การถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบราบเรียบผ่านช่องขนานที่มีครีบวางรูปตัว-V

Heat Transfer in Laminar V-Ribbed Channel Flows

สมพล สกุลหลง ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล ชินรักษ์ เธียรพงษ์ พงษ์เจต พรหมวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

Sompol skullong, Chanatip Chaidilokpatanakul, Chinaruk Thienpong, Pongjet Promvonge
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520 Thailand Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบสี่เหลี่ยมวางรูปตัว V ที่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวแบบคงที่ (Constant Heat Flux) การศึกษาจะพิจารณา ถึงสัดส่วนความสูงของครีบต่อระยะห่างแผ่นความร้อน (*e/D*) และการจัดรูปแบบแผ่นครีบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt Number) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) โดยมีขอบเขตการศึกษาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ตั้งแต่ช่วงระหว่าง 500 – 3,000 สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) มีค่าเท่ากับ 0.20, 0.25 และ 0.33 การจัดระยะแผ่นครีบวางตรงและเยื้องกัน และระยะพิตช์คงที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ จะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานความร้อนผิวเรียบ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน จากการทดลองพบว่า การจัดวางครีบสี่เหลี่ยมรูปตัว V ให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้นกว่าการจัดวางครีบแบบขวางตรง (transverse rib) การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนาน (*e/D*) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

Abstract

The paper presents the study of performance enhancement of heat transfer in a channel fitted with V-ribs in the heating surface. The experiments are made by varying air velocity in the test section to cover the range of laminar flow (Reynolds number from 500 to 3,000) at a constant heat flux condition. Experimental results are compared with the results of smooth channel without ribs. In addition, the V-ribbed surfaces of the lower and upper channel walls were placed in two arrays: in-line and staggered arrangements. The experimental result shows that the heat transfer rate and friction factor of the V-ribbed channel are higher than those of the smooth channel and the in-line arrangement yields higher heat transfer rate than the staggered one.

1. บทนำ

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญกับกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมาก เช่น หม้อไอน้ำ เครื่องทำความเย็น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ ในกระบวนการผลิต เป็นต้น และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่างๆ เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากอีกด้วย ดังนั้นการหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิผลในกระบวนการผลิตและยังเป็นการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตได้อีกด้วย [1, 2]

แนวทางหนึ่งที่มีการใช้ในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือการเพิ่มความปั่นป่วนในการไหลของของไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการติดครีบที่พื้นที่ถ่ายเทความร้อนก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มความปั่นป่วนของการไหล Rajendra Kawa [3] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีครีบขวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบที่ทดลองมีลักษณะเป็นครีบตรง ครีบรูปตัววีต่อเนื่อง 60 องศา,ครีบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา และครีบแทยงมุม 60 องศา โดยทำการทดลองที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 3,000 – 20,000 อัตราการส่วนความกว้างต่อความสูงแผ่นทดลองเท่ากับ 7.19-7.75 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงแผ่นครีบเท่ากับ 10 ความสูงครีบ 3.4 มิลลิเมตร ความกว้างครีบ 6.58 มิลลิเมตร ฟลักความร้อนชนิดคงที่ (Constant Heat Flux) โดยผลการทดลองพบว่าครีบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60° จะมีประสิทธิ์ภาพการถ่ายเทความร้อน

มากที่สุดและมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด ส่วนครีบตรงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ส่วนและครีบรูปตัววีต่อเนื่อง จะมีตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุด

Giovanni Tanda [4] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดผิวรูปร่าง V-Shape ชนิดแยกส่วน โดยการศึกษาเป็นการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์ 8,900 – 28,500 ความขรุขระสัมพัทธ์ (e/D_h) 0.009, 0.15 ระยะพิตช์สัมพัทธ์ (p/e) เท่ากับ 4,8,13.5 อัตราส่วนความสูงพิตช์ต่อความสูงแผ่นช่องขนาน (e/H) 0.15,0.25 จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงแผ่นครีบ (rib) มีค่าสูงขึ้น และแผ่นครีบมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน ระยะพิตช์ที่ 0.05 เมตรมีค่ามากกว่าระยะพิตช์ที่ 0.03 เมตร และที่การทดลองในช่วงดังกล่าวจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นเรียบอยู่ประมาณ 300 เปอร์เซนต์ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของแผ่นครีบมีค่าลดลง แผ่นครีบมีลักษณะเป็นรูปตัววี และครีบมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน

Benlu, Pei-Xue Jiang [5] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดครีบเอียงทำมุม 0 ถึง 90 องศากับทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอัตราการไหลอากาศ 0.001 – 0.0018 kg/s ระยะพิตช์ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงแผ่นครีบ 0.8 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ที่มุมครีบ 60 องศาจะให้ค่าสัมประสิทธิการพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมมากที่สุดแต่พบว่าที่มุม 20 องศาจะให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เมื่อศึกษาต่อที่มุมครีบ 20 องศาพบว่าที่ระยะพิตช์น้อยลงจะทำให้สัมประสิทธิการพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพิตช์ 1 และ 2 มิลลิเมตรจะให้ประสิทธิภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน

ดังนั้นในการศึกษานี้จะได้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องขนานที่มีการติดครีบ โดยจะทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบราบเรียบ แต่จะทำการศึกษาในช่วงค่า Re 500 ถึง 3,000 เพื่อเพิ่มข้อมูลทางด้านนี้ให้มากยิ่งขึ้น

2. สมมุติฐานและทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานชนิดมีครีบจำเป็นจะต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมและการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัดลมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นช่องขนานสามารถพิจารณาได้คือ [6]

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \tag{1}$$

$$\Delta p = f\,\frac{\rho L \overline{V}^2}{2D_h} \tag{2}$$

โดยที่

$\dot{W}_{in}$ =พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหล, Watt

Q = อัตราการไหลของของไหล, m^3/s

ΔP = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2

f = ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

L = ความยาวท่อ, m.

$\overline{V}$ = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิค (Hydraulic diameter), m.

การสมดุลพลังงาน (กรณีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Heat flux)

$$Q = mC_p\left(T_i - T_0\right) \;=\; hA_s\left(T_w - T_b\right) \tag{3}$$

โดยที่

Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ,Watt

m = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s

C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, kJ/kg. ^oK

T_i = อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, ^oC

T_0 = อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, ^oC

h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2.\,^oK$

A_s = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2

T_w = อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, ^oC

T_b = อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, ^oC

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในรูปของค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt Number, Nu) ดังสมการ

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \tag{4}$$

โดยที่

Nu = ค่าตัวเลขนัสเซลท์

k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ, W/m. ^oK

การจำแนกลักษณะการไหลของของไหลภายในท่อซึ่งจะพิจารณาจากตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: *Re*) ซึ่งมีนิยามดังนี้ [1]

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \tag{5}$$

โดยที่

Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์

μ = ค่าความหนืดเชิงกลของอากาศ, kg/m.s

ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η)

กรณีพิจารณาถึงการสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลเดียวกัน (Constant pumping power) ระหว่างท่อทดสอบผิวเรียบกับท่อทดสอบ

ที่มีครีบ สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการพลังงานของการไหลได้ดังนี้

$$\left(\dot{V}\Delta P\right)_0 = \left(\dot{V}\Delta P\right) \quad (6)$$

เมื่อ $\dot{V}$ คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/s

ตัวแปรทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (6) เป็นพลังงานการไหลของของไหลในท่อเปล่าและตัวแปรทางด้านขวามือของสมการเป็นพลังงานการไหลของของไหลภายในท่อที่มีแผ่นครีบ ด้วยการพิจารณาบนพื้นฐานของการสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลที่เท่ากัน ซึ่งการพิจารณาประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้นิยามขึ้นมาด้วยสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทดสอบที่มีครีบ(h) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อเปล่า (h_0) หรือนิยามด้วยสัดส่วนของค่าตัวเลขนัสเซลท์ของท่อทดสอบที่มีครีบ (Nu) กับค่าตัวเลขนัสเซลท์ของท่อเปล่า (Nu_0) จากข้อแนะนำของ Webb [7]

$$\eta = \left[\frac{h}{h_0}\right]_{pp} = \left[\frac{Nu}{Nu_0}\right]_{pp} \quad (7)$$

$$\eta = \left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-1/3} \quad (8)$$

โดยที่

η = ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

h_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อเปล่า, $W/m^2.{}^oK$

Nu_0 = ค่าตัวเลขนัสเซลท์ของท่อเปล่า

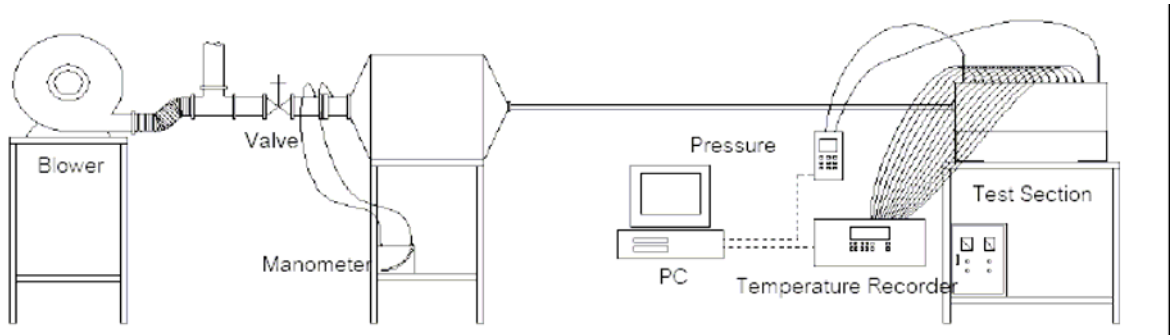
f_0 = ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานของท่อเปล่า

3. อุปกรณ์ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆตามรูปที่ (1) ด้านล่าง โดยใช้พัดลม (Blower) ขนาดพิกัด 1.5 kW เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าชิ้นงานทดสอบโดยการปรับหรี่วาล์ว โดยปริมาณลมแต่ละครั้งของการทดสอบจะถูกกำหนดโดยค่าความดันตกคร่อมแผ่น Orifice อากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ชุดทดลองจะต้องไหลผ่านกล่องลม ซึ่งมีหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศให้มีการไหลปั่นป่วนน้อยที่สุด และให้ไหลผ่านท่อปรับสภาพการไหล เพื่อให้อากาศที่ไหลก่อนเข้าชุดทดลองมีลักษณะเป็น fully develop และไหลเข้าชิ้นงานทดสอบ (Test Section)

ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยช่องขนานอลูมิเนียมที่มีครีบสี่เหลี่ยมวางรูปตัว V ขนาดกว้าง 0.20 เมตร ยาว 0.55 เมตร และระยะความสูงของช่องขนาน (*D*) เท่ากับ 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร โดยลักษณะครีบภายในช่องขนาน มีขนาดความสูง (*e*) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และกว้าง (*t*) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และระยะพิตต์ (*P*) คงที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยแผ่นช่องขนานดังกล่าวถูกทำให้ร้อนด้วย Heater ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ติดตั้งประกบแผ่นคู่ขนานทั้ง 2 ด้าน โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออก และอุณหภูมิผิวภายในถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 16 จุด โดยบันทึกค่าที่วัดได้ลงอุปกรณ์ FLUKE 2680A ส่วนค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานตรวจบันทึกค่าที่ได้ลงอุปกรณ์ TESTO 350 M/XL , TESTO 454

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผ่น Heater ไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก

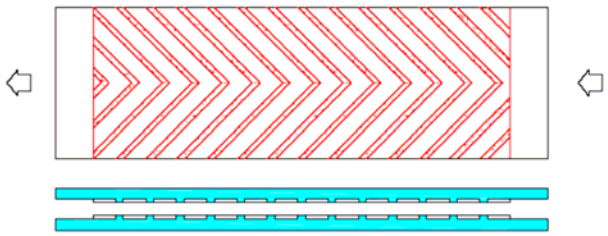


รูปที่ (1) อุปกรณ์การทดลอง

4.วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานที่มีครีบสี่เหลี่ยมวางรูปตัว V โดยทดลองที่ขนาดความสูงแผ่นช่องขนานที่ (*D*) 15, 20 และ 25 มิลลิเมตร โดยลักษณะแผ่นครีบทดลองติดตั้งในลักษณะตรงและเยื้อง ตามรูปที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

การทดลองทำการเปิดพัดลม จากนั้นปรับปริมาณการไหลของลมให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 2.20 เมตรต่อวินาที ซึ่งที่ความเร็วดังกล่าวครอบคลุมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ให้มีค่าอยู่ระหว่าง 500 ถึง 3,000 ในแต่ละช่วงความเร็วลมที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในแผ่นช่องขนานและอุณหภูมิอากาศเข้าออก มีค่าคงที่ก่อนจะทำการบันทึกค่า โดยอุณหภูมิแผ่นช่องขนานทำการตรวจวัดทั้งหมด 14 จุด และอีก 2 จุดสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผ่นช่องขนาน ในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานดังกล่าวด้วย



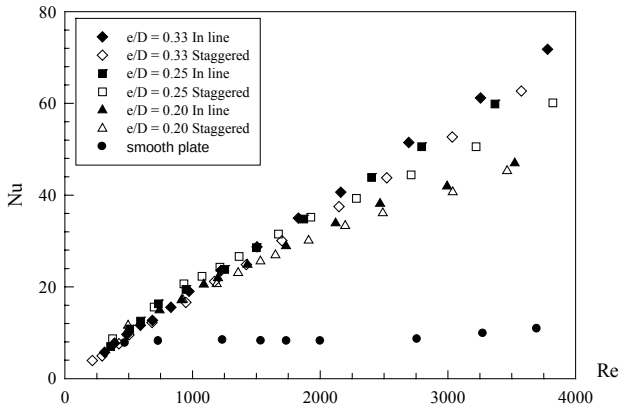
รูปที่ (2) ภาพด้านบนและภาพตัดของช่องขนานที่มีครีบสี่เหลี่ยมวางรูปตัว V

รูปที่ (3) ภาพตัดช่องขนานชนิดครีบตรง

รูปที่ (4) ภาพตัดช่องขนานชนิดครีบเยื้อง

5.ผลการทดลอง

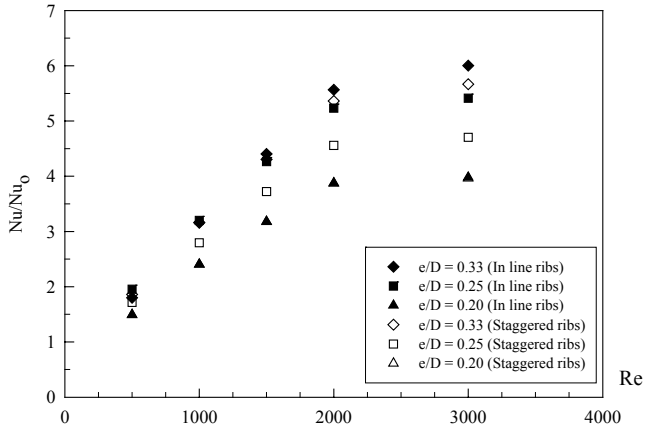
ผลของการทดลองแสดงในรูปความสัมพันธ์ต่าง ๆในรูปแบบกราฟได้ดังนี้



รูปที่ (5) การแปรเปลี่ยนของตัวเลขนัสเซลท์กับตัวเลขเรย์โนลด์

รูปที่ (5) แสดงค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) ในช่วง 500 ถึง 3,000 และค่าตัวเลขนัสเซลท์ (*Nu*) ของช่องขนานชนิดมีครีบวางตรงและครีบวางเยื้องที่สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) ต่าง ๆ โดยจะเปรียบเทียบกับแผ่นช่องขนานผิวเรียบ จากกราฟจะพบว่าที่ลักษณะค่า *Re* ต่ำกว่า 500 ค่า *Nu* ของช่องขนานที่มีครีบและแผ่นเรียบจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อค่า *Re* มีค่าสูงขึ้นจนถึง 1,500 ช่องขนานชนิดมีครีบจะเริ่มมีค่าแตกต่างกันโดยที่ค่า *Nu* ของแผ่นครีบตรงจะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นมากกว่าแผ่นครีบเยื้อง โดยผลดังกล่าวเกิดจากพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่เพิ่มขึ้นจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้น โดยอากาศที่ไหลแบบปั่นป่วนจะเป็นการไหลแบบทุกทิศทาง อากาศจึงมีเวลาและระยะทางสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากผนังความร้อนเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น แต่หากพิจารณาสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) พบว่าที่สัดส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 แผ่นครีบตรงและครีบเยื้องจะมีค่า *Nu* ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อสัดส่วน *e/D* มีค่าสูงขึ้นค่า *Nu* ของแผ่นครีบตรง จะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นมากกว่าแผ่นครีบเยื้อง จากผลดังกล่าวพบว่าเมื่อสัดส่วน *e/D* = 0.20 การจัดเรียบรูปแบบครีบตรงและครีบเยื้องจะมีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศ ดังจะพิจารณาได้จากค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานที่มีค่าไม่ต่างกันมากเช่นกัน ซึ่งผลดังกล่าวทำให้ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของการจัดเรียงครีบมีค่าใกล้เคียงกันด้วยเช่นกัน

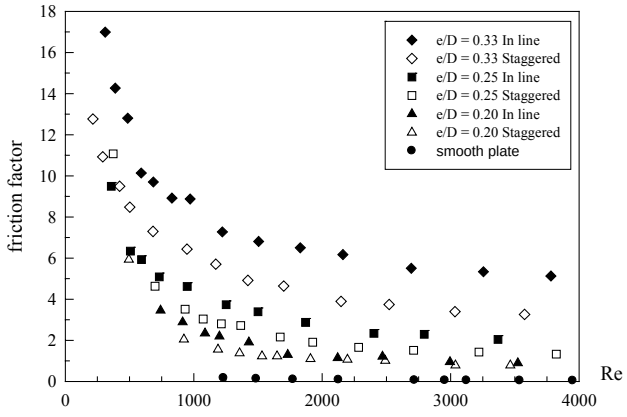
รูปที่ (6) แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์ของช่องขนานมีครีบต่อช่องขนานแผ่นเรียบ พบว่าช่องขนานชนิดมีครีบวางตรงจะมีค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงขึ้นเมื่อค่า *Re* มีค่าสูงขึ้นแต่จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราการเพิ่มที่น้อยลงเมื่อค่า *Re* มีค่าสูงขึ้น



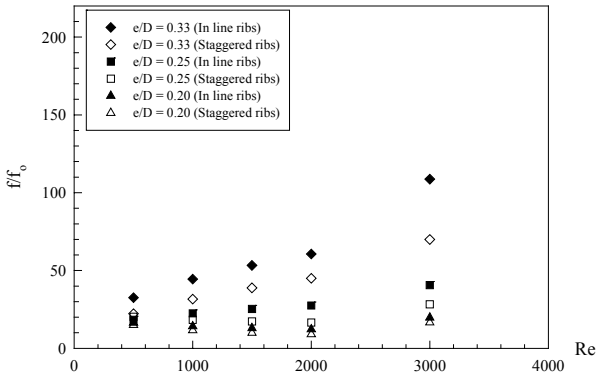
รูปที่ (6) การแปรเปลี่ยนของตัวเลขนัสเซลท์กับตัวเลขเรย์โนลด์ช่องขนานมีครีบต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

รูปที่ (7) แสดงค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ *Re* ในช่วง 500 ถึง 3,000 และแฟกเตอร์ความเสียดทาน (Friction factor) ของช่องขนานชนิดมีครีบวางตรงและครีบวางเยื้อง พบว่าที่ช่วงค่า *Re* ต่ำแฟกเตอร์ความเสียดทาน (*f*) ของช่องขนานที่มีครีบและแผ่นเรียบมีแนวโน้มที่ค่อนข้างสูง และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า *Re* เริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้น และจะมีค่าลดลงในอัตราส่วนที่น้อยลงมากเมื่อค่า *Re* มีค่าสูงกว่า 2,000 โดยเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) ต่าง ๆ พบว่าที่อัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 ค่า *f* ของช่องขนานแผ่นครีบตรงและช่องขนานครีบเยื้องจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่ออัตราส่วน *e/D* ที่เพิ่มสูงขึ้นแผ่นช่องขนานชนิดครีบตรงจะมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า *f* สูงกว่าช่องขนานชนิดครีบเยื้อง

เมื่อวิเคราะห์ผลที่ได้พบว่าที่สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) มากกว่า 0.20 การจัดวางแผ่นครีบตรงจะสามารถสร้างความปั่นป่วนของกระแสอากาศที่ไหลภายในได้มากกว่าแผ่นช่องขนานครีบเยื้อง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวสอดคล้องกับประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่มีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย แต่ที่สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) เท่ากับ 0.20 การจัดวางรูปแบบการวางครีบครีบจะมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการไหลค่อนข้างน้อยดังสังเกตได้จากค่าตัวประกอบแรงเสียดทานซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน



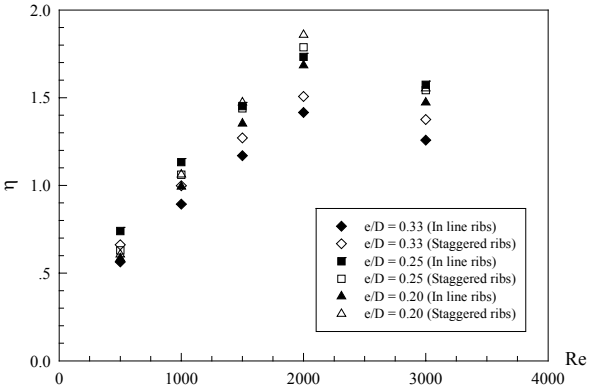
รูปที่ (7) การแปรเปลี่ยนของแฟกเตอร์ความเสียดทานกับตัวเลขเรย์โนลด์



รูปที่ (8) การแปรเปลี่ยนอัตราส่วนแฟกเตอร์ความเสียดทานของช่องขนานมีครีบต่อช่องขนานเรียบกับตัวเลขเรย์โนลด์

รูปที่ (8) แสดงค่าเปรียบเทียบแฟกเตอร์ความเสียดทานช่องขนานมีครีบต่อช่องขนานแผ่นเรียบพบว่าช่องขนานชนิดมีครีบวางตรงมีค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานสูงขึ้นเมื่อ *Re* มีค่าสูงและมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นมากกว่าแผ่นช่องขนานชนิดมีครีบวางเยื้อง

รูปที่ (9) แสดงค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (*Re*) ในช่วง 500 ถึง 3,000 และประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานชนิดมีครีบตรงและครีบเยื้อง พบว่าที่อัตราส่วนสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) เท่ากับ 0.20 แผ่นครีบตรงและครีบเยื้องจะมีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง แต่เมื่ออัตราส่วน *e/D* มีค่าสูงขึ้นค่าประสิทธิภาพ จะมีอัตราส่วนที่ลดลง



รูปที่ (9) การแปรเปลี่ยนของประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับตัวเลขเรย์โนลด์

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองช่องขนานที่มีครีบสี่เหลี่ยมวางรูปตัว V พบว่าครีบที่วางรูปตัว V ภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มค่าตัวเลขนัสเซลท์ให้เพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าตัวเลขนัสเซลท์จะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องขนาน โดยการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้ค่าตัวเลขนัสเซลท์มีค่าสูงขึ้น รวมถึงการจัดรูปแบบครีบภายในช่องขนานโดยแผ่นครีบตรงจะมีแนวโน้มของค่าตัวเลขนัสเซลท์สูงกว่าแผ่นครีบเยื้อง แต่ที่อัตราส่วนสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) เท่ากับ 0.20 แผ่นครีบวางตรงและครีบวางเยื้องจะมีค่าตัวเลขนัสเซลท์ใกล้เคียงกัน

ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในช่องขนานที่มีครีบวางรูปตัว V พบว่าจะมีค่าสูงมากเมื่อค่า *Re* มีค่าต่ำและมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่า *Re* มีค่าสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนการจัดรูปแบบแผ่นครีบวางตรงและแผ่นครีบวางเยื้องพบว่าแผ่นครีบวางตรงจะมีค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานสูงกว่าแผ่นครีบวางเยื้อง แต่ที่อัตราส่วนสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) เท่ากับ 0.20 แผ่นครีบวางตรงและครีบวางเยื้องจะมีแฟกเตอร์ความเสียดทานใกล้เคียงกัน

ส่วนค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องขนานที่มีครีบวางรูปตัว V พบว่าที่สัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) มีค่าสูงขึ้นทำให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลง แต่เมื่ออัตราส่วนสัดส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (*e/D*) มีค่าต่ำค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้น โดยที่อัตราส่วน *e/D* เท่ากับ 0.20 แผ่นครีบวางตรงและครีบวางเยื้องจะมีประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูง

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัยภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจาก “ส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ”

เอกสารอ้างอิง

[1]. Kakac, S and Yener, Y., 1995 ”Convective Heat Transfer”, Florida, CRC Press, pp. 156-165.

[2]. Yakut, K. and Sahin, B., 2004, “Flow-induced vibration analysis of conical rings used for heat transfer enhancement in heat exchangers”, Applied Energy Vol 78, pp 273 – 288.

[3]. Rajendra Karwa, 2003. Expermental Studies of Augmented Heat Transfer and Friction in Asymmetrically Heated Rectangular Ducts with Ribs on The Heated wall in Transverse, Inclined, V-Continuous and V-Discrete Pattern, Int. Comm Heat Mass Transfer Vol. 30 No.2, pp.241-250.

[4]. Giovanni Tanda, 2004. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, Int J. Heat Mass Transfer Vol. 47 pp.229-243.

[5]. Benlu, Pei-Xue Jiang, 2006. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs. Experimental Thermal and Fluid Science Vol.30, 6, pp. 513-521.

[6]. พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,พ.ศ.2542 หน้า 225-252.

[7]. Webb R. L. 1992. Principles of Enhanced Heat Transfer, John-Wiley & Sons, New York, USA, pp. 166-194.