

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้

A Feasibility Study of Solar Collector for Preheating Feed Water of Wood-Fired Boiler System

ศุภชัย ชุมชุมวัฒน์^{1*} นิตกร ทลีชัย¹ และธงชัย เครือผือ²

Suppachai Chumnumwat^{1*} Nitikorn Leechai¹ and Thongchai Khrueaphue²

Received: April 24, 2018; Revised: July 5, 2018; Accepted: July 10, 2018

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้เพื่อช่วยลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงของโรงงานผลไม้มะปรางอำเภอนาสีนม จังหวัดชลบุรี ซึ่งรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ศึกษามีสองรูปแบบ ประกอบด้วยรูปแบบแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา โดยวิเคราะห์ข้อมูลจากประสิทธิภาพเชิงความร้อน ต้นทุนแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการพิจารณาความเป็นไปได้ในการลงทุน จากผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 60.6 % และ 58.1 % โดยผลต่างของอุณหภูมิน้ำป้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ระหว่างสองรูปแบบเท่ากับ 1.8 °C เมื่อพิจารณาความเป็นไปได้ในการลงทุนทั้งประสิทธิภาพเชิงความร้อนและต้นทุนของแผงรับความร้อนพบว่า ต้นทุนแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีต้นทุนสูงกว่าแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร แต่ทั้งสองรูปแบบสามารถผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

¹ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Phitsanulok Campus

² คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

² Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan, Khon Kaen Campus

* Corresponding Author E - mail Address: s.chumnumwat@gmail.com

ดังนั้นรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาจึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงไม้เท่ากับ 45,639.70 บาทต่อปี เมื่อพื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 10,887.80 บาท ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 0.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี

คำสำคัญ : ตัวรับรังสีแสงอาทิตย์; หม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้; การอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ

Abstract

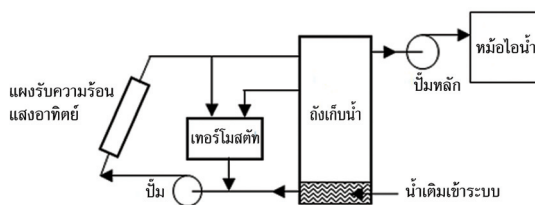
The purpose of this research was to determine feasibility of investing in the use of solar collectors to preheat feed water of a wood-fired boiler, in order to reduce fuel cost for the canned fruit factory at Phanatnikhom district, Chonburi province. Two types of solar collectors studied were evacuated tube and flat plate solar collector, both with compound parabolic concentrator. The feasibility of investment was determined by analysis of thermal efficiency, as well as cost and economic value of solar collector. Results of this research revealed that an average thermal efficiency of the evacuated tube and the flat plate solar collectors with compound parabolic concentrator were 60.6 % and 58.1 %, with a difference of 1.8 °C in feed water temperature between the two types of solar collector. Considering the feasibility of investment from both thermal efficiency and cost of solar collector, it was found that the cost of evacuated tube solar collector with compound parabolic concentrator was higher than that of flat plate solar collector at 4,365 baht per square meter. However, both types could produce feed water at the similar temperature level. Consequently, the flat plate solar collector with compound parabolic concentrator seemed to be a promising alternative to invest for preheating feed water of wood-fired boiler system. It could reduce the boiler's fuel cost by 45,639.70 baht per year with solar collection area of 119.07 m². The NPV of this project was 10,887.80 baht, with the IRR of 0.32 % and the payback period of 14.83 years.

Keywords: Solar Collector; Wood-Fired Boiler; Preheating Feed Water

บทนำ

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องส่งผลให้มีการใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย ไม่ว่าจะเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ซึ่งจะเห็นได้จากรายงานกระทรวงพลังงาน เรื่องการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในปี พ.ศ. 2559 สาขาอุตสาหกรรม ซึ่งมีการใช้พลังงานถึง 29,206 พันตัน

เทียบเท่าน้ำมันดิบ รวมถึงกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้รายงานว่าโรงงานอุตสาหกรรมจำนวนมากได้มีการนำหม้อไอน้ำมาใช้เป็นต้นกำลังหลักในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังมีจำนวนหม้อไอน้ำที่ใช้งานอยู่กว่า 15,000 เครื่อง จากจำนวนหม้อไอน้ำนี้ก็ส่งผลทำให้มีการใช้พลังงาน และมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงด้วย โดยพลังงานที่ใช้สำหรับหม้อไอน้ำคิดเป็น 29.1 % ของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะต้องมีกระบวนการที่สามารถลดการใช้พลังงานลง โดยทั่วไปจะมีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่หรือการใช้พลังงานทดแทนมาใช้เพื่อลดการใช้พลังงานหลักของหม้อไอน้ำ ซึ่งในการอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำเป็นลักษณะการให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำก่อนที่จะถูกนำเข้าไปในระบบหม้อไอน้ำ เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงหลักในหม้อไอน้ำ โดยการใช้แหล่งความร้อนในการอุ่นน้ำนั้นนิยมใช้กันมานานและมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องในอัตราการใช้งานที่เพิ่มขึ้น โดยวิธีการอุ่นน้ำป้อนโดยใช้ก๊าซไอเสียที่กำลังจะปล่อยทิ้งออกจากปล่องวนกลับมาให้ความร้อนแก่น้ำป้อนก่อนปล่อยทิ้งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งข้อดีคือประหยัดต้นทุนในการสร้างความร้อนและเป็นแหล่งความร้อนที่ใช้ค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ข้อเสียคือต้นทุนในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เชื่อมต่อกับเส้นทางท่อไหลของทางเดินก๊าซไอเสีย และต้องทำชุดท่อน้ำที่เข้ามารับความร้อน ซึ่งต้องมีการดูแลรักษาอย่างต่อเนื่องทั้งการจัดการเขม่าจากก๊าซไอเสียที่มาเกาะท่อแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งก่อให้เกิดการอุดตันและกีดขวางการไหล จึงทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียกับน้ำป้อนน้อยลงเนื่องจากชั้นเขม่าและกรดซัลฟูริกที่อยู่บนท่อ เมื่อใช้เป็นเวลานานก็อาจทำให้เกิดการกัดกร่อน [1] จำเป็นต้องเปลี่ยนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้เกิดเป็นต้นทุนในการบำรุงรักษาเพื่อลดปัญหาดังกล่าวก็จะมีอีกวิธีการโดยการอุ่นน้ำป้อนจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งการอุ่นน้ำป้อนมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 1 โดยน้ำอุณหภูมิต่ำที่เดิมเข้าระบบจะถูกป้อนเข้ามาในถังเก็บ จากนั้นจะถูกปั๊มเข้ามารับความร้อนที่แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแล้วกลับเข้ามาในถังเก็บน้ำแล้วจะถูกปั๊มหลักสูบไปใช้ให้ความร้อนในระบบหม้อไอน้ำ ทำให้ลดการใช้พลังงานหลักส่งผลให้การใช้เชื้อเพลิงน้อยลงไปด้วย โดยทั่วไปจะนำแผงรับความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบมาใช้ ซึ่งในแต่ละรูปแบบสามารถผลิตความร้อนได้ต่างกันไปตามตารางที่ 1 โดยขึ้นอยู่กับความต้องการของอุณหภูมิน้ำที่จะนำไปใช้



รูปที่ 1 หลักการของระบบการอุ่นน้ำป้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

จากการรายงานของกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมกรณีศึกษาด้านความร้อนของ บริษัท ซีพีเอฟ ผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด ได้มีการนำระบบผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในการบวนการต้มแฮม โดยรูปแบบของแผงรับแสงเป็นแบบแผ่นเรียบชนิดมีแผ่นปิด ซึ่งสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิ 65 °C พบว่า บริษัทสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 63,072 บาทต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับราคาของน้ำมันเตา โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.67 ปี

ตารางที่ 1 อุณหภูมิที่ทำได้ของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์

แบบแผ่นรับแสง	ระดับอุณหภูมิสูงสุดโดยประมาณ (°C)
1. แผ่นเรียบชนิดแผ่นปิดใส	40 – 90
2. แผ่นเรียบชนิดไม่มีแผ่นปิด	< 40
3. ท่อแก้วสุญญากาศ	100 – 200

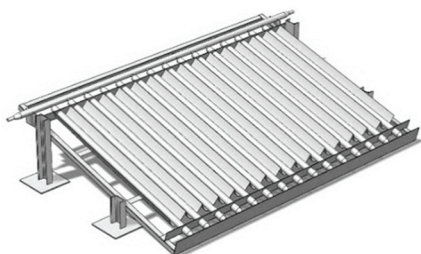
และจากงานวิจัยของ Celuppi, R., et al. [2] ได้ศึกษาการใช้แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศเพื่ออุ่นน้ำหม้อไอน้ำสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร พบว่าสามารถผลิตน้ำร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 97.9 °C โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 65 % ซึ่งให้ระยะเวลาคืนทุน 4.7 และ 5 ปี เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงไม้ ก๊าซธรรมชาติ (LPG) และพลังงานไฟฟ้า ตามลำดับ และสามารถช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการนำมาใช้ประโยชน์หลากหลายรูปแบบจึงจำเป็นต้องศึกษาประสิทธิภาพของแต่ละรูปแบบ โดยจากงานวิจัยการศึกษาในรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ผ่านมา Rabl, A. et al. [3] ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบแผงรับความร้อนแบบรูปประกอบพาราโบลาแบบใช้ท่อไม่สุญญากาศกับแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบ พบว่าชุดรับรังสีแบบรูปประกอบพาราโบลาแบบท่อไม่สุญญากาศมีผลการทำงานที่ดีกว่าชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบ แต่ยังมีข้อเสียในเรื่องของความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนของผิวที่เป็นกระจก จึงได้พัฒนาการใช้ชั้นผิวที่เป็นกระจก 2 ชั้น เพื่อลดความร้อนสูญเสียตรงส่วนนี้ลง ต่อมาได้มีการพัฒนาท่อแก้วแบบสุญญากาศขึ้นเพื่อลดปัญหาของการสูญเสียที่เกิดจากการพาความร้อน ซึ่งมีประสิทธิภาพการรับความร้อนที่สูงขึ้น สามารถทำอุณหภูมิได้สูงและปัจจุบันก็มีราคาที่ถูกลง โดย Chamsa-ard, W. et al. [4] ได้ทำการพัฒนาชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาโดยใช้ท่อแก้วสุญญากาศและหาประสิทธิภาพการผลิตความร้อน พบว่าชุดรับรังสีแสงอาทิตย์แบบรูปประกอบพาราโบลาที่ใช้ท่อแก้วสุญญากาศ สามารถผลิตความร้อนได้ดีกว่าแบบท่อแก้วสุญญากาศที่ไม่มีชุดรูปประกอบพาราโบลาสะท้อนแสง 73.38 % โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 45.6 % และ 26.3 % ตามลำดับ จากนั้น Sonsaree, S. et al. [5] ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพแผงรับความร้อนของแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศแบบรูปประกอบ โดยเป็นสมการประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิขาเข้า อุณหภูมิแวดล้อม และค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 78 % สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ a_1 และ a_2 มีค่าเท่ากับ 3.55 และ 0.0600 $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ตามลำดับ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแผ่นสะท้อนแสงกับชุดรับรังสีความร้อนแบบท่อทั้งกรณีท่อแบบสุญญากาศ และท่อไม่สุญญากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับความร้อนให้สูงขึ้นได้ รวมถึงการนำไปใช้จริงในอุตสาหกรรมที่มีการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุน จึงทำให้คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้รูปแบบแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา และแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา เป็นชุดทดสอบในการผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการลดการใช้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

ดังนั้นจากข้อมูลเบื้องต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ โดยมี บริษัท พี.วี.ที.ฟู้ดส์ อินดัสตรีส์ จำกัด โรงงานผลไม้กระป๋อง อำเภอพนสนิมคม จังหวัดชลบุรี เป็นพื้นที่กรณีศึกษา เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสร้างและทดสอบชุดทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

ในขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มจากการทำการสร้างชุดทดสอบเพื่อใช้ในการเก็บผลการทดสอบ โดยรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาแสดงดังรูปที่ 2 และมีส่วนประกอบดังตารางที่ 2

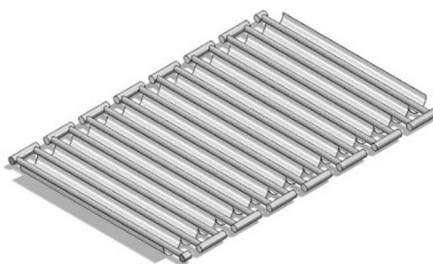


รูปที่ 2 ลักษณะแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลา

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วยพื้นที่
1. ท่อสุญญากาศแบบฮีตไปป์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm ยาว 1.5 m	15 ท่อ	8,125.5 บาทต่อตารางเมตร (พื้นที่ที่ใช้ 2.646 ตารางเมตร)
2. โครงสร้างแผง	1 ชุด	
3. แผ่นสะท้อนแสง	15 แผ่น	

และในการสร้างชุดทดสอบแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา จะมีลักษณะดังรูปที่ 3 และมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 ลักษณะแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบแผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

รายการ	จำนวน	ราคาต่อหน่วยพื้นที่
1. ท่อสแตนเลสบาง หนา 1 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาว 6 m	4 เส้น	3,760.5 บาทต่อตารางเมตร (พื้นที่ที่ใช้ 2.646 ตารางเมตร)
2. ท่อสแตนเลสบาง หนา 1 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2 นิ้ว ยาว 6 m	1 เส้น	
3. โครงสร้างแผง	1 ชุด	
4. แผ่นสะท้อนแสง	15 แผ่น	

จากนั้นทำการหาประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เพื่อประเมินความสามารถในการรับความร้อน โดยการวัดค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม อุณหภูมิน้ำป้อนขาเข้า และออกของแต่ละรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาพื้นที่รับความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ที่ทำให้ต้นทุนการดำเนินงานรวมต่อปีต่ำที่สุด โดยมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังรูปที่ 4 ซึ่งทำการเก็บผลการทดสอบตั้งแต่ 08.00 - 16.00 น. ในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 เฉพาะวันที่มีท้องฟ้าโปร่ง โดยใช้ข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4 หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

รายการ	จำนวน
- อายุการทำงานของแผงรับความร้อน	15 ปี
- ขนาดการทำงานของหม้อไอน้ำ	2 ตันต่อชั่วโมง
- ราคาเชื้อเพลิงไม้ฟืน	1 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหม้อไอน้ำที่ได้รับผลจากปริมาณเชื้อเพลิง*	0.2 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าใช้จ่ายแรงงานในการป้อนเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ*	0.15 บาทต่อกิโลกรัม
- ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงไม้ [6]	8,400 kJ/kg
- ค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องหม้อไอน้ำก่อนปรับปรุง*	2,000,000 บาทต่อปี
- อุณหภูมิน้ำป้อนก่อนทำการอุ่น	28 °C
- ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	80 %
- สัดส่วนการใช้งานแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ในสภาพอากาศที่เหมาะสม	60 %

* การประเมินของภาคอุตสาหกรรม สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ของแต่ละรูปแบบ สามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ได้จากสมการที่ (1)

$$\eta_c = \frac{Q_u}{Q_i} \quad (1)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \eta_c &= \text{ประสิทธิภาพแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์} \\ Q_u &= \text{ความร้อนที่ของไหลได้รับ (W)} \\ Q_i &= \text{ความร้อนที่แผงได้รับจากแสงอาทิตย์ (W)} \end{aligned}$$

และสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ในรูปแบบของการส่งผ่านความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่สูญเสียรวม ได้ดังสมการที่ (2) [7]

$$\eta_c = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I} \quad (2)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} F_R &= \text{ค่าสัมประสิทธิ์การดึงความร้อนไปใช้ของของไหล} \\ \tau &= \text{ค่าการส่งผ่านรังสี} \\ \alpha &= \text{ค่าการดูดกลืนรังสี} \\ U_L &= \text{สัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อน (W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C)} \\ T_i &= \text{อุณหภูมิน้ำที่เข้ามาแผงรับความร้อน (}^{\circ}\text{C)} \\ T_a &= \text{อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (}^{\circ}\text{C)} \\ I &= \text{ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

สามารถคำนวณหาความร้อนที่ของไหลได้รับ เมื่อทราบค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ค่าอัตราการไหล และอุณหภูมิของของไหลที่ไหลเข้าและออก ดังสมการที่ (3)

$$Q_u = c_p \dot{m}(T_o - T_i) \quad (3)$$

โดยที่

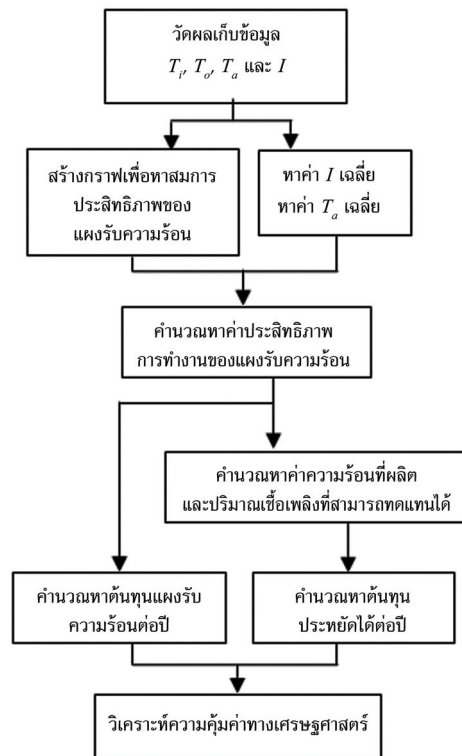
$$\begin{aligned} c_p &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล (kJ/kg }^{\circ}\text{C)} \\ \dot{m} &= \text{อัตราการไหลของของไหลที่ได้รับความร้อน (kg/s)} \\ T_o &= \text{อุณหภูมิน้ำที่ออกจากแผงรับความร้อน (}^{\circ}\text{C)} \end{aligned}$$

และความร้อนที่แผงได้รับจากแสงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Q_i = IA \quad (4)$$

โดยที่

$$A = \text{พื้นที่รับแสงอาทิตย์ (m}^2\text{)}$$



รูปที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการจะต้องวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลต้นทุนและผลประโยชน์ทางการเงินมาทำการวิเคราะห์ คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนต่อทุน (Benefit Cost Ratio: BCR) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เพื่อประกอบการวิเคราะห์ความคุ้มค่าของโครงการ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา Kongcharoen, K. and Jitsanguan, T. [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการลงทุนโครงการผลิตน้ำร้อนด้วยระบบผสมผสานพลังงานแสงอาทิตย์ : กรณีศึกษา โรงพยาบาลแก่ง จังหวัดระยอง การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดการทำงานจริงของระบบในช่วงระยะเวลา 6 เดือน นับตั้งแต่ติดตั้งระบบอายุโครงการเท่ากับ 16 ปี อัตราคิดลด

ร้อยละ 8 พบว่า โครงการมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 1,071,359.57 บาท อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (BCR) เท่ากับ 2.34 และอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการ (IRR) เท่ากับร้อยละ 31.15 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ พบว่าโครงการยังคงมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการลงทุน ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาการลงทุนโครงการ สิ่งที่จะนำมาวิเคราะห์คือ มูลค่าปัจจุบัน อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายใน และระยะเวลาคืนทุน โดยสามารถทำได้ดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

โดยที่

- i = อัตราคิดลด (Discount Rate) หรืออัตราดอกเบี้ย
- t = ระยะเวลาของโครงการ คือ ปีที่ 0, 1, 2, ... n
- B_t = รายได้ที่คาดว่าจะได้ และ ณ ปีที่ t
- C_t = รายจ่ายที่คาดว่าจะได้ และ ณ ปีที่ t

อัตราผลตอบแทนต่อทุน (Benefit Cost Ratio: BCR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6)

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (6)$$

โดยเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาในการลงทุน เมื่อ $BCR > 1$ จะยอมรับการลงทุนเพราะผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการจะมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไป แต่ถ้า $BCR < 1$ แสดงว่าผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการจะมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายที่เสียไป จึงไม่เหมาะสมที่จะลงทุน [9]

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) คือ อัตราดอกเบี้ยในการคิดลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ (7)

$$\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (7)$$

เกณฑ์การพิจารณา ถ้า IRR สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมของโครงการที่กำหนดไว้แสดงว่าโครงการคุ้มค่าแก่การลงทุน แต่ถ้า IRR ต่ำกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ยืมของโครงการที่กำหนดไว้แสดงว่าโครงการไม่คุ้มค่า

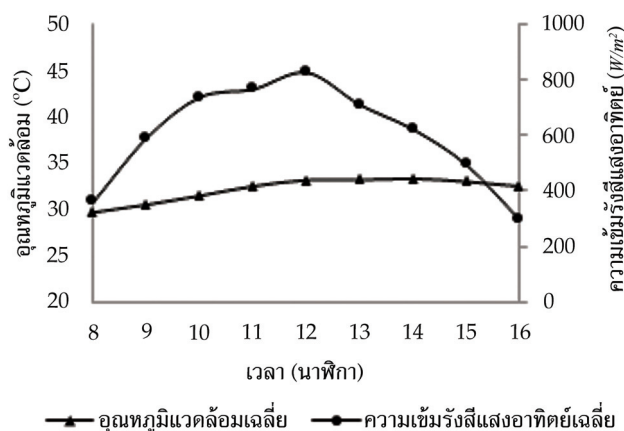
ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนเป็นการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาที่สามารถคืนทุนได้เมื่อเปรียบเทียบกับมูลค่าต้นทุนที่จ่ายออกไป โดยคำนวณได้จากสมการที่ (8)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนสำหรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์รายปี}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ต่อปี}} \quad (8)$$

ผลและวิจารณ์ผล

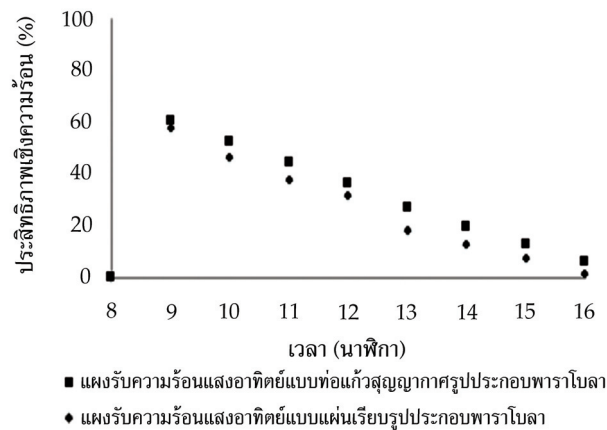
1. ผลการทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

จากการดำเนินการเก็บผลการทดลองสภาพแวดล้อม พบว่าในช่วงเดือนกันยายน พ.ศ. 2560 อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยเท่ากับ 32.1°C และค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 825.3 W/m^2 แสดงดังรูปที่ 5

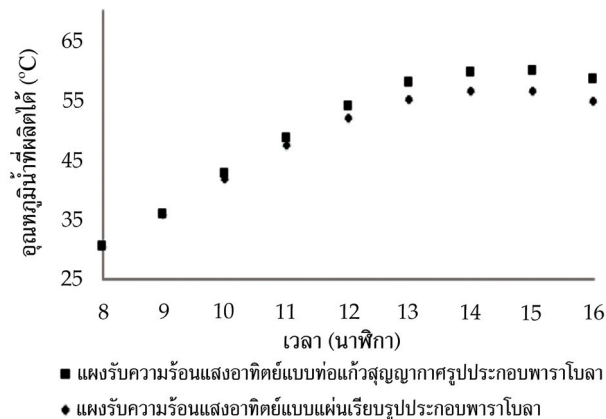


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ย ณ อำเภอพนสนิม จังหวัดชลบุรี

และเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของแผงรับความร้อนในแต่ละรูปแบบ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศ รูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา มีค่าสูงสุดเท่ากับ 60.6 % และ 58.1 % แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแต่ละรูปแบบมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำป้อนภายในถังเก็บน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำป้อนที่นำกลับมาเข้าแผงรับความร้อนสูงขึ้น ซึ่งจากการที่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำป้อนภายในถังเก็บน้ำว่าจะลดลงตามไปด้วย แต่เกิดจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำป้อนเข้าและขาออกที่น้อยลง จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนในแต่ละรูปแบบลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moakhar, R. S. et al. [1] ได้รายงานว่าประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำขาเข้าดังนั้นเมื่ออุณหภูมิขาเข้ายิ่งสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงรับความร้อนลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยในแต่ละรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์



รูปที่ 7 อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยที่ผลิตได้ในแต่ละรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์

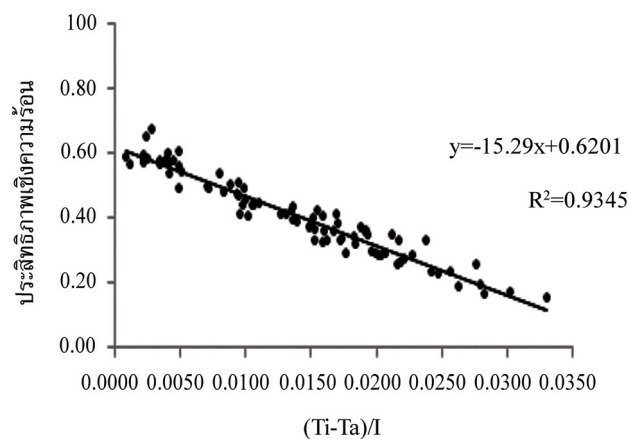
จากรูปที่ 7 อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำป้อนที่สามารถผลิตได้สูงสุดของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลามีค่าเท่ากับ 59.8 °C และ 56.5 °C โดยผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำป้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์ทั้งสองรูปแบบเท่ากับ 1.8 °C ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองรูปแบบของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์สามารถผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิใกล้เคียงกัน และผลการทดสอบสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malahom, T. [10] ที่ได้ศึกษาสมรรถนะของระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์แบบฮีตปั๊ม กล่าวว่า แผงรับความร้อนแบบแผ่นเรียบและแผงรับความร้อนแบบท่อแก้วสุญญากาศสามารถผลิตน้ำร้อนได้ใกล้เคียงกัน

ซึ่งจากผลการทดสอบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิที่ผลิตได้พบว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนและผลิตน้ำร้อนได้ดีกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา แต่หากคำนึงถึงต้นทุนในการสร้างแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์พบว่าแผงรับความร้อน

แสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาที่มีต้นทุนที่สูงกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 53.7 % โดยจะเห็นได้ว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาที่มีต้นทุนสูง แต่ผลิตน้ำป้อนได้อุณหภูมิแตกต่างกับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเพียง 1.8 °C และเมื่อพิจารณาประกอบกับตารางที่ 1 จะเห็นว่าท่อแก้วสุญญากาศนั้นมีความสามารถในการผลิตความร้อนที่อุณหภูมิเท่ากับ 100 - 200 °C แต่กลับพบว่าอุณหภูมิของน้ำป้อนที่สามารถผลิตได้ของท่อแก้วสุญญากาศอยู่ในช่วงของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบชนิดแผ่นปิคลิโซเท่านั้น จึงทำให้รูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาที่มีความเป็นไปได้ที่ดีกว่าในการลงทุนในการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งจะนำไปวิเคราะห์ผลการตอบแทนและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ต่อไป

2. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

ในการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากการเลือกรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาจะใช้ผลจากการทดสอบมาวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนตามสมการที่ (2) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) เพื่อนำมาใช้ในการทำนายค่าความร้อนที่สามารถผลิตได้สำหรับแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา จากผลการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนจะได้สมการประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา ดังสมการที่ (9) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 0.9345$

$$\eta_c = 0.6201 - 15.29 \left(\frac{T_i - T_a}{I} \right) \quad (9)$$

3. ผลตอบแทนและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลในตารางที่ 4 และสมการที่ (9) เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนในการทำงานของหม้อไอน้ำและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา พบว่าต้นทุนในการทำงานของหม้อไอน้ำต่ำที่สุดเท่ากับ 1,984,343.63 บาท เมื่อใช้พื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 50.4 % ซึ่งสามารถคำนวณค่าความร้อนที่ผลิตได้เท่ากับ 227,184.29 kJ/ปี โดยคิดเป็นต้นทุนของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 449,750 บาท และสามารถประหยัดต้นทุนทางด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงของไม้เท่ากับ 45,639.7 บาทต่อปี

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ประเภทเชื้อเพลิง	ค่าความร้อน ของเชื้อเพลิง (kJ/kg)	ราคาต่อหน่วย (บาทต่อกิโลกรัม)	NPV	BCR	IRR	ระยะเวลา คืนทุน (ปี)
ไม้	8,400	1.00 ^{*1}	10,887.80	-0.22	0.32 %	14.83
ก๊าซธรรมชาติ (LPG)	46,100	18.07 ^{*2}	624,015.40	1.16	16.29 %	4.83

หมายเหตุ ^{*1} ^{*2} ราคาเชื้อเพลิง ณ วันที่ 26 มกราคม 2560

จากตารางที่ 5 เมื่อวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์โดยพิจารณาที่อัตราดอกเบี้ยลูกค้ารายย่อยชั้นดี (MRR) จากธนาคารกรุงไทย (2560) ณ วันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2560 เท่ากับ 7.12 % พบว่ารูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เท่ากับ 10,887.80 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับ 0.32 % ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราผลตอบแทนต่ำและมีระยะเวลาคืนทุนที่นาน เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้มีราคาถูก ซึ่งในอนาคตแนวโน้มต้นทุนของไม้ฟืนมีราคาที่สูงขึ้น ก็จะทำให้อัตราผลตอบแทนและระยะเวลาคืนทุนดีขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากหากเปรียบเทียบกับระบบที่มีการนำก๊าซธรรมชาติ (LPG) มาใช้ซึ่งมีต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงที่สูง พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 624,015.40 บาท อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าเท่ากับ 16.29 % ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 4.83 ปี โดยจะเห็นได้ว่าสามารถลดระยะเวลาคืนทุนได้อย่างมากและมีผลตอบแทนที่ดี ดังนั้นการนำแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลามาใช้ในการอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำจึงมีความเป็นไปได้ในการลงทุน อย่างไรก็ตาม ในอนาคตอาจจะต้องมีการนำข้อมูลทางด้านต้นทุนและผลกระทบในส่วนอื่น ๆ เช่น การลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไม้ฟืน ซึ่งเป็นก๊าซหลักที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก มาพิจารณาร่วมด้วยการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็จะทำให้มีความเป็นไปได้ในการลงทุนเพิ่มมากขึ้น

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุนและต้นทุนของตัวรับรังสีแสงอาทิตย์สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ ซึ่งทำการศึกษาสองรูปแบบ ได้แก่ แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้ว สุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา สามารถสรุปผลการวิจัยด้านประสิทธิภาพและต้นทุนได้ดังนี้

1. เปรียบเทียบด้านประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยระหว่างรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลาและรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาพบว่า มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเท่ากับ 60.6 และ 58.1 % ซึ่งรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าคิดเป็น 2.5 % เป็นผลมาจากอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ยสูงสุดของรูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีค่าสูงกว่ารูปแบบแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลา

2. เมื่อเปรียบเทียบด้านต้นทุนระหว่างแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบท่อแก้วสุญญากาศรูปประกอบพาราโบลามีมูลค่าสูงกว่าแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเท่ากับ 4,365 บาทต่อตารางเมตร หรือคิดเป็น 53.7 % จากผลการวิเคราะห์ที่ต้นทุนดังกล่าวพบว่า แผงรับความร้อนแสงอาทิตย์แบบแผ่นเรียบรูปประกอบพาราโบลาเหมาะสมต่อการนำไปใช้สำหรับการอุ่นน้ำป้อนในระบบหม้อไอน้ำเชื้อเพลิงไม้ โดยมีมูลค่าเท่ากับ 449,750 บาท สามารถประหยัดต้นทุนทางด้านค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงของไม้เท่ากับ 45,639.7 บาทต่อปี เมื่อพื้นที่รับแสงของแผงรับความร้อนแสงอาทิตย์เท่ากับ 119.07 m² และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่าเท่ากับ 10,887.80 บาท ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 0.32 % และระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) เท่ากับ 14.83 ปี

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ โดยได้รับทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ร่วมกับเครือข่ายการวิจัยภาคเหนือตอนล่าง มหาวิทยาลัยนเรศวร ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 บริษัท พี.วี.ที.ฟู้ดส์ อินดัสตรีส์ จำกัด ที่เอื้อเฟื่องบประมาณและสถานที่ในการทำวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก

References

- [1] Moakhar, R. S., Mehdipour, M., Ghorbani, M., Mohebali, M., and Koochbor, B. (2013). Investigations of the Failure in Boilers Economizer Tubes Used in Power Plants. **Journal of Materials Engineering and Performance**. Vol. 22, Issue 9, pp. 2691-2697. DOI: 10.1007/s11665-013-0567-2

- [2] Celuppi, R., Scapinello, J., Andrade, F. G. D., Revello, J. H. P., and Magro, J. D. (2014). Solar Energy Use for Water Pre-Heating in Boilers of Agro-Industries. **Journal of Engenharia Agricola**. Vol. 34, No. 3, pp. 451-460. DOI: 10.1590/S0100-69162014000300009
- [3] Rabl, A., O’Gallagher, J., and Winston, R. (1980). Design and Test of Non-Evacuated Solar Collectors with Compound Parabolic Concentrators. **Solar Energy**. Vol. 25, Issue 4, pp. 335-351. DOI: 10.1016/0038-092X(80)90346-1
- [4] Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Pongtornkulpanich, A., Sonsaree, S., and Laodee, P. (2012). **Development of Compound Parabolic Concentrating Collector (CPC)**. Bangkok: Naresuan University
- [5] Sonsaree, S., Chamsa-ard, W., Sukchai, S., Laodee, P., and Sirisamphanwong, C. (2014). Development of a Compound Parabolic Concentrating Solar Collector. **Burapha Science Journal**. Vol. 19, No. 2, pp. 105-121
- [6] Quaak, P., Knoef, H., Stassen, H., Quaak, P., Knoef, H., and Stassen, H. (1999). **Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies (English)**. World Bank technical paper; no. WTP 422. Energy series. Washington, D.C.: The World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/936651468740985551/Energy-from-biomass-a-review-of-combustion-and-gasification-technologies>.
- [7] John A. Duffie and William A. Beckman. (1974). **Solar Energy Thermal Processes**. New York: John Wiley & Sons.
- [8] Kongcharoen, K. and Jitsanguan, T. (2006). Economic Analysis of Project Investment on Hot Water Production from Integrated Solar Energy System: Case Study of Klang Hospital, Rayong Province. **Applied Economics Journal**. Vol. 11, No. 1-2, pp. 33-48
- [9] Awirothannaon, A. (2016). Financial Feasibility of the use of Mixing Valve Solar Hot Water by Industrial Enterprises in the Northern Region. In **12th Naresuan Research Conference**. 21-22 July 2016. Phitsanulok, Thailand. pp. 1170-1179
- [10] Malahom, T. (2007). **A Study of the Performance of Heat Pipe Solar Collector for Hot Water System**. Chulalongkorn University