การเปรียบเทียบความสามารถของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายที่มีผลต่อการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลม

Comparison of the Ability of Wire–Net Porous Media on Enhancement of Forced Convective Heat Transfer in a Circular Pipe

อนุชา กล่ำน้อย[1], ณรงค์ศักดิ์ โยธา[1], รพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ[2], และบัณฑิต กฤตาคม[3]*

[1] สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[3]ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน 744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: E-mail: anucha_kang@hotmail.com, rapeepong.pe@rmuti.ac.th และ butdit.kr@rmuti.ac.th โทรศัพท์ 044-233-073,
โทรสาร 044-233-074

บทคัดย่อ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (PPI) ที่แตกต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ 8 และ 10 ที่มีต่อเลขนัสเสลท์ (Nusselt number, Nu) และความดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) ที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหล (อากาศ) แบบบังคับภายในท่อกลมกรณีการติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสเบอร์ 304 อัตราการจ่ายอากาศ (V_i) ให้กับระบบอยู่ในช่วง 200-700 l/min และมีอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า (T_i) คือ 60 $^{\circ}$C จากผลการทดลองพบว่าค่า Nu และ ΔP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ V_i เพิ่มมากขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบตาข่ายสแตนเลสทั้ง 2 ขนาด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าตาข่ายสแตนเลสขนาด PPI = 10 จะให้ค่า Nu ที่สูงกว่า PPI = 8 เพราะเนื้อของวัสดุเยอะกว่าจึงสามารถที่จะกักเก็บพลังงานจากอากาศร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังผิวท่อได้สูงขึ้นตามไปด้วย สำหรับค่า ΔP พบว่ากรณี PPI = 10 จะมีค่าสูงกว่า PPI = 8 เพราะมีขนาดของช่องว่างที่แคบกว่าจึงทำให้อากาศไหลผ่านได้ยากกว่า ซึ่งเป็นไปตามหลักการทางธรรมชาติทั่วไป กล่าวคือ ถ้ามีการกีดขวางการไหลจะส่งผลให้ ΔP สูงขึ้น

คำหลัก: เลขนัสเสลท์, ความดันตกคร่อม, วัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส, การพาความร้อนแบบบังคับ

Abstract

The aim of this experimental study was to compare the effect of two pores per inch (PPI), i.e., 8 and 10, on the Nusselt number (Nu) and pressure drop (ΔP) across the forced flow of fluid (air) in the circular pipe with installation of the 304 stainless wire-net type of porous insert. The air flow rate (V_i) was studied in the range of 200 – 700 l/min and the inlet temperature was kept at 60 $^{\circ}$C. From the experiment, it was found that the value of Nu and ΔP trended to increase as increasing V_i. In the comparison, effect of PPI, it was explicit that the Nu of PPI = 10 was greater than the case of PPI = 8. It was clarified by a higher material volume of PPI = 10 leading to gain more energy absorption from a hot air. Then, a higher heat transfer to the pipe surface was achieved. The ΔP of PPI = 10 was higher than the case of PPI = 8 due to the space size had narrower resulting to the air flowing through the

porous become more difficult. This was the natural phenomena because the increasing of ΔP was obtained if the fluid flow passed the obstruction.

Keywords: Nusselt number, Pressure drop, Wire-net porous media, Forced convection

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลังงาน เช่น ถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ที่มีปริมาณน้อยลงและมีราคาสูงขึ้น จึงได้มีการนำพลังงานจากแหล่งอื่นๆมาทดแทน ซึ่งมักจะออกมาในรูปแบบของพลังงานความร้อนแทบทั้งสิ้น ดังนั้นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจึงนับได้ว่ามีความสำคัญยิ่ง โดยเฉพาะการพาความร้อนโดยใช้อากาศเป็นขบวนการหนึ่งในการถ่ายเทความร้อน ซึ่งการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับด้วยการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนจึงถือเป็นแนวทางหนึ่งที่มีประโยชน์อย่างสูงทางวิศวกรรมและสามารถนำมาใช้งานได้จริงในทางอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การหล่อเย็นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ (Electronic cooling system) กระบวนการอบแห้ง (Drying processes) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Solid matrix heat exchanger) ท่อความร้อน (Heat pipe) [1] เป็นต้น เนื่องจากคุณลักษณะเด่นของวัสดุพรุน คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตรที่สูงกว่าวัสดุทึบทั่วๆ ไป ส่งผลให้การส่งถ่ายความร้อนในทั้งกรณีการนำและการพาความร้อนของอุปกรณ์ใด ๆ ที่มีการใช้วัสดุพรุนดียิ่งขึ้น ที่ผ่านมานักวิจัยได้พยายามทำการศึกษาทั้งการทดลองและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเพื่อใช้วัสดุพรุนในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยเฉพาะกรณีการพาความแบบบังคับที่มีของไหลไหลในท่อ

Alkam และ Al-Nimr [2] ได้ศึกษางานวิจัยโดยทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับการประยุกต์ติดตั้งวัสดุพรุนแบบเยื้องศูนย์กลางของท่อ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ (Double pipe heat exchanger) ผลการคำนวณพบว่าที่ความหนาที่เหมาะสมจะให้ค่าการเพิ่มประสิทธิภาพการพาความร้อนสูงที่สุด Angirasa และ Peterson [3] ได้นำเสนอทั้งการทดลองและทางทฤษฎีที่แสดงให้เข้าใจถึงการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับในช่องท่อด้วยอิทธิพลของการติดตั้งแหล่งความร้อนที่มีวัสดุพรุนแบบเส้นใย และนอกจากนี้ Angirasa [4] ยังได้ทำการทดลองเพิ่มเติมจาก Angirasa และ Peterson [3] โดยใช้วัสดุพรุนเส้นใยโลหะชนิดโฟมเซลล์เปิดมาติดตั้งในช่องท่อ ซึ่งโฟมเซลล์เปิดที่เลือกใช้มี 2 ค่าความพรุน (ε) คือ 0.97 และ 0.93 จากการศึกษาพบว่าค่า Nu ในท่อที่การติดตั้งวัสดุพรุนจะมีแนวโน้มสูงกว่ากรณีติดตั้งวัสดุทึบแบบแผ่นราบ และค่า Nu ของโฟมเซลล์เปิดที่ ε= 0.97 จะมีค่าต่ำกว่ากรณี ε = 0.93 Mohamad [5] ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลในท่อกรณีที่มีวัสดุพรุนเต็มท่อกับกรณีมีวัสดุพรุนเพียงบางส่วนของท่อ โดยชั้นวัสดุพรุนจะถูกใส่ที่แกนของท่อและให้การไหลเป็นแบบราบเรียบ โดยศึกษาถึงผลของความหนาของชั้นวัสดุพรุนที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นในช่วงค่า Darcy number 10^{-6} ถึง 10.0 จากการศึกษาพบว่าท่อที่ใส่วัสดุพรุนเพียงบางส่วน จะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนได้มากขึ้นและความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยกว่าสำหรับท่อที่มีวัสดุพรุนเต็มท่อ Pavel และ Mohamad [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของวัสดุพรุนชนิดโลหะที่ติดตั้งในท่อต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยท่อทดสอบมีอุณหภูมิที่ผิวและมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ซึ่งจะทำการทดลองในช่วง Reynolds numbers 1000-4500 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความพรุนและความหนาของวัสดุพรุนต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่การไหลในท่อไม่มีวัสดุพรุน พบว่าการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นและสอดคล้องกับความดันตกคร่อมด้วย ชัชวาล ปลื้มสุด และสุรชัย สนิทใจ [7] ได้ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของวัสดุพรุน ในการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลม โดยใช้ตาข่ายเป็นวัสดุพรุน ซึ่งมีค่าความพรุน (ε) อยู่ในช่วง 0.72 ถึง 0.86 จากการทดลองพบว่าการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อทดสอบมายังอากาศที่ไหลผ่านจะเพิ่มขึ้น 1.2 - 3.2 เท่าเมื่อเทียบกับท่อเรียบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาวัสดุพรุนมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนโดยเฉพาะกรณีการพาความแบบบังคับที่มีของไหลไหลในท่อ โดยจะ

ทำการศึกษาสำหรับการติดตั้งวัสดุพรุนที่มีค่าความพรุน 2 ค่า คือ 0.627 และ 0.503 ภายในท่อ อันจะเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. รายการสัญลักษณ์

A_s คือ พื้นที่ผิวท่อทดสอบ (m^2)

c_p คือ ค่าความจุความร้อนของอากาศ ($J/kg.K$)

T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อทดสอบ ($^\circ C$)

T_i คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าท่อทดสอบ ($^\circ C$)

T_s คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกท่อทดสอบ ($^\circ C$)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดสอบ (m)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ ($W/m^\circ C$)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2\,^\circ C$)

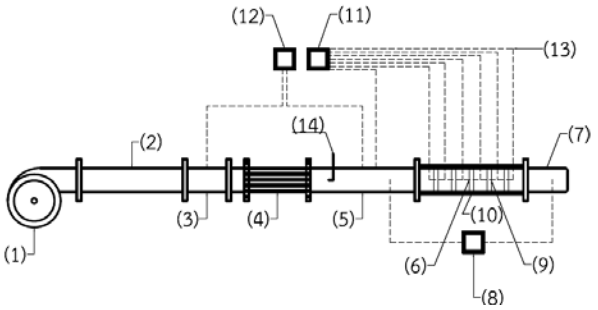
Pr คือ Prandtl number

Re คือ Reynolds number

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

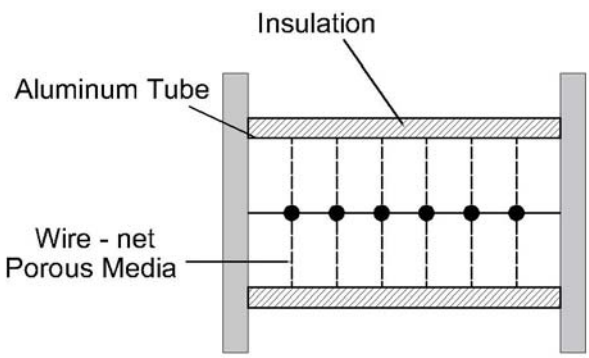
อุปกรณ์การทดลองจะถูกสร้างขึ้นดังแผนผังรูปที่ 1 เพื่อศึกษาการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลมที่มีการติดตั้งวัสดุพรุนชนิดตาข่าย ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ อากาศจะถูกเป่าโดยพัดลมเป่า (Blower) ให้ไหลผ่านท่อปรับการไหล (Setting flow pipe) โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยท่อฮีตเตอร์ (Heater pipe) จากนั้นอากาศก็ไหลผ่านท่อปรับการไหลให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอแนวตรง (Flow straightener) ไปยังช่วงท่อที่ทำให้ของไหลไหลเต็มท่อ (Developing flow pipe) ก่อนเข้าสู่ท่อทดสอบ (Test section) พร้อมทั้งมีการวัดความเร็วของของไหล (อากาศ) ด้วยพิทอททิ้ว (Pitot tube) เมื่ออากาศร้อนออกจาก Flow straightener สำหรับท่อทดสอบจะทำมาจากท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาเท่ากับ 100 mm ยาว 500 mm ผิวด้านนอกของท่อทดสอบจะหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว มีการเจาะรูขนาด 1.5 mm จำนวน 6 รู โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน คือ กลุ่มที่ 1 เจาะทะลุฉนวนถึงผิวด้านนอกของท่อทดสอบ และกลุ่มที่ 2 จะเจาะทะลุทั้งฉนวนและความหนาของท่อจนถึงผิวท่อด้านในของท่อทดสอบ เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของผิว ทั้งด้านนอกและด้านในอย่างละ 3 ตำแหน่ง ซึ่งจะเจาะให้ตรงกับตำแหน่งของวัสดุพรุน (Porous media) ที่ประกอบอยู่บนแกนเหล็กตรงและถูกสอดเข้าไปตามแนวแกนของท่อทดสอบ ดังรูปที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ยังทำการวัดความดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) ของท่อทดสอบด้วยไมโครมานอมิเตอร์ (Micro Manometer)

สำหรับวิธีการทดลองจะเริ่มจากติดตั้งวัสดุพรุนเข้าไปในท่อทดสอบ ปรับและจ่ายอากาศไหลเข้าสู่ท่อทดสอบ เปิดการทำงานของขดลวดไฟฟ้าที่ท่อฮีทเตอร์ เพื่อควบคุมอุณหภูมิทางเข้าของอากาศตามที่กำหนด รอจนอุณหภูมิทางเข้ามีค่าคงที่รวมทั้งอากาศมีการไหลอยู่ที่สภาวะคงที่ (Steady state) จึงทำการบันทึกผลการทดลอง ประกอบไปด้วยอุณหภูมิผิวภายในและภายนอกของท่อทดสอบและความเร็วของอากาศทางเข้า นอกจากนั้นยังบันทึกความดันตกคร่อม (ΔP) ที่เกิดขึ้นภายในท่อทดสอบและอุณหภูมิทางออกของท่อทดสอบ

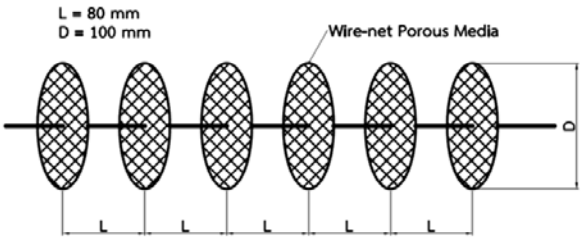


(1) Blower
(2) Setting Flow Pipe
(3) Inlet Heater
(4) Flow Straightener
(5) Developing Flow Pipe
(6) Test Section
(7) Setting Flow Pipe
(8) Micromanome
(9) Porous Media
(10) Insulation
(11) Data Logger
(12) Inlet Controller
(13) Thermocouple
(14) Pitot tube

รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 รายละเอียดท่อทดสอบ



รูปที่ 3 การติดตั้งวัสดุพรุน

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient, h) แบบบังคับภายในท่อกลมที่มีอุณหภูมิผิวท่อคงที่ จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$h = \frac{\dot{Q}}{A_s \Delta T_{\ln}} \qquad (1)$$

โดยที่ $\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_e - T_i)$, $\Delta T_{\ln} = \dfrac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_i)}$,

$$\Delta T_e = (T_s - T_e), \ \Delta T_i = (T_s - T_i) \qquad (2)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของงานวิจัยนี้จะนำเสนอในเทอมไร้หน่วยที่เรียกว่า เลขนัสเสลท์ (Nu) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} \qquad (3)$$

ค่าความพรุน (Porosity, ε) ของตาข่ายสแตน-เลสในงานวิจัยนี้ จะคำนวณจากโครงสร้างทางกายภาพที่มีลักษณะตาข่ายสานกัน การคำนวณหาค่าความพรุนจะพิจารณาจากเอาปริมาตรของเนื้อวัสดุ ซึ่งในที่นี้หาจากสัดส่วนเชิงปริมาตรของเนื้อวัสดุในหนึ่งหน่วย (Fraction of volumetric material per unit volume, F_V) หักออกจากสัดส่วนปริมาตรทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตร (Unit total volume) ซึ่งแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ [8]

$$\varepsilon = 1 - F_V \qquad (4)$$

5. ผลการทดลอง

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu_{exp} กับ สมการของ Gnielinski

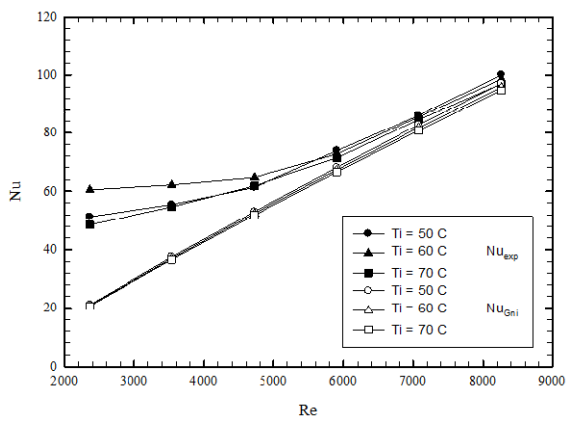
การเปรียบเทียบกับสมการของ Gnielinski จะนำเสนอในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการเทียบค่าของเลขนัสเสลท์ (Nu) จากการทดลองจริง (Nu_{exp}) กับสมการของ Gnielinski (Nu_{Gni}) ดังแสดงในสมการที่ 5 [9] กรณีท่อเปล่าที่อุณหภูมิทางเข้า 50, 60 และ 70 °C พบว่าเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์ (Re) มากกว่า 6,000 แนวโน้มของ Nu_{exp} จะลู่เข้าหา Nu_{Gni} แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์การทดลองของงานวิจัยนี้นี้มีความน่าเชื่อถือเมื่อ Re > 6,000 เนื่องจากสอดคล้องทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพกับสมการของ Gnielinski อย่างไรก็ตามหาก Re < 6,000 จะพบว่า Nu_{exp} สูงกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเลขเรย์โนลด์ระหว่าง 2,000 < Re < 6,000 รูปแบบการไหลของของไหลค่อนข้างมีความเปลี่ยนแปลงอย่างมากหรือมีพฤติกรรมเป็น Transition flow ซึ่งควบคุมลำบากและสมการของ Gnielinski มีพื้นฐานการสร้างมาจากการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนบ้างในระดับหนึ่ง ด้วยเหตุนี้ ผลการทดลองของงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่า Nu_{exp} ที่สูงกว่า ก็สามารถกล่าวได้ว่ามีความน่าเชื่อถือเพราะเส้นกราฟมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นคล้าย ๆ กับค่า Nu_{Gni}

$$Nu = \frac{(f/8)(\mathrm{Re}-1000)\,\mathrm{Pr}}{1+12.5(f/8)^{0.5}(\mathrm{Pr}^{2/3}-1)} \qquad (5)$$

โดย f คือ Friction factor ในท่อเรียบ

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

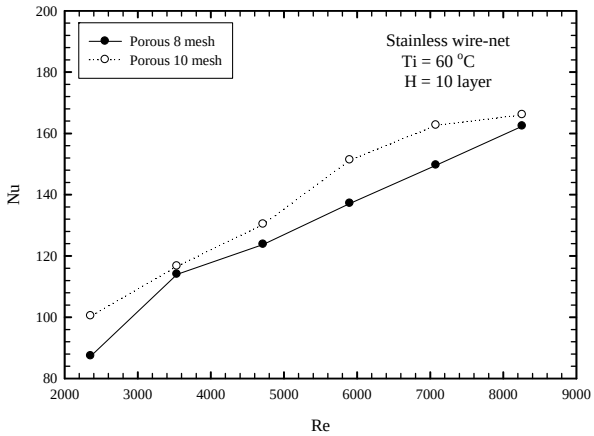
$$0.5 \le \mathrm{Pr} \le 2000 \ \text{และ} \ 3\times10^3 < \mathrm{Re} < 5\times10^6$$



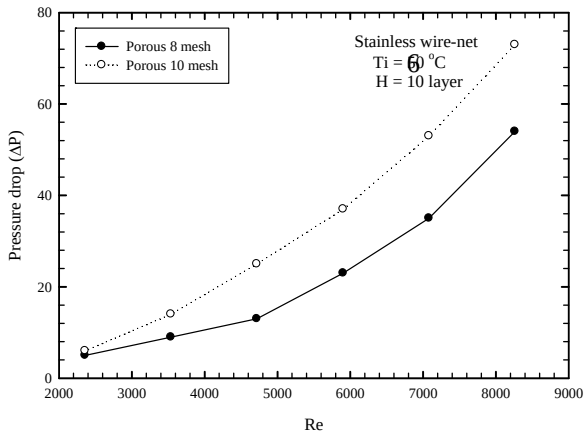
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ของ Nu ระหว่างผลการทดลองจริงกับสมการของ Gnielinski

5.2 การเปรียบเทียบกรณี PPI = 8 และ PPI = 10

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเปรียบเทียบระหว่างตาข่ายสแตนเลส PPI = 8 และ PPI = 10 เป็นการทดลองที่สภาวะ T_i = 60 ^{o}C และ H = 10 layer พบว่าพิจารณาที่ Re คงที่ใด ๆ ตาข่าย PPI = 10 มีค่า Nu ที่สูงกว่าตาข่าย PPI = 8 ทุกช่วง Re เนื่องมาจากตาข่าย PPI = 10 มีเนื้อวัสดุที่เยอะกว่า PPI = 8 ทำให้สามารถส่งถ่ายความร้อนโดยเฉพาะในรูปแบบการนำความร้อนจาก ตาข่ายไปยังผิวท่อได้ดีกว่า ส่งผลให้มีค่า Nu ที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด สำหรับ ΔP (รูปที่ 6) เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง PPI = 8 กับ PPI = 10 พบว่า ตาข่ายกรณี PPI = 10 จะมีค่าสูงกว่า ซึ่งมีเหตุผลคล้าย ๆ กับค่า Nu กล่าวคือ PPI = 10 จะมีเนื้อวัสดุที่มากกว่าทำให้ขวางการไหลของอากาศ ส่วน PPI = 8 จะมีช่องว่างที่มากกว่าจึงส่งผลกระทบต่อการไหลน้อยกว่า



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re กรณีเปรียบเทียบ PPI ระหว่าง 8 กับ 10



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔP กับ Re กรณีเปรียบเทียบ PPI ระหว่าง 8 กับ 10

6. สรุปผลการทดลอง

1. ค่าเลขนัสเสลท์ที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้ (Nu_{exp}) กรณีท่อเปล่า เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าเลขนัสเสลท์ที่ได้จากสมการของ Gnielinski (Nu_{Gni}) จะมีแนวโน้มสอดคล้องกันกับสมการของ Gnielinski โดยเฉพาะเมื่อ Re>6,000

2. ค่าเลขนัสเสลท์ (Nu) ของตาข่ายสแตนเลส PPI = 10 จะมีค่าที่สูงกว่า PPI = 8 เพราะเนื้อของวัสดุมากกว่าจึงสามารถที่จะการกักเก็บความร้อนได้มากกว่าตาข่ายกรณี PPI = 10 และความดันตกคร่อม (ΔP) กรณี PPI =10 จะมีค่าสูงกว่า PPI = 8 เพราะว่า PPI = 10 จะมีเนื้อวัสดุที่มากกว่าทำให้ขวางการไหลของอากาศ ส่วน PPI = 8 นั้นจะมีช่องว่างที่มากกว่าจึงส่งผลกระทบต่อการไหลน้อยกว่า

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายศักรินทร์ ทรงศิริเลศ, นายธนเสฏฐ จิระสุโข, นายชาญชัย ลันขุนทด ที่ช่วยทำการวิจัยในครั้งนี้ และห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (Development In Technology of Porous Material Research Laboratory, DiTo-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] K. Vafai. (2000). *Handbook of Porous Media*. New York: Marcel Dekker, Inc.

[2] M.K. Alkam and M.A. Al-Nimr. (1999). Improving the performance of double-pipe heat exchanger by using porous substrates, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 42, pp. 3609–3618.

[3] D. Angirasa and G. P. Peterson. (1999). Forced convection heat transfer augmentation in channel with a localized heat source using

fibrous materials, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, pp.1-7.

[4] D. Angirasa. (2002). Experimental investigation of forced convection heat transfer augmentation with metallic fibrous materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 919–922.

[5] A.A. Mohamad. (2003). Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media. Part I: constant wall temperature, *Int. J. Thermal Science*, Vol. 42, pp. 385–395.

[6] B. I. Pavel, and A. A. Mohamad. (2004). Experimental investigation of the potential of metallic porous inserts in enhancing forced convection heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 4939–4952.

[7] ชัชวาล ปลื้มสุด และสุรชัย สนิทใจ. (2550). อิทธิพลของวัสดุพรุนในการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลม, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21*, จังหวัดชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550, TSF-16.

[8] บัณฑิต กฤตาคม. (2553). หัวพ่นไฟวัสดุพรุนโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 21 ฉบับที่ 2, หน้า 85 – 92

[9] Y.A. Cengel, (2011). *Heat and Mass Transfer* (4rd ed.), New York: McGraw Hill.