

การศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์
แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน

A study on the mathematical modeling of a photovoltaic
solar collector with heat pipes

สุรเชษฐ สีสำนาน¹ และ ธีรพัฒน์ ชมภูคำ²

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150¹

E-mail: s.sichamnan@gmail.com¹

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องในการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยของแบบจำลอง สำหรับใช้ทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิกอน ขนาด 53 วัตต์ มีการติดตั้งท่อความร้อนเป็นอุปกรณ์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อนที่แผงฐาน ทำการทดสอบตั้งแต่ 09.00-15.30 น. ตลอดช่วงการทดสอบที่หน้างานมีปัจจัยภายนอกที่ยากต่อการควบคุมส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลอง โดยงานวิจัยนี้พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ไม่เกินร้อยละ ± 30 จากการทดสอบพบว่า แบบจำลองสามารถทำนายให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลจากการทดลอง ซึ่งค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง เท่ากับ 2.5 และ 2.1 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพที่ได้

จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.31 และร้อยละ 4.54 ตามลำดับ

คำสำคัญ: ท่อความร้อน, โฟโตโวลตาอิก, ตัวเก็บรังสีอาทิตย์, ประสิทธิภาพ

Abstract

This research aims to create a mathematical model of a photovoltaic solar collector with heat pipes by applied the finite difference method to solved the model solution. The mathematical model was built for predicted the heat transfer rate and the efficiency of the photovoltaic solar collector with heat pipes. A comparison between the model solution and the experimental result were reported. The type of the photovoltaic solar collector was 53 W monocrystalline silicon and installed heat pipes as the heat exchanger equipment at the base panel. The experiment period time started from 9 a.m. to finished at 3.30 p.m. In all experiments,

the difficulty controllable external factors affected an error of the model solution different from the experimental result while this paper considered the error doesn't exceed 30%. From the results found that the mathematical model was in good agreement to predict the heat transfer rate and the efficiency, corresponding to the experimental. The results of the heat transfer rate of the mathematical model and the experimental were 2.5 kW/m^2 and 2.1 kW/m^2 , respectively. The average efficiencies of the mathematical model and the experimental were 5.31% and 4.54%, respectively.

Keyword: Heat pipe, Photovoltaic, Solar collector, Efficiency

1. บทนำ

พลังงานแสงอาทิตย์ (solar energy) เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากใช้แล้วไม่มีวันหมด สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เองตามธรรมชาติ เป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก การประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ การผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตความร้อน โดยการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในรูปแบบของการผลิตไฟฟ้าจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการแปลงรังสีอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าที่เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เซลล์โฟโตโวลตาอิก หรือ photovoltaic

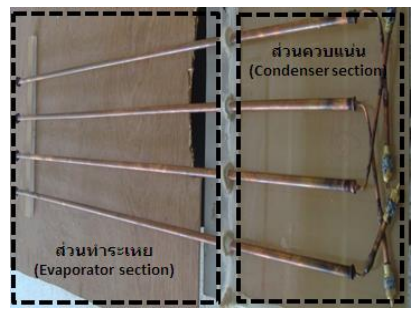
cell และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น มาจากการสะสมความร้อนที่แผ่ฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้งานภายใต้แสงอาทิตย์เป็นเวลานาน ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถให้ความต้องการทั้งการผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ Zondag [1] รวมถึงการพัฒนารูปแบบการใช้งานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ที่จะใช้งานร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกเพื่อเป็นการประยุกต์ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้ออกมาในรูปแบบของการผลิตไฟฟ้าและการผลิตความร้อน จากงานวิจัยที่ผ่านมา Hammad [2] ทดสอบการระบายความร้อนของท่อความร้อนร่วมกับตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ ภายในท่อความร้อนมีน้ำไหลผ่าน พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการระบายความร้อนของท่อความร้อน ประกอบด้วยความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน และอุณหภูมิของน้ำ ป้อนเข้าที่ส่วนควบแน่น จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าที่สภาพการใช้งานของระบบที่คงที่และเหมาะสม ประสิทธิภาพการระบายความร้อนของท่อความร้อนสามารถทำงานได้ถึงร้อยละ 80 Rittidech and Wannapakhe [3] ศึกษาการทำงานของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์แบบแผ่นราบร่วมกับท่อความร้อนแบบส่นวงรอบปลายปิด เพื่อให้เป็นอีกทางเลือกของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งพื้นที่ในส่วนของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์มีขนาด 2.00×0.97 ตารางเมตร ส่วนทำระเหยของท่อความร้อนแบบส่นวงรอบปลายปิดติดตั้งอยู่ในส่วนของบริเวณตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ และส่วน

ความแน่นของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบปลายปิดติดตั้งอยู่ในถังเก็บน้ำ ทำการทดสอบในช่วงเวลากลางวันจากการทดสอบพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงอุณหภูมิที่ตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์และความเร็วลม จากประสิทธิภาพของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่สภาวะคงที่และเหมาะสมต่อการทำงาน ทำให้ได้ประสิทธิภาพของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ทำงานได้ถึงร้อยละ 62 Tripanagnostopoulos และคณะ [4] วิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกร่วมกับการติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ทั้งที่มีและไม่มีกระจกครอบพร้อมมีการเคลือบสารกระจายแสง รวมทั้งประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกร่วมกับการติดตั้งระบบระบายความร้อนด้วยอากาศ ทั้งที่มีและไม่มีกระจกครอบพร้อมมีการเคลือบสารกระจายแสงพบว่า กระจกครอบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ แต่จะลดประสิทธิภาพทางไฟฟ้า รวมทั้งการเคลือบสารกระจายแสงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าได้เท่ากับร้อยละ 16 He และคณะ [5] ออกแบบระบบไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติที่ใช้งานกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกทำน้ำร้อนร่วม โดยใช้น้ำเป็นสารรับความร้อนและทำการออกแบบกล่องน้ำในส่วนที่รับความร้อนเป็นลักษณะกล่องแบน พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่น้ำได้รับเท่ากับร้อยละ 40 ในกรณีที่มีการไหลเวียนของน้ำตามธรรมชาติและยังพบว่าอุณหภูมิในการทำงานของเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการลดลงของ

ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเซลล์โฟโตโวลตาอิก สิริชัย ปัญญาสมาธิ [6] ออกแบบการระบายความร้อนแบบท่อขดเซอร์เพนไทน์และติดตั้งที่ด้านหลังของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก เพื่อดึงความร้อนออกจากแผงฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกมาใช้งานในรูปของการอุ่นน้ำร้อน พบว่าระบบโฟโตโวลตาอิกแบบผสมระบบผลิตน้ำร้อนจะมีประสิทธิภาพของระบบโฟโตโวลตาอิกสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 1.20-1.45 โดยน้ำอุ่นที่ได้จากเอามาทำเป็นต้นทุนสำหรับทำน้ำร้อน ช่วยประหยัดพลังงานในการต้มน้ำได้อีกทาง Ruobing Liang และคณะ [7] ทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก มีการติดตั้งอุปกรณ์ระบายความร้อน เพื่อดึงความร้อนออกจากเซลล์โฟโตโวลตาอิก พบว่า ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่มีและไม่มีติดตั้งอุปกรณ์การระบายความร้อนเท่ากับร้อยละ 6.46 และ 5.15 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเก็บรังสีอาทิตย์ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่มีการติดตั้งอุปกรณ์การระบายความร้อนยังสามารถช่วยประหยัดพลังงานได้ถึงร้อยละ 48 ซึ่งความร้อนที่ได้ออกมาจากการระบายความร้อนของเซลล์โฟโตโวลตาอิกนำไปใช้อุ่นน้ำให้ร้อน ก่อนที่จะมีการนำน้ำร้อนไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ ต่อไป พงษ์ศักดิ์ พูลศรี [8] พบว่าระบบของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกแบบทำน้ำร้อนร่วม ทำให้อุณหภูมิของเซลล์โฟโตโวลตาอิกลดลงซึ่งเกิดจากการระบายความร้อนออกจากเซลล์โฟโตโวลตาอิก ทั้งยังเป็น การช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าให้สูงกว่าระบบที่ไม่มีลดอุณหภูมิที่แผงฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกร้อยละ 0.08 ซึ่งความร้อน

ที่สะสมบริเวณแผงฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกมีผลให้เซลล์โฟโตโวลตาอิกมีอุณหภูมิการทำงานสูงขึ้นตามไปด้วย Meral and Dincer [9] ทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงและค่ากระแสลัดวงจรมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดและประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการทำงานของเซลล์โฟโตโวลตาอิก พฤทธิ์ สกุลช่างสังข์จะทัย [10] กล่าวว่าไว้ว่าโดยเฉลี่ยแล้วอุณหภูมิการทำงานของเซลล์โฟโตโวลตาอิกที่เพิ่มขึ้นทุกๆ 273.15 เคลวิน จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงประมาณร้อยละ 0.5 จึงได้มีการพยายามลดอุณหภูมิที่แผงฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกในรูปแบบต่างๆ โดย ท่อความร้อน (heat pipe) ก็เป็นอีกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอีกหนึ่งที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอก เพื่อเป็นรูปแบบและทางเลือกของการประยุกต์ใช้งานท่อความร้อนเข้ากับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก ซึ่งท่อความร้อนภายในติดตั้งวัสดุพอรุนแบบตาข่ายทองแดง ท่อความร้อนชนิดนี้มีข้อดี คือ วัสดุพอรุนแบบตาข่ายทองแดงที่ติดตั้งภายในท่อความร้อนจะมีแรงดันคาพิลลารีและความสามารถในการซึมผ่านสูงช่วยให้สารทำงานที่ควบแน่นไหลกลับสู่ส่วนทำระเหยได้ดีขึ้น ทำให้ท่อความร้อนชนิดนี้มีการค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูง [11]

ท่อความร้อนทำงานโดยการใช้หลักการส่งถ่ายความร้อนจากความร้อนแฝงของสารทำงานภายในท่อซึ่งระเหยโดยการรับความร้อนจากแหล่งความร้อนแล้วถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นเนื่องจากความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของสาร



รูปที่ 1 ท่อความร้อน

ทำงานมีค่าสูงมากจึงสามารถถ่ายเทความร้อนจากปลายด้านหนึ่งไปสู่อีกปลายด้านหนึ่งได้มากโดยมีอุณหภูมิต่างเล็กน้อย ท่อความร้อนจะประกอบด้วยส่วนทำระเหย (evaporator section) และส่วนควบแน่น (condenser section) บางครั้งอาจมีส่วนเพิ่มเติม ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า ส่วนกันความร้อน (adiabatic section) ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการติดตั้งท่อความร้อนเข้ากับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก เพื่อเป็นการช่วยดึงความร้อนออกจากแผงฐานของตัวเก็บรังสีอาทิตย์ ทำให้ได้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในรูปแบบการผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตความร้อนไปในตัวอีกด้วย

สำหรับลักษณะการใช้งานตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน จะใช้งานและติดตั้งในที่โล่งแจ้งปราศจากสิ่งที่มาบดบังในการรับพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้มีปัจจัยภายนอกที่ยากต่อการควบคุม ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อน ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะคาดการณ์สภาพแวดล้อมและปัจจัยภายนอกต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้วปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในงานทางด้านวิศวกรรมจะทำการวิเคราะห์และแก้ปัญหา

ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงซึ่งจะได้ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ออกมา แต่ด้วยปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ที่จะวิเคราะห์ห้มีรูปร่างลักษณะที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีตัวแปรรวมถึงปัจจัยที่จะต้องพิจารณามากมายทำให้ยากต่อการหาผลเฉลยแม่นยำ จากความซับซ้อนของปัญหาดังกล่าวประกอบกับการใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ ทำให้มีการนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) เข้ามาแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี [12] รวมถึงปัญหาทางด้านความร้อนและรูปแบบของลักษณะการถ่ายเทความร้อน ก็ถือเป็นงานที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรที่จะต้องพิจารณามากมาย จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการศึกษาและพัฒนา รูปแบบของการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาแก้ปัญหาตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก ร่วมกับระบบระบายความร้อนอยู่อย่างต่อเนื่อง Bergene และคณะ [13] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ จากปัจจัยและตัวแปรที่ยากต่อการควบคุม เช่น ความเข้มรังสีอาทิตย์ การนำและการพาความร้อนแบบธรรมชาติ ความเร็วลม และ อุณหภูมิแวดล้อมต่างๆ เหล่านี้ ทำให้ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนและไฟฟ้า เป็นการอยากต่อการคาดการณ์ผลการทดลองล่วงหน้า จากการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองสามารถคาดการณ์ผลล่วงหน้า ประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนและระบบไฟฟ้าได้ค่อนข้างดีประมาณร้อยละ 60 - 80 Riffat และคณะ [14] พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้ในการ

ตรวจสอบประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่crib ของท่อความร้อน จากการคำนวณจากแบบจำลองสามารถทำนายล่วงหน้าประสิทธิภาพการระบายความร้อนที่cribของท่อความร้อนได้ค่อนข้างดี โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงร้อยละ 40-70 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง Sarhaddi และคณะ [15] พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับค่าพลังงานความร้อนและไฟฟ้าของตัวเก็บสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับอากาศ ที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและทิศทางที่ดีกับผลการทดลอง ซึ่งเป็นสิ่งที่ดีที่สามารถคาดการณ์การทดลองได้ล่วงหน้า รวมถึงใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงรูปแบบการระบายความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ไฟฟ้าและประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมของระบบ เท่ากับร้อยละ 17.18, 10.01 และ 45 ตามลำดับ Zondag [16] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับค่าพลังงานความร้อนของตัวเก็บรังสีแผ่นราบแบบใช้ระบบโฟโตโวลตาอิกร่วมกับระบบผลิตน้ำร้อน ผลที่ได้จากแบบจำลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จริงพบว่า ผลที่ได้จากแบบจำลองเป็นไปตามการทดลอง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีประโยชน์ต่อการใช้ทำนายลักษณะล่วงหน้าของการทดลองได้เป็นอย่างดี และยังสามารถใช้เป็นข้อมูลช่วยในการออกแบบโครงสร้างของระบบระบายความร้อน เพื่อให้สามารถสร้างระบบระบายความร้อนที่ใช้งานร่วมกับตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีรังสีอาทิตย์แบบโฟโต

โวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน สำหรับระเบียบวิธีที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง (finite- difference method) และเลือกใช้วิธีของ แครงก์-นิโคลสัน (Crank-Nicolson method) ในการแก้ระบบสมการ โดยแต่ละวิธีมีลักษณะขั้นตอนในการแก้ที่มีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่ทำการวิเคราะห์

ศัพท์เฉพาะ

A	area, m ²
C _p	specific heat capacity, J/kg K
E	output electricity, W/m ²
G	solar radiation intensity, W/m ²
h	heat-transfer coefficient, W/m ² K
M	mass, kg
k	thermal conductivity, W/m K
T	temperature, K
R	thermal resistance, K/W
t	time, s
Nu	Nusselt number
γ	PV Cell coverage ration, A _{pv} / A _c
d	thickness, m
e	emissivity
h	efficiency
ρ	density, kg/m ³
s	Stefan-Boltzman constant, W/m ² K ⁴
a	absorptivity
(τa)	transmittance-absorptance product
τ	transmittance
a	air, ambient
b	base panel
c	collector
i	inner, defferential node " i "
g	glass cover
j	inner, defferential node " j "

sky	sky
l	liquid
HP	heat pipe
s	thermal insulating material
w	water
ad	adhesive layer
con	condenser section of heat pipe
eva	evaporator section of heat pipe
pv	PV cell
TPT	black tedlar-polyester-tellar
ṁ	mass flowing rate
n	number of heat pipe
u	flow velocity, m/s
	HP-PVSC Photovoltaic solar collectors by heat pipe installation (ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน)

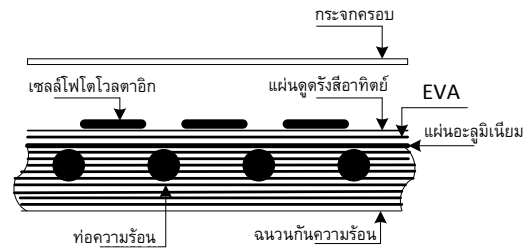
2. วิธีการทดลอง

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างชุดทดสอบสำหรับการศึกษาแบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ HP-PVSC โดยแบ่งวิธีการศึกษาออกเป็น ดังนี้

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน

จากรูปที่ 2 แสดงลักษณะการแบ่ง HP-PVSC ออกเป็นหลายส่วนเพื่อใช้กับวิธีการผลต่างสี่บเนื่อง ลักษณะที่จะทำการออกแบบโดยแบ่ง HP-PVSC ออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนทำระเหย ส่วนควบแน่น ก่อร่างน้ำ ท่อความร้อน ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก และถังเก็บน้ำ ที่แผ่ฐานของ HP-PVSC กับส่วนทำระเหยของท่อความร้อนจะแบ่งออกเป็นช่องๆ

ซึ่งมีขนาดเท่ากับ D_x ในทิศโคออร์ดิเนต x ซึ่งเชื่อมกันที่จุดต่อในตำแหน่งต่างๆ กัน ณ ตำแหน่งที่ $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ และ 9 ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ $i = 2, 4, 6, 8$ เป็นตำแหน่งที่แผงฐานตรงกับส่วนทำระเหยของท่อความร้อน พิจารณาที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อน ซึ่งเชื่อมกันที่จุดต่อในตำแหน่งต่างๆ กัน ณ ตำแหน่งที่ $j = 1, 2, 3$ และ 4 ตามลำดับ โดยกล่องน้ำจะรับน้ำจากถังเก็บน้ำ น้ำเข้าที่ส่วนควบแน่น ณ ตำแหน่งที่ $j = 1$ และน้ำออกที่ส่วนควบแน่น ณ ตำแหน่งที่ $j = 4$ จากรูปที่ 3 แสดงโครงสร้างของ HP-PVSC โดยตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ใช้เป็นแบบผลึกเดี่ยวซิลิกอน ประกอบไปด้วยชั้นของกระจกครอบ ชั้นเซลล์โฟโตโวลตาอิก ชั้นดูดซับรังสีแสงอาทิตย์ ชั้น Ethylene Vinyl Acetate (EVA) ท่อความร้อน และฉนวนกันความร้อน ตามลำดับ



รูปที่ 3 โครงสร้างของ HP-PVSC

2.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งท่อความร้อน

ในการศึกษาครั้งนี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีสมมติฐาน ดังนี้

1. ไม่พิจารณาการนำความร้อนในทิศทางตามยาวของแผ่นอะลูมิเนียม
2. อุณหภูมิของชั้นดูดซับรังสีอาทิตย์ ชั้น EVA เซลล์โฟโตโวลตาอิกและชั้นกาว ในที่มีทิศทางเดียวกันจะถือว่ามีความเท่ากัน

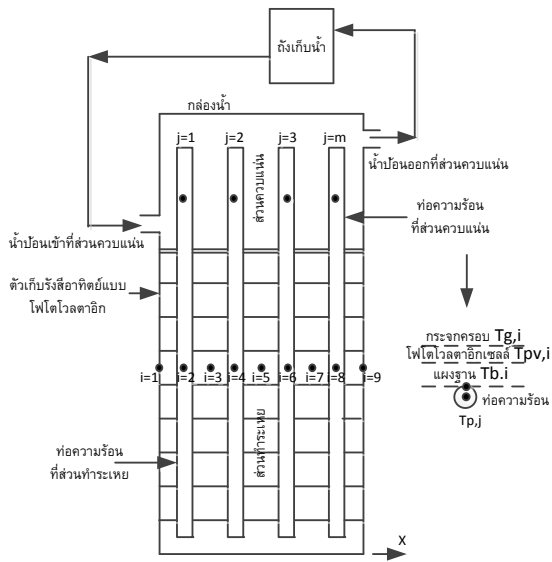
3. ค่าความจุความร้อนของชั้นดูดซับรังสีอาทิตย์ ชั้น EVA และเซลล์โฟโตโวลตาอิกในทิศทางเดียวกันจะไม่นำมาพิจารณา

สำหรับการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ HP-PVSC ในครั้งนี้ ประกอบด้วยชุดสมการหลักที่ใช้พิจารณาในแต่ละส่วนของ HP-PVSC ดังต่อไปนี้ Pei Gang และคณะ [17]

สมการสมดุลทางความร้อนที่กระจกครอบ ดังสมการที่ (1)

$$dr_{g,p,g} \frac{dT_g}{dt} = h_a(T_a - T_g) + h_{sky,g}(T_{sky} - T_g) + h_{g,pv}(T_{pv} - T_g) + Ga_g \quad (1)$$

โดยที่ $h_a = 2.8 + 3.0u_a$, $h_{sky,g} = e_g s_g (T_{sky}^2 + T_g^2)(T_{sky} + T_g)$,



รูปที่ 2 การแบ่ง HP-PVSC ออกเป็นหลายส่วนเพื่อใช้กับวิธีการผลต่างสืบเนื่อง

$$h_{g,pv} = s(T_{pv}^2 + T_g^2)(T_{pv} + T_g)$$

$$\frac{g}{1/e_{pv} + g(1/e_g - 1)} + \frac{g}{1/e_{TPT} + (1-g)(1/e_g - 1)} + \frac{Nu \times K_a}{l}$$

สมการสมดุลทางความร้อนที่เซลล์โฟโตโวลตาอิก ดังสมการที่ (2)

$$g d_{pv} r_{pv} C_{p,pv} \frac{\partial T_{pv}}{\partial t} = h_{g,pv} (T_g - T_{pv}) + \frac{T_b - T_{pv}}{R_{b,pv}} + G(\tau a)_{pv} - g E_{pv} \quad (2)$$

โดยที่ $R_{b,pv} = d_{ad} / K_{ad}$, $E_{pv} = G(\tau a)_{pv} \tau h_r (1 - B_r (T_{pv} - T_r))$ ซึ่ง h_r คือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่อุณหภูมิทำงาน, $T_r = 298.15 \text{ K}$, B_r คือสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ และ $B_r = 0.0045 \text{ K}^{-1}$

สมการสมดุลทางความร้อนที่แผงฐาน โดยแบ่งออกได้ดังนี้

สำหรับตำแหน่งที่แผงฐานตรงกับส่วนทำระเหยของท่อความร้อน ดังสมการที่ (3.1)

$$r_{b,p,b} C_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{1}{d_b} \left(\frac{\partial T_a - T_b}{R_{b,a}} + (T_{pv} - T_b) / R_{b,pv} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ $R_{b,a} = d_s / k_s + 1/h_a$, $R_{p,b} = d_{pb} / (k_p \times A_{pb})$ ซึ่ง A_{pb} และ d_{pb} คือ พื้นที่สัมผัสและความหนาระหว่างแผงฐานกับส่วนทำระเหยของท่อความร้อน

สำหรับตำแหน่งที่แผงฐานไม่ตรงกับส่วนทำระเหยของท่อความร้อน ดังสมการที่ (3.2)

$$r_{b,p,b} C_{p,b} \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_b \frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{1}{d_b} \left(\frac{\partial T_a - T_b}{R_{b,a}} + (T_{pv} - T_b) / R_{b,pv} \right) \quad (3.2)$$

สมการสมดุลทางความร้อนที่ส่วนทำระเหยของท่อความร้อน ดังสมการที่ (4)

$$M_{p,eva} C_{p,HP} \frac{\partial T_{p,eva}}{\partial t} = (T_{p,eva} - T_{p,con} / R_{eva,con}) + (T_b - T_{p,eva}) / R_{p,b} \quad (4)$$

โดยที่ $R_{eva,con} = R_{eva,wick} + R_{eva,i} + R_{con,i}$ ซึ่ง

$$R_{eva,wick} = \frac{\ln(D_{o,wick} / D_{i,wick})}{2\pi L_{eva} K_{wick}}, R_{eva,i} = \frac{2}{\pi D_{eva} L_{eva} h_{eva,i}}$$

$$h_{eva,i} = \frac{k_i}{\delta_{wick}}, R_{con,i} = \frac{1}{\pi D_{con,i} L_{con} h_{con,i}}, \text{ และ}$$

$$h_{con,i} = 1.13 \left[\frac{g \sin \theta \cdot \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu_l \Delta T_{cr} L_{con}} \right]^{1/4}$$

สมการสมดุลทางความร้อนที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อน ดังสมการที่ (5)

$$M_{p,con} C_{p,HP} \frac{\partial T_{p,con}}{\partial t} = (T_{p,eva} - T_{p,con} / R_{eva,con}) + A_w h_{w,con} (T_w - T_{p,con}) \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } h_{w,con} = Nu \frac{K_w}{D_{con,o}}$$

สมการสมดุลทางความร้อนของน้ำที่ส่วนควบแน่น ดังสมการที่ (6)

$$M_w C_{p,w} \frac{\partial T_{w,j}}{\partial t} + \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,j} - T_{w,j-1}) = (T_a - T_{w,j}) / R_{a,w} + A_w h_{w,con} (T_{p,con} - T_{w,j}) \quad (6)$$

สมการสมดุลทางความร้อนของน้ำที่ถังเก็บน้ำ ดังสมการที่ (7)

$$M_{w,tank} C_{p,w} \frac{\partial T_{w,t}}{\partial t} = (T_a - T_{w,t}) / R_{a,wt} + \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (7)$$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อน [11] ดังสมการที่ (8)

$$Q_w = \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (8)$$

โดยที่ Q_w คือ ค่าความร้อนที่น้ำได้รับในส่วนควบแน่น (วัตต์) \dot{m}_w คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน (กิโลกรัม/วินาที) $C_{p,w}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสารรับความร้อน (กิโลจูล/กิโลกรัม-องศา

เซลล์ ($T_{w,out} - T_{w,in}$) คือ ผลต่างอุณหภูมิของสาร
รับความร้อนขาออกและขาเข้าส่วนควบแน่น (องศา
เซลเซียส)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ส่วนควบแน่น
ของท่อความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ [11] ดังสมการที่ (9)

$$\dot{Q}_w = \frac{Q_w}{A_{HP,con}} \quad (9)$$

โดยที่ \dot{Q}_w คือ ค่าความร้อนที่น้ำได้รับต่อหน่วยพื้นที่
(วัตต์/ตารางเมตร) Q_w คือ ค่าความร้อนที่น้ำได้รับใน
ส่วนควบแน่น (วัตต์) $A_{HP,con}$ คือ พื้นที่ผิวของท่อความ
ร้อนที่ส่วนควบแน่น (ตารางเมตร)

สำหรับประสิทธิภาพของระบบ [17] ดังสมการที่ (10)

$$h_{HP-PVSC} = \frac{\int_{t1}^{t2} (A_c \dot{Q}_w + A_{pv} E_{pv}) dt}{A_c \int_{t1}^{t2} G dt} \quad (10)$$

โดยที่ $h_{HP-PVSC}$ คือ ประสิทธิภาพรวมของระบบ

A_c คือ พื้นที่ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (ตารางเมตร) \dot{Q}_w คือ
ค่าความร้อนที่น้ำได้รับต่อหน่วยพื้นที่ (วัตต์/ตาราง
เมตร) A_{pv} คือ พื้นที่เซลล์โฟโตโวลตาอิก (ตารางเมตร)
 E_{pv} คือ พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์โฟโตโวลตาอิกต่อ
หน่วยพื้นที่ (วัตต์/ตารางเมตร) G คือ ความเข้มรังสี
อาทิตย์ (วัตต์/ตารางเมตร)

2.3 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

สำหรับระเบียบวิธีของแครงก์-นิโคลสัน มี
หลักการคือการประมาณพจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง
ที่แปรผันกับเวลาที่กึ่งกลางระหว่างการคำนวณ
เวลาที่ t และ $t+1$ [12] ดังสมการที่ (11)

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_i^{t+1} - T_i^t}{\Delta x} \quad (11)$$

ประมาณพจน์อนุพันธ์อันดับสองที่แปรผันกับ
ระยะทาง ดังสมการที่ (12)

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_{i+1}^{t+1} - 2T_i^{t+1} + T_{i-1}^{t+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2} \right) \quad (12)$$

จากหลักการของระเบียบวิธีแครงก์-นิโคลสัน
นำมาประยุกต์ใช้กับชุดสมการหลักที่ใช้พิจารณาในแต่
ละส่วนของ HP-PVSC ได้ดังนี้

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (1)
จะได้ดังสมการที่ (13)

$$d r_g C_{p,g} \frac{T_{g,j}^1 - T_{g,j}^0}{\Delta t} = h_a (T_a - T_{g,j}^1) + h_{sky,g} (T_{sky} - T_{g,j}^1) + h_{g,pv} (T_{pv,j}^1 - T_{g,j}^1) + G a_g \quad (13)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (2)
จะได้ดังสมการที่ (14)

$$g d_{pv} r_{pv} C_{p,pv} \frac{T_{pv,j}^1 - T_{pv,j}^0}{\Delta t} = h_{g,pv} (T_{g,j}^1 - T_{pv,j}^1) + \frac{T_{b,j}^1 - T_{pv,j}^1}{R_{b,pv}} + G(\tau a)_{pv} - g E_{pv} \quad (14)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (3.1)
จะได้ดังสมการที่ (15)

$$r_b C_{p,b} \frac{T_{b,j}^1 - T_{b,j}^0}{\Delta t} = \frac{1}{d_b} \left(\frac{\dot{Q}_a - T_{b,j}^1}{R_{b,a}} + \frac{(T_{pv,j}^1 - T_{b,j}^1)}{R_{b,pv}} + \frac{(T_{p,ava,j}^1 - T_{b,j}^1)}{R_{p,b} A_{bi}} \right) + k_b \frac{T_{b,j+1}^1 - 2T_{b,j}^1 + T_{b,j-1}^1}{\Delta x^2} \quad (15)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (3.2)
จะได้ดังสมการที่ (16)

$$r_b C_{p,b} \frac{T_{b,j}^1 - T_{b,j}^0}{\Delta t} = k_b \frac{T_{b,j+1}^1 - 2T_{b,j}^1 + T_{b,j-1}^1}{\Delta x^2} + \frac{1}{d_b} \left(\frac{\dot{Q}_a - T_{b,j}^1}{R_{b,a}} + \frac{(T_{pv,j}^1 - T_{b,j}^1)}{R_{b,pv}} \right) \quad (16)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (4)

จะได้ดังสมการที่ (17)

$$M_{p,eva} C_{p,HP} \frac{T_{p,eva,j}^1 - T_{p,eva,j}^0}{\Delta t} = (T_{p,con,j}^1 - T_{p,eva,j}^1) / R_{eva,con} + (T_{b,j}^1 - T_{p,eva,j}^1) / R_{p,b} \quad (17)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (5)

จะได้ดังสมการที่ (18)

$$M_{p,con} C_{p,HP} \frac{T_{p,con,j}^1 - T_{p,con,j}^0}{\Delta t} = (T_{p,eva,j}^1 - T_{p,con,j}^1) / R_{eva,con} + A_w h_{w,con} (T_{w,j}^1 - T_{p,con,j}^1) \quad (18)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (6)

จะได้ดังสมการที่ (19)

$$M_w C_{p,w} \frac{T_{w,j}^1 - T_{w,j}^0}{\Delta t} + \dot{m}_w C_{p,w} (T_{w,j}^1 - T_{w,j-1}^1) = (T_a - T_{w,j-1}^1) / R_{a,w} + A_w h_{w,con} (T_{p,con,j}^1 - T_{w,j}^1) \quad (19)$$

ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ากับสมการที่ (7)

จะได้ดังสมการที่ (20)

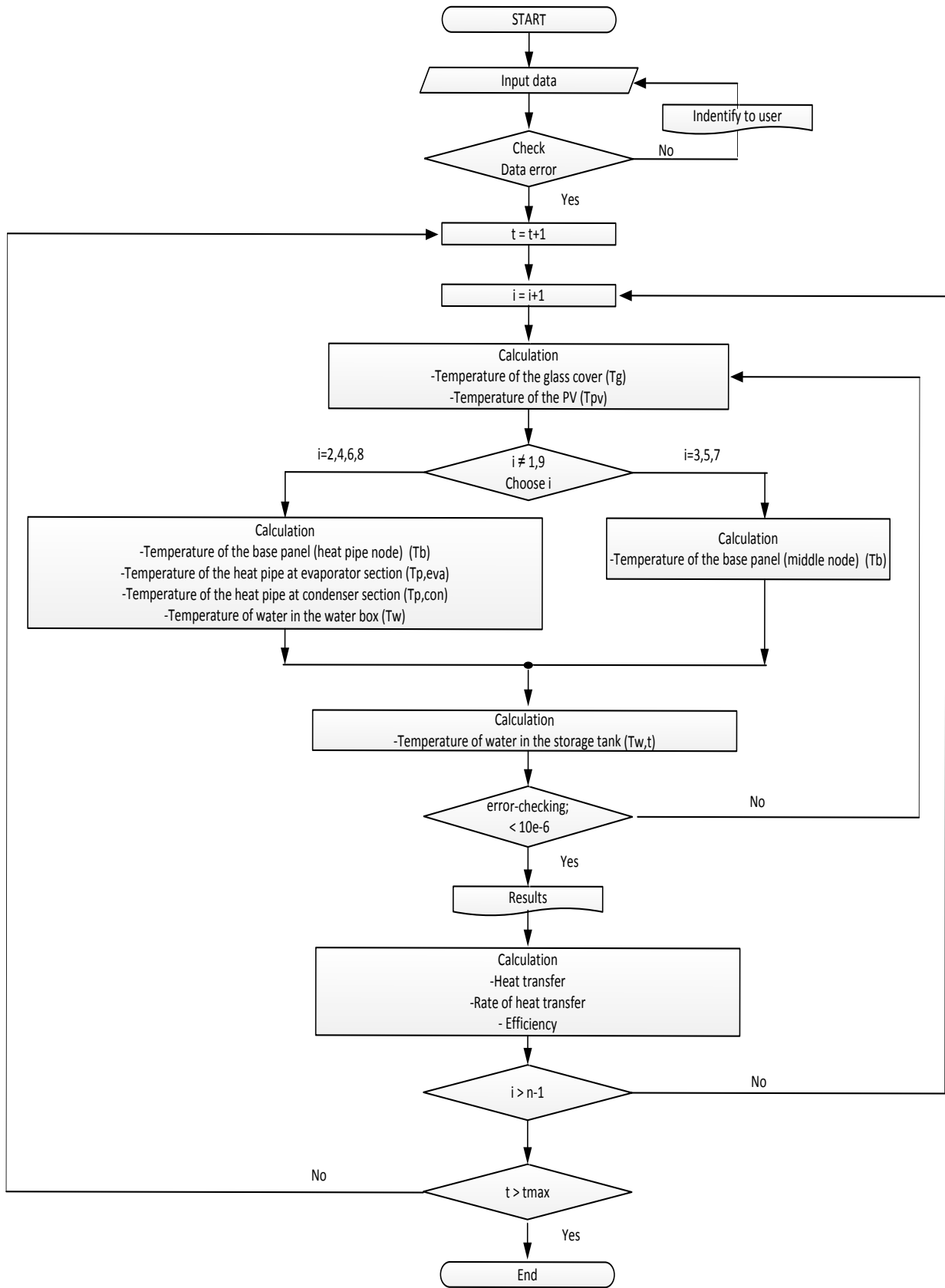
$$M_{w,tank} C_w \frac{T_{w,t}^1 - T_{w,t}^0}{\Delta t} = (T_a - T_{w,t}^1) / R_{a,wt} + n \dot{m}_w C_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (20)$$

2.4 หลักการทำงานของโปรแกรม

จากรูปที่ 4 แสดงแผนผังการทำงานของโปรแกรม HP-PVSC ที่เวลา $t = 1$ สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นของการแก้ปัญหา ตลอดขอบถูกกำหนดให้มี

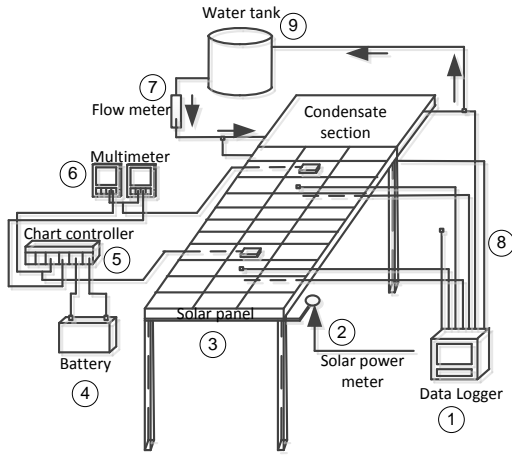
ค่าคงที่ตลอด เมื่อเรียกใช้งานโปรแกรมจะต้องป้อนข้อมูลดังนี้ ค่าอุณหภูมิแวดล้อม ความเข้มรังสีอาทิตย์ ความเร็วลม อัตราการไหลเชิงมวลของสารรับความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในของท่อความร้อน ความยาวส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นของท่อความร้อน ค่าการนำความร้อนของสารทำงาน หลังจากนั้นโปรแกรมก็จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ป้อนเข้ามา โปรแกรมก็จะเริ่มคำนวณอุณหภูมิใหม่ที่จุดต่อใดๆ ที่เวลาถัดไป โดยโปรแกรมจะเริ่มการคำนวณที่สมการสมดุลความร้อนที่กระจกครอบ สมการ

สมดุลความร้อนที่เซลล์โฟโตโวลตาอิก สมการสมดุลความร้อนที่แผงฐาน สมการสมดุลทางความร้อนที่ส่วนทำระเหย สมการสมดุลทางความร้อนที่ส่วนควบแน่น สมการสมดุลทางความร้อนของน้ำที่ส่วนควบแน่นและสมการสมดุลทางความร้อนของน้ำที่ถังเก็บน้ำ ตามลำดับ การคำนวณจะทำซ้ำจนค่าที่ทำการคำนวณนั้นเข้าสู่ผลลัพธ์ที่มีความผิดพลาดที่ยอมรับได้จึงจะหยุดการทำซ้ำ โดยใช้ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้เพื่อหยุดการคำนวณเท่ากับ 10^{-6} ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ ออกมาก็จะนำไปคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนและประสิทธิภาพรวมของระบบต่อไป ซึ่งเป็นการสิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมในรอบนั้นๆ



รูปที่ 4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม HP-PVSC

2.5 การติดตั้งชุดทดสอบตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่ติดตั้งต่อความร้อน



รูปที่ 5 การติดตั้งชุดทดสอบ HP-PVSC

ในชุดทดสอบ HP-PVSC ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) เครื่องบันทึกข้อมูล ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DX200 ขนาด 20 ช่องสัญญาณ มีช่วงการวัดอุณหภูมิ -200 องศาเซลเซียส ถึง 1,100 องศาเซลเซียส มีความละเอียด ± 0.1 องศาเซลเซียส
- 2) เครื่องวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ รุ่น DT-1,307 สำหรับวัดรังสีรวม โดยวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ถึง 1,999 วัตต์ / ตารางเมตร มีความแม่นยำ ± 10 วัตต์ / ตารางเมตร
- 3) แผงเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกเป็นแบบผลึกเดี่ยวซิลิกอน รุ่น M55/53 ขนาด 53 WP มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยทดสอบที่ความเข้มรังสีอาทิตย์ 1,000 วัตต์ต่อตารางเมตร
- 4) แบตเตอรี่ ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 12V-20AH

5) เครื่องควบคุมการประจุกระแสไฟฟ้า LEONICS รุ่น APOLLO S-120A แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 12 Vdc แรงดันไฟฟ้าขาออก 220 Vac 1 เฟส ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz

6) มัลติมิเตอร์ ยี่ห้อ UNI-T UT51~55 ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

7) ชุดปรับอัตราการไหล ยี่ห้อ Platon รุ่น GTF2 ASS-C มีช่วงการวัดที่ 0.2 – 1.5 ลิตรต่อนาที ใช้ปรับอัตราการไหลของน้ำในส่วนควบแน่น

8) สายเทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ OMEGA ชนิด K มีความแม่นยำ ± 1 องศาเซลเซียส

9) ถังกักเก็บน้ำ 100 ลิตร

2.6 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบ HP-PVSC ช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลตั้งแต่ เวลา 09.00-15.30 น. โดยทำการทดสอบที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 ชุดทดสอบ HP-PVSC

2.6.1 นำแผง HP-PVSC พร้อมจัดวางชุดทดสอบ โดยหันหน้าแผงไปในแนวทิศใต้และวางท่ามุม 18 องศา กับแนวระดับ

2.6.2 ในชุดทดสอบแผง HP-PVSC จะทำการติดตั้งปั๊มน้ำที่ถังเก็บน้ำ เพื่อใช้น้ำในการระบายความร้อนออกจากท่อความร้อนในส่วนควบแน่น โดยใช้ อัตราการไหลของน้ำ 0.5 ลิตรต่อนาที

2.6.3 ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบและอุปกรณ์ในการตรวจวัดเข้ากับชุดทดสอบ HP-PVSC ดังแสดงในรูปที่ 6

2.6.4 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัดอุณหภูมิเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล ประกอบด้วยตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิแวดล้อม 1 จุด ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิกระจกกรอบและอุณหภูมิแผงฐานอย่างละ 2 จุดต่อแผง ตำแหน่งตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำขาเข้าและขาออกที่ส่วนควบแน่นอย่างละ 1 จุดและทำการบันทึกอุณหภูมิทุกๆ 30 นาที

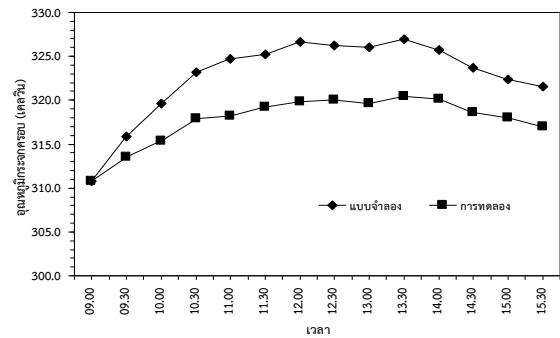
3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

3.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ HP-PVSC เพื่อใช้ในการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของระบบ ในที่นี้จะทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองดังต่อไปนี้

3.1.1 อุณหภูมิกระจกกรอบ

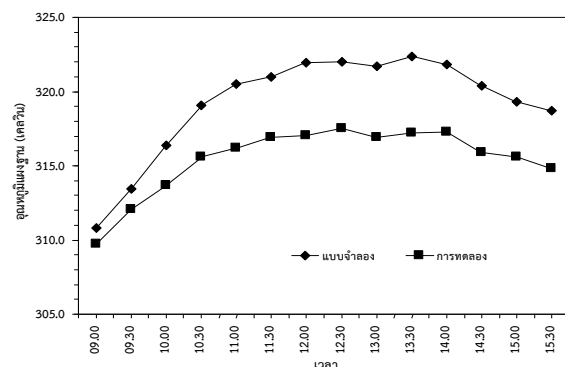
จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบอุณหภูมิของกระจกกรอบที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่า อุณหภูมิของกระจกกรอบที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบอุณหภูมิกระจกกรอบที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิกระจกกรอบที่ได้จากการทดลอง

กระจกกรอบที่ได้จากการทดลองและจากข้อมูลพบว่า ในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าอุณหภูมิกระจกกรอบที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 322.7 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิของกระจกกรอบที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 317.7 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิของกระจกกรอบที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิของกระจกกรอบที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 5 เคลวิน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับ 2.1

3.1.2 อุณหภูมิแผงฐาน



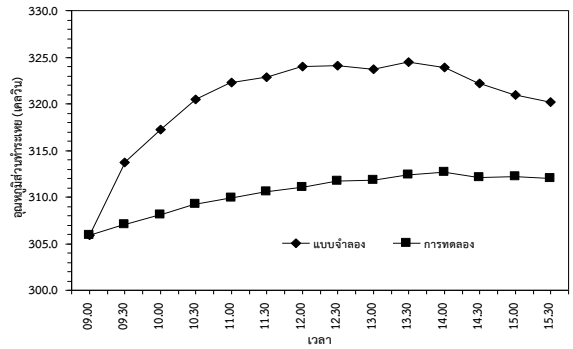
รูปที่ 8 เปรียบเทียบอุณหภูมิแผงฐานที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิแผงฐานที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่าอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นสืบเนื่องจากการสะสมความร้อน โดยค่าอุณหภูมิแฉงฐานที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 319.2 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 315.4 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิแฉงฐานที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 3.8 เคลวิน และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 1.6

3.1.3 อุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อน

จากรูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อนที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อนที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นสืบเนื่องจากการที่ส่วนทำระเหยของต่อความร้อนจะดึงความร้อนที่สะสมที่แฉงฐานโดยค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 320.4 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 310.4 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่

ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 10.0 เคลวิน และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 4.1

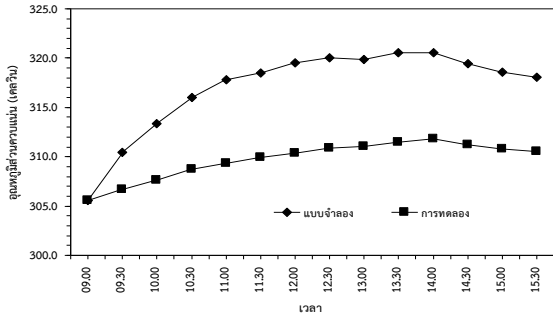


รูปที่ 9 เปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อนที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิส่วนทำระเหยต่อความร้อนที่ได้จากการทดลอง

3.1.4 อุณหภูมิส่วนควบแน่นต่อความร้อน

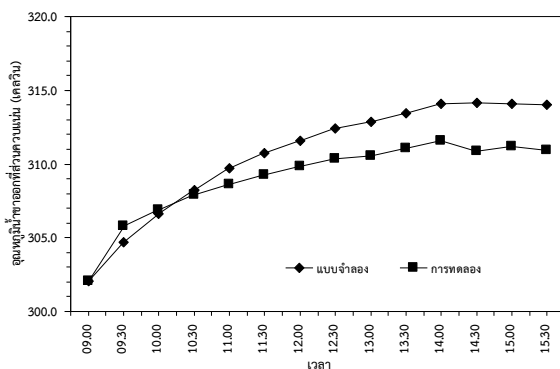
จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่า อุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและลักษณะใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลพบว่าในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 317.0 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 309.7 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิส่วนควบแน่นที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 7.3 เคลวิน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จาก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับ
ลบร้อยละ 2.9



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอุณหภูมิส่วนควบแน่นต่อความชื้นที่ได้
จากแบบจำลองกับอุณหภูมิส่วนควบแน่นต่อความชื้นที่ได้
จากการทดลอง

3.1.5 อุณหภูมิน้ำขาออกที่ส่วนควบแน่น

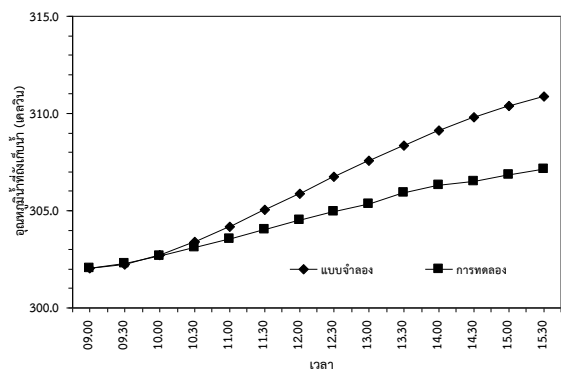


รูปที่ 11 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำขาออกที่ส่วนควบแน่น
ที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิน้ำขาออกที่ส่วนควบแน่นที่ได้
จากการทดลอง

จากรูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับ
การเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำขาออกที่ส่วนควบแน่นที่
ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิน้ำขาออกที่ส่วน
ควบแน่นที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่า
อุณหภูมิ น้ำขาออกที่ ส่วนควบแน่นที่ได้ จาก
แบบจำลองมีแนวโน้มและลักษณะใกล้เคียงกับค่า
อุณหภูมิ น้ำขาออกที่ส่วนควบแน่นที่ได้จากการทดลอง

และจากข้อมูลพบว่า ในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิ
จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าอุณหภูมิ น้ำขาออกที่ส่วน
ควบแน่นที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ
310.6 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิ น้ำขาออกที่ส่วน
ควบแน่นที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 309.0 เคล
วิน โดยค่าอุณหภูมิ น้ำขาออกที่ส่วนควบแน่นที่ได้จาก
แบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิ น้ำขาออกที่ส่วน
ควบแน่นที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 1.6 เคลวิน
มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จาก
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับ
ลบร้อยละ 0.9

3.1.6 อุณหภูมิน้ำที่ถังเก็บน้ำ

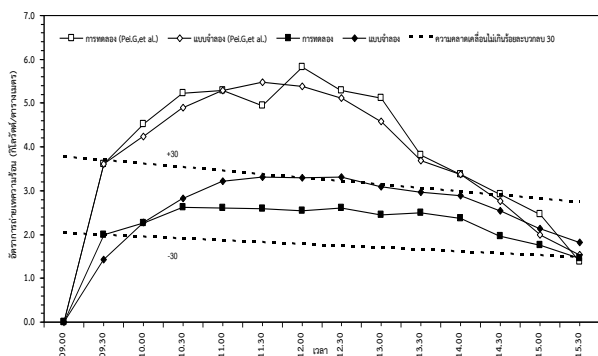


รูปที่ 12 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ถังเก็บน้ำที่ได้จาก
แบบจำลองกับอุณหภูมิน้ำที่ถังเก็บน้ำที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับ
การเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำที่ถังเก็บน้ำที่ได้จาก
แบบจำลองกับอุณหภูมิน้ำที่ถังเก็บน้ำที่ได้จากการ
ทดลองของ HP-PVSC ซึ่งน้ำที่ถังเก็บน้ำเป็นส่วนที่ใช้
ในการหมุนเวียนเพื่อไปช่วยในการระบายความร้อน
ออกจากส่วนควบแน่นของท่อความร้อนและเกิดการ
ถ่ายเทความร้อนจากส่วนควบแน่นของท่อความร้อน
มายังน้ำ จากข้อมูลพบว่า อุณหภูมิของน้ำที่ถังเก็บน้ำ

ที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและลักษณะใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิของน้ำที่ถึงเก็บน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลพบว่า ในช่วงเวลาระหว่างวันอุณหภูมิของน้ำที่ถึงเก็บน้ำทั้งจากแบบจำลองและการทดลองจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มทดสอบจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ โดยค่าอุณหภูมิของน้ำที่ถึงเก็บน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 306.3 เคลวิน ส่วนค่าอุณหภูมิของน้ำที่ถึงเก็บน้ำที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 304.6 เคลวิน โดยค่าอุณหภูมิของน้ำที่ถึงเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าอุณหภูมิของน้ำที่ได้ออกที่ส่วนควบแน่นที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 1.7 เคลวิน มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 1.1

3.1.7 อัตราการถ่ายเทความร้อน



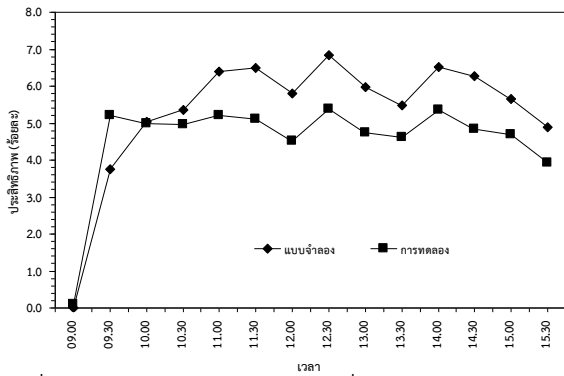
รูปที่ 13 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและลักษณะ

ใกล้เคียงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลอง และจากข้อมูลพบว่า ในช่วงเวลาระหว่างวันอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ส่วนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 2.1 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับ 0.4 กิโลวัตต์/ตารางเมตร ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 29.3 สอดคล้องกับข้อมูลงานวิจัยของ Pei Gang และคณะ [17] ซึ่งพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มทิศทางเป็นไปเหมือนกับการศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการทดลองของ [17] มีค่าสูงกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากแบบจำลองและอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยนี้ สืบเนื่องจากค่าเข้มรังสีอาทิตย์ในช่วงการทดสอบของแต่ละภูมิภาคแตกต่างกันออกไป จึงส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

3.1.8 ประสิทธิภาพ

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของเวลากับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองของ HP-PVSC พบว่า ประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองมีแนวโน้มและใกล้เคียงกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองกับประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง

และจากข้อมูลพบว่า ในช่วงเวลาระหว่างวัน ประสิทธิภาพจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ HP-PVSC ได้รับ โดยค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้จากแบบจำลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 5.31 ส่วนค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.54 โดยค่าประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 0.77 และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองเท่ากับร้อยละ 29.1 สืบเนื่องจากแผงตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกที่นำมาใช้ในการทดสอบในครั้งนี้ ผ่านการใช้งานมาแล้ว 5 ปี จึงมีผลทำให้คุณสมบัติภายในบางประการของตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิกมีค่าที่ลดต่ำลง อาทิ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะทั้งของกระจกและโฟโตโวลตาอิกเซลล์ ค่าการดูดกลืนรังสีทั้งของกระจกและโฟโตโวลตาอิกเซลล์ ค่าการแผ่รังสีทั้งของกระจกและโฟโตโวลตาอิกเซลล์ และค่าการส่งผ่านรังสีของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นระหว่างผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองตามมา

4. สรุป

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ HP-PVSC ที่สร้างขึ้นสำหรับใช้ในการทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของระบบ จากการศึกษาพบว่า

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนายผล

อัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของ HP-PVSC ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลจากการทดลอง

2. เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองพบว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ HP-PVSC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลลัพธ์มีค่ามากกว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของ HP-PVSC ที่ได้จากการทดลอง โดยผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ค่าเท่ากับ 2.5 กิโลวัตต์/ตารางเมตร และผลการทดลองได้ค่าเท่ากับ 2.1 กิโลวัตต์/ตารางเมตร โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 29.3 สำหรับประสิทธิภาพของ HP-PVSC ที่ได้จากผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ผลลัพธ์มีค่ามากกว่าค่าประสิทธิภาพของ HP-PVSC ที่ได้จากการทดลอง โดยผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ค่าเท่ากับร้อยละ 5.31 และผลการทดลองได้ค่าเท่ากับร้อยละ 4.54 และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 29.1 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยต่อความร้อนและออกแบบเครื่องมือทางความร้อน คณะ

วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการสร้างชุดทดสอบ เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Zondag, H.A., 2008. Flat-plate PV-thermal collectors and systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (4), 891-959.
- [2] Hammad, M., 1995. Experimental study of the performance of a solar collector cooled by heat pipes. *Energy Conversion* 36 (3), 197-203.
- [3] Rittidech, S., Wannapakne, S., 2007. Experimental study of the performance of a solar collector by closed-end oscillating heat pipe (CEOHP). *Applied Thermal Engineering* (27), 1978-1985.
- [4] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, TH., Souliotis, M., Yianoulis, P., 2002. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy* 72 (3), 217-234.
- [5] He, Wei, Chow, Tin-Tai, Ji, Jie, et al., 2006. Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. *Applied Energy* (83), 199-210.
- [6] สิริชัย ปัญญาสมาธิ. 2548. การปรับปรุงประสิทธิภาพของโซล่าเซลล์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะ

พลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [7] Ruobing, Zhang, Liangdong, et al., 2015. evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study. *Applied Thermal Engineering* (75), 487-492.
- [8] พงษ์ศักดิ์ พูลศรี. 2557. การศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าและน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [9] Meral ME, Dincer F. 2011; A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (15), 2176-2184.
- [10] พฤทธิ์ สกุลช่างสังจจะทัย. 2555. การศึกษาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งท่อความร้อนเพื่อพัฒนาการใช้พลังงานอย่างยั่งยืน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- [11] สัมพันธ์ ฤทธิเดช. 2554. เทคโนโลยีท่อความร้อน. ฉบับปรับปรุงแก้ไข 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- [12] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2555. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. ฉบับปรับปรุงแก้ไข 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [13] Bergene, T., Lovvik, M., 1995. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy* (55), 453-462.
- [14] Riffat, S.B., Zhao, X., Doherty, P.S., 2005. Developing a theoretical model to investigate thermal performance of a thin membrane heat-pipe solar collector. *Applied Thermal Engineering* (25), 899-915.
- [15] Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A., Mahdavi Adeli, M., 2010. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy* (87), 2328-2339.
- [16] Zondag, H.A., 2008. The Thermal and Electrical Yield of A PV-Thermal Collector. *Solar energy*, (72), 113-128.
- [17] Pei.G., Fu.H., Zhang.T., Ji.Jie., 2011. A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system *Solar energy* (85), 911-921.