

<http://journal.rmutp.ac.th/>

ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่าย

สลิตพงศ์ เส็งี่ยมศักดิ์^{1*} สุพัตรา บุไธสง² และ สัมพันธ์ ฤทธิเดช³

^{1,2} คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

^{1,2} 62/1 ถนนเกษตรสมบูรณ์ ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอเมืองกาฬสินธุ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³ ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

รับบทความ 3 พฤษภาคม 2561; ตอรับบทความ 10 สิงหาคม 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อท่อความร้อน ซึ่งเป็นการศึกษาคุณลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่าย ซึ่งท่อความร้อนทำจากท่อทองแดง มีตัวแปรคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 10 และ 12 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ซึ่งมีวัสดุพูนชนิดตาข่ายติดตั้งภายในท่อ สารทำงานที่บรรจุภายในท่อความร้อน คือ น้ำกลั่น เอทานอล และ สารทำความเย็น-11 (R-11) มีอัตราการเติมสารทำงานร้อยละ 50 ของส่วนทึ่ระเหย และมีการกำหนดอุณหภูมิในส่วนทึ่ระเหยไว้ที่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส โดยในส่วนควบแน่นได้รับการระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำรับความร้อน 0.5 ลิตรต่อนาที และตัวแปรทั้งหมดจะทำการเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายพบว่า ท่อความร้อนขนาด 12 มิลลิเมตร ให้การถ่ายโอนความร้อนดีที่สุดที่ 73.3 วัตต์ เมื่อใช้สารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทึ่ระเหย 90 องศาเซลเซียส และให้ประสิทธิภาพของท่อความร้อน ร้อยละ 58.2 เมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่าย ทั้งนี้พบว่า เนื่องจากวัสดุพูนจะช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนทึ่ระเหย เพื่อมารับความร้อนและช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน เป็นผลให้สารทำงานที่ควบแน่นกลับสู่ส่วนทึ่ระเหยได้ดี และส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น

คำสำคัญ : ท่อความร้อน; วัสดุพูนชนิดตาข่าย; การถ่ายโอนความร้อน

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร: +668 7970 0797, ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์: satitpong@live.com

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Study of parameters have effected to the heat pipe with mesh wick

Satitpong Sangiamsuk^{1*} Supattra Boothaisong² and Sampan Rittidech³

^{1,2} Faculty of Agro-Industrial, Kalasin University

^{1,2} 62/1 Kaset Sombun Road, Kalasin, Mueang, Kalasin, 46000

³ Faculty of Engineering, Mahasarakham University

³ Khamriang, Kantarawichai, Mahasarakham, 44150

Received 3 May 2018; Accepted 10 August 2018

Abstract

This research aims to study the parameters have affected the heat pipe which was studied the heat transfer characteristics of a heat pipe with a mesh wick. The heat pipe made from copper tubes with internal diameter (ID) as 10 and 12 mm and length of 30 cm which was installed a copper mesh wick inside a tube. Three working fluids are distilled water, ethanol and refrigerants-11 (R-11). The filling ratios is 50% with respect to evaporator volume. The operating temperature at the evaporator section is: 50, 70 and 90 °C. The condenser section has cooled by water with a flow rate of 0.5 L/min. Then, all of the experimental data were compared with the heat pipe without copper mesh wick. It was found that the heat pipe at ID 12 mm yielded a better heat transfer rate when compared with heat pipe without a mesh wick. The heat pipe produced a heat transfer rate value of 73.3 W and heat pipe efficiency of 58.2 at evaporator section's temperature of 90 °C. In addition, the mesh wicks will help transfer the working fluid in the condenser section return to the evaporator section. The condensed liquid had spread around the walls of the heat pipe. The working fluid was condensed to the evaporator section then affected to a higher heat transfer rate.

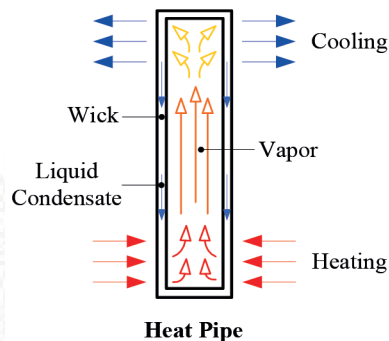
Keywords : Heat Pipe; Mesh Wick; Heat Transfer Rate

* Corresponding Author. Tel.: +668 7970 0797, E-mail Address: satitpong@live.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันเป็นยุคในการแข่งขันด้านเทคโนโลยีต่าง ๆ ซึ่งมีการนำทรัพยากรธรรมชาติมาใช้้อย่างมากมาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรม และชีวิตประจำวัน เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการผลิตเกือบทุกอุตสาหกรรมจะมีความร้อนทิ้ง หลายรูปแบบทั้งความร้อน และความเย็น ทั้งเป็นลมร้อน น้ำร้อน แล้วแต่กระบวนการผลิต หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน อย่างเช่น คอมพิวเตอร์ ซึ่งความร้อนเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานอีกได้ หรือที่เรียกว่า การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) ในการส่งถ่ายพลังงานความร้อนนั้นมีอุปกรณ์ถ่ายโอนความร้อนหลายประเภทที่รู้จักกันโดยทั่วไปก็คือ หอระบายความร้อน ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ต้องอาศัยอุปกรณ์อื่นช่วยเสริมในการทำงาน และมีอุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งซึ่งเรียกว่า ท่อความร้อน (Heat Pipe) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อย่างง่ายที่มีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ทั้งหมด โดยไม่มีการสูญเสีย อาศัยการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารที่บรรจุอยู่ภายในท่อ ซึ่งไม่ต้องอาศัยงานกลจากภายนอกให้กับท่อความร้อน แสดงดังรูปที่ 1 และถูกนำมาใช้ในการควบคุมความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ [1,2] เช่น การนำไปประยุกต์ใช้งานในการถ่ายโอนความร้อน ในอุตสาหกรรมการระบายความร้อนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การนำไปประยุกต์ใช้งานกับพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อใช้ในกระบวนการทำน้ำร้อน [3,4] นำไปใช้ด้านการประหยัดพลังงานในระบบปรับอากาศ [5] ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมทั่วไป [6] รวมถึงยังสามารถใช้เพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้ [7] โดยส่วนประกอบของท่อความร้อนจะเป็นท่อโลหะที่ปิดหัวท้ายภายในเป็นสุญญากาศที่มีสารทำงาน (Working Fluid) บรรจุอยู่ภายใน โดยปกติเป็นสารทำความเย็น

(Refrigerant) การทำงานของท่อความร้อนอาศัยหลักการเปลี่ยนสถานะจากการระเหยและควบแน่นร่วมกับแรงโน้มถ่วง สารทำงานเมื่อได้รับความร้อนจึงระเหยเป็นไอลอยขึ้นไปยังด้านที่สูงกว่าแล้วคายความร้อนออก ทำให้อุณหภูมิของสารทำงานมีอุณหภูมิลดลงถึงจุดควบแน่น กลายเป็นของเหลวตกลงสู่ด้านที่ต่ำกว่าอีกครั้ง ด้วยเหตุนี้จึงเรียกด้านที่อยู่ต่ำกว่าเป็นด้านระเหย (Evaporator Section) และเรียกด้านที่อยู่สูงกว่าเป็นด้านควบแน่น (Condenser Section) [8]



รูปที่ 1 ท่อความร้อน Heat Pipe

วัสดุพรุน (Wick) คือวัสดุที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างของรูพรุน ที่ทำเป็นช่องกลวงที่ติดต่อกันได้ เช่น ลวดตาข่าย สึกหลาด และผงอัด ซึ่งเรียกอย่างหนึ่งว่าเป็นวัสดุเนื้อเดียว มีความสำคัญที่ทำให้เกิดความดันยกตัว เพื่อทำให้เกิดการส่งถ่ายสารทำงานจากส่วนควบแน่นกลับมาบางส่วนทำระเหย ซึ่งช่วยในการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อน และส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อน และหากมีการนำสารทำงานประเภท Nano-fluid มาประยุกต์ใช้กับท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายจะยิ่งช่วยเพิ่มค่าการถ่ายโอนความร้อนขึ้น [9,10]

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงเลือกที่จะนำวัสดุพรุนชนิดตาข่ายไปติดตั้งภายในท่อความร้อน และทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อคุณลักษณะการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่าย เพื่อ

เป็นข้อมูลที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ และเป็นข้อมูลใช้ในการประยุกต์กับตัวแปรที่มีผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

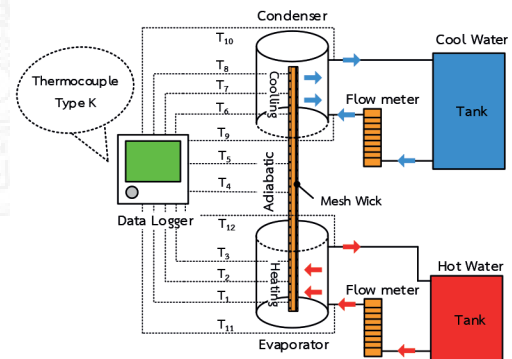
จากรูปที่ 2 แสดงแผนผังชุดทดลองท่อดำเนินการที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน และแสดงรูปการทดลองจริงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 3 ชุดท่อดำเนินการมีส่วนประกอบหลัก คือ ส่วนทำระเหย ซึ่งทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 และ 12 มิลลิเมตร ยาว 30 เซนติเมตร ประกอบด้วยส่วนทำระเหย (Evaporation Section) ส่วนกันความร้อน (Adiabatic Section) และส่วนควบแน่น (Condensation Section) มีความยาว 10 เซนติเมตร เท่าๆ กัน และภายในท่อดำเนินการมีวัสดุพูนชนิดตาข่ายบรรจุอยู่ ดังรูปที่ 4 โดยมีความหนาของวัสดุพูน 1 มิลลิเมตร โดยที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่นของท่อดำเนินการติดตั้งไว้ภายในกล่องน้ำร้อน น้ำเย็นภายในท่อดำเนินการบรรจุสารทำงานที่ร้อยละ 50 ของส่วนทำระเหย โดยในที่นี้ได้ใช้สารทำงานเป็น น้ำกลั่น เอทานอล และ R-11 รายละเอียดของท่อดำเนินการที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายภายในที่ใช้ในงาน วิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 1

ท่อดำเนินการได้รับความร้อนจากน้ำร้อนที่ถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ วั้ที่อุณหภูมิ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส ไปยังส่วนทำระเหย ซึ่งทำหน้าที่ในการรับความร้อน แล้วความร้อนจะถูกสารทำงานภายในท่อดำเนินการส่งถ่ายไปยังส่วนควบแน่น ในขณะที่ส่วนควบแน่นแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ไหลผ่านที่อัตราการไหล 0.5 ลิตรต่อนาที (Flowmeter, Treatton Z-3001) จากนั้นน้ำที่รับความร้อนจึงไหลไปยังถังเก็บ แล้วทำการวนกลับมารับความร้อนซ้ำที่ส่วนควบแน่น โดยถังเก็บห้ามฉนวนกันความร้อนไว้ เพื่อไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอุปกรณ์ในการทดลองที่ทำการ

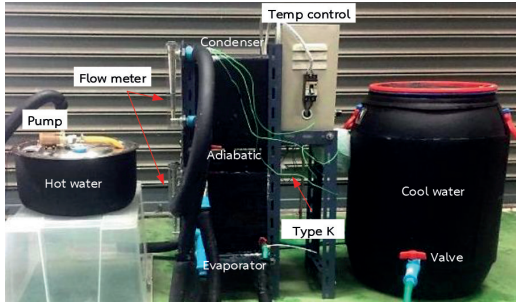
เก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองคือเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger, Zupcon MultiF R5000)

ตารางที่ 1 รายละเอียดของท่อดำเนินการที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน และเงื่อนไขการทดลอง

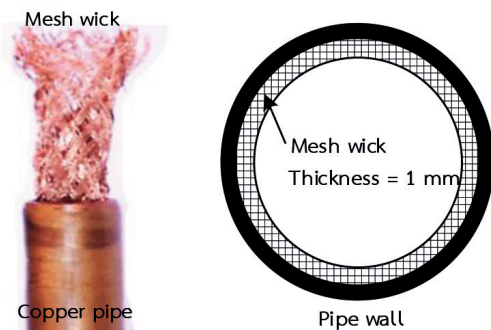
ท่อดำเนินการที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน	
วัสดุท่อ	ท่อทองแดง
วัสดุพูน	ตาข่ายทองแดง
ขนาดท่อ	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 และ 12 มิลลิเมตร
ความยาวท่อ	ส่วนทำระเหย 10 เซนติเมตร ส่วนกันความร้อน 10 เซนติเมตร ส่วนควบแน่น 10 เซนติเมตร
สารทำงาน	น้ำกลั่น เอทานอล และ R-11
ภายในท่อดำเนินการ	ติดตั้งวัสดุพูน และไม่ติดตั้ง
อุณหภูมิส่วนทำระเหย	50, 60 และ 90 องศาเซลเซียส
เงื่อนไขการทดลอง	
การเติมสารทำงาน	50% ของส่วนทำระเหย
อัตราการไหลของน้ำ	ส่วนควบแน่น คือ 0.5 ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิน้ำ	25 ± 2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 แผนผังชุดทดลองท่อดำเนินการที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน



รูปที่ 3 ภาพการติดตั้งการทดลองจริง



รูปที่ 4 วัสดุพรุนชนิดตาข่ายภายในท่อความร้อน

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเริ่มจากการเติมสารทำงานเข้าสู่ท่อความร้อนที่ทำให้เป็นสูญญากาศ ที่อัตราการเติมสารร้อยละ 50 ของส่วนทำระเหย ให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ แล้วก็ประกอบชุดท่อความร้อนเข้ากับกล่องน้ำร้อน-น้ำเย็น จากนั้นทำการติดตั้งเข้ากับแท่นชุดทดลอง โดยที่ส่วนควบแน่นจะมีอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow Meter, Treatton Z-3001) โดยที่ด้านน้ำเข้าจะทำการติดตั้งวาล์วปรับการไหลก่อนเข้าตัววัดอัตราการไหลไว้ และอีกด้านหนึ่งจะต่อสายยางที่หุ้มฉนวนกันความร้อนไปยังถังเก็บ โดยที่ตัวของถังเก็บจะติดตั้งปั๊มน้ำ เพื่อไหลเวียนน้ำในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในระบบ ในขณะที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้รับการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องด้วยสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และบันทึกด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data Logger, Zupcon MultiF R5000) โดยตำแหน่งในการตรวจวัดของท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพรุนภายในแสดงไว้

ดังรูปที่ 2 ที่ส่วนทำระเหยตำแหน่ง (T_1, T_2, T_3) ส่วนกันความร้อน (T_4, T_5) ส่วนควบแน่น (T_6, T_7, T_8) โดยในส่วนของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก ที่ส่วนทำระเหย (T_{11}, T_{12}) และที่ส่วนควบแน่น (T_9, T_{10})

ซึ่งตัวแปรในการทดลองกระทำที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้ (1) ท่อความร้อน 2 ชนิด ได้แก่ ท่อที่ติดตั้งวัสดุพรุน และไม่ติดตั้ง (2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 2 ขนาด ได้แก่ 10 และ 12 มิลลิเมตร (3) สารทำงานภายใน 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอล และ R-11 (4) อุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส ตามเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด สรุปไว้ดังตารางที่ 1

อัตราการเติมสารทำงานที่ร้อยละ 50 ของส่วนทำระเหยสามารถคำนวณได้จากสมการ (1)[11] และแสดงข้อมูลดังตารางที่ 2

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

โดยที่

ρ = ความหนาแน่นของสารทำงาน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

m = มวลของสารทำงาน (กิโลกรัม)

V = ปริมาตรร้อยละ 50 ของส่วนทำระเหย (ลูกบาศก์เมตร)

ตารางที่ 2 มวลของสารทำงานที่ร้อยละ 50 ของส่วนทำระเหย

สารทำงาน	ท่อขนาด 10 mm	ท่อขนาด 12 mm
น้ำกลั่น	3.93 กรัม	5.65 กรัม
เอทานอล	3.10 กรัม	4.46 กรัม
R-11	5.83 กรัม	8.39 กรัม

2.3 การคำนวณค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Rate)

โดยการหาค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อ

ความร้อนให้ความร้อนแก่ส่วนทำระเหย (Heat Sink) สารทำงานได้รับความร้อน และก่อตัวเป็นฟองไอ (Vapor Bubble) และแท่งของเหลว (Liquid Plug) แล้วเคลื่อนที่ขึ้นไปยังส่วนควบแน่น จากนั้นฟองไอ จะถ่ายโอนความร้อนให้กับแหล่งรับความร้อน หรือ ค่าความร้อนที่น้ำรับความร้อนที่ส่วนควบแน่น (Heat Source) โดยการวัดค่าอุณหภูมิที่แตกต่างบริเวณทาง เข้าและทางออกในส่วนควบแน่น ในการหาค่าการถ่าย โอนความร้อนนี้ ซึ่งเรียกว่า การถ่ายโอนความร้อน ที่ได้จากการทดลอง และสามารถคำนวณหาได้จาก สมการที่ (2) [11]

$$Q_{exp} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

โดยที่

Q_{exp} = ค่าการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)

\dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำในส่วน ควบแน่น (จุลต่อกิโลกรัม-เคลวิน)

T_{in} = อุณหภูมิขาเข้าของน้ำ (องศาเซลเซียส)

T_{out} = อุณหภูมิขาออกของน้ำ (องศาเซลเซียส)

และค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux) ที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนสามารถหาได้ จากสมการ (3) [11]

$$\dot{q} = \frac{Q_{exp}}{A_c} = \frac{Q_{exp}}{\pi d_o L_c} \quad (3)$$

โดยที่

\dot{q} = การถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (วัตต์ ต่อตารางเมตร)

A_c = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนควบแน่น (ตารางเมตร)

d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อความร้อน (เมตร)

L_c = ความยาวของส่วนควบแน่นของท่อความร้อน (เมตร)

และการพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนของท่อ ความร้อน โดยนำเอาค่าอุณหภูมิที่ตกคร่อมในท่อความ ร้อน ซึ่งแสดงให้เห็นอยู่ในรูปแบบของค่าความต้านทาน ความร้อนของท่อความร้อน ความร้อนสามารถเข้า และออกได้ทั้ง 2 ส่วนของท่อความร้อน คือ ส่วนทำ ระเหย และส่วนควบแน่น ซึ่งเป็นการนำความร้อนจาก แหล่งความร้อน และระบายความร้อนออกให้กับแหล่ง รับความร้อน

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบอุณหภูมิตกคร่อมที่ เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของท่อความร้อน ตั้งแต่ผนังท่อ ความร้อน ทั้งส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น อุณหภูมิ ที่ส่วนรอยต่อระหว่างวัสดุพูนกับช่องไอที่เกิดขึ้นใน ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น อุณหภูมิตกคร่อม ที่เกิดขึ้นในช่องไอ ซึ่งสามารถหาค่าการถ่ายโอน ความร้อนทางทฤษฎีได้จากสมการที่ (4) [12]

$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_{total}} \quad (4)$$

โดยที่

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_9 + R_{10} \quad (5)$$

ซึ่ง R คือ ค่าความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นกับท่อ ความร้อนในส่วนต่างๆ (องศาเซลเซียส/วัตต์)

โดยสมการหาค่าความต้านทานความร้อนของ ท่อความร้อนข้างต้น พบว่าค่าความต้านทาน R_4 , R_5 , R_6 และ R_{10} นั้นมีค่าเชิงปริมาณที่น้อยกว่าหลายเท่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานความร้อนตัว อื่น ๆ ดังนั้นในการคำนวณจึงสามารถละเว้นไม่นำมา พิจารณา R_1 และนอกจากนี้ยังสามารถละเว้นไม่ พิจารณา และ R_9 เนื่องจากส่วนทำระเหย และส่วน ควบแน่นสัมผัสโดยตรงกับแหล่งให้ความร้อน และรับ ความร้อน และสำหรับท่อความร้อนที่ไม่ได้มีการติดตั้ง วัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน ยังสามารถละเว้นการ พิจารณา R_3 และ R_7 ดังสมการ (6)

$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_2 + R_8} \quad (6)$$

และสำหรับท่อความร้อนที่มีการติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายภายในหาได้จากสมการที่ (7)

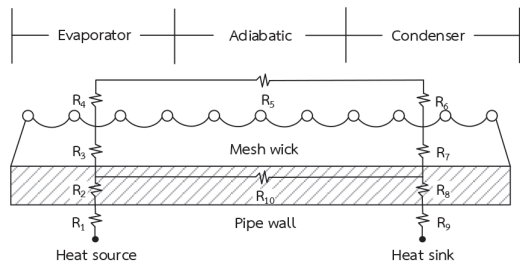
$$Q_{theory} = \frac{\Delta T}{R_2 + R_3 + R_7 + R_8} \quad (7)$$

โดย $R_2 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_{tube} L_e}$, $R_8 = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k_{tube} L_c}$ คือ

ความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น

และ $R_2 = \frac{\ln(d_i/d_{iw})}{2\pi k_w L_e}$, $R_7 = \frac{\ln(d_i/d_{iw})}{2\pi k_w L_c}$ คือ

ความต้านทานความร้อนที่เกิดขึ้นที่วัสดุพรุนชนิดตาข่ายที่ส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรความต้านทานทางความร้อน

สำหรับค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนสามารถหาได้จากการถ่ายโอนความร้อนที่ได้จากการทดลองหารด้วยการถ่ายโอนความร้อนทางทฤษฎีดังสมการที่ (8)

$$\eta = \frac{Q_{exp}}{Q_{theory}} \times 100\% \quad (8)$$

โดยที่

d_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน (เมตร)

d_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อความร้อน (เมตร)

k_{tube} = ค่าการนำความร้อนของท่อทองแดง (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)

k_w = ค่าการนำความร้อนของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายทองแดง (วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน)

L_e = ความยาวของส่วนทำระเหยของท่อความร้อน (เมตร)

Q_{theory} = การถ่ายโอนความร้อนทางทฤษฎี (วัตต์)

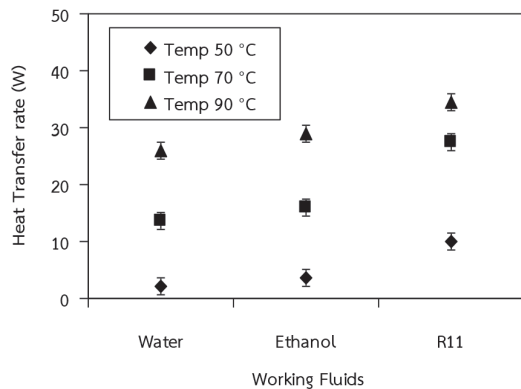
ΔT = ผลต่างของอุณหภูมิส่วนทำระเหย และส่วนควบแน่น (องศาเซลเซียส)

η = ค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

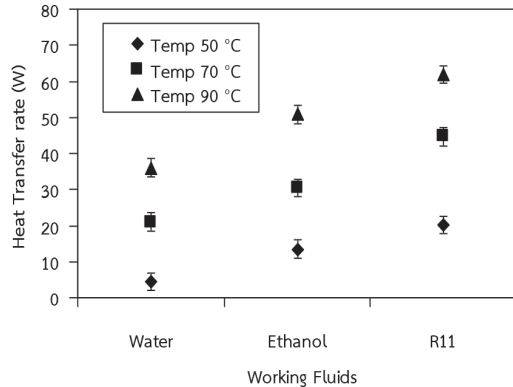
จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

3.1 ท่อความร้อนที่ไม่ติดตั้งวัสดุพรุนภายใน



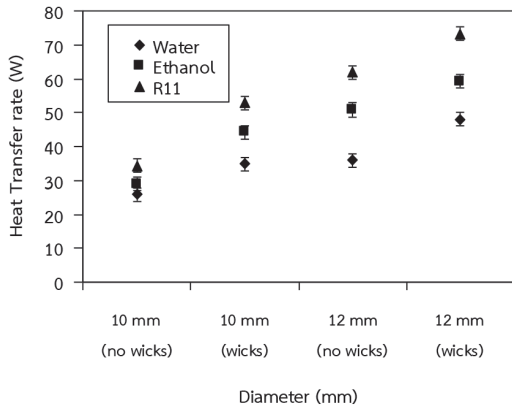
รูปที่ 5 ท่อความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพรุนภายใน

จากรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของสารทำงาน น้ำ เอทานอล และ R-11 และอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหย 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน พบว่าท่อความร้อนที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน ใช้สารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 34.4 วัตต์ และในรูปจะแสดงแถบความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ร้อยละ ± 5 โดยเกิดจากเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้น จะส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่อุณหภูมิก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการทำงานของท่อความร้อน และจากผลของสารทำงานภายในต่อท่อความร้อนพบว่าสารทำงาน R-11 ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูงกว่าสารทำงาน เอทานอล และน้ำกลั่น เนื่องจาก R-11 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่สูง และมีจุดเดือดที่ต่ำ เป็นผลให้รับความร้อนที่ส่วนทำระเหย แล้วเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ซึ่งเป็นผลต่อความดันของสารทำงานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้รับความร้อนแล้วเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้เร็ว ทำให้ผลของการถ่ายโอนความร้อนดีขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการทดลอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าหากเลือกใช้สารทำงานที่มีจุดเดือดต่ำ ที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูงย่อมส่งผลตรงกับค่าการถ่ายโอนความร้อน และเป็นผลในเชิงเดียวกันกับสารทำงานเอทานอลที่มีค่ามากกว่าน้ำกลั่นเช่นกัน เนื่องจากสารทำงานน้ำกลั่นอยู่ในสถานะของเหลวมากกว่าไอ จึงเกิดการเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า เมื่อพิจารณาผลการทดลองกับท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูนภายใน พบว่ามีผลของการถ่ายโอนความร้อนในทำนองเดียวกัน



รูปที่ 6 ท่อความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูนภายใน

จากรูปที่ 6 พบว่ามีผลจากการถ่ายโอนความร้อนเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ที่เมื่อท่อมีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น เป็นเพราะท่อความร้อนมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น และมีช่องไอภายในที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารทำงานได้ดี จึงทำให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น จากรูปที่ 6 พบว่าสารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 61.9 วัตต์ และพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงานทุกตัวมีค่ามากกว่าท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้จากรูปที่ 7 ที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าการถ่ายโอนความร้อนกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อน ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส

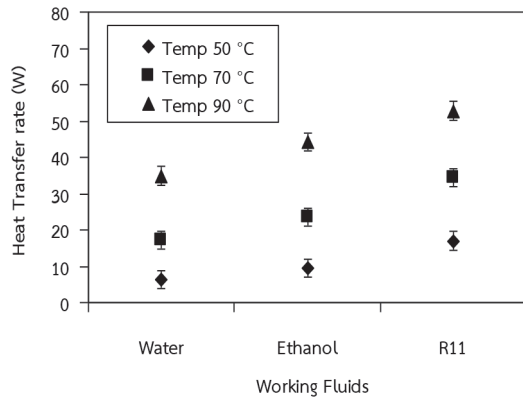


รูปที่ 7 ค่าการถ่ายโอนความร้อนกับเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อความร้อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส

3.2 ท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน

จากรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของสารทำงานและอุณหภูมิที่ส่วนทำระเหยเช่นเดียวกับรูปที่ 5 แต่มีตัวแปรที่เพิ่มเติมเข้ามา โดยการติดตั้งภายในท่อความร้อน คือ วัสดุพูนชนิดตาข่าย เพื่อเปรียบเทียบค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน พบว่าท่อความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งวัสดุพูนชนิดตาข่ายภายใน ช่วยให้มีการถ่ายโอนความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งเห็นได้จากค่าที่นำมาเปรียบเทียบกับท่อที่ไม่ได้ติดตั้งวัสดุพูน โดยที่สารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 52.8 วัตต์ เนื่องจากวัสดุพูนจะช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหยเพื่อมารับความร้อนอีกครั้ง โดยแรงยกตัวที่เกิดจากวัสดุพูนเป็นตัวดึงให้ของเหลวไหลกลับสู่ส่วนทำระเหย และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน เป็นผลให้สารทำงานที่ควบแน่นกลับสู่ส่วนทำระเหยได้ดี ซึ่งวัสดุพูนเป็นตัวแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของฟองไอ ที่เคลื่อนที่จากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นกับของเหลวที่ควบแน่นกับลงมายังส่วนทำระเหยไม่ให้เกิดการชน

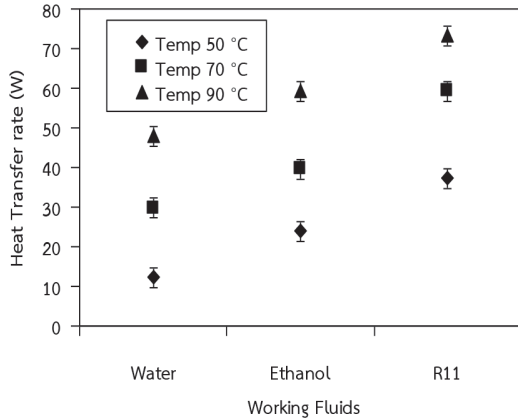
กันขึ้น [12] เป็นผลทำให้มีการขัดขวางการไหลของสารทำงานภายใน และวัสดุพูนยังช่วยในการนำความร้อนที่ดีอีกทางหนึ่ง จึงส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูงขึ้น



รูปที่ 8 ท่อความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน

ในทำนองเดียวกัน เมื่อทำการพิจารณาจากผลการทดลองกับท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน ดังรูปที่ 9 พบว่าท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นมีค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น เป็นเพราะท่อความร้อนมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น และมีช่องไภายในที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของสารทำงานได้ดีกว่าท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และวัสดุพูนก็เป็นตัวช่วยในการลำเลียงสารทำงานจากส่วนควบแน่นกลับลงมายังส่วนทำระเหย โดยใช้หลักการของแรงยกตัวที่เกิดจากวัสดุพูน จึงทำให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงขึ้น จากรูปที่ 8 พบว่าสารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด คือ 73.3 วัตต์ อธิบายได้ว่าอุณหภูมิในส่วนทำระเหยมีผลแปรผกผันตรงกลับค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อน ทั้งท่อที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งวัสดุพูนภายในนั่นเอง แล้วยังพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนของสารทำงานทุกตัวมีค่าที่มากกว่า

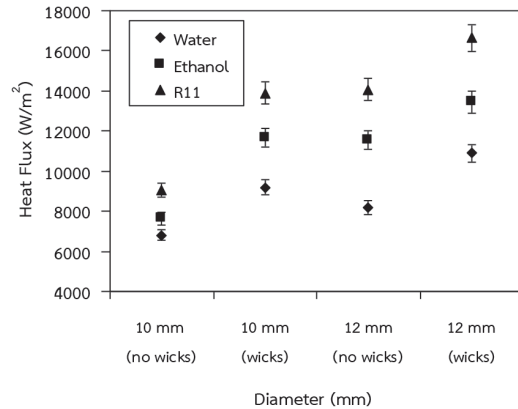
ท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 7



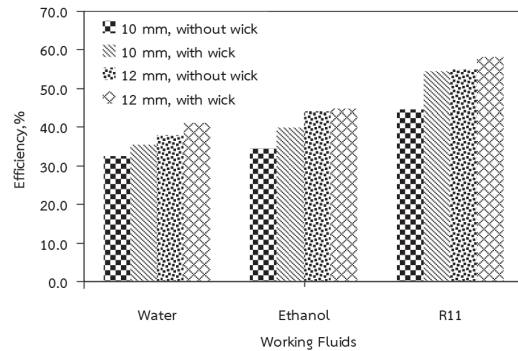
รูปที่ 9 ท่อความร้อนเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งวัสดุพอรุนภายใน

แต่เมื่อทำการพิจารณาพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ส่วนควบแน่นของท่อความร้อนขนาด 10 และ 12 มิลลิเมตร (ขนาดพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อมีค่า 0.0038 และ 0.0044 ตารางเมตร ตามลำดับ) โดยนำผลจากพื้นที่ของท่อความร้อนที่ส่วนควบแน่นไปหารกับค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ได้ ก็จะได้เป็นค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat Flux, W/m²) จากรูปที่ 10 เมื่อทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อความร้อนจาก 10 มิลลิเมตร เป็น 12 มิลลิเมตร ส่งผลต่อพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อทำการพิจารณาท่อความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งวัสดุพอรุน กับท่อความร้อนขนาด 12 มิลลิเมตร ที่ไม่ติดตั้งวัสดุพอรุน พบว่าถึงแม้ขนาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นแต่ค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ก็ยังมียังมีค่าใกล้เคียงกับท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพอรุน ขนาด 10 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าวัสดุพอรุนที่ติดตั้งเข้าไปจะช่วยให้การถ่ายโอนความร้อนให้ท่อความร้อนได้ดีให้ดีขึ้น ถึงแม้ว่าพื้นที่ในการ

แลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าในขนาดท่อ 12 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลของการติดตั้งวัสดุพอรุน เข้าไปในท่อความร้อน โดยวัสดุพอรุนช่วยนำความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นด้วย และช่วยแบ่งการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อน จึงส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนที่ดี



รูปที่ 10 ค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของท่อความร้อนที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส



รูปที่ 11 ค่าประสิทธิภาพสูงสุดของท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

3.3 ประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพอรุน

จากรูปที่ 11 แสดงค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่าท่อความร้อน

ที่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตรโดยใช้สารทำงาน R-11 มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 58.2 ซึ่งมากกว่าค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อนที่ใช้สารทำงานเอทานอล และน้ำกลั่น คือ 44.8 และร้อยละ 41.1 ตามลำดับ เนื่องจากสารทำงาน R-11 มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง จึงส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนที่ดี และเมื่อมีการติดตั้งวัสดุพูนภายใน จะช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นที่ส่วนควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหย เพื่อมารับความร้อน และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน ซึ่งเกิดจากแรงยกตัวของวัสดุพูนจึงทำให้ไม่เกิดการชนกันของสารทำงานภายในท่อความร้อน และเมื่อเปรียบเทียบกับท่อที่ติดตั้งวัสดุพูนขนาด 10 มิลลิเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพดีกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาของวัสดุพูนที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องไอภายในท่อความร้อน ทำให้ช่องไอมีผลต่อการเคลื่อนที่ของสารทำงาน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อก็ยังส่งผลต่อพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เพิ่มขึ้นด้วย

4. สรุป

การศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนที่ติดตั้ง และไม่ติดตั้งวัสดุพูนภายใน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 และ 12 มิลลิเมตรภายในท่อความร้อนใช้สารทำงาน น้ำกลั่น เอทานอล และ R-11 โดยมีอุณหภูมิส่วนทำระเหยเท่ากับ 50, 70 และ 90 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) ผลของการติดตั้งวัสดุพูนภายในท่อความร้อนที่มีต่อค่าการถ่ายโอนความร้อน วัสดุพูนจะไปช่วยในการลำเลียงสารทำงานที่เกิดการควบแน่นกลับมายังส่วนทำระเหยเพื่อมารับความร้อนอีกครั้ง โดยแรงยกตัวที่เกิดจากวัสดุพูนจะเป็นตัวดึงให้ของเหลวไหลกลับสู่

ส่วนทำระเหย และช่วยให้ของเหลวที่ควบแน่นกระจายตัวรอบผนังของท่อความร้อน เป็นผลให้สารทำงานที่ควบแน่นกลับสู่ส่วนทำระเหยได้ดี โดยวัสดุพูนยังช่วยในเรื่องของการนำความร้อนจากส่วนทำระเหยไปยังส่วนควบแน่นด้วย และช่วยแบ่งการเคลื่อนที่ของสารทำงานภายในท่อความร้อน จึงส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูงขึ้น

2) ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อที่มีผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนของท่อความร้อนพบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อเพิ่มขึ้นจะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ตามไปด้วย โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตรให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น ทำให้การการรับและส่งถ่ายความร้อนได้ดี

3) ผลของสารทำงานที่มีต่อค่าการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าหากเลือกใช้สารทำงานที่มีจุดเดือดต่ำ ที่มีค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอสูง ซึ่งอยู่ในสถานะของแก๊ส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ก็จะส่งผลโดยตรงกับค่าการถ่ายโอนความร้อนที่สูง เป็นผลให้รับความร้อนที่ส่วนทำระเหย แล้วเดือดกลายเป็นไอดีอย่างรวดเร็ว และเคลื่อนที่ไปยังส่วนควบแน่นได้เร็ว โดยสารทำงานที่ดีที่สุดคือ R-11

4) ผลของอุณหภูมิส่วนทำระเหยที่มีต่อค่าการถ่ายโอนความร้อน เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิส่วนทำระเหยขึ้น จะส่งผลต่อค่าการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสถานะของสารทำงานภายในท่อความร้อนที่เปลี่ยนแปลง โดยที่อุณหภูมิก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการทำงานของท่อความร้อน ซึ่งจากผลการทดลองอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด

5) ค่าประสิทธิภาพของท่อความร้อน เมื่อมีการติดตั้งวัสดุพูนภายในท่อความร้อน ส่งผลทำให้มีค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของท่อความร้อนเพิ่มขึ้น โดยท่อความร้อนที่ติดตั้งวัสดุพูน ที่ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร มีสารทำงาน R-11 ที่อุณหภูมิส่วนทำระเหย 90 องศาเซลเซียส จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 58.2

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ สาขาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยภาพสินธุ์ และหน่วยวิจัยที่ให้ความรู้และออกแบบเครื่องมือทางความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้ให้ความรู้ให้คำแนะนำให้กำลังใจตลอดการวิจัยที่ผ่านมา จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จตามเป้าหมาย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Lin, R. Ponnappan and J. Leland, "High performance miniature heat pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 3131–3142, 2002.
- [2] L.L. Vasiliev, "Micro and miniature heat pipes-electronic component coolers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 266–273, 2008.
- [3] J. Hirunlabh, P. Chantawong and J. Khedari, "A simple-low cost solar water heater for Thailand," *KMUTT Research and Development Journal*, vol. 23, pp. 109-120, 2000.
- [4] S. Sangiamsuk, S. Boothaisong and W. Dangton, "Solar collector from heat pipe with wick," in *Proceeding of the 31st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT)*, Thailand, 2017.
- [5] P. Naphon, "On the performance of air conditioner with heat pipe for cooling air in the condenser," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 2362-2366, 2010.
- [6] H. Akachi, F. Polasek and P. Stulc, "Pulsating heat pipes," in *Proceedings of the 5th International Heat Pipe Symposium*, Melbourne, Australia, 1996, pp. 208–217.
- [7] S. Sichamnan, T. Chompookham and S. Rittidech, "Efficiency Enhancement of Solar Panels using Copper Mesh Wick Heat Pipe," *UBU Engineering Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 11-12, 2016.
- [8] S. Rittidech, *Heat-pipe Technology*, 1st ed. Mahasarakham: Mahasarakham University's Press, 2010.
- [9] L. Godson Asirvatham, R. Nimmagadda and S. Wongwises, "Heat transfer performance of screen mesh wick heat pipes using silver-water nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 60, pp. 201-209, 2013.
- [10] A. Brusly Solomon, K. Ramachandran, L. Godson Asirvatham and B.C. Pillai, "Numerical analysis of a screen mesh wick heat pipe with Cu/water nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 523–533, 2014.
- [11] C. A. Yunus, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd ed. USA: McGraw-Hill, 2004.
- [12] D. Reay, P. Kew and R. McGlen, *Heat Pipes Theory, Design and Applications*, 6th ed. UK: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2014.