



การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในประเทศไทย Development of Solar Hot Water Systems in Thailand

ณัฐนี วรรณ, วิภาวดี วงษ์สุวรรณ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Natanee Vorayos, Wipawadee Wongsuwan and Tanongkiat Kiatsiriroat

Thermal System Research Unit, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chiang Mai University

บทคัดย่อ

ในบทความนี้ รวบรวมข้อมูลแนวทางในการพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ของหน่วยงานต่างๆ ในประเทศไทย โดยมีการปรับปรุงตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งส่วนใหญ่เน้น แบบแผ่นเรียบ และแบบท่อสุญญากาศ, ระบบเก็บรักษาความร้อน ในรูปความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง และในรูปเคมี, การเลือกชนิดของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทั้งที่เป็นน้ำ น้ำมัน หรือของไหลนาโน รวมไปถึง การประยุกต์ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีอื่น เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการผลิตน้ำร้อน และลดต้นทุน ในบทความยังแสดงการนำน้ำร้อนที่ได้ มาประยุกต์ใช้งานในกิจกรรมประเภทต่างๆ นอกจากการผลิตน้ำร้อนใช้งาน ได้แก่ การอุ่นน้ำในบ่อสระ การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ การอุ่นน้ำสำในโรงกลั่นสุราชุมชน และการอบแห้งไม้เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น ซึ่งพบว่าสามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้อย่างคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์

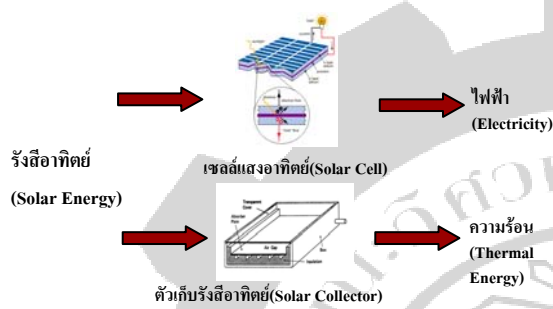
ABSTRACT

This paper reviews the development of solar water heating systems in Thailand. The content covers improvements of solar collectors of which flat-plate type and evacuated tubes are concentrated; thermal energy storages in the forms of sensible heat, latent heat and chemical energy; selection of working fluid in collector such as water, oil or nanofluids and integration of other technologies to enhance system performances and reduce costs. In the paper, besides of direct use of hot water, the solar hot water systems could be implemented in other applications, for example, water pool heating, boiler feed water preheating, beer preheating in community distillery and wood furniture drying, etc. It could be found that these applications could reduce fossil fuel and cost effectively.

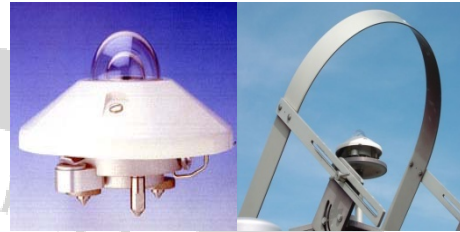
1. บทนำ

การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ ในรูปความร้อนในประเทศไทย มีการพัฒนามาเป็นเวลานาน และระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์เป็น รูปแบบหนึ่ง ที่มีการนำไปใช้งานจริง และมีการศึกษาวิจัย มาอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 1 แสดงเทคนิคในการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์โดยตรงใน 2 รูปแบบ

แบบแรก รังสีอาทิตย์จะเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าโดยตรง โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) และในแบบที่สอง รังสีอาทิตย์ จะเปลี่ยนรูปเป็นความร้อน โดยผ่านอุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งในบทความนี้จะเน้น การใช้ประโยชน์ในรูปแบบที่สอง



รูปที่ 1 เทคนิคในการเปลี่ยนรูปพลังงานมาใช้ประโยชน์จากรังสีอาทิตย์



ไพรานอมิเตอร์ ไพรานอมิเตอร์พร้อมแหวนบัง



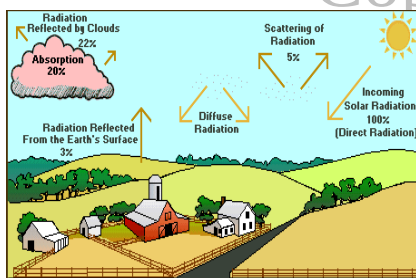
ไพฮีลิโอมิเตอร์

รูปที่ 3 อุปกรณ์วัดรังสีอาทิตย์

1.1 รังสีอาทิตย์บนพื้นราบ

รังสีอาทิตย์ที่ตกบนพื้นโลกสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1. รังสีตรง (Direct or Beam Radiation) เป็นรังสีที่ได้จากดวงอาทิตย์โดยตรงมีทิศทางที่แน่นอน สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางรังสี เช่น รวมแสงหรือสะท้อนเพื่อนำไปใช้งาน 2. รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีที่ได้รับหลังจากที่มีการกระจาย หักเหและสะท้อนในชั้นบรรยากาศหรือสิ่งแวดล้อม ทำให้มีทิศทางไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ ไม่สามารถรวมแสงหรือสะท้อนได้ และ 3. รังสีรวม (Total or Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย

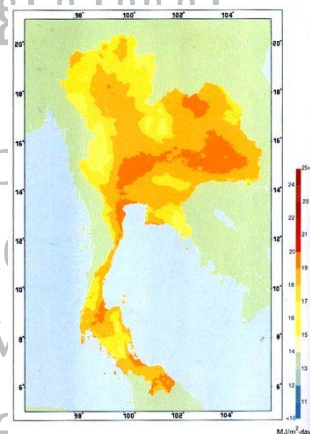
ลักษณะรังสีอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ แสดงในรูปที่ 2 และเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีรวม คือ ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) การวัดรังสีกระจาย จะใช้ไพรานอมิเตอร์โดยมีแหวนบัง (Shading Ring) ไม่ให้ตัววัดเห็นดวงอาทิตย์ การวัดรังสีตรงใช้ไพฮีลิโอมิเตอร์ (Pyheliometer) อุปกรณ์วัดรังสีอาทิตย์แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 ลักษณะรังสีอาทิตย์บนพื้นโลก

1.2 สักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย

จากแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย (พ.ศ. 2542) โดยกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานและคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร[1] พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยได้รับรังสีดวงอาทิตย์สูงสุด อยู่ระหว่างเดือนเมษายน และพฤษภาคม โดยรังสีรวมของดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศพบว่ามีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{day}$ จากผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง รูปที่ 4 แสดงค่าระดับความเข้มรังสีรวม ในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย



รูปที่ 4 ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์รวม ในพื้นที่ต่างๆของประเทศไทย [1]

ถึงแม้ภาพรวมระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ ของประเทศไทย มีค่าสูง แต่เนื่องจากอยู่ในเขตร้อนชื้น ซึ่งค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ย ในรูปของรังสีกระจายมีสัดส่วนสูง ประมาณ 40-50 % ดังนั้นระบบแบบรวมแสง ซึ่งต้องการรังสีตรง เพื่อสามารถ ควบคุมทิศทางรังสีในการนำมาใช้ประโยชน์ ไม่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ มักจะ เป็นชนิดไม่รวมแสง (Non-Concentration)

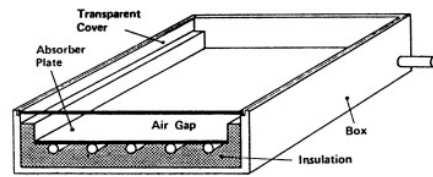
2. การประยุกต์ใช้งาน

2.1 การนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ โดยตรงในรูปความร้อน

พลังงานจากแสงอาทิตย์ สามารถนำไปเป็นพลังงาน ทดแทน สำหรับกระบวนการต่าง ๆ ทางด้านความร้อน ได้แก่

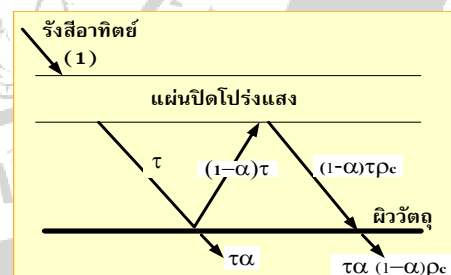
1. กระบวนการทำความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำ
 - สระว่ายน้ำ
 - ระบบทำน้ำร้อน
 - การให้ความร้อนในอาคาร
2. กระบวนการทำความร้อนที่อุณหภูมิสูง
3. กระบวนการทำความเย็น
4. การอบแห้ง
5. การกลั่นน้ำ
6. การหุงต้มอาหาร

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์ เป็น พลังงานความร้อน คือตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar Collector) ซึ่งทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ เปลี่ยน เป็นความร้อน ถ่ายเทให้กับของไหลทำงาน ให้มีอุณหภูมิ สูงขึ้น ในกรณีที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูงมากนัก มักนิยมใช้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ (Flat-plate Solar Collector) ดังแสดงในรูปที่ 5 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ ประกอบด้วย แผ่นปิดโปร่งแสง มักใช้กระจกหรือ พลาสติก ผิวดูดรังสี มักทาหรือเคลือบสีดำ โดยมีท่อ หรือ ช่องทางไหลของไหลทำงาน มารับความร้อน และก่อกองได้ ซึ่งหุ้มฉนวนความร้อนอย่างดี



รูปที่ 5 ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นปิดโปร่งแสง ค่า รังสีอาทิตย์ บางส่วนจะทะลุผ่านแผ่นปิดโปร่งแสงซึ่งมีค่า ส่องผ่านรังสี (τ) และเมื่อกระทบกับผิววัตถุด้านล่างบาง ส่วนจะถูกดูดกลืน (α) และบางส่วนจะสะท้อนกลับไปที่ แผ่นปิดโปร่งแสงอีก ซึ่งจะมีการสะท้อนกลับขึ้นมา ดังรูป ที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะการส่องผ่านดูดกลืน และสะท้อนรังสี

ในทางปฏิบัติรังสีอาทิตย์ที่ดูดกลืนที่ผิวดูดรังสีเมื่อ มีแผ่นปิดโปร่งแสงสามารถคำนวณจาก

$$(\tau\alpha)_e \approx 1.01 \tau\alpha$$

เมื่อ τ_e = ค่าสภาพส่งผ่าน (transmittance) ของแผ่นปิด โปร่งแสง กรณีของกระจก มีค่าประมาณ 0.85, α_e = ค่า สภาพดูดกลืน (absorptance) ของผิวดูดรังสี กรณีผิวสีดำ ด้าน มีค่าประมาณ 0.95, ρ_c = ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของ แผ่นปิดโปร่งแสง

สารทำงานที่ไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ จะรับความ ร้อนจากผิวดูดรังสี และกรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยน สถานะ ค่าอัตราความร้อน ที่สารทำงานได้รับ ที่ขณะใดๆ จะคำนวณจาก

$$q_c = \dot{m} C_p A (T_{fo} - T_{fi}) \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s), C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK), T_{fo} = อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกในตัวเก็บรังสี (K), T_{fi} = อุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าในตัวเก็บรังสี (K)

อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ในกรณีที่ไม่นิยามค่าความร้อนสะสมในตัวเก็บรังสี สามารถคำนวณได้โดยตรงจาก

$$q_c = A_c [I_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2)$$

เทอมแรกทางขวามือ คือค่ารังสีอาทิตย์ ที่ถูกดูดกลืนโดยตัวเก็บรังสี และเทอมที่สอง คือค่าความร้อนที่สูญเสียจากผิวดูดรังสีที่อุณหภูมิผิวเฉลี่ย T_{pm} ไปยังอากาศรอบๆ ที่อุณหภูมิ T_a

เนื่องจากอุณหภูมิผิวดูดกลืนรังสีเฉลี่ย (T_{pm}) ในทางปฏิบัติวัดได้ยาก จึงมักใช้อุณหภูมิของการไหลทำงานเฉลี่ย (T_{fm}) ในตัวเก็บรังสีแทน ดังสมการ

$$q_c = A_c F' [I_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_{fm} - T_a)] \quad (3)$$

เมื่อ F' คือ แฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี (Collector Efficiency Factor) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ได้จากตัวเก็บรังสีจริงต่อพลังงานที่ได้เมื่ออุณหภูมิผิวมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของไหล (T_{fm}) ซึ่งมักจะใช้ค่า

$$T_{fm} \cong \frac{(T_{fo} + T_{fi})}{2}$$

ในกรณีที่ใช้อุณหภูมิของของไหลเข้า มาเป็นฐานในการวิเคราะห์ ค่าอัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีจะอยู่ในรูป

$$q_c = A_c F_R [I_T (\tau\alpha)_e - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (4)$$

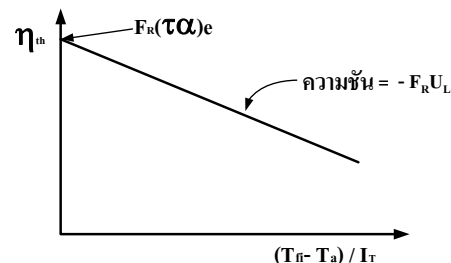
สมการดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า สมการของ Hottel-Whillier-Bliss

F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor) เป็นอัตราส่วนของอัตราความร้อนที่ได้จริงจากตัวเก็บรังสีต่ออัตราความร้อนที่ได้เมื่ออุณหภูมิผิวดูดรังสีเท่ากับอุณหภูมิของไหลที่เข้าตัวเก็บรังสี

สมการที่ 4 จะเป็นสมการที่นิยมใช้มากที่สุด และนิยมมาใช้ในการหาค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี ทั้งนี้ค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีจะเป็นดัชนีที่ใช้บอกความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบแล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน โดยคำนวณจาก

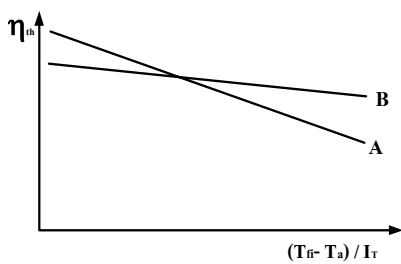
$$\eta_{th} = \frac{q_c}{I_T A_c} = F_R (\tau\alpha)_e - \frac{F_R U_L (T_{fi} - T_a)}{I_T} \quad (5)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง η_{th} และ $(T_{fi} - T_a)/I_T$ มาพล็อตกราฟ จะได้รูปสมการเส้นตรงโดยมีค่าความชันของเส้นกราฟเท่ากับ $-F_R U_L$ และค่าจุดตัดบนแกนประสิทธิภาพ คือค่า $F_R (\tau\alpha)_e$ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟแสดงสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

ค่า $F_R (\tau\alpha)_e$ อาจเรียกว่าประสิทธิภาพเชิงแสง (Optical Efficiency) ถ้ามีค่าสูงแสดงว่า การส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของตัวเก็บรังสีมีค่าสูง ส่วนเทอม $-F_R U_L$ แสดงค่าการสูญเสียความร้อน ถ้ามีค่าสูงแสดงว่าตัวเก็บรังสีดังกล่าวมีการป้องกันความร้อนสูญเสียไม่ดีพอ ทั้ง 2 แบบนี้ จะเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสี ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์

จากรูปตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบ A เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่แบบ B เหมาะใช้งานที่อุณหภูมิสูง

โดยทั่วไปจะมีมาตรฐานการทดสอบสมรรถนะ ทั้งแบบกลางแจ้งและในอาคาร โดยใช้ระบบแสงอาทิตย์เทียม (Solar Simulator) ที่ใช้หลอดไฟ ที่มีสเปกตรัมใกล้เคียงกับแสงอาทิตย์จริงในธรรมชาติ รูปที่ 9 แสดงระบบแสงอาทิตย์เทียม ซึ่งมีการพัฒนาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (KMUTT)



รูปที่ 9 ระบบแสงอาทิตย์เทียมที่ KMUTT

อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสี ภายใต้ระบบแสงอาทิตย์เทียม จะมีความแตกต่างจากการทดสอบกลางแจ้ง ดังนั้น จะต้องมีการปรับค่าที่ได้ ให้ได้ผลเสมือนกับการทดสอบกลางแจ้ง [2]

การทดสอบสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบกลางแจ้ง จะมีหน่วยทดสอบ ที่ มหาวิทยาลัยนเรศวร และ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

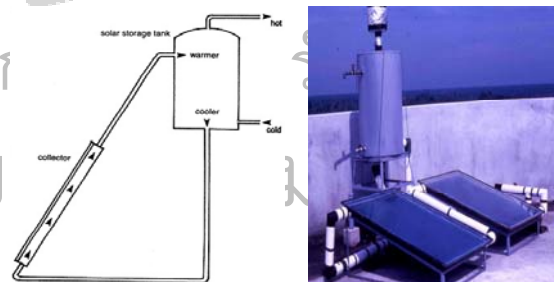
2.2 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์

ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ จะประกอบด้วยตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และถังเก็บสะสมความร้อน ตัวเก็บรังสีจะ

ทำให้น้ำภายในถังเก็บสะสมความร้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อการนำไปใช้งาน ภายในถังอาจจะมีฉนวนให้ความร้อน หรือมีก๊าซร้อนคอยช่วยเสริมในกรณีที่ระดับรังสีแสงอาทิตย์ไม่เพียงพอ

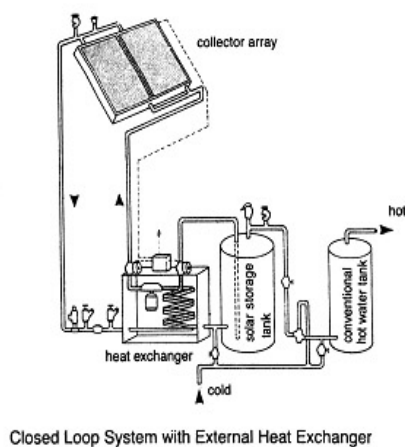
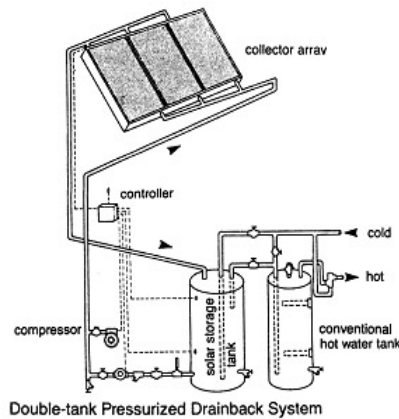
ระบบที่ใช้งานจะมี 2 รูปแบบ แบบแรกเรียกว่าระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) หรือแบบพาสซีฟ (Passive System) และอีกแบบเรียกว่า แอคทีฟ (Active System)

รูปที่ 10 แสดงระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ แบบเทอร์โมไซฟอนโดยของไหลที่อยู่ในตัวเก็บรังสี เมื่อได้รับความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น มีความหนาแน่นลดลง จะลอยตัวขึ้นไปในถังเก็บความร้อนด้านบน และของไหลที่อยู่ด้านล่างซึ่งเย็นกว่า และมีความหนาแน่นสูงจะจมตัวและไหลมาจากด้านล่างของถังไปยังตัวเก็บรังสี มารับความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอีก ทำให้เกิดการไหลเวียนของของไหลในระบบ โดยไม่มีปั๊มหมุนเวียนการไหล น้ำร้อนจากถังเก็บสะสมทางด้านบนของถังจะถูกนำไปใช้งาน ระบบนี้ถังเก็บสะสมต้องอยู่เหนือตัวเก็บรังสี และถังในแนวดิ่งจะมีการกระจายตัวของอุณหภูมิในถังดีกว่าถังในแนวนอน แต่แบบหลังจะนิยมใช้มากกว่า เนื่องจากเหตุผลด้านความสวยงาม



รูปที่ 10 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน

รูปที่ 11 จะเป็นระบบทำน้ำร้อนด้วยระบบแสงอาทิตย์รูปแบบแอคทีฟ กล่าวคือการหมุนเวียนของของไหลระหว่างตัวเก็บรังสีและถังเก็บสะสมจะมีปั๊มช่วยในการหมุนเวียนของไหล ระบบนี้ยังสามารถอยู่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสี ในบางระบบของไหลจากตัวเก็บรังสีจะมาไหลเวียนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ถ่ายเทความร้อนมาให้แก่น้ำในถังเก็บสะสมอีกทีหนึ่ง



รูปที่ 11 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์แบบแอคทีฟ

2.3 การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์

การเพิ่มสมรรถนะการทำงานของระบบ อาจทำได้โดย

1. การปรับปรุงสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์เพื่อดูดกลืนหรือรับรังสีอาทิตย์ให้สูงขึ้น และลดการสูญเสียความร้อน
2. การเลือกรูปแบบการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวเก็บรังสีกับถังเก็บสะสมความร้อนและการเลือกของไหลทำงานในตัวเก็บรังสี
3. การเลือกชนิดของสารตัวกลางในการสะสมความร้อนและ
4. การใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีอื่น

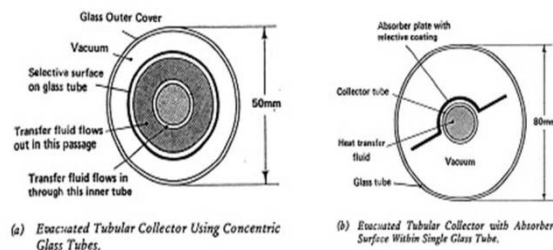
มีการทำ Selective Coating ที่ผิวดูดรังสี เพื่อให้มีค่าสภาพการดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นรังสีอาทิตย์มีค่าสูง และค่าสภาพการแผ่รังสีในช่วงคลื่นความร้อนมีค่าต่ำ [3] ซึ่งจะช่วยให้ความสามารถในการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ และลดการสูญเสียความร้อน

แนวทางหนึ่งในการลดการสูญเสียความร้อน ระหว่างผิวดูดรังสีกับแผ่นปิดโปร่งแสง คือ การลดการหมุนวนของอากาศ ที่อยู่ระหว่างผิวทั้งสอง ซึ่งจะลดการพาความร้อนจากผิวดูดรังสีมายังฝาปิดโปร่งแสง มีการพัฒนาผิวดูดรังสีที่ประกอบด้วยท่อ และครีบนในแนวดิ่ง [4] โดยจำนวนครีบนมีความหนาแน่นมากพอที่จะช่วยลดการหมุนวนของอากาศ สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนลงได้อีก 20-30% เทียบกับกรณีแบบท่อและครีบนแนวนอน ในตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบทั่วไป ลักษณะผิวดูดรังสีแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผิวดูดรังสีแบบท่อและครีบนแนวดิ่ง[4]

การลดการสูญเสียความร้อน โดยการทำให้เกิดสุญญากาศระหว่างแผ่นดูดรังสีและฝาปิดโปรงแสง เป็นวิธีการหนึ่งที่ นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะใช้ในลักษณะท่อสุญญากาศ (Evacuated Tube) ดังแสดงในรูปที่ 13 ซึ่งในประเทศมีการศึกษาบ้างพอสมควร [5] โดยเป็นการศึกษาผลของความดันสุญญากาศ ที่ผลต่อสภาพการสูญเสียความร้อน



รูปที่ 13 ท่อสุญญากาศ

ยังมีการออกแบบตัวถัง (Casing) ของตัวเก็บรังสี โดยหล่อด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยไฟเบอร์ (Fiber-reinforced Plastic, FRP) และด้านหลังระหว่างผิวดูดรังสีกับตัวถัง ไม่มีฉนวน และให้อากาศที่อยู่ระหว่างผิวกับตัวถังทำหน้าที่เป็นฉนวน [6] ดังรูปที่ 14 ซึ่งพบว่าสมรรถนะเชิงความร้อน ไม่แตกต่างกว่าแบบทั่วไปมากนัก



รูปที่ 14 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ตัวถังเป็น FRP[5]

ยังมีการใช้เทคนิคท่อความร้อน (Heat Pipe) ในลักษณะท่อความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน [7] ที่มีลักษณะแบบตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบทั่วไป และแบบท่อความร้อนที่อยู่ในท่อแก้วสุญญากาศ [8] มาเป็นตัวเก็บรังสี

อาทิตย์ ข้อดีของตัวเก็บรังสีประเภทนี้ คือ ตัวเก็บรังสีสามารถดึงความร้อนมาผลิตน้ำร้อน ได้รวดเร็ว และลดการสูญเสียความร้อนจากถังเก็บมายังตัวเก็บรังสี เมื่ออุณหภูมิในถังสูงกว่าตัวเก็บรังสีทำให้ความร้อนจะไหลทางเดียวจากตัวเก็บรังสี (Thermal Diode) ไปยังถังเก็บ ข้อเสียของตัวเก็บรังสีประเภทนี้ คือ ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน จากสารตัวกลางในท่อความร้อน ถ่ายเทให้กับน้ำที่ Header หรือน้ำในถัง ลักษณะตัวเก็บรังสีแบบท่อความร้อนที่อยู่ในท่อแก้วสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 15

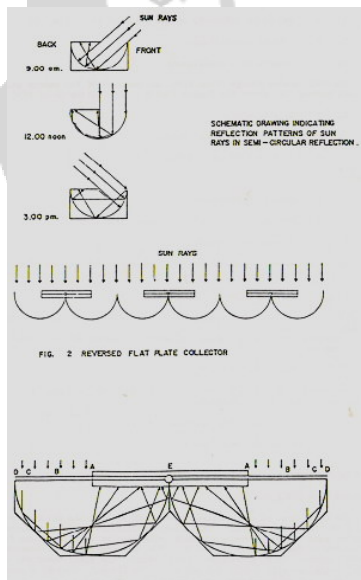


รูปที่ 15 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ที่ใช้ท่อความร้อนบรรจุในท่อแก้วสุญญากาศ [8]

นอกจากนี้ยังมีการใช้ของไหลนาโน มาใช้ในตัวเก็บรังสี เพื่อเพิ่มค่าสภาพการนำความร้อน และสามารถดึงความร้อนจากตัวเก็บรังสีได้ดีขึ้น มีการใช้ของไหลนาโนในตัวเก็บรังสีที่ใช้เทคนิคท่อความร้อนแบบสั่น (Pulsating Heat Pipe) [9]

ยังมีการศึกษา การใช้แผ่นสะท้อนรังสี รูปแบบต่างๆ เช่น แบบครึ่งทรงกลม [10] แบบ พาราโบลา (Compound Parabolic Reflector) ช่วยสะท้อนรังสีไปที่ผิวดูดรังสี ทำให้ผิวดูดรังสีได้รับรังสีอาทิตย์เพิ่มขึ้น จะทำงานที่อุณหภูมิสูงขึ้น ลักษณะตัวเก็บรังสีที่มีการใช้แผ่นสะท้อนรังสี แสดงในรูปที่ 16

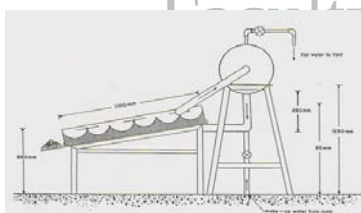
ระบบเก็บรักษาความร้อน จะช่วยให้ระบบสามารถผลิตน้ำร้อนต่อไปได้ ในกรณีที่ระดับความเข้มรังสีอาทิตย์ไม่เพียงพอ ระบบเก็บรักษาความร้อนจะมี3ประเภท หลักคือ แบบความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เช่น การเก็บสะสมในรูปน้ำ หรือน้ำมัน แบบความร้อนแฝง(Latent Heat) ซึ่งนิยมใช้สารเปลี่ยนเฟส (Phase Change Material, PCM) ในรูปของแข็ง-ของเหลว เช่น ขี้ผึ้ง และในรูปเคมี (Chemical Energy Storage) ซึ่งสารตัวกลางในการเก็บสะสมความร้อน มีการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี เมื่อมีการรับความร้อนหรือคายความร้อน



ผิวสะท้อนแบบครึ่งทรงกลม

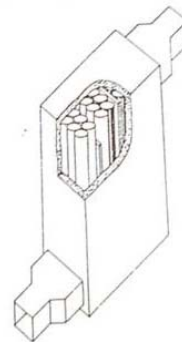


ผิวสะท้อนแบบพาราโบลิกผสม

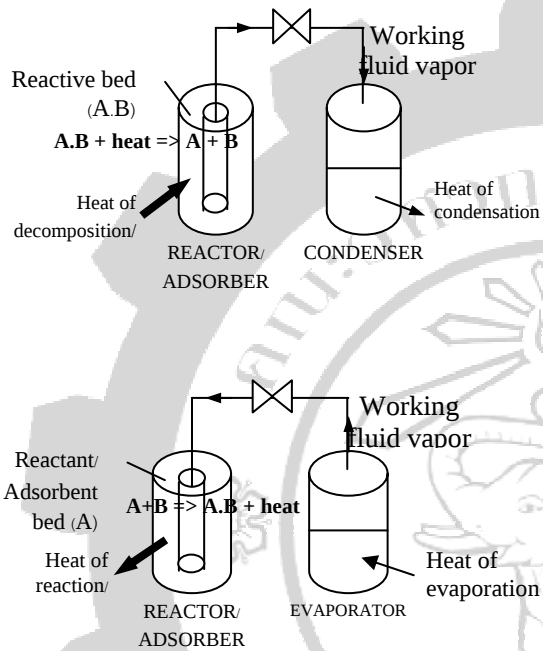


รูปที่ 16 ระบบทำน้ำร้อนที่ตัวเก็บรังสีมีผิวสะท้อนรังสี [10]

สารตัวกลางในการเก็บสะสมความร้อน ต้องการให้มีความเข้มข้นของพลังงานสูง เพื่อให้ขนาดถังเก็บสะสมมีขนาดเล็ก รวมถึงความสามารถในการประจุและคายความร้อนออกได้อย่างรวดเร็ว การศึกษาพัฒนาระบบเก็บสะสมความร้อน ในประเทศ ส่วนใหญ่ยังเป็นแบบความร้อนสัมผัส ส่วนแบบความร้อนแฝง และแบบเคมียังมีไม่มากนัก รูปที่ 17[11] แสดงตัวอย่างระบบเก็บรักษาพลังงานในรูปความร้อนแฝง ซึ่งจะเป็นกรดไขมัน บรรจุในกลุ่มท่อ และมีน้ำร้อนจากตัวเก็บรังสี ทำให้อกรดไขมันอยู่ในสภาวะของเหลว และเมื่อมีความต้องการน้ำร้อน จะมีน้ำเย็นมาดึงความร้อน ทำให้อกรดไขมันคืนรูปจากของเหลวเป็นของแข็ง ระบบเก็บสะสมพลังงานลักษณะนี้ มีการพัฒนาให้มีความสามารถในการทำงานสูงขึ้น โดยใช้เทคนิคการถ่ายเทความร้อนแบบสัมผัสโดยตรง [12] ส่วนหลักการของการเก็บสะสมพลังงานในรูปเคมี จะแสดงใน รูปที่ 18[13] เมื่อสาร AB ได้รับความร้อน สาร A และ B แยกตัวออกจากกัน และเมื่อนำ A และ B กลับมารวมตัวกัน จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น และมีการปลดปล่อยความร้อนออกมา



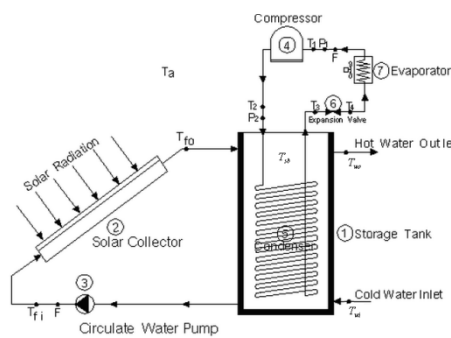
รูปที่ 17 ระบบทำน้ำร้อน ที่มีตัวเก็บสะสมความร้อนในรูปความร้อนแฝง [11]



รูปที่ 18 หลักการทำงานของระบบเก็บสะสมพลังงาน
ในรูปเคมี [13]

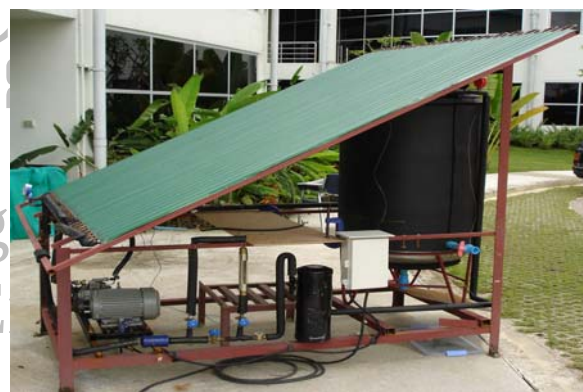
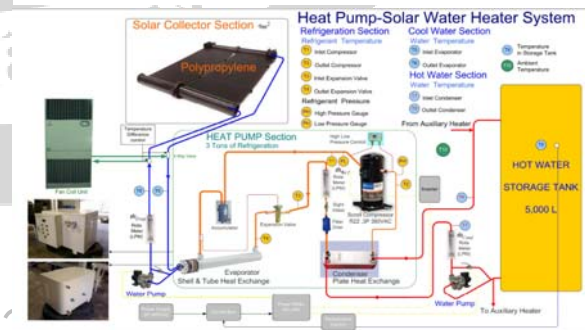
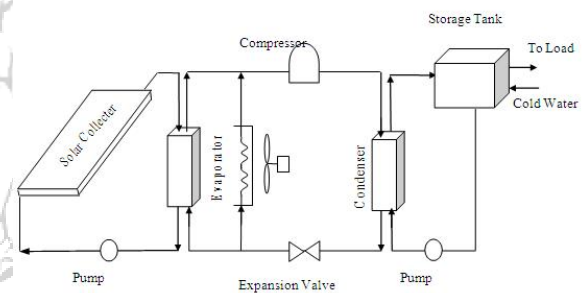
2.4 การเพิ่มสมรรถนะโดยการร่วมกับเทคโนโลยีอื่น

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีอื่น ซึ่งถ้ามีการเลือกให้เหมาะสม จะช่วยลดพื้นที่ของตัวเก็บรังสี หรือช่วยเพิ่มสมรรถนะตัวเก็บรังสีได้ รูปที่ 19 แสดงระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ซึ่งมีปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนเสริม [14-15] แทนลวดความร้อนซึ่งใช้กันในระบบทำน้ำร้อนทั่วไป ซึ่งจะช่วยให้ความร้อนเมื่ออุณหภูมิในถังเก็บไม่ได้ตามค่าที่ต้องการ การใช้พลังงานของปั๊มความร้อนจะน้อยกว่า กรณีการให้ความร้อนด้วยลวดความร้อน



รูปที่ 19 ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่มีปั๊มความร้อนให้ความร้อนเสริม [15]

รูปที่ 20 แสดงระบบทำน้ำร้อนแบบปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์ (Solar-Boosted Heat Pump Water Heating)[16] ในระบบนี้ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ให้ความร้อนที่อวาล์วของปั๊มความร้อน และปั๊มความร้อนจะจ่ายความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นที่คอนเดนเซอร์ เนื่องจากตัวเก็บรังสีจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำ อาจไม่ต้องการกระแสและฉนวน ตัวเก็บรังสีอาจเป็นแผ่นยางดำ หรือแผ่นและส่วนปั๊มความร้อนจะมีสมรรถนะการทำงานสูงขึ้น ประหยัดพลังงานที่คอมเพรสเซอร์



รูปที่ 20 การทำน้ำร้อนด้วยปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์

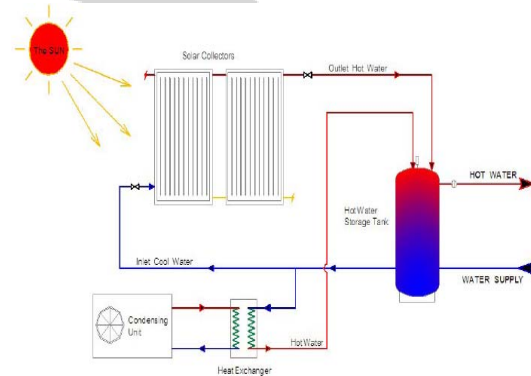


รูปที่ 21 ระบบทำน้ำร้อนแบบปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์ ที่มีการติดตั้งใช้งานที่โรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่

รูปที่ 21 เป็นระบบทำน้ำร้อนปั๊มความร้อนเสริมแสงอาทิตย์ ที่มีการติดตั้งใช้งานจริง ที่โรงพยาบาลมหาราชนครเชียงใหม่ ผลิต น้ำร้อนใช้งานประมาณ 50-55 °C ความสามารถในการผลิตน้ำร้อน 80 kW และมีการใช้ไฟฟ้ารวม เพียง ร้อยละ 30-35 เทียบกับการทำน้ำร้อนด้วยไฟฟ้า ระบบมีขนาดถังเก็บน้ำร้อน 6 m³ และใช้พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบประมาณ 30 m²

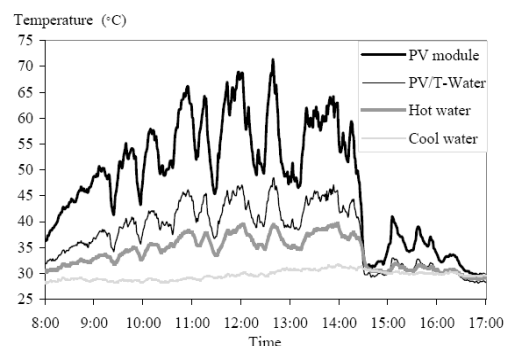
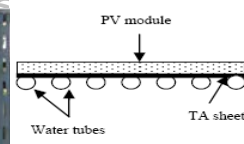
รูปที่ 22 แสดงการทำงานร่วมกันระหว่างตัวเก็บรังสีอาทิตย์ร่วมกับความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศ [17] ในเวลากลางคืนความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศ จะช่วยรักษา หรือเพิ่มอุณหภูมิน้ำร้อน และในตอนกลางวัน จะได้ความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิน้ำในถังจะต้องระมัดระวังมิเช่นนั้นอาจเกิดปัญหาต่อสมรรถนะของระบบปรับอากาศในการทำมาความเย็น

รวมถึงอาจทำให้สมรรถนะในการทำน้ำร้อนของตัวเก็บรังสีลดลง ในกรณีที่น้ำในถังมีค่าสูง



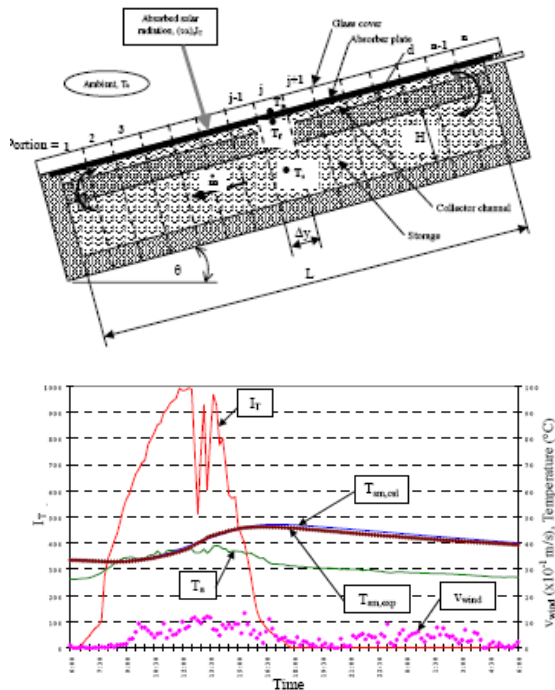
รูปที่ 22 การทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนทิ้งจากระบบปรับอากาศ [17]

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรังสีอาทิตย์ เป็นไฟฟ้า และประสิทธิภาพในการเปลี่ยนรูปพลังงานมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น รูปที่ 23 เป็นเทคนิคในการผลิตน้ำร้อน จากการระบายความร้อนของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ [18] โดยมีชุดท่อน้ำแนบติดที่ด้านหลังของแผ่นโมดูล อย่างไรก็ตาม น้ำร้อนที่ได้เป็นเพียงผลพลอยได้เท่านั้น



รูปที่ 23 ระบบทำน้ำร้อนด้วยการระบายความร้อนจากเซลล์แสงอาทิตย์

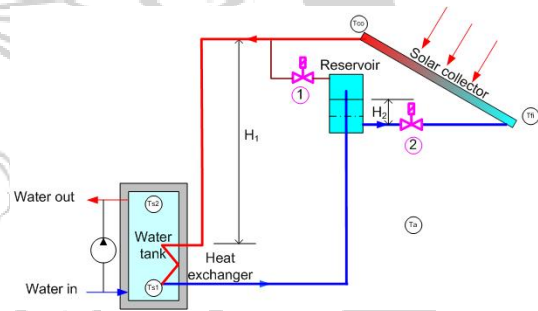
ยังมีการศึกษาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ที่มีตัวเก็บรังสีอาทิตย์ และถังเก็บสะสมน้ำร้อน อยู่ด้วยกัน [19-20] รูปที่ 20 แสดงลักษณะการไหลเวียนของน้ำในตัวเก็บรังสี และน้ำในถัง และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทำได้ ระบบดังกล่าวจะทำน้ำร้อนที่อุณหภูมิไม่สูงมาก เนื่องจากการหมุนเวียนของน้ำไม่มากนัก



รูปที่ 24 การสร้างระบบทำน้ำร้อนที่มีถังเก็บอยู่กับตัวเก็บรังสี(Built-in Storage)[20]

รูปที่ 25 เป็นการการสร้างระบบทำน้ำร้อนที่มีถังเก็บอยู่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีโดยไม่มีปั๊มหมุนเวียนของไหล [21] โดยมี ถังเก็บเล็กๆ (Reservoir) บรรจุสารทำงานร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งมีจุดเดือดต่ำ เมื่ออุณหภูมิสารทำงานในตัวเก็บรังสีถึงจุดเดือด ความดันในตัวเก็บรังสีจะเพิ่มขึ้นของเหลวบางส่วนจะเป็นไอ ไหลออกจากตัวเก็บรังสี โดยวาล์ว 1 และ 2 ปิดอยู่ ไอจะมากวนแน่น ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ถังเก็บสะสมและคายความร้อนให้แก่น้ำในถัง และเมื่อความดันในตัวเก็บรังสีถึงค่าพอ ไอก็จะดันของเหลวที่ควบแน่นมาที่ ถังเก็บสารทำงาน และระดับสารทำงานในถังจะเพิ่มขึ้น สูงกว่าระดับของเหลวในตัว

เก็บรังสี เมื่อความแตกต่างระดับของเหลวถึงค่าที่พอเหมาะ จะมีการเปิดวาล์ว 1 และ เพื่อให้ความดันในถังเก็บสารทำงานและตัวเก็บรังสีเท่ากัน สารทำงานในถัง จะไหลเข้าในตัวเก็บรังสี จนมีระดับเท่ากัน จากนั้นวาล์วทั้ง 2 จะปิด และเริ่มวงจรการทำงานใหม่



รูปที่ 25 ระบบทำน้ำร้อนที่มีถังเก็บอยู่ต่ำกว่าตัวเก็บรังสีโดยไม่มีปั๊มหมุนเวียนของไหล [21]

2.5 การผลิตน้ำร้อนใช้งานในรูปแบบต่างๆ

ระบบทำน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ สามารถนำน้ำร้อนที่ผลิตได้ มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ เช่น การอุ่นน้ำในสระ เพื่อว่ายน้ำ หรือการอุ่นน้ำในสระเพื่อการทำกายภาพบำบัด การผลิตน้ำร้อนมาอุ่นบ่อปลา กุ้ง บ่อเลี้ยงกบ ในฤดูหนาว รูปที่ 26 แสดงการนำตัวเก็บรังสีอาทิตย์มาใช้ในการอุ่นน้ำในสระ และ เนื่องจากอุณหภูมิใช้งานไม่สูง ตัวเก็บรังสี อาจไม่จำเป็นต้องมีกระจก และผิวดูดรังสีอาจทำด้วยยางสีดำ ทำให้น้ำหนักเบา ราคาถูก

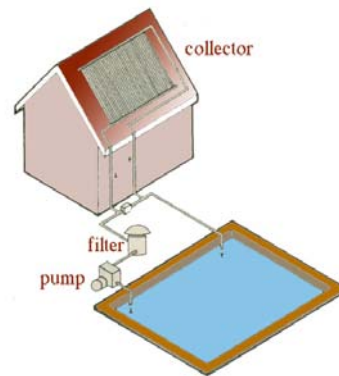
รูปที่ 27 เป็นการผลิตน้ำร้อนแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการสร้างความอบอุ่นภายในอาคาร จากรูป ตัวเก็บรังสีทำ

ให้น้ำในถังเก็บสะสมมีอุณหภูมิสูง น้ำในถัง จะถูกนำมาผ่านชุดให้ความร้อนภายในห้อง ถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศภายใน

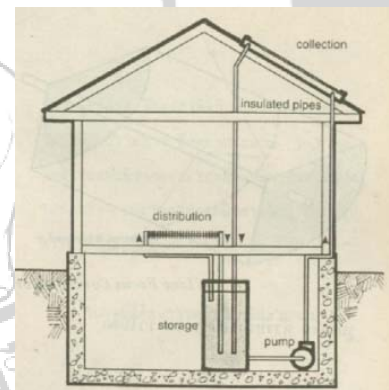
รูปที่ 28 จะมีลักษณะคล้ายกัน แต่น้ำร้อนที่ได้ จะถูกนำไปใช้ในการผลิตน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ช่วยลดการใช้เชื้อเพลิง ของหม้อไอน้ำในการผลิตไอน้ำ [22]

รูปที่ 29 เป็นการผลิตน้ำร้อน เพื่อใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ไม้ [23] น้ำร้อนที่ผลิตได้ จะถูกป้อนผ่านชุดท่อในห้องอบไม้ และทำอากาศภายในห้องให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น อากาศร้อน จะลอยตัวผ่านกองไม้ที่ต้องการอบแห้ง และพาความชื้นออกไปจากห้อง ในกรณีที่อุณหภูมิไม่สูงพอ ที่ถึงต้มน้ำร้อนจะมีการให้ความร้อนเสริม เพื่อรักษาอุณหภูมิ น้ำที่เข้าสู่ชุดท่อในห้อง ให้มีค่าคงที่ อุณหภูมิอากาศร้อนสามารถทำได้ถึง 80°C

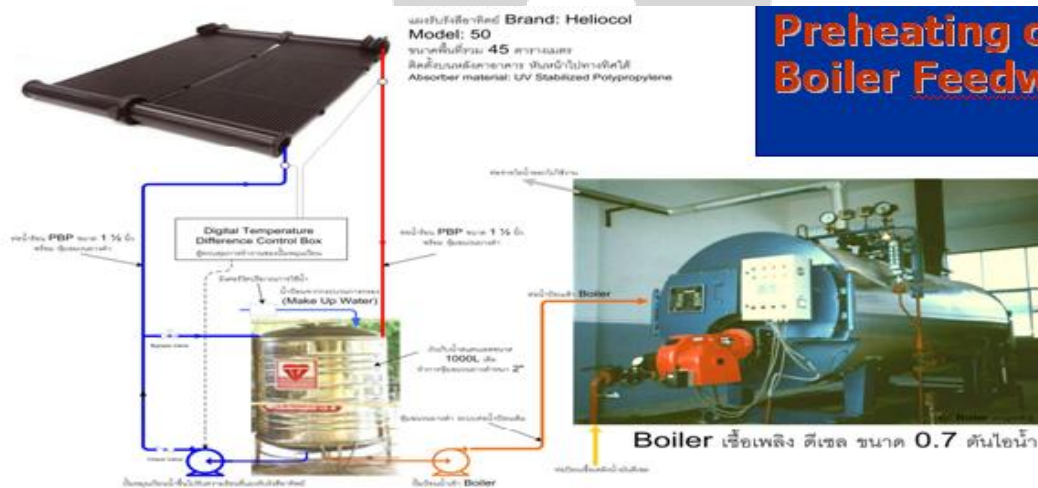
รูปที่ 30 เป็นการผลิตน้ำร้อนด้วยแสงอาทิตย์ มาใช้ในการอุ่นน้ำสำ ของโรงกลั่นสุราชุมชน [24] ซึ่งมีการใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งพบว่าการเลือกขนาดระบบที่เหมาะสม สามารถลดการใช้เชื้อเพลิงได้ถึงร้อยละ 30



รูปที่ 26 การอุ่นน้ำในสระด้วยแสงอาทิตย์

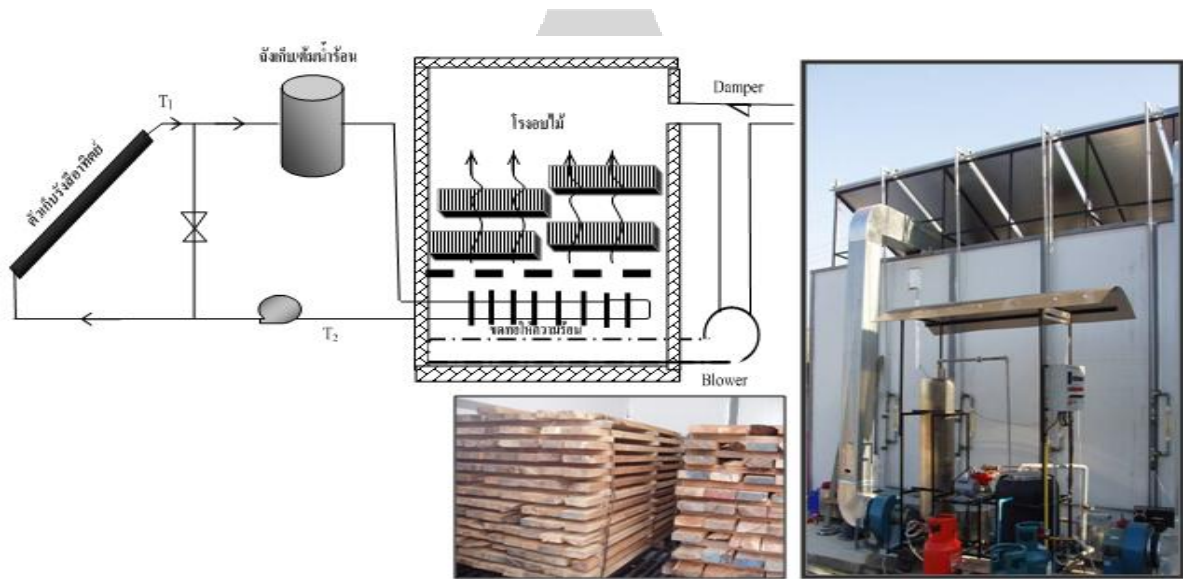


รูปที่ 27 การสร้างความอบอุ่นภายในอาคาร

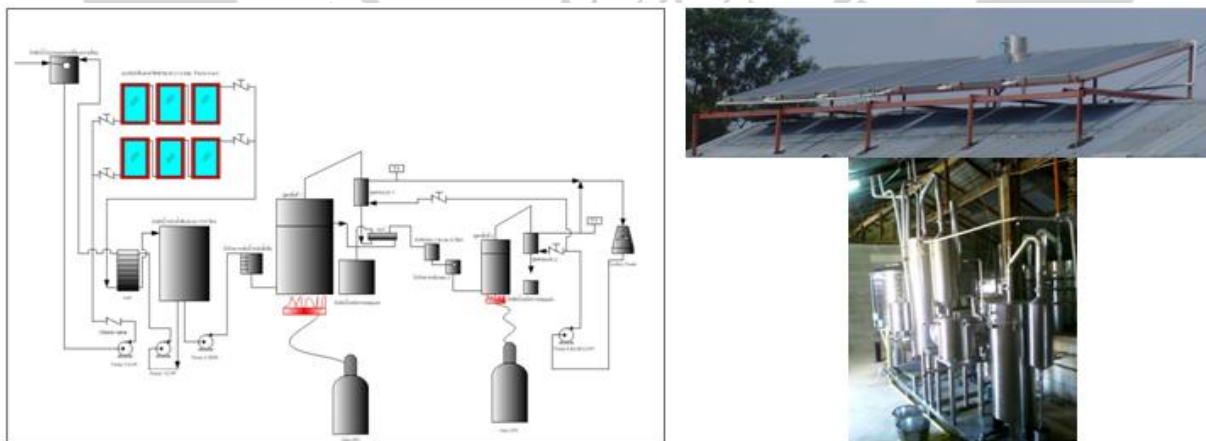


Thermal System Research Unit

รูปที่ 28 การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ด้วยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์



รูปที่ 29 การอบแห้งผลิตภัณฑ์ไม้ ด้วยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ [23]



รูปที่ 30 การอุ่นน้ำสำด้วยระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ [24]

3. สรุป

บทความนี้รวบรวมข้อมูลแนวทางในการพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ที่มีการพัฒนาในประเทศไทย โดยมีการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ซึ่งส่วนใหญ่เน้น แบบแผ่นเรียบ และแบบท่อสุญญากาศ, ระบบเก็บรักษาความร้อน ในรูปความร้อนสัมผัส ความร้อนแฝง และในรูปเคมี, การเลือกชนิดของไหลในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ รวมไปถึง การประยุกต์ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีอื่น เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการผลิตน้ำร้อน และลดต้นทุน รวมไปถึงการประยุกต์ใช้งานในกิจกรรมอื่น ได้แก่ การอุ่นน้ำในบ่อสระ

การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ การอุ่นน้ำสำในโรงกลั่นสุรา ชุมชน และการอบแห้งไม้เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น สามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังมีส่วนช่วย ในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานได้อีกส่วนหนึ่ง

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณสุริยนต์ ชมดี บริษัท ทีซัส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ในการให้ข้อมูลระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ ที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน รูปแบบต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, แผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย, บริษัทจิรังรัชต์ จำกัด กันยายน 2542.
- [2] Kiatsiriroat ,T. and Na Thalang, K.(1993), Parameters of solar collectors tested with a KMITT solar simulator, *Renewable Energy*, vol. 3, no.6/7, 1993, pp. 795-799.
- [3] สุภาพรณ วิษณุซึ่งตระกูล, การหาสภาวะที่เหมาะสมในการหุบเคลือบผิวเลือกรังสีโครมดำวิทยานิพนธ์ (วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตธนบุรี, 2525.
- [4] ข้อมูลสมรรถนะตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ บริษัท ทีซีเอส อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
- [5] Wibulswas, P., and Kiatsiriroat, T.(1979)., Evaluation of solar water heaters with evacuated tube collectors, Proc. Interregional Sym. *Solar Energy for Development*, Japan Ind. Tech. Association, Tokyo, February, 1979.
- [6] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ สุรเดช จันทรานุรักษ์ (2526) การนำ เอฟ อาร์ พี ใช้กับตัวรับรังสีแสงอาทิตย์, การประชุมทางวิชาการ เรื่อง เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท ครั้งที่ 2, มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [7] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ กานดา แสงจันทร์ (2528), การศึกษาตัวรับรังสีแสงอาทิตย์แบบฮีทไปป์ อย่างง่าย, การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 3 เรื่อง เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท, จ.ขอนแก่น
- [8] วิทยา ขงเจริญ และชวรัตน์ มาลาหอม (2552), การศึกษาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบฮีทไปป์, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5(E-NETT5) มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก
- [9] Rittidech, S. and Wannapakne, S.,(2007), Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP), **Applied Thermal Engineering**, vol. 27(11-12), pp. 1978-1985.
- [10] Wibulswas, P., Lim, A.M. and Xuening, W. (2532), Development of reversed flat plate collectors with multiple slim reflectors, การประชุมใหญ่ทางวิชาการ เทคโนโลยีใหม่ในงานวิศวกรรม วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
- [11] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, วิโรจน์ สุจิตสำราญ, สมชาย แจ่มอุลิตรัตน์ และ อติสร วิชัยทกะ (2524), เครื่องทำน้ำร้อน แสงอาทิตย์แบบมีตัวสะสมความร้อนแฝง, การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 3 เรื่อง **Non-Conventional Energy and Applications**, กรุงเทพฯ
- [12] Kiatsiriroat, T., Tiansuwan, J., Suparos, T. and Na Thalang K. (2000), Performance analysis of a direct-contact thermal energy storage-solidification, **Renewable Energy**, 20, 2000, 99. 195 – 206.
- [13] Iammak, K., Wonsuwan, W. and Kitsiriroj, T. (2004)., Investigation of modular chemical energy storage performance, **The Joint Int. Conf. on Sustainable Energy and Environment**, Hua Hin, Thailand.
- [14] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ มารุต บุรพา ญัฐนี วรยศ และ สุริยนต์ ชมดี (2551), การวิเคราะห์สมรรถนะระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ เสริมด้วยปั๊มความร้อน, การประชุมวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1, วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จ.พิษณุโลก
- [15] มารุต บุรพา, ญัฐนี วรยศ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และสุริยนต์ ชมดี (2552), โมเดลอย่างง่ายของการทำน้ำร้อน แสงอาทิตย์ ที่มีปั๊มความร้อนเสริม, วารสารเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ ลำปาง ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 ตุลาคม – มีนาคม, หน้า 15-23

- [16] Nuntaphan, A., Chansena, C. and Kiatsiriroat, T.(2009), Performance analysis of solar water heater combined with heat pump using refrigerant mixture, **Applied Energy**, vol.86(5), pp.748-756.
- [17] วิสุทธิ แซ่มะอาด รัฐพร เงินมีศรี และ นิพนธ์ เกตุจ้อย (2552), ระบบน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ผสมผสานกับความร้อนเหลือทิ้งของโรงแรมริมปาว, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5(E-NETT5), มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก
- [18] นิคม ผึ้งคำ, การออกแบบระบบหล่อเย็นสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์, การประชุมทางวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 2 มหาวิทยาลัยศิลปากร
- [19] Soponronnarit, S., Taechapiroj, C. and, Tia, S. (1994), Comparative studies of built-in storage solar water heaters, **RERIC International Energy Journal** 16 (1), pp. 11-26.
- [20] เจริญ จันทร์สา ศุภชาติ จงไพบูลย์พัฒนะ มุอำมัด ทรงชาติและ มณเฑียร แก่นสน (2548), การศึกษาการไหลเวียนตามธรรมชาติของน้ำในระบบจำลองของเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่19, จ.สงขลา
- [21] พนมกร ปิงศิริพัฒนา สราวุธ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2551), การวิเคราะห์สมรรถนะ ระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ที่ใช้เทอร์โมไฮฟอนวเจอร์ปิด, **Proc. the 2nd Sym. On Engineering and Architecture for the Sustainable Development in the Greater Mekong Subregion**, สปป ลาว, pp. 68-73.
- [22] วาสนา คำโอภาส สราวุธ พลวงษ์ศรี และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2552), การเลือกขนาดตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ชนิดโพลีพรอพิลีนในการอุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ, การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 8, โรงแรมโพธิ์วัดลี รีสอร์ท แอนด์ สปา จ.เชียงราย
- [23] ภราดร หนูทอง, กันยาพร ไชยวงศ์, ณัฐนิ วรรณ, ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, ณัฐวุฒิ ดุษฎี (2550), การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ในระบบอบแห้งไม้, การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 6, โรงแรม อโมร่า ท่าแพ เชียงใหม่
- [24] กันยาพร ไชยวงศ์ จิรวรรณ เตียรต์สุวรรณ วารุณี เตียร ภราดร หนูทอง และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2551), การอุ่นน้ำสาด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อลดต้นทุนแอลพีจีในหน่วยกลั่น, การประชุมวิชาการ การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน ครั้งที่ 7, โรงแรมยูเรเซีย จ.เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright©by
Faculty of Engineering
Chiang Mai University
All Right Reserved