

บทความวิจัย (Research Article)

ผลกระทบของความพรุนตาข่ายสแตนเลสต่อการถ่ายเทความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

นพรัตน์ อมัตริรัตน์¹, วันชัย อินทปัด¹, ธวัชชัย จารุงวงศ์วิทยา¹ และ นิวัฒน์ เกตุชาติ^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานและการปรับอากาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา

* ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: niwat.ke@rmuti.ac.th

(รับบทความ: 24 กุมภาพันธ์ 2568; แก้ไขบทความ: 26 มีนาคม 2568; ตอรับบทความ: 28 มีนาคม 2568)

บทคัดย่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรม การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปทำได้หลายวิธี การใช้วัสดุพรุนวางขวางการไหลภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็เป็นอีกหนึ่งวิธีที่สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้วัสดุพรุนที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดและค่าความพรุนของวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความพรุนต่อการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมโดยใช้วัสดุพรุนตาข่ายสแตนเลสเกรด SUS 304 ที่มีค่าความพรุน (Porosity, X) ได้แก่ 0.55, 0.62, 0.70 และ 0.77 สัดส่วนระยะพิทช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) เท่ากับ 2 และสัดส่วนความสูงแผ่นหยักต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (HR) เท่ากับ 0.40 โดยใช้อากาศเป็นของไหลด้วยความเร็วการไหลในรูปเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 4,300-23,800 การศึกษากระทำภายใต้สภาวะเงื่อนไขฟลักซ์ความร้อนที่ผิวท่อคงที่ จากการทดลองพบว่า X ลดลงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อน (Nu) และค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาตรเนื้อวัสดุที่เป็นของแข็งเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการกักเก็บความร้อนในรูปของการนำความร้อนมีมากขึ้น ส่งผลให้การส่งถ่ายความร้อนจากเนื้อวัสดุไปยังของไหลมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยที่ $X=0.55$ จะมีค่า Nu และ f สูงสุด เท่ากับ 2.75 และ 23.85 เท่าเมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบ ตามลำดับ และสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.28 จะถูกพบที่ $X=0.55$ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นทำให้ Nu มีค่าเพิ่มขึ้น และ f มีค่าลดลง

คำสำคัญ: เลขนัสเซิลท์ ตัวประกอบความเสียดทาน สมรรถนะเชิงความร้อน

การอ้างอิงบทความ: นพรัตน์ อมัตริรัตน์, วันชัย อินทปัด, ธวัชชัย จารุงวงศ์วิทยา และ นิวัฒน์ เกตุชาติ, "ผลกระทบของความพรุนตาข่ายสแตนเลสต่อการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 3, ฉบับที่ 2, หน้า 16-29, 2568.

Effect of Stainless Mesh Porosity on Heat Transfer in Circular Tube Heat Exchangers

Nopparat Amattirat¹, Wanchai Intapat¹, Tawatchai Jaruwongwittaya¹ and Niwat Ketchat^{1,*}

¹ Department of Energy and Air Conditioning Engineering, Faculty of Engineering and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan Nakhon Ratchasima

* Corresponding Author: niwat.ke@rmuti.ac.th

(Received: February 24, 2025; Revised: March 26, 2025; Accepted: March 28, 2025)

Abstract

Heat exchangers were important devices used for heat transfer in various industries. Heat transfer enhancement in heat exchangers can be achieved using various methods. The porous media were placed across the flow inside the tubes of the heat exchanger. This method was used to enhance heat transfer. However, the selection of appropriate porous media must consider various factors, such as the type and porosity. Therefore, the objective of this research was to study the effect of stainless wire-mesh porosity on heat transfer in a circular tube heat exchanger with a porous triangular serrated insert. The SUS 304 stainless wire-mesh was used as porous media. The porosity (X) was examined in four levels: 0.55, 0.62, 0.77 and 0.77. The pitch ratios (PR = 2) and height ratios (HR = 0.40). The experimental have been conducted for the air flow in terms of Reynolds numbers (Re) ranging from 4,300 – 23,800. The experiment was conducted in the tube heat exchanger having a uniform heat fluxed wall. Experimental results indicate that a decrease in X leads to an increase in the Nusselt number (Nu) and the friction factor (f). This was because a larger volume of solid material enhances its heat storage capacity through conduction, resulting in increased heat transfer from the material to the fluid. The highest Nu and f were found at X=0.55, which were 2.75 and 23.85 times when compared with a smooth tube, respectively. In this research, the maximum thermal enhancement factor (TEF) of 1.28 was found at X=0.55. Experimental results also indicate that Nu increases as Re increases, while f decreases.

Keywords: Nusselt Number, Friction Factor, Thermal Enhancement Factor

Please cite this article as: N. Amattirat, W. Intapat, T. Jaruwongwittaya and N. Ketchat, “Effect of Stainless Mesh Porosity on Heat Transfer in Circular Tube Heat Exchangers,” *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 3, no. 2, pp. 16-29, 2025.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม รวมถึงอุตสาหกรรมยานยนต์และอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายวิธี แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือวิธี Passive [1] เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกในหลาย ๆ กระบวนการ เช่น การติดตั้ง การผลิต การบำรุงรักษา รวมทั้งประหยัดต้นทุนและค่าใช้จ่าย เทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive ที่ให้ประสิทธิภาพดีคือ การใส่อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนวนหรือหมุนควงภายในท่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งสามารถช่วยเพิ่มระดับความปั่นป่วนภายในท่อได้เป็นอย่างดี และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน [2] ด้วยเหตุนี้ทำให้นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแผ่นใบพัด [3-5] พบว่าสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Nu) ได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบ อย่างไรก็ตามก็ยังส่งผลทำให้ค่าความเสียดทาน (f) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ต่อมาได้มีการนำเสนอการการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการใส่วงแหวนแบบต่าง ๆ [6-9] พบว่าการใส่วงแหวนแบบต่าง ๆ จะส่งผลให้ Nu และ f มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบแต่ก็ทำให้การสูญเสียความดันเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากนั้นมีการนำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการติดตั้งแผ่นบาง

รูปตัว Z [10] พบว่าการสอดใส่แผ่นบางรูปตัว Z ทุกกรณีจะให้ค่า Nu และ f เพิ่มขึ้นจากท่อผนังเรียบผนังเรียบ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนการติดตั้งแผ่นปีกสามเหลี่ยมแบบต่าง ๆ [11-12] พบว่าการใส่แผ่นปีกทุกรูปแบบสามารถเพิ่ม Nu ได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นปีกมีค่า f ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนหรือหมุนควงชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันโดยติดตั้งแผ่นรูปตัว V หลาย ๆ รูปแบบ [13-14] เพื่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนและลดการสูญเสียแรงดันในการไหลของอากาศการทดลองความสัมพันธ์กันระหว่างรูปแบบทางเรขาคณิตต่าง ๆ เช่น ระยะห่างของการอุดตัน ความกว้างของการอุดตัน ความสูงของสิ่งกีดขวาง ระยะห่างระหว่างสิ่งกีดขวางที่ต่อเนื่องกัน ความกว้างของพื้นที่ที่ไม่ต่อเนื่องของการอุดตัน และมุมปะทะของการไหล พบว่าครีที่ถูกต้องแบบแยกส่วนหรือครีที่ถูกทำให้มีลักษณะพรุน จะทำให้อากาศที่ไหลผ่านช่องหรือรูพรุนเกิดกระแสการไหลแบบ Jet Flow และ Swirling Flow และยังสามารถลดความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลปะทะกับแผ่นครีโดยตรง [15-16]

การพัฒนาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาถ่านโดยวัสดุพรุนตาข่ายสแตนเลสภายในท่อนำความร้อนของเตาเผาถ่าน พบว่าสามารถเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าเตาเผาถ่านที่ไม่มีการติดตั้งวัสดุพรุน [17] การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สทุ้งต้มแบบ Vertical port โดยใช้วัสดุพรุนแบบลวดตาข่าย

บทความวิจัย (Research Article)

สแตนเลส พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาแก๊สหุงต้มแบบดั้งเดิม [18] การประยุกต์วัสดุพุนตาข่ายสแตนเลสเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งแบบพาความร้อนโดยติดตั้งภายในท่อลมร้อนขาเข้าของห้องอบแห้งพบว่าสามารถลดความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่ไม่มีการติดตั้งวัสดุพุน [19]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนควงหรือหมุนวนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ใบพัด วงแหวน แผ่นบาง แผ่นปีก เป็นต้น สามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่าท่อผนังเรียบ แต่การติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดความดันสูญเสียภายในช่องการไหลจำนวนมาก เนื่องจากอุปกรณ์ส่วนใหญ่เป็นแบบทึบ จึงทำให้เกิดการกีดขวางการไหลของอากาศ จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีผู้วิจัยทำการพัฒนาอุปกรณ์สร้างการไหลรูปแบบต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์สร้างการไหลที่ถูกติดตั้งแบบแยกส่วนหรือถูกทำให้มีรูพุน เพื่อที่จะทำให้อากาศที่ไหลผ่านช่องหรือรูพุนเกิดกระแสการไหลแบบ Jet Flow และ Swirling Flow และยังสามารถลดความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลปะทะกับแผ่นครีบโดยตรง [15-16] นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ตาข่ายสแตนเลสที่มีค่าความพุนต่างกันส่งผลต่อการเพิ่มสมรรถนะเชิงความร้อนของเตาเผาถ่านและเตาแก๊สหุงต้มโดยการเลือกใช้ตาข่ายสแตนเลสที่ค่าความพุนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้ [17-18] และยังสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งแบบพาความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ [19]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าความพุนตาข่ายสแตนเลสที่เป็นอุปกรณ์สร้างการไหลแบบหมุนวนและเป็นตัวกักเก็บความร้อนในตัวเดียวกัน (แผ่นหยักสามเหลี่ยมพุน) ต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน และลดความดันสูญเสียภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมได้ ซึ่งหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดการใช้พลังงานในอนาคตได้

2. รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

b	คือ ความสูง (m)
D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)
f	คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทาน
f_s	คือ ค่าตัวประกอบความเสียดทานท่อผนังเรียบ
h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 K$)
h_s	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนท่อผนังเรียบ ($W/m^2 K$)
HR	คือ สัดส่วนความสูงแผ่นหยักต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m K$)
L	คือ ความยาวท่อช่วงทดลอง (m)
Nu	คือ เลขนัสเซิลท์
Nus	คือ เลขนัสเซิลท์ท่อผนังเรียบ
ΔP	คือ ความดันตกคร่อมบริเวณท่อทดลอง (kPa)
p	คือ ระยะเวลา (m)
PR	คือ สัดส่วนระยะพิตช์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

บทความวิจัย (Research Article)

Re คือ เลขเรย์โนลด์

TEF คือ สมรรถนะเชิงความร้อน

U คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

ν คือ ความหนืดจลน์ของอากาศ (m²/s)

3. การคำนวณ

การไหลของอากาศผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงในค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number, Re) ดังสมการที่ (1)

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1)$$

การถ่ายเทความร้อนจะถูกแสดงในค่าเลขนัสเซิลท์ (Nusselt Number, Nu) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อนภายในท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใด ๆ ดังสมการที่ (2)

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2)$$

ค่าตัวประกอบความเสียดทาน (Friction Factor, f) ดังสมการที่ (3)

$$f = \frac{2}{(L/D)} \frac{\Delta P}{\rho U^2} \quad (3)$$

การประเมินสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแสดงในรูปของสมรรถนะเชิงความร้อน (Thermal Enhancement Factor, TEF) โดยนิยามจากอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนท่อที่ติดตั้งวัสดุพรุณ (h) กับท่อผนังเรียบ (h_s) ซึ่งพิจารณาที่กำลังขับเท่ากัน ดังสมการที่ (4)

$$TEF = \frac{h}{h_s} \bigg|_{pp} = \frac{Nu}{Nus} \bigg|_{pp} = \left(\frac{Nu}{Nus} \right) \left(\frac{f}{f_s} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

เพื่อให้การทดลองมีความน่าเชื่อถืองานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองท่อผนังเรียบผนังเรียบเพื่อหาค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปของเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบความเสียดทาน (f) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ที่ โดย Nu เทียบกับสมการของ Dittus-Boelter ดังสมการที่ (5) ขณะที่ f เทียบกับสมการของ Petukhov ดังสมการที่ (6)

สหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

สหสัมพันธ์ของ Petukhov

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (6)$$

บทความวิจัย (Research Article)

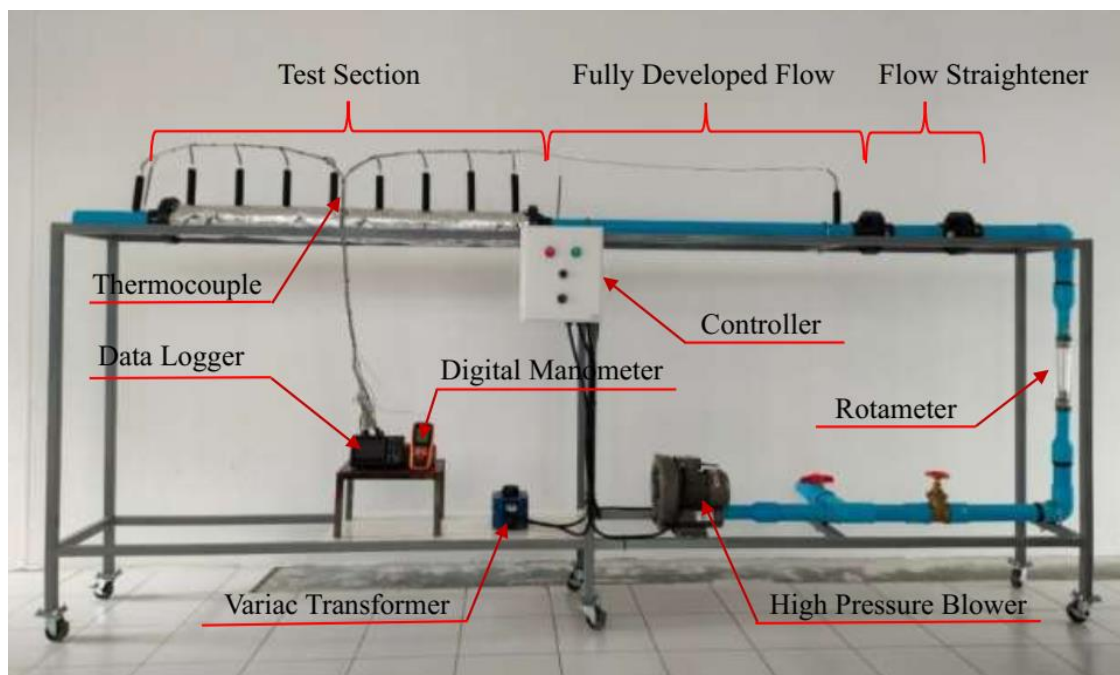
4. ชุดทดลองและวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ชุดทดลองที่แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมจะแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- 1) พัดลมแรงดันสูง (High Pressure Blower) ขนาด 0.37 kW 1-Phase 200-240 Vac 50/60 Hz
- 2) โรตاميเตอร์ (Rotameter) ขนาด 1 นิ้ว ย่านการวัด 10-100 m³/h
- 3) อุปกรณ์จัดระเบียบการไหล (Flow Straightener)
- 4) ชุดปรับสภาพการไหลของอากาศให้มีลักษณะการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ยาว 1.20 m
- 5) ชุดทดลอง (Test Section) ทำจากท่อทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ยาว 1,200 mm ถูกติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K (K-Type Thermocouple) ช่วงการวัดอุณหภูมิ -180-1,300 องศาเซลเซียส (°C) จำนวน 8 ตัว
- 6) มานอมิเตอร์แบบดิจิทัล (Digital Manometer) รุ่น Testo 510 ช่วงการตรวจวัด 0 -100 mbar
- 7) หม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า (Variac Transformer) เป็นหม้อแปลงแบบแกนหมุนสำหรับระบบไฟกระแสสลับ AC ใช้ในการปรับแรงดันไฟฟ้า จากค่าศูนย์ไปจนถึงค่าสูงสุดตั้งแต่ 0-250 Vac
- 8) เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (Data Logger) รุ่น HIOKI LR8431-20 มีช่องสัญญาณมาตรฐานจำนวน 10 ช่อง

จากส่วนประกอบทั้งหมดของชุดทดลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมโดยติดตั้งแผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุนจะมีหลักการทำงานดังนี้ โดยเริ่มจากพัดลมแรงดันสูงทำหน้าที่ขับเคลื่อนของไหล (อากาศ) ผ่านโรตاميเตอร์ (Rotameter) ซึ่งเป็นตัววัดอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่ชุดทดลอง จากนั้นจะเข้าสู่อุปกรณ์จัดระเบียบการไหล (Flow Straightener) ทำหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศและเข้าสู่ช่วงปรับสภาพการไหลที่มีความยาวมากพอให้อากาศปรับสภาพการไหลให้มีลักษณะพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow) ก่อนเข้าสู่ส่วนทดลอง ท่อทองแดงที่ใช้ในการทดลองถูกติดตั้งด้วยขดลวดความร้อนแบบฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater) ขนาด 1,000 วัตต์ ทำการจ่ายความร้อนให้แก่ท่อทดลองแบบสภาวะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat Flux) และท่อทองแดงจะถูกหุ้มฉนวนอย่างดี เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศ โดยทำการตรวจวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (K-Type Thermocouple) จำนวน 10 ตัว จะถูกติดตั้งที่ผิวท่อด้านบน 8 ตัว และทางเข้าและทางออกของท่อทดลองอีก 2 ตัว จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) โดยที่ค่าความดันตกคร่อม (Pressure Drop) จะถูกตรวจวัดที่ทางเข้าและทางออกชุดทดลองด้วยดิจิทัลมานอมิเตอร์ รุ่น Testo 510

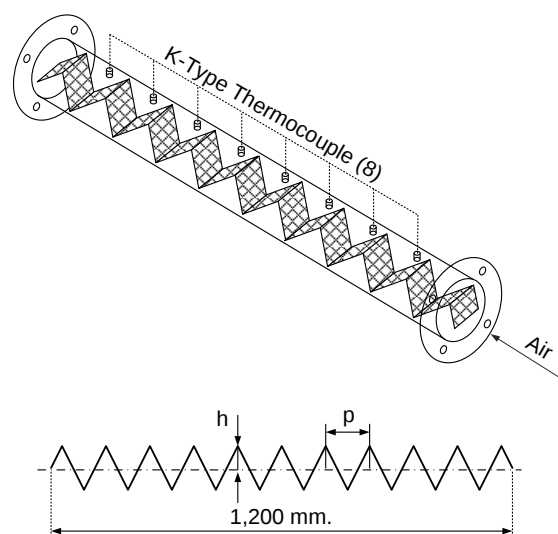
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 1 ชุดทดลองท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งแผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุนในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม และตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดอุณหภูมิผิวท่อทดลองทั้งหมด 8 ตำแหน่ง โดยวัสดุพรุนที่เลือกใช้ คือ ตาข่ายสแตนเลสเกรด SUS 304 ที่มีค่าความพรุน (Porosity, X) ได้แก่ 0.55, 0.62, 0.70 และ 0.77 ดังแสดงในรูปที่ 3 แผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุนจะมีสัดส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Pitch Ratios, $p/D = PR$) เท่ากับ 2 และสัดส่วนความสูงแผ่นหยักต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (Height Ratios, $h/D = HR$ คือ 0.40) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น ขณะที่ท่อทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เท่ากับ 50.8 mm ท่อทดลองถูกทำให้ร้อนแบบฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Fluxed) ด้วยขดลวดความร้อนตลอดความยาวของท่อทดลอง (L) เท่ากับ 1,200 mm

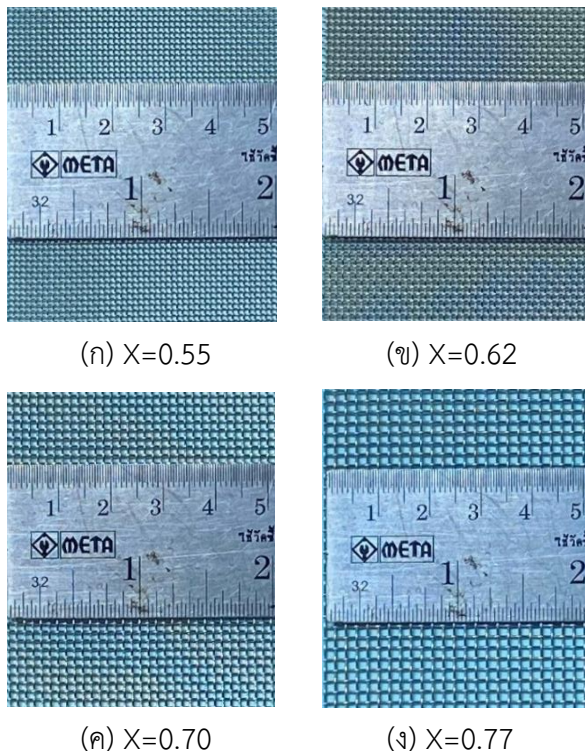
และทำการหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2 แผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุน

นพรัตน์ อมิตร์ตัน และคณะ, ผลกระทบของความพรุนตาข่ายสแตนเลสต่อการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม

บทความวิจัย (Research Article)



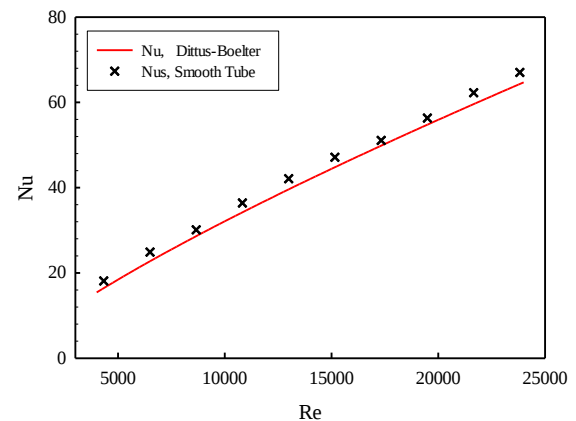
รูปที่ 3 ตาข่ายสแตนเลส

5. ผลการทดลอง

5.1 การทดลองท่อผนังเรียบ

ก่อนการติดตั้งแผ่นหยักสามเหลี่ยมพูนภายในท่อของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้มีการทดลองค่าเลขนัสเซิลท์ (Nu) และตัวประกอบความเสียดทาน (f) ของท่อผนังเรียบ เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของการทดลอง โดยนำผลการทดลองของท่อผนังเรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Dittus-Boelter สำหรับค่า Nu และสมการสหสัมพันธ์ของ Petukhov สำหรับค่า f จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง Nu และ Re ของท่อผนังเรียบเทียบกับ

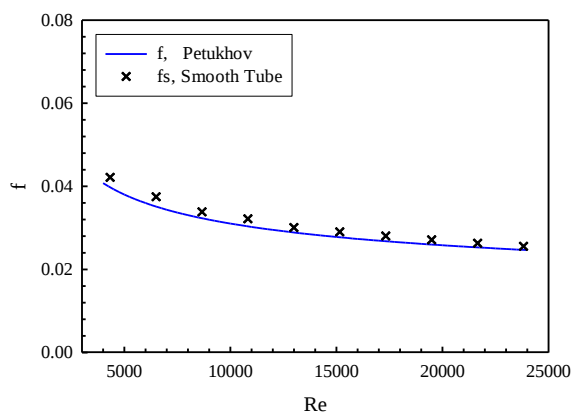
สมการของ Dittus-Boelter มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 6% ในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re
กรณีท่อผนังเรียบ

ความสัมพันธ์ระหว่าง f และ Re เทียบกับสมการของ Petukhov มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 5% ดังแสดงในรูปที่ 5 อาจจะเป็นผลมาจากสภาพพื้นผิวของผนังท่อทดลองที่ส่งผลต่อการพาความร้อนและค่าความเสียดทานทำให้ค่า Nu และ f จากการทดลองท่อผนังเรียบสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการ Dittus-Boelter และ Petukhov นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนืดและค่าการนำความร้อนที่จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

บทความวิจัย (Research Article)

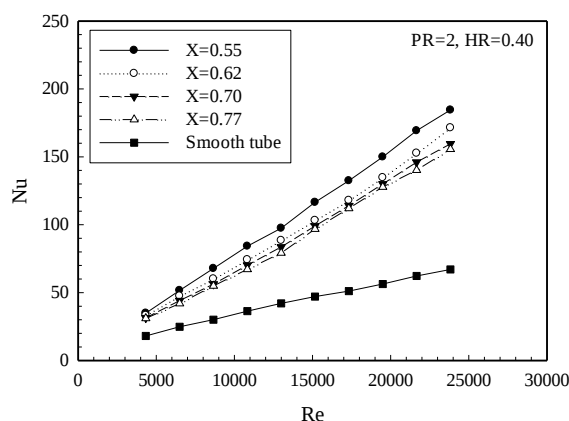


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re
กรณีท่อผนังเรียบ

5.2 การถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบของค่าความพรุน (X) ต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากเลขนัสเซิลท์ (Nu) กับ ความเร็วของของไหล (อากาศ) คำนวณได้จากเลขเรย์โนลด์ (Re) โดยที่สัดส่วนระยะพิชต์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (PR) คือ 2 และสัดส่วนความสูงแผ่นหยักต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (HR) คือ 0.40 วัสดุพรุนที่เลือกใช้คือ สแตนเลสชนิด SUS 304 ที่มีค่า X ทั้งหมด 4 ค่าได้แก่ 0.55, 0.62, 0.70 และ 0.77 ช่อง จากการทดลองพบว่า Nu เพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Re ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดกระแสการไหลแบบปั่นป่วนหรือหมุนวนมากขึ้นส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่า Re คงที่ใด ๆ พบว่าค่า Nu เพิ่มขึ้นตาม X ที่ลดลง เนื่องจากที่ X มีค่าต่ำ ๆ จะมีปริมาตรเนื้อวัสดุที่เป็นของแข็งเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการกักเก็บความร้อนในรูปของการนำความร้อนมีมาก

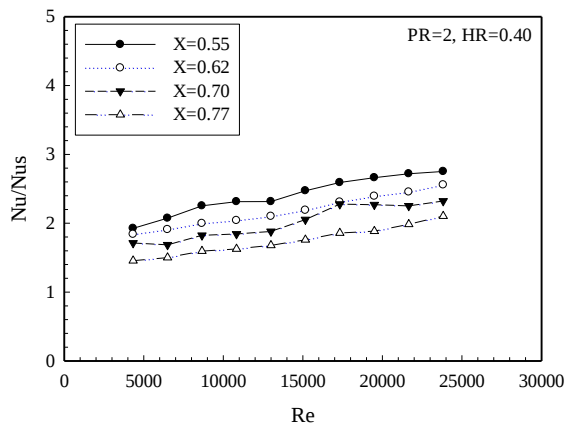
ขึ้นส่งผลให้เมื่อของไหลไหลผ่านวัสดุพรุนจะเกิดการส่งถ่ายพลังงานความร้อนจากเนื้อวัสดุไปยังของไหลได้ดีหรือมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้มีความแตกต่างจากแผ่นใบปิด [3-5] และแผ่นบางรูปตัวไอซ์ [10] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสองชนิดมีค่า Nu สูงกว่าเล็กน้อยในบางกรณี เนื่องจากสามารถสร้างความปั่นป่วนและหมุนวนของไหลได้มากกว่า ในขณะที่แผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุน ทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บและส่งถ่ายพลังงานความร้อนผ่านการนำความร้อนของวัสดุไปยังของไหล ซึ่งมีลักษณะการเพิ่มประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังทำการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการติดตั้งและไม่มีการติดตั้งวัสดุพรุน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu กับ Re

รูปที่ 7 พบว่าในทุกกรณีของการติดตั้งวัสดุพรุนจะมีค่า Nu ที่สูงกว่า ซึ่งมีค่ามากกว่า 1.63 ถึง 2.75 เท่า ของท่อผนังเรียบ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 1

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu/Nus กับ Re

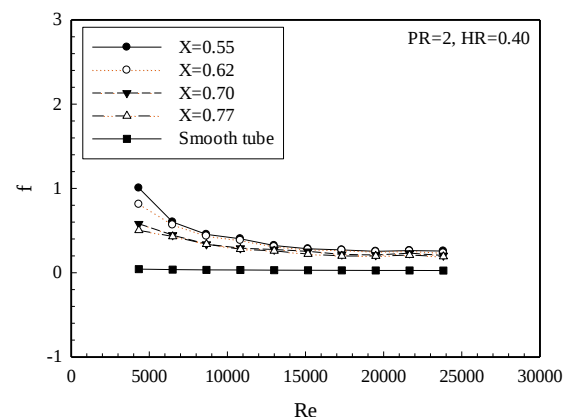
ตารางที่ 1 การถ่ายเทความร้อน (Nu/Nus)

Re	Nu/Nus			
	X=0.55	X=0.62	X=0.70	X=0.77
4,300	1.93	2.04	1.84	1.63
6,500	2.07	2.10	1.88	1.85
8,660	2.25	2.19	2.05	1.76
10,800	2.31	2.31	2.28	1.86
13,000	2.31	2.39	2.27	1.88
15,160	2.47	2.45	2.25	1.98
17,300	2.59	2.50	2.32	2.10
19,500	2.66	2.04	1.84	1.63
21,660	2.72	2.10	1.88	1.68
23,800	2.75	2.19	2.05	1.76

5.3 ตัวประกอบความเสียดทาน

รูปที่ 8 แสดงผลกระทบบของค่าความพรุน (X) ต่อความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) จากการทดลองพบว่า f มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ Re ทุกกรณี แต่เมื่อพิจารณาค่า Re คงที่ใด ๆ จะพบว่าค่า X

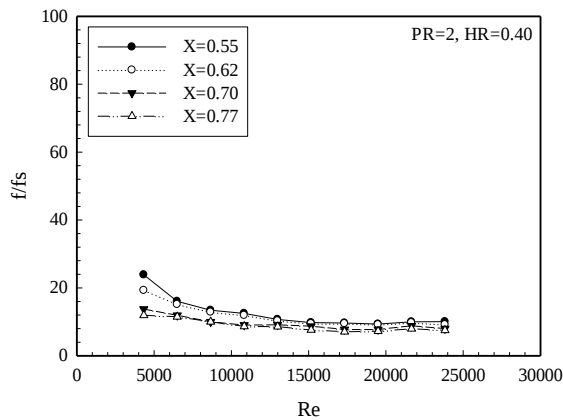
เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ f มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากวัสดุพรุนที่มีค่า X เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาตรช่องว่างเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ปริมาตรเนื้อวัสดุที่เป็นของแข็งจะลดลง) ทำให้ของไหลไหลผ่านได้ง่ายกว่าวัสดุพรุนที่มีค่า X ต่ำ ๆ จึงส่งผลให้ f มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดลองของงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานของ ใบบิต [3-5] แผ่นบางรูปตัวไอซ์ [10] และแผ่นครีป [15-16] ซึ่งมีค่าตัวประกอบความเสียดทานสูงกว่าแผ่นหัยกสามเหลี่ยมพรุน เนื่องจากโครงสร้างของทั้งสามชนิดจะมีโครงสร้างที่กีดขวางการไหลของของไหลมากกว่า ขณะที่แผ่นหัยกสามเหลี่ยมพรุน ช่วยให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้สะดวกกว่าส่งผลให้ค่าความเสียดทานลดลง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f กับ Re

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบ f/f_s รูปที่ 9 พบว่ากรณีที่ติดตั้งแผ่นหัยกสามเหลี่ยมพรุนจะส่งผลให้ค่า f สูงกว่ากรณีที่ท่อผนังเรียบทุกกรณี ซึ่งมีค่ามากกว่า 7.07 ถึง 23.85 เท่า ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 2

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า f/fs กับ Re

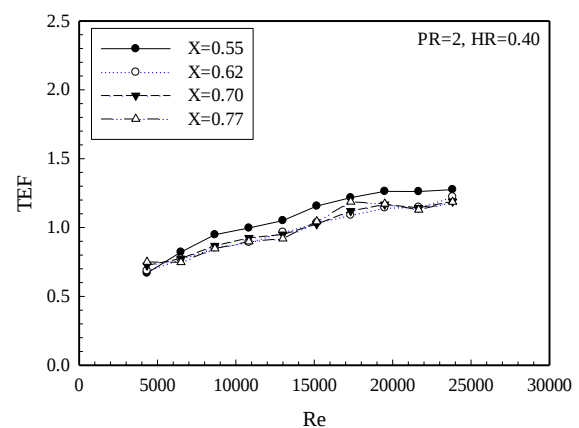
ตารางที่ 2 ตัวประกอบความเสียหาย (f/fs)

Re	f/fs			
	X=0.55	X=0.62	X=0.70	X=0.77
4,300	23.85	19.27	13.76	11.93
6,500	16.06	15.14	11.93	11.47
8,660	13.43	12.86	10.00	10.00
10,800	12.50	11.92	9.04	8.65
13,000	10.71	10.29	9.14	8.57
15,160	9.78	9.46	8.70	7.61
17,300	9.66	9.48	7.76	7.07
19,500	9.37	9.15	7.75	7.25
21,660	10.00	9.77	8.82	7.94
23,800	10.05	9.15	8.00	7.50

5.4 ตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน

รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของค่าความพรุน (X) ต่อความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบสมรรถนะเชิงความร้อน (TEF) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) สามารถอธิบายได้ด้วยอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนระหว่างท่อที่ติดตั้งและไม่มีการติดตั้งแผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุน

(Nu/Nus) เทียบกับอัตราส่วนตัวประกอบความเสียหายตามกรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มการถ่ายเทความร้อน (f/fs) จากการทดลองพบว่า TEF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ Re ทุกกรณี แต่เมื่อพิจารณาค่า Re คงที่ใด ๆ พบว่าค่า TEF มีแนวโน้มลดลงตามค่า X เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงการแปรผันที่สัมพันธ์กับสัดส่วนการถ่ายเทความร้อนต่อการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ TEF สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 1.28 จะถูกพบที่ $X=0.55$



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TEF กับ Re

6. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสรุปได้ว่าแผ่นหยักสามเหลี่ยมพรุนสามารถเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่า เมื่อ X มีค่าลดลง ทำให้ Nu และ f มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุพรุนที่มีค่า X ลดลง จะมีปริมาตรเนื้อวัสดุที่เป็นของแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการกักเก็บความร้อนในรูปของการนำความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้เมื่อของไหลไหลผ่านวัสดุพรุนการส่งถ่ายพลังงานจากเนื้อวัสดุไปยังของ

บทความวิจัย (Research Article)

ไหลจึงเกิดได้ดีหรือมีปริมาณมากตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุพูนที่มีค่า X ลดลง จะทำให้การกีดขวางการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้ค่า f สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ Nu และ f อยู่ระหว่าง 1.63-2.75 และ 7.07-23.85 เท่า ตามลำดับ เมื่อเทียบกับท่อผนังเรียบ ในส่วนของค่า Nu และ f สูงที่สุดจะถูกพบที่ $X=0.55$ ในขณะที่ TEF ของงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.28 ถูกพบที่ $X=0.55$ เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามในอนาคตควรศึกษารูปแบบเพิ่มเติมเพื่อช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้ดียิ่งขึ้น ได้แก่ การปรับแต่งรูปทรงของวัสดุพูน เช่น แผ่นโค้งหรือแผ่นคลื่น เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสและกระแสไหลวน (vortex) โดยอาจต้องใช้ตัวสร้างความปั่นป่วนประเภทอื่นร่วมด้วย หรืออาจจะต้องใช้การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เพื่อศึกษารูปแบบการไหลภายในท่อเพื่อช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของไหลและปรับปรุงการออกแบบรูปทรงของวัสดุพูนได้แม่นยำขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม งบประมาณโครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 เลขที่ FF67/P1-017

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Liu and M. Sakr, "A comprehensive review on passive heat transfer enhancements in pipe exchangers,"

Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 19, pp. 64–81, Mar. 2013.

- [2] ภาณุวัฒน์ หุ่นพงษ์ และ สมพล สกุลหงษ์, "การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนผ่านแผ่นปีกสามเหลี่ยม," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 28, ฉบับที่ 3, หน้า 557–566, ก.ค.–ก.ย. 2561.
- [3] M. M. K. Bhuiya, et al., "Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 46, pp. 49–57, Aug. 2013.
- [4] เก่งกล้า กุณรักษ์, มิตภาณี พุ่มกล่อม และ เชษฐภรณ์ ปญญวัชรวงศ์, "อิทธิพลของท่อผิวครีบทึบที่มีแผ่นบิดส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน," *วารสารวิชาการเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม*, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 53–59, ม.ค.–มิ.ย. 2564.
- [5] P. Promvong and S. Skullong, "Heat transfer in a tube with combined V-winglet and twin counter-twisted tape," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 26, pp. 1–10, Aug. 2021.
- [6] W. Chingtuaythong and S. Chokphoemphun, "Thermal performance augmentation in heat exchanger tube with oval–pentagon ring," *J. Res. Appl.*

บทความวิจัย (Research Article)

- Mech. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 166–174, Jul. 2018.
- [7] วิฑูรย์ ชิงถ้วยทอง และคณะ, "การศึกษาถึงการไหลแบบปั่นป่วนของอากาศและคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของท่อที่มีการสอดใส่วงแหวนข้าวหลามตัด-ข้าวหลามตัด," *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 161–168, พ.ค.–ส.ค. 2561.
- [8] P. Promvong and S. Skullong, "Thermal characterization in circular tube inserted with diamond-shaped ring," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–10, Nov. 2019.
- [9] P. Hoonpong, P. Promvong and S. Skullong, "Experimental study of thermal performance in a tubular heat exchanger using inclined perforated vortex rings," *J. Res. Appl. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 148–157, Nov. 2020.
- [10] สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, เอกวุฒิ แสนคำวงษ์ และชาญวิทย์ ชัยอมฤต, "การศึกษาเชิงทดลองของการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลมที่มีแผ่นบางรูปตัว Z," *วารสาร มทร. อีสาน*, ปีที่ 12, ฉบับที่ 3, หน้า 79–95, ก.ย.–พ.ย. 2562.
- [11] S. Skullong, et al., "Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 229–243, Dec. 2017.
- [12] A. T. Wijayanta, et al., "Effect of wing-pitch ratio of double-sided delta-wing tape insert on the improvement of convective heat transfer," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 151, pp. 1–8, Nov. 2020.
- [13] P. Promvong and S. Skullong, "Thermo-hydraulic performance in heat exchanger tube with V-shaped winglet vortex generator," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 164, pp. 1–11, Jan. 2020.
- [14] P. M. Erfanian Nakhchi and M. T. Rahmati, "Turbulent flows inside pipes equipped with novel perforated V-shaped rectangular winglet turbulators: numerical simulations," *J. Energy Resour. Technol. Trans. ASME*, vol. 142, pp. 1–10, Nov. 2020.
- [15] A. Kumar, et al., "Developing heat transfer and pressure loss in an air passage with multi discrete V-blockages," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 84, pp. 266–278, Jun. 2017.
- [16] R. Kumar, et al., "Performance evaluation and optimization of solar assisted air heater with discrete multiple arc shaped ribs," *J. Energy Storage*, vol. 26, pp. 1–17, Sep. 2019.
- [17] นิวัฒน์ เกตุชาติ และคณะ, "การพัฒนาเตาเผาถ่านประสิทธิภาพสูงด้วยวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลส," *วารสารนวัตกรรมวิทยาศาสตร์เพื่อการ*

บทความวิจัย (Research Article)

พัฒนาอย่างยั่งยืน, ปีที่ 5, ฉบับที่ 2, หน้า 557–
566, ก.ค.-ธ.ค. 2566.

- [18] อนิรุตต์ มัทธจักร และคณะ, "อิทธิพลของลวดตาข่ายสแตนเลสต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้ม แบบ Vertical port," วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 33, ฉบับที่ 1, หน้า 24–29, มี.ค. 2559.

- [19] คมเพชร อินลา และคณะ, "การประยุกต์วัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานของการอบแห้งแบบพาความร้อน," วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 32, ฉบับที่ 4, หน้า 830–842, ต.ค.-ธ.ค. 2565.