การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่อง

Heat Transfer and Pressure Drop in a Channel with Grooved Surfaces

ดุสิต บูรณโชคไพศาล, พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ ทวี เทศเจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 อีเมล์ dusit_bu@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

Dusit Buranachokphaisan, Pongjet Phromvonge and Thavee Teschareon
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology-Ladkrabang,
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
Tel: 0-2326-4197, Fax: 0-2326-4198, E-mail: dusit_bu@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานด้วยการเซาะร่องพื้นผิวที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนเป็นรูปสี่เหลี่ยม โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของช่องขนานเป็นแบบฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ และของไหลที่ใช้ในการทดลองคืออากาศ ในการทดลองจะใช้ความเร็วลมต่าง ๆ กัน โดยให้อยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลระหว่างช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ผิวบนและผิวล่าง แบบมีแนวตรงและมีแนวเยื้อง เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

จากการทดลองพบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่ผิวบนและผิวล่าง มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้อง จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสูงกว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวตรง

Abstract

This paper presents the study of performance enhancement of heat transfer in a channel by grooving the heating surface. The experiments were conducted by varying air velocity in the test section to cover the range of turbulent flow (Reynolds number from 5,000 to 20,000) at a constant heat flux tube-wall condition. Experimental results were compared with the results of which without grooving. In addition, the grooved-surface arrangements were placed in in-line and stagger fashions.

The experimental result revealed that the heat transfer rate and the friction factor in the channel with grooved surfaces are higher than the channel with smooth surface and the stagger arrangement yields greater heat transfer rate than the in-line one.

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่าง ๆ เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิผลในกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการเซาะร่องที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล โดยจากการศึกษาของ Takahiro Adachi and Haruo Uehara [4] ซึ่งทำการทดลองในช่วงการไหลแบบราบเรียบ (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 50 ถึง 500) พบว่าช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานที่มีการเซาะร่อง โดยจะ

ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (เลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000)

2. ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองนี้ได้แก่

การจำแนกลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อซึ่งจะพิจารณาจากเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad (1)$$

โดย Re คือ ค่า Reynolds Number

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก, m

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, kg/m s

โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic Radius: D_h) มีนิยามดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องขนาน, m^2

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องขนาน, m

ในกรณีช่องขนานที่มีการเซาะร่อง A จะคิดเท่ากับกรณีช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง

สำหรับความดันลดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor: f) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \quad (3)$$

โดย ΔP คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa

f คือ Friction Factor

f_0 คือ Friction Factor ของช่องขนานเรียบ

L คือ ความยาวของท่อ, m

V คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ในการศึกษาจะพิจารณาเป็นกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat Flux) ซึ่งสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จากสมการดังนี้

$$h = \frac{\dot{m} C_p \left(T_{m,o} - T_{m,i}\right)}{A_w (T_w - T_b)} \quad (4)$$

$$T_b = \frac{\left(T_{m,o} + T_{m,i}\right)}{2} \quad (5)$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2 K

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของของไหล, kg/s

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล, J/kg K

A_w คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2

$T_{m,o}$ คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางออก, $^\circ$C

$T_{m,i}$ คือ อุณหภูมิของไหลที่ทางเข้า, $^\circ$C

T_w คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยของพื้นที่ถ่ายเทความร้อน, $^\circ$C

T_b คือ อุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้าและออกของของไหล, $^\circ$C

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในรูปของค่า Nusselt Number ดังสมการ

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (6)$$

โดย Nu_D คือ Nusselt Number

Nu_0 คือ Nusselt Number ของช่องขนานเรียบ

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, W/m K

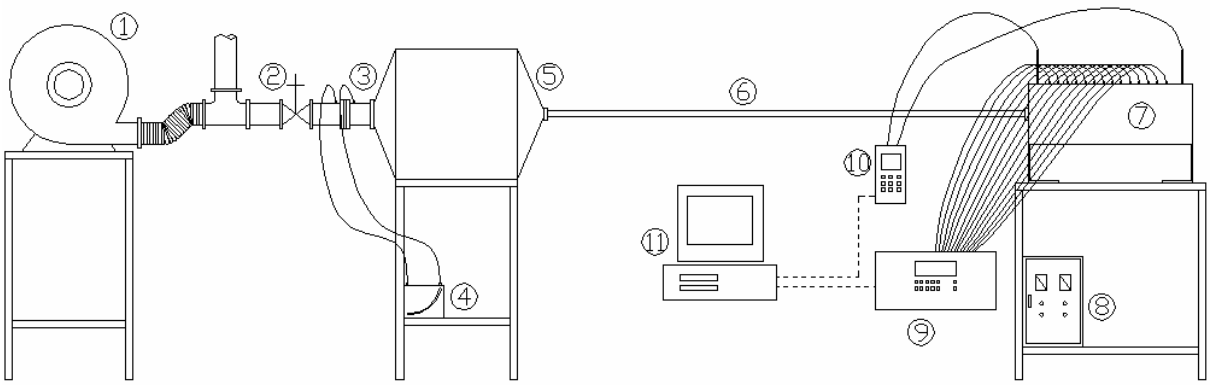
3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์สำหรับการทดลองการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยม

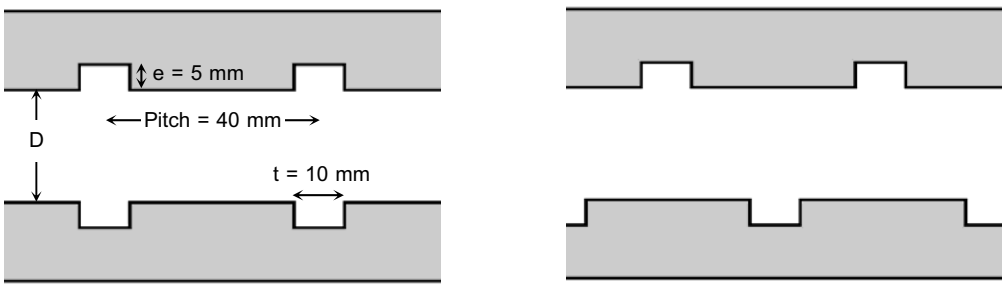
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 1, 2, และ 3 ซึ่งประกอบด้วยพัดลมขนาด 2.20 กิโลวัตต์, กล่องปรับรูปแบบการไหลสำหรับเปลี่ยนการไหลจากท่อกลมมาเป็นการไหลในช่องขนาน, ท่อสี่เหลี่ยมสำหรับปรับสภาพของการไหลทำจากแผ่นโลหะขนาดหน้าตัดกว้าง 0.20 เมตร และมีความยาว 1.60 เมตร และส่วนทดลองจะเป็นแผ่นโลหะกว้าง 0.20 เมตร และยาว 0.55 เมตร ทำการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมกว้าง 0.01 เมตร และลึก 0.005 เมตร ตลอดหน้าตัด

การปรับอัตราการไหลของของไหลจะใช้การควบคุมด้วยวาล์วเพื่อให้ได้การไหลแบบปั่นป่วน อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2.00 กิโลวัตต์ โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 0.09 เมตร และยาว 0.45 เมตร ที่ผิวบนและผิวล่างของช่องขนาน ผิวภายนอกของส่วนทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียพลังงานความร้อนของชุดทดลอง การวัดอุณหภูมิผิวช่องขนานและอุณหภูมิของอากาศทางเข้าและออกถูกวัดด้วยเทอร์โมคัพเปิลชนิด K จำนวน 16 ตัว ด้วย Data Logger (Fluke สามารถวัดและบันทึกค่าได้ 40 Channels) และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ ส่วนค่าความดันลดระหว่างตำแหน่งทางเข้าและตำแหน่งทางออกของส่วนทดลองอ่านและบันทึกค่าด้วย Digital Differential Pressure Recorder (Testo model 350XL)

รูปที่ 1 ชุดทดลอง



รูปที่ 2 แผนภาพอุปกรณ์และการไหลของสารทำงาน



รูปท 3 ลกษณะของแผนขนานเซาะร่องรูปสี่เหลียมวางแนวตรงกันและเยื้องกัน

4. วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของการไหลภายในช่องขนานผ่านพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยม

เริ่มการทดลองโดยเปิดสวิทช์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง จากนั้นเปิดชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อให้ความร้อนกับระบบ โดยให้ผิวของช่องขนานได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) ปรับความเร็วลมของชุดทดลองโดยการปรับหรี่ที่วาล์วเพื่อให้ได้ความเร็วของของไหลครอบคลุมรูปแบบการไหลในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (ค่า Re อยู่ในช่วง 5,000 ถึง 20,000) และปรับค่าสัดส่วนความลึกของร่องต่อระยะระหว่างแผ่นขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ทำการบันทึกผลค่าความดันลด อุณหภูมิผิวท่อ อุณหภูมิที่ทางเข้าและอุณหภูมิที่ทางออกของของไหล

พิจารณาผลของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ผิวบนและผิวล่างของช่องขนาน แบบที่มีแนวตรงกันและมีแนวเยื้องกัน

5. ผลการทดลอง

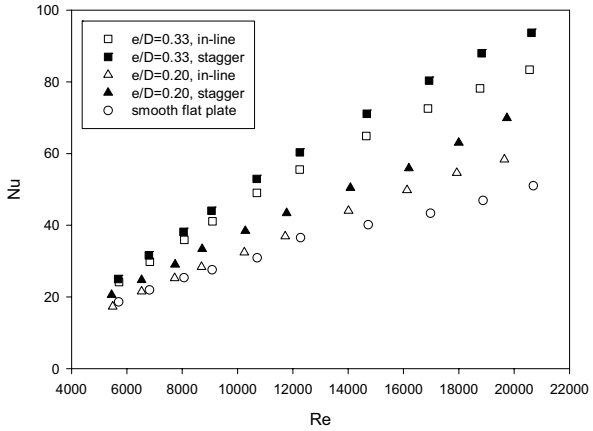
จากการทดลองเพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมสามารถแสดงผลได้ดังนี้

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ Nu ของช่องขนานเรียบที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า Nu เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนความลึก (e/D) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Nu มีค่าเพิ่มขึ้น และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะให้ค่า Nu สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

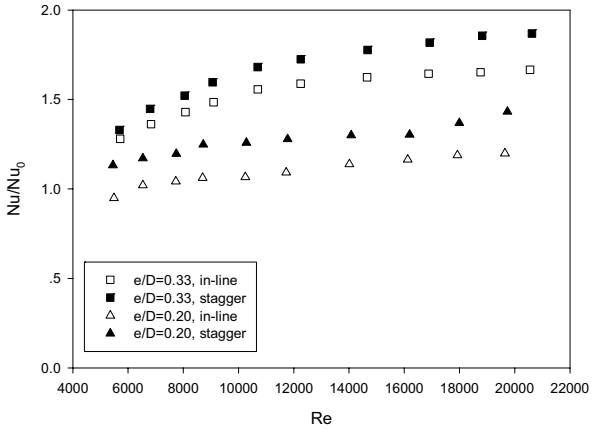
รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ อัตราส่วนของ Nu ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (Nu/Nu_0) ของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวตรงกัน และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 จากกราฟพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะมีค่าสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 18% และ 13% ที่ค่า e/D = 0.20 และ 0.33 ตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.20 ค่า Nu เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.3 และ 1.1 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.33 ค่า Nu เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.7 และ 1.5 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับ f ของช่องขนานที่ไม่มีการเซาะร่อง กับช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบตรงแนว และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองแล้วจะเห็นได้ว่าค่า Re เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า f ลดลง และที่สัดส่วนความลึก (e/D) ลดลงจะทำให้ค่า f ลดลงเช่นกัน และช่องขนานที่มีการเซาะร่องแนวเยื้องจะให้ค่า f สูงกว่าแบบเซาะร่องแนวตรง

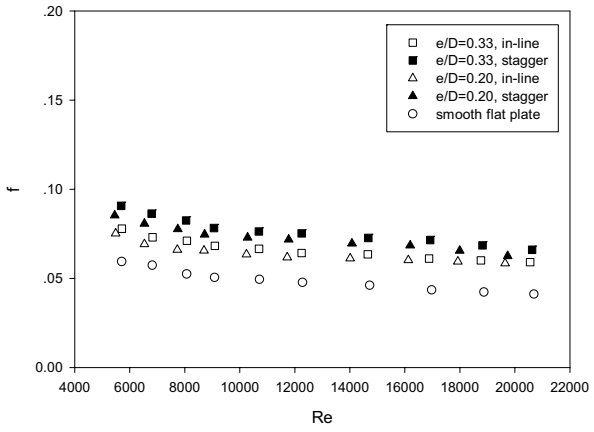
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re กับอัตราส่วนของ f ระหว่างช่องขนานเซาะร่องกับช่องขนานเรียบ (f/f_0) ของช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบตรงแนว และ ช่องขนานที่มีการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมแบบแนวเยื้องกัน ที่สัดส่วนความลึกของร่องกับระยะห่างระหว่างช่องขนาน (e/D) เท่ากับ 0.33 และ 0.20 จากกราฟจะพบว่าการเซาะร่องแบบวางเยื้องจะมีค่าสูงกว่าแบบวางตรงประมาณ 15% และ 14% ที่ค่า e/D = 0.20 และ 0.33 ตามลำดับ และที่ค่า e/D = 0.20 ค่า f เฉลี่ยจะสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.5 และ 1.3 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ ส่วนที่ค่า e/D = 0.33 จะให้ค่า f เฉลี่ยสูงกว่าแผ่นเรียบประมาณ 1.6 และ 1.4 เท่า สำหรับการวางเยื้องและวางตรงตามลำดับ



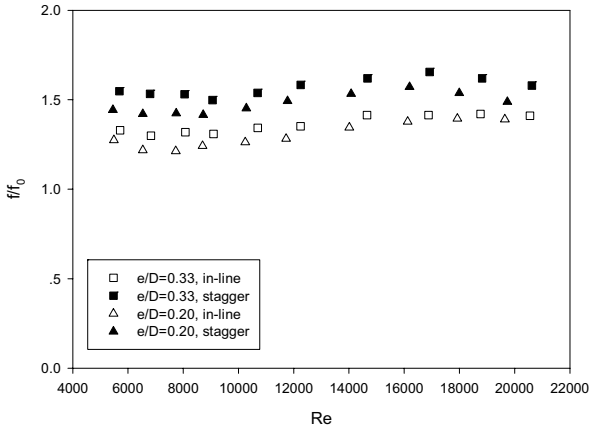
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu กับ Re



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Nu/Nu_0 กับ Re



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง f/f_0 กับ Re

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเซาะร่องรูปสี่เหลี่ยมที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องขนานจะเป็นการช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากร่องที่เซาะทำให้ความปั่นป่วนของการไหลเพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนความลึกของร่อง (e/D) ที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น และแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องแบบมีแนวเยื้องจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นขนานที่มีการเซาะร่องแบบมีแนวตรงกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Sadik Kakac and Yaman Yener, 1995, Convective Heat Transfer, Florida, CRC Press, pp. 156 – 165.

[2] มนตรี พิรุณเกษตร รศ., 1999, การถ่ายเทความร้อน, พิมพ์ครั้งที่ 2, บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด, หน้า 418 – 420.

[3] Kenan Yakut and Bayram Sahin, 2004, Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers, Applied Energy Vol 78, pp 273 – 288.

[4] Takahiro Adachi and Haruo Uehara, 2001, Correlation between heat transfer and pressure drop in channels with periodically grooved parts, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol 44, pp. 4333 – 4343.