

การประเมินสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ ด้วยการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จี

วาณิช นิลนนท์^{1*} และ สุจิตา พิทักษ์วินัย²

บทคัดย่อ

การนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้ประโยชน์มีบทบาทกับการดำเนินชีวิตประจำวันมากขึ้น เนื่องจากพลังงานชนิดนี้เป็นพลังงานสะอาดปราศจากมลพิษและใช้ได้ไม่มีวันหมดสิ้น สามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานประเภทฟอสซิลที่ราคามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาการเพิ่มการสะสมของก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่ออุณหภูมิโลก สำหรับประเทศไทยพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานความร้อน โดยมีการใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญในการแปลงรูปพลังงานรังสีที่ตกกระทบให้เป็นความร้อน ความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้นจัดได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นในการออกแบบระบบผลิตพลังงานความร้อน ในบทความนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลวิธีการวิเคราะห์ความสามารถของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่มีความนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางโดยใช้หลักการวิเคราะห์ตามกฎข้อที่หนึ่งและการวิเคราะห์เอกเซอร์จีที่อยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบของประเทศไทยให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น สามารถเพิ่มความคุ้มค่าในเชิงพาณิชย์สำหรับทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นไปตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกที่กำหนดโดยกระทรวงพลังงาน

คำสำคัญ : ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ, พลังงาน, เอกเซอร์จี

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, นนทบุรี

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ, นนทบุรี

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: emnil@live.com รับเมื่อ 23 พฤษภาคม 2561 ตอบรับเมื่อ 10 กรกฎาคม 2561

Performance Assessment of Flat Plate Solar Collector Based on Energy and Exergy Analyses Method

Wanich Nilnont^{1*} and Sutida Phitakwinai²

Abstract

Renewable energy utilization has a greater role in daily life because this energy is clean without pollution and never run out. Renewable energy can help reduce fossil energy consumption that the price of fossil fuels is likely to rise all the time. Moreover, it also reduces the problem of increasing the accumulation greenhouse gases, thus affecting global temperatures. In Thailand, solar energy is one type of renewable energy that has the potential to transform into thermal energy. The main device used to convert an incident radiation into heat is solar collector. The ability to change the energy of a solar collector is important in designing a thermal power system. This paper gathers the information on the analysis methods of the capabilities of the solar collector using the first law of thermodynamics and exergy analysis based on the second law of thermodynamics. This information will serve a guideline to improve the quality of flat plate solar collector, which helps reduce the use of fossil fuels in the most cost-effective approach, following The Alternative Energy Development Plan set up by the Ministry of Energy.

Keywords : Flat plate solar collector, Energy, Exergy

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, 11000, Thailand.

² Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Nonthaburi, 11000, Thailand.

* Corresponding author, E-mail: emnil@live.com Received 23 May 2018, Accepted 10 July 2018

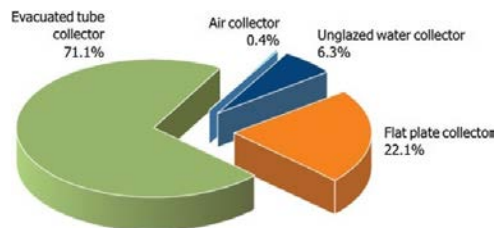
1. บทนำ

แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก เป็นหนึ่งในแผนบูรณาการพลังงานแห่งชาติในช่วงปี พ.ศ.2558 ถึง พ.ศ.2579 ที่จัดทำขึ้น โดยกระทรวง พลังงาน ซึ่งจะให้ความสำคัญในการพัฒนาศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทนด้วยเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสม และการพัฒนาพลังงานทดแทนเพื่อประโยชน์ร่วมใน มิติด้านสังคมและสิ่งแวดล้อมแก่ชุมชน

ความต้องการพลังงานเพื่อผลิตความร้อนเป็น สัดส่วนที่สำคัญในความต้องการพลังงานของประเทศ การผลิตความร้อนจากพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นเป้าหมาย หนึ่งที่อยู่ในการส่งเสริม จากการประเมินศักยภาพของ กลุ่มเป้าหมายตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและ พลังงานทางเลือกพบว่ามีความต้องการใช้พลังงานรังสี อาทิตย์เพื่อผลิตความร้อนใน 3 เทคโนโลยี ได้แก่ ระบบ ทำน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ ระบบอบแห้งรังสีอาทิตย์ และ ระบบทำความเย็นด้วยความร้อนรังสีอาทิตย์ คิดเป็น เป้าหมายการส่งเสริมรวม 1,200 Ktoe สำหรับระบบน้ำ ร้อนรังสีอาทิตย์มีกลุ่มเป้าหมายคือกลุ่มที่พักอาศัย โรงแรม โรงพยาบาล กลุ่มผู้ใช้ น้ำ ร้อน สำหรับ กระบวนการอุตสาหกรรม โดยมีเป้าหมายติดตั้งระบบน้ำ ร้อนรังสีอาทิตย์ประมาณ 9.17 ล้านตารางเมตร หรือ เทียบเท่าการผลิตความร้อน 1,160 Ktoe ในกลุ่มระบบ อบแห้งรังสีอาทิตย์มีกลุ่มเป้าหมายคือผู้ประกอบการ อบแห้งผลิตภัณฑ์ ทั้งใน ระดับครัวเรือน ระดับ อุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งสามารถลด ระยะเวลาและรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ตามความ ต้องการของผู้บริโภค โดยมีเป้าหมายส่งเสริมการติดตั้ง ระบบอบแห้งรังสีอาทิตย์ 75,000 m² หรือเทียบเท่าการ ผลิตพลังงานความร้อน 5 Ktoe และระบบทำความเย็น

ด้วยความร้อนรังสีอาทิตย์จะเป็นการนำน้ำร้อนจาก ระบบทำน้ำร้อนรังสีอาทิตย์มาเป็นแหล่งความร้อน ให้กับระบบผลิตความเย็นประเภทดูดซับความร้อน (Absorption chiller) โดยมีเป้าหมายส่งเสริมการใช้งาน ระบบทำความเย็นรังสีอาทิตย์ประมาณ 300,000 m² หรือ เทียบเท่าการผลิตความร้อน 35 Ktoe [1]

การใช้ประโยชน์จากพลังงานรังสีอาทิตย์จำเป็นต้อง มีอุปกรณ์ในการเปลี่ยนรูปพลังงาน ในกรณีเปลี่ยนรูป พลังงานรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนทำได้โดยการใช้ อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (Solar collector) ความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์นี้จะมีปริมาณ และคุณภาพมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถใน การเปลี่ยนรูปพลังงานของตัวเก็บรังสีจากการสำรวจ ข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าการใช้ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบมี สัดส่วนการใช้งานสูงถึง 21.1% เมื่อเทียบกับตัวเก็บรังสี ชนิดอื่น ๆ [2] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 สัดส่วนการใช้งานตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ ชนิดต่าง ๆ [2]

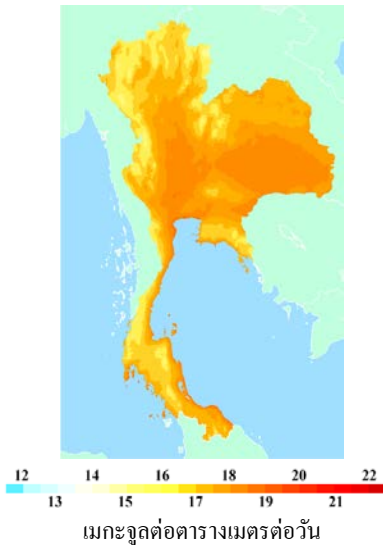
หลักการทางอุณหพลศาสตร์มีบทบาทที่สำคัญต่อ การวิเคราะห์ระบบทางความร้อน โดยกฎข้อที่หนึ่งของ อุณหพลศาสตร์เป็นกฎของความสัมพันธ์ระหว่างการ เปลี่ยนแปลงพลังงานในระบบกับความร้อนและงานที่ ผ่านข้ามขอบเขตของระบบ กฎนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ ทั่วไปว่า “กฎอนุรักษ์พลังงาน” กล่าวคือ เมื่อพลังงาน

รูปแบบหนึ่งหายไปก็จะมีพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่มีปริมาณเท่ากันมาแทน เพราะพลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายลงไปได้ ถ้าวิเคราะห์ระบบตามหลักการประสิทธิภาพจะได้ผลลัพธ์ในรูปของการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานที่ให้กับระบบแล้วได้เป็นพลังงานออกมาได้ร้อยละเท่าไร สำหรับการวิเคราะห์พลังงานตามกฎข้อที่สองที่กล่าวว่า “พลังงานที่มีอยู่ในสารทำงานที่สถานะหนึ่งนั้นไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด” ซึ่งตรงกับความจริงในทางปฏิบัติที่ว่าพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะมีส่วนหนึ่งที่สามารถใช้ประโยชน์ได้และอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์เอกเซอร์จีที่อยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองนั้นเป็นหลักการวิเคราะห์พลังงานที่สามารถทำการคาดคะเนถึงพลังงานในส่วนที่เป็นประโยชน์ของระบบใดระบบหนึ่งกระทำได้ ซึ่งมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมที่กำหนดไว้ชัดเจน โดยพลังงานส่วนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์นี้ถ้านำไปใช้ไม่ถูกวิธีการก็จะมี การสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้นอีก การสูญเสียที่เกิดขึ้นในส่วนหลังนี้คือ “การย้อนกลับไม่ได้” ถ้ากล่าวถึงหลักการวิเคราะห์ระบบตามหลักการประสิทธิภาพ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจะเป็นการเปรียบเทียบในรูปอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เป็นประโยชน์ที่ระบบทำได้จริงกับค่าพลังงานสูงสุดที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์

สำหรับประเทศไทยรังสีอาทิตย์รวมรายวันเฉลี่ยต่อปีของพื้นที่ทั่วประเทศมีค่าเท่ากับ $18.2 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$ หรือ $5.05 \text{ kWh/m}^2\text{-day}$ จากรูปที่ 2 จะเห็นว่าบริเวณที่มีค่าสูงจะอยู่ที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่างและในตอนกลางของภาคกลางรวมถึงพื้นที่บริเวณตามแนวชายฝั่งของประเทศ สำหรับบริเวณที่มีค่ารังสีรวมทั้ง

ก่อนข้างต้นนั้น พบว่าอยู่ในบริเวณพื้นที่ภูเขาทางภาคเหนือรวมถึงด้านทิศตะวันตกและทิศตะวันออกของภาคกลาง นอกจากนี้ยังพบที่บริเวณรอยต่อของภาคเหนือกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบนและในพื้นที่ของภาคใต้บางส่วน [3] แม้ว่าระดับศักยภาพพลังงานรังสีอาทิตย์ของประเทศจะมีค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากภูมิประเทศตั้งอยู่ในเขตร้อน ค่าเฉลี่ยของรังสีกระจายจึงมีสัดส่วนที่สูง ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ในรูปของความร้อนจะต้องเป็นชนิดที่ไม่รวมแสง [4] ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นตัวเก็บรังสีที่มีความเหมาะสมชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กับลักษณะภูมิอากาศสำหรับประเทศไทยเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ราคาต้นทุนการผลิตไม่สูง การบำรุงดูแลรักษาทำได้ง่ายและที่สำคัญสามารถสร้างขึ้นเองได้ โดยตัวเก็บรังสีชนิดนี้มีความเหมาะสมกับงานที่ไม่ต้องการอุณหภูมิสูงคือประมาณ 50°C ถึง 60°C หรือถ้าต้องการอุณหภูมิที่ 80°C ถึง 90°C สามารถทำได้โดยใช้แผ่นดูดกลืนรังสีเป็นชนิดเลือกรังสีและต้องมีจำนวนแผ่นปิดใสปิดด้านบนของตัวเก็บรังสีมากกว่าหนึ่งชั้น การหาความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนของตัวเก็บรังสีเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบหรือพัฒนาให้ได้ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์มากที่สุดเท่าที่จะมีได้หลังจากผ่านอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงาน ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่เพิ่มเติมความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับระบบการทำงานรวมถึงการพัฒนาเพื่อเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบในการผลิตความร้อน โดยมีการวิเคราะห์ระบบการทำงานด้วยการใช้กฎข้อที่สองและการวิเคราะห์เอกเซอร์จีที่อยู่บน

พื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ในการหาประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

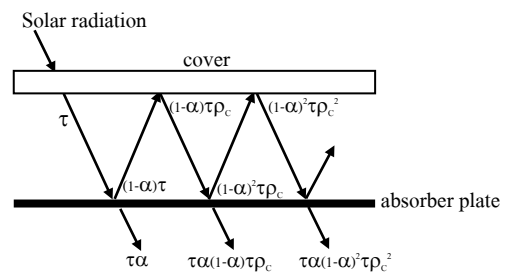


รูปที่ 2 แผนที่รังสีรวมรายวัน 3 เดือนต่อปี [3]

2. ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนแล้วถ่ายเทให้กับของไหลทำงานเพื่อนำไปใช้งาน ของไหลทำงานที่ใช้โดยมากได้แก่ น้ำหรืออากาศ ซึ่งโครงสร้างของอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยแผ่นปิดใสโปร่งแสงที่ส่วนมากทำจากกระจก แผ่นดูดกลืนรังสีที่ทำหรือเคลือบสีดำด้านและมีช่องทางให้ของไหลทำงานมารับความร้อน โดยมีการหุ้มฉนวนบริเวณด้านข้างและด้านล่างของอุปกรณ์เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบที่แผ่นปิดโปร่งแสง รังสีอาทิตย์สามารถผ่านไปอยู่ที่แผ่นดูดกลืนรังสีบางส่วน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าสภาพการส่งผ่าน (τ , transmittance) ของแผ่นปิดโปร่งแสง ซึ่งในกรณีกระจกมีค่าประมาณ 0.85 และที่แผ่นดูดกลืนรังสีมีค่าสภาพการ

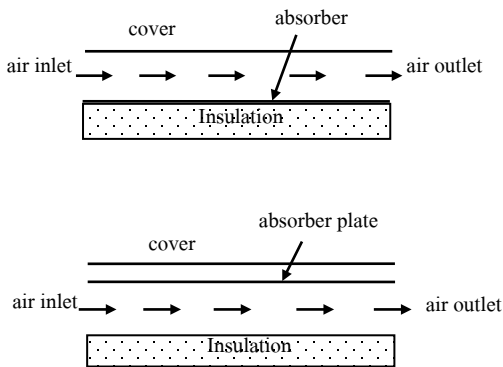
ดูดกลืน (α , absorptance) ในกรณีผิวที่ทำหรือเคลือบด้วยสีดำด้านจะมีค่าประมาณ 0.95 โดยที่รังสีอาทิตย์บางส่วนสะท้อนกลับไปที่แผ่นปิดโปร่งแสงอีกและจะมีการสะท้อนกลับไป-มา ระหว่างแผ่นดูดกลืนรังสีและแผ่นปิดโปร่งแสง แต่ในกรณีแผ่นปิดโปร่งแสงเป็นกระจกจะมีค่าการสะท้อนรังสีที่ต่ำมาก [5] เมื่อของไหลทำงานเข้าไปในตัวเก็บรังสีก็จะรับความร้อนจากแผ่นดูดกลืนรังสีทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3



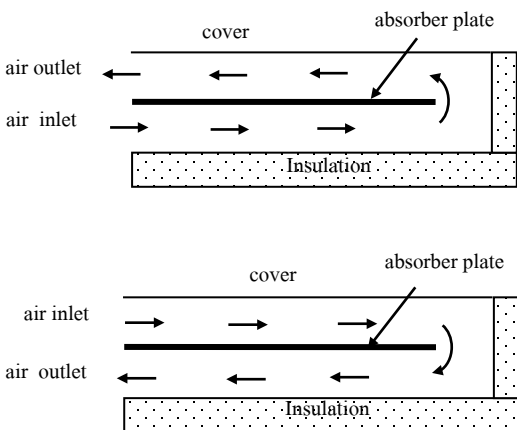
รูปที่ 3 ระบบการส่งผ่านและการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดโปร่งแสง [6]

2.1 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบชนิดของไหลทำงานเป็นอากาศ

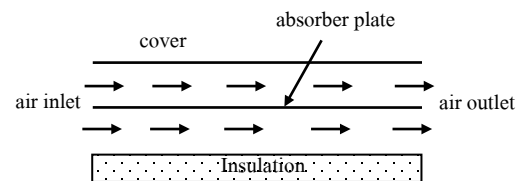
การเคลื่อนที่ของอากาศที่ผ่านตัวเก็บรังสีแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีช่องทางเดียว (single pass) และ สองช่องทาง (double pass) ก่อนนำอากาศร้อนไปใช้งาน การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีช่องทางเดียวอาจจะมี การเคลื่อนที่ผ่านด้านบนหรือด้านล่างของแผ่นดูดกลืนรังสีเพียงช่องทางใดช่องทางหนึ่งเท่านั้น ส่วนตัวเก็บรังสีอีกประเภทหนึ่งคือการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านแผ่นดูดกลืนรังสีสองช่องทางอากาศมีการเคลื่อนที่ผ่านทั้งด้านบนและด้านล่างของแผ่นดูดกลืนรังสีก่อนนำออกไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



รูปที่ 4 ตัวเก็บรังสีแบบช่องทางเดียว (Single-pass air solar heater) (ดัดแปลงจาก [7])



(a)

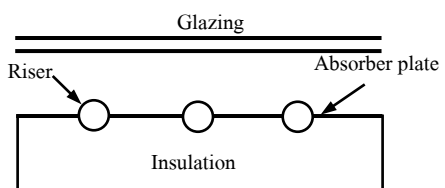


(b)

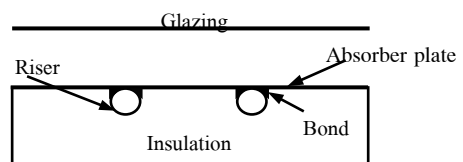
รูปที่ 5 ตัวเก็บรังสีแบบสองช่องทาง (a) การไหลแบบสวนทาง (counter flow) และ (b) การไหลแบบขนาน (parallel flow) (ดัดแปลงจาก [7])

2.2 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบชนิดของไหลทำงานเป็นของเหลว

ตัวเก็บรังสีอาทิตย์เป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญของระบบทำน้ำร้อนด้วยพลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับพลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับน้ำ ภายในตัวเก็บรังสีนิยมจัดวางท่อบรรจุของไหลทำงาน (risers) 2 รูปแบบคือ การติดตั้งให้จุดศูนย์กลางของท่อบรรจุของไหลทำงานอยู่ระดับเดียวกับแผ่นดูดกลืนรังสี (tubes centered in the plate) ดังแสดงในรูปที่ 6 และการติดตั้งท่อบรรจุของไหลทำงานไว้ด้านล่างของแผ่นดูดกลืนรังสี (tubes under the plate) ดังแสดงในรูปที่ 7 ส่วนตัวเก็บรังสีแบบมีการจัดวางท่อบรรจุของไหลทำงานที่อยู่ระดับเดียวกับแผ่นดูดกลืนรังสีจะมีพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าการจัดวางท่อบรรจุของไหลทำงานไว้ด้านล่างของแผ่นดูดกลืนรังสี จึงมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากแผ่นรับรังสีไปยังของไหลทำงานได้ในปริมาณมากกว่า



รูปที่ 6 ตัวเก็บรังสีที่ท่อบรรจุของไหลอยู่ระดับเดียวกับแผ่นดูดกลืนรังสี (ดัดแปลงจาก [8])



รูปที่ 7 ตัวเก็บรังสีที่ท่อบรรจุของไหลอยู่ด้านล่างของแผ่นดูดกลืนรังสี (ดัดแปลงจาก [9])

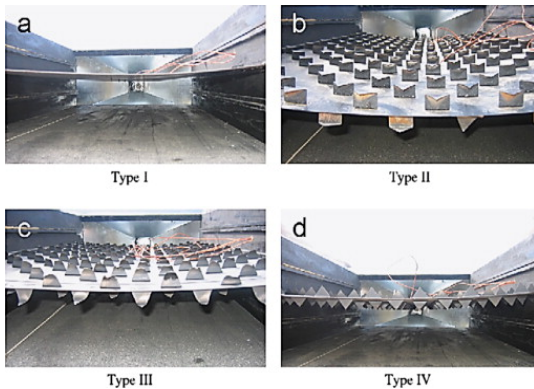
3. การเพิ่มสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

3.1 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบชนิดของไหลทำงานเป็นอากาศ

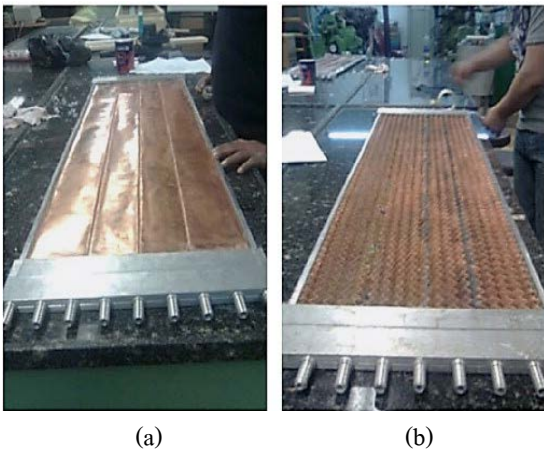
การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้สารทำงานเป็นอากาศนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในตัวเก็บรังสี โดยเพิ่มพื้นที่ผิวของแผ่นดูดกลืนและทำให้ของไหลภายในตัวเก็บรังสีมีการไหลแบบปั่นป่วนมากขึ้น หรือเพิ่มแผ่นปิดโปรงแสงมากกว่า 1 ชั้น ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ เช่น Esen [10] ได้ทำการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์กีดขวางการไหล (obstacles) ของอากาศที่แผ่นดูดกลืนรังสี เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงใน รูปที่ 8 จากนั้นได้ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์เอกเซอร์จีของระบบ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับแผ่นดูดกลืนรังสีแบบแผ่นเรียบ พบว่าในกรณีที่แผ่นดูดกลืนรังสีชนิดแผ่นเรียบมีค่าการย้อนกลับไม่ได้ (irreversibility) เกิดขึ้นมากกว่าและมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์กีดขวางการไหล จากนั้น El-Sawi et al. [11] ได้ศึกษาค้นและติดตั้งครีบริบรูปตัววีดังแสดงในรูปที่ 9 บนแผ่นดูดกลืนรังสี (chevron plate) โดยทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบและอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสี ซึ่งกำหนดอัตราการไหลของอากาศระหว่าง $0.01 - 0.05 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ พบว่าในกรณีติดตั้งครีบริบตัววีทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่ออกจากตัวเก็บรังสีจะสูงกว่าแบบธรรมดาประมาณ 20% และ 10°C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 10 อุณหภูมิที่ออกจากตัวเก็บรังสีนั้นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตรา

การไหลเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ Ucar และ Inalli [12] ได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ระบบเพื่อให้มีเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการจัดวางแผ่นดูดกลืนรังสีในลักษณะที่แตกต่างกันภายในตัวเก็บรังสีจำนวน 3 แบบและแบบที่ 4 เป็นการติดตั้งครีบริบบนแผ่นดูดกลืนรังสีในช่องทางการไหลของอากาศดังแสดงในรูปที่ 11 พบว่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีทั้ง 4 แบบมีค่าสูงกว่าแบบธรรมดาที่เป็นชนิด double pass และมีค่าการย้อนกลับไม่ได้ที่ต่ำกว่าแบบธรรมดา Akpinar และ Kocyigit [13] ได้ติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลของอากาศจำนวน 3 แบบร่วมกับอุปกรณ์กีดขวางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 12 เปรียบเทียบกับชนิดธรรมดาโดยทำการทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและสอง ด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.0074 และ 0.0052 kg/s พบว่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 20% - 82% และประสิทธิภาพตามกฎข้อที่สองมีค่าอยู่ระหว่าง 8.32% - 44% โดยที่ตัวเก็บรังสีแบบชนิดธรรมดาจะมีประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและสองต่ำที่สุด Sabzpooshani et al. [14] ทำการศึกษาจำนวนของแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลและแผ่นปิดโปรงแสงที่ผลต่อประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสี ซึ่งตัวเก็บรังสีมีขนาด $2 \times 1 \text{ m}^2$ โดยทำการทดลองในห้องปฏิบัติการซึ่งควบคุมความเข้มรังสีอยู่ที่ 700 W/m^2 ด้านบนของตัวเก็บรังสีติดตั้งกระจกเป็นแผ่นปิดโปรงแสง ส่วนด้านล่างและด้านข้างหุ้มด้วยฉนวน แผ่นดูดกลืนรังสีได้ติดตั้งครีบริบและแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลของอากาศกว้าง 0.005 m ยาว 0.1 m จำนวน 5, 7, 9 และ 11 แผ่น ดังรูปที่ 13 พบว่าการติดตั้งแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลจำนวน 11 แผ่นทำให้มีประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของระบบมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ

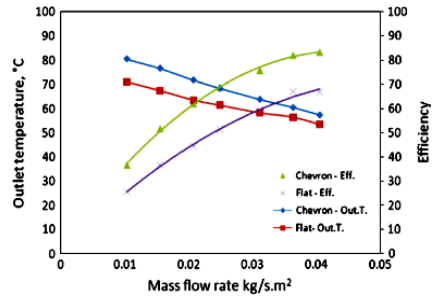
0.01 kg/s ดังแสดงในรูปที่ 14 จากนั้นติดตั้งแผ่นปิดโปรงแสงที่ด้านบนเพิ่มอีก 1 แผ่น พบว่าระบบที่ติดตั้งแผ่นปิดโปรง 2 ชั้นและแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลจำนวน 5 แผ่นมีประสิทธิภาพเอกเซอร์จิจของระบบสูงกว่าการติดตั้งแผ่นปิดโปรงแสงเพียง 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 15



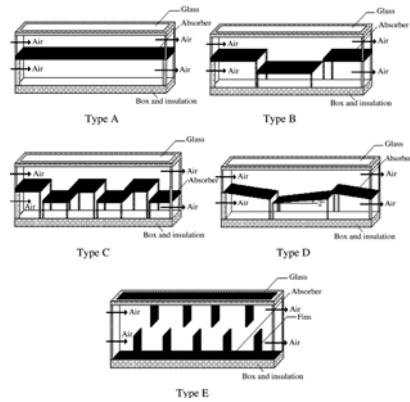
รูปที่ 8 แผ่นดูดกลืนรังสีแบบไม่มีและมีอุปกรณ์กีดขวางการไหลแบบต่าง ๆ [10]



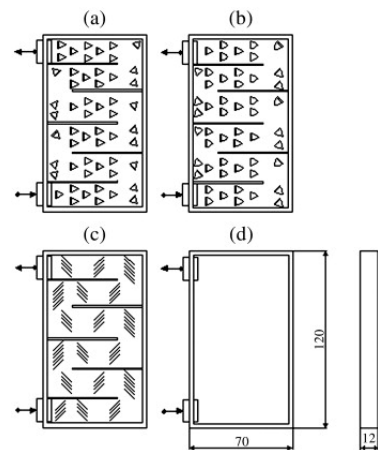
รูปที่ 9 แผ่นดูดกลืนรังสี (a) แบบเรียบ (flat plate) และ (b) แบบตัววี (chevron plate) [11]



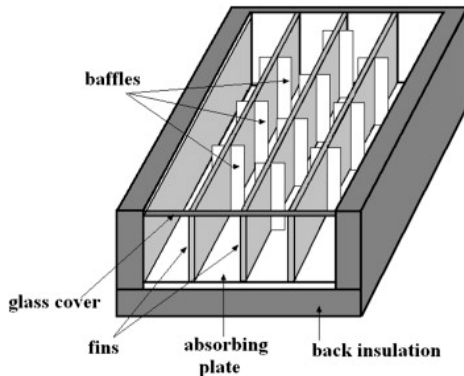
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและอุณหภูมิที่ออกจากตัวเก็บรังสี [11]



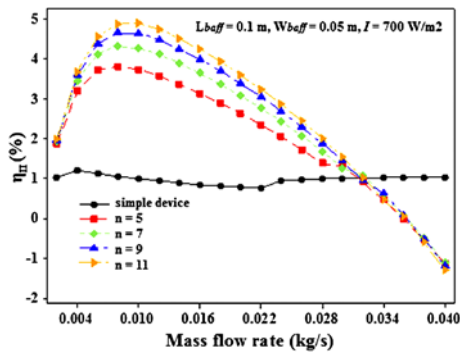
รูปที่ 11 ภาพตัดขวางของตัวเก็บรังสีที่มีอุปกรณ์กีดขวางการไหลแบบต่าง ๆ [12]



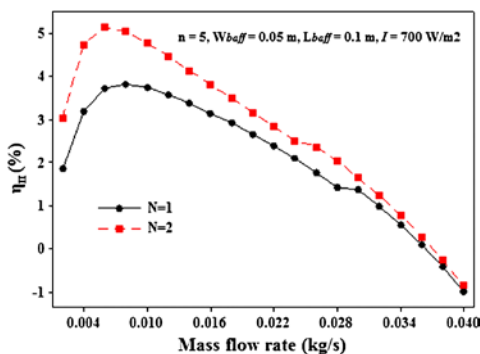
รูปที่ 12 ตัวเก็บรังสีแบบไม่มีและมีอุปกรณ์กีดขวางการไหลแบบต่าง ๆ [13]



รูปที่ 13 การติดตั้งกริปและแผ่นบังคับทิศทางการไหลบนแผ่นดูดกลืนรังสี [14]



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอกเซอร์จีและอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ [14]



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเอกเซอร์จีอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ และจำนวนแผ่นปิดโปรงแสง [14]

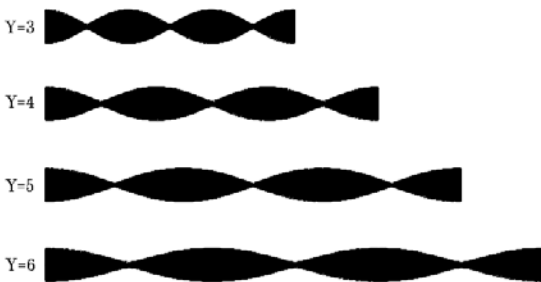
3.2 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบชนิดของไหลทำงานเป็นของเหลว

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบที่ใช้ของเหลวเป็นของไหลทำงานสามารถทำได้หลายวิธีการเช่น การเลือกชนิดของแผ่นดูดกลืนรังสีการทาสีเลือกรังสี (Selective coating) การลดการพาความร้อนจากผิวดูดรังสีมายังแผ่นปิดโปรงแสงด้วยการควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศที่อยู่ระหว่างผิวแผ่นดูดกลืนรังสีและผิวแผ่นปิดโปรงแสงให้มีค่าต่ำที่สุด การเลือกตำแหน่งติดตั้งและมุมในการรับรังสีอาทิตย์ และการเลือกชนิดของฉนวนให้เหมาะสม นอกจากนี้ยังมีกรสอดแผ่นไบบิด (twisted tape) [15] ดังแสดงในรูปที่ 16 เพื่อสร้างความปั่นป่วนและเพิ่มความเร็วสัมผัสของของไหลบริเวณใกล้ผนังท่อ ซึ่งเป็นการเพิ่มสมรรถนะทางความร้อน โดยการพาแบบบังคับส่งผลให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดย Pholboom [16-18] ได้ทำการรวบรวมข้อมูลวิธีการสำหรับการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในท่อกลมโดยการสอดแผ่นไบบิดชนิดต่าง ๆ ไว้ในท่อเพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านพบว่าวิธีการนี้สามารถเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนให้กับระบบได้มากขึ้น โดยมีการลงทุนที่ต่ำเนื่องจากไบบิดสามารถขึ้นรูปได้ง่าย Jaisankar et al. [19] ได้ทำการทดลองโดยเลือกใช้ไบบิดที่มีมุมบิด 18° ที่แสดงในรูปที่ 17 สำหรับใส่ในท่อของตัวเก็บรังสีพบว่าที่ไบบิด Y=3 สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำร้อนให้สูงขึ้นดีกว่าไบบิดอื่น ๆ Murugesan et al. [20] ยังได้สร้างไบบิดชนิดมีร่องสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal-cut twisted tape) ดังแสดงในรูปที่ 18 ที่อัตราส่วนการบิดที่ 6 และ 4 สำหรับการสร้างการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อ จากการทดลอง

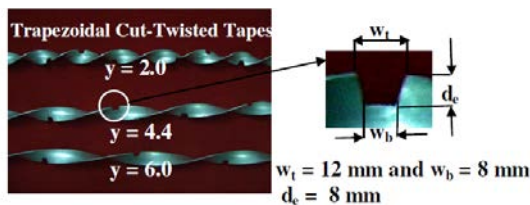
พบว่าที่อัตราส่วนการบิดที่ 6 และ 4 สามารถเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ 27% และ 41.8% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไหลผ่านท่อแบบปกติ นอกจากนี้ยังได้มีการออกแบบใบบิดเพื่อใช้ในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเกิดความดันลด ในการไหลของสารทำงานภายในท่อ ดังแสดงในรูปที่ 19 โดย Mohammed [21] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการลดอัตราส่วนการบิดตัวของแผ่นใบบิดภายในท่อ



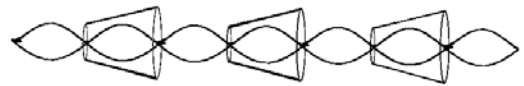
รูปที่ 16 ใบบิด (Twisted tape) ที่อัตราส่วนการบิด $Y=y/w$ (คัดแปลงจาก [15])



รูปที่ 17 ใบบิดที่มีมุมบิด 18° ที่อัตราส่วนการบิด $Y=3, 4, 5$ และ 6 [19]



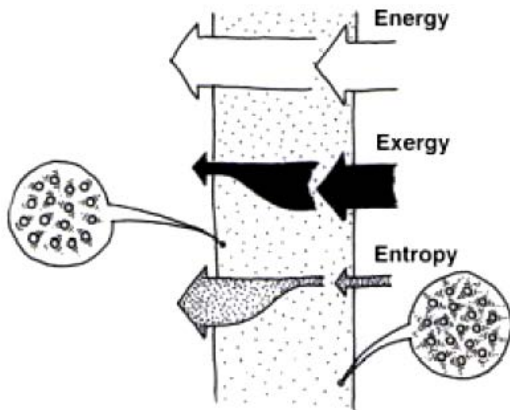
รูปที่ 18 ใบบิดชนิดมีร่องสี่เหลี่ยมคางหมู [20]



รูปที่ 19 ภาพตัดขวางของท่อสอดใบบิดและกรวยวงแหวน (คัดแปลงจาก [21])

4. การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีสำหรับตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบ

ในการวิเคราะห์พลังงานจะมีการนำกฎทางอุณหพลศาสตร์ข้อที่หนึ่งและข้อที่สองมาวิเคราะห์ โดยที่กฎข้อที่หนึ่งจะมีความเกี่ยวข้องกับพลังงานในเชิงปริมาณที่มีการใช้ระหว่างกระบวนการ ส่วนกฎข้อที่สองจะกล่าวถึงพลังงานในส่วนที่นำไปใช้เป็นประโยชน์ได้ (Available energy) โดยมีการวิเคราะห์ในรูปแบบของเอกเซอร์จี ซึ่งเอกเซอร์จีเป็นการคาดคะเนถึงค่าสูงสุดของพลังงานที่เป็นประโยชน์ที่ระบบสามารถทำได้ เมื่อระบบเปลี่ยนแปลงสภาวะด้วยกระบวนการย้อนกลับได้จากสภาวะที่กำหนด โดยอ้างอิงกับสภาวะแวดล้อม ในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถใช้เอกเซอร์จีได้ทั้งหมด เอกเซอร์จีบางส่วนสูญเสียไปเนื่องจากสภาพการย้อนกลับไม่ได้ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เอกเซอร์จีในกระบวนการย้อนกลับไม่ได้จะเป็นสัดส่วนที่แปรผันกับการเกิดเอนโทรปีดังแสดงในรูปที่ 20 [22] เอนโทรปีเป็นสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ที่ไม่ขึ้นอยู่กับเส้นทางเดินของกระบวนการ แต่จะขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้นและสุดท้าย ซึ่งเอนโทรปีเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณของพลังงานที่ถูกทำลาย



รูปที่ 20 การถ่ายโอนพลังงาน เอกเซอร์จี และเอนโทรปีผ่านระบบ [22]

โดยที่การเปลี่ยนแปลงสภาวะของสารทำงานหรือระบบใดๆ มักจะมีการสูญเสียพลังงานที่เรียกว่า “การย้อนกลับไม่ได้ (irreversibility)” เกิดขึ้นเสมอ

4.1 ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบโดยใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน

ตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นอุปกรณ์ผลิตความร้อนให้กับอากาศที่เคลื่อนที่ผ่าน เพื่อนำความร้อนที่สะสมไว้ในอากาศไปใช้งาน กระบวนการในการทำงานสามารถพิจารณาให้เป็นกระบวนการไหลแบบสภาวะคงตัว โดยการทำงานของตัวเก็บรังสีจะมีการไหลของมวลอากาศเข้าสู่และออกจากอุปกรณ์ด้วยสมบัติในระบบ ณ ตำแหน่งใด ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลาและมวลอากาศที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์เท่ากับมวลอากาศที่ออกจากตัวเก็บรังสี การวิเคราะห์จะทำโดยการประยุกต์ใช้สมการอนุรักษ์มวลและหลักการอนุรักษ์พลังงาน โดยที่สมการทั่วไปของการอนุรักษ์มวลของอากาศและการอนุรักษ์พลังงาน สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [23]

$$\sum \dot{m}_{ai} = \sum \dot{m}_{ao} \tag{1}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_o \left(h_o + \frac{v_o^2}{2} \right) + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{v_i^2}{2} \right) \tag{2}$$

พลังงานรังสีตกกระทบบนระนาบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์หาได้จาก

$$Q_c = A I_s \tag{3}$$

โดยที่ A คือพื้นที่รับรังสีอาทิตย์ และ I_s คือรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบของตัวเก็บรังสี

พลังงานใช้ประโยชน์ที่ได้ (Q_u) จากตัวเก็บรังสีสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$Q_u = \alpha \tau I_s A \tag{4}$$

โดยที่ α คือ ค่าสภาพการดูดกลืนที่แผ่นดูดกลืนรังสี และ τ คือ สภาพการส่งผ่านของแผ่นปิดโปร่งแสง สารทำงานที่ไหลเข้าไปในตัวเก็บรังสีอาทิตย์จะได้รับความร้อนจากผิวดูดรังสีโดยที่ค่าอัตราการความร้อนที่สารทำงานได้รับในช่วงเวลาใดๆ สามารถหาได้ดังนี้

$$Q_u = Q_f = \dot{m}_f C_{pf} (T_{fo} - T_{fi}) \tag{5}$$

โดยที่ \dot{m}_f และ C_{pf} คือ ค่าอัตราการไหลเชิงมวลและค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน ส่วน T_{fo} คือ อุณหภูมิของสารทำงานที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสี และ T_{fi} คือ อุณหภูมิของสารทำงานที่ไหลเข้าตัว

เก็บรังสี ในการหาค่าการเปลี่ยนพลังงานรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเป็นพลังงานความร้อนที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาจากค่าประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตามกฎข้อที่หนึ่งทางอุณหพลศาสตร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{th} = \frac{Q_f}{AI_s} \quad (6)$$

4.1.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีในตัวเก็บรังสีอาทิตย์นั้นอยู่บนพื้นฐานของกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์ โดยมีความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ผ่านเข้ามาของขอบเขตของระบบและระบบจะมีการแปลงพลังงานจากรังสีอาทิตย์เป็นความร้อนให้กับของไหลทำงานที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าและออกจากตัวเก็บรังสีในภาวะคงตัว (Steady state) ซึ่งกระบวนการนี้จัดได้ว่าเป็นกระบวนการให้ความร้อนจากแหล่งผลิตความร้อนที่มีขนาดใหญ่มากที่ความดันคงที่ให้กับของไหลทำงาน ค่าเอ็กเซอร์จีสามารถคำนวณได้จากการสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ดังสมการต่อไปนี้ [24]

$$\text{Exergy} = (h - h_{\infty}) - T_{\infty}(s - s_{\infty}) + \frac{v^2}{2} + gz \quad (7)$$

โดยที่ ∞ หมายถึงสภาวะอ้างอิง สำหรับการวิเคราะห์ซึ่งใช้สภาวะแวดล้อมเป็นสภาวะอ้างอิงจากสมการที่ (7) การเปลี่ยนแปลงเอ็กเซอร์จีของกระบวนการสามารถตัดเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากออกจากสมการ และสมมติฐานว่าอากาศเป็นแก๊ส

อุดมคติมีค่าความร้อนจำเพาะคงที่ไม่คิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นในอากาศ ดังนั้นวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีสามารถเขียนดังสมการต่อไปนี้ [25]

$$\text{Exergy} = \dot{m}_a C_{p_a} \left[(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \frac{T}{T_{\infty}} \right] \quad (8)$$

จากสมการที่ (8) ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าเอ็กเซอร์จีที่เพิ่มขึ้นในของไหลทำงานเมื่อรับเอ็กเซอร์จีจากตัวเก็บรังสี (\dot{Ex}_f) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Ex}_f = \dot{m} [(h_o - h_i) - T_a (s_o - s_i)] \quad (9)$$

$$\dot{Ex}_f = \dot{m} C_p \left[(T_o - T_i) - T_a \left(\ln \frac{T_o}{T_i} \right) \right] \quad (10)$$

สำหรับเอ็กเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับได้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์มายังตัวเก็บรังสี [26] สามารถแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$\dot{Ex}_{solar} = Q_{ab} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (11)$$

โดยที่ T_a คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และ T_s คืออุณหภูมิเทียบเท่าดวงอาทิตย์มีค่าโดยประมาณ 5,770 K ซึ่ง

$$Q_{ab} = (\tau\alpha)Q_c$$

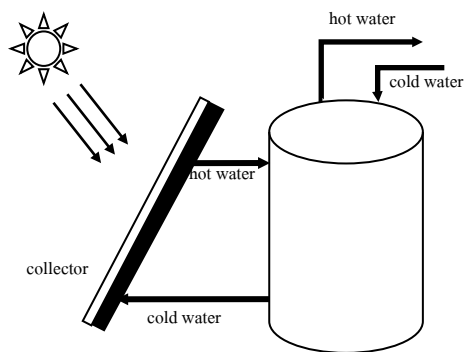
ตัวห้อย i และ o แสดงตำแหน่งที่เข้าและออกจากตัวเก็บรังสี ในการหาประสิทธิภาพเอ็กเซอร์จี (ψ) ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนเอ็กเซอร์จีที่เพิ่มขึ้นของอากาศเมื่อออกจากตัวเก็บรังสีต่อเอ็กเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีรับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\psi = \frac{\dot{E}x_f}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{mC_p \left[(T_o - T_i) - T_a \left(\ln \frac{T_o}{T_i} \right) \right]}{Q_{ab} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right]} \quad (12)$$

4.2 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบที่ใช้ของไหลทำงานเป็นน้ำ

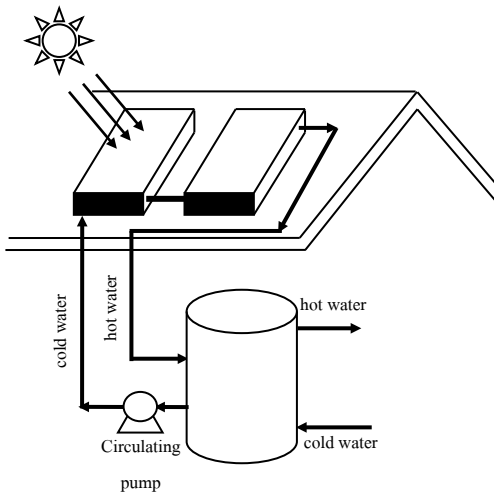
การทำน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการรับพลังงานจากรังสีอาทิตย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งระบบทำน้ำร้อนจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักที่สำคัญคือ ตัวเก็บรังสีอาทิตย์และถังสะสมน้ำร้อน ระบบทำน้ำร้อนที่มีการใช้งานจะมี 2 รูปแบบคือ ระบบเทอร์โมไซฟอน (Thermosyphon) หรือเรียกว่าแบบพาสซีฟ (Passive system) และอีกระบบคือระบบแอคทีฟ (Active system) โดยระบบแรกจะไม่มีปั๊มในการทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลจะเคลื่อนที่จากความแตกต่างของความหนาแน่น เมื่อของไหลที่อยู่ในตัวเก็บรังสีได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์จะมีความหนาแน่นลดลง เนื่องจากอุณหภูมิของไหลมีค่าที่สูงขึ้นทำให้ของไหลลอยตัวไปที่ถังเก็บสะสมน้ำร้อนทางด้านบนและของไหลที่อยู่ในถังเก็บสะสมน้ำร้อนบริเวณด้านล่างที่มีความหนาแน่นที่มากกว่าก็จะไหลไปแทนที่เข้าสู่ตัวเก็บรังสีเพื่อรับความร้อน ซึ่งระบบนี้ถึงสะสมน้ำร้อนต้องติดตั้งในตำแหน่งที่อยู่เหนือตัวเก็บรังสี ในระบบนี้จะมีข้อดีคือไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้า ง่ายต่อการดูแลและบำรุงรักษา แต่ประสิทธิภาพของระบบพาสซีฟจะต่ำกว่าระบบแอคทีฟ ส่วนระบบแอคทีฟประกอบด้วยปั๊ม วาล์ว และระบบควบคุมการทำงาน โดยที่ปั๊มทำหน้าที่ช่วยในการหมุนเวียนของไหลในระบบ ซึ่งระบบแอคทีฟนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบพาสซีฟและสามารถติดตั้งถังสะสมน้ำร้อนได้ตามตำแหน่งที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 21

ระบบแอคทีฟมีการออกแบบให้ใช้งานใน 2 ลักษณะ คือ ระบบเปิด (open loop active) และระบบปิด (close loop active) ระบบเปิดจะมีการหมุนเวียนน้ำผ่านตัวเก็บรังสีแล้วน้ำมาเก็บในถังสะสมน้ำร้อนเพื่อรอการนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 21(b) ซึ่งระบบเปิดนี้มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง แต่มีข้อควรระวังในการใช้น้ำที่ใช้น้ำในระบบจะต้องมีคุณภาพที่ดีเพื่อไม่มีความกระด้างหรือเป็นกรด เพราะจะทำให้อุปกรณ์ของระบบได้รับความเสียหาย ส่วนอีกระบบปิดเป็นระบบที่แยกระหว่างระบบผลิตความร้อนและระบบนำความร้อนไปใช้งานดังแสดงในรูปที่ 21(c) ระบบปิดจะมีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับถ่ายเทความร้อนจากระบบผลิตความร้อนให้กับระบบนำความร้อนไปใช้งาน ถ้าระบบนี้ใช้น้ำเป็นของไหลทำงานในระบบผลิตความร้อนจะมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าแบบระบบเปิดเนื่องจากมีค่าการย้อนกลับไม่ได้เพิ่มขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สามารถทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้ของไหลทำงานเป็นของไหลนาโนแทนที่ในระบบผลิตความร้อน

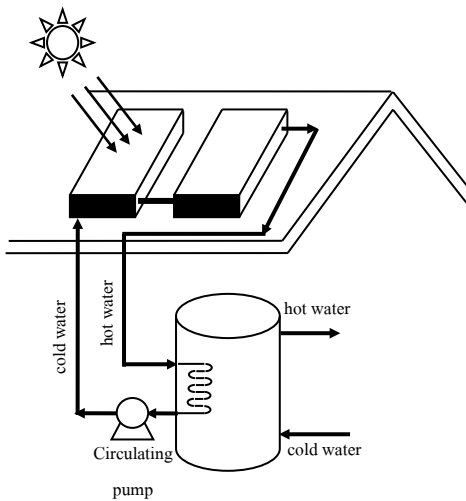


(a) ระบบเทอร์โมไซฟอน

รูปที่ 21 ระบบทำน้ำร้อน [27-28]



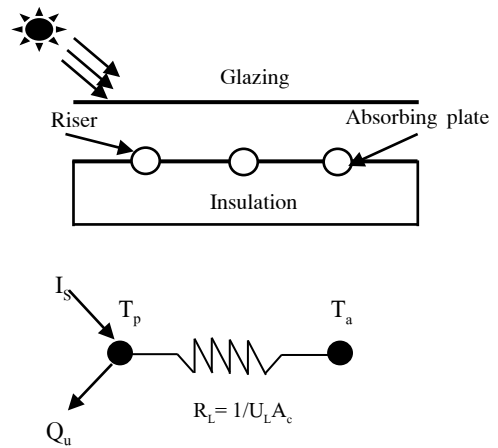
(b) ระบบแอกทีฟ ระบบเปิด



(c) ระบบแอกทีฟ ระบบปิด

รูปที่ 21 (ต่อ) ระบบทำน้ำร้อน [27-28]

4.2.1 การใช้กฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์



รูปที่ 22 การสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บรังสี [9]

จากโครงสร้างของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบในรูปที่ 22 สามารถนำกฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์มาทำสมดุลพลังงานของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบได้ดังนี้ [9]

$$\dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} \quad (13)$$

โดยที่ \dot{E}_{st} คือพลังงานที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์, \dot{E}_{in} คือพลังงานที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์รับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์, \dot{E}_{out} คือพลังงานที่สูญเสียออกจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์, \dot{E}_{gen} คือแหล่งผลิตความร้อนภายในตัวเก็บรังสี ซึ่งในกรณีนี้ไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในตัวเก็บรังสีดังกล่าว

จากสมการที่ (13) สามารถแสดงในรูปแบบของการสมดุลพลังงานบนตัวเก็บรังสีได้ดังนี้ [5]

$$Q_u = A_c [s - U_L (T_p - T_a)] \quad (14)$$

และ $S = I_s (\tau \alpha) \quad (15)$

โดย Q_u คือความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์, A_c คือพื้นที่ของตัวเก็บรังสี S คือรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนโดยแผ่นดูดกลืนรังสี, U_L คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน $T_p - T_a$ คือความแตกต่างของระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของแผ่นดูดกลืนรังสีและอากาศแวดล้อม

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (U_L) สามารถหาได้จากสมการ

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (16)$$

โดย U_t คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสี, U_b คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่างของตัวเก็บรังสี, และ U_e คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านข้างของตัวเก็บรังสี

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านบนของตัวเก็บรังสี (U_t) สามารถหาได้จากสมการ [5]

$$U_t = \frac{1}{\frac{N_g}{\frac{C}{T_p} \left[\frac{T_p - T_a}{N + \tau} \right]^{0.33} + \frac{1}{h_w}} + \frac{\sigma(T_p^2 - T_a^2)(T_p + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.05N_g(1 - \varepsilon_p)} + \frac{2N_g + \tau - 1}{\varepsilon_g} + N_g} \quad (17)$$

โดย N_g คือจำนวนของแผ่นปิดที่เป็นกระจกของตัวเก็บรังสี, σ คือค่าคงตัวสเตฟาน โบลท์มานน์, ε_p และ ε_g คือค่าการแผ่รังสีของแผ่นดูดกลืนและกระจก สำหรับค่า h_w คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนโดยลม สามารถหาได้จากสมการ [8]

$$h_w = \frac{8.6V_w^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (18)$$

โดย v_w คือความเร็วลม, L คือความยาวของตัวเก็บรังสี ซึ่งในการคำนวณ โดยใช้สมการ (18) พบว่าค่าที่ได้ ออกมาน้อยกว่า $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ดังนั้นจะสมมติฐานให้ค่า h_w เท่ากับ $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำจนเกือบหยุดนิ่ง [9] สำหรับค่าคงที่ τ และ C สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้ [9]

$$\tau = (1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2)(1 + 0.091N_g) \quad (19)$$

$$C = 365.9(1 - 0.00883\beta + 0.0001298\beta^2) \quad (20)$$

โดย β คือ ความลาดเอียงของตัวเก็บรังสี

การสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ด้านบนของตัวเก็บรังสี ส่วนการสูญเสียความร้อนด้านล่างและด้านข้างของตัวเก็บรังสีสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านล่างของตัวเก็บรังสี (U_b) [9]

$$U_b = \frac{1}{\frac{t_b}{k_b} + \frac{1}{h_{b,a}}} \quad (21)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนด้านข้างของตัวเก็บรังสี (U_e) [9]

$$U_e = \frac{1}{\frac{t_e}{k_e} + \frac{1}{h_{e,a}}} \cdot \frac{A_c}{A_c} \quad (22)$$

โดย k_b และ k_e คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนที่ด้านล่างและด้านข้างของตัวเก็บรังสีตามลำดับ, A_c คือพื้นที่ผิวของด้านข้าง, t_b และ t_e คือความหนาของฉนวนที่ด้านล่างและด้านข้างของตัวเก็บ

รังสีตามลำดับ $h_{b,a}$ และ $h_{c,a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ด้านล่างและด้านข้าง ซึ่งค่าที่ใช้ในการคำนวณใช้ค่าเท่ากันทั้งสองกรณี คือ $5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ [29]

ในการคำนวณหาค่า U_L เพื่อนำมาหาค่า U_L ต้องทำการสมมติค่า T_p เริ่มต้น จากนั้นจึงคำนวณหาค่า U_L และ Q_u โดยสามารถหาค่า T_p ใหม่ จากการคำนวณดังนี้ [9]

$$T_p = T_{in} + \frac{Q_u}{A_c F_R U_L} (1 - F_R) \quad (23)$$

ทำการเปรียบเทียบของ T_p ที่ทำการสมมติ และ T_p ใหม่ที่ได้จากการคำนวณ เพื่อหาค่าความถูกต้องของ T_p ได้ดังนี้ [9]

$$\left| \frac{(T_p)_{guess} - (T_p)_{calculated}}{(T_p)_{calculated}} \right| \leq 10^{-5} \quad (24)$$

โดยที่ F_R คือค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat removal factor) ซึ่งก็คืออัตราส่วนของความร้อนที่น้ำได้รับจริงต่อความร้อนทั้งหมดที่ตัวเก็บรังสีรับไว้ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้ [9]

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{U_L F' A_c}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (25)$$

โดยที่ค่า F' เป็นแฟกเตอร์ประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสี ซึ่งก็คืออัตราส่วนของความต้านทานจากแผ่นดูดกลืนรังสีไปยังอากาศแวดล้อมต่อความต้านทานจากของไหลในท่อไปยังอากาศแวดล้อม สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [9]

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (26)$$

ซึ่ง W คือระยะห่างระหว่างกึ่งกลางท่อน้ำในตัวเก็บรังสี, D คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อน้ำในตัวเก็บรังสี, และ D_i คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อน้ำในตัวเก็บรังสี ส่วน F คือประสิทธิภาพของครีบ ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้ [9]

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (27)$$

และ $m = \sqrt{\frac{U_L}{k_c \delta_c}} \quad (28)$

สำหรับค่า k_c และ δ_c คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนและความหนาของแผ่นดูดกลืนรังสีตามลำดับ ในการหาค่าประสิทธิภาพการพาความร้อนของน้ำในท่อ (h_{fi}) สามารถหาค่าความสัมพันธ์ได้จากค่าจำกัดความของเลขนัสเซิลด์ (Nu) ได้ดังนี้ [9]

$$h_{fi} = \frac{Nu \cdot k_f}{D_i} \quad (29)$$

โดยที่ k_f เป็นสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของน้ำ การหาค่าตัวเลขนัสเซิลด์ (Nu) หาได้จากสมการที่ได้จากการทดลองของ Gnielinski ซึ่งมีเงื่อนไขในการคำนวณคือ $3000 < Re < 5 \times 10^5$ และ $0.5 < Pr < 2000$ โดยที่การไหลของน้ำในท่อเป็นการไหลแบบเต็มท่อ และเป็นชนิดการไหลแบบปั่นป่วน [9]

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (30)$$

โดยที่ f คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สามารถหาได้จากสมการ Colebrook โดยตัวเลขเรย์โนลด์ส์มีค่าระหว่าง 4000 ถึง 10^8 และอัตราส่วนระหว่างความสูงของผิวท่อและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (ϵ/D_i) มีค่าระหว่าง 0 – 0.05 ดังนี้ [29]

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D_i}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_i}} \right) \quad (31)$$

ในส่วนของตัวเลขเรย์โนลด์ส์และตัวเลขแพนดท์เทิลหาได้จาก

$$Re = \frac{4\dot{m}_r}{\pi D_i \mu} \quad (32)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (33)$$

สำหรับอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}_r) เป็นอัตราการไหลเชิงมวลที่เกิดขึ้นในท่อ (riser) ภายในตัวเก็บรังสี ซึ่งความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถหาอุณหภูมิเฉลี่ย (T_p) ที่แผ่นดูดกลืนรังสีได้และสามารถหาอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากตัวเก็บรังสีดังนี้

$$T_{out} = T_{in} + \frac{Q_u}{\dot{m} C_p} \quad (34)$$

สำหรับค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของตัวเก็บรังสีตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ หาได้จาก

$$\eta_{th} (\%) = \frac{Q_u}{A_c I_T} \quad (35)$$

4.2.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์จี

ในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์จีสำหรับตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบโดยใช้น้ำเป็นของไหลทำงานสามารถทำได้โดยการเขียนสมการสมดุลของเอ็กเซอร์จีในภาวะคงตัวดังนี้ [29]

$$\Sigma \dot{E}x_{in} - \Sigma \dot{E}x_{out} = \Sigma \dot{E}x_{dest} \quad (36)$$

ซึ่ง $\dot{E}x_{in}$ ประกอบด้วยเอ็กเซอร์จีเนื่องจากการไหลเข้าของมวล ($\dot{E}x_{in,f}$) และเอ็กเซอร์จีที่ตัวเก็บรังสีรับไว้จากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ($\dot{E}x_{solar}$) ส่วน ($\dot{E}x_{out,f}$) คือเอ็กเซอร์จีของสารทำงานที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสี โดยที่ $\dot{E}x_{in,f}$ สามารถหาได้จากสมการดังนี้ [30]

$$\dot{E}x_{in,f} = \dot{m} C_p \left[(T_i - T_a) - T_a \ln \left(\frac{T_i}{T_a} \right) \right] \quad (37)$$

ส่วนเอ็กเซอร์จีของสารทำงานที่ไหลออกจากตัวเก็บรังสี $\dot{E}x_{out,f}$ หาได้จากสมการดังนี้ [30]

$$\dot{E}x_{out,f} = \dot{m} C_p \left[(T_o - T_a) - T_a \ln \left(\frac{T_o}{T_a} \right) \right] \quad (38)$$

$\dot{E}x_{dest}$ คืออัตราการสูญเสียของเอ็กเซอร์จีจากตัวเก็บรังสีสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการดังนี้

$$\dot{E}x_{dest} = \dot{E}x_{dest,leakage} + \dot{E}x_{dest,\Delta T_s} + \dot{E}x_{dest,\Delta T_f} \quad (39)$$

$\dot{E}x_{dest,leakage}$ คืออัตราการสูญเสียของเอ็กเซอร์จีที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม [30] สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\dot{Ex}_{dest,leakage} = A_c U_1 (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (40)$$

$\dot{Ex}_{dest,\Delta T_s}$ คืออัตราการสูญเสียของเอกเซอร์จีที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิเทียบเท่าดวงอาทิตย์และอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีสามารถหาได้จากสมการดังนี้ [31]

$$\dot{Ex}_{dest,\Delta T_s} = Q_{ab} T_a \left[\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right] \quad (41)$$

และ $\dot{Ex}_{dest,\Delta T_f}$ คืออัตราการสูญเสียของเอกเซอร์จีที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างอุณหภูมิของของไหลทำงานและอุณหภูมิแผ่นดูดกลืนรังสีสามารถหาได้จากสมการดังนี้ [31]

$$\dot{Ex}_{dest,\Delta T_f} = \dot{m} C_p T_a \left[\ln \left(\frac{T_o}{T_i} \right) - \frac{(T_o - T_i)}{T_p} \right] \quad (42)$$

สำหรับประสิทธิภาพเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีอาทิตย์สามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอกเซอร์จีของน้ำที่เพิ่มขึ้น (\dot{Ex}_u) ต่อเอกเซอร์จีสูงสุดที่มีให้ใช้ประโยชน์ที่ตัวเก็บรังสี (\dot{Ex}_{solar}) รับไว้จากการแผ่รังสีอาทิตย์ [31]

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Ex}_u}{\dot{Ex}_{solar}} \quad (43)$$

$$\dot{Ex}_u = \dot{m} (h_{w,out} - h_{w,in}) - T_a (S_{w,out} - S_{w,in}) \quad (44)$$

หรือ

$$\dot{Ex}_u = \dot{m} C_p \left[(T_{w,out} - T_{w,in}) - T_a \left(\ln \frac{T_{w,out}}{T_{w,in}} \right) \right] \quad (45)$$

$$\text{และ } \dot{Ex}_{solar} = Q_{ab} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (46)$$

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดพบว่าหลังจากมีการออกแบบระบบผลิตความร้อนแล้วจะต้องมีการประเมินศักยภาพการทำงานของระบบ ในการประเมินศักยภาพของระบบสามารถวิเคราะห์ได้ในแง่ของประสิทธิภาพ โดยที่ประสิทธิภาพของระบบจะมีความแตกต่างกันอยู่ 2 รูปแบบคือประสิทธิภาพในเชิงปริมาณและประสิทธิภาพในเชิงคุณภาพ ประสิทธิภาพในเชิงปริมาณนั้นจะทำการวิเคราะห์สารทำงานหรือระบบทางความร้อนบนพื้นฐานกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งคือการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของระบบเพียงอย่างเดียว ทำให้ขาดข้อมูลในการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของผลลัพธ์ที่ได้ออกมา ในส่วนการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบเชิงคุณภาพนั้นจะทำการหาประสิทธิภาพของระบบตามกฎข้อที่สองในรูปแบบของเอกเซอร์จี การวิเคราะห์เอกเซอร์จีจะทำให้ทราบถึงกรอบพิสัยสูงสุดที่ระบบใดระบบหนึ่งหรือสารทำงานที่สถานะหนึ่งสามารถกระทำได้ โดยมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมที่อ้างอิงอย่างชัดเจน ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบจริงกับสมรรถนะสูงสุดของระบบอุดมคติ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบนี้โดยส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการย้อนกลับไม่ได้ภายในและภายนอก (internal and external irreversibility) ดังนั้น การวิเคราะห์เอกเซอร์จีนี้

จะช่วยเพิ่มความกระจำในการแก้ปัญหาให้ตรงกับสาเหตุมากขึ้น

การวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีจึงเป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบผลิตความร้อนจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นเรียบสำหรับประเทศไทยในด้านการใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเต็มศักยภาพเป็นผลให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืนในการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและสามารถลดการใช้พลังงานที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม

5. สรุปผล

บทความนี้รวบรวมข้อมูลแนวทางในการวิเคราะห์พลังงานและเอกเซอร์จีของตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบสำหรับระบบผลิตความร้อน โดยมีของไหลทำงานที่นิยมใช้ได้แก่ อากาศ น้ำ และของไหลนาโน โดยมีตัวเก็บรังสีแบบแผ่นเรียบเป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนให้แก่ของไหลทำงาน เพื่อนำของไหลทำงานเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องต่อไป โดยที่ระดับพลังงานที่สะสมอยู่ในสารทำงานที่สถานะหนึ่งหรือระบบใดระบบหนึ่งนั้นไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้จะบอกเป็นประสิทธิภาพอุณหภาพและประสิทธิภาพเอกเซอร์จีจึงเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญให้ผู้ปฏิบัติงานที่มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้แปลงพลังงานให้มีความสามารถในการผลิตความร้อนที่ดียิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มศักยภาพในการทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังมีส่วนร่วมในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากระบบผลิตพลังงานความร้อนได้ส่วนหนึ่ง

Nomenclature

Symbols

A	area (m ²)
C _p	heat capacity (J/kg ·K)
\dot{E}	energy (W)
\dot{E}_x	exergy (W)
D	diameter (mm)
h	specific enthalpy (kJ/kg)
I _s	solar radiance (W/m ²)
m _i	mass flow rate (kg/s)
s	specific entropy (kJ/kg·K)
S	received solar radiance to plate (W/m ²)
T	temperature (K)
Q	heat (W)
U	heat loss coefficient (W/m ² ·K)
V _w	wind velocity (m/s)

Subscripts

c	collector
in	inlet
out	outlet
u	useful
f	base fluid
dest	destroyed
p	plate

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy, “Alternative Energy Development Plan: AEDP2015”, Available: http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf, 30 March 2018. (in Thai)

- [2] M. Abuska, “Energy and exergy analysis of solar air heater having new design absorber plate with conical surface”, *Applied Thermal Engineering* 131, 2018, pp. 115–124.
- [3] S. Janjai, I. Masiri, S. Pattarapanitchai and J. Laksanaboonsong, “Mapping Global solar radiation from long-term satellite data in the tropics using an improved model”, *International Journal of Photoenergy*, 2013, pp. 1-11.
- [4] N. Vorayos, W. Wongsuwan and T. Kiatsiriroat, “Development of solar hot water system in Thailand”, *Engineering Journal Chiang Mai University* 16, 2009, pp. 55-69. (in Thai)
- [5] J.A. Duffie and W.A. Beckman, “Solar Engineering of Thermal Processes”, Wiley, New York, 2013.
- [6] P. Choomti, “Performance study of metal sheet solar collector”, Master Thesis, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Thailand. 2012.
- [7] A.E. Kabeela, M.H. Hamedb, Z.M. Omarab and A.W. Kandeal, “Solar air heaters: Design configurations, improvement methods and applications – A detailed review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, 2017, pp.1189–1206.
- [8] O. Mahian, A. Kianifar, A.Z. Sahin and S. Wongwises, “Entropy generation during Al_2O_3 /water nanofluid flow in a solar collector: Effects of tube roughness, nanoparticle size, and different thermophysical models”, *International Journal of Heat Mass Transfer* 78, 2014a, pp. 64–75.
- [9] O. Mahian, A. Kianifar, A.Z. Sahin and S. Wongwises, “Performance analysis of a minichannel-based solar collector using different nanofluids”, *Energy Conversion and Management* 88, 2014b, pp. 129–138.
- [10] H. Esen, “Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates”, *Building and Environment* 43, 2008, pp.1046–1054.
- [11] A.M. El-Sawi, A.S. Wifi, M.Y. Younan, E.A. Elsayed and B.B. Basily, “Application of folded sheet metal in flat bed solar air collectors”, *Applied Thermal Engineering* 30, 2010, pp. 864–871.
- [12] A. Ucar and M. Inall, “Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques”, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33, 2006, pp. 1281–90.
- [13] E.K. Akpınar and F. Koçyigit, “Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates”, *Applied Energy* 87, 2010, pp.3438–3450.
- [14] M. Sabzpooshani, K. Mohammadi and H. Khorasanizadeh, “Exergetic performance evaluation of a single pass baffled solar air heater”, *Energy* 64, 2014, pp. 697-706.
- [15] A. Kumar and B.N. Prasad, “Investigation of twisted tape inserted solar water heating systems-heat transfer, friction factor and thermal performance results”, *Renewable Energy* 19, 2000, pp. 379-398.

- [16] S. Pholboorn, “Heat Transfer and Pressure Loss Characteristics in Circular Tube with Twisted Tape”, *The Journal of Industrial Technology* 10(3), 2014, pp. 135-149. (in Thai)
- [17] S. Pholboorn, “A Review Study on Heat Transfer Performance Enhancement in a Circular Tube Using Wire Coils and Rings”, *The Journal of Industrial Technology* 11(1), 2015, pp. 88-102. (in Thai)
- [18] S. Pholboorn, “A Review of Turbulent Flow Heat Transfer in a Circular Tube with Twisted Tape”, *The Journal of Industrial Technology* 12(1), 2016, pp. 92-108. (in Thai)
- [19] S. Jaisankar, T.K. Radhakrishnan and K.N. Sheeba, “Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system with helical twisted tapes”, *International Energy Journal* 9, 2008, pp. 199-206.
- [20] P. Murugesan, “Heat transfer and friction factor characteristics in a double pipe heat exchanger fitted with variant twisted tape”, *Doctoral Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, Anna University, India. 2013. Available: <http://shodhganga.inflibnet.ac.in:8080/jspui/handle/10603/11558>, 30 March 2018.*
- [21] A.A. Mohammed, “Heat transfer and pressure drop characteristics of turbulent flow in a tube fitted with conical ring and twisted tape inserts”, *Engineering and Technology Journal* 29(2), 2011.
- [22] M. Shukuya and A. Hammache, “Introduction to the concept of exergy for a better understanding of low-temperature-heating and high-temperature-cooling systems”, *VTT Tiedotteita, research notes* 2158, Espoo, 2002.
- [23] S.R. Park, A.K. Pandey, V.V. Tyagi and S.K. Tyagi, “Energy and exergy analysis of typical renewable energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, 2014, pp.105–123.
- [24] A. Bejan, G. Tsatsaronis and M. Moran, “*Thermal Design & Optimization*”, Wiley, New York. 1996.
- [25] F. Bayrak, H.F. Oztop and A. Hepbasli, “Energy and exergy analyses of porous baffles inserted solar air heaters for building applications”, *Energy and Buildings* 57, 2013, pp. 338–345.
- [26] S.A. Kalogirou, S. Karellas, K. Braimakis, C. Stanciu and V. Badescu, “Exergy analysis of solar thermal collectors and processes”, *Progress in Energy and Combustion Science* 56, 2016, pp. 106–137.
- [27] ICFhome, “Designing a Residential Solar Water Heater”, Available: <http://buildersontario.com/solar-water-heater>, 30 March 2018.
- [28] Stack Exchange Inc. , “Failed-solar-thermal-water-heating-system”, Available: <https://sustainability.stackexchange.com/questions/5126/failed-solar-thermal-water-heating-system>, 30 March 2018.

- [29] O. Mahian, A. Kianifar, S.Z. Heris and S. Wongwises, "First and second laws analysis of a minichannel-based solar collector using boehmite alumina nanofluids: Effects of nanoparticle shape and tube materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 78, 2014c, pp. 1166–1176.
- [30] F. Jafarkazemi and E. Ahmadifard, "Energetic and exergetic evaluation of flat plate solar collectors", *Renewable Energy* 56, 2013, pp. 55-63.
- [31] E. Shojaeizadeh and F. Veysi, "Development of a correlation for parameter controlling using exergy efficiency optimization of an Al_2O_3 /water nanofluid based flat-plate solar collector", *Applied Thermal Engineering* 98, 2016, pp. 1116–1129.