

อิทธิพลของวัสดุพอร์นในการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลม Effect of Porous Media on Forced Convective Heat Transfer Enhancement in a Circular Pipe

ชัชวาล ปลื้มสุต¹ และ สุรชัย สนิทใจ²

ห้องปฏิบัติการเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทรศัพท์: 02-470-9109, โทรสาร: 02-470-9111, Email: surachai.san@kmutt.ac.th²

Chatchawan Pluemsud¹ and Surachai Sanitjai²

Thermodynamics and Heat Transfer Laboratory (THT)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Prachauthit Road, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140 Thailand

Tel: 02-470-9109, Fax: 02-470-9111, Email: surachai.san@kmutt.ac.th²

บทคัดย่อ: การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อกลมที่บรรจุด้วยวัสดุพอร์น โดยได้ศึกษาถึงอิทธิพลของชนิดของวัสดุพอร์น (thermal conductivity) (k_p) ในช่วง $0 < k_p/k_f < 6200$, อิทธิพลของค่า porosity (ϵ) ของวัสดุพอร์น ในช่วง $0.7217 < \epsilon < 0.8664$, อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพอร์น (L) ในช่วง $0.6 < L/D < 1$ และอิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุพอร์น (t) ในช่วง $0.012 < t/D < 0.12$ ในช่วง Reynolds number ตั้งแต่ 3000 ถึง 9000 โดยมี thermal boundary condition ของผิวทดสอบเป็นแบบ constant wall temperature จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อ thermal conductivity และความหนาของชั้นวัสดุพอร์นเพิ่มขึ้น และเมื่อ porosity ของวัสดุพอร์นและระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพอร์นลดลง

Abstract: The objective of this investigation is to study convective heat transfer enhancement in a circular pipe fitted with porous media. The effects of porous media thermal conductivity (k_p) in the range of $0 < k_p/k_f < 6200$, porosity (ϵ) in the range of $0.7217 < \epsilon < 0.8664$, the distance between the porous layer (L) in the range of $0.6 < L/D < 1$ and the porous layer thickness (t) in the range of $0.012 < t/D < 0.12$ are examined in the Reynolds number range of 3000 - 9000. A thermal boundary condition of constant wall temperature is applied in this study. The experimental results show that the convective heat transfer

coefficient is enhanced due to increasing of the thermal conductivity and the porous layer thickness and decreasing of porosity and the distance between the porous layers.

Keywords: Heat transfer enhancement, Porous media, Convective heat transfer, Circular pipe

1. บทนำ

วัสดุพอร์นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนในด้านวิศวกรรมหลายอย่าง เช่น การระบายความร้อนออกจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อนในท่อไฟของหม้อไอน้ำ รวมถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงแบบขนาดกะทัดรัด ทั้งนี้เนื่องจากค่าการนำความร้อนของวัสดุพอร์นมีค่าสูงกว่าค่าการนำความร้อนของของไหลโดยเฉพาะสารทำงานที่เป็นแก๊ส งานวิจัยนี้ได้นำเอาวัสดุพอร์นมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อน อันจะเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้วัสดุพอร์นในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนในท่อน้อย เช่น Bogdon และ Mohamad [1] ได้ศึกษาถึงผลของวัสดุพอร์นในการส่งเสริมการพาความร้อน โดยการใส่วัสดุพอร์นเข้าไปในท่อทดสอบที่มีอุณหภูมิผิวดังที่ (constant wall temperature) และผิวท่อทดสอบที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (constant heat flux) โดยทำการทดลองในช่วง Reynolds number: 1000 – 4500 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความพอร์น (porosity) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุพอร์นต่อ

การส่งเสริมการพาความร้อน ผลการทดลองพบว่าการใส่วัสดุพรุนเข้าไปในท่อทดสอบทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังท่อทดสอบและแก๊สที่ไหลผ่านสูงขึ้นอย่างมาก

Alkam และ Al-Nimr [2] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของวัสดุพรุนที่มีต่อสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ โดยใช้การคำนวณเชิงตัวเลข ในการทำนายผลที่เกิดจากใส่วัสดุพรุนเพื่อเพิ่มสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ผลการศึกษาพบว่าการติดตั้งวัสดุพรุนที่ทางเข้าและทางออกของท่อชั้นในจะช่วยให้สัมประสิทธิ์พาความร้อนระหว่างผนังท่อกับของไหลสูงขึ้น

Fu และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของระบบการไหลของแก๊สแบบกลับไปมา (Oscillating Flow) เปรียบเทียบกับการไหลแบบคงที่ (Steady) โดยมีวัสดุพรุนขวางการไหลของแก๊ส จากการทดลองพบว่าผลของการไหลของแก๊สแบบกลับไปมา ทำให้การกระจายอุณหภูมิที่ผิวท่อทดสอบมีค่าคงที่มากกว่าและการถ่ายเทความร้อนในท่อทดสอบที่มีวัสดุพรุนมีค่าสูงกว่าการไหลแบบคงที่โดยที่ไม่มีวัสดุพรุน

Bogdan และ Mohamad [4] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลในท่อซึ่งมีวัสดุพรุนอยู่เต็มท่อกับกรณีที่มีวัสดุพรุนอยู่บางส่วนในท่อ โดยชั้นวัสดุพรุนถูกสวมเข้ากับแกนกลางท่อ การไหลเป็นแบบ Laminar flow โดยศึกษาถึงผลของการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพรุนที่ใส่เข้าไปและแรงดันตกคร่อม (Pressure drop) ที่เกิดขึ้น ในช่วงค่า Darcy number $10^{-6} - 10.0$ การให้ความร้อนเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ จากการศึกษาพบว่าท่อซึ่งมีวัสดุพรุนอยู่บางส่วนจะมีข้อดีอยู่ 2 ประการคือ ช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากขึ้น และความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากรณีของท่อที่มีวัสดุพรุนอยู่เต็มท่อ

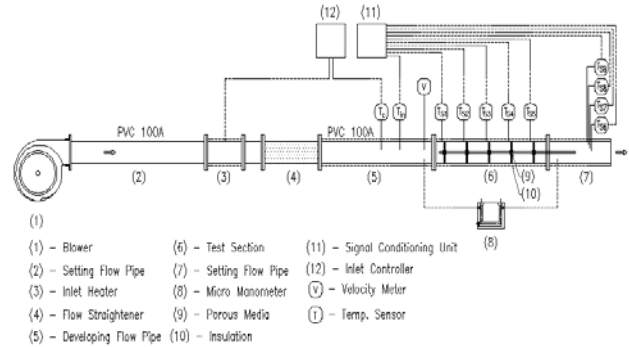
เนื่องจากงานวิจัยที่ใช้วัสดุพรุน และความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนในท่อน้อย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึง

1. อิทธิพลของชนิดของวัสดุพรุน (thermal conductivity, k_p) ในช่วง $0 < k_p/k_f < 6200$
2. อิทธิพลของค่า porosity (ϵ) ของวัสดุพรุน ในช่วง $0.7217 < \epsilon < 0.8664$
3. อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพรุน (L) ในช่วง $0.6 < L/D < 1$
4. อิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุพรุน (t) ในช่วง $0.012 < t/D < 0.12$

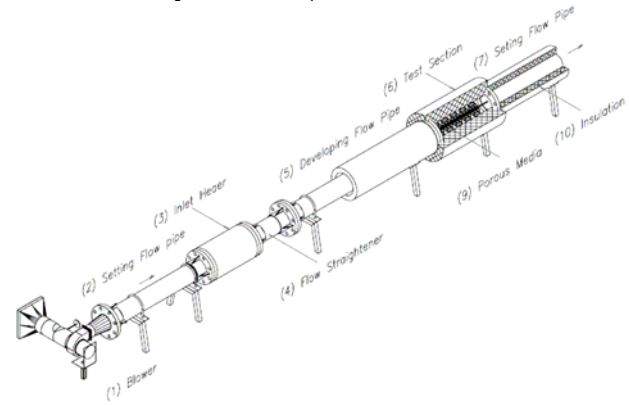
2. อุปกรณ์ทดลองและวิธีการทดลอง

อุปกรณ์สำหรับทดลองถูกสร้างขึ้นโดยมีแผนผังดังรูปที่ 1 โดยที่อากาศจะถูกเป่าโดย blower (1) ให้ไหลผ่าน setting flow pipe (2) โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วย inlet heater (3) จากนั้นอากาศก็ไหลผ่าน flow straightener (4) ไปยัง developing flow pipe (5) แล้วไหลเข้าสู่ท่อทดสอบ (test section) (6) ไปออกที่ setting flow pipe (7) ท่อทดสอบเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ยาว 500 มม. โดยท่อทดสอบจะถูกให้ความร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าขนาด 200 วัตต์ ผิวด้านนอกของท่อทดสอบหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว หนาประมาณ 100 มม. ส่วนบนของท่อทดสอบจะมีการเจาะรูขนาด 2 มม. จำนวน 5

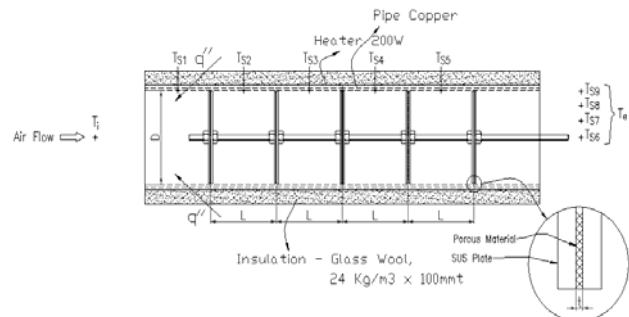
รู เพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิตรงจุดต่างๆ วัสดุพรุน (Porous media) (9) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. ประกอบอยู่บนแกนเหล็กตรง จะถูกสอดเข้าไปตามแนวแกนของท่อที่ระยะต่างๆ การวัดแรงดันตกคร่อมระหว่างท่อทดสอบจะใช้ Micro manometer (8) แบบจำลองของอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 อุปกรณ์การทดลอง



วิธีการทดลองเริ่มจากใส่วัสดุพรุนเข้าไปในท่อทดสอบ ปรับและวัดค่า Reynolds number ที่ต้องการโดยใช้ Velocity meter (V), เปิดการทำงานของขดลวดไฟฟ้า Inlet heater (3) ที่อุปกรณ์ Inlet controller (12) เพื่อควบคุมอุณหภูมิทางเข้าของอากาศ, ป้อนกระแสไฟฟ้าที่ต้องการให้กับขดลวดไฟฟ้าของท่อทดสอบโดยใช้ DC power supply, ตรวจสอบอุณหภูมิทางเข้า, อุณหภูมิผิวท่อทดสอบและอุณหภูมิทางออกของท่อทดสอบโดยใช้ Signal conditioning unit (11) ต่อเข้ากับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ เมื่ออุปกรณ์และอุณหภูมิแต่ละจุดคงที่แล้วจึงบันทึกผลการทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ การบันทึกผลจะทำเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวท่อทดสอบคงที่ 70°C โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะวัดไม่เกิน $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ บันทึกผลการทดลองทั้งหมด 200 ค่าแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย โดยเวลาที่ใช้ในการทดลองต่อครั้งประมาณ 1 – 3 ชั่วโมง พร้อมทั้งจะบันทึกผลของแรงดันตกคร่อมระหว่างท่อทดสอบโดยใช้ Micro manometer (8)

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อกลมที่มีอุณหภูมิผิวท่อคงที่ ($T_s = \text{constant}$) โดยสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ได้ดังนี้ [5]

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_e - T_i)}{(A_s \Delta T_{\ln})} \quad (1)$$

โดยที่

$$\Delta T_{\ln} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_i)} \quad (2)$$

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

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะนำเสนอในเทอมไร้มิติของค่า Nusselt Number ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

ค่าความพรุนของวัสดุพรุน (porosity, ε) คือสัดส่วนของปริมาตรช่องว่าง (space_volume) ต่อปริมาตรทั้งหมด (total_volume) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\varepsilon = 1 - VF \quad (4)$$

โดยที่ Volume fraction (VF)

$$VF = \frac{\text{Porous_volume}}{\text{Total_volume}} \quad (5)$$

4. ผลการทดลอง

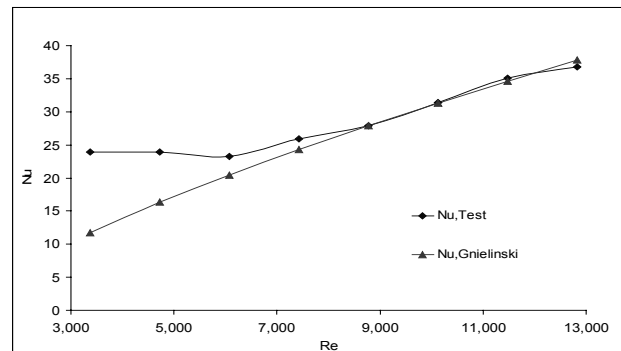
เนื่องจากการมีการสร้างอุปกรณ์การทดลองขึ้นมาใหม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดลองหาค่า Nusselt number เพื่อเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ ผลการทดลองในกรณีท่อเรียบในรูปของ Nusselt number ของงานวิจัยนี้ ได้เปรียบเทียบกับสมการของ “Gnielinski” [5] ในสมการ (6) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสมการที่ (6) นี้มีความคลาดเคลื่อน $< 10\%$

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)} \quad (6)$$

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

$$0.5 \leq Pr \leq 2000 \text{ และ}$$

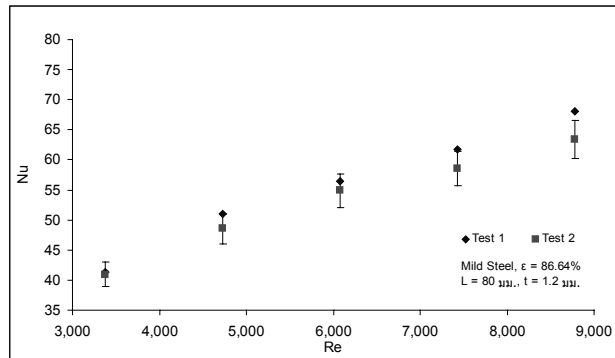
$$3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$$



รูปที่ 4 เปรียบเทียบค่า Nusselt number จากการทดลองกับสมการ (6) ของ Gnielinski [5]

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4 ค่า Nusselt number จากการทดลองในช่วง $3000 < Re < 6000$ มีค่าต่างจากการค่าที่ได้จากการทำนายของสมการที่ (6) นั้นสูง สืบเนื่องมาจากการทดลองในช่วง Reynolds number นี้การไหลในท่อเป็นแบบ transition flow ส่วนในช่วง $8000 < Re < 13000$ ค่า Nusselt number ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างจากสมการ (6) ไม่เกิน 2% ซึ่งสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าอุปกรณ์และวิธีการทดลองนั้นสามารถนำมาใช้เพื่อการศึกษาถึงอิทธิพลของวัสดุพรุนต่อการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับในท่อกลมได้

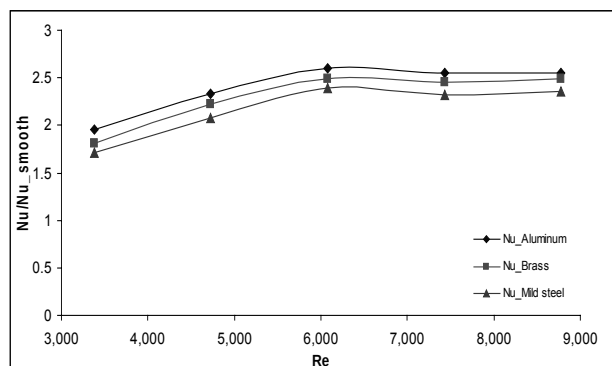
เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองจึงได้ทำการทดลองในวันและเวลาต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน คือ วัสดุพรุนทำจากเหล็กเหนียว, ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$ และความหนาของวัสดุพรุน (t) = 1.2 มม. ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า ผลการทดลองครั้งที่ 1 (Test 1) และ ผลการทดลองครั้งที่ 2 (Test 2) มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5%



รูปที่ 5 ความคลาดเคลื่อนของ Nusselt number จากการทดลองซ้ำ

อิทธิพลของชนิดวัสดุพรุน

อิทธิพลของชนิดของวัสดุพรุนหรือค่าการนำความร้อน (k) ต่อการส่งเสริมการพาความร้อนได้ถูกศึกษา โดยใช้วัสดุพรุน 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม ($k = 164 \text{ W/mK}$) ทองเหลือง ($k = 111 \text{ W/mK}$) และ เหล็กเหนียว ($k = 43 \text{ W/mK}$) โดยผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของ Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีการใส่วัสดุพรุนชนิดต่างๆ ต่อค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ (smooth pipe) (Nu/Nu_{smooth}) ที่ Reynolds number ต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าการใส่วัสดุพรุนลงไปในท่อจะทำให้การพาความร้อนเพิ่มขึ้นทุกวัสดุ โดยที่วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงจะส่งเสริมการพาความร้อนได้ดีกว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ซึ่งการส่งเสริมการพาความร้อนของวัสดุพรุนทั้งสามชนิดทำให้ค่า Nusselt number เพิ่มขึ้น 1.7 – 2.6 เท่าของค่า Nusselt number ของท่อเรียบ และการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง $3000 < Re < 6000$ ส่วนการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนเมื่อ $Re > 6000$ จะมีค่าค่อนข้างคงที่ แสดงถึงประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ ถึงแม้การไหลของแก๊สภายในท่อจะมากขึ้นก็ตาม

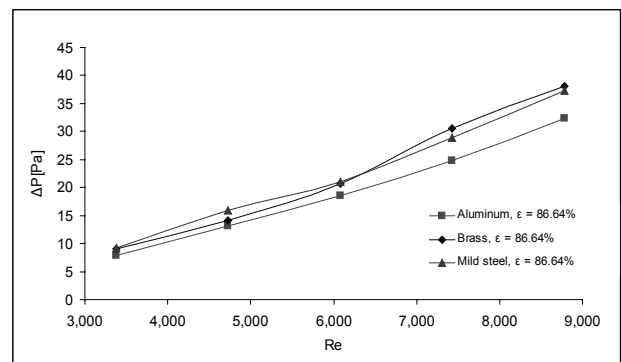


รูปที่ 6 อิทธิพลของชนิดของวัสดุพรุนต่อการส่งเสริมการพาความร้อน
ที่ $L = 80$, $\varepsilon = 86.64\%$ และ $t = 1.2$ มม.

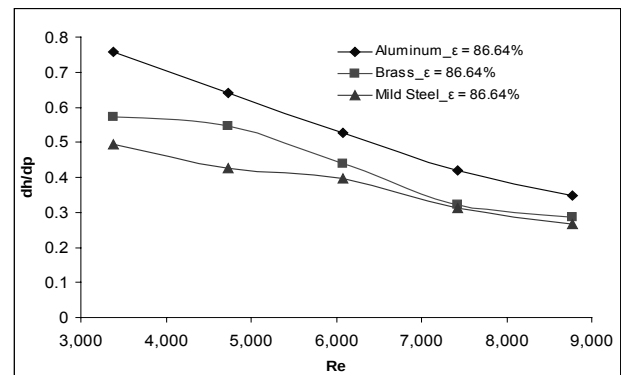
ผลจากการใส่วัสดุพรุนเข้าไปในท่อเรียบ (smooth pipe) ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม (pressure drop) ระหว่างท่อทดสอบมีค่ามากขึ้นโดยแรงดันตกคร่อมจะสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า Reynolds number ผล

ของแรงดันตกคร่อมที่วัดได้ของวัสดุทั้งสามชนิดมีค่าเฉลี่ยต่างกัน $< 15\%$ ดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 8 แสดงสัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุพรุนที่เพิ่มขึ้นต่อแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น (dh/dp) ของวัสดุพรุนชนิดต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่า dh/dp มีค่าลดลงเมื่อ Reynolds number สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการส่งเสริมการพาความร้อนโดยวัสดุพรุนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการส่งเสริมการพาความร้อนโดยคุณลักษณะการไหลที่มีความปั่นป่วนมากขึ้น (highly turbulent flow) ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อทดสอบมายังอากาศที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่น้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมระหว่างท่อทดสอบของวัสดุพรุน นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงจะให้ค่า dh/dp สูง ดังนั้นในการใช้งานควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง



รูปที่ 7 อิทธิพลของชนิดของวัสดุพรุนต่อ Pressure drop
ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$ และ $t = 1.2$ มม.



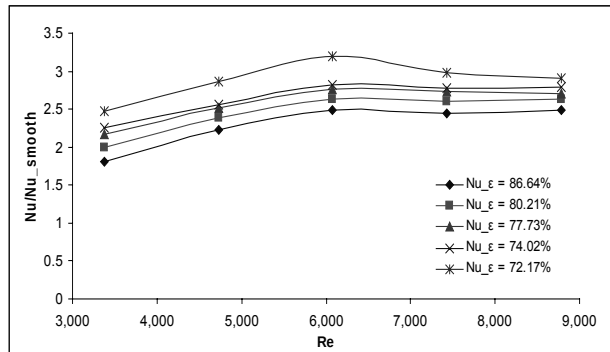
รูปที่ 8 ค่า dh/dp ของวัสดุพรุนชนิดต่าง
ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$ และ $t = 1.2$ มม.

อิทธิพลของค่า porosity (ε) ของวัสดุพรุน

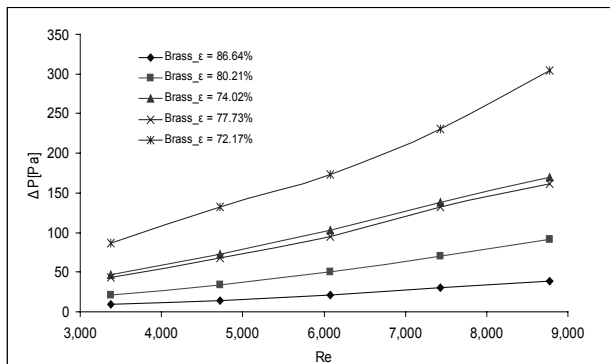
สำหรับอิทธิพลของค่า porosity ของวัสดุพรุนต่อการส่งเสริมการพาความร้อนนั้นได้ศึกษาโดยใช้วัสดุพรุนทองเหลืองที่มีค่าความพรุนต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่มีค่า ε ต่างๆ กัน ต่อค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ (smooth pipe) ที่ Reynolds number ต่างๆ จากรูปเห็นได้ว่าเมื่อ

ค่า porosity ลดลง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อทดสอบมายังอากาศที่ไหลผ่านได้เพิ่มขึ้นกว่า 1.8 – 3.2 เท่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ ทั้งนี้เนื่องจากค่า porosity ที่ลดลงส่งผลให้ปริมาณเนื้อวัสดุพูนที่ช่วยในการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น

อิทธิพลของค่า porosity ต่อแรงดันตกคร่อม (pressure drop, ΔP) ที่ค่า Reynolds number ต่างๆแสดงในรูปที่ 10 จากรูปเห็นได้ว่าเมื่อค่า porosity ลดลง ปริมาณเนื้อของวัสดุพูนที่ไปขวางการไหลของอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมระหว่างท่อทดสอบสูงขึ้น

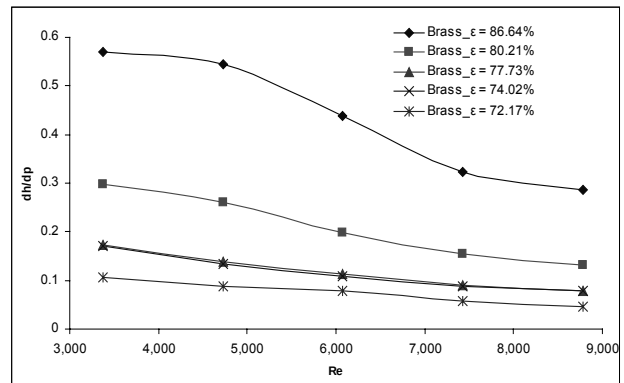


รูปที่ 9 อิทธิพลของค่า porosity ต่อการส่งเสริมการพาความร้อน
ที่ $L = 80$ มม., $72.17\% < \text{porosity } (\epsilon) < 86.64\%$
และ $t = 1.2$ มม., วัสดุทำจากทองเหลือง



รูปที่ 10 ผลของค่า porosity ต่อค่า Pressure drop
ที่ $L = 80$ มม., $72.17\% < \text{porosity } < 86.64\%$
และ $t = 1.2$ มม., วัสดุทำจากทองเหลือง

รูปที่ 11 แสดงสัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุพูนที่เพิ่มขึ้นต่อแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น (dh/dp) ที่ค่า porosity ต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่า dh/dp มีค่าลดลงเมื่อ Reynolds number สูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงการส่งเสริมการพาความร้อนโดยวัสดุพูนมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่งเสริมการพาความร้อนโดยคุณลักษณะการไหลที่มีความปั่นป่วนมากขึ้น (highly turbulent flow) เช่นเดียวกับอิทธิพลของชนิดของวัสดุพูน นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุพูนที่มีค่าความพูนสูงจะให้สัดส่วน dh/dp สูงกว่าวัสดุพูนที่มีค่าความพูนต่ำ ดังนั้นในการใช้งานควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า porosity สูง

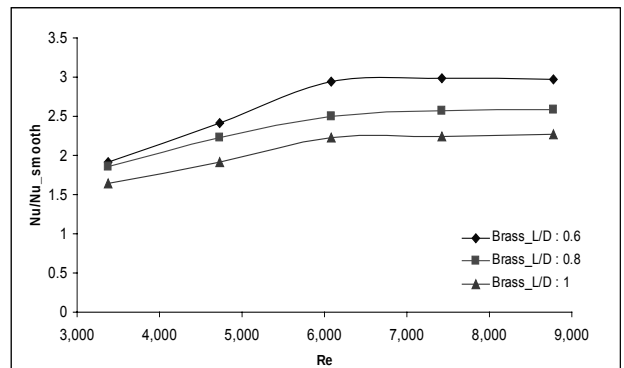


รูปที่ 11 ผลของค่า porosity ต่อค่า dh/dp

ที่ $L = 80$ มม., $72.17\% < \text{porosity } (\epsilon) < 86.64\%$
และ $t = 1.2$ มม., วัสดุทำจากทองเหลือง

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพูน (L)

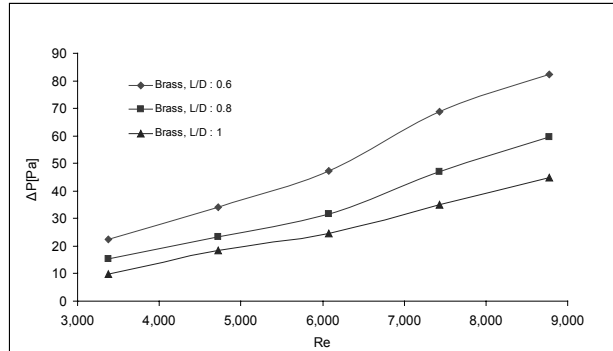
สำหรับอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพูนต่อการส่งเสริมการพาความร้อนได้ทำการศึกษาโดยใช้วัสดุพูนทองเหลือง ที่มีค่า $\epsilon = 86.64\%$ และ $t = 1.2$ มม. โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่ระยะห่าง (L) ของวัสดุพูนต่างกันต่อค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ (smooth pipe) ที่ Reynolds number ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 12 จากรูปเห็นได้ว่าอิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพูน นั้นจะส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจากผิวภายในท่อมายังอากาศที่ไหลผ่านได้เพิ่มขึ้น 1.6 – 3.0 เท่าของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ระยะห่าง L/D ต่ำจะมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ L/D สูง เนื่องจากที่ระยะห่าง L/D ต่ำจำนวนชั้นของการใส่วัสดุพูนมีมากกว่าที่ L/D สูง ทำให้มีปริมาณเนื้อวัสดุพูนสูงกว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนจึงสูงกว่า อย่างไรก็ตามค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง $3000 < Re < 6000$ และจะมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อ $Re > 6000$ สำหรับทุก L/D



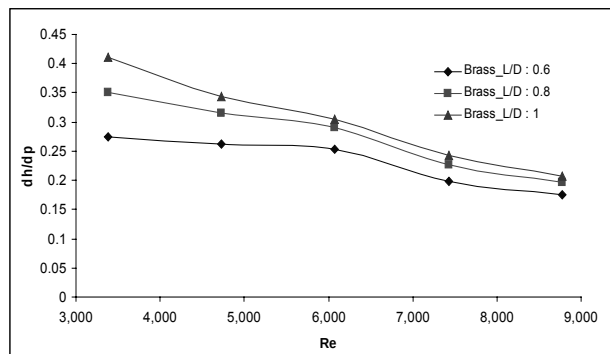
รูปที่ 12 อิทธิพลของ L/D ต่อการส่งเสริมการพาความร้อน
ที่ $0.6 < L/D < 1$, $\epsilon = 86.64\%$ และ $t = 1.2$ มม.

อิทธิพลของระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพูน ที่ Reynolds number ต่างๆ ต่อแรงดันตกคร่อมแสดงในรูปที่ 13 จากรูปเห็นได้ว่าเมื่อ L/D ต่ำ ให้ค่าแรงดันตกคร่อมสูง เนื่องจากมีจำนวนชั้นของวัสดุพูนสูงขึ้น

รูปที่ 14 แสดงสัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุพูนที่เพิ่มขึ้นต่อแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น (dh/dp) ที่ค่า L/D ต่างๆ จากรูปพบว่าวัสดุพูนที่มีค่า L/D สูงจะให้สัดส่วน dh/dp สูงกว่าวัสดุพูนที่มีค่า L/D ต่ำ ดังนั้นในการใช้งานควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า L/D สูง ในช่วง $Re < 6000$ นอกจากนี้อิทธิพลของ L/D ต่อ dh/dp จะลดลงเมื่อ $Re > 6000$



รูปที่ 13 ผลของ L/D ต่อค่า Pressure drop
ที่ $\varepsilon = 86.64\%$, $0.6 < L/D < 1$ และ $t = 1.2$ มม.



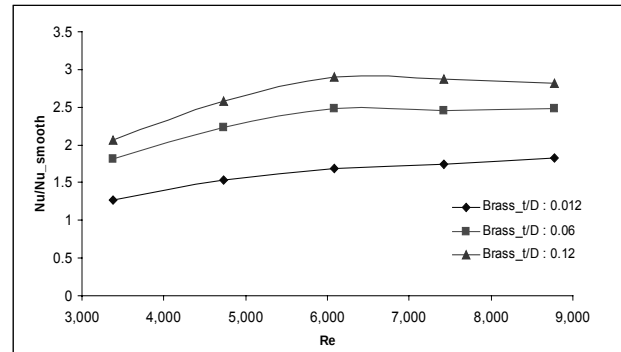
รูปที่ 14 ผลของ L/D ต่อค่า dh/dp
ที่ $\varepsilon = 86.64\%$, $0.6 < L/D < 1$ และ $t = 1.2$ มม.

อิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุพูน (t)

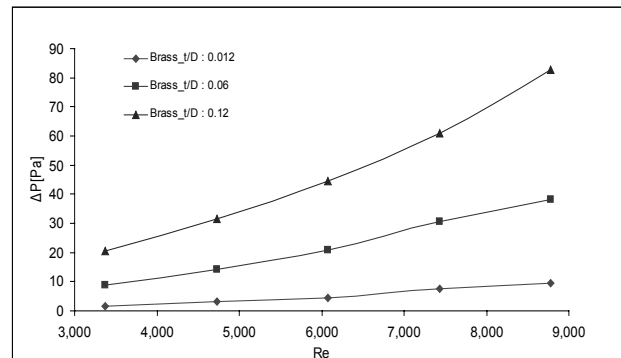
อิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุพูนต่อการส่งเสริมการพาความร้อนได้ทำการศึกษาโดยใช้วัสดุพูนทองเหลือง ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$ โดยผลการทดลองจะเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนภายในท่อที่ความหนาของวัสดุพูนต่างกันต่อค่า Nusselt number ของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ (smooth pipe) ที่ Reynolds number ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 15 จากรูปเห็นว่าอิทธิพลของความหนาของชั้นวัสดุพูน นั้นจะส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนจากผิวภายในท่อมายังอากาศที่ไหลผ่านได้เพิ่มขึ้น 1.2 – 2.9 เท่าของการถ่ายเทความร้อนในท่อเรียบ โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ระยะห่าง t/D สูงจะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ t/D ต่ำ การเพิ่มความหนาของชั้นวัสดุพูนทำให้ปริมาณเนื้อวัสดุพูนในการส่งเสริมการการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อมายังแก๊สที่ไหลผ่านได้มากขึ้น

อิทธิพลของ t/D ต่อแรงดันตกคร่อม ที่ค่า Reynolds number ต่างๆ แสดงตามรูปที่ 16 จากรูปเห็นว่าเมื่อ t/D สูง ค่า ΔP สูงขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณเนื้อวัสดุพูนมากขึ้น

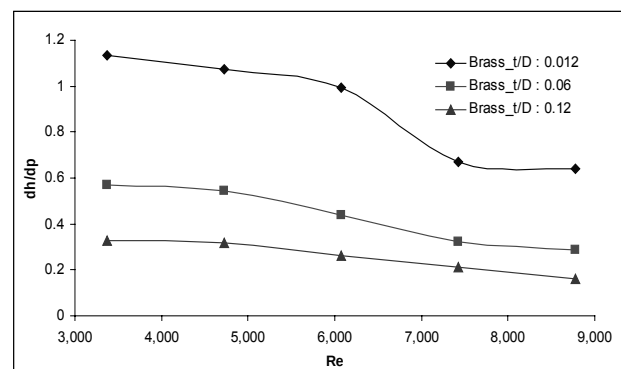
รูปที่ 17 แสดงสัดส่วนของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของวัสดุพูนที่เพิ่มขึ้นต่อแรงดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้น (dh/dp) ที่ค่า t/D ต่างๆ จากรูปพบว่าวัสดุพูนที่มีค่า t/D ต่ำจะให้สัดส่วน dh/dp สูงกว่าวัสดุพูนที่มีค่า t/D สูง ดังนั้นในการใช้งานควรเลือกใช้วัสดุที่มีค่า t/D ต่ำ



รูปที่ 15 อิทธิพลของ t/D ต่อการส่งเสริมการพาความร้อน
ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$



รูปที่ 16 ผลของ t/D ต่อค่า Pressure drop ที่ $L=80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$



รูปที่ 17 ผลของ t/D ต่อค่า dh/dp ที่ $L = 80$ มม., $\varepsilon = 86.64\%$

สรุป

การนำวัสดุพรุนใส่เข้าไปในท่อทดสอบมีผลต่อการส่งเสริมการพาความร้อนแบบบังคับภายในท่อกลม โดยทำให้การถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อทดสอบมายังอากาศที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้น 1.2 – 3.2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับท่อเรียบ ดังนั้นการใช้วัสดุพรุนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนได้มากขึ้น การเลือกรูปแบบที่เหมาะสมมาประยุกต์ใช้งานจึงเป็นสิ่งสำคัญ จากการศึกษาทดลองนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชนิดของวัสดุพรุนหรือค่าการนำความร้อนจะมีอิทธิพลต่อการส่งเสริมการพาความร้อนโดย ค่าการนำความร้อนของวัสดุพรุนสูงจะทำให้การส่งเสริมการพาความร้อนสูงขึ้น
2. ค่า porosity ($\mathcal{E}$) ของวัสดุพรุนจะมีอิทธิพลต่อการส่งเสริมการพาความร้อน โดยค่า $\mathcal{E}$ ต่ำจะทำให้การส่งเสริมการพาความร้อนได้สูงกว่าที่ค่า $\mathcal{E}$ สูง
3. ระยะห่างระหว่างแผ่นวัสดุพรุน (L) มีอิทธิพลต่อการส่งเสริมการพาความร้อน โดยค่า L/D ต่ำจะทำให้การส่งเสริมการพาความร้อนได้สูงกว่าที่ค่า L/D สูง
4. ความหนาของชั้นวัสดุพรุน (t) จะมีผลต่อการส่งเสริมการพาความร้อน โดยค่า t/D สูงจะทำให้การส่งเสริมการพาความร้อนได้สูงกว่าที่ค่า t/D ต่ำ
5. เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของ dh/dp ต่ออิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนทั้งสี่อิทธิพล พบว่าในการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนในการส่งเสริมการพาความร้อนในท่อ ควรเลือกวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง, มี porosity สูง, มี L/D ต่ำ และมีค่า t/D ต่ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ศนวท) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในงานวิจัยครั้งนี้

รายการสัญลักษณ์

$\mathcal{E}$ = ค่าความพรุนของวัสดุ (porosity)

ΔT_{lm} = Logarithmic mean temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)

A_s = พื้นที่ผิวท่อทดสอบ (m^2)

c_p = ค่าความจุความร้อนของอากาศ (J/kg.K)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดสอบ (m)

f = Friction factor ในท่อเรียบ

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

k_p = ค่า thermal conductivity ของวัสดุพรุน (W/m K)

k_f = ค่า thermal conductivity ของอากาศ (W/m K)

L = ระยะระหว่างวัสดุพรุน (m)

$\dot{m}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศในท่อ (kg/s)

t = ความหนาของวัสดุพรุน (m)

T_s = อุณหภูมิที่ผิวท่อทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

T_i = อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าท่อทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

T_e = อุณหภูมิของอากาศที่ทางออกท่อทดสอบ ($^{\circ}\text{C}$)

VF = Volume fraction

Nu = Nusselt Number

Re = Reynolds Number

Pr = Prandtl number

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bogdon, I.P. and A. A. Mohamad, 2004, "Experimental Investigation of the Potential of Metallic Porous Inserts in enhancing Forced Convection Heat Transfer," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 126, pp. 540–545.
- [2] Alkam, M. K., and M. A. Al-Nimr, 1999, "Improving the Performance of Double-Pipe Heat Exchanger by Using Porous Substrates," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 3609–3618.
- [3] Fu, H. L., K. C. Leong, X. Y. Huang, and C. Y. Liu, 2001, "An Experimental Study of Heat Transfer of a Porous Channel Subjected to Oscillating Flow", ASME J. Heat Transfer, Vol. 123, pp. 162–170.
- [4] Bogdan I. P. and A.Mohamad, 2004, "An experimental and numerical study on heat transfer enhancement for gas heat exchangers fitted with porous media", Int.J.Heat and Mass Transfer 47, pp.4939-4952.
- [5] F. P. Incropera and P. Dewitt, 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 5th ed, John Wiley & Sons, New York.