ระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับการล้างแบบ Cleaning In Place ของศูนย์รับน้ำนมดิบ

จาตุพงศ์ วาฤทธิ์ [1,*] สมเกียรติ จตุรงค์ล้ำเลิศ [2] ชานนท์ เวียนทอง [3]
อานนท์ สุจริต [3] และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี [4]
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์รับน้ำนมดิบแบบ Cleaning In Place (CIP) ของบริษัทตัวอย่างในจังหวัดเชียงใหม่ เลือกระบบการทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีขนาด 4 m^2 มีถังน้ำสะสมความร้อนขนาด 360 ลิตร อัตราการไหลแบบบังคับที่ 1 lpm ผลการทดสอบพบว่าตัวเก็บรังสีให้พลังงานความร้อนสะสมตลอดช่วงเวลารับรังสี 8 ชั่วโมงที่ 42.5 MJ เมื่อติดตั้งที่ศูนย์รับน้ำนมดิบในเดือนกุมภาพันธ์ 2550 ระบบที่ออกแบบสามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมได้ 30.3 ˚C คลาดเคลื่อนไปจากทฤษฎี 1.3% ชุดทดสอบใช้เงินลงทุนขั้นต้น 80,000 บาท ลดค่าใช้จ่ายเพื่อทำความร้อนในการทำความสะอาดอุปกรณ์รับน้ำนมดิบได้ปีละ 21,900 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 3.7 ปี และมีอัตราผลตอบแทนภายในที่ 27.2%

คำสำคัญ : ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ / ระบบทำน้ำร้อน / ระบบ CIP / ศูนย์รับน้ำนมดิบ

---

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

[2] อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

[3] ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

[4] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาพืชไร่

[*] ผู้รับผิดชอบบทความ Email: jatuphon@mju.ac.th

Water Heater System using Solar Collector for Cleaning In Place (CIP) Equipment of Raw Milk Collecting Center

Jatuphong Varith [1,*], Somkiat Jaturonglumlert [2], Chanon Vientong [3], Anon Sutjarit [3], and Natthawud Dussadee [4]

Maejo University, Amphur Sunsai, Chiang Mai 50290

Abstract

This research dealt with a study and design of water heating system using solar collector suitable for the CIP equipment at raw milk collecting center of a dedicated company in Chiang Mai. The heating system was designed with the solar collector size of 4 m^2 with a collecting tank of 360 l and flow rate of 1 lpm. Result shows that the solar collector provided an accumulating thermal energy during 8-hr collecting period of 42.5 MJ. Appling the system at the raw milk collecting center, temperature of the collecting tank was increased by 30.3 ^{o}C, deviated from a theoretical temperature by 1.3%. The initial investment of test rig was 80,000 bahts. Annual heating cost for the CIP was saved by 21,900 bahts/year with a pay back period of 3.7 years and an internal rate of return of 27.2%

Keywords : Solar Collector / Water Heating System / CIP System / Raw Milk Collecting Center

[1] *Assistant Professor, Department of Agricultural and Food Engineering.*

[2] *Lecturer, Department of Agricultural and Food Engineering.*

[3] *Research Assistant, Department of Agricultural and Food Engineering.*

[4] *Assistant Professor, Department of Agronomy.*

[*] *Corresponding author, Email:jatuphon@mju.ac.th*

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนที่ไม่มีแนวโน้มว่าจะหมดไปในอนาคตอันใกล้ การเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานความร้อนที่นิยมใช้กันทั่วไปคือการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในระบบทำความร้อนต่างๆ ได้ ในปัจจุบันการใช้ระบบความร้อนมีบทบาทอย่างยิ่งในงานอุตสาหกรรมเกษตร โดยเฉพาะด้านของการทำความสะอาดเครื่องมือที่ถูกสุขลักษณะ เพื่อลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในศูนย์รับน้ำนมดิบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิน้ำในการทำความสะอาดระบบแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กับการทำ Cleaning In Place (CIP) จึงน่าจะเป็นแนวทางการใช้พลังงานทดแทนเพื่อลดต้นทุนการผลิตนมสดผ่านการฆ่าเชื้อบรรจุในภาชนะปิดในขั้นตอนการรับวัตถุดิบได้

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน มีช่วงการทำอุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วงประมาณ 30-80 ˚C [1] ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมากมาย เช่น ค่ารังสีอาทิตย์ ค่าการสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีและถังเก็บน้ำร้อน อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ ตำแหน่งการวางมุมรับรังสี อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสี เป็นต้น จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าได้มีการรายงานตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ ตัวอย่างเช่น ชาญวิทย์ [2] ทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีที่ทำมาจากแผงระบายความร้อนในรถยนต์มีพื้นที่ขนาด 0.2 ตารางเมตร จำนวน 10 แผง มาต่อเข้าด้วยกันแบบอนุกรมและแบบขนานร่วมกัน โดยใช้อัตราการไหล 0.02 kg/m^2 และได้เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบกันทั้ง 3 ระบบ โดยระบบที่ 1 เป็นระบบที่ทดสอบตามมาตรฐานของ ASHRAE 93-77 ได้ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ = 0.693 และค่า F_RU_L = 7.1764 W/m^2 ˚C ระบบที่ 2 เป็นระบบที่มีการป้อนน้ำเย็นเข้าผสมในช่วงที่ต่ออนุกรมของชุดระบายความร้อนตัวที่ 2 กับ 3, 3 กับ 4 และ 4 กับ 5 ที่อัตราการไหล 10% ของอัตราการไหลที่ออกจากตัวเก็บรังสีตามลำดับ ได้ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ = 0.6984 และค่า F_RU_L = 6.8086 W/m^2 ˚C และระบบที่ 3 เป็นสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นราบที่มีขายในประเทศซึ่งมีค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ = 0.795 และค่า F_RU_L = 12.02 W/m^2 ˚C พบว่าระบบมีสมรรถนะเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 37.32 38.73 และ 34.63% ตามลำดับ ซึ่งประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าของตัวเก็บรังสีทางการค้าที่ โสภณาทและเอกลักษณ์ [3] ได้ศึกษากับระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์บนอาคารสุจิณโณ ในโรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ ที่มีการใช้งานจำนวน 30 และ 90 แผง พบว่ามีประสิทธิภาพของระบบเท่ากับ 41% และ 36% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ธนาคมและทวีคุณ [4] ได้ศึกษาจำลองการทำความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าเมื่อตัวเก็บรังสีอาทิตย์วางอยู่ในมุมและตำแหน่งที่เหมาะสมภายใต้ปริมาณแสงอาทิตย์ 400 W/m^2 อุณหภูมิของน้ำสูงสุดที่ได้คือ 74.8 ˚C และประสิทธิภาพของระบบที่มุมเอียง 5 15 และ 30 ˚ ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 53 56 และ 51% ตามลำดับ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการติดตั้งออกแบบระบบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสม จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

ระบบ CIP เป็นระบบการล้างอุปกรณ์และเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่กับที่ โดยเฉพาะระบบที่ใช้ท่อลำเลียงขนส่งวัตถุดิบเหลวในโรงงานนมสด การทำ CIP เป็นขั้นตอนการทำให้ปลอดเชื้อในระบบท่อส่งนม ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ โดยไม่ต้องมีการถอดประกอบอุปกรณ์ ในขั้นตอนการทำ CIP แบบเต็มรูปแบบนั้น จะต้องใช้น้ำร้อนอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 80 C ร่วมกับการล้างหมุนเวียนด้วยด่าง กรด และน้ำเย็นส่งกำลังด้วยปั๊มแรงดันสูง เมื่อเปรียบเทียบกับศูนย์รับน้ำนมดิบซึ่งเป็นโรงพักและรวบรวมน้ำนมดิบจากเกษตรกรขนาดเล็กที่อยู่ใกล้ฟาร์มผลิตนมสด เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นเครื่องมือที่ดูแลรักษาง่าย และใช้ผู้ดูแลที่ไม่ต้องมีความรู้ทางเทคนิคสูงมากนัก แต่ผ่านการฝึกฝนการปฏิบัติงานตามขั้นตอนก็สามารถดำเนินการตามระบบได้ ดังนั้นการทำ CIP ในศูนย์รับน้ำนมดิบจึงเป็นการทำ CIP แบบไม่เต็มรูปแบบ แต่ต้องเพียงพอที่จะทำให้ไม่เกิดการตกค้างของนมสดในระบบท่อและอุปกรณ์อันจะก่อให้เกิดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรคได้ ดังนั้นการประยุกต์ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อร่วมทำระบบความร้อนในศูนย์รับน้ำนมดิบจึงน่าจะเป็นแนวทางที่เหมาะสม เนื่องจากมีต้นทุนไม่สูงนักและต้องการการดูแลรักษาต่ำ แต่ยังไม่

พบรายงานในการประยุกต์ใช้ระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงเป็นการศึกษาตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำและอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสี รวมทั้งผลการทดลองและการประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อให้สามารถออกแบบการใช้งานตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมกับการติดตั้งกับสภาพการใช้งาน ณ ศูนย์รับน้ำนมดิบตัวอย่างในจังหวัดเชียงใหม่ โดยมีขอบเขตของการดำเนินงานวิจัยในช่วงเดือนตุลาคม 2549 จนถึง เดือนมีนาคม 2550

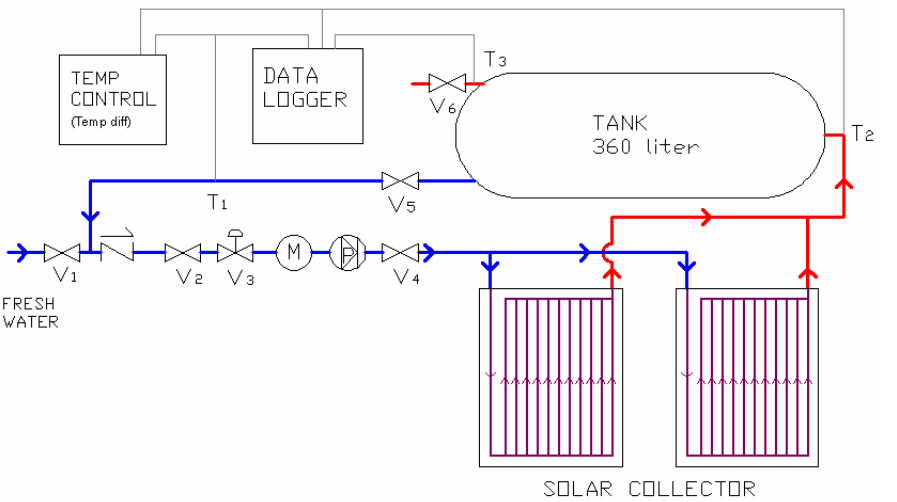
2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

2.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบแผ่นเรียบขนาด 2 m^2 ดังรูปที่ 1 (ทีซัส อินเตอร์เนชันแนล จำกัด, เชียงใหม่) จำนวน 2 แผง ต่อเข้าด้วยกันแบบขนาน เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนน้อยกว่าแบบอนุกรม [5] ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ประกอบไปด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.52 mm ยาว 1.97 m จำนวน 44 ท่อ เสริมด้วยครีบอลูมิเนียม มีฉนวนกันความร้อนแบบไยแก้วหนา 4 mm ติดอยู่ด้านล่างป้องกันการสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสี ถังเก็บสะสมน้ำร้อนเป็นถังขนาด 360 ลิตร ทำจากสแตนเลสม้วนขึ้นรูป หุ้มด้วยฉนวนโพลียูรีเทน ท่อน้ำร้อนจะใช้ชนิดโพลิเอททิลีนขนาด 3/4 นิ้ว ใช้ปั๊มหมุนเวียนน้ำรุ่น UPS 25 - 50 (Grundfos DK A/S, Denmark) เพื่อหมุนเวียนน้ำในระบบ

2.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบบังคับและแบบธรรมชาติ

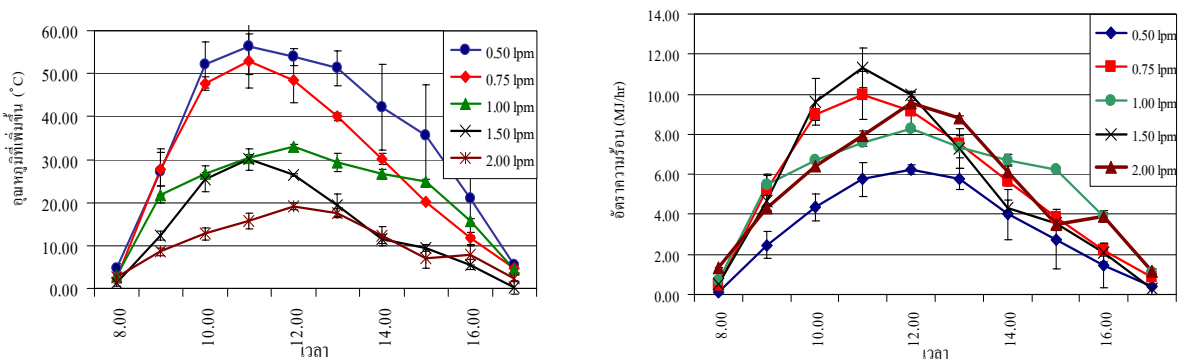
เนื่องจากการหมุนเวียนน้ำในระบบแบบบังคับและแบบธรรมชาติ (เทอร์โมไซฟอน) อาจมีผลต่อสมรรถนะการทำความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จึงได้ทดสอบการไหลเวียนของน้ำทั้ง 2 แบบพร้อมทั้งหาอัตราการไหลที่เหมาะสม การทดสอบได้ติดตั้งอุปกรณ์แก่ระบบทำความร้อนดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Datalogger รุ่น PHL (Fuji Electric Co. Ltd, Japan) มีความแม่นยำ ± 0.25% ของช่วงการวัด 0-400 ˚C มีความเที่ยงตรง ± 0.1 ˚C และมีความละเอียด 0.1 ˚C เพื่อเก็บข้อมูลอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งต่างๆ และวาล์วปรับทิศทางและอัตราการไหล ทดสอบหาพลังงานความร้อนโดยใช้น้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 25 ˚C บันทึกค่าอุณหภูมิจุดที่ T_1 T_2 และ T_3 การทดสอบระบบการหมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติโดยใช้หลักการของเทอร์โมไซฟอนไม่ใช้ปั๊มน้ำ และการหมุนเวียนน้ำแบบบังคับโดยใช้ปั๊มน้ำเพื่อช่วยในการหมุนเวียนน้ำ คำนวณพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีสร้างได้โดยทำการทดสอบที่อัตราการไหล 1 lpm โดยสมการที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบระบบทดสอบเก็บข้อมูลสมรรถนะการไหลเวียนแบบบังคับและแบบธรรมชาติ
ตัวอักษรย่อ : V-วาล์ว T-เทอร์โมคัฟเปิล และ M-มิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ

รูปที่ 3 (ก.) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านตัวเก็บรังสีที่มีการหมุนเวียนน้ำทั้ง 2 แบบเพิ่มขึ้นจาก 23 ˚C จนสูงสุดที่ประมาณ 57 ˚C อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงต้นของระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าแบบบังคับเนื่องจากการไหลแบบธรรมชาตินั้นอาศัยหลักการของเทอร์โมไซฟอนที่จะต้องอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิจึงจะเกิดการหมุนเวียนแบบธรรมชาติได้ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถทำได้ของระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติ รูปที่ 3 (ข.) ที่เพิ่มขึ้นเพียงน้อย (< 2 MJ/hr) เนื่องจากอุณหภูมิยังไม่สูงมากนักในช่วงเวลา 08.00-09:00 น. แต่จะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อเวลา 12:00 น. เนื่องจากมีความแตกต่างของอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมและระบบมาก ช่วงเวลาตั้งแต่ 08.00-16.00 น. ระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติสามารถสร้างพลังงานความร้อนสะสมในระบบได้ประมาณ 56.2 MJ ในขณะที่ระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบบังคับสามารถสร้างพลังงานความร้อนสะสมได้ประมาณ 58.0 MJ สูงกว่าระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบธรรมชาติอยู่เล็กน้อย รูปที่ 2 (ข.) ยังแสดงให้เห็นว่าอัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับกับค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยที่วัดได้ในช่วง 9:00-17:00 น. คือ ค่ารังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้นจนถึงเวลา 12:00 น. แล้วจึงลดลงเช่นเดียวกับอัตราความร้อนที่ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารังสีอาทิตย์มีผลโดยตรงกับอัตราความร้อนในระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์นี้

3.2 อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีที่เหมาะสม



ก. ข.

รูปที่ 4 (ก.)-อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ (ข.)-อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลต่างๆ ; จุดบนกราฟแสดงค่าเฉลี่ยและแท่งเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ครั้ง

รูปที่ 4 (ก.) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่อัตราการไหลทุกอัตราเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด ณ ช่วงเวลาประมาณ 12:00 น. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามอัตราการไหลของน้ำ คือ กลุ่มที่ 1 มีการเพิ่มของอุณหภูมิของน้ำสูงสุดประมาณ 56 ˚C ที่อัตราการไหล 0.5 และ 0.75 lpm ส่วนกลุ่มที่ 2 มีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำสูงสุดอยู่ที่ 33 ˚C ที่อัตราการไหล 1.0, 1.5 และ 2.0 lpm อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราการความร้อนที่ได้จากรูปที่ 4 (ข.) พบว่าที่อัตราการไหล 0.5 lpm ระบบสร้างอัตราความร้อนได้สูงสุดประมาณ 6.2 MJ/hr ต่ำกว่าที่อัตราการไหลอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีอัตราการไหลที่ต่ำ ทำให้ได้ค่าตัวคูณในสมการอัตราความร้อนจากสมการที่ 1 มีค่าต่ำไปด้วย ผลที่ได้จึงทำให้อัตราความร้อนต่ำ ส่วนที่อัตราการไหล 0.75 1.0 1.5 และ 2.0 lpm มีอัตราความร้อนสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อยตั้งแต่ 8.3 จนถึง 11.4 MJ/hr ที่ช่วงเวลา 11.00 จนถึง 12:00 น. ส่วนพลังงานความร้อนสะสมที่ตัวเก็บรังสีสร้างได้ในช่วงตั้งแต่ 08:00-17:00 น. นั้น พบว่าอัตราการไหล 1.0 lpm ระบบให้พลังงานความร้อนสะสมออกมาสูงสุดเป็น 54.2 MJ และรองลงมาคือที่อัตราการไหล 0.75, 1.50, 2.00

เมื่อติดตั้งเสร็จได้เก็บข้อมูลอุณหภูมิน้ำเข้าและออกตัวเก็บรังสี และอุณหภูมิเฉลี่ยในถังน้ำสะสมความร้อนนำผลที่ได้มาวิเคราะห์หาพลังงานความร้อนสะสมในถังตามสมการที่ 1 และวัดอุณหภูมิน้ำในถังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิทำนายของน้ำในถังสะสมความร้อนตามสมการที่ 2 ดังนี้ [5]

$$T_{sf} = T_{si} + \frac{\Delta t}{(MC_p)T}(\dot{Q}_{coll} - \dot{Q}_{storage} - \dot{Q}_{loss}) \quad (2)$$

เมื่อ

$$\dot{Q}_{coll} = A_c[F_R(\tau\alpha)_e I_T - F_R U_L(T_{si} - T_a)]S_c \quad (3)$$

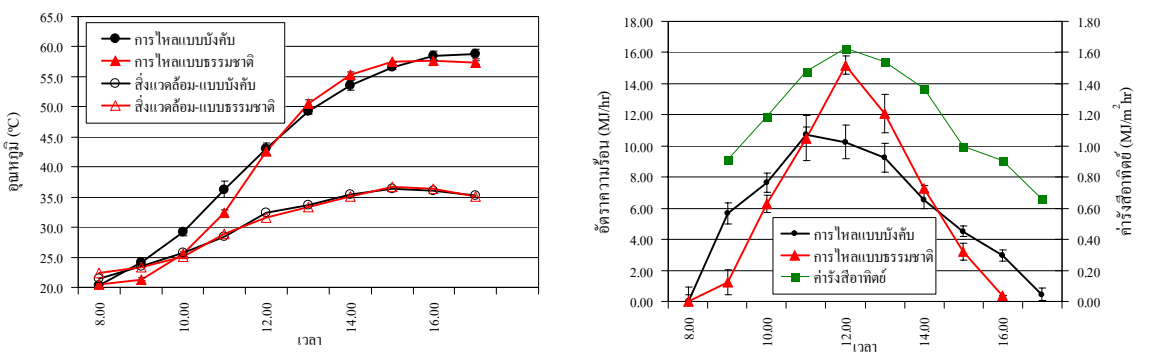
$$\dot{Q}_{storage} = \dot{m}_L C_p(T_{si} - T_L)S_L \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{loss} = (UA)_T(T_{si} - T_a) \quad (5)$$

เมื่อ $(MC_p)_T$ คือ ผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในถัง (MJ/˚C) T_{si}, T_{sf} คือ อุณหภูมิของน้ำในถังเก็บสะสมที่เวลาเริ่มต้น และเวลาสุดท้ายของช่วงเวลา (˚C) Δt คือผลต่างช่วงระยะเวลา (hr) $\dot{m}_L$ คืออัตราการใช้น้ำ (kg/hr) T_L คืออุณหภูมิของน้ำเย็นที่เติมเข้าถังเก็บสะสม (˚C) $(UA)_T$ คือ ผลคูณสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมและพื้นที่ผิวของถังเก็บสะสม (MJ/hr ˚C) S_c คือ Control function เป็น 0 เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่นำมาใช้ประโยชน์มีค่า 0 S_L คือ Control function เป็น 0 เมื่ออุณหภูมิ $T_{si} \leq T_L$ หรือเป็น 1 เมื่ออุณหภูมิ $T_{si} > T_L$ F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน $(\tau\alpha)_e$ คือ ประสิทธิภาพเชิงแสงของตัวเก็บรังสี I_T คือค่าความเข้มของรังสีอาทิตย์รวมรายชั่วโมงที่ตกกระทบตั้งฉากบนระนาบเอียง (MJ/m^{2}h) A_c คือ พื้นที่ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (m^2) T_a คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (˚C) ค่า $F_R(\tau\alpha)_e$ และ $F_R U_L$ ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์มีค่าเท่ากับ 0.802 และ 10.37 W/m^2 ˚C ตามลำดับ ค่า I_T ใช้ค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์โดยประมาณของเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 ของจังหวัดเชียงใหม่ [6]

3. ผลการทดลอง

3.1 ระบบที่หมุนเวียนน้ำแบบบังคับและแบบธรรมชาติ



ก. ข.

รูปที่ 3 (ก.)-อุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (ข.)-อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่มีการหมุนเวียนน้ำแบบบังคับและแบบธรรมชาติ จุดบนกราฟแสดงค่าเฉลี่ยและแท่งเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ครั้ง

$$\dot{Q}_{coll} = \dot{m}_f C_p (T_2 - T_1) \quad \textbf{(1)}$$

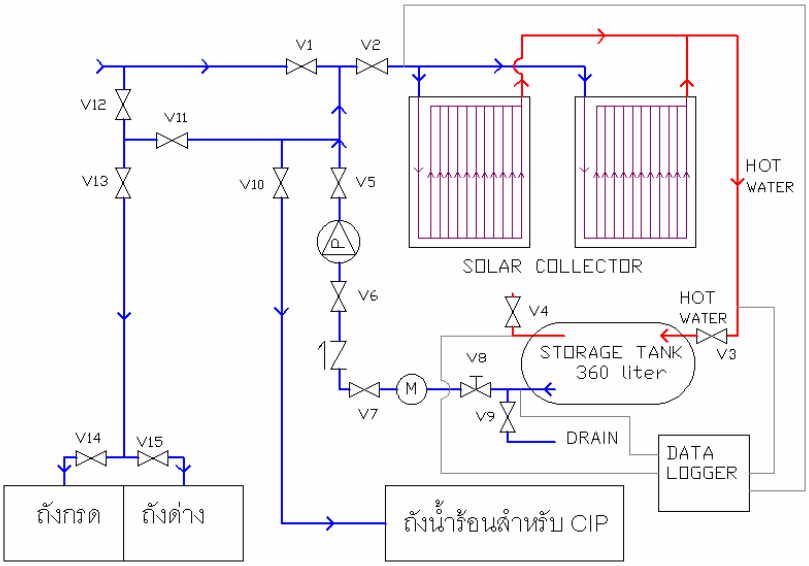
โดยที่ $\dot{Q}_{coll}$ คือ อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี (MJ/hr) $\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสี (kg/hr) C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (MJ/kg ˚C) T_1 คือ อุณหภูมิของน้ำร้อนที่เข้าสู่ถัง (˚C) และ T_2 คือ อุณหภูมิของน้ำเย็นที่ออกจากถัง (˚C)

2.3 การทดสอบหาอัตราการไหลผ่านตัวเก็บรังสีที่เหมาะสม

เนื่องจากอัตราการไหลเวียนของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีที่เหมาะสมอาจส่งผลต่ออัตราความร้อนที่ได้ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาอัตราการไหลผ่านตัวเก็บรังสีที่เหมาะสม ในการทดลองนั้นได้ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 1 อัตราการไหลถูกปรับตั้งไว้ที่ 0.5 0.75 1.0 1.5 และ 2.0 lpm เก็บข้อมูล ณ ตำแหน่ง T_1 และ T_2 และใช้การคำนวณอัตราความร้อนตามสมการที่ 1 น้ำที่ไหลผ่านตัวเก็บรังสี จะถูกปล่อยทิ้ง ไม่เวียนกลับเข้าสู่ถังสะสมความร้อน

2.4 การติดตั้งและทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ณ ศูนย์รับน้ำนมดิบร่วมกับระบบ CIP

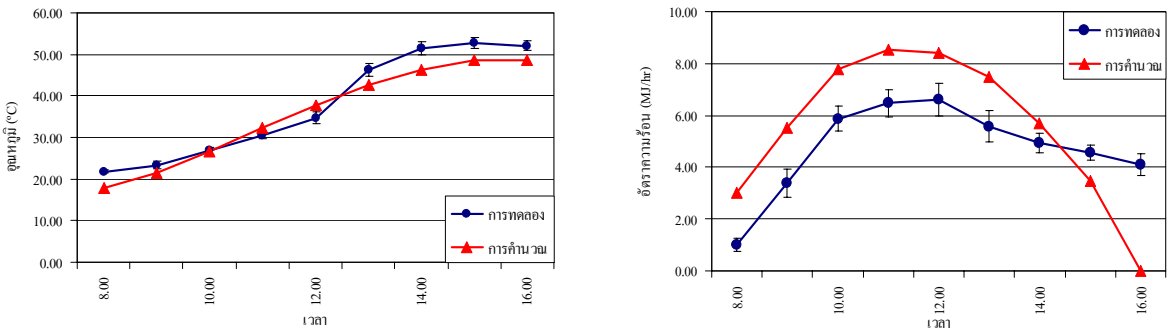
จากการทดสอบระบบต่างๆ ในขั้นต้น สามารถเลือกใช้เงื่อนไขการออกแบบติดตั้งตัวเก็บรังสีให้ประสิทธิภาพมากที่สุดในการทำน้ำร้อนให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ประมาณ 50-60˚C เพื่อใช้ในงาน CIP ของศูนย์รับน้ำนมดิบตัวอย่าง ณ อ.สันกำแพง จ.เชียงใหม่ ช่วงเวลาในการทำน้ำร้อนตั้งแต่ 8:00-16:00 น. และในช่วงเวลาในการใช้น้ำร้อนเพื่อทำ CIP คือ 19.00-20.00 น. ใช้น้ำร้อนวันละ 360 ลิตร เลือกเงื่อนไขที่ได้ทดสอบขั้นต้น ได้แก่การติดตั้งถังสะสมระบบหมุนเวียนน้ำและอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีที่เหมาะสม เพื่อประกอบการออกแบบระบบ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงผู้ปฏิบัติงานที่มีความรู้ด้านเทคนิคด้วย และออกแบบการต่อเชื่อมเข้ากับระบบ CIP ของโรงงานโดยไม่ต้องดัดแปลงเพิ่มเติมดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อใช้ในศูนย์รับน้ำนมดิบ

และ 0.50 lpm ให้ค่าพลังงานความร้อนออกมา 53.9, 53.7, 53.1 และ 33.4 MJ ถึงแม้ว่าที่อัตราการไหลต่ำๆ เช่น 0.5 lpm จะให้ค่าอุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้นสูงที่สุด แต่เมื่อคำนวณพลังงานสะสมตลอดช่วงการรับรังสีแสงอาทิตย์แล้วพบว่าพลังงานความร้อนสะสมไม่ได้สูงไปด้วยเนื่องจากมีอัตราการไหลที่ต่ำ สอดคล้องกับอัตราความร้อนที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา ดังนั้นอัตราการไหลที่ 1 lpm จึงเป็นอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสีที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสะสมสูงเพียงพอที่จะนำไปใช้งานออกแบบเพื่อทำน้ำร้อนในระบบ CIP ของศูนย์รับน้ำนมดิบต่อไป

3.3 ผลการทดสอบระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ศูนย์รับน้ำนมดิบ



ก. ข.

รูปที่ 5 (ก.) อุณหภูมิของน้ำในถังสะสมความร้อน และ (ข.) อัตราความร้อนของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์เมื่อติดตั้งที่ศูนย์รับน้ำนมดิบ จุดบนกราฟแสดงค่าเฉลี่ยและแท่งเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ครั้ง

ในการติดตั้งระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ศูนย์รับน้ำนมดิบนั้น ได้ติดตั้งตัวเก็บรังสีอาทิตย์ไว้บนหลังคาโรงเรือนและแยกถังสะสมความร้อนไว้ภายในโรงเรือนเพื่อสะดวกสำหรับผู้ปฏิบัติงานที่จะสามารถเปิด-ปิดวาล์วลดแรงดันอากาศในระบบก่อนทำการเดินปั๊มหมุนเวียนน้ำในระบบด้วยอัตราการไหล 1 lpm เมื่อวัดอุณหภูมิน้ำเข้าและออกถังสะสมความร้อนพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำในถังดังรูปที่ 5 (ก.) ในช่วงเวลา 8:00-17:00 น. จาก 23.0 ˚C ขึ้นไปจนสูงสุดที่ประมาณ 53.3 ˚C เพิ่มขึ้นประมาณ 30.3 ˚C สอดคล้องกับการทดลองขั้นต้นที่แสดงให้เห็นว่าอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิน้ำที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ทำได้จะอยู่ที่ประมาณ 33 ˚C เมื่อคำนวณตามทฤษฎีการสะสมความร้อนจากสมการ 2-5 แล้วพบว่าอุณหภูมิของน้ำที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองซึ่งจะได้ค่าอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 50 ˚C และมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยที่ 1.3%

เมื่อพิจารณาอัตราความร้อนของถังน้ำสะสมความร้อนดังรูปที่ 5 (ข.) ซึ่งใช้วิธีคำนวณต่างกัน 2 วิธี คือ อัตราความร้อนที่คำนวณจากผลการทดลอง (สมการที่ 1) และที่คำนวณตามทฤษฎีอัตราความร้อนของถังน้ำสะสมความร้อน (สมการที่ 3) พบว่าแนวโน้มของการคำนวณอัตราความร้อนของน้ำในถังน้ำสะสมความร้อนทั้งสองวิธีเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎีจะสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากการใช้สมการที่ 3 ได้มีการประมาณการค่าความเข้มของแสงอาทิตย์จากค่าเฉลี่ยของเดือนกุมภาพันธ์ 2548 แต่ไม่ทราบอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกถังน้ำสะสมความร้อน ส่วนการคำนวณอัตราความร้อนเชิงการทดลองจากสมการที่ 1 นั้นใช้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากน้ำที่ไหลผ่านเข้าและออกถังน้ำสะสมความร้อน อัตราความร้อนจากการคำนวณทั้ง 2 วิธีนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่เวลา 12:00 น. จากนั้นจะลดลงเนื่องหลังจาก 12:00 น. แสงอาทิตย์เริ่มคล้อยจากตัวเก็บรังสี ดังนั้นอัตราความร้อน

ที่ได้จึงลดลง อย่างไรก็ตาม ตัวเก็บรังสีก็ยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำได้จนถึงเวลาประมาณ 15:00 น. จากนั้นอุณหภูมิของน้ำในถังสะสมความร้อนจะเริ่มคงที่และอัตราความร้อนที่ได้จะไม่เพิ่มขึ้นเลย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในการทำน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ควรสามารถทำได้ในช่วงเวลา 8:00-15:00 น. ช่วงเวลาหลังจากนั้นตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพลดลงจนถึงระดับที่ไม่สามารถจะใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการหมุนเวียนน้ำผ่านตัวเก็บรังสีอาทิตย์จึงอาจจะสามารถหยุดการทำงานได้ตั้งแต่เวลา 15:00 น. เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ค่าพลังงานความร้อนสะสมตลอดช่วงเวลาทดลองคือ 8:00-17:00 น. มีค่าเท่ากับ 42.5 และ 49.9 MJ เมื่อใช้การคำนวณจากการทดลอง (สมการที่ 1) และการคำนวณเชิงทฤษฎี (สมการที่ 3) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์สำหรับศูนย์รับน้ำนมดิบ

พื้นที่รับรังสี ($ม^2$)	เงินลงทุน (บาท)	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ (บาทต่อปี)	NPV (บาท)	SPP (ปี)	IRR (%)
4	80,000	21,900	72,558	3.7	27.2
6	106,500	29,035	96,593	3.7	27.0
8	133,000	33,181	120,628	4.0	24.6
12	186,000	38,965	168,698	4.8	20.4

หมายเหตุ : NPV-Net pre sent value, SPP-Simple payback period, IRR-Internal rate of return, อัตราดอกเบี้ย = 7.5%, มูลค่าซากคิดเป็น 10% ของเงินลงทุนเริ่มต้น, เวลาทำงาน = 8 ชั่วโมงต่อวัน / 365 วันต่อปี, อายุการใช้งาน = 20 ปี, ค่าไฟฟ้า = 3.5 บาทต่อหน่วย

ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (ตารางที่ 1) โดยใช้การคำนวณพลังงานความร้อนสะสมจากสมการที่ 3 ที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ปริมาณการใช้น้ำ 360 ลิตรต่อวัน ใช้ฐานข้อมูลค่าความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยของแต่ละเดือนของปี 2548 พบว่าสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาประมาณ 3 ปี 8 เดือน สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายการใช้ไฟฟ้าเพื่อผลิตน้ำร้อนเมื่อเทียบกับการทำน้ำร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้ปีละ 21,900 บาท มีผลตอบแทนการลงทุนอยู่ที่ 27.2% ซึ่งมีค่ามากกว่าดอกเบี้ยเงินกู้จากธนาคาร (7.50%) ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาโดย พิสิฏฐ [6] ซึ่งพบว่าที่ปริมาณการใช้น้ำ 350 ลิตรต่อวันในโรงฆ่าสัตว์ พื้นที่รับรังสีขนาด 4 m^2 มีระยะเวลาคืนทุนน้อยที่สุดและอัตราส่วนระหว่างการลงทุนกับค่าใช้จ่ายที่ประหยัดต่อปี (SPP) มีค่าที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามการออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ในโครงการวิจัยนี้เป็นการออกแบบสำหรับการล้างทำความสะอาดแบบ CIP แบบไม่เต็มรูปแบบ ซึ่งทำความสะอาดระบบรับน้ำนมดิบวันละ 1 ครั้งเท่านั้น หากต้องการให้มีการทำความสะอาดมากกว่า 1 ครั้งต่อวันจะต้องมีเงื่อนไขการคำนวณเพิ่มเติมให้เหมาะสมกับจำนวนครั้งของ CIP ที่เปลี่ยนแปลงไป

4. สรุป

ในการออกแบบระบบทำน้ำร้อนด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้น ได้พิจารณาถึงปัจจัยบางประการในการติดตั้ง ได้แก่ ลักษณะของพื้นที่ติดตั้ง คุณสมบัติของผู้ปฏิบัติงาน รูปแบบการหมุนเวียนน้ำ และอัตราการไหลของน้ำผ่านตัวเก็บรังสี สำหรับศูนย์รับน้ำนมดิบตัวอย่างที่ศึกษาพบว่าอัตราการใช้น้ำประมาณวันละ 360 ลิตร ซึ่งเหมาะสมกับการใช้ปริมาณน้ำร้อนสะสมต่อ 1 วัน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถให้อัตราความร้อนเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 8:00 น. จนถึงเวลาประมาณ 12:00 น. หลังจากนั้นอัตราความร้อนที่ได้จะลดลง ระบบที่ออกแบบเพื่อใช้ในศูนย์รับน้ำนมดิบสามารถทำความร้อนสะสมเฉลี่ยที่ถังเก็บน้ำประมาณวันละ 42.5 MJ ทำอุณหภูมิน้ำเพิ่มขึ้นได้ 30.3 ˚C ได้อุณหภูมิการใช้งานของน้ำที่ประมาณ 55 ˚C ซึ่งเพียงพอในการทำความสะอาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถังเก็บน้ำนมดิบ และผสมกับกรดและด่างเพื่อล้างอุปกรณ์ต่างๆ ในระดับไม่เต็มรูปแบบ อย่างไรก็ตามในการใช้อุณหภูมิของน้ำที่สูงกว่านี้เพื่อการทำ CIP ที่เต็มรูปแบบ สามารถใช้ฮีตเตอร์เพื่อเสริมความร้อนก็จะสามารถทำอุณหภูมิได้สูงขึ้นตามต้องการ การลงทุนตัวเก็บรังสีอาทิตย์ในการทำน้ำร้อนประมาณ 80,000 บาทต่อ 4 m^2 สามารถลดค่าไฟฟ้าที่จะต้องทำน้ำร้อนได้ปีละ 21,900 บาท คืนทุนได้ในระยะเวลาประมาณ 3 ปี 8 เดือน และมีผลตอบแทนการลงทุนอยู่ที่ 27.2%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ เครือข่ายกิจกรรมฝึกงานเทคโนโลยีสะอาดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และบริษัทเชียงใหม่เฟรชมิลค์ จำกัด ที่ได้สนับสนุนงบประมาณวิจัยประจำปี 2550 ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

1. Kalogirou, S. A., 2004, “Solar thermal collectors and applications,” *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol.19, No.8, pp. 807 - 817.

2. ชาญวิทย์ วุฒิวงศานนท์, 2545, การพัฒนาระบบนร้อนแสงอาทิตย์แบบประหยัด วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

3. โสภณาท ฤทธิโสม และเอกลักษณ์ ศรีพลากิจ, 2544, การศึกษาระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนอาคารสุจิณโณ โรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ โครงงานวิศวกรรม วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

4. ธนาคม สุนทรชัยนาคแสง และทวีคุณ ปณิฐาภรณ์, 2542, การวิเคราะห์พารามิเตอร์และประเมินศักยภาพการเก็บสะสมพลังงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ บทความวิจัยและวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ หน้า 356 - 363.

5. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2537, การออกแบบระบบพลังงานความร้อน (พิมพ์ครั้งที่ 2) คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หน้า 113 - 125.

6. พิสิฏฐ สงวนตระการกุล, 2549, การเลือกขนาดระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์สำหรับโรงฆ่าสัตว์ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.