

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนในช่องขนานที่มีครีบริบ

Enhancement of Heat Transfer in a Ribbed Channel

ศรัณย์ พิพัฒน์ศาสตร์, พงษ์เจต พรหมวงศ์ และ เมธี ลิ้มกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-326-4198 อีเมลล์ saranpi@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

Saran Pipatsart, Pongjet Promvongse and Mehtee Limkul

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Bangkok 10520, Tel 0-2326-4197, Fax 0-2326-4198; saranpi@yahoo.com, kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบริบสี่เหลี่ยมชนิดที่มีฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux) โดยกำหนดให้อากาศเป็นของไหลที่ไหลผ่านแผ่นช่องขนาน การศึกษาจะพิจารณาถึงสัดส่วนความสูงของครีบริบต่อระยะห่างแผ่นความร้อน (e/D) และการจัดรูปแบบแผ่นครีบริบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) โดยมีอัตราการไหลในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ระหว่าง 5,000 – 20,000 สัดส่วนความสูงครีบริบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (e/D) มีค่าเท่ากับ 0.20 และ 0.25 การจัดระยะแผ่นครีบริบตรงและเอียงและระยะพิตช์คงที่เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ จะทำการศึกษาร่วมกับการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานความร้อนผิวเรียบ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความสูงครีบริบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนาน (e/D) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a ribbed channel with constant heat flux. Effects of rib-to-channel height ratio (e/D) and rib arrangements on heat transfer rate and friction loss in the ribbed channels are experimentally investigated. The mass flow rate of this work is based on the Reynolds number at the inlet ranging from 5000 to 20000 for rib-to-channel height ratio (e/D) of 0.20 and 0.25 and pitch length of 40 mm. The ribs used in the test section are placed in stagger and in-line arrangements. Experimental results obtained are compared with the results obtained from smooth-surface channels under similar conditions. The experimental result reveals that the

heat transfer rate and the friction loss increase considerably with the rise of Reynolds number and the (e/D) ratio.

1. บทนำ

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทของแผ่นความร้อนที่ได้เคยมีการศึกษาตั้งแต่ Taslim et al. [1] รายงานค่าประสิทธิภาพที่จุดใด ๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบริบ, รูปร่างครีบริบและความไม่ต่อเนื่องครีบริบ (แนวครีบริบตัวมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อแนวครีบริบตัวมีทิศทางเดียวกับการไหล Rajendra Kawa [2] ได้ทำการศึกษการเพิ่มสมรรถนะของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบริบที่ทดลองมีลักษณะเป็นครีบริบตรง ครีบริบรูปตัววีต่อเนื่อง 60 องศา, ครีบริบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา และครีบริบแท่งมุม 60 องศา โดยทำการทดลองที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 2,800 – 15,000 อัตราการส่วนความกว้างต่อความสูงแผ่นทดลองเท่ากับ 7.19-7.75 และอัตราส่วนระยะพิตช์ต่อความสูงแผ่นครีบริบเท่ากับ 10 ความสูงครีบริบ 3.4 มิลลิเมตร ความกว้างครีบริบ 6.58 มิลลิเมตร ถ่ายเทความร้อนชนิดคงที่ Constant Heat Flux โดยผลการทดลองพบว่าครีบริบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด ส่วนครีบริบตรงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ส่วนและครีบริบรูปตัววีต่อเนื่อง จะมีตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุด Giovanni Tanda [3] ได้ทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดผิวรูป 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 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงแผ่น

ครีป (Rib) มีค่าสูงขึ้น และแผ่นครีปมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน ระยะพิคต์ที่ 0.05 เมตรมีค่ามากกว่าระยะพิคต์ที่ 0.03 เมตร และที่การทดลองในช่วงดังกล่าวจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นเรียบอยู่ประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของแผ่นครีปมีค่าลดลง แผ่นครีปมีลักษณะเป็นรูปตัววี และครีปมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน Benlu, Pei-Xue Jiang [4] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดครีปเอียง ทำมุม 0 ถึง 90 องศาทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษา ในช่วงอัตราการไหลอากาศ 0.001 – 0.0018 kg/s ระยะพิคต์ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงแผ่นครีป 0.8 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ที่มุมครีป 60 องศาจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมมากที่สุดแต่พบว่าที่มุม 20 องศาจะให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เมื่อศึกษาต่อที่มุมครีป 20 องศาพบว่าที่ระยะพิคต์น้อยลงจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพิคต์ 1 และ 2 มิลลิเมตรจะให้ประสิทธิภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน

2. ทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานชนิดมีครีปจำเป็นจะต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมและการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัดลมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นช่องขนานสามารถพิจารณาได้คือ

$$\dot{W}_{in} = Q\Delta p \quad (1)$$

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D_h} \quad (2)$$

โดยที่

\dot{W}_{in}	=	พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านช่องขนาน ; Watt
Q	=	อัตราการไหลของของไหล, m^3/s
Δp	=	ความดันตกคร่อมของของไหล, Pa
f	=	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
L	=	ความยาวท่อ, m.
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
D_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m.

การสมดุลพลังงาน

$$Q = mC_p(T_i - T_o) = hA_s(T_w - T_b) \quad (3)$$

โดยที่

Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ, Watt
\dot{m}	=	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศเฉลี่ย, $kJ/kg.K$
T_i	=	อุณหภูมิอากาศด้านเข้า, °C
T_o	=	อุณหภูมิอากาศด้านออก, °C
h	=	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2.K$
A_s	=	พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2
T_w	=	อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, °C
T_b	=	อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, °C

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในรูปของค่า Nusselt Number ดังสมการ

$$Nu_D = \frac{hD_h}{k} \quad (4)$$

โดยที่

Nu_D	=	ค่าตัวเลขนัสเซลท์
k	=	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ; $W/m.K$

โดยประเภทของการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งได้โดยอาศัยค่าตัวเลขเรย์โนลด์ คือ

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu}$$

โดยที่

Re	=	ค่า Reynolds number
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
V	=	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล m/s
μ	=	ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, $kg/m.s$
D_h	=	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $(= \frac{4A}{P})$, m.

โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

P = ความยาวเส้นรอบของท่อ, m.

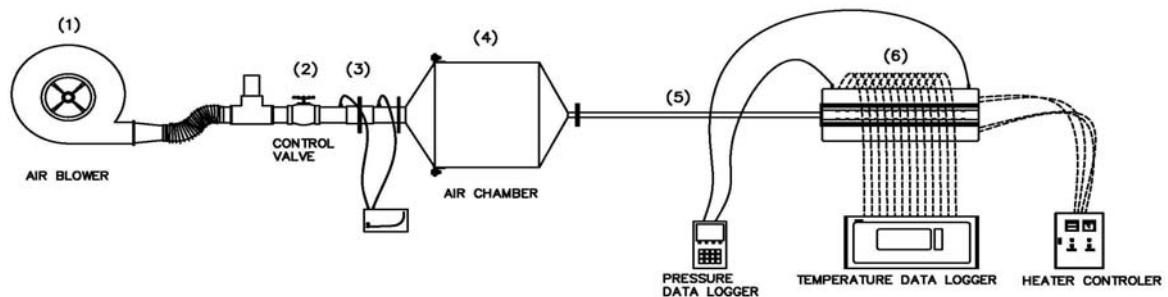
3. อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆตามรูปที่ (1) ด้านล่าง โดยใช้พัดลม (1) (Blower) ขนาดพิกัด 2.2 kW เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าขึ้นงานทดสอบโดยการปรับหัววาล์ว (2) โดยปริมาณลมแต่ละครั้งของการทดสอบจะถูกกำหนดโดยค่าความดันตกคร่อมแผ่น Orifice (3) อากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ชุดทดลองจะต้องไหลผ่านกล่องลม (4) ซึ่งมีหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศให้มีการไหลปั่นป่วนน้อยที่สุด และให้ไหลผ่านท่อปรับสภาพการ

ไหล (5) เพื่อให้อากาศที่ไหลก่อนเข้าสู่ชุดทดลองมีลักษณะเป็น fully Developed flow และไหลเข้าชิ้นงานทดสอบ (6) ในที่สุด

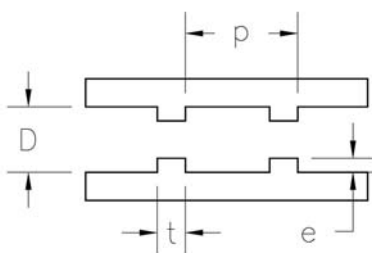
ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยช่องขนานอลูมิเนียมที่มีครีบ ขนาด กว้าง 0.20 เมตร ยาว 0.55 เมตร และระยะความสูงของช่องขนาน (D)

เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และ 25 มิลลิเมตร โดยลักษณะครีบภายในช่อง ขนาน มีขนาดความสูง (e) เท่ากับ 5 มิลลิเมตร และกว้าง (t) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และระยะพิตต์ (P) เท่ากับ 40 มิลลิเมตร โดยแผ่นช่องขนาน ดังกล่าวถูกทำให้ร้อนด้วย Heater ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ติดตั้ง



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

ประกอบแผ่นคู่ขนานทั้ง 2 ด้าน โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออก และ อุณหภูมิผิวภายในถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล Type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 16 จุด โดยบันทึกค่าที่วัดได้ลงอุปกรณ์ Data logger ส่วนค่าความดัน ตกคร่อมแผ่นช่องขนานตรวจบันทึกค่าที่วัดได้ลง Digital Differential Pressure



รูปที่ 2 ค่าตัวแปรแสดงระยะต่างๆ

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนใยแก้วกันความร้อนเพื่อ ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผ่น Heater ไหลออกสู่บรรยากาศ ภายนอก

4.วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่อง ขนานที่มีครีบ โดยทดลองที่ขนาดความสูงแผ่นช่องขนานที่ (D) 20 และ

25 มิลลิเมตร โดยลักษณะแผ่นครีบทดลองติดตั้งในลักษณะตรงและ เยื้อง ตามรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3 ภาพตัดช่องขนานชนิดครีบตรง

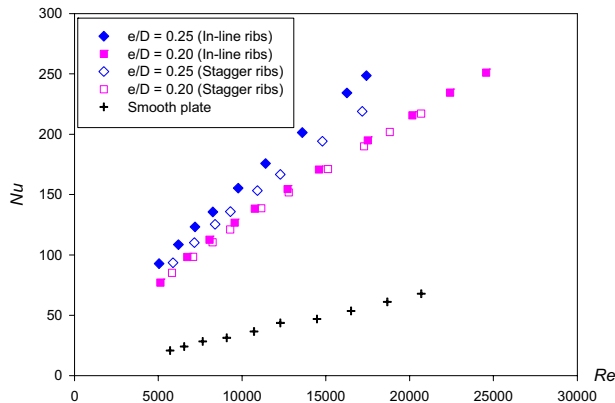


รูปที่ 4 ภาพตัดช่องขนานชนิดครีบเยื้อง

การทดลองเริ่มจากเปิดพัดลม จากนั้นปรับปริมาณการไหลของลม ให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 2.5 ถึง 9.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งที่ความเร็วดังกล่าวครอบคลุมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ให้มี ค่าอยู่ระหว่าง 5,000 ถึง 20,000 ในแต่ละช่วงความเร็วลมที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในแผ่นช่องขนานและอุณหภูมิอากาศเข้า ออก มีค่าคงที่ก่อนจะทำการบันทึกค่า โดยอุณหภูมิผิวแผ่นช่องขนานทำ การตรวจวัดทั้งหมด 14 จุด และอีก 2 จุดสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้าและ ออกแผ่นช่องขนาน ในขณะที่เดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อม แผ่นช่องขนานดังกล่าวด้วย

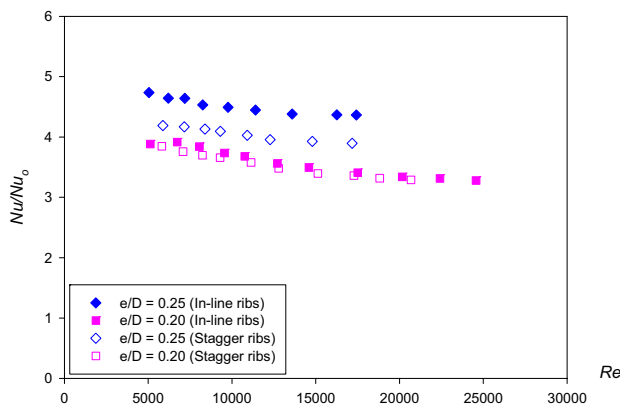
5. ผลการทดลอง

ผลของการทดลองแสดงในรูปความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number ; Nu)

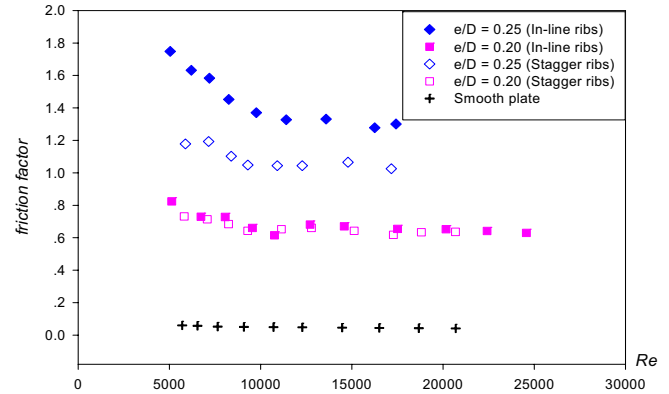
จากรูปที่ 5 ค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 5,000 ถึง 20,000 และค่าตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number ; Nu) ของช่องขนานที่มีการจัดวางแบบแผ่นครีบริดตรงและครีบริดเอียง ที่สัดส่วนความสูงครีบริดต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (e/D) ต่างๆ เปรียบเทียบกับแผ่นช่องขนานผิวเรียบ จากการพบว่าที่ค่า Re ต่ำๆ ค่า Nu ของช่องขนานที่มีครีบริดแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก แต่เมื่อค่า Re มีค่าสูงขึ้นค่า Nu ของการจัดวางแบบแผ่นครีบริดตรงจะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นมากกว่าการจัดวางแบบแผ่นครีบริดเอียง แต่หากพิจารณาอัตราส่วน e/D พบว่าที่อัตราส่วน e/D เท่ากับ 0.20 การจัดวางแบบแผ่นครีบริดตรงและครีบริดเอียงจะให้ค่า Nu ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าสูงขึ้นค่า Nu ของแผ่นครีบริดตรงมีค่ามากกว่าการจัดวางแบบแผ่นครีบริดเอียงที่ตัวเลขเรย์โนลด์เดียวกัน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt number ; Nu) ของช่องขนานมีครีบริดต่อช่องขนานแผ่นเรียบ

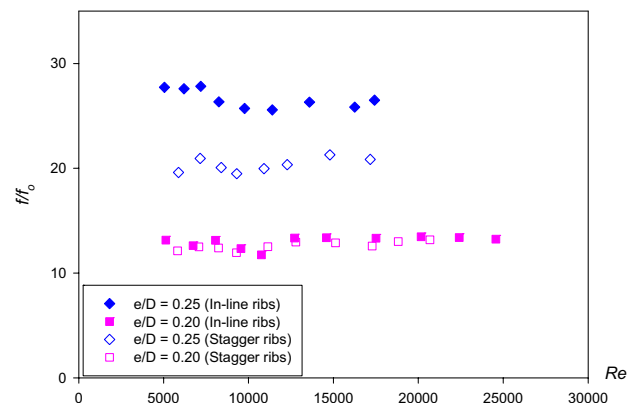
จากรูปที่ 6 หากเปรียบเทียบค่าตัวเลขนัสเซลท์ของช่องขนานมีครีบริดต่อช่องขนานแผ่นเรียบพบว่าการจัดวางแบบแผ่นครีบริดจะมีค่าสูงกว่า

แผ่นเรียบประมาณ 3.5-4.5 เท่า และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อค่า Re มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากรูปที่ 7 ค่าสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในช่วง 5,000 ถึง 20,000 และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor ; f) ของช่องขนานที่มีการจัดวางแผ่นครีบริดตรงและครีบริดเอียง ที่สัดส่วนความสูงครีบริดต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (e/D) ต่างๆ เปรียบเทียบกับแผ่นช่องขนานผิวเรียบ พบว่าในช่วงค่า Re ต่ำๆ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) ของช่องขนานที่มีครีบริดและแผ่นเรียบมีค่าสูงแต่เมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ค่าๆหนึ่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่ามากขึ้นหากเป็นช่องขนานดังกล่าวมีการจัดวางแบบครีบริดตรงและมีอัตราส่วน e/D ที่สูง และยังพบอีกด้วยว่าอัตราส่วนผลต่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแผ่นครีบริดตรงและแผ่นครีบริดเอียงจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าลดลง และมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อ e/D มีค่าเท่ากับ 0.20



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานช่องขนานมีครีบริดต่อช่องขนานเรียบ

จากรูปที่ 8 หากเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานช่องขนานมีครีบท่อช่องขนานแผ่นเรียบพบว่าการจัดวางทั้งชนิดครีบท่อและครีบบริเวณจะมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่ไม่ว่าค่า Re จะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองช่องขนานที่มีครีบท่อพบว่าการครีบท่อภายในช่องขนานสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้นได้ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องขนาน โดยการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้ค่า Nu มีค่าสูงขึ้น รวมถึงการจัดวางรูปแบบครีบท่อภายในช่องขนานโดยการจัดวางแบบแผ่นครีบท่อตรงจะมีแนวโน้มของค่า Nu สูงกว่าแผ่นครีบบริเวณ แต่หากค่าอัตราส่วน e/D มีน้อยกว่า 0.20 การจัดวางแบบแผ่นครีบท่อตรงและครีบบริเวณจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ใกล้เคียงกัน

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในแผ่นช่องขนานที่มีครีบท่อพบว่า f จะมีค่าสูง เมื่อมีลักษณะการไหลในช่วงค่า Re ที่มีค่าไม่มาก และเมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนรูปแบบการจัดวางแบบแผ่นครีบท่อตรงและแผ่นครีบบริเวณพบว่าแผ่นครีบท่อตรงจะมีให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงกว่าแผ่นครีบบริเวณ แต่หากค่าอัตราส่วน e/D มีน้อยกว่า 0.20 การจัดวางแบบแผ่นครีบท่อตรงและครีบบริเวณจะให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.E. Taslim, T. Li, D.M. Kercher, 1996. Experimental heat transfer and friction in channels roughened with angled, V-shaped, and discrete ribs on two opposite walls, ASME J. Turbomachinery Vol.118, , pp. 20-28.
- [2] Rajendra Karwa, Experimental, 2003. 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
- [3] Giovanni Tanda, 2004 . Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, Int J of Heat and Mass Transfer 47 pp.229-243
- [4] Benlu, Pei-Xue Jiang, 2005. Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs. Int J of Experimental Thermal and Fluid and science
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.
- [6] Fox, Robert W., and Alan T. McDonald: Introduction to Fluid Mechanics, Wiley, New York, 1998, pp. 332-395.

- [7] Incropera, Frank P., and David P. Dewitt: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley, New York, 1996, pp. 419-461.
- [8] Holman, J.P. : Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1990, pp. 217-321.