

ผลของสารทำงานต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่น
ที่ติดตั้งท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดล้นวงรอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์
Effect of working fluid on the thermal efficiency of a closed-loop oscillating
Flat heat pipe (CLOFHP) solar collector

ตั้งเอง ยนต์สฤติยกุล¹ และ วสันต์ ศรีเมือง^{1*}

ห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน (Heat pipe heat exchanger research laboratory)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

*ติดต่อ: E-mail: wasan.sr@rmuti.ac.th, tangheang@hotmail.com

โทรศัพท์: +664-423-3073 ต่อ 3411, 087-0055449 โทรสาร: +664-423-3074

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผล ของชนิดสารทำงานมีต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของ เครื่องทำน้ำอุ่น ซึ่งท่อความร้อนได้ มีการปรับปรุง รูปทรงหน้าตัดใหม่ โดยใช้ท่อทองแดงหน้าตัดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4 mm นำมาบีบให้แบนมีหน้าตัดคล้ายทรงแคปซูล ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์ประมาณ 3.1 mm แล้วนำมาขดต่อกันเป็นวงรอบ ซึ่งท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดล้นวงรอบ (CLOFHP) มีความยาว 39.40 m ทำการขดกลับไปมาจำนวน 10 รอบ และแบ่งตามหลักการทำงานเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนทำระเหยมีความยาว 1.46 m และความกว้าง 0.48 m ติดต่อกับระหว่างท่อความร้อนด้วยแผ่นทองแดงหนา 0.28 mm ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งถ่ายความร้อนให้กับสารทำงานภายในท่อความร้อน ส่วนที่สองเป็นส่วนกันความร้อนมีความยาว 0.07 m ทำหน้าที่กันความร้อนระหว่างส่วนทำระเหยกับส่วนควบแน่น ส่วนที่สามเป็นส่วนควบแน่นมีความยาว 0.32 m ทำหน้าที่ส่งถ่ายความร้อนจากสารทำงานให้กับน้ำเย็นกว่าที่ไหลผ่าน ในการทดลองนี้ ได้ใช้กับสารทำงาน 3 ชนิด คือ น้ำ เอทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1) โดยอัตราการเดินสารทำงานที่ 50% ของปริมาตรภายในท่อความร้อน และอัตราการไหลของน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 0.0066 kg/s ซึ่งการทดลองพบว่า CLOFHP ที่ใช้สารทำงานเป็นเอทานอล ทำน้ำร้อนในช่วงเวลา 11.30 น. ถึง 13.00 น. มีค่าความเข้มของแสงอาทิตย์สูงประมาณ 1017 W/m^2 ทำให้มีค่าอุณหภูมิน้ำร้อนสูงสุดประมาณ 67.8°C และประสิทธิภาพทางความร้อนของการถ่ายเทความร้อนเครื่องทำน้ำอุ่น สำหรับสารทำงานเป็นเอทานอล มีค่าสูงประมาณ 61.29% ซึ่งมีค่าสูงกว่าสารทำงานที่เป็นน้ำ ผสมเอทานอล (1:1) มีประสิทธิภาพประมาณ 43.35% และสูงกว่าสารทำงานที่เป็นน้ำมีประสิทธิภาพประมาณ 41.66% และมีค่าสมรรถนะตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ สำหรับชนิดสารทำงานเป็นเอทานอล มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านและดูดกลืนรังสีของตัวเก็บรังสี ($F_R(TO)$) มีค่าสูงประมาณ 63.82 และมีค่าการสูญเสียความร้อน ($F_R U_L$) ประมาณ $-1148.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ซึ่งแสดงว่าสารทำงานได้รับความร้อนและเกิดการทำงานในระบบมากขึ้น และสูงกว่าน้ำผสมเอทานอล (1:1) และน้ำ ตามลำดับ

คำหลัก: เครื่องทำน้ำอุ่น, ประสิทธิภาพทางความร้อน, ท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดล้นวงรอบ

Abstract

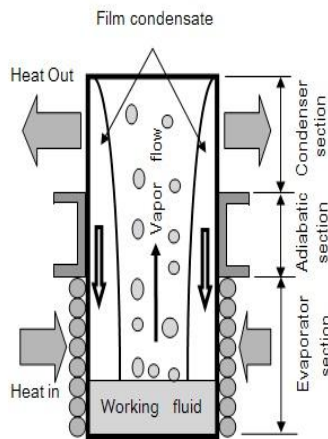
This research aims to study the effects of three filling ratio on the thermal efficiency of CLOFHP. The heat pipe has new modifier in the section area by using the copper tube inside about 4 mm diameter, compressed by mold to be flat tube as capsule-shape in internal diameter hydraulic 3.1 mm. When joining a closed-loop heat pipe, it becomes a closed-loop oscillating flat heat pipe (CLOFHP) at the length 39.40 m. It makes it 10 loop reverse up and down when divided into three parts. The first part is the evaporator 1.46 m long and 0.48 m wide, the copper sheet 0.28 mm thick fixes the fins between the heat pipes. The function is to absorb the solar energy and transfer the heat to the working fluid inside the heat pipe. The second part is adiabatic section 0.07 m long. Its function is to insulate the heat between evaporator section and condenser section. The third part is the condenser section 0.32 m long. Its function is to transfer the heat to the flowing cool water. This experiment uses three kinds of filling working fluid: water, ethanol, and mixing of water and ethanol (1:1). This is done by filling 50% ratio of the internal heat pipe volume and by flowing rate of cool water fixing at 0.0066 kg/s. The result shows that CLOFHP that uses ethanol filling 50% ratio has the hottest water during 11:30 am – 13:00 pm. The solar energy irradiation is approximately 1017 W/m^2 . This can get water temperature at approximately 67.8°C and the efficiency is approximately 61.29%. Ethanol is higher than the mixing of water and ethanol (1:1). It has the efficiency of approximately 43.35% and the water filling has the efficiency of approximately 41.66 %. Therefore, I conclude that ethanol filling has the highest optical efficiency ($F_R(\tau\alpha)$) at 63.82 and the overall loss coefficient ($F_R U_L$) is approximately $-1148.7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Show that, working fluid is heated and working in the system and higher than mixing of water and ethanol (1:1) and water respectively.

Keywords: solar collector, thermal efficiency, a closed-loop flat oscillating heat pipe.

1. บทนำ

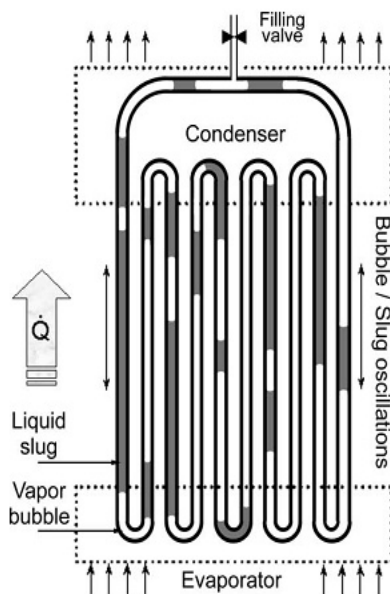
ท่อความร้อนจัดเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้ทำเครื่องทำน้ำอุ่น ซึ่งสามารถส่งถ่ายความร้อนจากแหล่งความร้อนสูงไปยังแหล่งความร้อนต่ำกว่าได้ดี โดยอาศัยสารทำงาน (Working Fluid) ที่อยู่ในท่อความร้อน ดังรูปที่ 1 ลักษณะท่อความร้อนแบบธรรมดา หรือเรียกว่าเทอร์โมไซฟอน (Conventional Two-Phase closed Thermosyphon, CTPCT) เป็นท่อความร้อนหน้าตัดทรงกลม ไม่มีไส้ และภายในท่อเป็นระบบปิดบรรจุสารทำงานภายในท่อความร้อน ท่อความร้อนจะถูกแบ่งตามหลักการทำงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนด้านล่างเป็นส่วนทำระเหย (Evaporator Section) เป็นส่วนรับความร้อนจากแหล่งความร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ส่วนกลางเป็นส่วนกัน

ความร้อน (Adiabatic Section) เป็นส่วนกันความร้อนระหว่างแหล่งความร้อนสูงกับแหล่งความร้อนต่ำ และส่วนควบแน่น (Condenser Section) เป็นส่วนถ่ายเทความร้อนให้กับของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อที่ส่วนทำระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนสูงจะทำให้สารทำงานสถานะของเหลวภายในท่อความร้อนเกิดการเดือดและกลายเป็นไอลอยขึ้นและเคลื่อนที่ไปยังส่วนบนผ่านส่วนกันความร้อนไปยังส่วนควบแน่น ซึ่งสารทำงานจะนำความร้อนแฝงไปยังส่วนควบแน่นด้วย แล้วถูกส่งถ่ายความร้อนให้กับของไหลที่เย็นกว่าไหลผ่าน เช่น น้ำ หรืออากาศ เป็นต้น แล้วสารทำงานถูกควบแน่นเปลี่ยนเป็นของเหลวไหลย้อนกลับมายังส่วนด้านล่างด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) เพื่อรับ



รูปที่ 1 ท่อความร้อนแบบธรรมดา (Conventional Two-Phase Closed Thermosyphon, CTPCT)

ความร้อนอีกครั้ง อุปกรณ์นี้นิยมนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เครื่องทำน้ำอุ่น อุปกรณ์ระบายความร้อนในคอมพิวเตอร์ ทำอากาศร้อน เป็นต้น CTPCT ที่สภาวะความร้อนสูงนั้น จะถูกจำกัดโดยแรงดันไอ (Vapor Pressure) และขีดจำกัดการพา (Entrainment Limit) ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลที่สวนทางกัน (Counter Current Flow) ของสารทำงานในสถานะไอ



รูปที่ 2 ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe, CLOHP) [1]

อุณหภูมิสูงจากส่วนที่ระเหยกับของเหลวอุณหภูมิต่ำจากส่วนควบแน่น ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร

ท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (Closed-loop oscillating heat pipe, CLOHP) [1] ดังรูปที่ 2 มีลักษณะท่อความร้อนต่อเนื่องเป็นวงรอบ และมีขนาดเล็ก (capillary tube) ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อความร้อนแบบสั่น ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการของ Maezawa [2] ดังสมการที่ (1) และแบ่งส่วนตาม

$$D_{\max} \leq 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

หลักการทำงาน คล้ายกับท่อความร้อนแบบธรรมดา แต่มีข้อแตกต่างกัน คือ สารทำงานจะอยู่ทั่วท่อความร้อนและ อยู่ภายใน สถานะของเหลว (Liquid Slug) สลับกับฟองไอ (Vapor Bubble) มีหลักการทำงานคือ เมื่อส่วนที่ระเหยได้รับความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง ทำให้สารทำงาน ภายในท่อความร้อน ที่เป็นของเหลว เกิดการเดือด เปลี่ยนเป็นไอเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับส่วนฟองไอและเคลื่อนที่สลับกันไปมาอย่างรวดเร็ว และเคลื่อนที่ไปยัง ส่วนควบแน่นที่มีอุณหภูมิสูงแล้วส่งถ่ายความร้อนให้กับของไหลที่ อุณหภูมิต่ำกว่าไหลผ่าน ทำให้สารทำงานเกิดการควบแน่น เปลี่ยนเป็นของเหลวไหลสลับกับไอ เคลื่อนที่ตามท่อบรรอบและเกิดการสั่นไปมาเนื่องจากความดันและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง และเคลื่อนที่ ลงมายังส่วน ทำระเหยด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง เมื่อสารทำงานรับความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้การสั่นมีความถี่เพิ่มมากขึ้นทำให้สามารถรับและ ถ่ายเทความร้อนได้ดี ทำให้ลดปัญหาการไหลส่วนทิศทางระหว่างสารทำงาน และจากงานวิจัยที่ผ่านมามีงานที่เกี่ยวข้องกับท่อความร้อนและเทอร์โมไซฟอน มีดังนี้

สุวรรณ และคณะ [3] ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบ (CLOHP) ในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบชาร์ท ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 1.778

และ 2.032 mm ความยาวส่วนทำระเหยและส่วนระบายความร้อนยาวเท่ากันเท่ากับ 170 mm ใช้สารทำงานคือ R-12, R-22 และน้ำ ที่อัตราการเติมเท่ากับ 50% โดยปริมาตรทั้งหมดภายในท่อ และมุมเอียงของท่อความร้อน 90 องศาจากแนวระดับ ทำการทดลองโดยให้ความร้อนส่วนทำระเหยด้วยอากาศร้อนที่ผ่านการอัดจากเทอร์โบชาร์ท และระบายความร้อนในส่วนควบแน่นด้วยอากาศ จากการศึกษพบว่าที่ท่อความร้อนแบบสั่นปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.032 mm ความยาวรวมเท่ากับ 20 m ใช้สารทำงานเป็น R-22 ทำให้สมรรถนะเครื่องย่นต์สูงสุด และเครื่องย่นต์ที่ติดตั้ง CLOHP มีแรงบิดและกำลังงานต่อพื้นที่การรับความร้อนสูงกว่าเครื่องย่นต์ที่ติดตั้งอินเตอร์คูลเลอร์ 9.2 และ 9.2 เท่า ตามลำดับ

วสันติ และพัฒน์พล [4] ได้ศึกษาขีดจำกัดของท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ และผลของความยาวส่วนทำระเหย และสารทำงานที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน โดยท่อความร้อนทำมาจากท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.77 mm ขนาดความยาวส่วนทำระเหย 5, 10 และ 15 cm ใช้สารทำงานได้แก่ R123, เอทานอล และน้ำ อัตราการเติมสารทำงาน 50% ของปริมาณทั้งหมด ทำการทดลองโดยควบคุมความร้อนที่ส่วนทำระเหยที่อุณหภูมิ 60 °C และทำการวัดอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำไหลเข้าและไหลออกจากส่วนควบแน่น จนกว่าอุณหภูมิส่วนทำระเหยเกิดการกระโดดจะถือว่าเป็นสภาวะวิกฤติ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความยาวที่ส่วนทำระเหยเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤติลดลง และสารทำงานเป็น R123 เอทานอล และน้ำ จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงตามลำดับ

Rittidech, S., Donmaung, A. and Kumsombut, K. [5] ได้วิจัยท่อความร้อนแบบสั่นชนิดวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ (Closed-Loop Oscillating Heat Pipe with Check Valve, CLOHP/CV) โดยการติดตั้งวาล์วกันกลับทำหน้าที่บังคับทิศทางการไหลให้ไหลวนทิศทางเดียว ในการทดลองใช้สารทำงานเป็น R-134a

บรรจุในท่อ 50% ของปริมาตรภายในท่อความร้อน แผงวางเอียง 18 องศาจากขนานกับพื้น จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 76% ของแผงที่รับความร้อนเข้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่ามากกว่าท่อความร้อนสั่นแบบปลายปิด

Honghai Yang, et al. [6] ได้ทำการศึกษาขีดจำกัดของท่อ ความร้อนแบบสั่นวงรอบทำมาจากท่อทองแดงจำนวน 40 ท่อโค้ง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm และ 2 mm ความยาวส่วนทำระเหย 8 mm และส่วนควบแน่นมีความยาว 120 mm ใช้สารทำงานเป็น R123 อัตราการเติมที่ 30%, 50% และ 70% ของปริมาตรท่อ ส่วนทำระเหยให้ความร้อนด้วยแผ่นความร้อนไฟฟ้าทำมาจากทองแดงขนาด 130×25×25 mm³ ผลการศึกษพบว่า CLPHP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 mm มีผลการทำงานสูงกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm และ CLPHP ติดตั้งในแนวตั้ง ให้ความร้อนที่ส่วนล่าง และอัตราเติมสารทำงานที่ 50% ของปริมาตรภายในท่อความร้อนจะมีผลการทำงานที่ดีที่สุด

Hussein, H.M.S., El-Ghetany, H.H. and Nada, S.A. [7] ได้ทดลองหาประสิทธิภาพของการทำงานของท่อความร้อนรับพลังงานแสงอาทิตย์ ที่มีความแตกต่างกันของพื้นที่หน้าตัดรูปทรงเรขาคณิตคือ ทรงกลม ทรงวงรี และทรงครึ่งวงกลม โดยติดแผ่นครีบบเคลือบสีดำดูดความร้อน (Absorber Plate) และใช้น้ำกลั่นเป็นสารทำงาน ซึ่งเติม 10%, 20% และ 30% ผลการทดลองพบว่าท่อความร้อนที่มีหน้าตัดรูปทรงวงรี และอัตราส่วนเติมสารทำงานที่ 10% จะทำให้ท่อความร้อนได้รับความร้อนสูงกว่าท่อความร้อนที่มีหน้าตัดรูปทรงกลม และมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงกว่า

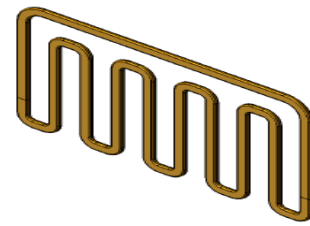
Amatachaya, P. and Srimuan, W. [8] ได้วิจัยเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเทอร์โมไซฟอนแบบหน้าตัดแบน (Flat Two-Phase Closed Thermosyphon, FTPCT) และเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา (Conventional Two-Phase Closed

Thermosyphon, CTPCT) ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงานในปริมาตร 60% สำหรับส่วนระเหยยาว 238 mm ผลการทดลองพบว่า ความร้อนที่ให้กับส่วนระเหยของ FTPCT มีผลต่ออุณหภูมิที่ผิวมากกว่า CTPCT และการทำงานของถ่ายเทความร้อนของ FTPCT สูงกว่า CTPCT

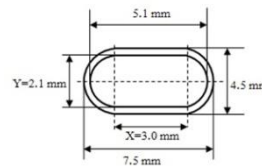
จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่า อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อความร้อนได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องไม่ว่ากรณีแบบเทอร์โมไซฟอนแบบธรรมดา หรือท่อความร้อนแบบสั่นวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ที่สามารถถ่ายเทความร้อนได้โดยไม่ต้องอาศัยพลังงานจากภายนอกทำงานโดยอาศัยสารทำงาน ภายในท่อเปลี่ยนแปลงสถานะส่งถ่ายความร้อนแฝงจากแหล่งความร้อนสูงไปสู่แหล่งความร้อนต่ำ สำหรับประสิทธิภาพของท่อความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น พื้นที่รับพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะหน้าตัดของท่อความร้อน ลักษณะการวางท่อความร้อน สารทำงานภายในท่อ อัตราการไหลน้ำแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดที่จะศึกษา ผลของสารทำงานต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นที่มีท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบ (Closed-Loop Oscillating Flat Heat Pipe, CLOFHP) ดังรูปที่ 3 โดยใช้สารทำงานเป็น เอทานอล น้ำ และเอทานอลผสมกับน้ำ (1:1) และคาดว่าข้อมูลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกร และผู้ออกแบบสร้างเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

2. รายการสัญลักษณ์

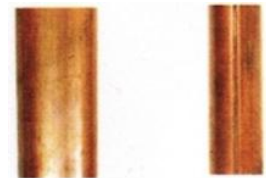
A_c	พื้นที่ตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ (m^2)
$C_{p,w}$	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ($4.187 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$)
D_{mas}	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนสูงสุดแบบสั่น (Capillary Tube) (m)
F_R	ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน



(a)



(b)



(c)

(d)

รูปที่ 3 (a) ท่อความร้อนหน้าตัดแบนชนิดสั่นวงรอบ CLOFHP, (b) รูปทรงหน้าตัด CLOFHP, (c) รูปด้านบน CLOFHP และ (d) รูปด้านข้าง CLOFHP

g	ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2
I_s	ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ (W/m^2)
m_w	อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)
Q_{incident}	อัตราความร้อนที่ CLOFHP ได้รับ (Watt)
Q_{heat}	อัตราความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเย็น (Watt)
T_a	อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)
T_{wi}	อุณหภูมิของน้ำไหลเข้า ($^\circ\text{C}$)
T_{wo}	อุณหภูมิของน้ำไหลออก ($^\circ\text{C}$)
$T_{p1} - T_{p9}$	อุณหภูมิที่ส่วนระเหยของ CLOFHP ($^\circ\text{C}$)
T_{pm}	อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนระเหยของ CLOFHP ($^\circ\text{C}$)
T_{wc}	อุณหภูมิน้ำเย็นที่ถึงน้ำ ($^\circ\text{C}$)
T_{wh}	อุณหภูมิน้ำร้อนที่ถึงเก็บน้ำ ($^\circ\text{C}$)
U_L	ค่าการสูญเสียความร้อน $\text{W/(m}^2\text{K)}$
η	ประสิทธิภาพทางความร้อน
τ	ค่ารังสีอาทิตย์ส่งผ่านวัตถุ
α	ค่าวัตถุดูดกลืนรังสีอาทิตย์
σ	ค่าความตึงผิวของสารทำงาน (N/m)
ρ_c	ค่าสะท้อนรังสีอาทิตย์ของแผ่นปิดโปร่งแสง

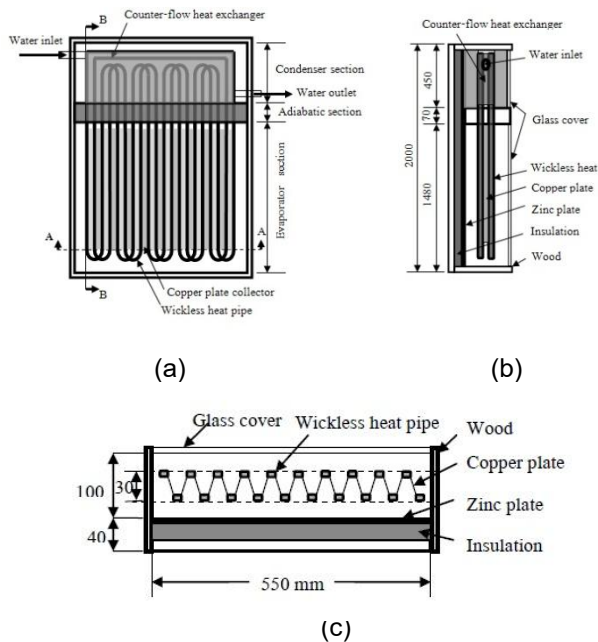
- ρ_l ค่าความหนาแน่นของสารทำงานในสภาวะเป็นของเหลว (kg/m^3)
- ρ_v ค่าความหนาแน่นของสารทำงานในสภาวะเป็นไอ (kg/m^3)

แสงอาทิตย์ 1.475 m^2 เคลือบด้วยสีดำด้าน ส่วนกันความร้อนมีพื้นที่ $0.55 \times 0.07 \text{ m}^2$ ส่วนควมแน่นครอบด้วยกระจกหนา 0.4 mm ขนาดความกว้าง 0.55 m ความยาว 0.45 m

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

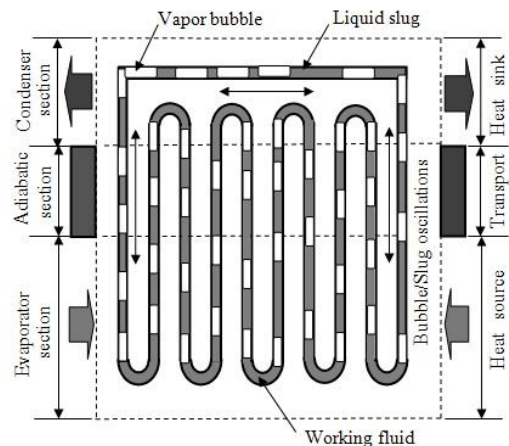
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 4 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ CLOFHP ที่ใช้ศึกษาวิจัยซึ่ง CLOFHP ประกอบด้วยท่อทองแดงหน้าตัดแบนรูปสี่เหลี่ยมมีครึ่งวงกลมด้านข้างทั้งสองด้าน (Capsule Shape) มีขนาดหน้าตัดภายใน 9.76 mm^2 ความยาว $39,400 \text{ mm}$ ต่อเป็นวงรอบ และทำ



รูปที่ 4 ลักษณะอุปกรณ์ CLOFHP (a) Top view, (b) Section B-B และ (c) Section A-A

การขดกลับไปมาวางซ้อนกันสองชั้นๆ ละ 5 ขด ดังรูปที่ 4 CLOFHP แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) ส่วนระเหยเป็นส่วนรับ พลังงานความร้อนจาก แสงอาทิตย์ (2) ส่วนกันความร้อน และ (3) ส่วนควมแน่น เป็นส่วนถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ ส่วนทำระเหยติดครีด้วยแผ่นทองแดงหนา 0.28 mm ระหว่างท่อบนและท่อล่างสลับเป็ นลักษณะพื้นปลาที่มีพื้นที่รับพลังงาน

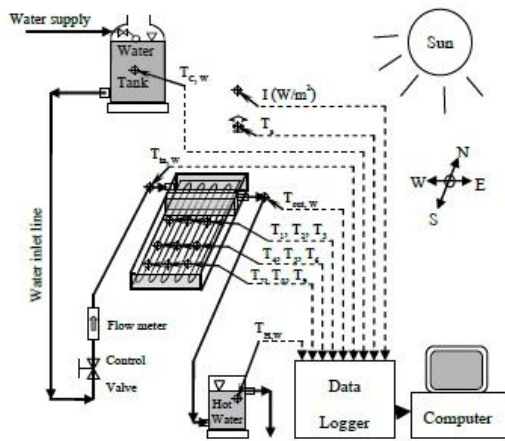


รูปที่ 5 หลักการทำงานท่อความร้อนชนิดสั่นวงรอบ (CLOFHP)

รูปที่ 5 แสดงหลักการทำงานของ CLOFHP เริ่มจากที่ส่วนระเหยรับความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้สารทำงานภายในเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นไอ และแรงดันสูง พาความร้อนเคลื่อนที่ไป ยังส่วนควมแน่น และถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำเย็นที่ส่วนควมแน่น เมื่อสารทำงานถูกควมแน่นทำให้ เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวไหลลงมายังส่วนระเหย เพื่อรับความร้อนอีกครั้ง

3.2 วิธีการทดลอง

รูปที่ 6 แสดงวงจรการทดลองเครื่องทำน้ำอุ่น โดย CLOFHP ถูกติดตั้งรับแสงอาทิตย์ทางทิศตะวันตก ทำมุมเอียงกับแนวราบ 18 องศา จากถังน้ำสูงไหลผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำไหลเข้า CLOFHP ในส่วนควมแน่น โดยควบคุมอัตราการไหลที่ 0.0066 kg/s และไหลออกไปยังถังเก็บน้ำร้อน และได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดตามจุด ดังรูปที่ 4 เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ KIPP & ZONEN รุ่น Pyranometer CMP3 และ



รูปที่ 6 วงจรการทดลองเครื่องทำน้ำอุ่น

เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ (Thermocouple, Type K) แล้ว ส่งค่าที่วัดได้เข้าเครื่องเก็บข้อมูล (Datalogger) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น MW100 (Yokogawa Electric Corporation, Japan) แล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ ชนิดของสารทำงาน เป็น น้ำ เอทานอล และ น้ำผสม เอทานอล (1:1) ตามลำดับ

3.3 การหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำน้ำร้อน

การหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องทำน้ำอุ่นสามารถหาได้จากอัตราความร้อนที่น้ำเย็นได้รับต่ออัตราส่วนอัตราความร้อนที่เครื่องทำน้ำอุ่นได้รับพลังงานความร้อนจากรังสีแสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (1)

$$\eta = \frac{Q_{\text{heat}}}{Q_{\text{incident}}} \quad (1)$$

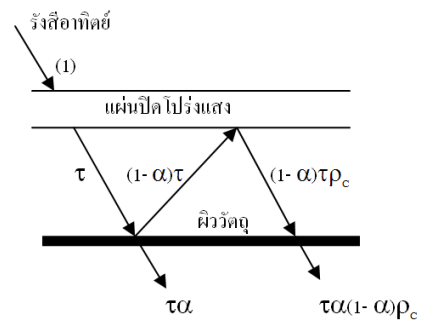
เมื่อ Q_{heat} คืออัตราความร้อนที่น้ำเย็นได้รับความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนของสารทำงาน ดังสมการที่ (2)

$$Q_{\text{heat}} = \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot (T_{w_o} - T_{w_i}) \quad (2)$$

และ Q_{incident} คืออัตราความร้อนที่ CLOFHP ได้รับความร้อนเข้าจากพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (3)

$$Q_{\text{incident}} = A_c \cdot I_s \quad (3)$$

ค่าสมรรถนะของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ เป็นค่าประสิทธิภาพของ CLOFHP ส่วนที่ระเหยที่สามารถดูดเก็บพลังงานรังสีแสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ (7)



รูปที่ 7 ลักษณะรังสีส่งผ่านแผ่นปิดโปร่งแสง ตกกระทบและดูดกลืนกับผิววัตถุ [9]

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบบนแผ่นปิดโปร่งแสง ค่ารังสีส่งผ่านแผ่นโปร่งแสง [8] ซึ่งมีค่าส่งผ่านรังสี (τ) และเมื่อกระทบกับผิววัตถุด้านล่างบางส่วนจะถูกดูดกลืน (α) และบางส่วนถูกสะท้อนกลับกระทบกับแผ่นโปร่งแสงอีก แล้วสะท้อนกลับไปกลับมาดังรูปที่ 7 อัตราความร้อนที่ได้จากแผ่นเก็บรังสี (Q_{heat}) สามารถหาได้จาก สมการของ Hottel - Whillier - Bliss [9] ดังสมการที่ (4)

$$Q_{\text{heat}} (\text{W}) = A_c F_R [I_s \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_{\text{pm}} - T_a)] \quad (4)$$

เมื่อ F_R คือ ค่าแฟกเตอร์การดึงความร้อน (Heat Removal Factor) และเมื่อนำค่า Q_{heat} สมการที่ (4) แทนค่าในสมการที่ (1) จะได้สมการประสิทธิภาพของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ CLOFHP ตามสมการที่ (5)

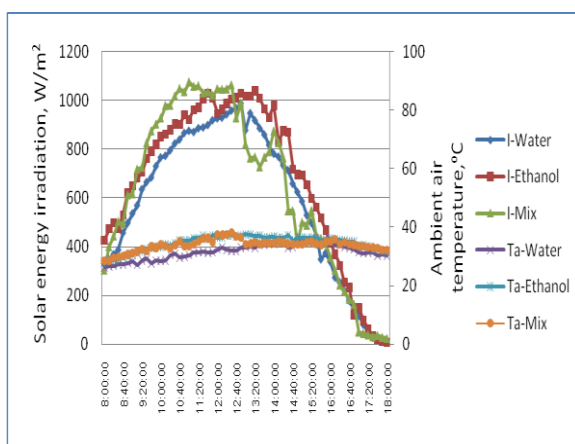
$$\eta = \frac{Q_{\text{heat}}}{I_s A_c} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_p - T_a)}{I_s} \quad (5)$$

เมื่อค่า $F_R (\tau\alpha)$ อาจเรียกว่าประสิทธิภาพเชิงแสง (Optical Efficiency) เป็นค่าส่งผ่านและดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของแผงเก็บรังสี และเทอม $F_R U_L$ เป็นค่าการสูญเสียความร้อนของแผงเก็บรังสี

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลเก็บข้อมูลของอากาศแวดล้อม

ในการทดลองได้เก็บข้อมูลสภาวะอากาศแวดล้อมขณะทำการทดลอง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา ในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2555 ตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น. รูปที่ 8 แสดงค่าอุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (ambient air temperature) ของอัตราการไหลที่ 0.0066 kg/s โดยใช้สารทำงานได้แก่ น้ำ เอทานอล และ น้ำผสมเอทานอล (1:1) ที่อัตราการเดินสารทำงานที่ 50% ของปริมาตรภายในท่อความร้อน ผลการเก็บข้อมูลพบว่า ความเข้ม แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 13.30 น. แล้วเริ่มลดลงตั้งแต่เวลา 13.30 น. ถึง 18.00 น. และ

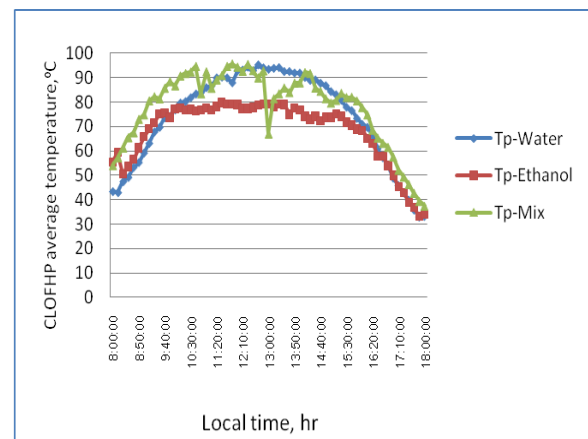


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (Ambient Air Temperature) และความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar Energy Irradiation) กับเวลา

ในขณะที่ทำการทดลองช่วงเวลา 11.30 น. ถึง 13.30 น. ค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม (T_a) มีค่าสูงสุดประมาณ 34.5, 36.7 และ 36.5 °C สำหรับสารทำงานชนิดน้ำ เอทานอลและ น้ำผสมเอทานอล (1:1) ตามลำดับ และความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าสูงประมาณ 957.8, 1017 และ 1020 W/m² ตามลำดับซึ่งทั้งสามกรณีมีแนวโน้มไปทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีผลต่อค่าอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

4.2 ผลการทดลองของ CLOFHP

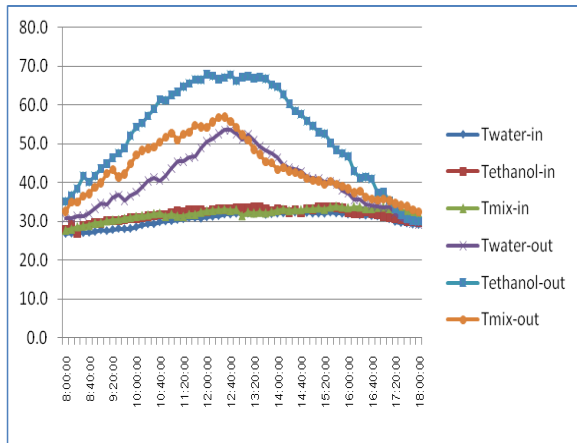
รูปที่ 9 แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวส่วนทำระเหยของ CLOFHP ของ T_{p1} ถึง T_{p9} จากรูปที่ 9 พบว่า ค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 13.30 น. แล้วเริ่มลดลงในช่วงเวลา 13.30 น. ถึง 18.00 น. และ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวส่วนทำระเหยของ CLOFHP กับเวลา

ในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวส่วนทำระเหย สำหรับสารทำงานชนิด น้ำ เอทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1) มีค่าสูงประมาณ 94.1, 79.2 และ 85.8 °C ตามลำดับ

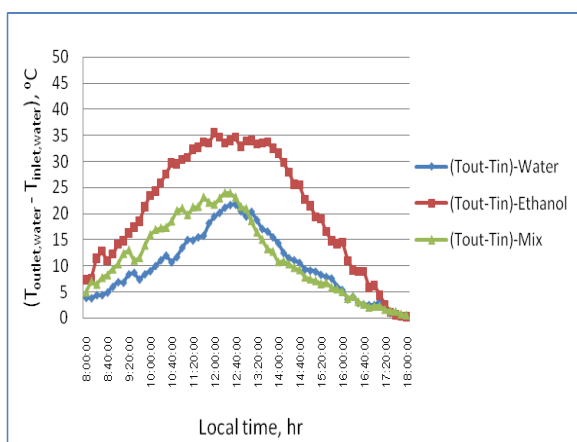
จากรูปที่ 10 แสดงค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นไหลเข้ารับความร้อนและไหลออกจาก CLOFHP ที่ส่วนควบแน่น ในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. มีค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นไหลส่วนควบแน่น สำหรับสารทำงานชนิด น้ำ เอทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของน้ำเย็นไหลเข้า และอุณหภูมิน้ำเย็นไหลออก CLOFHP กับเวลา

มีค่าสูงประมาณ 32.0, 33.2 และ 32.7 °C ตามลำดับ และค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นไหลออกที่ส่วนควบแน่นมีค่าสูงประมาณ 52.4, 67.8 และ 55.6 °C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิแตกต่างกันระหว่างน้ำเย็นไหลเข้าและไหลออกของกรณีใช้สารทำงานเป็นเอทานอล จะมีค่าสูงประมาณ 34.6 °C

รูปที่ 11 แสดงค่าอุณหภูมิแตกต่าง ΔT ของน้ำเย็นไหลเข้า -ออกที่ส่วนควบแน่น พบว่าในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ΔT สำหรับสารทำงานชนิด น้ำ เอทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1) มีค่าสูงประมาณ 20.4, 34.6 และ 22.9 °C ตามลำดับ

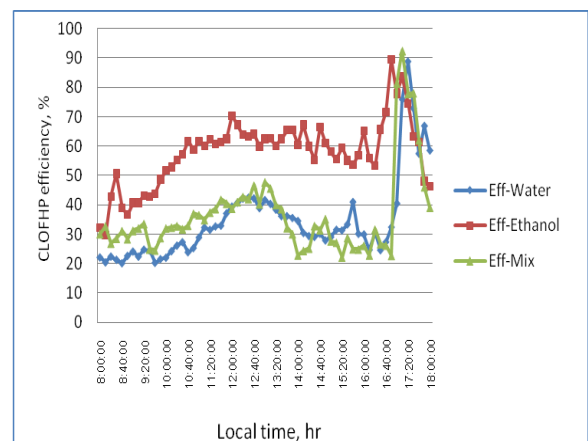


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำออกกับน้ำเข้าของ CLOFHP กับเวลา

4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ

ค่าประสิทธิภาพได้จากผลการวิเคราะห์ค่า นวน จากค่าอัตราความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำเย็นต่อค่า อัตราความร้อนที่ CLOFHP ได้รับจากพลังงาน แสงอาทิตย์ ดังสมการที่ (3) ซึ่งแสดงผลค่า ประสิทธิภาพเครื่องทำน้ำอุ่นดังรูปที่ 9

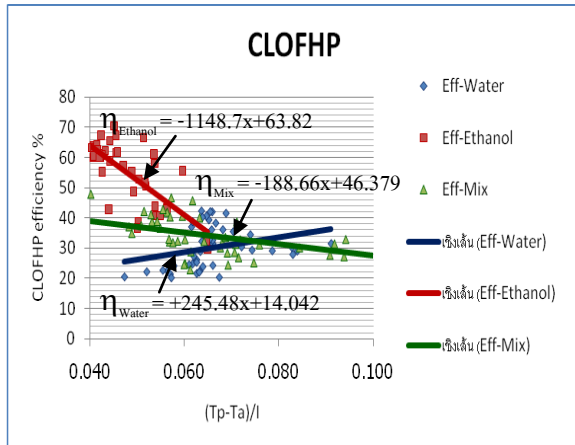
รูปที่ 12 แสดงค่าประสิทธิภาพของ CLOFHP พบว่าค่าประสิทธิภาพทั้ง 3 กรณีมีค่าเพิ่มขึ้น ใน ช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 13.30 น. และมีค่าประสิทธิภาพ ลดลงในช่วงเวลา 13.30 น. ถึง 16.30 น. และค่า เพิ่มขึ้นอีกในช่วงเวลา 16.30 น. ถึง 18.00 น. เนื่องมาจากค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นใน



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ค่าประสิทธิภาพของ CLOFHP กับเวลา

ช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 13.30 น.และเริ่มลดลงใน ช่วงเวลา 13.30 น. ถึง 18.00 น.แต่ในช่วงเวลา 16.30 น. ถึง 18.00 น. ค่าความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ลดลง อย่างรวดเร็วแต่ค่าอุณหภูมิของ CLOFHP ยังมีค่าสูง อยู่จึงทำให้ผลของค่าประสิทธิภาพมีค่าสูงมากกว่า ปกติ และค่าประสิทธิภาพ มีสูงในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. สำหรับสารทำงานชนิด น้ำ เอทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1) มีค่าสูงประมาณ 41.66, 61.29 และ 43.35% ตามลำดับ

รูปที่ 13 แสดงสมรรถนะตัวเก็บรังสีพลังงาน แสงอาทิตย์ได้จากผลการวิเคราะห์และคำนวณจากค่า ประสิทธิภาพของ CLOFHP เทียบกับค่า $(T_p - T_a)/I$ ดัง



รูปที่ 13 สมรรถนะของตัวเก็บรังสีแสงอาทิตย์ของ CLOFHP กับ $(T_{pm}-T_a)/I$

สมการที่ (5) พบว่า กรณีสำหรับชนิดสารทำงานเป็น น้ำ มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านและดูดกลืนรังสี แสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี ($F_R(T\alpha)$) มีค่าประมาณ 14.04 มีค่าการสูญเสีย ความความร้อน (F_{RU_L}) ประมาณ $+245.48 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ สำหรับชนิดสารทำงาน เป็น เอทานอล มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านและ ดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี ($F_R(T\alpha)$) มีค่า สูงประมาณ 63.82 มีค่าการสูญเสียความร้อน (F_{RU_L}) ประมาณ $-1148.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ สำหรับชนิดสาร ทำงานเป็น น้ำผสมเอทานอล (1:1) มีค่าประสิทธิภาพ การส่งผ่านและดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี ($F_R(T\alpha)$) มีค่าสูงประมาณ 46.38 มีค่าการสูญเสีย ความความร้อน (F_{RU_L}) ประมาณ $-188.66 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ดังนั้น CLOFHP สำหรับใช้เอทานอลมีค่า (F_{RU_L}) สูง แสดงว่าสารทำงานชนิดเอทานอลได้รับความร้อน และ เกิดการทำงานในระบบมากขึ้น และมีแนวโน้มสูงกว่า น้ำผสมเอทานอล (1:1) และน้ำ ตามลำดับ

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาเชิงการทดลอง เพื่อศึกษาผลของ สารทำงานต่อ ประสิทธิภาพ ทาง ความร้อนของ CLOFHP ที่ใช้สารทำงาน เป็น น้ำ เอทานอล และน้ำ ผสมเอทานอล (1:1) ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.0066 kg/s สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ค่าความเข้ม แสงอาทิตย์ อาทิตย์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ เวลา 08.00 น. ถึง 13.30 น. แล้วเริ่มลดลงตั้งแต่เวลา 13.30 น. ถึง 18.00 น. และในขณะทำการทดลอง ช่วงเวลา 11.30 น. ถึง 13.30 น. มีค่าความเข้มรังสี แสงอาทิตย์มีค่าสูงประมาณ 957.8, 1017 และ 1020 W/m^2 สำหรับสารทำงานชนิดน้ำ เอทานอลและ น้ำ ผสมเอทานอล (1:1) ตามลำดับและค่าอุณหภูมิอากาศ แวดล้อม (T_a) มีค่าสูงประมาณ 34.5, 36.7 และ $36.5 ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

2) ค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นไหลเข้า รับความร้อน และไหลออกจาก CLOFHP ที่ส่วนควบแน่น ในช่วง เวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. มีค่าอุณหภูมิของน้ำเย็น ไหลส่วนควบแน่น สำหรับสารทำงานชนิด น้ำ เอ ทานอล และน้ำผสมเอทานอล (1:1) มีค่าสูงประมาณ 32.0, 33.2 และ $32.7 ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ และสารทำงานที่ เติมในท่อความร้อนมีผลต่อค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นไหล ออกที่ส่วนควบแน่นมีค่าสูงประมาณ 52.4, 67.8 และ $55.6 ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า อุณหภูมิ แตกต่างระหว่างน้ำเย็นไหลเข้าและไหลออกของกรณี ใช้สารทำงานเป็น น้ำ เอทานอลและน้ำผสมเอทานอล (1:1) จะมีค่าสูงประมาณ 20.4, 34.6 และ $22.9 ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ

3) ค่าประสิทธิภาพของ CLOFHP ขึ้นอยู่กับสาร ทำงานที่เติมภายในท่อควา มร้อน สำหรับใช้สาร ทำงานเป็นเอทานอลมีค่าสูงกว่าสารทำงานที่ใช้เป็น น้ำผสมเอทานอล (1:1) และน้ำ ในช่วงเวลา 12.00 น. ถึง 13.30 น. มีค่าสูงประมาณ 61.29, 43.35, และ 41.66 % ตามลำดับ

4) ค่าสมรรถนะตัวเก็บรังสีพลังงานแสงอาทิตย์ จากผลการวิเคราะห์และคำนวณค่าประสิทธิภาพของ CLOFHP เทียบกับค่า $(T_p-T_a)/I$ ขึ้นอยู่กับสารทำงาน ที่เติมภายในท่อความร้อน สำหรับชนิดสารทำงานเป็น เอทานอล มีค่าประสิทธิภาพการส่งผ่านและดูดกลืน รังสีแสงอาทิตย์ของตัวเก็บรังสี ($F_R(T\alpha)$) มีค่า สูงประมาณ 63.82 มีค่าการสูญเสียความร้อน (F_{RU_L}) ประมาณ $-1148.7 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่า ค่าที่ใช้สารทำงานเป็น น้ำผสมเอทานอล (1:1) และ

น้ำ ตามลำดับ แสดงว่าสารทำงานชนิดเอทานอล ทำงานและถ่ายเทความร้อนได้ดีและมีแนวโน้มสูงกว่า สารทำงานชนิดน้ำผสมเอทานอล (1:1) และ น้ำ ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ที่ได้สนับสนุน เงินทุน อุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ เพื่อใช้ในการ ดำเนินการทดลองและ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วสันต์ ศรีเมือง ที่ได้ให้คำแนะนำงานวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Honghai Yang., Khandekar, S. and Groll, M. (2008). Operational limit of closed loop pulsating heat pipes, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 49-59.
- [2] Maezawa, S., Gi, K.Y., Minamisawa, A., Akachi., Thermal performance of capillary tube thermosyphon, in: Proceeding of the 9th International Heat Pipe Conference. Albuquerque, USA, vol. 2, 1996, pp. 791 – 795.
- [3] สุวรรณ วาวแวว, ดนัย หมั่นทรัพย์, ประชา ยืนยงกุล, ชัยณรงค์ พรหมศรี และ ประดิษฐ์ เทอดทูล (2547). การประยุกต์ใช้งานของท่อความร้อนแบบสันแบบวงรอบในการเพิ่มสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบชาร์จ , การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย , ครั้งที่ 18, ตุลาคม 2547, จังหวัดขอนแก่น, หน้า 18-20.
- [4] วสันต์ ปิ่นเต และ พัฒนพล มีนา (2555). ขีดจำกัด ของท่อความร้อนแบบสันวงรอบที่ติดตั้งวาล์วกันกลับ และผลของความยาวส่วนทำระเหย และ สารทำงานที่มีต่อการถ่ายเทความร้อน , การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย , ครั้งที่ 13, 4-5 เมษายน 2555, จังหวัดเชียงใหม่, ORS025.
- [5] Rittidech, S., Donmaung, A. and Kumsombut, K. (2009). Experimental study of the performance of a circular tube solar collector with closed-loop oscillating heat-pipe with check valve (CLOHP/CV), Renewable Energy, Vol. 34, pp. 2234-2238.
- [6] Honghai Yang, Sameer Khandeka and Manfred Groll. (2009). Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal Spreaders, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 815–824.
- [7] Hussein, H.M.S., El-Ghetany, H.H. and Nada, S.A. (2006). Performance of wickless heat pipe flat plate solar collectors having different pipe cross section geometries and filling ratios, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 1539-1549.
- [8] Amatachaya, P. and srimuang, W (1999). Comparative heat transfer characteristics of a flat two-phase closed thermosyphon (FTPCT) and a conventional two-phase closed thermosyphon (CTPCT), International communication in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 293-298.
- [9] ณัฐนี วรรณ, วิภาวดี วงษ์สุวรรณ และ ทนงเกียรติเกียรติศิริโรจน์ (2009). การพัฒนาระบบทำน้ำร้อนแสงอาทิตย์ในประเทศไทย , วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, Engng.J.CMU., Vol. 16(2), pp. 55-69.
- [10] Jorge Facão and Armando C. Oliveira. (2004). Analysis of a Plate Heat Pipe Solar Collector, International Conference on Sustainable Energy Technologies. Nottingham, UK, 28-30 June 2004.