว้นท่อ ซึ่งจะได้สร้างระบบใหม่และทดสอบเพิ่มเติมต่อไปในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประเภทเงินรายได้และทุนสนับสนุนการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

## เอกสารอ้างอิง

- โครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียม สำหรับประเทศไทย, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2542-2544
- มารีน่า มะหนิ, 2542, “วิศวกรรมพลังงานแสงอาทิตย์” มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- พิสิษฐ์ เตชะรุ่งไพศาล และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์, 2547. “ผลของตำแหน่งการต่อท่อน้ำร้อนจากแผงรับแสงอาทิตย์เข้าสู่ถังน้ำร้อนแบบวางนอนต่อสมรรถนะของเครื่องทำน้ำร้อนโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์”. *วิศวกรรมสาร มข.* 31 (1): 56-71.
- Abdul-Jabbar, N. Khalifa and M. M. Mehdi. June 1999. **On the verification of one dimensional heat flow in a horizontal thermosyphon storage tank.** *Energy Conversion and Management* 40:9, Pg. 961-974.
- Close, D.J. January-March 1962. **The performance of solar water heaters with natural circulation** *Solar Energy* 6:1, Pg. 33-40.
- Gupta, C. L. and H. P. Garg. December 1968. **System design in solar water heaters with natural circulation.** *Solar Energy* 12:2 Pg. 163-170.
- Helwa, N. H., A. M. Mobarak, M. S. El-Sallak and H. H. El-Ghetany. 1995. **Effect of hot-water consumption on temperature distribution in a horizontal solar water storage tank.** *Applied Energy* 52:2-3, Pg. 185-197.
- Morrison, G. L., and D. B. J. Ranatunga. 1980. **Thermosyphon circulation in solar collectors** *Solar Energy* 24:2 Pg. 191-198.
- Pannigul, P. 1999. **A study of temperature and flow distribution in a natural circulation solar water heater system,** Master Degree Thesis, Asian Institute of Technology, School of Environment, Resources and development, Bangkok, Thailand.
- Pisit Techarungpaisan, Bancha Buddadee, Sivanappan Kumar, October 19-20, 2005, **Investigation of Water Flow Rate in a Thermosyphon Solar Water Heater,** The 19<sup>th</sup> Annual Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand., Songkla, Thailand.
- Riazi, Mohammad R. and Jalil Razavi. February. 1997. **Performance of Polypropylene and Steel Tubes in Solar Water Heaters with Natural Circulation,** *Energy Sources*, 19:2 Pg. 147 – 152.
- Santos, B. M., M. R. Queiroz and T. P. F Borges, April-June, 2005. **A solar collector**

design procedure for crop drying *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 22:2, Pg. 277-284.

Shariah, A. M., and G. O. G. Löf. March 1996. The optimization of tank-volume-to-collector-area ratio for a thermosyphon solar water heater. *Renewable Energy* 7:3 Pg 289-300.

Shitzer, A., D. Kalmanoviz, Y. Zvirin and G. Grossman. 1979. Experiments with a flat plate solar water heating system in thermosyphonic flow. *Solar Energy* 22:1, Pg. 27-35.

Techarungpaisan, P., U.Teeboonma and R.Khunthongjan, 30 August - 1 September 2006 Investigation on water cooling and heating performance of an unglazed metallic roof panel solar water heater, The 5<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Energy Technologies, Vincenza, Italy

### ภาคผนวก

ตารางแสดงรายละเอียดชุดทดลองและรูปแบบการทดลอง

| อุปกรณ์                    | การทดลองแบบที่ 1                                     | การทดลองแบบที่ 2                                     | การทดลองแบบที่ 3                                     |
|----------------------------|--|--|--|
| <b>ก. ถังน้ำร้อน</b>       |  |  |  |
| - ปริมาตร                  | 200 Liters   | 200 Liters   | 200 Liters   |
| - ขนาด                     | เส้นผ่านศูนย์กลาง 48 cm. ยาว 116 cm.                 | เส้นผ่านศูนย์กลาง 48 cm. ยาว 116 cm.                 | เส้นผ่านศูนย์กลาง 48 cm. ยาว 116 cm.                 |
| - วัสดุ                    | ทำจากสแตนเลสความหนา 1 mm.                            | ทำจากสแตนเลสความหนา 1 mm.                            | ทำจากสแตนเลสความหนา 1 mm.                            |
| - ฉนวน                     | ไมโครไฟเบอร์หนา 2.45 cm. หุ้มทับด้วยสังกะสีหนา 1 mm. | ไมโครไฟเบอร์หนา 2.45 cm. หุ้มทับด้วยสังกะสีหนา 1 mm. | ไมโครไฟเบอร์หนา 2.45 cm. หุ้มทับด้วยสังกะสีหนา 1 mm. |
| <b>ข. ท่อส่งและท่อกลับ</b> |  |  |  |
| - ขนาด                     | เส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4"                                | เส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4"                                | เส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4"                                |
| - วัสดุ                    | ท่อทองแดง  | ท่อทองแดง  | ท่อทองแดง  |
| - ฉนวน                     | แอโรเฟลคหนา 3/4"                                     | แอโรเฟลคหนา 3/4"                                     | แอโรเฟลคหนา 3/4"                                     |

ตารางแสดงรายละเอียดชุดทดลองและรูปแบบการทดลอง (ต่อ)

| อุปกรณ์                   | การทดลองแบบที่ 1             | การทดลองแบบที่ 2             | การทดลองแบบที่ 3             |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>ค.แผงรับแสงอาทิตย์</b> |                              |                              |                              |
| -ขนาดแผง                  | 780x1820x100 mm.             | 780x1820x100 mm.             | 780x1820x100 mm.             |
| - ท่อน้ำท่อที่ 1          | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    |
| - ท่อน้ำท่อที่ 2          | เปิด 100%                    | เปิด 50%                     | เปิด 0%                      |
| - ท่อน้ำท่อที่ 3          | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    |
| - ท่อน้ำท่อที่ 4          | เปิด 100%                    | เปิด 50%                     | เปิด 0%                      |
| - ท่อน้ำท่อที่ 5          | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    |
| - ท่อน้ำท่อที่ 6          | เปิด 100%                    | เปิด 50%                     | เปิด 0%                      |
| - ท่อน้ำท่อที่ 7          | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    | เปิด 100%                    |
| -แผ่นดูดความร้อน          | เหล็กแผ่นทาสีดำความหนา 1 mm. | เหล็กแผ่นทาสีดำความหนา 1 mm. | เหล็กแผ่นทาสีดำความหนา 1 mm. |
| - ฉนวน                    | ไมโครไฟเบอร์ 3 cm.           | ไมโครไฟเบอร์ 3 cm.           | ไมโครไฟเบอร์ 3 cm.           |
| - กระจก                   | กระจกใส หน้า 5 mm.           | กระจกใส หน้า 5 mm.           | กระจกใส หน้า 5 mm.           |