

การหาค่าการซึมผ่านของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสโดยใช้สมการฟอชไฮเมอร์

The Finding on Permeability of Stainless Wire-Net Porous Media by Using Forchheimer Equation

รพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ¹, สาม ศรีสุโร¹, อนุชา กล้าน้อย², ญาดา พรภักดี² และบัณฑิต ฤทธาคุม^{3*}

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

³ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน

(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DiTo-Lab)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: rapeepong.pe@rmuti.ac.th และ bundit.kr@rmuti.ac.th, โทรศัพท์ 044 233 073, โทรสาร 044 233 074

บทคัดย่อ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาค่าการซึมผ่าน (Permeability, K) โดยใช้สมการฟอชไฮเมอร์ (Forchheimer equation) สำหรับวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส เบอร์ 304 ซึ่งมีขนาดจำนวนของช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (Pore per inch, PPI) เท่ากับ 4 อัตราการจ่ายอากาศ (Q_A) ให้กับระบบอยู่ในช่วง 200-700 l/min ที่อุณหภูมิ 27 °C และจะติดตั้งแผ่นตาข่ายจำนวน 6 ตำแหน่ง ในท่อทดสอบ โดยจะเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นความหนาของแผ่นตาข่ายสแตนเลส (H) 5 ขนาด คือ 4, 8, 12, 16 และ 20 ชั้น จากผลการทดลองพบว่าเมื่อ H มากขึ้น ค่า K จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อชั้นความหนาเพิ่มขึ้นก็ทำให้เนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อากาศไหลผ่านได้ลำบากขึ้น

คำหลัก: การซึมผ่าน, ชั้นความหนา, วัสดุพรุนชนิดตาข่าย

Abstract

This experimental study aimed to investigate the Permeability (K) using the Forchheimer equation. The experiment was carried out by using the stainless wire-net porous inserts of grade 340 with the pore per inch (PPI) 4, the airflow rate (Q_A) in the varying of 200-700 l/min., and inserting the stainless wire-net porous at 6 positions into the test pipe. Five types of stainless wire-net porous inserts (H) with 4, 8, 12, 16 and 20 layer thickness at the temperature of 27 °C were considered for experimentation. The experimental results showed that stainless wire-net porous inserts (H) tended to be higher with decrease in the Permeability (K) since higher layer thickness caused to higher volume of material substance that could be affected to distress the airflow.

Keywords: Permeability, Thickness, Wire-net porous media.

1. บทนำ

ในระบบที่มีการไหลหรือมีการซึมผ่านของของไหลผ่านวัสดุพูน ถือว่าเป็นหัวข้อที่น่าสนใจอย่างหนึ่ง ซึ่งในทางวิศวกรรมศาสตร์ ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุพูนสำหรับการใช้งานทางด้านการถ่ายเทความร้อน โดยสามารถนำเอาวัสดุพูนไปประยุกต์ใช้งานได้จริง เช่น เครื่องฟอกไอเสียสำหรับระบบไอเสียของรถยนต์ (ใช้ในการกรองไอเสียของรถยนต์ในท่อรถยนต์เพื่อลดความเป็นมลพิษออกสู่อากาศ) นำไปใช้ในคอนเดนเซอร์เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และยังมีการใช้วัสดุพูนเพื่อการระบายความร้อนในระบบแก๊สเทอร์ไบน์ เป็นต้น [1] การไหลหรือการซึมผ่านของของไหลผ่านวัสดุพูนยังต้องศึกษาและทำความเข้าใจอีกค่อนข้างมาก ซึ่งอาจรวมถึงการไหลหรือการซึมผ่านวัสดุพูนที่ไม่มีความร้อนหรือไม่มีอุณหภูมิมาเกี่ยวข้องก็ตาม ได้มีนักวิจัยพยายามศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการไหลหรือการซึมผ่านของของไหลผ่านวัสดุพูนดังต่อไปนี้

Calmidi และ Mahajan [2] ทำการศึกษาค่าการซึมผ่านของวัสดุพูนชนิดโฟมโลหะ โดยกำหนดจุดที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างของวัสดุพูนเป็นรูปหกเหลี่ยมและรูปสี่เหลี่ยม จากศึกษาพบว่าค่าการซึมผ่านจะมีค่าขึ้นกับขนาดของรูและขนาดเส้นใย Paek และคณะ [3] ทำการศึกษาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนและค่าการซึมผ่านของวัสดุพูนชนิดโฟมโลหะ จากการศึกษาพบว่า ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความพูนลดลง ส่วนค่าการซึมผ่านจะเพิ่มขึ้นเมื่อความพูนมากขึ้น Mahajan และคณะ [4] ทำการศึกษาค่าการซึมผ่านและสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยของวัสดุพูนชนิดโฟมโลหะ โดยได้ทำการศึกษาคล้ายกับการทดลองของ Calmidi และ Mahajan [2] โดยกำหนดจุดที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างของวัสดุพูนเป็นรูปวงกลม จากการศึกษาพบว่าค่าการซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความพูนเพิ่มขึ้น

และค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยจะมีค่าขึ้นกับขนาดของความพูนเพียงอย่างเดียว Pavel และ Mohamad [5] ได้ทำการทดลองหาค่าการซึมผ่านและสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยของวัสดุพูนชนิดตาข่ายอลูมิเนียม จากการทดลองพบว่าเมื่อความพูนเพิ่มขึ้นค่าการซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยจะมีค่าลดลง Huang และคณะ [6] ทำการทดลองหาค่าการซึมผ่านและสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยของวัสดุพูนชนิดตาข่ายทองแดง จากการทดลองพบว่าเมื่อความพูนเพิ่มขึ้นค่าการซึมผ่านจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์ความเฉื่อยจะมีค่าลดลง Mehmet Turgay Pamuk และ Mustafa Özdemir [7] ได้ศึกษาการซึมผ่านของของไหลผ่านวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมสำหรับการไหลแบบสลับทิศทางและการไหลแบบทิศทางเดียว จากผลการทดลองพบว่า การไหลแบบสลับทิศทางจะให้ค่าการซึมผ่านมากกว่าการไหลแบบทิศทางเดียว

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาค่าการซึมผ่านของวัสดุพูนชนิดตาข่ายสแตนเลสเบอร์ 304 ที่มีจำนวนช่องว่างต่อหนึ่งนิ้ว (PPI) เท่ากับ 4 อุณหภูมิ 27°C ที่ชั้นความหนา 4, 8, 12, 16 และ 20 ชั้น โดยใช้สมการฟอชไฮเมอร์ (Forcheimer Equation) อันจะเป็นองค์ความรู้ สำหรับการนำวัสดุพูนไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการถ่ายเทความร้อน เพื่อพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. รายการสัญลักษณ์

- K คือ การซึมผ่าน (m^2)
- H คือ ชั้นความหนา
- u คือ ความเร็ว (m/s)
- ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
- μ คือ ความหนืด ($^{\circ}\text{C}$)
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดสอบ (m)

L คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตาข่าย (m)

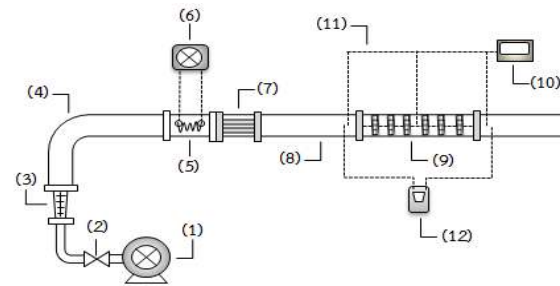
L_0 คือ ความยาวของท่อทดสอบ (m)

ΔP คือ ความดันตกคร่อม (Pa)

ε คือ ค่าความพรุน

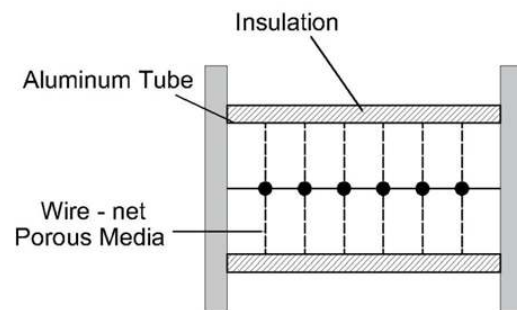
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 1 แสดงแผนผังของอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ อากาศจะถูกเป่าโดยพัดลมเป่า (Blower) ให้ไหลผ่านวาล์วปรับอากาศ (Valve) พร้อมทั้งมีการวัดอัตราการไหลของของไหล (อากาศ) ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหล (Rotameter) โดยทำการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยท่อฮีตเตอร์ (Heater pipe) จากนั้นอากาศก็ไหลผ่านท่อปรับการไหล ให้เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอแนวตรง (Flow straightener) ไปยังช่วงท่อที่ทำให้ของไหลไหลเต็มท่อ (Developing flow pipe) ก่อนเข้าสู่ท่อทดสอบ (Test section) สำหรับท่อทดสอบจะทำมาจากท่ออลูมิเนียมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 97 mm ยาว 500 mm ผิวด้านนอกของท่อทดสอบจะหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว มีการเจาะรูขนาด 1.5 mm เพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิอากาศ ซึ่งตำแหน่งของวัสดุพรุน (Porous media) จะประกอบอยู่บนแกนหลักตรงและถูกสอดเข้าไปตามแนวแกนของท่อทดสอบ ดังรูปที่ 2 และ 3 โดยจะทำการวัดความดันตกคร่อม (Pressure drop, ΔP) ของท่อทดสอบด้วยไมโครมานอมิเตอร์ (Micromanometer)

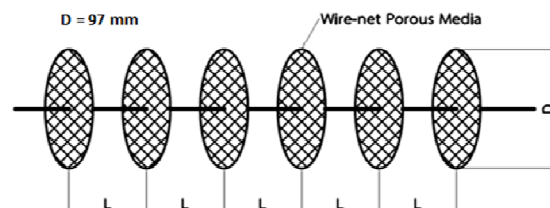


- | | |
|---------------------|--------------------------|
| (1) Blower | (7) Flow straightener |
| (2) Valve | (8) Developing flow pipe |
| (3) Rotameter | (9) Test section |
| (4) PVC pipe | (10) Data logger |
| (5) Inlet heater | (11) Thermocouples |
| (12) Micromanometer | |

รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 รายละเอียดท่อทดสอบ



รูปที่ 3 การติดตั้งวัสดุพรุน

อ้างอิงจากรูปที่ 1 จะมีวิธีการทดลองดังนี้ เริ่มจากติดตั้งวัสดุพรุนเข้าไปในท่อทดสอบ ปรับและจ่ายอากาศไหลเข้าสู่ท่อทดสอบในช่วง 200 - 700 L/min เปิดการทำงานของขดลวดไฟฟ้าที่ฮีตเตอร์เพื่อควบคุมอุณหภูมิทางเข้าของอากาศตามที่กำหนด รอจนอุณหภูมิทางเข้ามี

ค่าคงที่รวมทั้งอากาศมีการไหลอยู่ที่สภาวะคงที่ (Steady state) จึงทำการบันทึกความดันตกคร่อม (ΔP) ที่เกิดขึ้นภายในท่อทดสอบ

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

การหาค่าการซึมผ่าน (Permeability, K) ในงานวิจัยนี้จะคำนวณโดยใช้สมการพอชไฮเมอร์ (Forcheimer Equation) ดังนี้

$$\Delta P = \frac{\mu L_0}{K} u + \frac{\rho F L_0}{\sqrt{K}} u^2 \quad (1)$$

หรือ

สมการเส้นตรง		
H	$\Delta P/u$	R-Squared
4	$\Delta P/u = 4.4112 + 5.2157u$	0.9330
8	$\Delta P/u = 6.4497 + 12.0207u$	0.9806
12	$\Delta P/u = 8.7647 + 20.1252u$	0.9980
16	$\Delta P/u = 9.0386 + 24.4226u$	0.9925
20	$\Delta P/u = 10.5392 + 30.1131u$	0.9726

$$\frac{\Delta P}{u} = a + bu \quad (2)$$

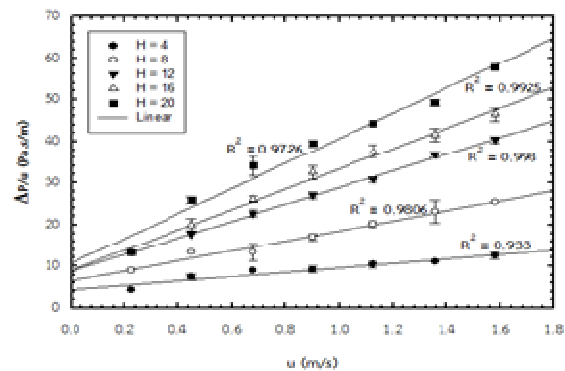
โดยที่

$$a = \frac{\mu L_0}{K} \quad \text{และ} \quad b = \frac{\rho F L_0}{\sqrt{K}} \quad (3)$$

5. ผลการทดลอง

การหาค่าการซึมผ่าน (K) จะคำนวณได้จากสมการพอชไฮเมอร์ (Forcheimer Equation) โดยจะวัดความดันตกคร่อมที่ความเร็วการไหลที่แตกต่างกันตลอดวัสดุพูน และจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบสมการเส้นตรงของ $\Delta P/u$ กับ u ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเส้นทึบในรูปคือเส้นตรงที่เหมาะสมของข้อมูลการทดลอง จากรูปพบว่าค่า $\Delta P/u$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ u เพิ่มขึ้น และเมื่อ

พิจารณาที่ u คงที่ใดๆ จะพบว่าค่า $\Delta P/u$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ H เพิ่มขึ้น และจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P/u$ กับ u จะสามารถสร้างสมการเส้นตรง ได้ดังตารางที่ 5.2

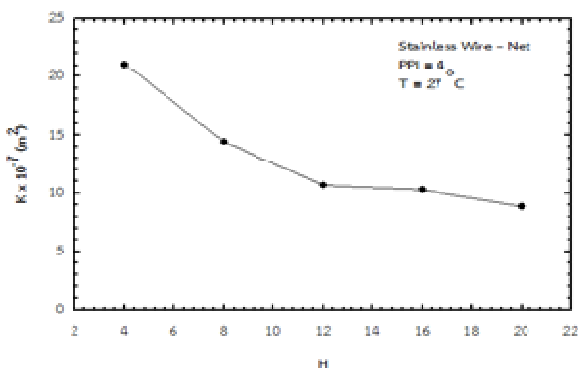


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P/u$ กับ u

ตารางที่ 1 แสดงสมการเส้นตรงระหว่าง $\Delta P/u$ กับ u

5.1 อิทธิพลของ H ที่มีผลต่อ K

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ H จากรูปพบว่า K จะมีค่าลดลงเมื่อ H เพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อ H เพิ่มขึ้นจะทำให้มีเนื้อของวัสดุมากขึ้น ทำให้อากาศที่ไหลผ่านวัสดุพูนนั้นไหลผ่านได้ลำบากขึ้น จึงทำให้ค่า K มีค่าลดลง

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง K กับ H

ตารางที่ 2 แสดงค่า K ที่ H ต่างๆ

6. สรุปผลการทดลอง

1) จากผลการทดลองพบว่าค่า ΔP จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ u เพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นไปตามหลักการของกลศาสตร์ของไหล คือ เมื่อความเร็วการไหลเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เกิดแรงเสียดทานกับวัสดุพูนมากขึ้น ส่งผลให้ ΔP มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ระหว่าง $\Delta P/u$ กับ u พบว่า $\Delta P/u$ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ H เพิ่มขึ้น

2) ค่า K จะมีค่าลดลงเมื่อ H เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีเนื้อของวัสดุมากขึ้นทำให้อากาศต้องใช้เวลาในการไหลผ่านวัสดุพูน เกิดการสะสมแรงเสียดทานส่งผลให้ K มีค่าลดลง

นอกจากข้อสรุป 2 ข้อข้างต้นแล้ว คณะผู้วิจัยมีบางประเด็นที่ยังต้องศึกษาเพิ่มเติม กล่าวคือการทดลองควรจะศึกษาเพิ่มเติมถึงชนิดของตาข่ายที่ทำจากวัสดุอื่น ๆ เช่น ตาข่ายทองแดงตาข่ายทองเหลือง เป็นต้น และควรศึกษา PPI ให้หลากหลายขนาดมากกว่านี้ เพื่อให้มีข้อมูลการทดลองที่เพียงพอและเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานได้จริง

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายบรรพต บุรณะ นายกิตติชัย ม่วงเกิด นายจุติชัย สุขสบาย ที่ช่วยงานในการทดลองให้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน (Development In Technology of Porous Material Research Laboratory, DiTo-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณและสถานที่ในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] V. A. Jambhekar. (2011). Forchheimer Porous-

H (ชั้น)	K (m²)
4	21.0881×10^{-7}
8	14.4223×10^{-7}
12	10.6136×10^{-7}
16	10.2919×10^{-7}
20	8.8265×10^{-7}

media Flow Models - Numerical Investigation and Comparison with Experimental Data, Master's Thesis, Universität Stuttgart - Institut Für Wasser- und Umweltsystemmodellierung.

[2] V.V. Calmadi and R.L. Mahajan. (1999). "The effective thermal conductivity of high porosity metal foams", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 466-471.

[3] J.W. Paek et al. (2000). Effective Thermal Conductivity and Permeability of Aluminum Foam Materials, International Journal of Thermophysics, Vol. 21, pp. 453-464.

[4] R.L. Mahajan et al. (2002). Thermophysical properties of high porosity metal foams, International Journal of Thermophysics, Vol. 45, pp. 1017-1031.



[5] 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.

[6] Z. F. Huang, A. Nakayama, K. Yang, C. Yang, and W. Liu. (2010). Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1164–1174.

[7] M. T. Pamuk และ M. Özdemir. (2014). Friction factor, permeability and inertial coefficient of oscillating flow through porous media of packed balls, *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 38, pp. 134–139.