



สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบนที่ใช้ผงคาร์บอนผสมน้ำเป็นสารทำงาน
Thermal Performance of Flat Two Phase Closed Thermosyphon Air preheater with carbon nanoparticles
mixed water as working fluid

วสันต์ ศรีเมือง^{*1} การิณย์ หอมชาติ¹, วิชัย กนกพิทยากร¹ และไพรัชต์ ดิฐคุณารักษ์กุล¹
^{*1}ห้องปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Email: wasan.sr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบน (FTPCT) ที่ใช้น้ำผสมผงคาร์บอนระดับอนุภาคนาโนเป็นสารทำงาน ท่อทองแดงมาตรฐานหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm ยาว 980 mm ถูกบีบในแม่พิมพ์เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดให้เป็นท่อหน้าตัดแบน ซึ่งมีค่าความแบนเป็น $y = 15$ mm การทดลองได้นำส่วนทำระเหยของ FTPCT จุ่มในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ $T_b = 80^\circ\text{C}$ ใช้อากาศอุณหภูมิห้องทดลอง ($29 \pm 1^\circ\text{C}$) และความเร็ว 1.0 m/s เพื่อระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่น ผลการทดลองพบว่าเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT นี้ สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศได้สูงถึง $\Delta T = 26.80^\circ\text{C}$ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) สูงสุดของ FTPCT คือ $370.22 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าในรายงานวิจัยของ Ong และคณะค่าความต้านทานความร้อนของ FTPCT ลดลง 43.43% เมื่อผสมผงคาร์บอนระดับอนุภาคนาโนเข้ากับน้ำซึ่งใช้เป็นสารทำงานค่าประสิทธิผลของ FTPCT กรณีใช้น้ำผสมผงคาร์บอนระดับอนุภาคนาโน, กรณีใช้น้ำ และกรณีไม่เติมสารทำงานมีค่าเป็น 0.73, 0.68 และ 0.19 ตามลำดับ

ความสำคัญ: ท่อความร้อน, อนุภาคนาโน, ประสิทธิภาพ, เครื่องอุ่นอากาศ

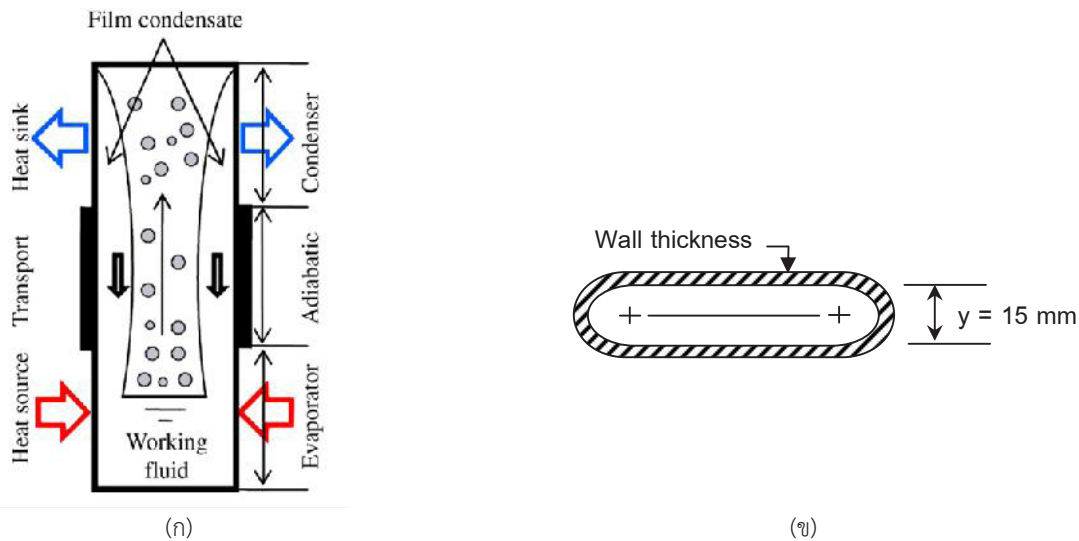
Abstract

This research presents thermal performance of flat two phase closed thermosyphon (FTPCT) air preheater with carbon nanoparticles-water mixture as working fluid. A circular standard copper tube with inside diameter of 25 mm and the length of 980 mm was reformed its cross sectional area for flattened tube, is $y = 15$ mm. The experiments were performed with the evaporator was immersed in hot water with $T_b = 80^\circ\text{C}$, and ambient air in the test room with temperature of $29 \pm 1^\circ\text{C}$ was used for cooling of the condenser with constant velocity of 1.0 m/s. The results indicated that the FTPCT air preheater can be warmed the air up to $\Delta T = 26.80^\circ\text{C}$. The maximum values of overall heat transfer coefficient (U) of the FTPCT air preheater was $370.22 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, which is lower than the value in research of Ong et al. The thermal resistance of FTPCT is reduced by added the carbon nanoparticles in liquid water that apply for working fluid around 43.43%. The effectiveness of the FTPCT with carbon nanoparticles-water, with water, and without working fluid were 0.73, 0.68 and 0.19, respectively.

Keyword: heat pipe, nanoparticles, effectiveness, air preheater

1. บทนำ

เทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบน (Flat Two Phase Closed Thermosyphon, FTPCT) หรือท่อความร้อนที่ไม่มีไส้ (Wickless heat pipe) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้สำหรับการระบายความร้อนจากอุปกรณ์ที่ต้องการระบายความร้อนหรือใช้กับระบบที่ต้องการให้มีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ FTPCT ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนทำระเหย (evaporator section) ส่วนกันความร้อน (adiabatic section) และส่วนควบแน่น (condenser section) FTPCT ทำงานโดยอาศัยหลักการดูดซับความร้อนจากแหล่งความร้อนสูงถ่ายเทเข้าสู่สารทำงานที่บรรจุภายในส่วนทำระเหย หากสารทำงานดังกล่าวได้รับความร้อนเพียงพอแล้วจะกลายเป็นไอ ซึ่งสารทำงานที่กลายเป็นไอนี้จะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน (ส่วนระบายความร้อน หรือส่วนควบแน่นผ่านส่วนกันความร้อน) จากนั้นสารทำงานที่เป็นไอจะถูกถ่ายเทความร้อนออกไปยังแหล่งความร้อนต่ำที่นำมาระบายความร้อน เช่น น้ำหรืออากาศ ใต้งกล่าวนี้ จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลตกลงมาสู่ส่วนทำระเหยเพื่อรับความร้อนอีกครั้ง



รูปที่ 1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ FTPCT [1]

(ก) การทำงานของเทอร์โมไซฟอน (ข) หน้าตัดของ FTPCT

ปัจจุบันประเทศไทยมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนไม่มากนักและผู้เขียนสังเกตพบว่าเทอร์โมไซฟอนมีขีดจำกัดในการทำงานเนื่องจากการไหลสวนทางระหว่างไอของสารทำงานที่พุ่งขึ้นไปเพื่อระบายความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่าขาดข้อมูลทางเทคนิค (technical data) ที่ใช้ในการออกแบบ (design) จึงทำให้มีนักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาเพื่อหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอนด้วยวิธีการต่างๆ มากมาย รวมทั้งพยายามนำเสนอข้อมูลทางเทคนิคเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้เขียนแบ่งการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็นสามประเด็นหลักๆ ดังนี้

ประเด็นแรกคือการนำผงโลหะที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนมาเป็นส่วนผสมกับสารทำงานที่เป็นของเหลวซึ่งรายละเอียดมีดังนี้ Paisarn และคณะ [2] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของท่อความร้อนโดยใช้ของผสมระหว่างผงไทเทเนียมอนุภาคนาโนผสมกับสารทำความเย็น 11 (Titanium nanoparticles-R11) เป็นสารทำงาน โดยอนุภาคนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 nm ผสมกับ R11 ด้วยเครื่อง Ultrasonic homogenizer สิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัยนี้คือ การใช้สารทำงานที่เป็นของผสมระหว่างผงไทเทเนียมอนุภาคนาโนผสมกับสารทำความเย็น 11 นั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับท่อความร้อนได้มากกว่าการใช้ R11 อย่างเดียวถึง 1.4 เท่า งานวิจัยในลักษณะเดียวกัน Guo และคณะ [3] ศึกษาเชิงทดลองคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อความร้อนขนาดเล็กโดยใช้ของผสมระหว่างผงทองแดงออกไซด์อนุภาคนาโนกับน้ำ (copper oxide nanoparticles-water) เป็นสารทำงาน ซึ่งเติมสารทำงาน 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย จากการทดลองของ [3] มีประเด็นที่น่าสนใจคือ การใช้ของผสมระหว่างผงทองแดงออกไซด์อนุภาคนาโนกับน้ำเป็นสารทำงานให้ค่าความต้านทานความร้อน (R) มีค่าต่ำกว่าการใช้น้ำอย่างเดียวเป็นสารทำงาน ซึ่งนั่นหมายความว่า สารทำงานที่เป็นของผสมระหว่างผงทองแดงออกไซด์อนุภาคนาโนกับน้ำเป็นผลให้ความร้อนสามารถถ่ายโอนเข้าและออกจากท่อความร้อนได้มากกว่าการใช้น้ำ Parametthanuwat และคณะ [4] ได้ทำการทดลองเพื่อสร้างสมการสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดกลม (Conventional Two Phase Closed Thermosyphon, CTPCT) ที่ใช้ของผสมระหว่างผงเงินอนุภาคนาโนกับน้ำ (silver nanoparticles-water) เป็นสารทำงาน ความน่าสนใจงานวิจัยนี้คือ คุณสมบัติของสารทำงานนั้นมีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนของ FTPCT และอีกงานวิจัยหนึ่งที่น่าสนใจ คืองานวิจัยของ Zhen และคณะ [5] ซึ่งได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนของท่อความร้อนแบบ vapor chamber ซึ่งภายในท่อความร้อนถูกทำเป็นร่อง (groove) และใช้ของผสมระหว่างผงทองแดงอนุภาคนาโนผสมกับน้ำกลั่นเป็นสารทำงาน โดยใช้ผงทองแดงอนุภาคนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 และ 20 nm ปริมาณความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคนาโนเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.2 wt% ผลการทดลองที่สำคัญพบว่า การใช้ผงทองแดงอนุภาคนาโนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 nm และมีปริมาณความเข้มข้นของจำนวนอนุภาคนาโนเท่ากับ 1.0wt% นั้น มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) สูงสุด

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเด็นที่สองคือ การศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของ FTPCT นั้น Srimuang และคณะ [6] ได้ศึกษาด้วยทดลองหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของ FTPCT ที่มีขนาดความแบน 2.6, 4.6 และ 6.6 mm โดยทำการเปรียบเทียบกับ CTPCT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.6 mm และใช้น้ำบริสุทธิ์, สารทำความเย็น 123 และเอทานอลเป็นสารทำงาน ซึ่งเติมสารทำงานในอัตราส่วน 20, 40, 60 และ 80% ของปริมาตรทั้งหมด จากการทดลองสรุปได้ว่าอัตราส่วนการเติมสารทำงานมีผลต่อฟลักซ์ความร้อน ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนสนที่สนเป็นผลให้ฟลักซ์ความร้อนลดลง รวมทั้งการเปลี่ยนชนิดของสารทำงานก็ส่งผลต่อฟลักซ์ความร้อนเช่นกัน กล่าวคือ โดยการใช้สารทำความเย็น 123 เป็นสารทำงาน

นั้นให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด และถ้าหากเปลี่ยนจากเอทานอลเป็นน้ำบริสุทธิ์จะให้ค่าฟลักซ์ความร้อนลดลง สิ่งที่สำคัญยังพบอีกว่า FTPCT ที่มีขนาดความแบน 4.6 mm ที่เดิมสารทำงาน 20% นั้น ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดเท่ากับ 32.5 kW/m^2 ซึ่งในขณะที่ค่าฟลักซ์ความร้อนของ CTPCT ที่อัตราการเติมสารทำงาน 60% ให้ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดเพียงแค่ 27.5 kW/m^2 เท่านั้น และงานวิจัยในลักษณะใกล้เคียงกันเสนอโดย Amatachaya และ Srimuang [1] ซึ่งได้ศึกษาคุณลักษณะทางความร้อนของ CTPCT เปรียบเทียบกับ FTPCT โดยที่ CTPCT ทำด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm ยาว 980 mm ซึ่ง FTPCT ทำจากท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน และบีบท่อในแม่พิมพ์ให้มีขนาดความแบน (y) แตกต่างกันสามระดับ กล่าวคือ y เท่ากับ 7, 13 และ 17 mm แล้วเติมสารทำงาน (น้ำ) ปริมาณ 30, 60 และ 90% ของปริมาตรส่วนทำระเหย ในการทดลองได้จ่ายฟลักซ์ความร้อนเข้าส่วนทำระเหย $6-18 \text{ kW/m}^2$ และใช้น้ำอุณหภูมิบรรยากาศปกติ ($26-29^\circ\text{C}$) เพื่อระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ 200 LPM ผลการทดลองมีประเด็นน่าสนใจคือ FTPCT ที่มี $y = 7 \text{ mm}$ มีการกระจายอุณหภูมิที่ผิวสูงที่สุดและมีค่าการถ่ายโอนความร้อนออกสูงกว่า CTPCT

ประเด็นที่สามการประยุกต์ต่อความร้อนเพื่อนำพลังงานเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Waste heat recovery) โดยเฉพาะในกรณีการนำความร้อนจากน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้ใหม่เพื่ออุ่นอากาศก่อนไหลเข้าห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำนั้นจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ได้ประโยชน์สองประการคือ ประการแรกทำให้ลดการใช้พลังงาน และประการที่สองทำให้ลดการปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบธรรมดา เช่น ท่อ-ครีบ (Fin and tube) หรือท่อ-ถัง (shell and tube) ถูกใช้เพื่อนำเอาความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 0.30-0.50) และยังจำเป็นต้องใช้เครื่องสูบลำดับสำหรับขับของไหลเพิ่มอีก ดังนั้นหากมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงมาแทนอุปกรณ์แลกเปลี่ยนแบบเดิม ก็จะส่งผลให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานให้สูงขึ้นได้ การประยุกต์ใช้ท่อความร้อนเพื่อนำเอาความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่นั้นมีนักวิจัยหลายท่านที่ให้ความสนใจ มีดังนี้ Noie S. H. and Majidian G. R. [7] ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT สำหรับห้องผ่าตัดในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง ชุดทดลองของเขาประกอบไปด้วยฮีตเตอร์ขนาด 1500 W และกำหนดความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT เท่ากับ 2.3 m/s จากงานวิจัยนี้เขาพบว่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.16 ซึ่งผู้เขียนเห็นว่ามีความค่อนข้างต่ำ ต่อมา Yang และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองนำเอาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT ไปประยุกต์ใช้สำหรับนำเอาความร้อนปล่อยทิ้งไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่สำหรับอุ่นอากาศในห้องผู้โดยสาร เขาได้ทำการทดลองโดยให้อุณหภูมิของไอเสียไหลผ่านส่วนทำระเหยอยู่ในช่วง $100-300^\circ\text{C}$ จากการศึกษาพบว่า CTPCT มีประสิทธิภาพ 0.28 จากนั้น Lukitubudi และคณะ [9] ได้ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT เพื่อนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียของปล่องควันมาใช้สำหรับการผลิตเบเกอร์ ซึ่งทำงานอยู่ในระดับอุณหภูมิปานกลาง (ต่ำกว่า 300°C) เขาได้ทดลองในสภาวะความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน CTPCT ระหว่าง $1.5-5 \text{ m/s}$ และความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยระหว่าง $4-20 \text{ kW}$ จากการทดลองของ [9] พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ระหว่าง 0.18-0.63 ต่อมา Habeebullah และคณะ [10] ได้เสนอรายงานวิจัยจากการนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยการใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CHP ในการทดลองของ [10] ได้กำหนดอุณหภูมิไอเสีย 300°C เพื่อไหลผ่านส่วนทำระเหยของ CHP จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าสามารถนำเอาความร้อนจากไอเสียมาใช้ใหม่ได้ 70-93% นอกจากนี้ Riffat and Gan [11] ได้รายงานวิจัยเกี่ยวกับสมรรถนะทางความร้อนของ CHP ต่างกันสามชนิดที่ใช้สำหรับการนำเอาความร้อนกลับมาใช้ใหม่ [11] ได้รายงานถึงความเร็วที่ไหลผ่าน CHP มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพ ซึ่งการเพิ่มความเร็วที่ไหลผ่าน CHP ทำให้ประสิทธิภาพลดลง และค่าประสิทธิภาพก็ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของครีบและการจัดเรียงของท่อความร้อนด้วย ต่อมา Noie [12] ได้ทำการตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศร้อนกับอากาศเย็น [12] ได้ทดลองในเงื่อนไขดังนี้ อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่านส่วนทำระเหยคือ $100-250^\circ\text{C}$ ในขณะที่ความร้อนที่จ่ายให้กับส่วนทำระเหยเท่ากับ $18-72 \text{ kW}$ และความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นเป็น $0.5-5.5 \text{ m/s}$ ผลการทดลองเขาพบว่า ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ CTPCT มีค่าเป็น 0.37-0.65

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT ที่ใช้น้ำผสมผงคาร์บอนระดับอนุภาคนาโนเป็นสารทำงานซึ่งเน้นการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์นำความร้อนที่เหลือทิ้งจากน้ำคอนเดนเสทกลับมาใช้เพื่ออุ่นอากาศป้อนเข้าห้องเผาไหม้ของเครื่องกำเนิดไอน้ำซึ่งผู้วิจัยคาดหวังว่าจะเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพการนำเอาความร้อนที่เหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ให้ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการลดสภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วยรวมทั้งเพิ่มข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้งาน FTPCT สำหรับอุ่นอากาศด้วย

2. ทฤษฎี

2.1 ฟลักซ์ความร้อนถ่ายเทออกจาก FTPCT

บริเวณภายนอกท่อของส่วนควบแน่นของ FTPCT ถูกสวมด้วยกระเปาะอากาศระบายความร้อน (cooling jacket) และภายนอกกระเปาะอากาศนี้ถูกหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสีย อากาศอุณหภูมิห้องทดลองถูกบังคับให้ไหลภายในกระเปาะอากาศโดยใช้พัดลม (หรือกล่าวได้ว่า

อากาศนี้ไหลสัมผัสผิวด้านนอกของส่วนควบแน่น) ดังนั้นสารทำงานภายในส่วนควบแน่นของFTPCTซึ่งลอยมาจากส่วนทำระเหย จะเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศดังกล่าว จากนั้นสารทำงานที่เป็นไอจึงเกิดการกลั่นตัวที่บริเวณส่วนควบแน่น ฟลักซ์ความร้อน (q_{out}) ที่อากาศได้รับหรือสารทำงานถ่ายเทออก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q_{out} = \frac{\dot{m}C_p (T_{air,out} - T_{air,in})}{A_c} \quad (1)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศระบายความร้อน (kg/s), C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($J/kg^\circ C$), $T_{air,in}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าของส่วนควบแน่น ($^\circ C$) $T_{air,out}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกของส่วนควบแน่น ($^\circ C$) และ A_c คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนส่วนควบแน่น (m^2)

2.2 ความต้านทานความร้อนรวม (R_t)

ความต้านทานความร้อนรวม (R_t) เป็นค่าต้านทานการถ่ายเทความร้อนระหว่างแหล่งจ่ายความร้อนและแหล่งรับความร้อน ถ้าค่า R_t มาก แสดงว่า การถ่ายเทความร้อนภายใน FTPCT ไม่ดี หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า มีความต้านทานความร้อนสูง ในทางกลับกัน หากค่า R_t ต่ำ หมายถึง ความร้อนเกิดการถ่ายเทจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นได้ดี ดังนั้นการปรับปรุงลักษณะต่างๆ ของ FTPCT แล้วส่งผลให้ FTPCT มีค่า R_t ต่ำนั้น เป็นสิ่งที่นักวิจัยหลายท่านต้องการในกรณีนี้ นำ FTPCT มาใช้ถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำร้อนไปยังอากาศเย็น ค่า R_t คำนวณได้จากสมการ

$$R_t = \frac{T_{e,av} - T_{c,av}}{q_{out}} \quad (2)$$

เมื่อ $T_{e,av}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผิวนอกท่อส่วนทำระเหย ($^\circ C$), $T_{c,av}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยผิวนอกท่อส่วนควบแน่น ($^\circ C$) และ q_{out} คือ ฟลักซ์ความร้อนถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่น (kW/m^2)

2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

Ong และ Alalhi [13] นำเสนอสมการสำหรับคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของCTPCT ที่ใช้โอนถ่ายความร้อนจากน้ำร้อนไปยังน้ำเย็นอุณหภูมิห้องทดลองซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นท่อความร้อนเป็นแบบFTPCT ที่ถูกใช้เพื่อทำหน้าที่เป็นเครื่องอุ่นอากาศที่รับความร้อนเหลือทิ้งจากน้ำร้อนคอนเดนเสท (น้ำร้อน) ดังนั้นชุดทดลองจึงถูกออกแบบให้FTPCTระบายความร้อนออกจากส่วนควบแน่นด้วยอากาศอุณหภูมิห้องทดลอง แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบสมการที่ใช้ในการคำนวณหา U สำหรับ FTPCT ดังนั้นในงานวิจัยนี้ยังคงใช้สมการเช่นเดียวกับสมการของ [13] ดังนี้

$$U = \frac{q_{out}}{(T_b - T_c)} \quad (3)$$

เมื่อ q_{out} คือ ฟลักซ์ความร้อนออกถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่นของอุ่นอากาศ (kW/m^2), U คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($kW/m^2^\circ C$), T_b คืออุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำร้อน ($^\circ C$), T_c คืออุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ส่วนควบแน่น ($^\circ C$) โดยหาได้จากสมการ $T_c = (T_{air,out} - T_{air,in}) / 2$ เมื่อ $T_{c,in}$ และ $T_{c,out}$ คืออุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าและออกจากระบายความร้อน ($^\circ C$) ของส่วนควบแน่น ($^\circ C$) ตามลำดับ

2.4 ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT

ประสิทธิภาพของเครื่องอุ่นอากาศหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทได้จริงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นได้ ในกรณีที่ FTPCT ทำงานระหว่างน้ำร้อนอุณหภูมิคงที่กับอากาศอุณหภูมิห้องนั้น ยังไม่มีสมการที่แน่ชัดที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีงานวิจัยนี้งานวิจัยก่อนหน้านี้ Azad และ Geoola [14] ได้นำเสนอสมการสำหรับหาประสิทธิภาพที่ส่วนทำระเหยของ CTPCT กรณีจำนวนชั้นของเครื่องอุ่นอากาศเท่ากับ 1 ชั้น (หรือท่อเดียว) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้สมการของ [14] มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งสมการเป็นดังนี้

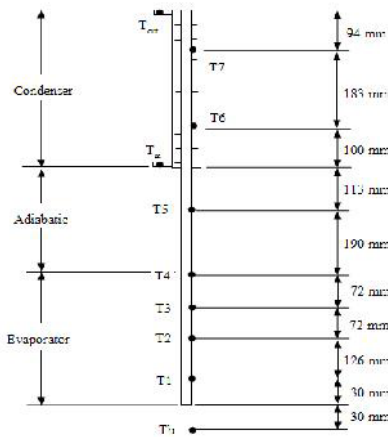
$$\mathcal{E}_1 = 1 - \exp(-NTU) \quad (4)$$

เมื่อ \mathcal{E}_1 คือประสิทธิภาพที่ส่วนทำระเหย, $NTU = UA / \dot{m}C_p$, U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2^\circ C$), A คือพื้นที่ของท่อความร้อนที่ส่วนระเหย (m^2), \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศไหลผ่านส่วนควบแน่น (kg/s) และ C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ($kJ/kg^\circ C$)

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

3.1 ท่อความร้อนแบบ FTPCT

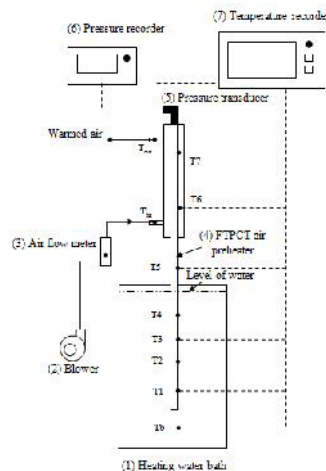
ผู้ทำวิจัยได้สร้างเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT โดยที่ทำจากท่อทองแดงมาตรฐานหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 mm ยาวทั้งหมด 980 mm ในความยาวดังกล่าวถูกจัดแบ่งเป็นส่วนทำระเหย $L_e = 300$ mm ส่วนกันความร้อน $L_a = 300$ mm ส่วนควบแน่น $L_c = 380$ mm ท่อดังกล่าวถูกบีบในแม่พิมพ์เพื่อลดพื้นที่หน้าตัดให้เป็นท่อหน้าตัดแบน ซึ่งมีค่าความแบนเป็น $y = 15$ mm บริเวณผิวนอกท่อของส่วนควบแน่นได้ตัดคريبแบบวงแหวนหนา 1 mm จากนั้นสร้างกระเปาะสำหรับให้อากาศระบายความร้อนไหลผ่านส่วนควบแน่น ทำสุญญากาศก่อนเติมสารทำงาน ติดสายเทอร์โมคัปเปิ้ลจุดต่างๆ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ

3.2 ชุดทดสอบและอุปกรณ์

ท่อความร้อนแบบ FTPCT ทำงานระหว่างน้ำร้อนซึ่งเป็นแหล่งจ่ายความร้อน และอากาศเย็นในห้องทดลองซึ่งเป็นแหล่งรับความร้อน ชุดทดสอบสมรรถนะของ FTPCT แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรชุดทดสอบสมรรถนะของ FTPCT

ในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วย 1. อ่างทำน้ำร้อน (Heating water bath), 2. พัดลมเป่าอากาศ (Blower) 3. เครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ (Air flow meter) 4. เครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT 5. เครื่องวัดภายใน FTPCT แบบทรานสดิวเซอร์ (Pressure transducer) 6. เครื่องบันทึกค่าความดัน (pressure recorder) และ 7. เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Temperature recorder) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DX200 ขนาด 24 ช่องสัญญาณ มีความแม่นยำ $\pm 0.1^\circ\text{C}$

3.3 การทดลอง

เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกจาก FTPCT จึงได้ทำการหุ้มฉนวนบริเวณภายนอกของส่วนกันความร้อนและกระเปาะระบายอากาศไว้เป็นอย่างดี การทดลองเริ่มต้นด้วยเปิดพัดลมระบายความร้อนโดยให้อากาศไหลผ่านกระเปาะระบายอากาศด้วยความเร็วคงที่ $V = 1.0$ m/s จากนั้นเปิด

สวิตช์อ่างน้ำร้อนและปรับตั้งอุณหภูมิน้ำร้อนให้คงที่ 80°C ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง ซึ่งแบ่งออกเป็นพารามิเตอร์ควบคุมและเปลี่ยนแปลง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ควบคุมและเปลี่ยนแปลง

พารามิเตอร์ควบคุม	<ul style="list-style-type: none"> • ความเร็วไหลอากาศเย็นระบายความร้อนส่วนควบแน่น $V=1.0$ m/s • อุณหภูมิของอากาศระบายความร้อนประมาณ $29 \pm 1^\circ\text{C}$ • อัตราการเติมสารทำงานเท่ากับ 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย • ปริมาณความเข้มข้นระหว่าง Carbon nanoparticles-water เท่ากับ 1w/v% • อุณหภูมิน้ำร้อนที่ส่วนทำระเหย $T_b = 80^\circ\text{C}$ • ครีบบางวงแหวนหนา 1 mm ติดผนังห้องด้านนอกส่วนควบแน่น
พารามิเตอร์เปลี่ยนแปลง	<ul style="list-style-type: none"> • ชนิดสารทำงาน (1) ไม่เติมสาร (2) น้ำ และ (3) Carbon nanoparticles-water

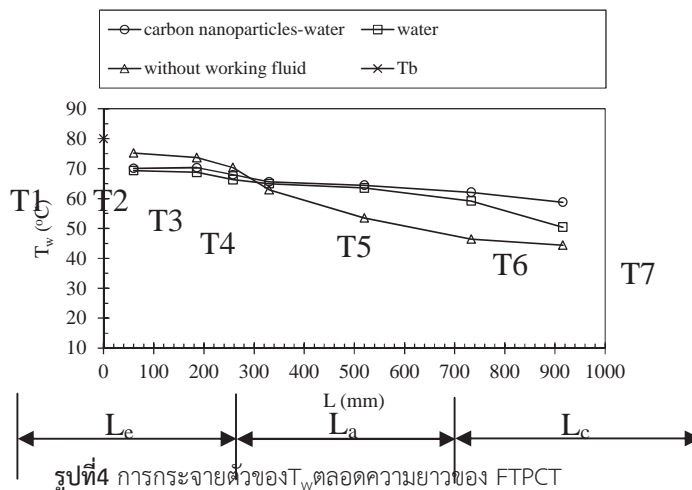
4. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากผลการทดลองหาสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT นั้น ผู้วิจัยได้แบ่งการนำเสนอผลการวิจัยออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้ (1) การกระจายอุณหภูมิตามผิว (T_w) ตลอดความยาวของ FTPCT, (2) ฟลักซ์ความร้อน (q_{out}) ออกจาก FTPCT, (3) ความต้านทานความร้อนรวม (R_t), (4) อุณหภูมิอากาศอุ่น (T_{out}) ที่ได้จากเครื่องอุ่นอากาศ (5) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) และ (6) ค่าประสิทธิภาพเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT

4.1 การกระจายอุณหภูมิตามผิว (T_w) ตลอดความยาวของ FTPCT

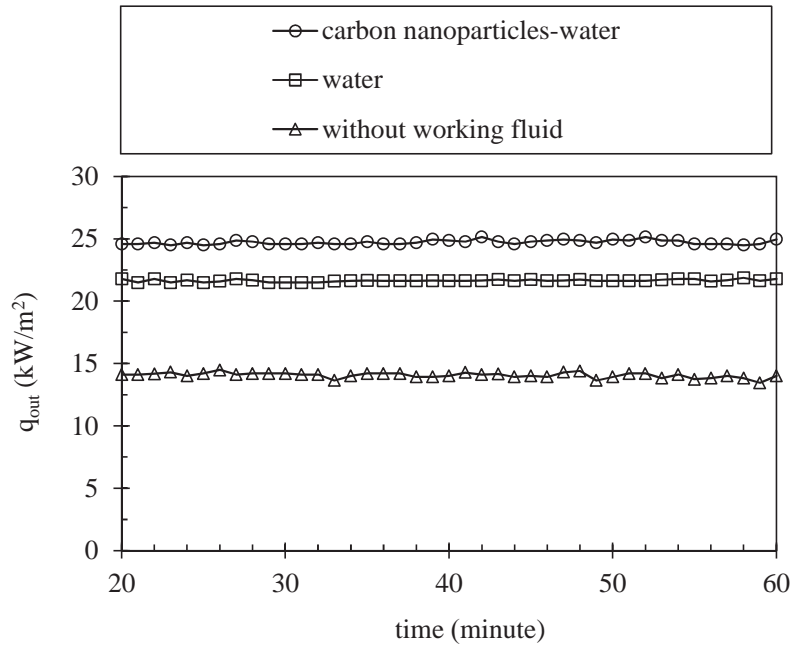
รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของ T_w ตลอดความยาวของ FTPCT จะเห็นว่าอุณหภูมิช่วงความยาวส่วนทำระเหยมีค่าค่อนข้างคงที่ ($T1-T4$) ซึ่งลดลงเล็กน้อย จากนั้นอุณหภูมิ ($T4-T7$) จะลดลงมากขึ้นเนื่องจากบริเวณนี้อยู่ใกล้กับทางเข้าของอากาศระบายความร้อน จากรูปที่ 4 พบว่าจุด $T7$ มีอุณหภูมิต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นบริเวณส่วนบนสุดของส่วนควบแน่น ซึ่งความร้อนส่วนมากจะถูกถ่ายเทผ่านผนังของ FTPCT ที่ส่วนควบแน่นออกไปให้กับอากาศระบายความร้อนบ้างแล้ว หากพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างกรณีเติม carbon nanoparticles-water กับเติมน้ำเป็นสารทำงานพบว่า ลักษณะการกระจายอุณหภูมิลักษณะคล้ายกันมากซึ่งกรณีเติม carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน มีค่าอุณหภูมิ T_w ของแต่ละจุดสูงกว่ากรณีเติมน้ำเพียงเล็กน้อย ลักษณะการกระจายตัวของ T_w ตลอดความยาวของ FTPCT กรณีไม่เติมสารทำงานนั้นพบว่ามีความชันมากที่สุด ค่าความแตกต่างระหว่าง $T1$ กับ $T7$ ในกรณีเติม carbon nanoparticles-water, เติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงานมีค่าต่างกันเป็น 11.31°C , 18.90°C และ 30.78°C ตามลำดับ

เมื่อนำผลการทดลองจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Ong และ Alalhi [13] พบว่าค่าการกระจาย T_w จากงานวิจัยนี้มีลักษณะคล้ายกัน ถึงแม้เงื่อนไขในการทดลองจะแตกต่างกันก็ตาม



4.2 ฟลักซ์ความร้อน (q_{out}) ออกจาก FTPCT

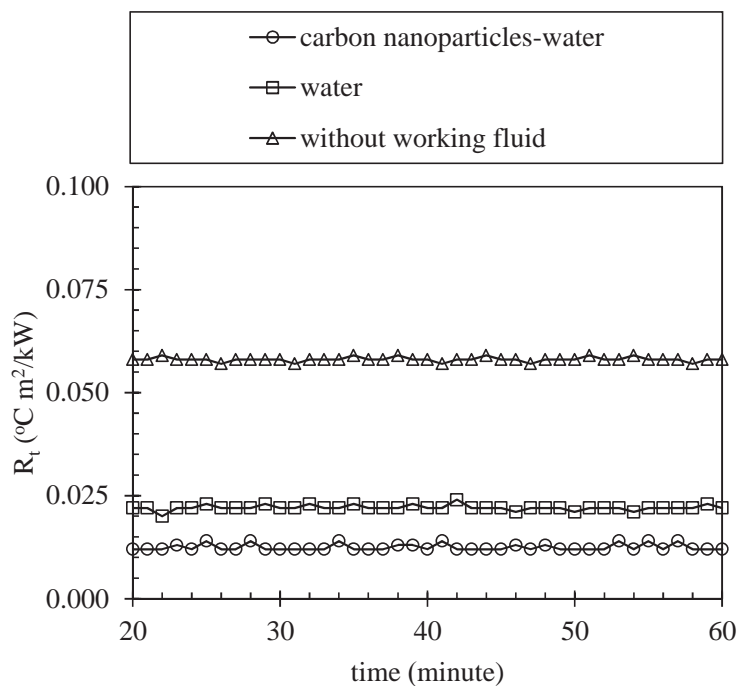
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เช่น ค่าของอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ระบายความร้อนที่ไหลเข้าส่วนควบแน่น (T_{in}) และออกจากส่วนควบแน่น (T_{out}) และพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของส่วนควบแน่นสามารถนำมาคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อน (q_{out}) ที่ถ่ายเทออกจาก FTPCT ได้โดยใช้สมการ (1) การเปลี่ยนแปลง q_{out} กรณีใช้สารทำงานต่างชนิดกันแสดงดังรูปที่ 5 ผลการทดลองพบว่า กรณีเติม carbon nanoparticles-water, เติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน นั้นให้ค่า q_{out} เฉลี่ยเป็น 24.72 kW/m^2 , 21.63 kW/m^2 และ 14.03 kW/m^2 ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลง q_{out} กรณีใช้สารทำงานต่างชนิดกัน

4.3 ความต้านทานความร้อนรวม (R_t)

ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากส่วนควบแน่น, อุณหภูมิเฉลี่ยส่วนทำระเหย และอุณหภูมิส่วนควบแน่น ถูกนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_t) ของ FTPCT รูปที่ 6 แสดงค่า R_t ในกรณีเติมสารทำงานต่างชนิดกัน ซึ่งพบว่ากรณีเติม carbon nanoparticles-water, เติมน้ำ, และไม่เติมสารทำงาน มีค่า R_t เป็น 0.012, 0.022 และ $0.058 \text{ } ^\circ\text{C m}^2/\text{kW}$ ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่า การใช้ผงคาร์บอนผสมในน้ำที่เป็นสารทำงานใน FTPCT นั้น ให้ค่า R_t ลดต่ำกว่ากรณีใช้น้ำอย่างเดียวเท่ากับ 43.43%



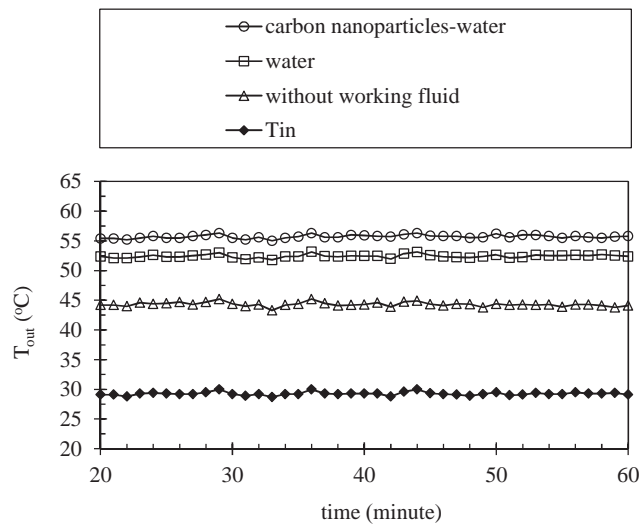
รูปที่ 6 ความต้านทานความร้อนรวม (R_t)

4.4 อุณหภูมิอากาศอุ่น (T_{out}) ที่ได้จากเครื่องอุ่นอากาศ

รูปที่ 7 แสดงอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากเครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT กรณีที่เติม carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน ซึ่งพบว่าอากาศอุณหภูมิ $29 \pm 1^{\circ}\text{C}$ สามารถเพิ่มเป็น 56.80, 53.63 และ 45.10°C ตามลำดับ หรือกล่าวได้ว่าเครื่องอุ่นอากาศนี้ทำให้อากาศอุณหภูมิห้องทดลองเพิ่มขึ้นประมาณ 26.80, 23.63 และ 15.10°C ตามลำดับ

อุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะมีผลอย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ เนื่องจากการอุ่นอากาศโดยใช้ความร้อนเหลือทิ้งซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิ 26.80°C ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นค่าที่ค่อนข้างสูงมาก โดยจะส่งผลต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้น ซึ่งการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นนั้นจะส่งผลต่อการปล่อยมลภาวะออกสู่สิ่งแวดล้อม และเป็นที่รู้จักกันดีว่าการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ

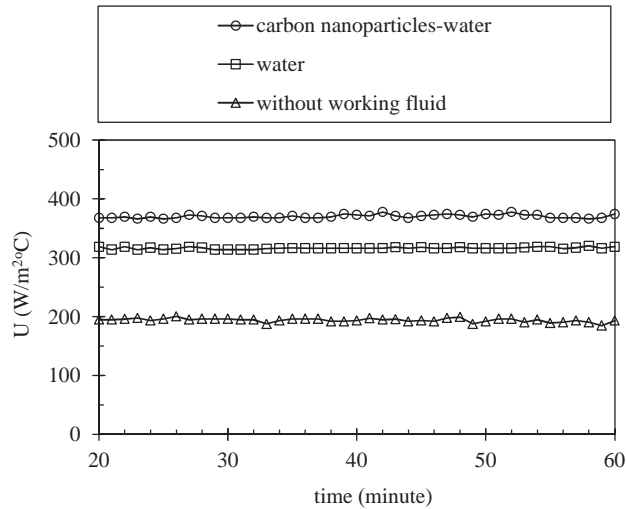
แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่ได้เก็บข้อมูลของควันไอเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นควรทำวิจัยเพิ่มในประเด็นนี้เพื่อให้ผลที่ได้ชัดเจนว่าเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้นมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 7 อุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นที่เครื่องอุ่นอากาศสามารถทำได้

4.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

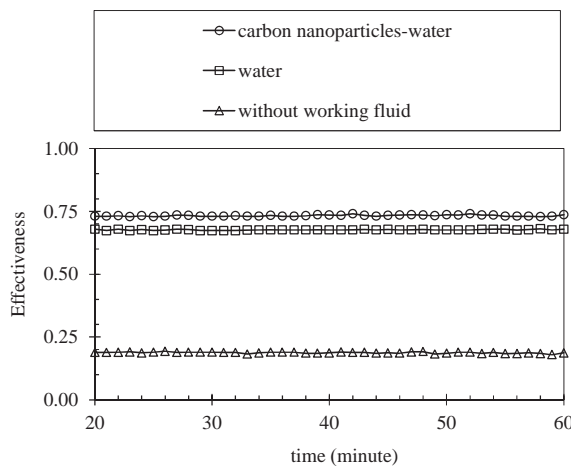
รูปที่ 8 แสดงสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) กรณีใช้สารทำงานต่างชนิดกัน ซึ่งค่า U คำนวณจากสมการ (3) ผลการทดลองพบว่า FTPCT กรณีไม่เติมสารทำงาน, กรณีใช้น้ำ และกรณีใช้ carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน มีค่า U เป็น 193.69, 316.67 และ $370.22 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และถ้าพิจารณากรณีเติมผงคาร์บอนลงในน้ำที่ใช้เป็นสารทำงาน พบว่าค่า U เพิ่มขึ้นจากกรณีเติมน้ำอย่างเดียวเป็นประมาณ 14.60% ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากผงคาร์บอนมีคุณสมบัติในการนำความร้อนสูง ซึ่งผงคาร์บอนผสมในน้ำที่ใช้เป็นสารทำงานมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงภายใน FTPCT ดังนั้นเป็นผลให้สารทำงานสามารถรับและคายความร้อนได้เพิ่มขึ้น อีกเหตุผล ถ้าหากพิจารณามวลของผงคาร์บอนและมวลของน้ำแล้วซึ่งมวลของผงคาร์บอนมีน้ำหนักมากกว่าและจะสะท้อนความจริงง่ายกว่า ผงคาร์บอนจะตกจากส่วนควบแน่นมาสู่ส่วนทำระเหยได้เร็วกว่าน้ำ



รูปที่ 8 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

4.6 ค่าประสิทธิภาพเครื่องอุณหอากาศแบบ FTPCT

ในงานวิจัยนี้ได้นำสมการของ Azad และ Geoola [14] มาใช้สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพของเครื่องอุณหอากาศ โดยในสมการ (4) จะต้องใช้ค่า NTU ซึ่งผู้วิจัยได้นำสมการที่ใช้หาค่า U จากงานวิจัยของ Ong และ Alalhi [13] รูปที่ 9 แสดงค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุณหอากาศแบบ FTPCT ซึ่งพบว่ากรณีเติม carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน มีค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 0.73 ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีเติมน้ำเป็นสารทำงานประมาณ 8.39%



รูปที่ 9 แสดงค่าประสิทธิภาพของเครื่องอุณหอากาศแบบ FTPCT

5. สรุปผล

จากการศึกษาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุณหอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนหน้าตัดแบน (FTPCT) ที่ทำงานระหว่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C และอากาศอุณหภูมิห้อง 29 ± 1°C ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านส่วนควบแน่น 1 m/s โดยทำการทดลองในกรณีเติม carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ และ กรณีไม่เติมสารทำงานสามารถสรุปได้ดังนี้

- กรณีไม่เติมสารทำงาน, เติมน้ำ และเติม carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน มีค่าการกระจายอุณหภูมิ T_w ต่างกัน ซึ่งกรณีเติมน้ำ และเติม carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน มีลักษณะการกระจายอุณหภูมิลำดับกันมาก โดยที่การเติม carbon nanoparticles-water มีความชันต่ำกว่ากรณีเติมน้ำ
- พลั๊กการถ่ายเทความร้อนที่ส่วนควบแน่น กรณีเติม carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน มีค่า q_{out} เฉลี่ยเท่ากับ 24.72 kW/m², 21.63 kW/m² และ 14.03 kW/m² ตามลำดับ
- กรณีที่เติม carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน มีค่าความต้านทานความร้อนรวม (R_p) เป็น 0.012, 0.022 และ 0.058 °Cm²/kW ตามลำดับ



- เครื่องอากาศแบบ FTPCT กรณีที่เติม carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน สามารถอุ่นอากาศ จากอุณหภูมิห้อง $29 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็น 26.80, 23.63 และ 15.10°C ตามลำดับ
- FTPCT กรณีใช้ carbon nanoparticles-water, กรณีเติมน้ำ, และกรณีไม่เติมสารทำงาน มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) เป็น 370.22, 316.67 และ $193.69\text{W/m}^2\text{C}$ ตามลำดับ
- เครื่องอุ่นอากาศแบบ FTPCT มีค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 0.73 โดยการใช้ carbon nanoparticles-water เป็นสารทำงาน ให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีเติมน้ำเท่ากับ 8.39%

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Amatachaya, P. and Srimuang, W., Comparative heat transfer characteristics of a flat two-phase closed thermosyphon (FTPCT) and a conventional two-phase closed thermosyphon (CTPCT). International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(2010), 293-98.
- [2] Paisarn, N., Dithapong, T., and Pichai, A. Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures. Energy Conversion and Management, 50(2009), 772-76.
- [3] Guo, S. W., Bin, S., and Zhen, H. L., Operation characteristics of cylindrical miniature grooved heat pipe using aqueous CuO nanofluids. Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (2010), 1415-1421.
- [4] Parametthanuwat, T., Rittidech, S., and Pattiya, A., A correlation to predict heat-transfer rates of a two-phase closed thermosyphon (TPCT) using silver nanofluid at normal operating conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(2010), 4960-65.
- [5] Zhen, H. L., Yuan, Y. L., and Ran, B., Composite effect of nanoparticle parameter on thermal performance of cylindrical micro-grooved heat pipe using nanofluids. International Journal of Thermal Sciences, 50 (2011), 558-68.
- [6] Srimuang, W., Rittidech, S., and Bubphachot, B., Heat transfer characteristics of a vertical flat thermosyphon (VFT). Journal of Mechanical Science and Technology, 23(2010), 2548-54.
- [7] Noie, S. H. and Majidian, G. R., Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for surgery room in hospitals, Applied Thermal Engineering, 20 (14), (2000), 1271-82.
- [8] Yang, F., Yuan, X. and Lin, G., Waste heat recovery using heat pipe heat exchanger for heating automobile using exhaust gas, Applied Thermal Engineering, 23 (2003), 367-72.
- [9] Lukitobudi, A. R., Akbarzadeh, A., Johnson, A. W., and Hendy P., Design, construction and testing of a thermosyphon heat exchanger for medium temperature heat recovery in bakeries, Heat Recovery Systems, 15 (5) (1995), 481-91.
- [10] Habeebullah, M. H., Akyurt, M., Najjar, Y. S. H. and El-Kalay, A. K., Experimental performance of a waste heat recovery and utilization system with a looped water in steel heat pipe, Applied Thermal Engineering, 18 (1998), 595-07.
- [11] Riffat, S. B. and Gan, G., Determination of effectiveness of heat-pipe heat recovery for naturally-ventilated buildings, Applied Thermal Engineering, 18 (1998), 121-30.
- [12] Noie, S. H., Investigated the thermal performance of an air to air thermosyphon heat exchanger, Applied Thermal Engineering, 26 (2006), 559-67.
- [13] Ong, K. S. and Alalhi, Md. H. E. Performance of a R-134a-filled thermosyphon. Applied Thermal Engineering, 23 (2003), 2373-2381.
- [14] Azad, E. and Geoola, F. A design procedure for gravity assisted heat pipe heat exchanger. Heat Recovery System, 2 (1984), 101-11.