

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนภายในช่องแผ่นขนานที่มีครีบริ่อง

**TURBULENT HEAT TRANSFER IN A CHANNEL FITTED
WITH RIB-GROOVE**



ชานนท์ มะลิกุล

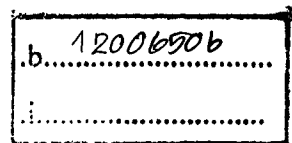
CHANON MALIKUN

ณ.

๕๕๒/๖

๒๕๕๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 85166
วัน,เดือน,ปี..... - 4 พ.ย. 2551



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-030-155

**TURBULENT HEAT TRANSFER IN A CHANNEL FITTED
WITH RIB-GROOVE**

CHANON MALIKUN

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2008
KMITL-2008-EN-M-030-155**

COPYRIGHT 2008

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนภายในช่องแผ่นขนานที่มีครีบริ่อง
นักศึกษา	นายชานนท์ มะลิกุล
รหัสนักศึกษา	49060369
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อช่องขนานสี่เหลี่ยมที่มีครีบริ่อง โดยทำการทดลองที่สภาวะผิวของท่อมีการให้ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant heat flux) ในการทดลองจะทำการปรับอัตราการไหลของอากาศทดสอบให้อยู่ในช่วงของค่าเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) $Re = 3000 - 20,000$ โดยทำการทดลองเป็นสองกรณี คือกรณีที่มีการติดตั้งครีบริ่อง (ไม่มีร่อง) และกรณีที่มีการติดตั้งครีบริ่องผสมร่องตรง ซึ่งร่องมีขนาดความลึก 5 mm กว้าง 10 mm และครีบริ่องสูง 5 mm ทำมุม 45 องศากับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น โดยทำการเปรียบเทียบกับผลทดลองของท่อที่มีผนังเรียบ ไม่มีครีบริ่อง ภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบริ่องที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบริ่องทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งกรณีนี้มีแบ่งการจัดวางครีบริ่องได้เป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเยื้องกัน เพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนแสดงในรูปของค่าเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) และค่าตัวประกอบเสียดทานจากการติดตั้งครีบริ่องดังกล่าว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชุดทดลองที่มีครีบริ่องผสมร่องตรง กรณีติดครีบริ่องที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่า $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าผนังเรียบสูงที่สุด โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.51 เท่า และชุดทดลองที่มีครีบริ่อง (ไม่มีร่อง) กรณีติดครีบริ่องที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่า $PR = 0.5$ โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.33 เท่า และกรณีติดครีบริ่องที่ด้านบนเพียงด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.66 และชุดทดลองที่มีครีบริ่องผสมร่องตรง กรณีติดครีบริ่องทั้งด้านบนด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.84 และ 1.71 ซึ่งพบที่ค่าเลขเรย์โนลด์ต่ำๆ สำหรับกรณีท่อมีครีบริ่องและท่อมีครีบริ่องผสมร่องตามลำดับ และสำหรับท่อที่มีครีบริ่องผสมร่องตรง กรณีติดครีบริ่องทั้ง

ด้านบนและด้านล่างที่มีการวางครีบบางตรงกันที่มีค่า $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขน้สเซลล์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบนด้านบนและด้านล่างแบบวางตรงกัน โดยมีค่าเลขน้สเซลล์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.37 เท่า และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.69 ต่อมาเป็นชุดทดลองที่มีครีบบัซ(ไม่มีร่อง)กรณีติดครีบบนด้านบนและด้านล่างที่มีการวางครีบบางตรงกันที่มีค่า $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขน้สเซลล์สูงสุด โดยมีค่าเลขน้สเซลล์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.20 เท่า และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.57

Thesis Title	Turbulent Heat Transfer in a Channel Fitted with Rib-Groove
Student	Mr.Chanon Malikun
Student ID.	49060369
Degree	Master of Engineering
Program	Mechanical Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

ABSTRACT

The research presents the study of thermal performance enhancement in a rectangular duct using rib and groove turbulators. The experiments are made by varying air flow rate for Reynolds numbers, $Re = 3000 - 20000$ in the tested duct with constant surface heat flux on the upper plate only. Ribs and grooves mounted on the bottom and the top surfaces of the tested duct are placed in staggered or in-line arrangements. Recirculation flow in the tested duct is produced by using ribs and grooves placing on the test surfaces. Two test cases are considered in the present work. One is for using corrugated ribs only while the other for both grooves and corrugated ribs. The groove size is 5 mm deep and 10 mm wide; the rib size is 0.3 mm thick and 5 mm high. The corrugated ribs are placed on the channel walls with 45° angle of attack. Two types of mounting ribs are taken into account: ribs placed on the upper plate only and on both the lower and upper plates. The experimental result shows that the use of the corrugated ribs mounted only on the upper grooved-plate of the test duct leads to the highest heat transfer rate and friction factor in comparison with the smooth duct with/without ribs. In this case, the mean Nusselt number is found to be 6.51 times higher than the smooth channel at $PR = 0.5$. The presence of the corrugated ribs on the smooth upper plate only at $PR = 0.5$ provides the mean Nusselt number of 6.33 times over the smooth channel. However, the maximum heat transfer enhancement efficiency values are seen to be 1.84 and 1.71 at the lowest Reynolds number and $PR = 1.0$ for using ribs with grooved and smooth plates, respectively. For the ribs mounted on both channel walls in the in-line array, the use of the ribs on both grooved-walls at $PR = 0.5$ provides the mean Nusselt number of 7.37 times over the smooth channel with maximum heat transfer enhancement efficiency of 1.64. The mean Nusselt number of 7.20 times over the smooth channel with heat

transfer enhancement efficiency of 1.57 is obtained for similar case except for ribs placed on the smooth channel walls.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการการถ่ายเทความร้อนแบบปั่นป่วนภายในช่องแผ่นขนานที่มีครีป-ร่องสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์สนับสนุนจาก รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ อันเป็นประโยชน์ยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ผู้ร่วมงานจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านที่ทำให้งานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างสูงที่ทำให้งานวิจัยเรื่องนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผู้ที่ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและทำวิจัยของผู้วิจัยมาโดยตลอด ได้แก่ คุณพ่อ และคุณแม่ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณในทุกประการที่ให้แก่งานวิจัยเรื่องนี้ไว้ ณ โอกาสนี้

ชานนท์ มะลิกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 โครงร่างวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 เจาะใจในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	11
3.1 เจาะใจในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	11
3.1.1 เจาะใจของการเดินเครื่อง.....	11
3.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล.....	11
3.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล.....	12
3.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	12
บทที่ 4 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	16
4.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Heat Exchanger.....	16
4.1.1 พลาสติก.....	16
4.1.2 แก้วไฟต์.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 แก้ว.....	19
บทที่ 5 ทฤษฎี.....	20
5.1 กลศาสตร์ของไหล.....	20
5.1.1 สภาวะการไหล.....	20
5.1.2 ความเร็วเฉลี่ย.....	21
5.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	22
5.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหล แบบปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	24
5.2 การถ่ายเทความร้อน.....	26
5.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย.....	27
5.2.2 สภาวะการปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	27
5.3 การสมดุลของพลังงาน.....	28
5.4 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม.....	30
5.4.1 ช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว.....	30
5.5 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ในท่อกลม.....	31
5.6 สหพันธ์การพาความร้อน ท่อที่ไม่กลม.....	33
5.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน.....	34
5.8 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน.....	34
บทที่ 6 การออกแบบและการคำนวณ.....	36
6.1 การออกแบบอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	36
6.2 การคำนวณ.....	37
6.2.1 พัดลม.....	37
6.2.2 ท่อทางเข้าชุดทดลอง.....	38
บทที่ 7 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	39
7.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....	39
7.1.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.1.2 Supply Air.....	40
7.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ.....	41
7.1.4 ถังพักลม.....	42
7.1.5 อุปกรณ์ควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์.....	43
7.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	43
7.1.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม.....	45
7.1.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ.....	45
7.2 อุปกรณ์การทดลอง.....	46
7.3 วิธีการทดลอง.....	47
บทที่ 8 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	52
8.1 ผลการทดลองท่อมี่ผนังเรียบ.....	52
8.1.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer).....	52
8.1.2 การสูญเสียความดัน (Pressure loss).....	53
8.2 อิทธิพลของการติดตั้งครีบริบตรงและร่องตรง.....	54
8.3 อิทธิพลของระยะพิทช์.....	59
8.4 อิทธิพลของการจัดวางครีบริบที่ระยะพิทช์ต่างกัน.....	69
8.5 อิทธิพลของครีบริบห้กและครีบริบห้กผสมร่องตรง โดยที่มีอัตราส่วนพิทช์ต่างกัน.....	80
8.6 การหาความสัมพันธ์ของ Nu และ f จากการทดสอบ.....	86
8.6.1 กรณีท่อที่มีครีบริบห้กวางแบบแนวตรงกัน.....	86
8.6.2 กรณีท่อที่มีครีบริบห้กวางแบบแนวเอียงกัน.....	87
8.6.3 กรณีท่อที่มีครีบริบห้กผสมร่องวางแบบแนวตรงกัน.....	89
8.6.4 กรณีท่อที่มีครีบริบห้กผสมร่องวางแบบแนวเอียงกัน.....	90
บทที่ 9 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
9.1 สรุปผลการทดลอง.....	92
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
บรรณานุกรม.....	94

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก.....	97
ภาคผนวก ข.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	109

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ กัน.....	33
7.1 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบตรง.....	48
7.2 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบ-ร่องตรง.....	49
7.3 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบหยัก.....	50
7.4 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบหยักผสมร่อง.....	51
8.1 สรุปผลของการถ่ายเทความร้อน, สัมประสิทธิ์ความเสียหาย และ efficiency (η).....	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โคอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden	6
2.2 Rib configurations: (a) cross rib-roughened (b) parallel rib-roughened (c) cross V-rib-roughened (d) parallel V-rib-roughened (e) Swirl Flow Tube	7
2.3 โคอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Rajendra Karwa	8
2.4 รูปแบบครีบบนท่อนที่เหลี่ยมของ Rajendra Karwa	8
2.5 โคอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi	9
2.6 รูปแบบครีบบนท่อนที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi	9
4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อนในเซลล์ที่สร้างโดยใช้เทคนิครูโซวี่.....	17
4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหลี่ยมที่ทำด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิครูโซวี่.....	18
4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อนในเซลล์ที่ทำด้วยแก้วโดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อและซีต.....	18
4.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว.....	18
5.1 การก่อตัวของบาวนด์คาร์บอนของการไหลแบบลามินาร์ในท่อกลม.....	20
5.2 สมดุลแรงบนอิลิมินต์ α สำหรับการไหลแบบลามินาร์ที่ก่อตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม.....	22
5.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม.....	25
5.4 การก่อตัวของบาวนด์คาร์บอนทางความร้อนในท่อกลม.....	26
5.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ.....	28
5.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนโดยการติดแผ่นเกลียวบิด.....	34
6.1 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบนร่อง.....	37
7.1 ชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	39
7.2 Blower.....	40
7.3 Motor.....	40
7.4 Inverter.....	41
7.5 Orifice meter.....	41
7.6 Inclined manometer.....	42
7.7 ถังพักลม.....	42
7.8 เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์.....	43
7.9 Data Logger FLUKE 2680A	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.10 คอมพิวเตอร์.....	44
7.11 Thermocouple.....	44
7.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม TESTO 350-M/XL	45
7.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445.....	45
7.14 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีป-ร่อง.....	46
7.15 แผ่นทดสอบกรณีติดครีปตรงแนวตรงบนผิวเรียบ.....	47
7.16 แผ่นทดสอบกรณีร่องแนวตรงติดตั้งครีปตรง.....	48
7.17 ชุดทดลองครีปหัยกมูม 45 องศา วางบนแผ่นทดสอบผิวเรียบ.....	49
7.18 ชุดทดลองครีปหัยกมูม 45 องศา วางผสมกับร่องตรงแนวตรง.....	50
8.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างนัสเชิลล์นัมเบอร์กับเร โนลด์นัมเบอร์กรณีท่อที่มีผนังเรียบ.....	53
8.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเร โนลด์นัมเบอร์กรณีท่อที่มีผนังเรียบ.....	54
8.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเชิลล์กับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีปตรง, ร่องตรง และครีปตรงวางผสมกับร่องตรง	55
8.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลล์ต่อเลขนัสเชิลล์ของท่อที่มีผิวเรียบ กับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีปตรง, ร่องตรง และครีปตรงวางผสมกับร่องตรง	56
8.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติด ครีปตรง, ร่องตรง และครีปตรงวางผสมกับร่องตรง.....	57
8.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทาน ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีปตรง, ร่องตรง และ ครีปตรง วางผสมกับร่องตรง.....	58
8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีปตรง, ร่องตรง และ ครีปตรงวางผสมกับร่องตรง	59
8.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเชิลล์กับเลขเร โนลด์ กรณีครีปหัยกที่มีค่าอัตราส่วน พิศซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่น ที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	60
8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลล์ต่อเลขนัสเชิลล์ของท่อที่มีผิวเรียบ กับเลขเร โนลด์ กรณีครีปหัยกที่มีค่าอัตราส่วนพิศซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่มีค่า อัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการคิดตั้ง ครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	62
8.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทาน ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการ คิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียง ด้านเดียว.....	63
8.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้าน ล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	64
8.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเชิลด์กับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่วางผสมกับร่อง ตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการ คิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	65
8.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเชิลด์ต่อเลขนัสเชิลด์ของท่อที่มีผิวเรียบ กับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่วางผสมกับร่องตรง ที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับ การคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบน เพียงด้านเดียว.....	66
8.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่วาง ผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับ ด้านล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	67
8.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทาน ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่วางผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วน พิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่น ที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	68
8.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบกที่วางผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิศต่างๆ สำหรับการคิดครีบนแผ่น ที่ด้านบนกับด้านล่างและการคิดตั้งครีบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	69

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบบัวยาวผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบน แผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน.....	79
8.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์กับเลขเร โนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยก และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการ ติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	80
8.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต่อเลขนัสเซลล์ของท่อที่มีผิวเรียบ กับเลขเร โนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกและกรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกผสมร่องตรง ที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	81
8.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีที่มีการติดตั้ง ครีบบัวยกและกรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	82
8.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทาน ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกและกรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยก ผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบน เพียงด้านเดียว.....	83
8.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกและกรณีที่มีการติดตั้งครีบบัวยกผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วน พิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว.....	84
8.33 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบัวยก เมื่อมีการจัดวางครีบบแบบแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบที่แผ่นด้านบนด้านเดียว.....	86
8.34 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบัวยก เมื่อมีการจัดวางครีบบแบบแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบที่แผ่นด้านบนด้านเดียว.....	87
8.35 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบัวยก สำหรับการจัดวางครีบบแบบแนวเอียงกัน.....	88
8.36 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบัวยก สำหรับการจัดวางครีบบแบบแนวเอียงกัน.....	88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
8.37 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก วางผสมร่อง เมื่อมีการจัดวางครีบบางแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นด้านบน ด้านเดียว.....	89
8.38 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก วางผสมร่อง เมื่อมีการจัดวางครีบบางแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นด้านบน ด้านเดียว.....	90
8.39 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก สำหรับการจัดวางครีบบางแนวเอียงกัน.....	91
8.40 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก สำหรับการจัดวางครีบบางแนวเอียงกัน.....	91
ก-1 Standard orifice plate.....	98
ก-2 แสดงโครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิส.....	98
ก-3 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice).....	99
ก-4 ออริฟิสแบบต่างๆ.....	99

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

A_c	พื้นที่หน้าตัด, m^2
A_s	พื้นที่ผิว, m^2
C_f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน
C_1	ค่าคงที่
C_2	ค่าคงที่
c_p	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่, $J/kg \cdot K$
c_v	ความร้อนจำเพาะของของไหลที่ปริมาตรคงที่, $J/kg \cdot K$
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), m
e	ความหยาบของผิว, m
f	ตัวประกอบเสียดทาน
f_o	ตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผนังเรียบ
g	ระยะร่อง, m
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, $W/m^2 \cdot K$
k	ค่าการนำความร้อน, $W/m \cdot K$
L	ความยาวท่อ, m
\dot{m}	อัตราการไหลของของไหล, kg/s
Nu_D	นัสเซลต์นัมเบอร์
Nu_o	นัสเซลต์นัมเบอร์ของท่อที่มีผนังเรียบ
n	ค่าคงที่
η	ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน
P	เส้นรอบรูป, m
Pr	พลาตันนัมเบอร์
p	ระยะพิคค์
Δp	ความดันตกของของไหล, N/m^2
Q	อัตราการไหลของของไหล, m^3/s
q_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด, W
q_s'	ฟลักซ์ความร้อนที่ผิว, W/m^2
R	ค่าคงที่ของก๊าซ, $J/kg \cdot K$

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

Re_D	เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์
r	รัศมีที่ตำแหน่งใดๆ, m
r_o	รัศมีที่อกกลม, m
St	สแตนตันนัมเบอร์
T	อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ, $^{\circ}C$
T_b	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, $^{\circ}C$
T_m	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ, $^{\circ}C$
$T_{m,i}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางเข้า, $^{\circ}C$
$T_{m,o}$	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อที่ทางออก, $^{\circ}C$
T_s	อุณหภูมิเฉลี่ยผิวครีป, $^{\circ}C$
u	ความเร็วตามแนวแกน x , m/s
u_m	ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ, m/s
\bar{V}	ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
v	ความเร็วตามแนวแกน r , m/s
\dot{W}_m	การจ่ายกำลังให้พัลลัม, J/s
x_i	ความยาวที่ตำแหน่งใดๆ, m
x_{fd}	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่, m
$x_{fd,h}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัว, m
$x_{fd,t}$	ความยาวของทางเข้าสำหรับการปรับตัวเต็มที่ของความร้อน, m
α	ค่าการฟุ้งกระจายความร้อน, m^2/s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
μ	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล, $N \cdot s/m^2$
μ_s	ความหนืดสมบูรณ์ของของไหลที่ผิว, $N \cdot s/m^2$
ν	ปริมาตรจำเพาะ, m^2/s
τ_r	ความเค้นเฉือนในแนวรัศมี, N/m^2
τ_s	ความเค้นเฉือนบนผิว, N/m^2

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้มีการพัฒนาเพื่อต้องการลดขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและต้นทุนในการผลิตในขณะที่อัตราการถ่ายเทความร้อนยังสูงอยู่ ซึ่งตัวแปรสำคัญในการลดขนาดและค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้นหรือการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน โดยการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการทำให้เกิดการไหลแบบหมุนวนหรือการสร้างความปั่นป่วนของของไหลเป็นเทคนิคแบบหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งในทางปฏิบัติสามารถเพิ่มค่าการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น ปัจจุบันบนโลกเรานี้มีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมาตลอดเวลา เนื่องจากโลกมีความเจริญและพัฒนามากขึ้น ทำให้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากขึ้น ซึ่งงานในทางด้านอุตสาหกรรมได้มีการใช้พลังงานในปริมาณมากเช่นเดียวกัน เพราะงานอุตสาหกรรมได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ส่วนหนึ่งที่เราพบเห็นคืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์แบบหนึ่งที่สำคัญและพบได้มาก ในทางวิศวกรรมและอุตสาหกรรม เช่น คอนเดนเซอร์ คอยล์ร้อน คอยล์เย็น หม้อน้ำ หม้อน้ำรถยนต์ ฯลฯ ซึ่งเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่มีความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น ในทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ และ โรงงานผลิตพลังงาน ต่างมีขั้นตอนและกระบวนการมากมายที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิด โดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย หลายประเทศพยายามที่จะหาวิธีการพัฒนาในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อให้มากที่สุด ดังนั้นการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีปร่องจึงเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อโดยการทำให้พื้นที่ผิวขรุขระหรือติดครีปร่องที่ผิวภายในท่อเพื่อให้เกิดเทอร์บูเลนต์ ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ปัญหาของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ ต้องการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของแผ่นความร้อนที่ได้เคยมีการศึกษาดังนี้ Taslim et al. [1] รายงานค่าเลขนัสเซลต์นัสเซลต์(Nusselt number) ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมร่อง, รูปร่างร่องรูปตัววี และความไม่ต่อเนื่องแนวร่อง (แนวร่องตัววีมีทิศทาง

เกี่ยวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อแนวร่องตัววีมีทิศทางเดียวกันกับการไหล Rajendra Kawa [2] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มสมรรถนะของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีร่องขวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบริบที่ทศลงมีลักษณะเป็นร่องตรง ร่องรูปตัววีต่อเนื่อง 60 องศา, ร่องรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา และร่องแท่งมุม 60 องศา โดยทำการทดลองที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ในช่วง 2,800 – 15,000 อัตราการส่วนความกว้างต่อความสูงแผ่นทศลงเท่ากับ 7.19-7.75 และอัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงแผ่นเซาะร่องเท่ากับ 1.0 ความลึกร่อง 3.4 มิลลิเมตร ความกว้างร่อง 6.58 มิลลิเมตร ถ่ายเทความร้อนชนิดคงที่ Constant Heat Flux โดยผลการทดลองพบว่าร่องรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและมีค่าตัวประกอบความเสียดทานน้อยที่สุด ส่วนร่องตรงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ส่วนและร่องรูปตัววีต่อเนื่อง จะมีตัวประกอบความเสียดทานมากที่สุด Giovanni Tanda [3] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียดทานของแผ่น โซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดผิวรูปร่าง V-Shape ชนิดแยกส่วน โดยการศึกษาเป็นการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์ 8,900 – 28,500 ความขรุขระสัมพัทธ์ (e/D_h) 0.009, 0.15 ระยะพิคต์สัมพัทธ์ (p/e) เท่ากับ 4,8,13.5 อัตราส่วนความสูงพิคต์ต่อความสูงแผ่นช่องขนาน (e/H) 0.15,0.25 จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงแผ่นเซาะร่อง (Rib) มีค่าสูงขึ้น และแผ่นเซาะร่องมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน ระยะพิคต์ที่ 0.05 เมตรมีค่ามากกว่าระยะพิคต์ที่ 0.03 เมตร และที่การทดลองในช่วงดังกล่าวจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นเรียบอยู่ประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความลึกของแผ่นเซาะร่องมีค่าลดลง แผ่นเซาะร่องมีลักษณะเป็นรูปตัววี และร่องมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน

จากปัญหาดังกล่าว ถ้าเราสามารถหาวิธีเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนให้มากขึ้น เป็นผลให้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หลักการเดิมเป็นการติดครีบริบหรือร่องเพียงอย่างเดียวที่ผิวภายในท่อเป็นวิธีการในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ในขณะที่หลักการใหม่พบว่าผลของท่อที่มีครีบริบทั้งครีบริบและร่องอยู่ในจุดเดียวกันที่ผิวภายในท่อ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นการศึกษาค่าการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบริบจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อการค้นคว้าวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.3.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริบหักทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม ของกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบหัก(ไม่มีร่อง) และกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบหักผสมร่องตรง ภายในชุดทดสอบ

1.3.2 ศึกษาผลของลมที่มีการไหลแบบปั่นป่วน

1.3.3 ศึกษาผลของกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบหัก(ไม่มีร่อง) และกรณีที่มีการติดตั้งครีบริบหักผสมร่องตรง ที่มีรูปร่างครีบริบหักทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม ภายในชุดทดสอบ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีครีบริบ และแบบครีบริบผสมร่อง

1.4.2 ทดลองที่สภาวะผิวของท่อเป็นฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่

1.4.3 แผ่นชิ้นส่วนทดสอบที่ใช้มี 2 ลักษณะคือ แผ่นอลูมิเนียมผิวเรียบมีความหนา 15 mm กว้าง 200 mm ยาว 650 mm และแผ่นอลูมิเนียมที่มีร่องซึ่งมีขนาดเท่ากับแผ่นอลูมิเนียมผิวเรียบ โดยร่องมีลักษณะเป็นร่องแนวตรง ลึก 5 mm กว้าง 10 mm ยาว 200 mm ทำมุม 90 องศา กับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น

1.4.4 ครีบริบที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นครีบริบหักทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น ครีบริบมีความหนา 0.3 mm สูง 5 mm ซึ่งการติดครีบริบมีการปรับค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ ดังนี้ ครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ (ระยะพิทช์ $P = 10$ mm) ครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ (ระยะพิทช์ $P = 20$ mm) และครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ (ระยะพิทช์ $P = 40$ mm) ตามลำดับ โดยภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณา คือ กรณีการติดครีบริบที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบริบทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งมีการจัดวางครีบริบเป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน

1.4.5 ระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ $D = 20$ mm

1.4.6 ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานในช่วงเลขเรย์โนลด์(Reynolds number) $Re = 3000 - 20,000$

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

1.5.2 พัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น

1.5.3 สามารถนำหลักการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ

1.6 โครงร่างวิทยานิพนธ์

1.6.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการไหลของลม และผลของรูปร่างและการจัดวางครีบบนแบบต่างๆ

1.6.2 ศึกษาทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลและทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

1.6.3 ออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบนและแบบครีบบนผสมร่อง

1.6.4 ทำการทดลองเพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียด

ทาน

1.6.5 เก็บผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1.6.6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทรรศน์

กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลแตกต่างกัน 2 ชนิด เป็นกระบวนการที่สำคัญมากและพบได้บ่อยในอุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น หม้อน้ำ คอนเดนเซอร์ หม้อน้ำรถยนต์ คอยล์ร้อน ฯลฯ ต่างเป็นตัวอย่างของกระบวนการที่ซึ่งความร้อนเกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น อุตสาหกรรมปิโตรเคมีสมัยใหม่ โรงงานผลิตพลังงานต่างมีกระบวนการต่างๆมากมายจนไม่สามารถนับได้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหล 2 ชนิด โดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพเลย โดยทั่วไปอุปกรณ์นั้นเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางการสัมผัสของทิศทางการไหลของกระแสของไหลทั้ง 2 ชนิด ถ้ากระแสทั้งสองไหลตัดซึ่งกันและกันในช่องว่างที่โดยปกติเป็นมุมฉาก เครื่องแลกเปลี่ยนนี้ถูกเรียกว่าเป็น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน (Cross-flow heat exchanger) ตัวอย่างของเครื่องแบบนี้เช่น หม้อน้ำรถยนต์ หรือหน่วยหล่อเย็นในท่อระบบปรับอากาศ ชนิดที่สองของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยเครื่องที่ซึ่งกระแสการไหล 2 ชนิดเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกันในช่องว่าง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube เป็นรูปแบบที่พบมากที่สุด และเครื่องแลกเปลี่ยนแบบท่อซ้อนกัน (เครื่องแลกเปลี่ยนแบบท่อสองชั้น) ก็เป็นตัวอย่างหนึ่งของเครื่องชนิดนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu (1990) ทำการศึกษาผลของมุมครีบบและตำแหน่งครีบบ มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับตำแหน่งของครีบบ แบบแรกครีบบถูกคิดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และอีกแบบครีบบถูกคิดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม พบว่าครีบบมุม 60° ให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

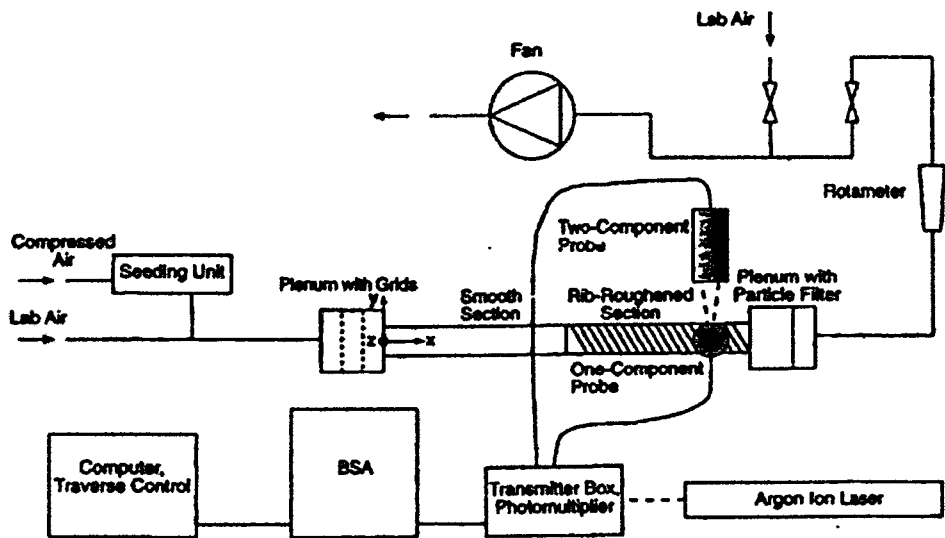
Han, J.C., J.J. Huang, and C.P. Lee (1993) ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีครีบบรูปตัววีและครีบบรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้เกิดปั่นป่วน พบว่าครีบบรูปสามเหลี่ยมให้สมรรถนะการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด

Zhang, Y.M., W.Z. Gu, and J.C. Han (1994) ทำการศึกษาผลของร่องระหว่างครีบบในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มี aspect ratio = 1-10 ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 10000 - 50000$ และพบว่าร่องระหว่างครีบบให้ค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าผนังครีบบ แต่มีค่าความดันตกคร่อมเท่ากัน

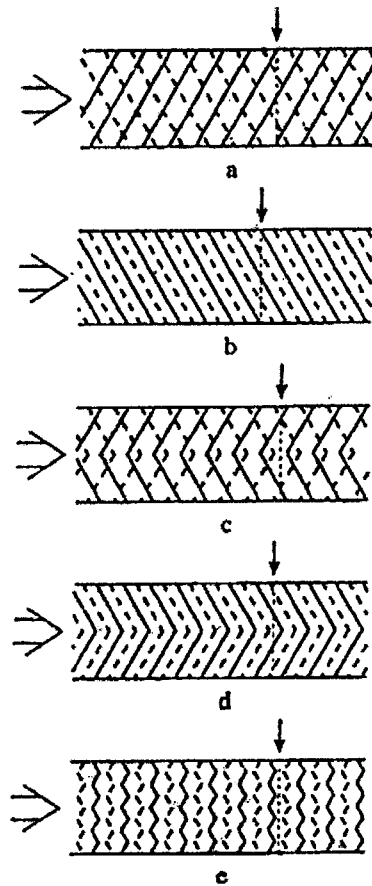
Taslim, M.E., T. Li, and D.M. Kercher (1996) รายงานค่าเลขนัสเซิลต์ที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบบ, รูปร่างครีบบรูปตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบบ (แนว

ครีบริรูปตัววีมีทิศทางการไหลและมิติศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยพลังความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนมากที่สุดเมื่อแนวครีบริรูปตัววีมีทิศทางการไหล

Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden (1998) ทำการศึกษารูปแบบการไหล, ความดันตกคร่อม และการถ่ายเทความร้อนในท่อสี่เหลี่ยมที่มีครีบริ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 500-15000$ ค่า aspect ratio ของท่อสี่เหลี่ยมคือ 1-8, และครีบริถูกติดกับผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม ทำการทดสอบครีบริต่างๆ ดังนี้ ครีบริถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบริถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบริรูปตัววีถูกติดในแนวตัดกันบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม, ครีบริรูปตัววีถูกติดในแนวขนานบนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม และครีบริรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางการไหล (แนวครีบริรูปตัววีมีทิศทางการไหลและมิติศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม การถ่ายเทความร้อนและความดันตกคร่อมถูกแสดงโดยตัวประกอบ j (Colburn heat transfer factor) และตัวประกอบ f (Fanning friction factor) พบว่าครีบริรูปตัววีแบบต่อสลับทิศทางการไหลให้ค่าตัวประกอบ j และค่าตัวประกอบ f มากกว่าครีบริรูปอื่นๆ ที่ค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 1000-2000$

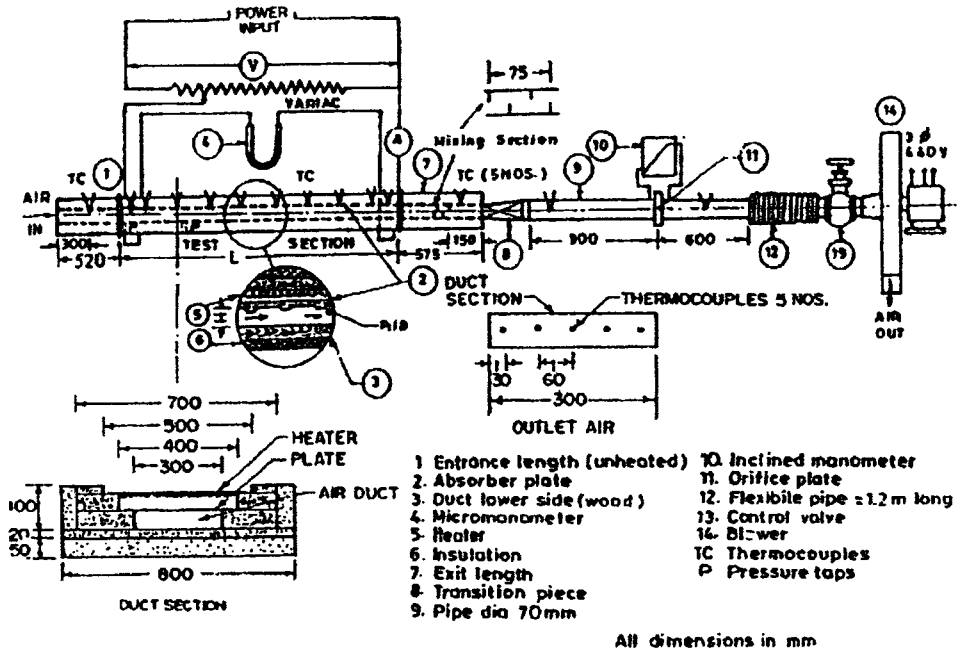


รูปที่ 2.1 โค้ดแกรมชุดอุปกรณ์ของ Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden

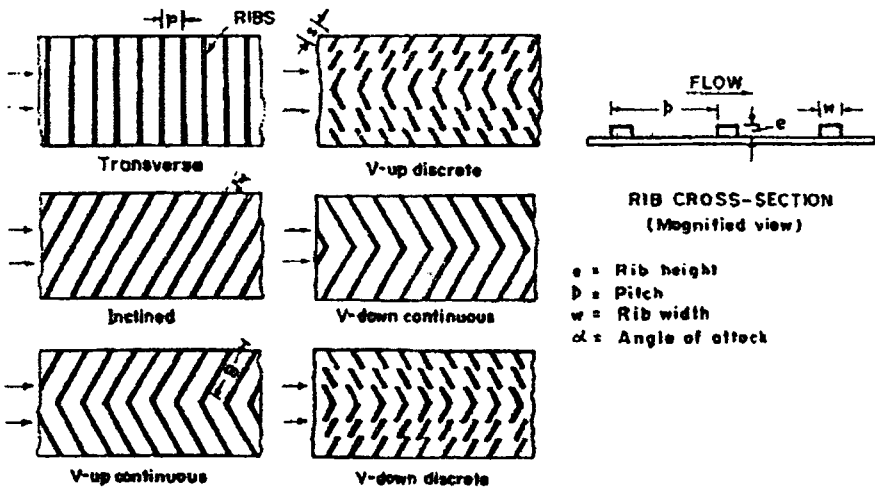


รูปที่ 2.2 Rib configurations: (a) cross rib-roughened (b) parallel rib-roughened (c) cross V-rib-roughened (d) parallel V-rib-roughened (e) Swirl Flow Tube

Rajendra Karwa (2003) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในท่อเหลี่ยมที่มีครีบบางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบบททดสอบมีลักษณะเป็นครีบบาง ครีบบาง ครีบบางตัววี ทั้งในลักษณะยาวต่อเนื่อง และแบบแยกส่วน โดยอุปกรณ์ที่ทดสอบมีอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงท่อสี่เหลี่ยมเท่ากับ 7.19 ถึง 7.75 ความสูงครีบบางต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ 0.0476 และ 0.050 และระยะพิงค์ต่อความสูงครีบบาง (p/e) เท่ากับ 10 โดยครีบบางตัววีที่ทดสอบเป็นครีบบางตัววีทำมุม 60 องศา และครีบบางแบบมุม โดยทำการทดลองในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 2800 - 15000$ และความร้อนที่ให้กับท่อสี่เหลี่ยมเป็นฟลักซ์ความร้อนคงที่ (Constant Heat Flux)



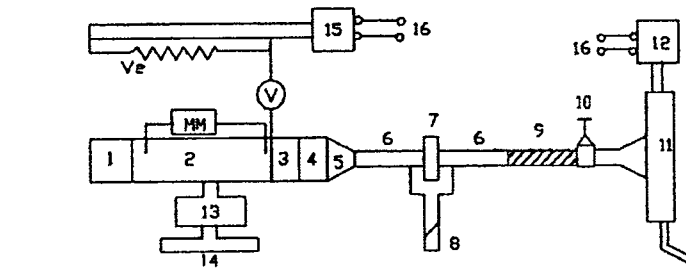
รูปที่ 2.3 โค้ดอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Rajendra Karwa



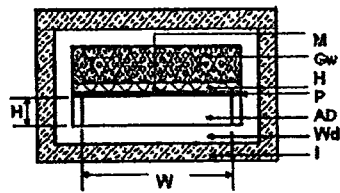
รูปที่ 2.4 รูปแบบครีบบนท่อสี่เหลี่ยมของ Rajendra Karwa

จากการทดลองพบว่าแผ่นครีบบรูปตัววียาวต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบเสียดทานมากที่สุด และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 3.40 ถึง 3.92 เท่า ส่วนแผ่นครีบบรูปตัววีชนิดยาวไม่ต่อเนื่องมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแผ่นครีบลักษณะต่างๆ และมีค่ามากกว่าแผ่นเรียบประมาณ 2.35 ถึง 2.47 เท่า ในขณะที่ค่าสแตนต์นัมเบอร์ (Stanton number) สำหรับแผ่นครีบบรูปตัววีมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลจะมีแนวโน้มมากที่สุดคือ 2.10 ถึง 2.47 เท่า เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับครีบบตรง

Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi (2005) ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าตัวประกอบเสียดทานของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์ที่เหลี่ยมชนิดผิว Rib-grooved โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ $Re = 3000 - 21000$ ความสูงครีปต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) เท่ากับ $0.0181 - 0.0363$ อัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) เท่ากับ $4.5 - 10.0$ และระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) เท่ากับ $0.3 - 0.7$



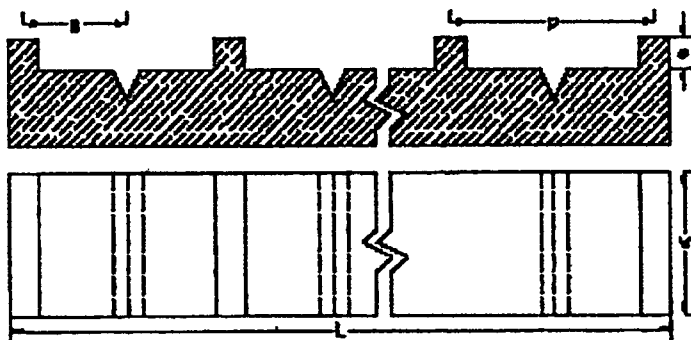
(a) Experimental setup



(b) Enlarged view of test cross section

1. Inlet section (560 mm x 156 mm)	11. Blower
2. Test section (1200 mm x 156 mm)	12. Electric motor Selector-switch
3. Mixing section (300 mm x 156 mm)	13. Selector-switch
4. Outlet section (540 mm x 156 mm)	14. Temperature Recorder
5. Transition section	15. Power source
6. G. I. pipe, 78 mm diameter	16. Voltage stabilizer
7. Orificemeter	MM Micro-manometer
8. Manometer	V Volt meter
9. Flexible pipe	A Ammeter
10. Control valve	Ai Air inlet
	Vc Variac

รูปที่ 2.5 ไคอะแกรมชุดอุปกรณ์ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi



รูปที่ 2.6 รูปแบบครีปที่มีร่อง (Rib-grooved) ของ Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่น Rib-grooved จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่น Rib-grooved จะมีค่ามากกว่าแผ่น Rib อย่างเดียว และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) มีค่าลดลง และมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) เท่ากับ 6 เมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าเลขนัสเซิลด์ Nu มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีปต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ส่วนค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) มีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) เท่ากับ 6 และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงครีป (p/e) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor) มีค่าสูงสุดเมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) เท่ากับ 0.4 และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะร่องต่อระยะพิคต์ (g/p) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงครีปต่อเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (e/D_h) มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

บทที่ 3

เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 เงื่อนไขในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

คำนิยามของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมหมายถึง เครื่องมือใดๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีระดับพลังงานความร้อน (อุณหภูมิ) แตกต่างกัน 2 ชนิด ผ่านผนังกั้นระหว่างของไหลทั้งสอง ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สิ่งแรกที่จะต้องศึกษาคือ คุณสมบัติของไหลที่ใช้ จากนั้นจึงทำการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับจุดประสงค์และเงื่อนไขของการใช้มากที่สุด หัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง และถูกหลักเศรษฐกิจด้วย

3.1.1 เงื่อนไขของการเดินเครื่อง (Operating Conditions)

เงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวกับความแข็งแรงของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกกำหนดโดยความดันและอุณหภูมิของของเหลวที่ใช้ในการออกแบบ เพื่อให้วิธีแลกเปลี่ยนความร้อนและความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ปลอดภัยพอสำหรับการปฏิบัติงาน เราจำเป็นต้องใช้เงื่อนไขของการเดินเครื่องในการคำนวณความหนาของเชลล์ (Shell) ที่บางที่สุดที่ต้องใช้ ตลอดจนสัดส่วนของแฟลนจ์ (Flange) ที่เหมาะสม

ในกรณีที่ต้องจำกัดผลการลดความดันของของไหลระหว่างทางออกและทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเคร่งครัด เราควรพิจารณาทบทวนแบบของเครื่องที่เลือกไว้แล้ว ในกรณีที่การเดินเครื่องเป็นแบบพัทๆ (batch) ปริมาณของของไหล เวลาที่ใช้ในการเดินเครื่อง และผลต่างของอุณหภูมิที่ยอมให้ได้ในการเดินเครื่องแต่ละครั้ง เป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงด้วย

3.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของของไหล (Chemical Properties of Fluid)

การเกิดสนิม (Corrosion) และการกัดเซาะ (Erosion) ผิวสัมผัสของของไหลเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงเสมอ ในการออกแบบอุปกรณ์ทางอุตสาหกรรมเคมี การเกิดสนิมเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ของไหลกระทำต่อผิวสัมผัส ซึ่งโดยปกติแล้ว ผิวสัมผัสจะถูกกัดให้บางลงอย่างสม่ำเสมอ แต่ในบางครั้งสนิมอาจกัดเฉพาะแห่ง เนื่องจากปรากฏการณ์ทางด้านเชลล์ไฟฟ้า ส่วนการกัดเซาะนั้นเกิดจากการปะทะของของไหลกับผิวสัมผัส หรืออาจจะเป็นผลของ

ความสึกหรอที่เกิดจากความดันค่าที่เกิดขึ้น ณ จุดบางจุด วัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงควรเป็นวัสดุที่ไม่เกิดสนิมง่าย หรือถูกกัดเซาะ โดยของไหลที่ใช้

สิ่งที่กล่าวถึงข้างต้นนี้คือ ปัจจัยทั้งหมดที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกแบบและวัสดุที่ใช้ทำ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในขณะที่เดียวกันยังต้องคำนึงถึงราคาของการผลิตของอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนประกอบเข้าไปด้วย

3.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล (Physical Properties of Fluid)

คุณสมบัติของของไหลที่สำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ ความหนืด ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล ปริมาณของ สิ่งเจือปนหรืออนุภาคของแข็งที่มีอยู่ในของไหล ตลอดจนคุณสมบัติของสิ่งเจือปนเหล่านั้น เนื่องจากว่าสิ่งเจือปนอนุภาคของแข็งและตะกอนมักจะสะสมในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จนเกิดการกีดขวางการไหลหรือเกาะเป็นคราบ (Scale) ติดกับผิวนำความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนลดลง จึงควรระวังเป็นพิเศษ ในกรณีที่มีการระเหยหรือการควบแน่น ของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าสภาพการไหลของของไหลไม่เหมาะสม อาจเกิดการ สั่นสะเทือนราวกับถูกฆ้อนน้ำ (Water hammer) หรือเกิดการสะสมของก๊าซ ซึ่งทำให้ ประสิทธิภาพของเครื่องลดลง

3.2 ความเหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Optimization)

ถึงแม้ว่าการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาตรฐานต่างๆ ไป จะเป็นที่พอใจของ ความต้องการในการทำงาน หน่วยธรรมดาที่อุณหภูมิและความดันปานกลางสำหรับกรณีโดย เฉพาะ ถูกออกแบบให้ใช้ได้กับงานพิเศษได้มากมาย คือได้ช่วงอุณหภูมิและความดันตั้งแต่ค่าต่ำๆ จนค่าสูงๆ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหลายตัว ถูกออกแบบสำหรับงานหลากหลายชนิด ดังนั้น มาตรการสำหรับความเหมาะสมที่สุด ขึ้นกับชนิดของงานที่จะนำไปใช้ เช่น มาตรการที่เหมาะสม ที่สุด อาจจะถูกต้องการให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้ำหนักน้อยที่สุด ปริมาตรหรือพื้นที่ที่ใช้ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด เช่นถ้าต้นทุนในการผลิต (Initial Cost) และค่าใช้จ่ายในการ ดำเนินงาน (Operation Cost) จะมีค่าสูงเพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดใหญ่ ต้องใช้สาร ทำงาน (Working fluid) มากกว่า และต้องใช้ Pump ใหญ่ขึ้น Pressure Drop ก็มากกว่าด้วย ต่อมา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรมีการถ่ายเทความร้อนมากที่สุด แต่ความดันที่ลดลงน้อยสุด (Pressure Drop) ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยน้อยที่สุด

ดังนั้นเพื่อที่จะนำไปสู่การศึกษาความเหมาะสมที่สุด ในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนควรถูกแสดง และการคำนวณควรถูกการทำซ้ำสำหรับแต่ละการออกแบบที่สามารถแปรผันได้ จนกระทั่งมาตรการที่เหมาะสมที่สุดถูกทำให้พึงพอใจ และได้มีการนำไปโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาใช้ในการออกแบบด้านอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

Spalding โครงร่างทั่วไปของลักษณะเด่นของวิธีทาง numerical สำหรับการคำนวณ Fluid Dynamics และสมรรถนะการแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, Bell อธิบายคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบกระบวนการทางความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell and Tube, Shah เกี่ยวกับพื้นฐานของลักษณะเด่นคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบทางความร้อนและกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด

โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขั้นพื้นฐาน จะมีการมุ่งความสนใจไปทางด้าน การออกแบบให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดกะทัดรัด แต่ให้มีประสิทธิภาพดี

ขั้นแรกของกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดคือ การแก้ปัญหาของการประเมินค่า (Rating Problem) และการกำหนดขนาด (Sizing Problem)

ปัญหาด้านการประเมินค่า (Rating Problem) ถูกเกี่ยวข้องกับการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิทางออกและความดันที่ลดลงในแต่ละด้าน และปริมาณต่อไปนี้เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ ที่ระบุในปัญหาการประเมินค่าคือ ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, พื้นผิวรูปทรงเรขาคณิต, การจัดการการไหล, อัตราการไหล และอุณหภูมิด้านเข้า

ปัญหาด้านขนาด (Sizing Problem) ถูกเกี่ยวข้องกับการหาค่ามิติของเมตริกซ์ เพื่อจะได้พบการถ่ายเทความร้อนจำเพาะ (Specific heat transfer) และความดันลดลง (Pressure Drop) ที่ต้องการ งานของผู้ที่จะออกแบบคือ การเลือกชนิดของโครงสร้าง, การจัดการการไหล และพื้นผิวรูปทรงเรขาคณิตทั้งสองด้าน

ปริมาณต่อไปนี้เป็นปริมาณอย่างกว้างๆ คือ อุณหภูมิของเหลวที่ทางเข้าและอุณหภูมิทางออก, อัตราการไหล, ความดันลดลง และอัตราการถ่ายเทความร้อน

Shah อธิบายจุดเด่นของความสำคัญของคอมพิวเตอร์ ในการทำ Subroutine ที่ถูกต้อง ให้มีการคิดคำนวณการหาขนาด และการประเมินอัตราต่างๆ ซึ่งรวมถึงข้อต่อไปนี้

1. การออกแบบโดยเฉพาะ (Design specific) การออกแบบโดยเฉพาะที่มีการกำหนดแน่นอนที่สมบูรณ์ ควรถูกหาได้ที่ Computer subroutine ข้อมูลควรรวบรวมชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, การจัดการการไหล, พื้นผิวเรขาคณิต, ค่าสภาวะการทำงาน เช่น อุณหภูมิทางเข้า, ความดัน, อัตราการไหล, ชนิดของของเหลว และอื่นๆ

2. คุณสมบัติของของเหลว (Fluid Properties) คุณสมบัติทางกายภาพหลายๆ อย่างของของเหลว เช่น ความร้อนจำเพาะ, ความหนาแน่น, ความหนืด, ค่าการนำความร้อน และเพลาตันนัม

เบอร์ ค่าเหล่านี้ควรถูกรวมเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิในเทอมที่มีความสัมพันธ์ร่วมกัน หรือที่เรียกว่า สหสัมพันธ์ (Correlation)

3. Matrix geometry ข้อมูลที่บ่งบอกพฤติกรรมของ Matrix geometry ควรถูกแบ่งแต่ละด้านของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงพื้นที่ที่มีการไหลแบบอิสระให้น้อยที่สุด, เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส์, ขนาดครีป ถูกจำเป็นสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของครีป และอื่นๆ

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง ε -NTU (ε -NTU Relation) เนื่องจากวิธี ε -NTU ถูกนำไปใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระจัดกระจาย การกำหนดสูตรหลายๆ สูตรของความสัมพันธ์ระหว่าง ε -NTU ควรถูกจัดทำขึ้น ความสัมพันธ์ควรนำไปใช้ได้กับกรณีทั่วไปในการหา เมื่อรู้ NTU และ $C = C_{\min}/C_{\max}$ และคำนวณ NTU เมื่อรู้ ε และ C

5. ความสัมพันธ์ h และ f (h and f relation) ลักษณะเฉพาะของการแลกเปลี่ยนความร้อนและความเสียดทานการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบกระจัดกระจาย ถูกใช้ในเทอม j และ f และ plot กราฟ ในเทอมของ Reynolds number และ ข้อมูล h , f และ Re ควรถูกจัดทำขึ้นเป็นสหสัมพันธ์ (Correlation)

6. ความดันลดลง (Pressure Drop) ความดันที่ลดลงสำหรับการไหลผ่านตลอด Matrix เกิดจากความเสียดทานการไหล การเร่งและการหน่วง อันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อน, การหดและการขยายที่ทางเข้าและทางออกของ Matrix ความสัมพันธ์ที่เหมาะสมควรถูกทำขึ้น การคำนวณความดันที่ลดลงเนื่องจากสาเหตุหลัก และรวมทั้งข้องอ (Bends), หัวจ่าย (Headers) และท่อรวม (Mainfolds)

7. ประสิทธิภาพครีป (Fin Efficiency) เมื่อพื้นผิวถูกขยาย มีการใช้ใน Heat Transfer Matrix ประสิทธิภาพครีป (η) และประสิทธิภาพของพื้นที่ครีป (η') ถูกต้องการในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นในการกำหนดสูตรประสิทธิภาพครีป และข้อมูลที่ต้องการสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพของพื้นที่ครีปควรถูกจัดทำ

Sizing Problem ถ้าปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับขนาด, น้ำหนัก หรือพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงราคาด้วย ดังนั้น Sizing Problem ถูกแก้ปัญห และขนาดของแกนกลางของ Matrix และพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนถูกคำนวณ

Rating Problem ถ้าเป็นปัญหาเกี่ยวข้องกับการเหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งถูกสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือความดันลดลง ถัดมา Rating Problem ถูกแก้ปัญหและเป็นผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและความดันลดลงถูกคำนวณ การแก้ปัญหของ Rating Problem จะถูกคอมพิวเตอร์นำมาคิดแทน

Optimization Problem มาตรการที่เหมาะสมที่สุดขึ้นกับงาน โดยเฉพาะ ดังนั้นปริมาณที่จะถูกทำให้เกิดสถานะเหมาะสมที่สุดควรมีการกำหนดว่าต้องการมากที่สุด (Maximized) หรือต่ำสุด (Minimized) เนื่องจากอาจจะมีเงื่อนไขบางตัว ถูกเพิ่มเข้ามา หนึ่งในความหลากหลายของวิธีหลายๆ

วิธี อาจจะถูกนำมาใช้ให้ถึงจุดของการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนั้นก็จะถูกปรับให้เหมาะกับแต่ละกรณีที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาของ Rating Problem หรือ Sizing Problem

คาดการณ์ไว้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบเหมาะสมที่สุด สำหรับราคาถูกที่สุด ปัญหาเกี่ยวกับเงื่อนไขที่เปิดเผยเห็นแจ้ง เช่น พื้นที่ด้านหน้าที่ถูกคงที่ (Fixed Frontal Area) และ ช่วงของขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเงื่อนไขที่แสดงเป็นนัย (Implicit Constraints) โดยเฉพาะอัตราการถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด และความดันลดลงมากที่สุด ครั้งหนึ่งพื้นที่ผิวเรขาคณิตถูกเลือก ผู้ออกแบบมีทางเลือกในการเพิ่มเงื่อนไข เช่น ค่าต่ำสุดและสูงสุดของความสูงครีป, ความหนาครีป, ระยะห่างระหว่างครีป, ค่าการนำทางความร้อนครีป, ความยาวครีป, อัตราการไหลของแก๊ส ดังนั้นปัญหาลดลงจากการแก้ปัญหาของ Rating Problem ภายในช่วงของการปรับค่าที่เจาะจง

บทที่ 4

วัสดุที่ใช้ทำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทำ Heat Exchanger

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ แทบทั้งหมดทำจากโลหะแทบทั้งสิ้น โลหะเป็นวัสดุที่มีให้เลือกใช้อย่างกว้างขวาง พร้อมลักษณะสมบัติความแข็งแรงที่หลากหลาย โลหะสามารถแต่งขึ้นรูปได้สะดวกและสามารถเชื่อมต่อได้โดยการเชื่อมหรือการบัดกรี ปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจเป็นตัวชี้้นำให้ใช้โลหะที่มีราคาต่ำสุดที่ยังสามารถทนต่อการไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ความสามารถในการทนต่อการไหลที่สำคัญคือ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนของเหลวและไอที่กัดกร่อน เช่น กรดไฮดรอกลอลริก กรดกำมะถัน และกรดฟอสฟอริก เป็นเหตุให้ต้องหันไปใช้โลหะที่มีราคาแพง เช่น ไททานเนียม แทนทาลัม เซอร์โคเนียม และแฮสเทลลอย ตลอดจนโลหะผสมอื่นๆ ของไหลบางชนิดมีความกัดกร่อนมากจนไม่สามารถหาโลหะที่มีความเหมาะสมในเชิงความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ ภายใต้ข้อจำกัดทางเศรษฐศาสตร์ ทางเลือกก็คือใช้โลหะที่ไม่ใช่โลหะ เช่น พลาสติก แก้ว ไฟไฟด์ แก้ว เป็นต้น

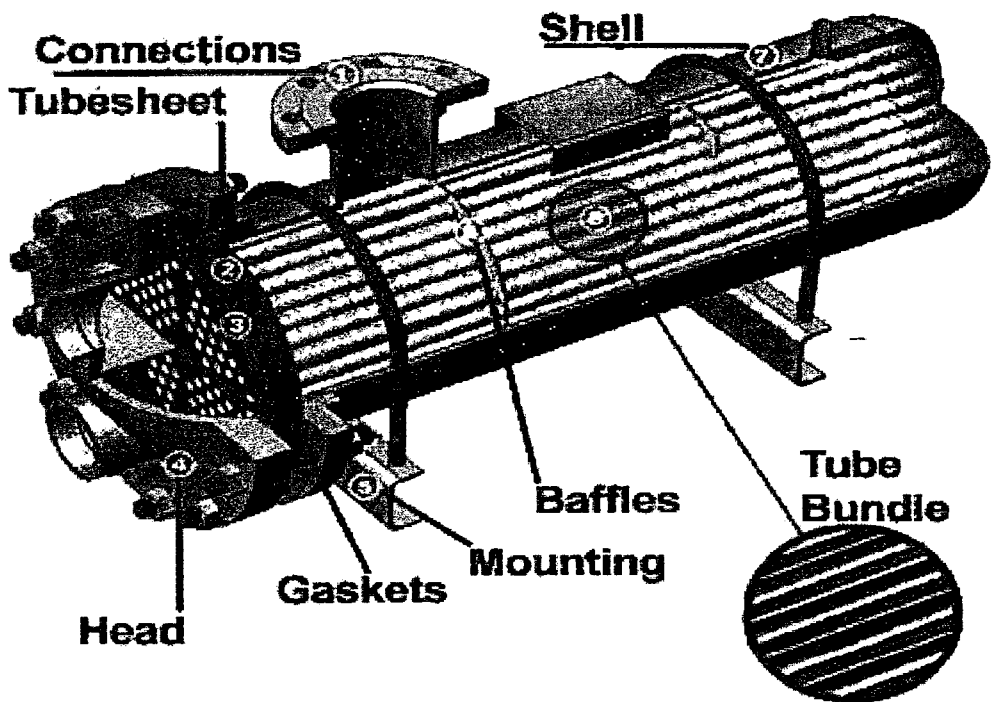
4.1.1 พลาสติก

วัสดุพลาสติกโดยเฉพาะอย่างยิ่ง Teflon หรือ Fluon (Polytetrafluoroethylene, PTFE) ได้รับความนิยมเป็นพิเศษเนื่องจากสมบัติที่พิเศษในด้านความต้านทานต่อการทำลายทางเคมี และการเสื่อมสภาพ เราสามารถสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้โดยการใช้กลุ่มท่อ PTFE ที่ยาวบางและยืดหยุ่น ซึ่งปลายท่อถูกยึดเข้ากับท่อพักที่ทำด้วยวัสดุชนิดเดียวกัน กลุ่มท่อนี้จะถูกม้วนหรือแขวนอยู่ในถังระบายความร้อนที่เปิดบรรจุน้ำระบายความร้อน อีกเทคนิคหนึ่งเป็นการชุบ PTFE บนพื้นผิวภายในท่อและพื้นผิวอื่นๆ ที่สัมผัสกับของไหลที่กัดกร่อน

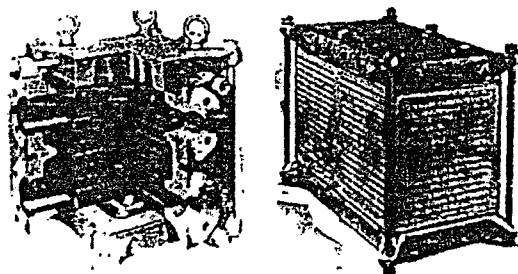
4.1.2 แก้วไฟไฟด์

แก้วไฟไฟด์เป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางเช่นกัน ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับของไหลที่กัดกร่อนมาก แก้วไฟไฟด์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงมาก เป็นตัวนำความร้อนที่ดี และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ (นั่นคือทนต่อการกระชากทางความร้อน) แก้วไฟไฟด์สามารถรับการกักตึงทางกลได้ดี แต่ไม่สามารถเชื่อมได้และมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำในการออกแบบจึงมุ่งให้แก้วไฟไฟด์ทำงานภายใต้แรงกด ข้อจำกัดทางด้านอุณหภูมิและความดันสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แก้วไฟไฟด์โดยทั่วไปคือ 175 °C และ 1.7 MPa ตามลำดับ การใช้แก้วไฟไฟด์เป็นวัสดุทางวิศวกรรมนับว่ามีประวัติอันยาวนาน แต่ได้ขยายขอบเขตการใช้งานใน

ขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางเมื่อไม่กี่สิบปีมานี้ อันเป็นผลจากการพัฒนาเทคนิค ทำให้แกร์ไฟต์ไม่เป็นรูปพรรณ โดยการทำให้อิมตัวภายใต้ความดันโดยเรซินที่เหมาะสม การขยายขอบเขตการใช้งานนี้พอดีห้องกับการขยายตัวโดยทั่วไปทางอุตสาหกรรมทางเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบอินทรีย์ของคลอรีนและฟลูออรีน ปัญหาจากการที่แกร์ไฟต์มีความแข็งแรงด้านทานแรงดึงต่ำ สามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบให้ชิ้นส่วนที่เป็นแกร์ไฟต์ทำงานอยู่ภายใต้ความเค้นกดแทนที่จะเป็นความเค้นดึง วิธีหนึ่งก็คือการหุ้มแกร์ไฟต์ด้วยเปลือกโลหะ ชิ้นส่วนแกร์ไฟต์ที่ประกอบเข้าด้วยกันค่อนข้างแน่น จะถูกประกอบที่อุณหภูมิสูงเพื่อว่าเมื่อเย็นตัวลงโลหะจะเกิดการหดตัวและบีบแกร์ไฟต์ให้อยู่ภายใต้แรงกด สำหรับการใช้งานที่ความดันสูง มักจะนำเอาเทคนิครูไขว้ ซึ่งจะทำให้การเจาะรูเป็นแถวขนานกัน ในแท่งแกร์ไฟต์ตัน รูที่เจาะจะมีด้วยกันสองชุดที่ทำมุมฉากกันและอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน ชุดที่หนึ่งสำหรับของไหลที่กักคร่อนทางด้านท่อ ส่วนอีกชุดหนึ่งสำหรับของไหลที่ไม่กักคร่อนทางด้านเซลล์ รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เทคนิคดังกล่าว แม้ว่าแกร์ไฟต์จะสามารถต้านทานการกัดคร่อนโดยการไหลส่วนใหญ่ได้ แต่ก็ไม่น่าให้ใช้กับสารละลายของโบรไมน์ ฟลูออโรไนท์ ฟอสฟอรัสแดง สารละลายซูปโครเมียม กรดไนตริก และกรด โคลมิก หากมีข้อสงสัยควรรักษาผู้ผลิตแกร์ไฟต์โดยตรง



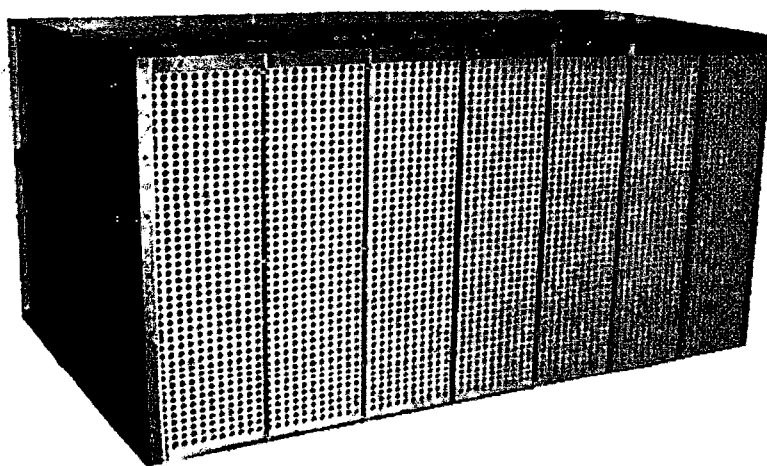
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่สร้าง โดยใช้เทคนิครูไขว้



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำความร้อนที่ทำได้ด้วยแกรไฟต์โดยใช้เทคนิครูโซวี่



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ที่ทำด้วยแก้ว โดยมีเทฟลอนเป็นแผ่นยึดท่อและซีล



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อแก้ว

4.1.3 แก้ว

แก้วเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่มีการนำมาใช้ทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานพิเศษเฉพาะอย่าง แก้วเป็นวัสดุที่น่าสนใจเป็นพิเศษสำหรับการใช้งานที่กักความร้อนอื่นๆ แก้วมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง โดยนอกจากนี้แก้วยังได้รับความนิยมสูงในอุตสาหกรรมยาและอาหาร ซึ่งมีความสะอาดและความบริสุทธิ์ถือเป็นหัวใจสำคัญ ถ้าวัสดุของกระบวนการผลิตสัมผัสเฉพาะกับแก้วและเทฟลอนเท่านั้น โอกาสเกิดการปนเปื้อนจะน้อยมาก อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำด้วยแก้วโดยทั่วไปมีโครงสร้างสองแบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อในเซลล์ ตามปกติทั่วไปที่ใช้ท่อซึ่งทำด้วยแก้วและใช้แผ่นยึดท่อและซีลที่ทำเทฟลอน ตัวเซลล์อาจจะทำด้วยแก้วถ้าของไหลทั้งทางด้านเซลล์และด้านท่อที่เป็นของไหลที่กักกร่อน ในกรณีความดันและอุณหภูมิการใช้งานถูกจำกัดไว้ที่ประมาณ 140 kPa และ 175 °C ตามลำดับ หากต้องการให้ทำงานที่ความดันและอุณหภูมิสูงกว่านี้ จะต้องใช้เซลล์ที่ทำด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนซึ่งได้รับการฉาบหรือปิดหน้าด้วยเทฟลอนหรือยาง รูปที่ 4.4 แสดงชุดท่อคอนเดนเซอร์และชุดท่อบอยเลอร์ที่เป็นแก้ว ในกรณีแรกน้ำหล่อเย็นจะไหลเวียนอยู่ภายในชุดท่อ ส่วนในกรณีหลังไอน้ำหรือของไหลชนิดอื่นจะอยู่ในท่อ ในการใช้งานอาจมีชุดท่อหลายชุดวางซ้อนกันในแนวตั้งก็ได้ เนื่องจากแก้วมีค่าสภาพการนำความร้อนต่ำมากเมื่อเทียบกับโลหะ จึงดูเหมือนว่าเป็นวัสดุที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเลย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในทุกๆ แง่แล้วข้อเสียในส่วนนี้ของแก้วอาจไม่ร้ายแรงอย่างที่คิดแต่แรกก็เป็นได้ ปัจจัยก็คือพื้นผิวที่เรียบของแก้วจะช่วยลดทอนการเกิดคราบสกปรกปรกอย่างได้ผลในหลายๆกรณี ความต้านทานทางด้านเฟาถึงเป็นตัวต้านทานความร้อนที่มีอิทธิพลที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วความต้านทานจากท่อมีค่าน้อยมาก ถึงแม้ว่าแก้วคงจะไม่มีโอกาสที่จะกลายเป็นวัสดุทางการถ่ายเทความร้อนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางแต่ด้วยคุณสมบัติที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนและป้องกันการซึมผ่านได้ดี ประกอบกับมิให้เหลือใช้ได้หลายรูปแบบในราคาที่ต่ำ จึงทำให้ยังคงมีการใช้งานต่อไปในขบวนการหลายอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมยาอาหาร เครื่องดื่ม

บทที่ 5

ทฤษฎี

การไหลภายในท่อที่มีขอบเขตจำกัด โดยที่ความหนาของบาวนด์รีเลเยอร์ไม่สามารถเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ได้ เพราะว่าเมื่อไหลไปได้ระยะหนึ่งบาวนด์รีเลเยอร์ก็ก่อตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อจึงไม่สามารถขยายออกไปได้อีก รูปร่างของความเร็วจะมีลักษณะชัดเจนแน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงต่อไปอีก ซึ่งการไหลลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow) ส่วนการไหลก่อนหน้านี้นี้เรียกว่าการไหลที่กำลังปรับตัว (developing flow) และเรียกช่วงระยะของการไหลแบบนี้ว่า Hydrodynamic entrance region

5.1 กลศาสตร์ของไหล

ตัวพารามิเตอร์ความดันตกเกี่ยวข้องกับกำลังงานของพัลลุมโดยตรง ซึ่งความดันตกมากจำเป็นต้องใช้กำลังขับเคลื่อนของไหลมาก

การจ่ายกำลังให้พัลลุม, \dot{W}_m

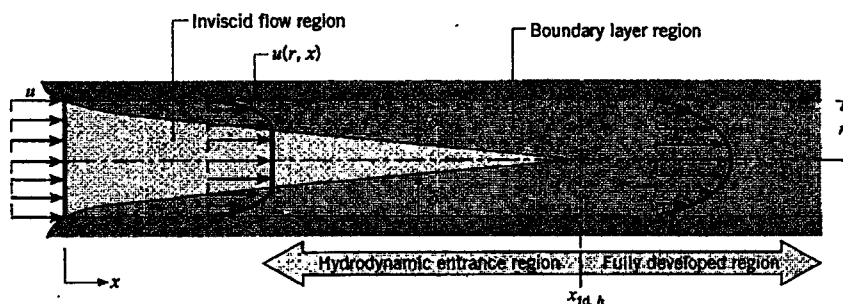
$$\dot{W}_m = Q\Delta p \quad (5.1)$$

ความดันตกของของไหล, Δp

$$\Delta p = f \frac{\rho L \bar{V}^2}{2D} \quad (5.2)$$

5.1.1 สถานะการไหล

พิจารณาการไหลแบบราบเรียบในท่อกลมที่มีรัศมี r_0 ตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การก่อตัวของบาวนด์รีเลเยอร์ของการไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

สำหรับการไหลภายในท่อนั้น ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของช่วงบริเวณทางเข้า (entry region) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับว่าการไหลนั้นเป็นอย่างไร แบบราบเรียบหรือปั่นป่วน

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์, Re_D

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} \quad (5.3)$$

เมื่อ u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยภายในท่อ
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากราบเรียบเป็นปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ที่ $Re_D \geq 4000$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($Re_D \leq 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re_D \quad (5.4)$$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_D \geq 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณดังนี้

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{turb} \leq 60 \quad (5.5)$$

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมุติว่า $x_{fd} > 10D$ สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

5.1.2 ความเร็วเฉลี่ย (mean velocity)

ความเร็วภายในท่อจะแปรเปลี่ยนทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังนั้นจึงใช้ความเร็วเฉลี่ย u_m (mean velocity) แทน โดยนิยามว่าความเร็วเฉลี่ยคือ ความเร็วคูณด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อและความหนาแน่นของของไหล จะเท่ากับอัตราการไหลของมวล

$$\dot{m} = \rho u_m A_c \quad (5.6)$$

ถ้าเป็นการไหลสถานะคงที่ ที่อัดตัวไม่ได้ภายในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ ค่า m และ u_m ย่อมมีค่าคงที่ตลอดความยาวท่อ

สำหรับท่อกลม ($A_c = \pi D^2/4$) ค่าของเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ลดลงเป็น

$$\text{Re}_D = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (5.7)$$

เพราะว่าค่า \dot{m} อาจหาได้จากการอินทิเกรตของฟลักซ์มวล (ρu) ทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัด

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c \quad (5.8)$$

ดังนั้นสำหรับท่อกลม กรณีของไหลอัดตัวไม่ได้ จะได้

$$u_m = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) dA_c}{\rho A_c} = \frac{2\pi\rho}{\rho\pi r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr = \frac{2}{r_o^2} \int_0^{r_o} u(r, x) r dr \quad (5.9)$$

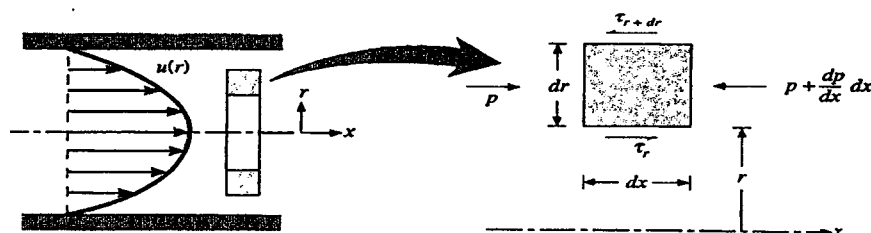
ซึ่งจะหาค่า u_m ได้ทันที เมื่อรู้ velocity profile, $u(r)$ ที่ตำแหน่งนั้น

5.1.3 รูปร่างของความเร็วของของไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

รูปร่างของความเร็วสามารถหาได้ สำหรับการไหลแบบราบเรียบของของไหลที่คุณสมบัติคงที่ อัดตัวไม่ได้ ในช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วของท่อกลม (สำหรับปีนป่วน ส่วนใหญ่ต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นหลัก) โดยทั่วไปจะเป็นฟังก์ชันของรัศมี

สิ่งสำคัญสำหรับเงื่อนไขข้างต้นก็คือ ค่าความเร็วในแนวรัศมีและการเปลี่ยนแปลงของความเร็วตามแนวแกนต่างๆ แห่งมีค่าเป็นศูนย์ $v=0$ และ $(\partial u/\partial x)=0$ ดังนั้นความเร็วตามแนวแกนจะมีค่าขึ้นอยู่กับ r เท่านั้น [$u(x, r) = u(r)$]

ความเร็วตามแนวแกนหาได้จากการแก้สมการที่เหมาะสมของสมการโมเมนตัมตามแนว x หรือหาโดยศึกษาคงตัวของอนุกรมโมเมนตัมก็ได้ตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 สมดุลแรงบนอิลิเมนต์ dx สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ก่อตัวเต็มที่แล้วในท่อกลม

ดังนี้

สำหรับอีลิเมนต์คิฟเฟอเรนเชียลรูปวงแหวนของรูปที่ 5.2 สามารถเขียนสมดุลของแรงได้

$$\begin{aligned} & -\tau_r(2\pi r dx) + \left\{ \tau_r(2\pi r dx) + \frac{d}{dr}[\tau_r(2\pi r dx)]dr \right\} \\ & + p(2\pi r dr) - \left\{ p(2\pi r dr) + \frac{d}{dx}[p(2\pi r dr)]dx \right\} = 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

ซึ่งลดรูปเป็น
$$-\frac{d}{dr}(r\tau_r) = r \frac{dp}{dx} \quad (5.11)$$

จากกฎความหนืดของนิวตัน เราทราบว่า $\tau_r = \mu \frac{du}{dr}$

ดังนั้น (5.11) จะเป็น
$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dp}{dx} \quad (5.12)$$

เพราะว่า dp/dx นั้นไม่ขึ้นกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรต (5.12) ได้

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{2} + C_1 \quad (5.13)$$

และ
$$u(r) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) \frac{r^2}{4} + C_1 \ln r + C_2 \quad (5.14)$$

จากเงื่อนไขที่ขอบ ได้ว่า $u(r_o) = 0$ และ $\partial u / \partial r|_{r=r_o} = 0$ จะได้

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{dx} \right) r_o^2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (5.15)$$

ดังนั้นรูปทรงของความเร็วสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว จะเป็นพาราโบลา และจะสังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงความดัน (dp/dx) ต้องเป็นลบเสมอ

ผลลัพธ์ที่กล่าวมานี้อาจใช้หาค่าความเร็วเฉลี่ยได้ (u_m) โดยแทนสมการ (5.15) ใน (5.9) แล้วอินทิเกรต จะได้

$$u_m = -\frac{r_o^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (5.16)$$

แทนสมการ (5.16) ใน (5.15) จะได้ว่ารูปร่างของความเร็วเป็น

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

เพราะว่า u_m สามารถหาได้จากการรู้อัตราการไหลของมวล ดังนั้นสมการ (5.16) สามารถใช้หาเกรเดียนต์ของความดันได้ (dp/dx)

5.1.4 การเปลี่ยนแปลงความดันและตัวประกอบเสียดทานในการไหลแบบปรับตัวเต็มที่แล้ว ปกติวิศวกรมักสนใจเกี่ยวกับความดันตกในการไหลภายในท่อ เนื่องจากตัวพารามิเตอร์นี้เกี่ยวข้องกับ การหาขนาดกำลังงานของปั๊มหรือพัดลมโดยตรง ในการหาความดันตกเราจะใช้ตัวประกอบเสียดทานของ Moody (Darcy) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ไร้มิติ โดยนิยามว่า

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (5.18)$$

ค่านี้ต่างกับสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน C_f ซึ่งบางครั้งเรียกว่าตัวประกอบเสียดทานเฟอว์นิง ซึ่งนิยามว่า

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_m^2/2} \quad (5.19)$$

เพราะว่าแรงเฉือนบนผนังของของไหลเท่ากับทิศทางตรงกันข้ามแรงบนผิวของของไหล ดังนั้นความเค้นเฉือนบนผิวกำหนดเป็น $\tau_s = -\mu(du/dr)|_{r=r_0}$ ได้

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (5.20)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว

$$f = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad (5.21)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับค่าเต็มที่แล้ว การวิเคราะห์ยุ่งยากมากกว่าต้องใช้ผลจากการทดลองตัวประกอบเสียดทานสำหรับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ต่างๆ ได้แสดงในไดอะแกรมของ Moody ในรูปที่ 5.2 ตัวประกอบเสียดทานจะมีค่าขึ้นอยู่กับเรย์โนลด์นัมเบอร์และสภาวะผิวของท่อ ซึ่งจะมีค่าน้อยสำหรับผิวเรียบและเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหยาบของผิว (e) เพิ่มขึ้น โดยประมาณดังนี้

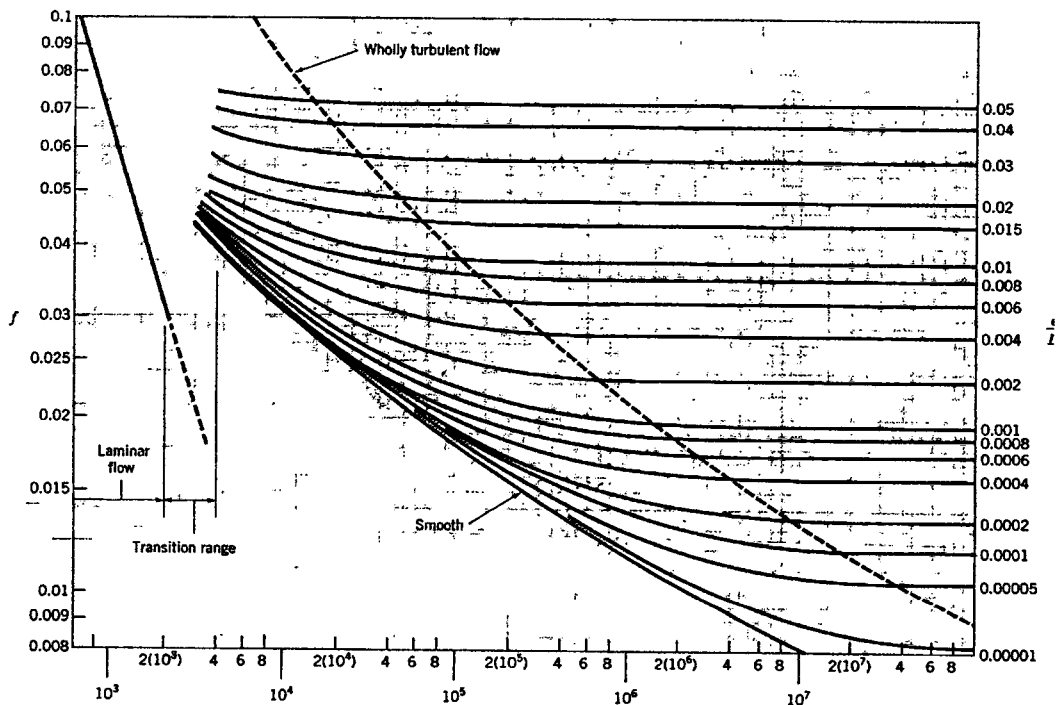
$$f = 0.316 \text{Re}_D^{-1/4} \quad \text{Re}_D < 2 \times 10^4 \quad (5.22)$$

$$f = 0.184 \text{Re}_D^{-1/5} \quad \text{Re}_D > 2 \times 10^4 \quad (5.23)$$

นอกจากนี้เรารู้ว่าความดันลด (Δp) ระหว่างระยะ x_1 ถึง x_2 เป็น

$$\Delta p = - \int_{p_1}^{p_2} dp = f \frac{\rho u_m^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho u_m^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (5.24)$$

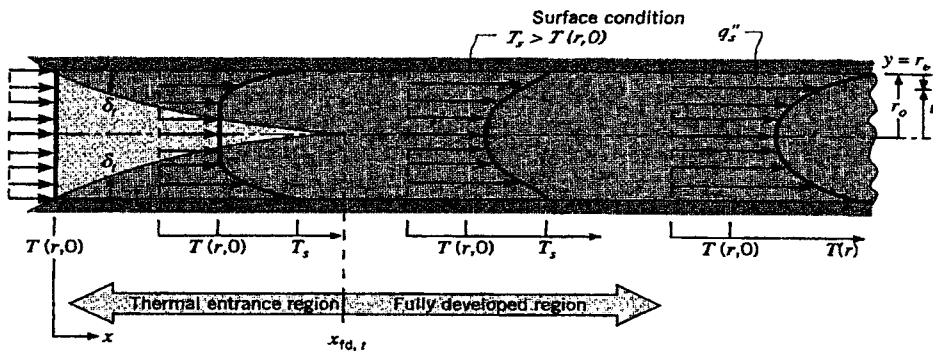
ซึ่งค่า f หาจากรูปที่ 5.3 หรือจากสมการ (5.21) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ และจากสมการ (5.22) และ (5.23) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมผิวเรียบ



รูปที่ 5.3 ตัวประกอบเสียดทานสำหรับการไหลที่ปรับค่าเต็มที่แล้วในท่อกลม

5.2 การถ่ายเทความร้อน

ถ้าของไหลไหลเข้าไปในท่อตามรูปที่ 5.4 ที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ $T(r,0)$ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของความร้อนจะเริ่มต้นก่อตัวขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าสภาวะที่ผิวของท่อคงที่ โดยอาจเป็นอุณหภูมิผิวสม่ำเสมอคงที่ ($T_s = \text{คงที่}$) หรือ ฟลักซ์ความร้อนที่ผิวสม่ำเสมอ ($q_s'' = \text{คงที่}$) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไขไม่ว่าอุณหภูมิผิวคงที่หรือฟลักซ์ความร้อนคงที่



รูปที่ 5.4 การก่อตัวของบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ทางความร้อนในท่อกลม

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ระยะความยาวของทางเข้าสำหรับปรับตัว

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 \text{Re}_D \text{Pr} \quad (5.25)$$

โดยการเปรียบเทียบบริเวณทางเข้า (entrance region) ของอุณหภูมิตามสมการ (5.25) กับสมการของความเร็ว (5.4) จะพบว่าต่างกันที่ค่า Pr เท่านั้น จึงพอสรุปได้ว่า ถ้า $\text{Pr} > 1$ แล้ว ไฮโดรไดนามิกบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ขยายเร็วกว่าบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของความร้อนมาก ($x_{fd} > x_{fd,t}$) และจะกลับกันถ้า $\text{Pr} < 1$ สำหรับค่า Pr สูงๆ เช่น น้ำมัน ($\text{Pr} \geq 100$) x_{fd} จะน้อยกว่า $x_{fd,t}$ มาก และอาจสมมุติได้ว่ารูปทรงของความเร็วที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว มีตลอดช่วงบริเวณทางเข้าของความร้อนในทางกลับกันของไหลที่มีค่า Pr ต่ำมากๆ เช่น โลหะเหลว ($\text{Pr} \leq 0.05$) รูปร่างอุณหภูมิอาจเป็นแบบปรับตัวเต็มที่แล้วได้เร็วมาก ในขณะที่รูปร่างของความเร็วยังอยู่ในช่วงกำลังก่อตัวอยู่ ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วนเงื่อนไขทั้งสองเกือบจะเป็นอิสระไม่ขึ้นกับ Pr และโดยการประมาณได้ว่า $x_{fd,t}/D = 10$

5.2.1 อุณหภูมิเฉลี่ย

ในเรื่องอุณหภูมิ จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) โดยให้ความหมาย

$$T_m = \frac{\int_{A_c} \rho c_v T dA_c}{\dot{m} c_v} \quad (5.26)$$

สำหรับท่อกลม และเป็นกรไหลที่อัดตัวไม่ได้

$$T_m = \frac{2}{u_m r_o^2} \int_0^r u T r dr \quad (5.27)$$

ค่าของ T_m จะเปลี่ยนตามแนว x ถ้ามีความร้อนเข้าหรือออกจากของไหล ซึ่งต่างจาก u_m มีค่าคงที่ สำหรับท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่

ฟลักซ์ความร้อน (q_s') ระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน

$$q_s' = h(T_s - T_m) \quad (5.28)$$

ซึ่ง h เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ T_m เปลี่ยนแปลงตามทิศทาง นั่นคือ dT_m/dx จะไม่เป็นศูนย์ ถ้ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น

5.2.2 สภาพการปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed conditions)

เนื่องจากการพาความร้อนเกิดขึ้นจริงระหว่างผิวและของไหล นั่นคืออุณหภูมิของไหลยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะ x สิ่งหนึ่งที่อยากรู้คือเกิดภาวะ Thermal fully developed หรือยัง สถานการณ์นี้จะแตกต่างไปจากกรณีการไหลของของไหลที่ $(\partial u/\partial x) = 0$ ในช่วงบริเวณปรับตัวเต็มที่แล้ว ในทางกลับกัน ถ้ามีการพาความร้อนแล้ว (dT_m/dx) เช่นเดียวกับ $(\partial T/\partial x)$ ที่รัศมี r ใดๆ จะไม่เป็นศูนย์ ผลที่ตามมาคือรูปร่างของอุณหภูมิ $T(r)$ จะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x ซึ่งเปรียบเสมือนว่า สภาพการปรับตัวเต็มที่แล้วของอุณหภูมิไม่เคยเกิดขึ้นเลย ปรากฏการณ์นี้จะต้องจัดใหม่ให้อยู่ในรูปไร้มิติของอุณหภูมิเพื่อให้ได้เงื่อนไขนี้

ความแตกต่างอุณหภูมิไร้มิติในรูป $(T_s - T)/(T_s - T_m)$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีอยู่จริง ซึ่งอัตราส่วนนี้จะป็นอิสระกับ x นั่นคือถึงแม้ว่า $T(r)$ ยังคงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกับ x แต่รูปร่าง

สัมพัทธ์ของ profile นี้จะไม่เปลี่ยนแปลงเลย และการไหลแบบนี้เรียกว่า การไหลปรับตัวเต็มที่แล้วทางความร้อน (Thermally fully developed) และจะได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right]_{fd,t} = 0 \quad (5.29)$$

เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวท่อ

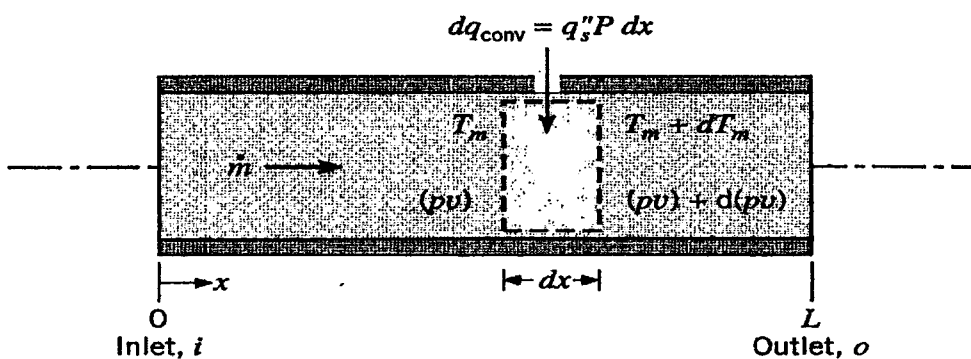
T คือ อุณหภูมิของของไหลที่ตำแหน่งใดๆ

T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เงื่อนไขที่กำหนดให้สำหรับสมการ (5.29) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อ อาจจะเป็นกรณี q_s'' คงที่ หรือ T_s คงที่ก็ได้ เงื่อนไขที่ผิวแบบนี้เกิดขึ้นมากในทางวิศวกรรม เช่น ในผนังท่อที่ได้รับความร้อนจากไฟฟ้าหรือผิวภายนอกที่ได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอย่างสม่ำเสมอ จะเป็นกรณีของ q_s'' คงที่ ส่วนกรณี T_s คงที่ จะเกิดขึ้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลง (เนื่องจากการเดือดหรือการควบแน่น) เกิดขึ้นที่ผิวภายนอก

5.3 การสมดุลของพลังงาน (Energy Balance)

พิจารณาการไหลในท่อตามรูปที่ 5.5 ของไหลไหลด้วยอัตรามวลคงที่ \dot{m} และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นที่ผิวภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของของไหล รวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางตามแนวแกนจะไม่นำมาคิด ดังนั้นถ้าไม่มีงานเพลตซึ่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้ว จะมีเพียงอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 5.5 ปริมาตรควบคุมสำหรับการไหลภายในท่อ

งานของการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุม คิดต่อหน่วยมวลของไหล และจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน p และปริมาตรจำเพาะ v (ซึ่ง $v=1/\rho$)

โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 5.5 และจากนิยามของ T_m จะได้

$$dq_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} dx \right] = 0 \quad (5.30)$$

หรือ
$$dq_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad , \quad (5.31)$$

ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์ ($pv = RT_m$ และ $c_p = c_v + R$) จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} c_p dT_m \quad (5.32)$$

สมการนี้ใช้ได้สำหรับของเหลวที่อัดตัวไม่ได้เช่นกัน ในกรณีนี้ $c_v = c_p$ เพราะว่า v น้อยมากๆ $d(pv)$ โดยทั่วไปจะน้อยกว่า $d(c_v T_m)$ มากจนตัดทิ้งได้

รูปของสมการ (5.32) เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขสำหรับท่อทั้งหมด โดยการอินทิเกรตจากทางเข้าถึงทางออกของท่อ จะได้

$$q_{conv} = \dot{m} c_p (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (5.33)$$

โดยที่ q_{conv} เป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อทั้งหมด

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, h

$$h = \frac{\dot{m} C_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s (T_s - T_b)} \quad (5.34)$$

อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, T_b

$$T_b = \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \quad (5.35)$$

เลขนัสเซิลต์, Nu_D

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (5.36)$$

เงื่อนไขความร้อนที่ผิวคือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ (Constant Surface Heat Flux) โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ที่ผิวกริบ

5.4 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบราบเรียบในท่อกลม

5.4.1 ช่วงบริเวณที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed region)

ที่จุดใดๆ ในท่อ สมการพลังงานจะเป็น

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\alpha}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.37)$$

เทอมทางซ้ายมือของสมการ (5.37) เป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการพา และเทอมทางขวามือเป็นการถ่ายเทพลังงานสุทธิโดยการนำ ในทิศทางตามแนวรัศมี

คำตอบของสมการ (5.37) ได้หาไว้แล้วสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ในช่วงนี้การประมาณบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของความเร็วมืดที่พอใจ นั่นคือ $v=0$ และ $(\partial u/\partial x)=0$ สำหรับกรณีของรูปร่างความเร็วตามแนวแกนเป็นแบบพาราโบลา นอกจากนี้สำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การประมาณบาวน์คาร์ลีเลเยอร์ของอุณหภูมิให้ผลที่เป็นที่พอใจเช่นกัน นั่นคือ $\partial^2 T/\partial x^2 = 0$ แทนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกน สมการพลังงาน (5.37) ลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{dT}{dr}) = \frac{2u_m}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[1 - (r/r_o)^2 \right] \quad q_s' = \text{คงที่} \quad (5.38)$$

ซึ่งเทอม $(2u_m/\alpha)(dT_m/dx)$ คงที่ โดยการแยกตัวแปรและอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้

$$T(r) = \frac{2u_m}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[\frac{r^2}{4} - \frac{r^4}{16r_o^2} \right] + C_1 \ln r + C_2$$

ค่าคงที่ของการอินทิเกรต C_1 และ C_2 หาจากเงื่อนไขที่ขอบดังนี้

T ที่ $r=0$ หรือ $(\partial T/\partial r=0$ ที่ $r=0)$ จะได้ $C_1=0$ และ $T(r_o)=T_s$ ที่ซึ่ง T_s แปรตาม x จะได้ $C_2 = T_s - (2u_m/\alpha)(dT_m/dx)(3r_o^2/16)$ ดังนั้นสำหรับช่วงที่ปรับตัวเต็มที่แล้วและฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ จะได้การกระจายของอุณหภูมิในรูป

$$T(r) = T_s - \frac{2u_m r_o^2}{\alpha} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \left[\frac{3}{16} + \frac{1}{16} \left(\frac{r}{r_o} \right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{r_o} \right)^2 \right] \quad (5.39)$$

เมื่อรู้การกระจายของอุณหภูมิ ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ก็สามารถหาได้ เช่นถ้ารูปร่างของความเร็วและอุณหภูมิตามสมการ (5.15) และ (5.39) โดยแทนในสมการ (5.27) และอินทิเกรตทั่วทั้ง r จะได้

$$T_m = T_s - \frac{11}{48} \left(\frac{u_m r_o^2}{\alpha} \right) \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \quad (5.40)$$

จากสมการ $\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s^* P}{m c_p}$

ซึ่ง $P = \pi D$ และ $m = \rho u_m (\pi D^2 / 4)$ จะได้

$$T_m - T_s = - \frac{11}{48} \frac{q_s^* D}{k} \quad (5.41)$$

จากกฎการเย็นตัวของนิวตัน สมการ (5.28) และ (5.41) ได้ว่า

$$h = \frac{48}{11} \left(\frac{k}{D} \right)$$

หรือ $Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36$ สำหรับ q_s^* คงที่ (5.42)

ดังนั้นในท่อกลมที่มีคุณลักษณะฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ การไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว ค่านัสเซิลท์นัมเบอร์จะคงที่ ไม่ขึ้นกับ Re_D , Pr และตำแหน่งตามแนวแกน x

5.5 สหพันธ์การพาความร้อน การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลม

สมการหา Nu_x สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมเรียบเสนอโดย Colburn ซึ่งได้มาจาก Chilton-Colburn analogy

$$\frac{C_f}{2} = \frac{f}{8} = St Pr^{2/3} = \frac{Nu_D}{Re_D Pr} Pr^{2/3} \quad (5.43)$$

แทน f จากสมการ (5.23) สมการของ Colburn เป็น

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (5.44)$$

Dittus-Boelter ได้เสนอสมการเป็น

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (5.45)$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน ($T_s > T_m$)

$n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_s < T_m$)

สมการนี้ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองสำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10,000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$$

สมการต่างๆ นี้จะใช้เฉพาะกรณีย่อยๆ ที่ความแตกต่างอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) ไม่มากนัก โดยคุณสมบัติต่างๆ คัดที่ T_m สำหรับการไหลที่แสดงลักษณะการแปรเปลี่ยนคุณสมบัติมากๆ Seider และ Tate ได้แนะนำให้ใช้สมการต่อไปนี้

$$Nu_D = 0.027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (5.46)$$

สำหรับ

$$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 16,700 \\ Re_D \geq 10,000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$$

โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ยกเว้นค่า μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s หาที่ T_s

5.6 สหพันธ์การพาความร้อน ท่อที่ไม่กลม

ถึงแม้ว่ามีข้อจำกัดมากเกี่ยวกับการพิจารณาต่อการไหลภายในท่อกลม การประยุกต์ทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนในท่อที่ไม่กลม โดยการใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิภาพผลเป็นความยาวเฉพาะ (characteristic length) ซึ่งเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter), D_h

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (5.47)$$











เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัด

P คือ เส้นรอบรูปของการไหล

เส้นผ่านศูนย์กลางนี้จะใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Re_D และ Nu_D

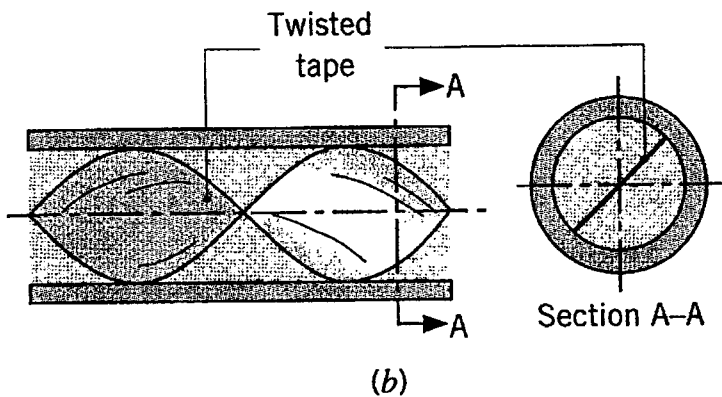
สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ค่า Nu_D ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขปรับตัวเต็มที่แล้วหาได้จากตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่า Nu_D สำหรับการไหลแบบราบเรียบที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อพื้นที่หน้าตัดต่างๆ

Cross Section	$\frac{b}{a}$	$Nu_D = \frac{hD_h}{k}$	
		(Uniform q_s'')	(Uniform T_s)
	—	4.36	3.66
	1.0	3.61	2.98
	1.43	3.73	3.08
	2.0	4.12	3.39
	3.0	4.79	3.96
	4.0	5.33	4.44
	8.0	6.49	5.60
	∞	8.23	7.54
	∞	5.39	4.86
	—	3.11	2.47

5.7 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Enhancement)

การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการทำให้เกิดการหมุนวนด้วยการสอดใส่แผ่นเกลียวบิดตามรูปที่ 5.6 การสอดแทรกนี้ประกอบด้วยแผ่นบางที่ถูกบิดเป็นคาบของมุม 360° เป็นผลให้ความเร็วของการไหลเพิ่ม เนื่องจากความเร็วสัมผัสเพิ่มใกล้ผนังท่อ การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนเป็นผลให้เกิดความดันตก (pressure drop) มากขึ้น



รูปที่ 5.6 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน โดยการติดแผ่นเกลียวบิด

5.8 ประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบ (P_o) เท่ากับกำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีครีบลักษณะต่างๆ (P_r)

$$P_o = P_r$$

$$(PQ)_o = (PQ)_r$$

$$\left[\left(\frac{f \rho L \bar{V}^2}{2D_h} \right) (\bar{V}A) \right]_o = \left[\left(\frac{f \rho L \bar{V}^2}{2D_h} \right) (\bar{V}A) \right]_r$$

$$(f \bar{V}^3)_o = (f \bar{V}^3)_r$$

$$(f Re^3)_o = (f Re^3)_r$$

$$\frac{f_o}{f_r} = \frac{\text{Re}_r^3}{\text{Re}_o^3}$$

$$\frac{\text{Re}_r}{\text{Re}_o} = \left(\frac{f_o}{f_r}\right)^{1/3}$$

$$\frac{\text{Re}_r}{\text{Re}_o} = \frac{1}{(f_r/f_o)^{1/3}}$$

$$\text{Re}_r = \frac{\text{Re}_o}{(f_r/f_o)^{1/3}} \quad (5.48)$$

ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนพิจารณาที่กำลังของพัดลมที่ใช้ในการจ่ายอากาศผ่านท่อที่มีผนังเรียบและท่อที่มีครีบลักษณะต่างๆ เท่ากัน

$$Nu = f(\text{Re})$$

$$\eta = \frac{Nu}{Nu_o} \Big|_{\text{pumping power}}$$

$$\eta = \frac{Nu/Nu_o}{(f/f_o)^{1/3}} \quad (5.49)$$

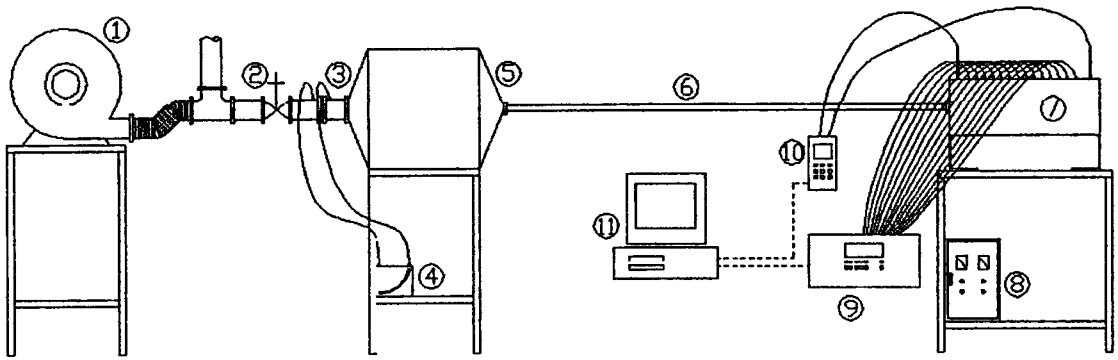
บทที่ 6

การออกแบบและการคำนวณ

6.1 การออกแบบอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคอากาศไหลแบบหมุนวนช่วยในการถ่ายเทความร้อน การไหลแบบหมุนวนได้ถูกนำมาใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก การหมุนวนได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันของอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีป การติดครีปได้ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีป และช่วยเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนที่ผิวครีป ซึ่งการติดครีปที่ผิวภายในท่อเป็นผลให้อากาศเกิดความปั่นป่วนขึ้น สามารถนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน ลดพื้นที่ผิวสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนและเป็นผลให้อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีขนาดเล็กลง อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ

ชุดทดสอบช่องขนานประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมแบบผิวเรียบและผิวร่องรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 200 mm มีความยาว 650 mm และมีความสูงระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 20 mm ที่มีการติดครีปตรงแนวตรง และครีปหยักทำมุม 45 องศา กับทิศทางของลม ซึ่งผนังของชุดทดลองจะประกอบไปด้วยฉนวน 3 ชั้น ฉนวนชั้นแรกเป็นฉนวนใยเซรามิกชั้นที่สองเป็นแผ่นกระเบื้องฉนวนชั้นที่สามเป็นฉนวนใยแก้ว และมีแผ่นติดทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลอง ผิวภายนอกชุดทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวน ครีปทุกแบบทำจากแผ่นอลูมิเนียม มีความหนา 0.03 mm มีขนาดความสูงครีป 5 mm และมีระยะพิตซ์ 1, 2 และ 4 mm โดยนำครีปต่างๆ ติดลงบนผนังของแผ่นอลูมิเนียม ครีปและผนังติดกันแต่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน จะมีความต้านทานของหน้าสัมผัสที่ฐานครีป แผ่นที่มีผิวเรียบและแผ่นที่มีผิวร่องถูกติดกับผิวท่อแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกัน ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นอลูมิเนียมแต่ละแผ่นจะมีจำนวนครีปที่แตกต่างกันไป โดยหลักการทำงานของอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ Blower เป็นแหล่งจ่ายอากาศ ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านถังพักลม ท่อทางเข้าชุดทดลอง และชุดทดลอง ในการทดลองกำหนดให้มีอัตราการไหลของอากาศในช่วงเรย์โนลด์ส์นับเบอร์ $Re = 3000 - 20,000$ ซึ่งอัตราการไหลของอากาศจะถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ และวัดค่าอัตราการไหลออกมาโดยชุดออริฟิสมิเตอร์



รูปที่ 6.1 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีป ประกอบด้วย (1) Blower, (2) วาล์วปรับปริมาณลม, (3) ออร์ฟิสมิเตอร์, (4) มาณมิเตอร์, (5) ถังลมปรับการไหล, (6) ช่องขนานปรับสภาพการไหล, (7) ชุดทดสอบ, (8) ชุดควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์, (9) ชุดบันทึกอุณหภูมิ, (10) ชุดวัดความดันตกคร่อม และ (11) คอมพิวเตอร์

6.2 การคำนวณ

6.2.1 พัฒน

การหาขนาดพัฒลม โดยพิจารณาที่เรย์โนลด์์นัมเบอร์ $Re = 20000$ ซึ่งพัฒลมรับภาระสูงสุดจากสมการเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)

$$\begin{aligned} D_h &= \frac{4A_c}{P} \\ &= \frac{4(0.2 \times 0.02)}{2(0.2 + 0.02)} \\ &= 0.03636364 \text{ m} \end{aligned}$$

จากตารางคุณสมบัติอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 318 K จะได้ $\rho = 1.1581 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 1.85072 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$

จากสมการเรย์โนลด์์นัมเบอร์

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \\ \text{หาความเร็วเฉลี่ย} \quad \bar{V} &= \frac{Re_D \mu}{\rho D_h} \\ &= \frac{24000 \times 1.85072 \times 10^{-5}}{1.1581 \times 0.03636364} \\ &= 10.547 \text{ m/s} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} Q &= \bar{V} A_c \\ &= 10.547 \times 0.2 \times 0.02 \\ &= 0.04218 \text{ m}^3/\text{s} \\ &= 2.531 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการทดลองใช้พัลลวมมีอัตราการไหลมากกว่า 2.531 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

6.2.2 ท่อทางเข้าสู่ชุดทดลอง

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ ($Re_D \leq 2300$) ความยาวของช่วงบริเวณทางเข้าสำหรับการปรับตัว หาได้จากสมการ

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re_D$$

เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์วิกฤติ สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลงของการไหล จากราบเรียบเป็นปั่นป่วน เริ่มต้นจาก $Re_{D,c} \approx 2300$ และการไหลเป็นแบบปั่นป่วนเต็มที่ ที่ $Re_D \geq 4000$

ส่วนในการไหลแบบปั่นป่วน ($Re_D \geq 4000$) ไม่มีสมการที่แน่นอนสำหรับหาระยะทางสำหรับการปรับตัว แต่รู้เพียงว่าไม่เกี่ยวข้องกับเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และมีค่าประมาณดังนี้

$$10 \leq \left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{turb} \leq 60$$

สำหรับค่าที่ใช้ในที่นี้ เราจะสมมติว่า $x_{fd} = 20D_h$ สำหรับการไหลที่ปรับตัวเต็มที่แล้ว (fully developed flow)

จากสมการ

$$\begin{aligned} x_{fd} &= 20D_h \\ &= 20 \times 0.03636364 \\ &= 0.7272728 \text{ m} \end{aligned}$$

ดังนั้นในการทดลองใช้ท่อทางเข้าสู่ชุดทดลองมีความยาว 0.72 เมตร

บทที่ 7

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

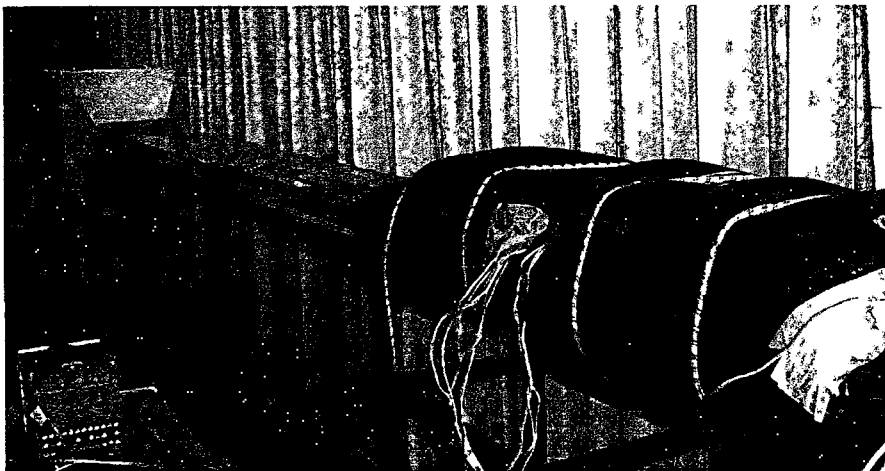
ในการทดลองชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม สามารถแบ่งขั้นตอนการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่หนึ่งเป็นการเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง ขั้นตอนที่สองเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง และขั้นตอนที่สามเป็นขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง

7.1 การเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

ในการศึกษาถึงผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีชิ้นส่วนทดสอบแบบครีบทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมภายในท่อ และผลของอัตราส่วนพิทช์ของครีบและการจัดวางครีบ ซึ่งเป็นงานวิจัยเชิงการทดลอง การจัดเตรียมและสร้างอุปกรณ์ในการทดลองจึงมีการกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

7.1.1 ชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยม(Rectangular duct)

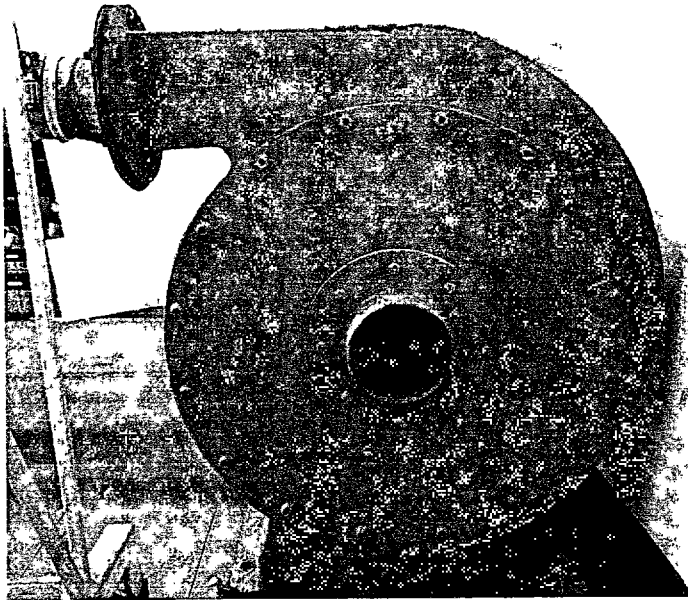
ชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลของลมไหลในช่วงปั่นป่วน โดยชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยมมีค่า aspect ratio 10:1 ทำการทดลองเป็นสองกรณี คือกรณีที่มีการติดตั้งครีบทำมุมไม่มีร่องและกรณีที่มีการติดตั้งครีบทำมุมผสมร่องตรง โดยทำการเปรียบเทียบกับผลทดลองของท่อที่มีผนังเรียบไม่มีครีบ โดยภายในชุดทดลองของท่อสี่เหลี่ยมที่พิจารณา คือ กรณีการติดตั้งครีบที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดตั้งครีบทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งมีการจัดวางครีบเป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกันภายในชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยม

7.1.2 Supply Air

Blower MODEL TB-150 เป็นแหล่งจ่ายอากาศ ซึ่งเป็น Blower แบบ 12 ใบพัด ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ หรือ 2 HP ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V PRESSURE 700 mm.Aq ดังแสดงในรูปที่ 7.2



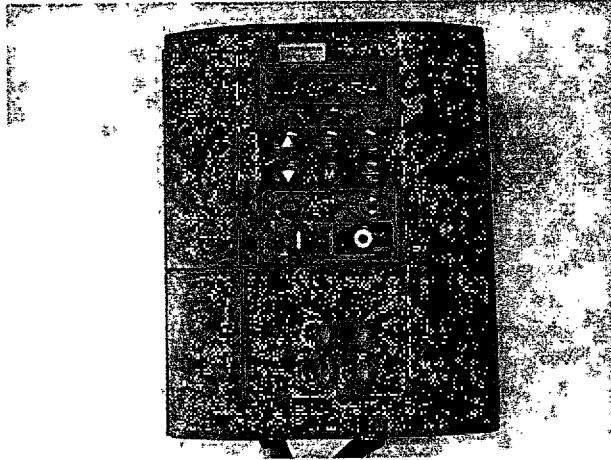
รูปที่ 7.2 Blower

Motor เป็นต้นกำลังในการขับ Blower ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V 50 Hz 2900 rpm 14.8 A ดังแสดงในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 Motor

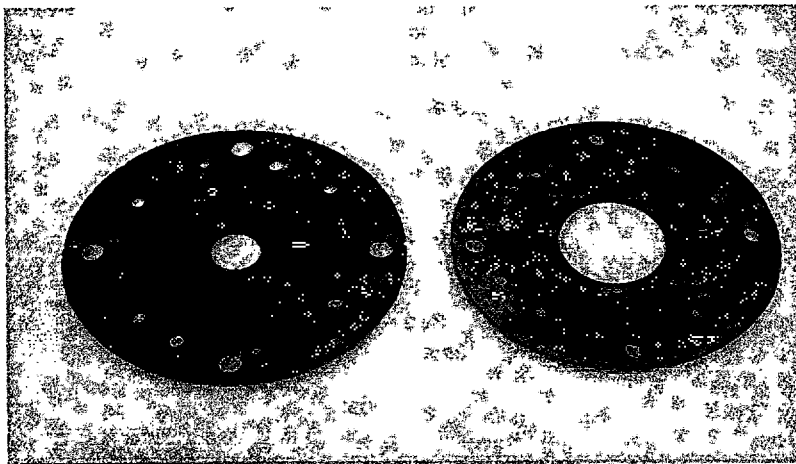
Inverter TYPE FVR7.5E11S-4JE ถูกนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับ Blower ในการควบคุมอัตราการไหลของอากาศให้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 7.4 โดย Inverter สามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุดเท่ากับ 2400 rpm และมีค่าความละเอียดในการปรับความเร็วรอบในหลักหน่วย ใช้กระแสไฟฟ้า 380 V 3 PHASES



รูปที่ 7.4 Inverter

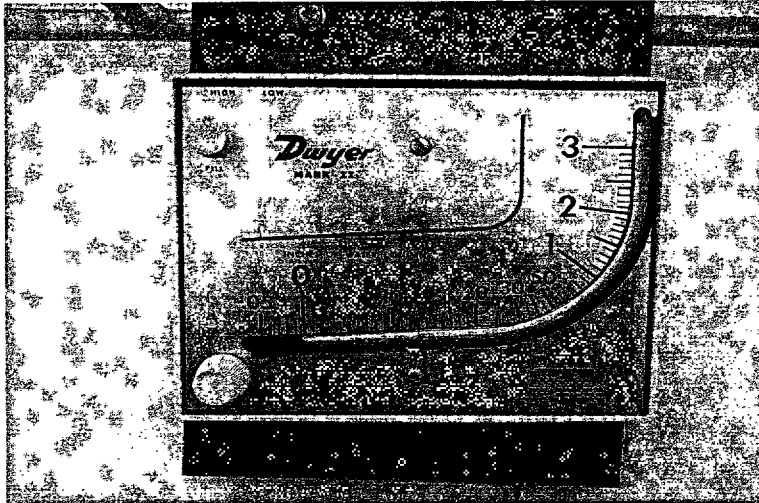
7.1.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

Orifice meter เป็นอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศ โดย Orifice meter เป็นชุดวัดอัตราการไหลของอากาศที่ทางเข้าชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.5 ในการสร้างอุปกรณ์ Orifice meter ได้สร้างตามมาตรฐานของ JIS (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD) Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes JIS Z 8762



รูปที่ 7.5 Orifice meter

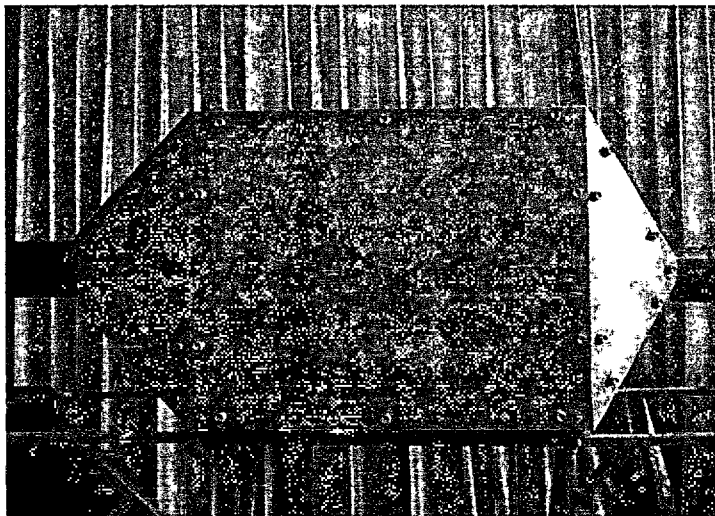
Manometer ใช้วัดความแตกต่างของความดัน เพื่อใช้หาอัตราการไหลของอากาศ ความแตกต่างของความดัน ซึ่งสามารถอ่านค่าได้จากความแตกต่างของระดับน้ำ Inclined manometer Mark II Model No.25 ใช้วัดความแตกต่างของความดันที่มีค่าน้อย ซึ่งจะทำให้สามารถอ่านค่าของระดับ red gage oil (specific gravity 0.826) ได้มีความถูกต้องมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 Inclined manometer

7.1.4 ถังพักลม

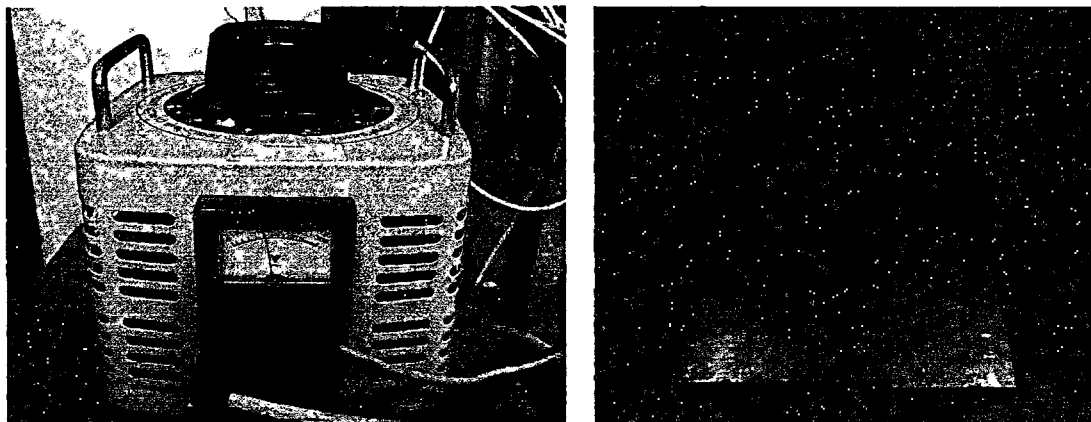
ถังพักลมเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับความเร็วลมให้คงที่ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม มีความกว้าง 37 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และความสูง 38 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ถังพักลม

7.1.5 อุปกรณ์ควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์

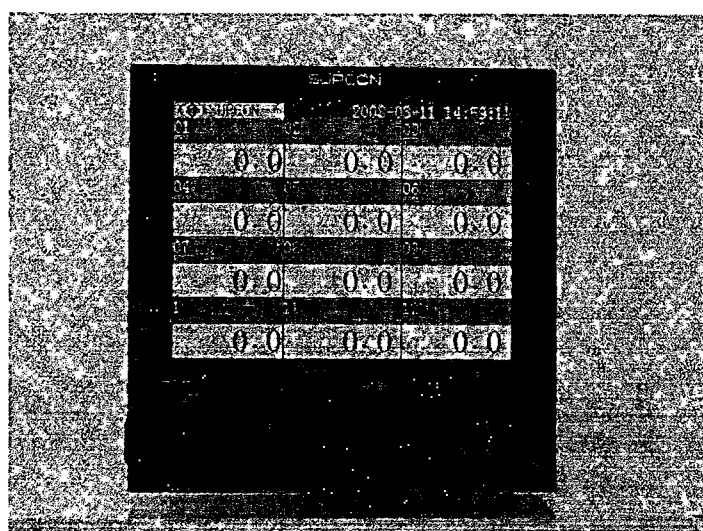
เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์ แบบสไลด์โวลท์เทจ TDBC 2-3 kVA CAPACITY: 3000 VA MAX. 12 Amp เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมโวลท์เทจที่ให้กับแผ่นฮีตเตอร์ ในการควบคุมฟลักซ์ความร้อนของแผ่นฮีตเตอร์ให้ได้ได้ตามที่กำหนดดังแสดงในรูปที่ 7.8 โดยเครื่องควบคุมความร้อนสามารถปรับโวลท์เทจได้สูงสุดเท่ากับ 250 V



รูปที่ 7.8 เครื่องควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์ และแผ่นฮีตเตอร์ 500 W

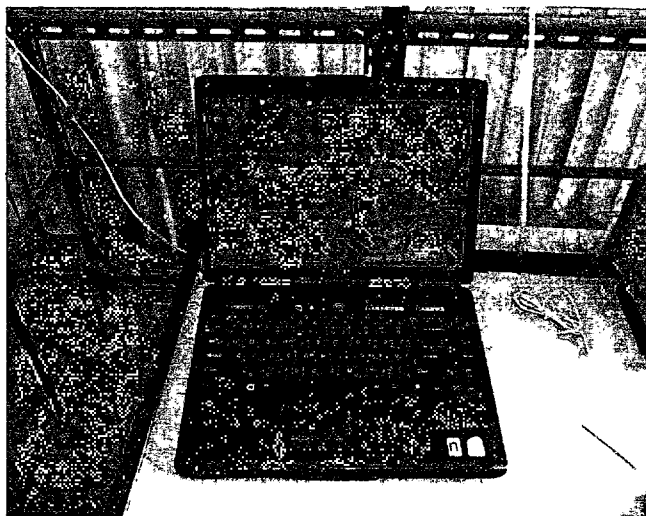
7.1.6 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

Data Logger SUPCON เป็นอุปกรณ์แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ อุณหภูมิที่ทางเข้าครีป และอุณหภูมิที่ทางออกครีป ดังแสดงในรูปที่ 7.9 สามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้ทั้งหมด 12 ตำแหน่ง



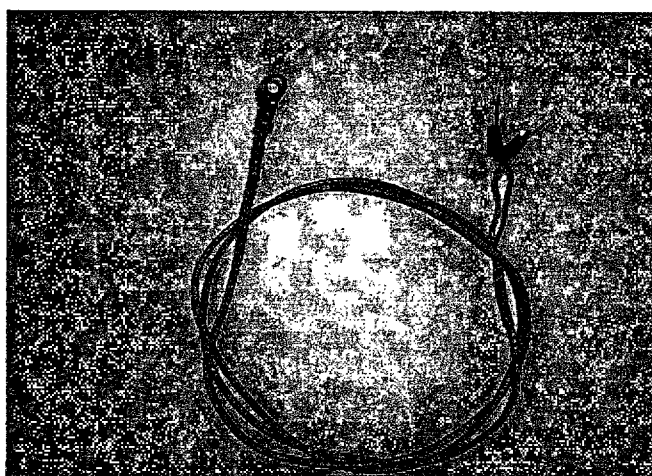
รูปที่ 7.9 Data Logger SUPCON

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวครีบนั่นละ 4 ตำแหน่ง อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบน อุณหภูมิที่ทางออกครีบน และใช้เก็บข้อมูลความดันตกคร่อมระหว่างข้างหน้าครีบนและข้างหลังครีบนดังแสดงในรูปที่ 7.10 คอมพิวเตอร์บันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยต่อเข้ากับ Data Logger และเครื่องวัดความดันตกคร่อม



รูปที่ 7.10 คอมพิวเตอร์

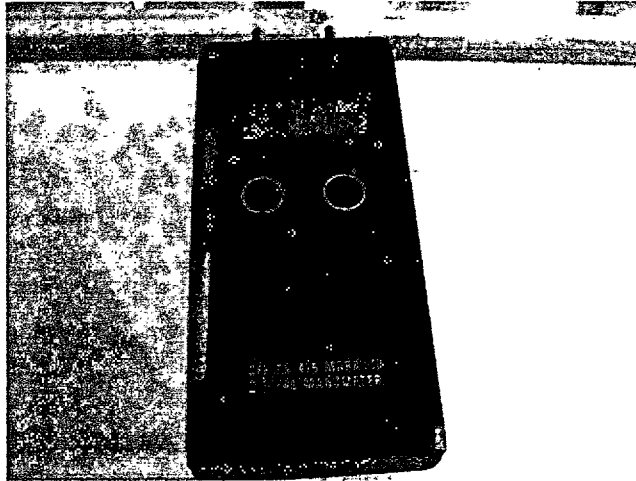
Thermocouple เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิผิวครีบน อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบน และอุณหภูมิที่ทางออกครีบนดังแสดงในรูปที่ 7.11 ซึ่งเป็น Thermocouple type K และใช้ Thermocouple ในการทดลองทั้งหมด 10 ตัว



รูปที่ 7.11 Thermocouple

7.1.7 อุปกรณ์วัดความดันตกคร่อม

เครื่องวัดความดันตกคร่อม Dwyer (Range 0 – 10 in water) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันตกคร่อมภายในชุดทดสอบระหว่างตำแหน่งที่มีการคิดครีบแรกถึงครีบสุดท้าย ในขณะที่ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 เครื่องวัดความดันตกคร่อม Dwyer 475 Mark III Digital Manometer

7.1.8 อุปกรณ์วัดความเร็วของอากาศ

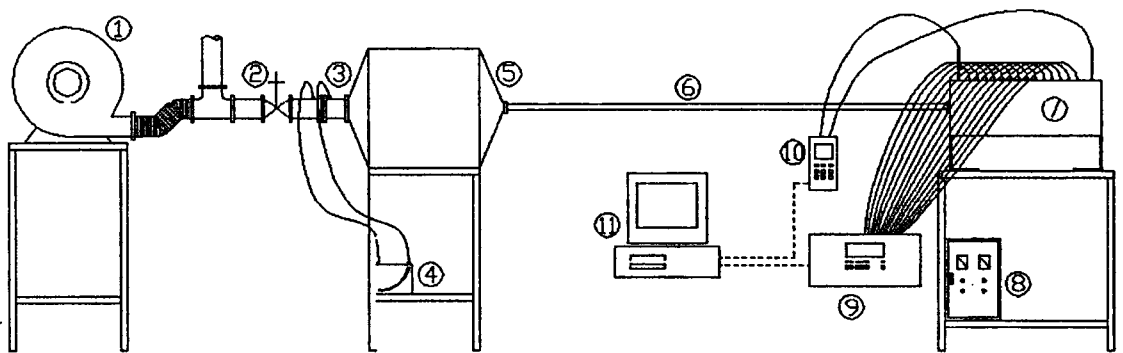
เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งทางออกของชุดออริฟิส ใช้ในการ Calibration ในขณะที่ทำการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 เครื่องวัดความเร็วของอากาศ TESTO 445

7.2 อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีชิ้นส่วนทดสอบแบบครีบริบ-ร่อง ทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม และอุปกรณ์ต่างๆ ได้ถูกแสดงในรูปที่ 7.14 ซึ่งประกอบด้วยชุดทดลองท่อสี่เหลี่ยม ความสูงของท่อระหว่างผิวท่อด้านบนและผิวท่อด้านล่างเท่ากับ $D = 20 \text{ mm}$ ท่อทางเข้าชุดทดลองทำจากอะคริลิกใสขนาดหน้าตัดกว้าง 200 mm สูง 20 mm และมีความยาว 1200 mm โดยมีการติดตั้งครีบริบ (ไม่มีร่อง) และที่มีการติดครีบริบผสมร่องตรง ซึ่งร่องมีขนาดความลึก 5 mm กว้าง 10 mm และครีบริบสูง 5 mm ทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น โดยภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานมีกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบริบที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบริบทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งมีการจัดวางครีบริบเป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเยื้องกัน ครีบริบทุกแบบทำจากอลูมิเนียมมีความหนา 0.3 mm ซึ่งการติดครีบริบมีการปรับค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ ดังนี้ ครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ (ระยะพิทซ์ $P = 10 \text{ mm}$) ครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ (ระยะพิทซ์ $P = 20 \text{ mm}$) และครีบริบที่มีอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ (ระยะพิทซ์ $P = 40 \text{ mm}$) ครีบริบที่นำมาติดภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าไม่ได้เป็นส่วนหนึ่งของผนังที่ยื่นออกมาคือครีบริบและผนังไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันจะมีความต้านทานของหน้าสัมผัสที่ฐานครีบริบ ซึ่งภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แผ่นครีบริบแต่ละแผ่นจะมีจำนวนครีบริบที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับระยะพิทซ์สัมพันธ์ต่างๆ



รูปที่ 7.14 ชุดอุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบริบ-ร่อง ประกอบด้วย (1) พัดลม

- (2) วาล์วปรับปริมาณลม (3) ออร์ฟิสมิเตอร์ (4) มานอมิเตอร์ (5) ถังพักลม (6) ท่อทางเข้าชุดทดลอง (7) แผ่นชุดทดสอบ (8) ชุดควบคุมความร้อนแผ่นฮีตเตอร์ (9) ชุดวัดอุณหภูมิ (10) ชุดวัดความดันตกคร่อม และ (11) คอมพิวเตอร์

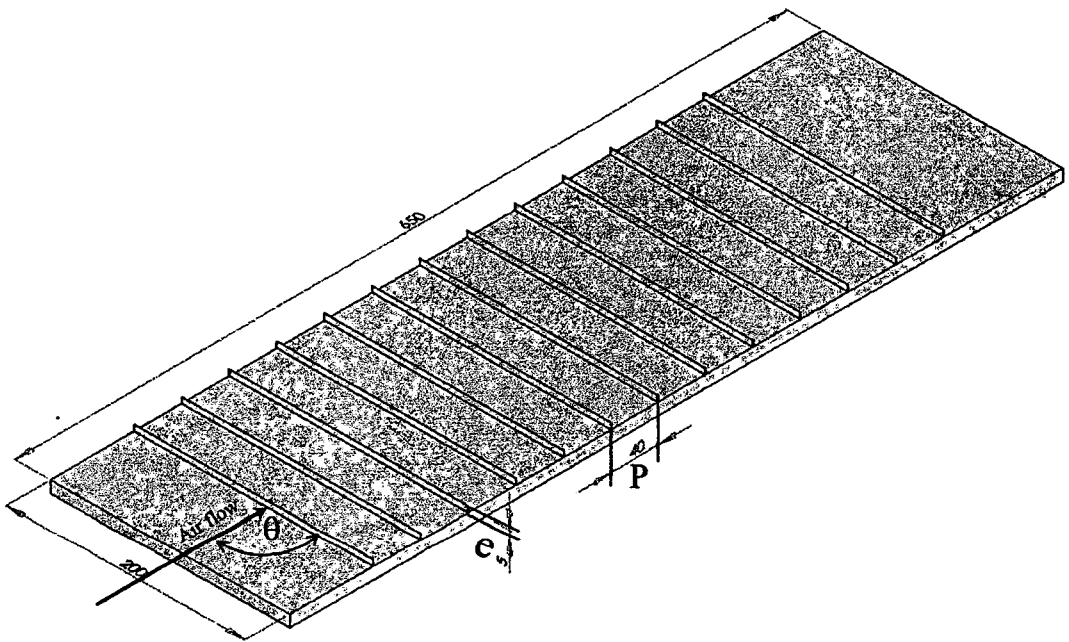
พัดลมขนาด 7.5 กิโลวัตต์ มีอินเวอร์เตอร์เป็นตัวควบคุมความเร็วรอบขับลมผ่านท่อ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าจะถูกวัดด้วย Orifice meter อากาศในชุดทดลองถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วย

แผ่นฮีตเตอร์ขนาด 500 วัตต์ จำนวน 2 แผ่น โดยติดแผ่นฮีตเตอร์ซึ่งมีพื้นที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาดกว้าง 100 mm และยาว 520 mm ที่ผิวครีบบนที่ด้านบนของแผ่นขนาน ผิวภายนอกชุดทดลองถูก คุ้มด้วยฉนวนในช่วงระยะเวลาทำความร้อน โดยแผ่นฮีตเตอร์ การวัดอุณหภูมิผิวครีบบนถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 10 ตัว โดยตำแหน่งที่ทำการวัดมีระยะห่างเท่ากับ 50 mm และอ่านค่าจาก Data Logger และทำการวัดค่าความดันตกคร่อมระหว่างชิ้นส่วนทดสอบตรงตำแหน่งที่มีการติด ครีบแรกถึงครีบสุดท้าย อ่านค่าจากเครื่องวัดความดันตกคร่อม

ในเนื้อหาบางส่วนของวิทยานิพนธ์นี้จะมีศัพท์ที่ใช้เรียกครีบในรูปแบบต่างๆ โดยจะ อธิบายและนิยามคำต่างที่ใช้เรียกครีบดังนี้ ครีบตรงหมายความว่า เป็นครีบที่มีลักษณะตรงวางใน แนวตรงดังแสดงในรูปที่ 7.15 ครีบหักหมายความว่า เป็นครีบที่มีลักษณะหักทำมุม 45 องศา กับ ทิศทางลม โดยครีบทั้งสองที่กล่าวมามีขนาดความหนาเท่ากับ 0.3 mm สูง 5 mm และร่องตรง หมายความว่า เป็นร่องที่มีลักษณะตรงวางในแนวตรง โดยร่องมีขนาดความลึกเท่ากับ 5 mm กว้าง 10 mm ยาว 200 mm มีทั้งหมด 13 ร่อง

7.3 วิธีการทดลอง

พิจารณาผลของท่อครีบตรงวางแนวตรงบนแผ่นทดสอบ โดยภายในชุดทดลองของท่อช่อง ขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบทั้ง ด้านบนและด้านล่างของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 7.15

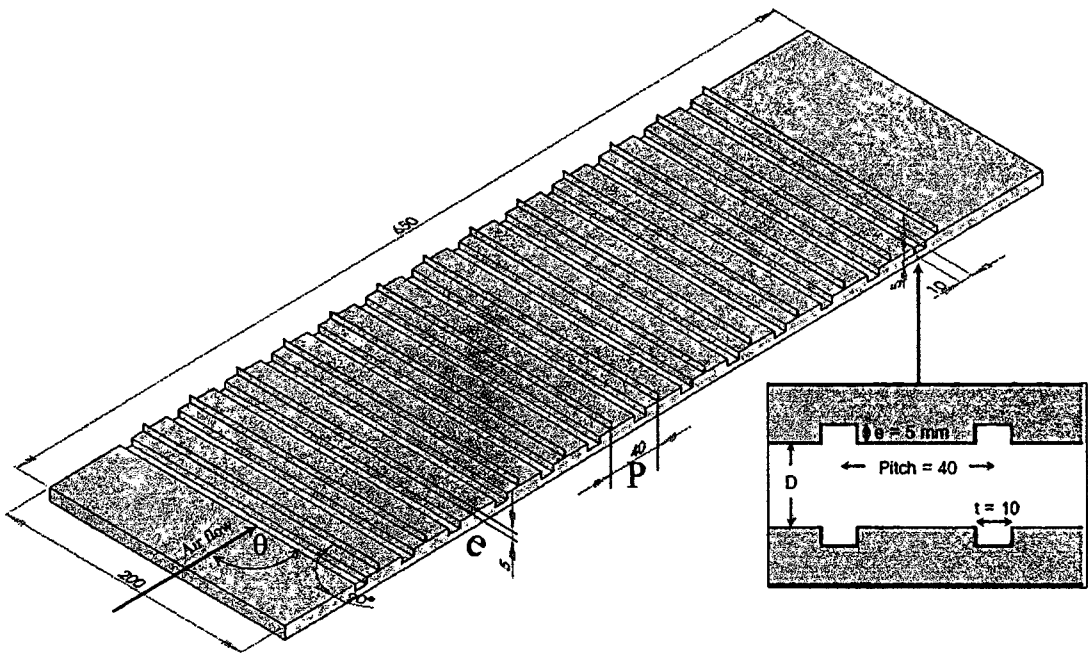


รูปที่ 7.15 แผ่นทดสอบกรณีติดครีบตรงแนวตรงบนผิวเรียบ

ตารางที่ 7.1 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบริดตรง

กรณี ที่	มุม θ	e (mm)	PR (P/D)	ลักษณะการติด ครีบริด/ร่อง	จำนวนครีบริดที่ ด้านบน/ด้านล่าง
1	0	0	0	(ผิวเรียบ)	-
2	90	5	2	ครีบริดตรง	13/-
3	90	5	2	ครีบริดตรง	13/13

พิจารณาผลของท่อครีบริดตรงผสมร่องตรงบนแผ่นทดสอบ โดยภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบริดที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบริดทั้งด้านบนและด้านล่างของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งร่องตรงเป็นร่องที่มีขนาดความลึกเท่ากับ 5 mm กว้าง 10 mm ยาว 200 mm มีทั้งหมด 13 ร่อง ดังแสดงในรูปที่ 7.16

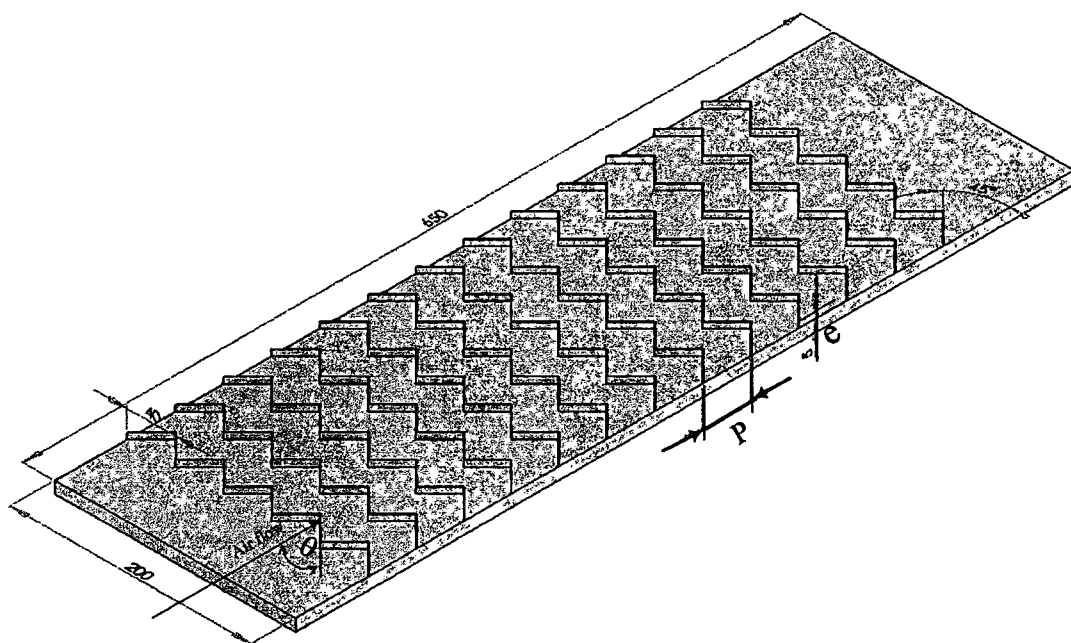


รูปที่ 7.16 แผ่นทดสอบกรณีร่องแนวตรงติดตั้งครีบริดตรง

ตารางที่ 7.2 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบริง-ร่อง

กรณี ที่	มุม θ	e (mm)	PR (P/D)	ลักษณะการติด ครีบริง/ร่อง	จำนวนครีบริงที่ ด้านบน/ด้านล่าง	จำนวนร่องที่ ด้านบน/ด้านล่าง
1	90	5	2	ร่อง	-	13/-
2	90	5	2	ร่อง	-	13/13
3	90	5	2	ครีบริง-ร่อง	13/-	13/-
4	90	5	2	ครีบริง-ร่อง	13/13	13/13

พิจารณาแผ่นทดสอบของท่อที่มีครีบริงหัก โดยครีบริงทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม โดยภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบริงที่ด้านบนอย่างเดียวนั้น และกรณีติดครีบริงทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งกรณีนี้มีแบ่งการจัดวางครีบริงได้เป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกันของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 7.17

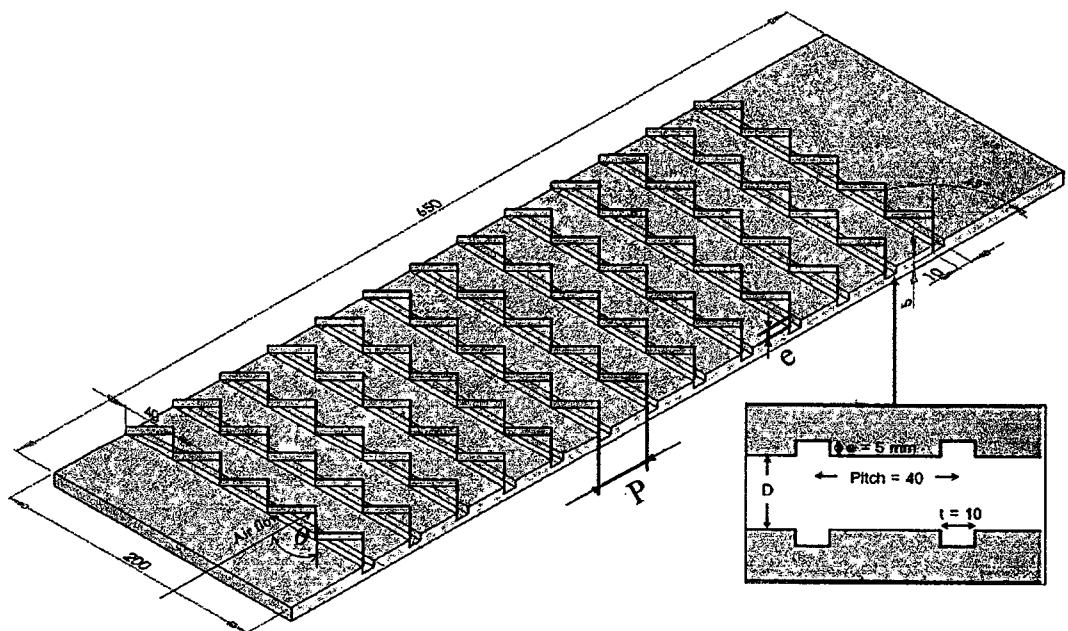


รูปที่ 7.17 ชุดทดลองครีบริงหักมุม 45 องศา วางบนแผ่นทดสอบสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 7.3 แสดงลักษณะแผ่นช่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบกั้น

กรณี ที่	มุม θ	e (mm)	PR (P/D)	ลักษณะการติด ครีบกั้น/ร่อง	จัดวางแบบ ตรง/เอียง	จำนวนครีบกั้นที่ ด้านบน/ด้านล่าง
1	45	5	0.5	ครีบกั้น	-	52/-
2	45	5	0.5	ครีบกั้น	วางตรง	52/52
3	45	5	0.5	ครีบกั้น	วางเอียง	52/52
4	45	5	1.0	ครีบกั้น	-	26/-
5	45	5	1.0	ครีบกั้น	วางตรง	26/26
6	45	5	1.0	ครีบกั้น	วางเอียง	26/26
7	45	5	2.0	ครีบกั้น	-	13/-
8	45 </td <td>5</td> <td>2.0</td> <td>ครีบกั้น</td> <td>วางตรง</td> <td>13/13</td>	5	2.0	ครีบกั้น	วางตรง	13/13
9	45	5	2.0	ครีบกั้น	วางเอียง	13/13

พิจารณาแผ่นทดสอบของท่อที่มีครีบกั้นวางผสมกับร่องตรงแนวตรง โดยครีบกั้นทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหลของลม โดยภายในชุดทดลองของท่อช่องขนานจะมีสองกรณีที่พิจารณาคือ กรณีการติดครีบกั้นที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และกรณีติดครีบกั้นทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งกรณีนี้มีแบ่งการจัดวางครีบกั้นได้เป็นสองแบบคือแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกันของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 ชุดทดลองครีบกั้นมุม 45 องศา วางผสมกับร่องตรงแนวตรง

ตารางที่ 7.4 แสดงลักษณะแผ่นร่องขนานของแต่ละกรณีศึกษาที่มีครีบก้นผสมร่อง

กรณี ที่	มุม θ	e (mm)	PR (P/D)	ลักษณะการติด ครีบก้น/ร่อง	จัดวางแบบ ตรง/เอียง	จำนวนครีบก้นที่ ด้านบน/ด้านล่าง
1	45	5	0.5	ครีบก้น-ร่อง	-	52/-
2	45	5	0.5	ครีบก้น-ร่อง	วางตรง	52/52
3	45	5	0.5	ครีบก้น-ร่อง	วางเอียง	52/52
4	45	5	1.0	ครีบก้น-ร่อง	-	26/-
5	45	5	1.0	ครีบก้น-ร่อง	วางตรง	26/26
6	45	5	1.0	ครีบก้น-ร่อง	วางเอียง	26/26
7	45	5	2.0	ครีบก้น-ร่อง	-	13/-
8	45	5	2.0	ครีบก้น-ร่อง	วางตรง	13/13
9	45	5	2.0	ครีบก้น-ร่อง	วางเอียง	13/13

1. ทำการติดแผ่นครีบก้นบนชุดทดสอบของตารางที่ 7.1 ในกรณีที่ 1 ที่ผิวของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
2. เปิดสวิทซ์เดินเครื่องพัดลม ให้อากาศไหลผ่านชุดทดลอง และปรับความเร็วลมในชุดทดลอง
3. ทำการวัดค่าของความดันตกคร่อม และบันทึกผลของความดันตกคร่อม
4. เปิดเครื่องให้ความร้อน โดยให้ผิวท่อ ได้รับความร้อนด้วยฟลักซ์ความร้อนคงที่
5. สังเกตอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คงที่
6. บันทึกผลของ อุณหภูมิผิวครีบก้น อุณหภูมิที่ทางเข้าครีบก้น และอุณหภูมิที่ทางออกครีบก้น
7. ปรับความเร็วลมลดลงเรื่อยๆ โดยให้ค่าเลขเรย์โนลด์อยู่ระหว่าง $Re = 3000 - 24000$ แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 5 - 6
8. ทำการติดแผ่นครีบก้นบนชุดทดสอบของตารางที่ 7.1 ในกรณีที่ 2 จนถึง ตารางที่ 7.4 ในกรณีที่ 9 โดยติดที่ผิวของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วดำเนินการทดลองซ้ำตามขั้นตอน 2 - 7 ใหม่ตามลำดับ

บทที่ 8

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้สามารถแยกการพิจารณาได้เป็น 2 ส่วน คือ การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในเทอมของเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) และการพิจารณาการสูญเสียความดันในเทอมของรูปผลคูณประกอบเสียดทาน (Friction Factor) ดังต่อไปนี้ ในเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ในบทนี้จะมีศัพท์ที่ใช้เรียกครีบและผิวของท่อในรูปแบบต่างๆ โดยจะอธิบายและนิยามคำต่างๆที่ใช้เรียกดังต่อไปนี้

ท่อผิวเรียบ คือ ท่อที่เหลี่ยมเปล่าไม่มีการติดตั้งครีบหรือร่องใดๆทั้งสิ้น

ครีบตรง คือ ครีบที่มีลักษณะตรงวางในแนวตรง โดยครีบทำมุม 90 องศากับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น โดยครีบบีขนาดความหนาเท่ากับ 0.3 mm และสูง 5 mm

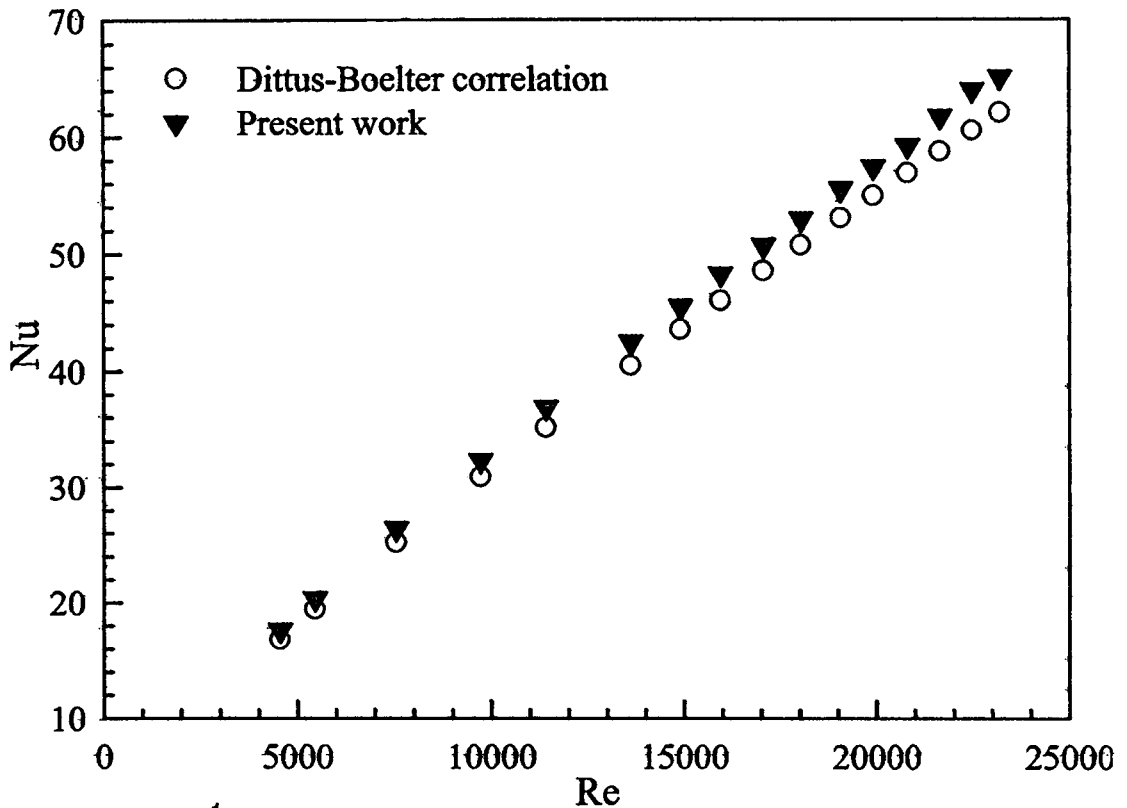
ครีบหัก คือ ครีบที่มีลักษณะหักทำมุม 45 องศา กับทิศทางการไหล และมียุขขนาดความหนาของครีบเท่ากับ 0.3 mm และสูง 5 mm เช่นเดียวกัน

ร่องตรง คือ ร่องที่มีลักษณะตรงวางในแนวตรง โดยร่องทำมุม 90 องศากับทิศทางการไหลของลมเท่านั้น และมีขนาดความลึกของร่องเท่ากับ 5 mm กว้าง 10 mm ยาว 200 mm และค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ โดยมีทั้งหมด 13 ร่อง (หมายเหตุ ร่องมีการจัดวางแบบแนวเดียวกันหรือตรงกันเสมอ)

8.1 ผลการทดลองท่อมีผิวเรียบ

8.1.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

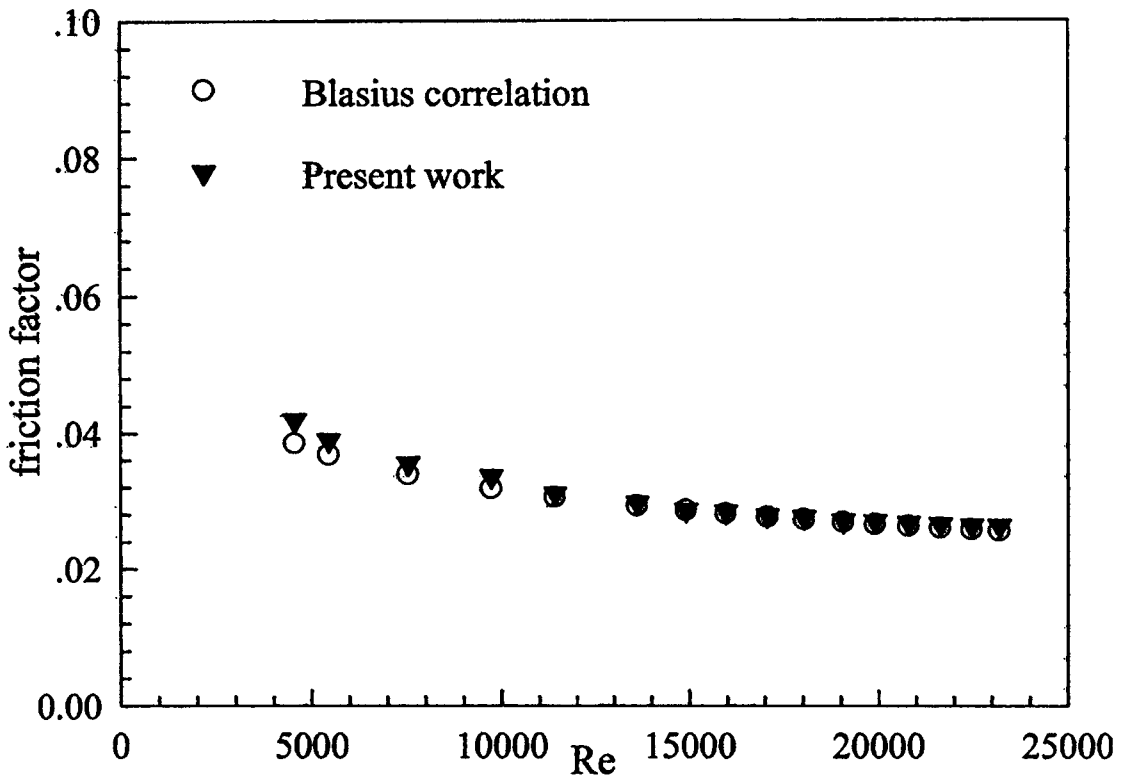
ทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในเทอมของเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณียุขมีผิวเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าเลขเรโนลด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองและค่าเลขนัสเซิลต์ที่มาจากสมการของ Dittus-Boelter correlation พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าเลขนัสเซิลต์จากทฤษฎี โดยค่าเลขนัสเซิลต์จากการทดลองมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 4.81 % เมื่อเทียบกับ Dittus-Boelter correlation แสดงในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์กับเลขเร โนลด์กรณีท่อที่มีผิวเรียบ

8.1.2 การสูญเสียความดัน(Pressure loss)

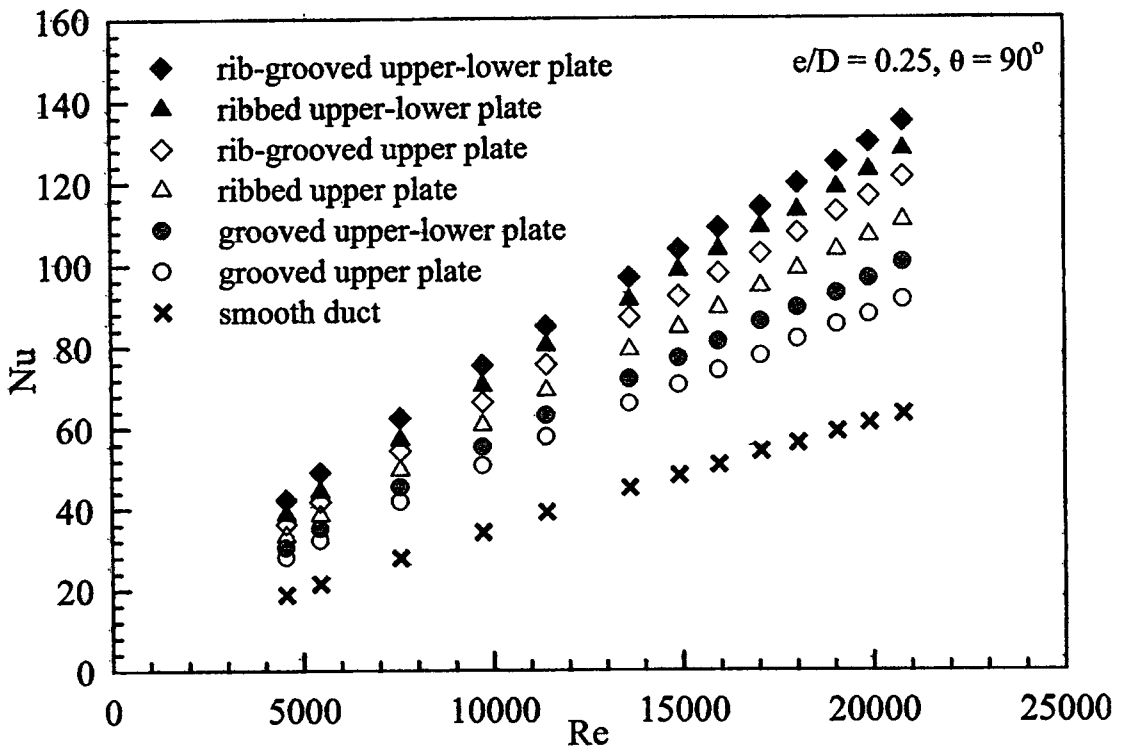
ทำการการพิจารณาการสูญเสียความดันในทอมของรูปผลตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีผิวเรียบ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองและค่าตัวประกอบเสียดทานที่มาจากสมการของ Blasius correlation พบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบเสียดทานจากทฤษฎี โดยค่าตัวประกอบเสียดทานจากการทดลองมีค่าลดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.68 % เมื่อเทียบกับ Blasius correlation โดยค่าตัวประกอบเสียดทานที่มาจากสมการของ Blasius correlation ใช้หา friction factor สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรับตัวเต็มที่แล้วในท่อกลมผิวเรียบ ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ $Re_D \leq 20000$ แสดงในรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีสู่ที่มีผิวเรียบ

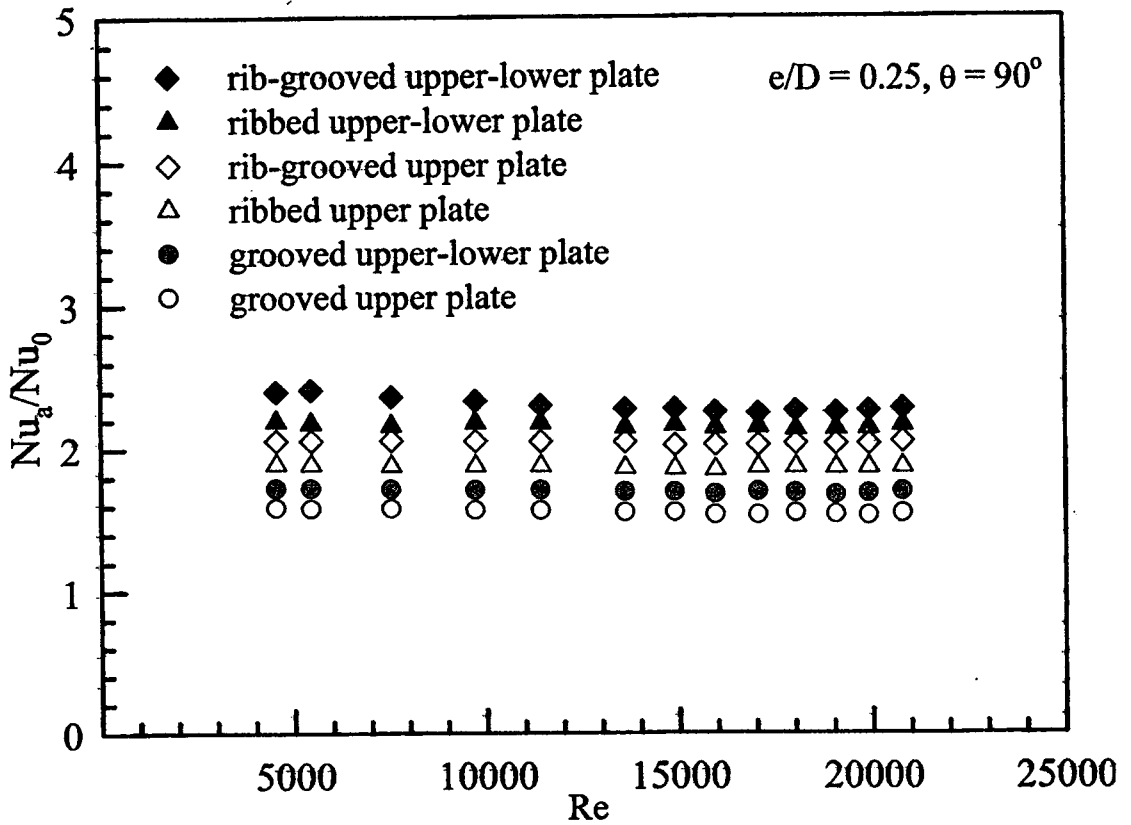
8.2 อิทธิพลของการติดตั้งครีบตรงและร่องตรง

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีสู่ที่มีการติดตั้งครีบตรง กรณีสู่ที่มีร่องแนวตรง และกรณีสู่ที่มีติดครีบตรงวางผสมกับร่องตรง โดยความสูงของช่องขนาน $D = 20 \text{ mm}$ โดยที่มีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์ของครีบเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ท่อที่ติดครีบตรงผสมร่องตรง สำหรับการติดครีบที่ด้านบนและด้านล่าง มีค่าเลขนัสเซิลต์มากที่สุด ตามด้วยท่อที่ติดครีบตรงตามด้วยท่อที่มีร่องตรง และท่อที่มีผิวเรียบ ซึ่งการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างนั้นให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าการติดครีบบนแผ่นเฉพาะที่ด้านบนด้านเดียวตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.3



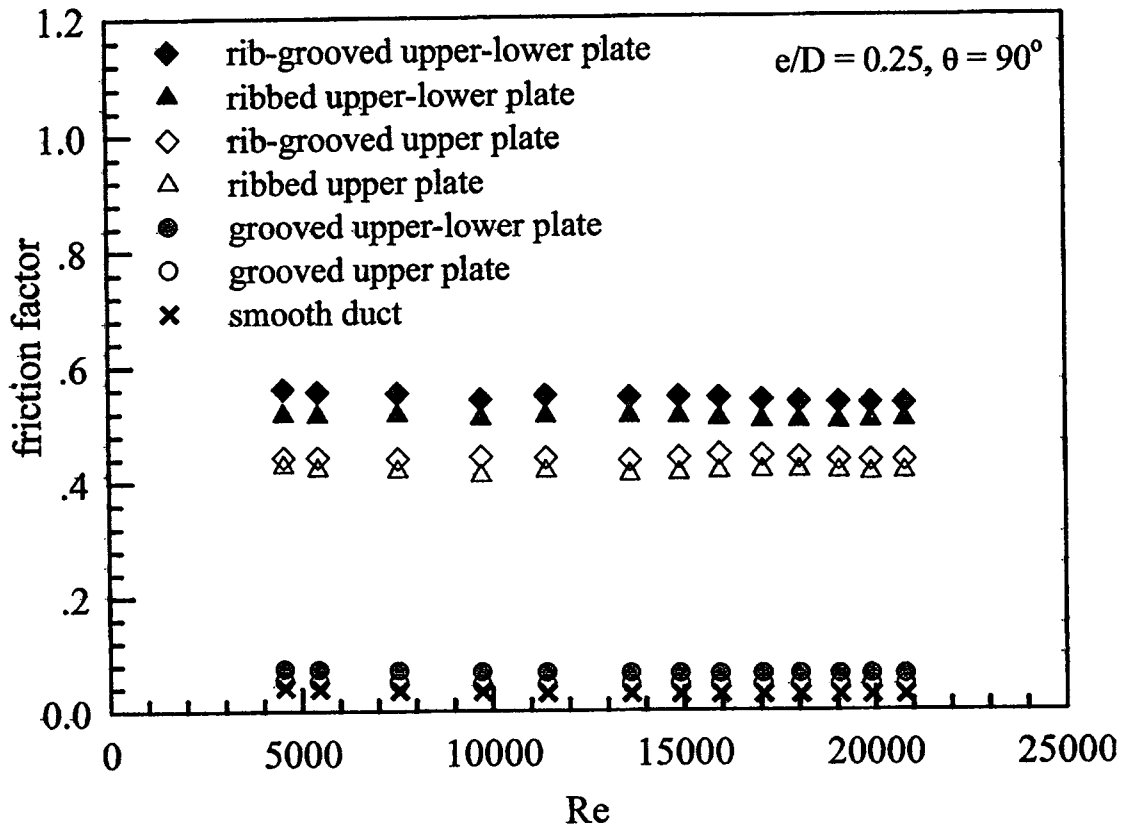
รูปที่ 8.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง, ร่องตรง และ ครีบริบตรงวางผสมกับร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลต์ต่อเลขนัสเซลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง กรณีท่อที่มีร่องตรง และกรณีท่อที่มีครีบริบตรงวางผสมกับร่องตรง โดยความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm โดยมีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่ติดครีบริบตรงผสมร่องตรง มีค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 2.30 และ 2.04 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ ท่อที่ติดครีบริบตรง มีค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 2.15 และ 1.86 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ และท่อที่มีร่องตรง มีค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.69 และ 1.55 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.4



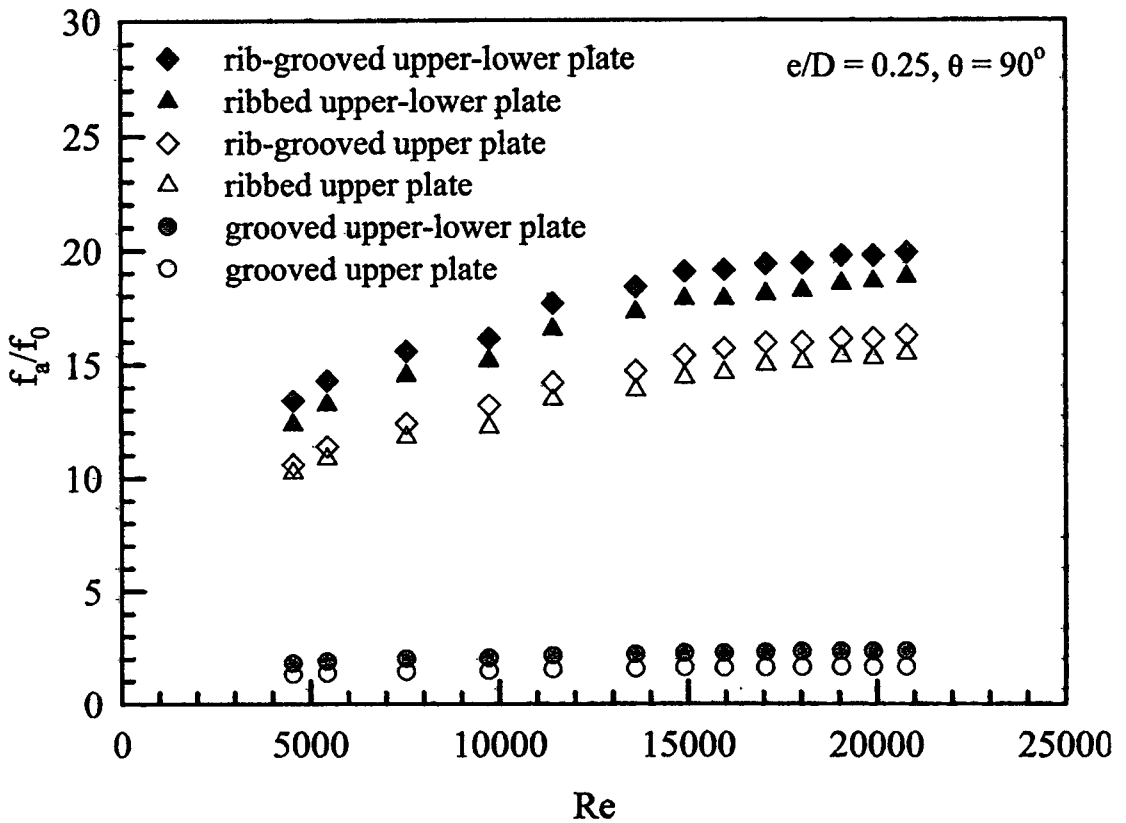
รูปที่ 8.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต่อเลขนัสเซลล์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบตรง, ร่องตรง และ ครีบตรงวางผสมกับร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบตรง, กรณีท่อที่มีร่องตรง และกรณีท่อที่มีครีบตรงวางผสมกับร่องตรง โดยความสูงของช่องขนาน $D = 20 \text{ mm}$ โดยที่มีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ทุกแบบมีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผิวเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยท่อที่มีร่องตรงบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวและร่องตรงบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่าง ท่อที่ติดครีบตรงบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว และท่อที่ติดครีบตรงผสมร่องตรง บนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว ตามด้วยท่อที่ติดครีบตรงบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่าง และตามด้วยท่อที่ติดครีบตรงผสมร่องแนวตรงบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่าง ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.5



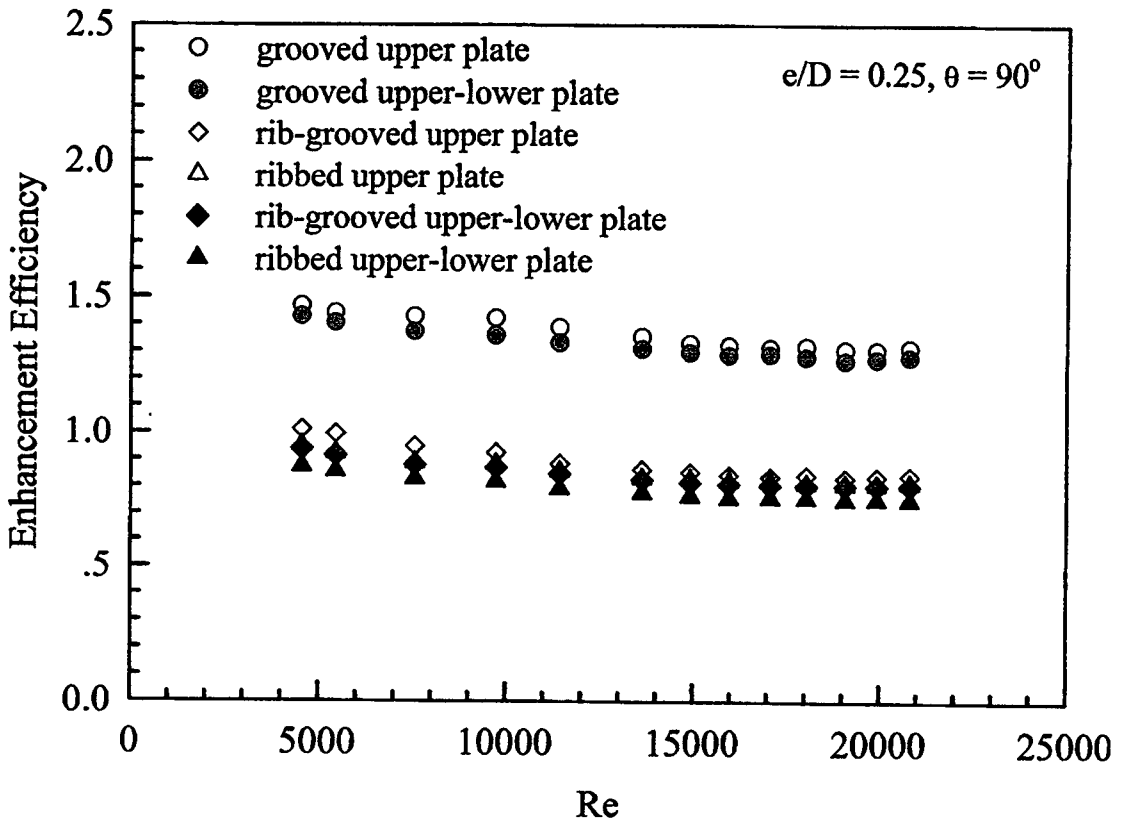
รูปที่ 8.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง, ร่องตรง และ ครีบริบตรงวางผสมกับร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง กรณีท่อที่มีร่องตรง และกรณีท่อที่มีครีบริบตรงวางผสมกับร่องตรง โดยความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm โดยที่มีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่ติดครีบริบตรงผสมร่องตรง มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 17.82 และ 14.43 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ ท่อที่ติดครีบริบตรง มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 16.67 และ 13.51 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ และท่อที่มีร่องตรง มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 2.53 และ 1.50 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.6



รูปที่ 8.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานคือตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง, ร่องตรง และ ครีบริบตรง วางผสมกับร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดคั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบตรง กรณีท่อที่มีร่องตรง และกรณีท่อที่มีครีบริบตรงวางผสมกับร่องตรง โดยความสูงของช่องขนาน $D = 20 \text{ mm}$ โดยมีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่ติดครีบริบตรงผสมร่องตรง มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 0.88 และ 0.84 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดคั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ ท่อที่ติดครีบริบตรง มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 0.84 และ 0.78 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดคั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ และท่อที่มีร่องตรง มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.31 และ 1.35 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดคั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.7



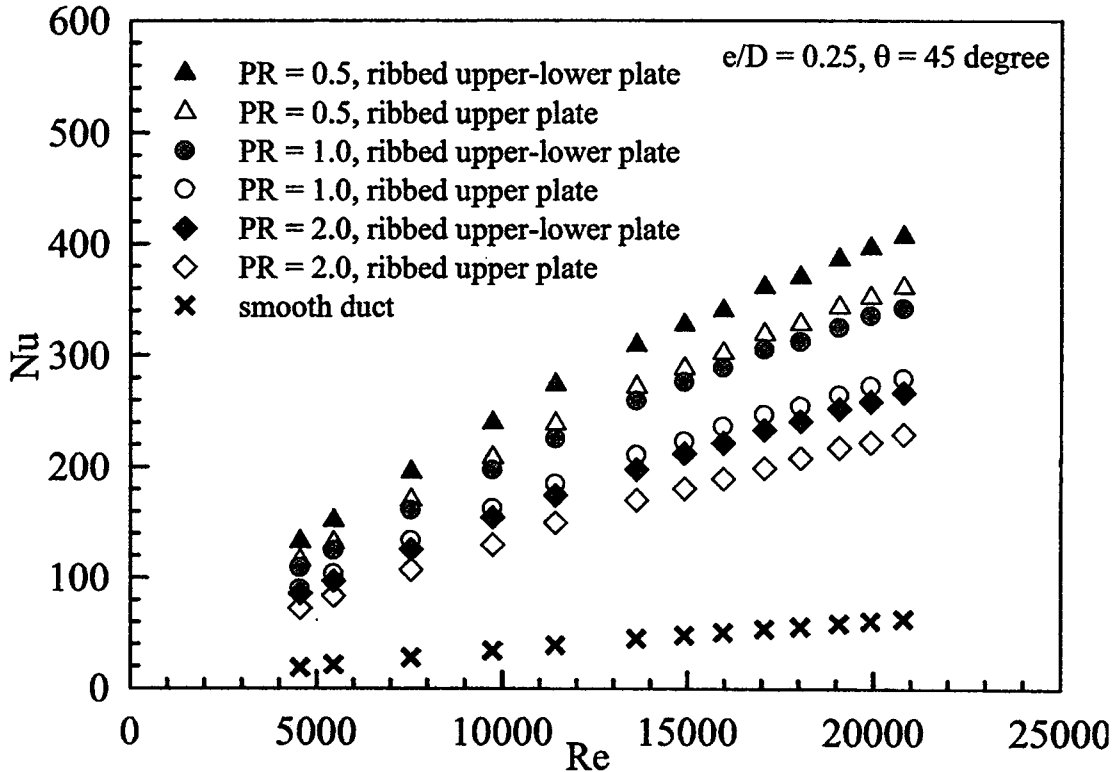
รูปที่ 8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบตรง, ร่องตรง และ ครีบตรงวางผสมกับร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

จากกรณีศึกษาชุดทดลองท่อที่มีการติดครีบตรงพบว่า กรณีท่อที่ติดครีบตรงผสมร่องตรง มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 2.30 และ 2.04 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ และกรณีท่อที่มีร่องตรง มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.31 และ 1.35 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวตามลำดับ

8.3 อิทธิพลของระยะพิทซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบหยัก ซึ่งจะพิจารณาการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีระยะในการติดครีบที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm จากการศึกษาและทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน กรณีท่อที่มีครีบหยักที่มีค่า

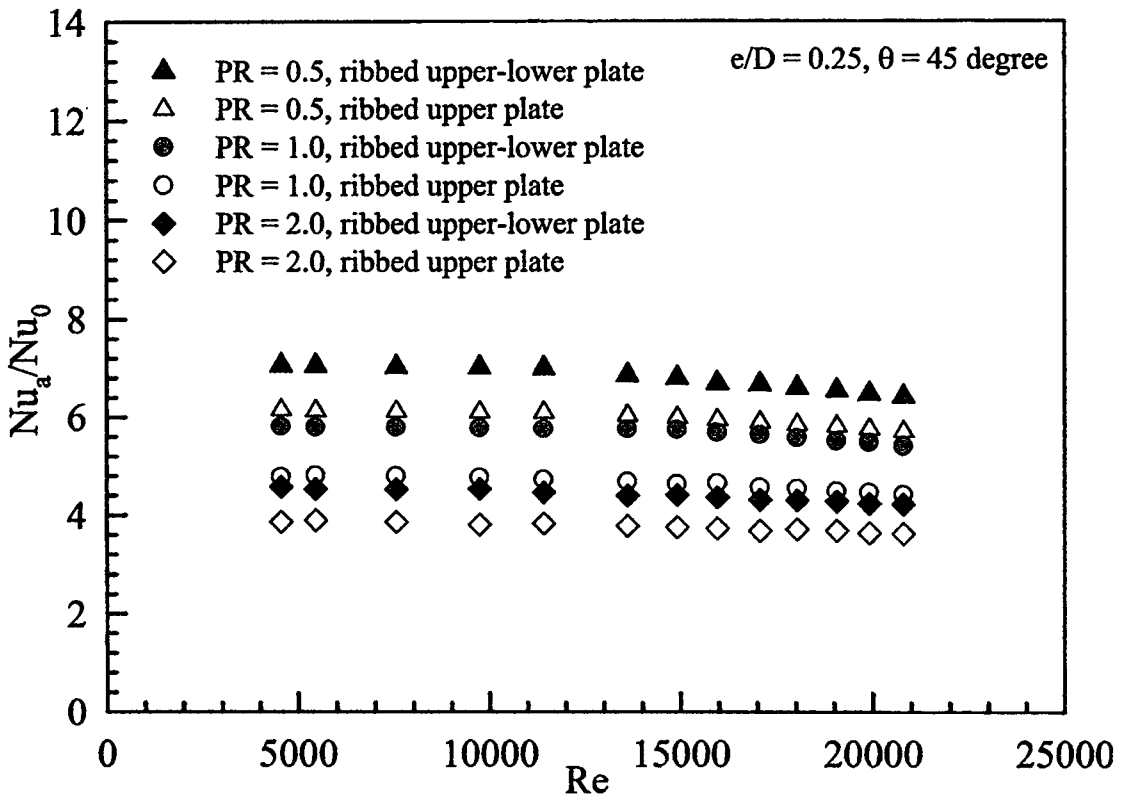
อัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์มากที่สุด ตามด้วยท่อที่มีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ และตามด้วยท่อที่มีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ สำหรับการติดครีบบนแผ่นทั้งด้านบนและด้านล่างจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงกว่ากรณีการที่ติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนอย่างเดียว แสดงในรูปที่ 8.8



รูปที่ 8.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

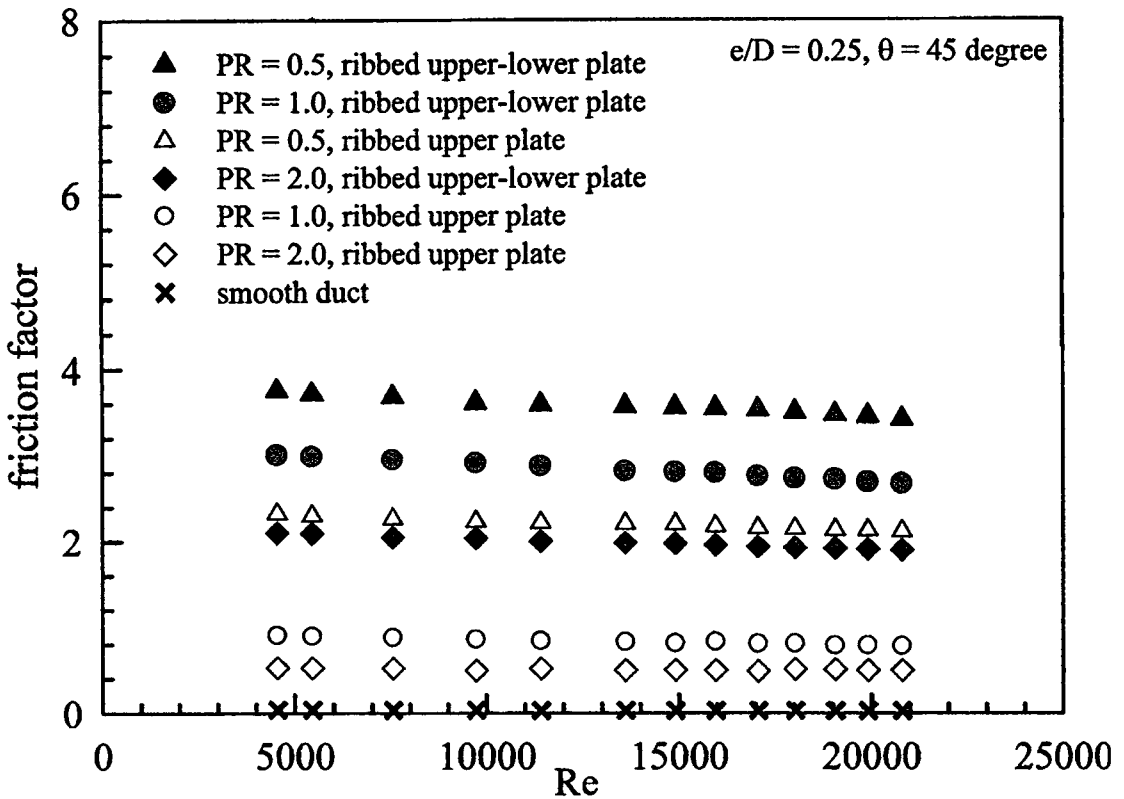
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ต่อเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเรโนลด์นัม กรณีท่อที่มีการติดครีบบวก ซึ่งจะพิจารณาการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีระยะในการติดครีบบวกที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีท่อที่มีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.33 และ 7.20 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียวและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นทั้งด้านและบนด้านล่างตามลำดับ กรณีท่อที่มีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 4.91 และ 6.00 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียวและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นทั้งด้านและบนด้านล่างตามลำดับ และกรณีท่อที่มีครีบบวกที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ มีค่า

เลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 3.98 และ 4.66 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะ ด้านบนเพียงด้านเดียวและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นทั้งด้านและบนด้านล่างตามลำดับ แสดงใน รูปที่ 8.9



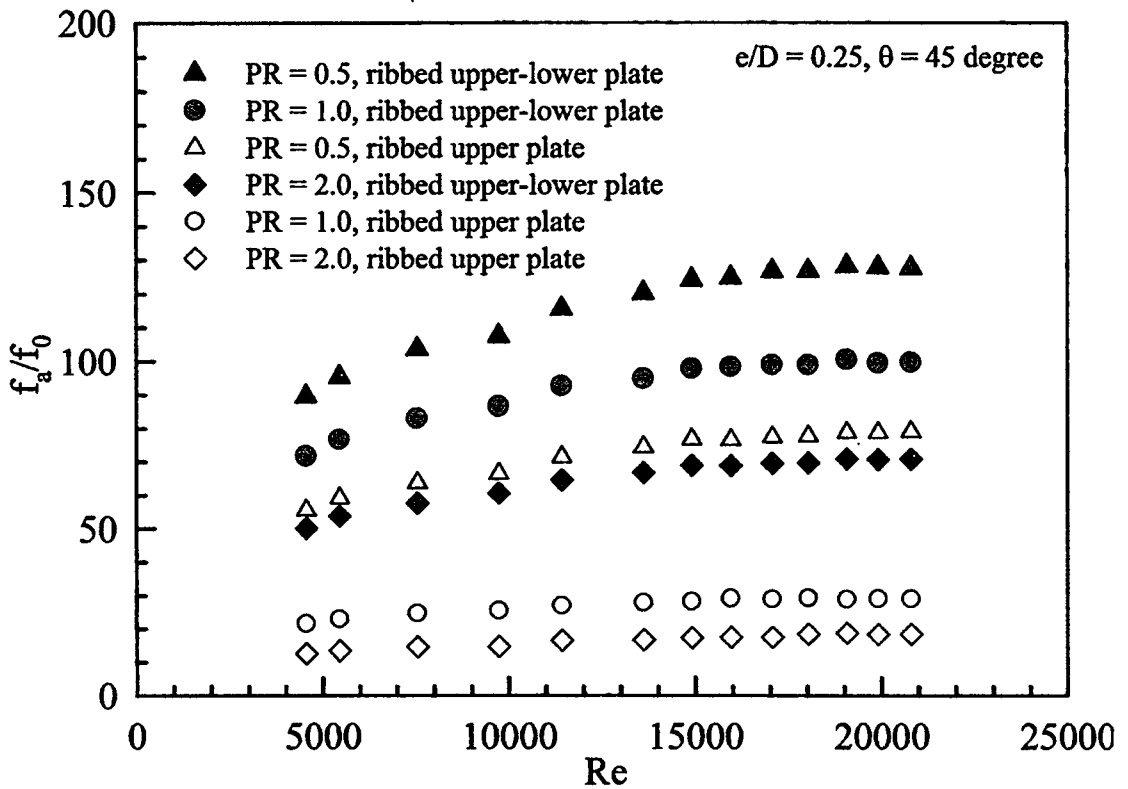
รูปที่ 8.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ต่อเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับ เลขเร โนลด์ กรณีครีบบนแผ่นที่มีค่าอัตราส่วนพิชต์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ นั้น กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่น ซึ่งจะพิจารณาการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะ ด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีระยะในการติดครีบบนแผ่นที่ค่าอัตราส่วนพิชต์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่มีค่าอัตราส่วนพิชต์ต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเลขเร โนลด์เพิ่มขึ้น การติดตั้งครีบบนแผ่นแบบทั้งด้านบนและด้านล่างจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทาน มากกว่าการติดตั้งครีบบนแผ่นแบบด้านบนด้านเดียว และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่อกรณีท่อที่มี ครีบบนแผ่นที่มีค่าอัตราส่วนพิชต์มีค่าลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้น แสดง ในรูปที่



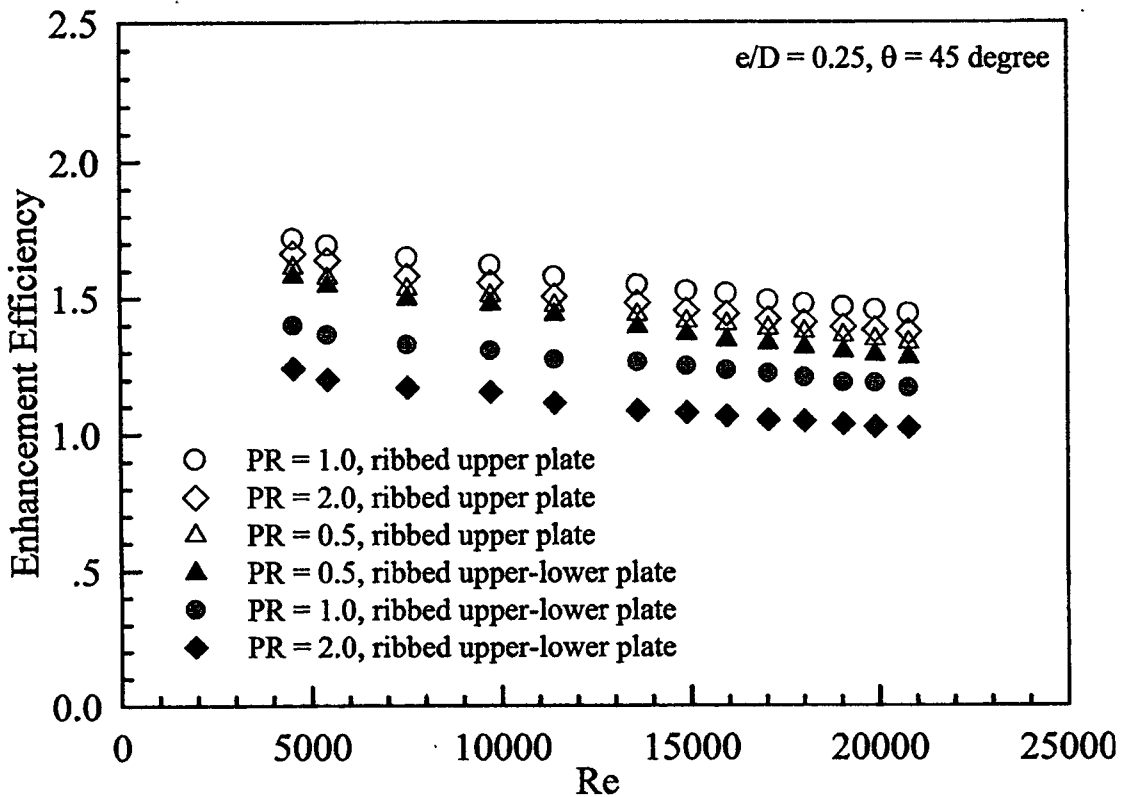
รูปที่ 8.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบก้น ซึ่งจะพิจารณาการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีระยะในการติดครีบก้นที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ PR = 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 71.93 และ 116.71 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 1.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 26.95 และ 92.11 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดครีบบนแผ่นด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 2.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 16.48 และ 64.78 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดครีบบนแผ่นด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.11



รูปที่ 8.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีสกรูบหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งกรูบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีสกรูบที่มีการติดกรูบหยัก ซึ่งจะพิจารณาการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งกรูบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีระยะในการติดกรูบที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ PR = 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดกรูบหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5 มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.52 และ 1.47 สำหรับการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ ท่อที่มีการติดกรูบหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 1.0 มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.64 และ 1.33 เท่า สำหรับการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดกรูบหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 2.0 มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.57 และ 1.17 เท่า สำหรับการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรูบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.12

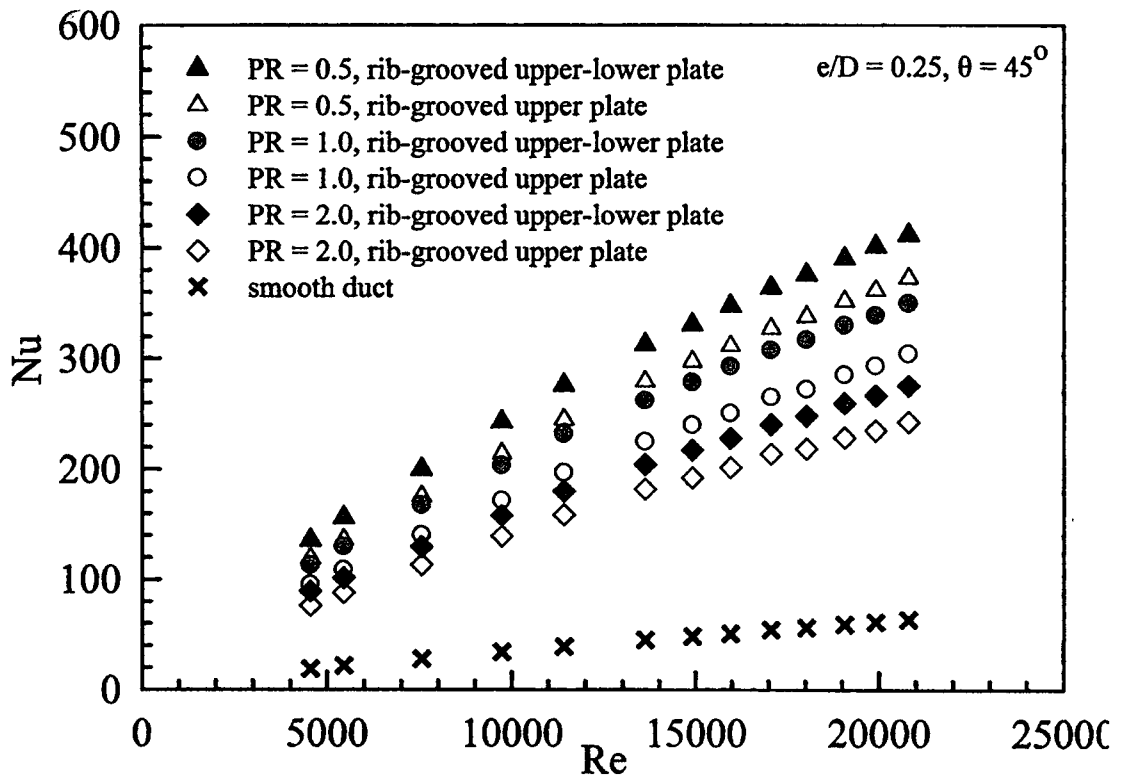


รูปที่ 8.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีกิริบหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับ ด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

จากกรณีศึกษาชุดทดลองที่มีครีบบน (ไม่มีร่อง) กรณีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนอย่าง เดียว และกรณีติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ ให้ค่า เลขนัสเซิลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.33 และ 7.20 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนอย่างเดียว และกรณีติดครีบบนแผ่นทั้งด้านบน และด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ สำหรับการติด ครีบบนแผ่นที่ด้านบนอย่างเดียว ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อ เปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนอย่างเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่ม การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.64

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนทวิภาคกับ ร่องตรง โดยมีการปรับระยะในการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20 \text{ mm}$ เมื่อการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและ การติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบ

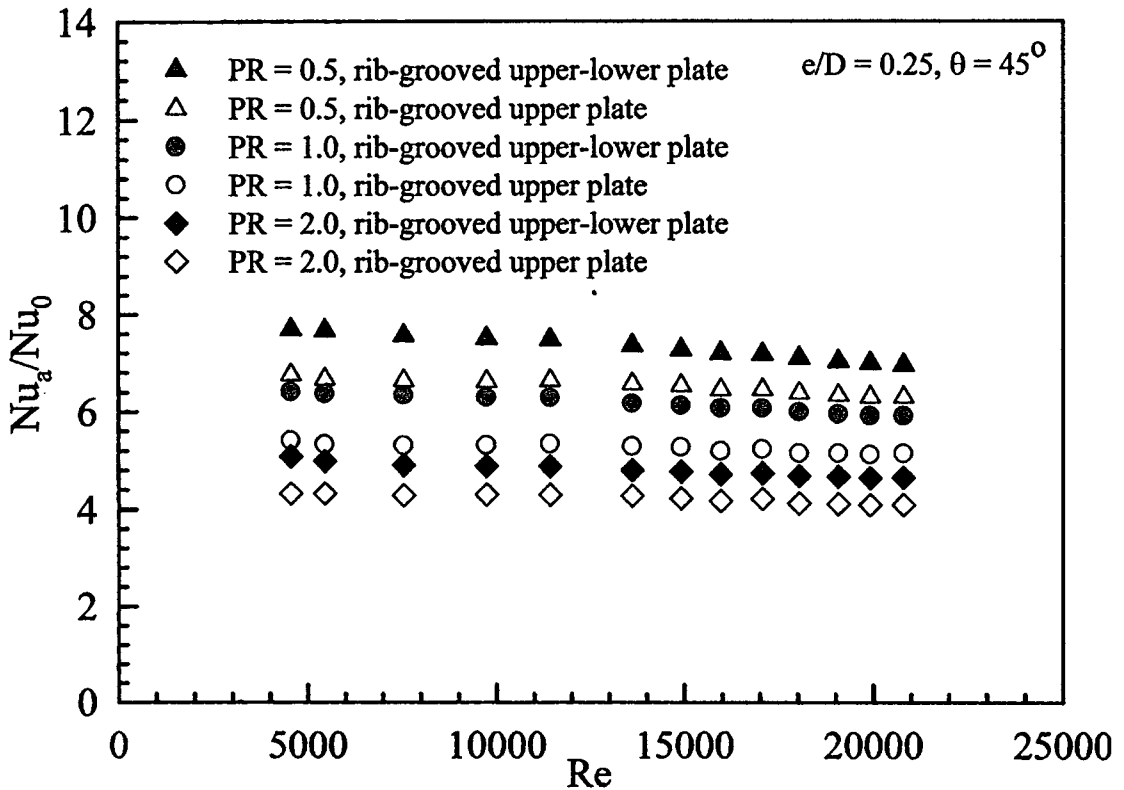
ปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเลขนัสเซิลล์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน กรณีท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลล์สูงที่สุด ตามด้วยกรณีท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ และตามด้วยกรณีท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ ตามลำดับ ซึ่งกรณีการติดครีบบนแผ่นทั้งด้านบนและด้านล่างจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลล์สูงกว่ากรณีการที่ติดครีบบนแผ่นเฉพาะที่ด้านบนอย่างเดียว แสดงในรูปที่ 8.13



รูปที่ 8.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลล์กับเลขเรโนลด์ กรณีครีบบนทรงแฉกกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

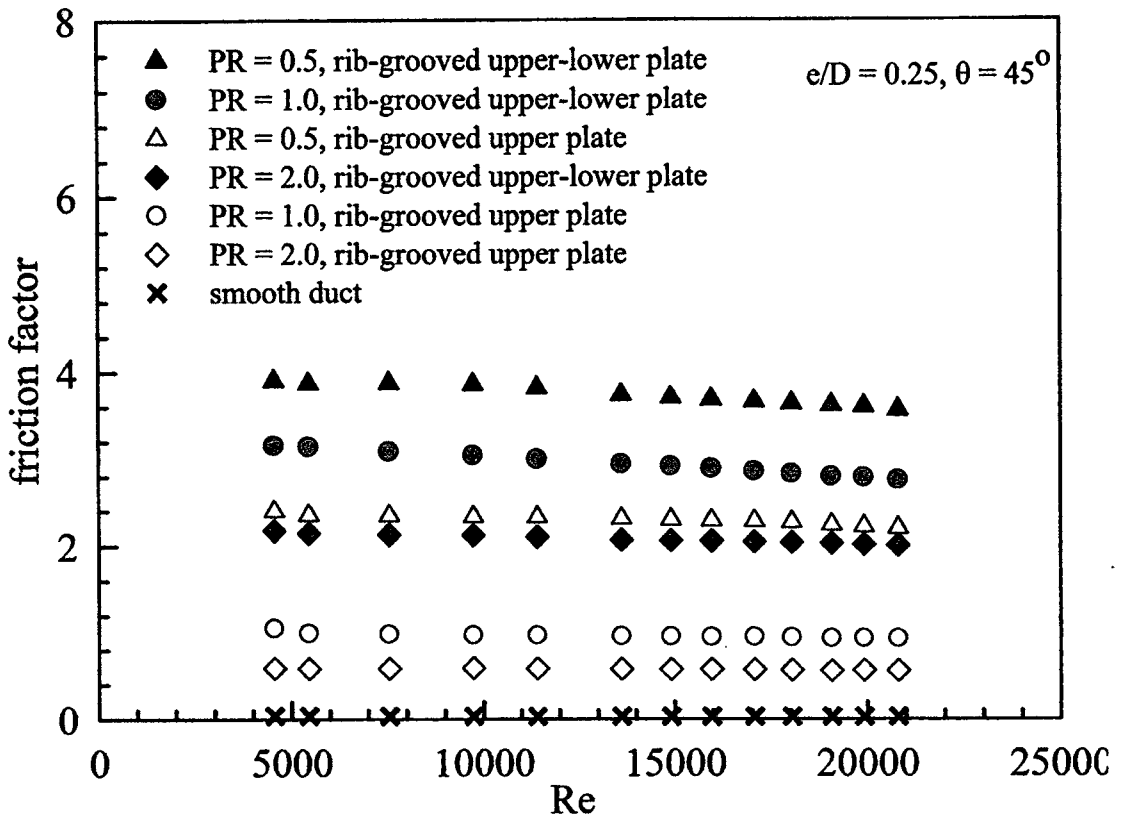
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลล์คือเลขนัสเซิลล์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนทรงแฉกกับร่องตรง โดยมีการปรับระยะในการติดครีบบนที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลล์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.51 และ 7.37 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและบนด้านล่างตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ มีค่าเลขนัสเซิลล์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 5.23 และ 6.58 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและ

บนด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ มีค่าเลขนัสเซิลล์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 4.21 และ 4.79 เท่า สำหรับกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียว และกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.14



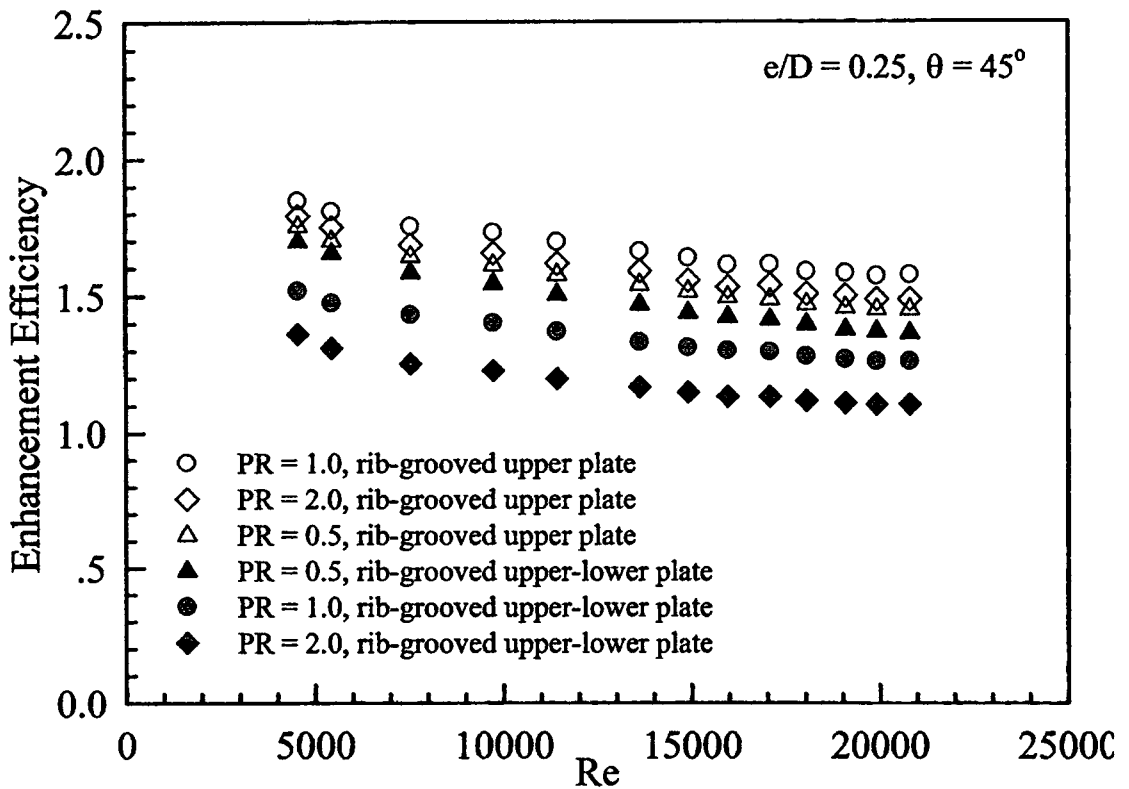
รูปที่ 8.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลล์ต่อเลขนัสเซิลล์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบบนห้กวางผสมกับร่องตรง ที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียทวนกับเลขเรกรณีท่อที่มีการติดครีบบนห้กวางผสมกับร่องตรง โดยมีการปรับระยะในการติดครีบบนห้กที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของร่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนห้กผสมร่องตรงที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียทวนลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การติดตั้งครีบบนแผ่นแบบทั้งด้านบนและด้านล่างจะให้ค่าตัวประกอบเสียทวนมากกว่าการติดตั้งครีบบนแผ่นแบบด้านบนด้านเดียว และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่อค่าอัตราส่วนพิทซ์มีค่าลดลงจะทำให้ค่าตัวประกอบเสียทวนเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 8.15



รูปที่ 8.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีกรีดหยาบ
 ผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนกับ
 ด้านล่างและการติดตั้งกรีดบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดกรีดหยาบผสมกับร่องตรง โดยมีการปรับระยะในการติดกรีดที่มีอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ PR = 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งกรีดบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดกรีดหยาบที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 75.09 และ 121.98 เท่า สำหรับการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ ท่อที่มีการติดกรีดหยาบที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 1.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 31.40 และ 103.65 เท่า สำหรับการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดกรีดหยาบที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 2.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 18.83 และ 67.82 เท่า สำหรับการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนด้านเดียวและการติดกรีดบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.16



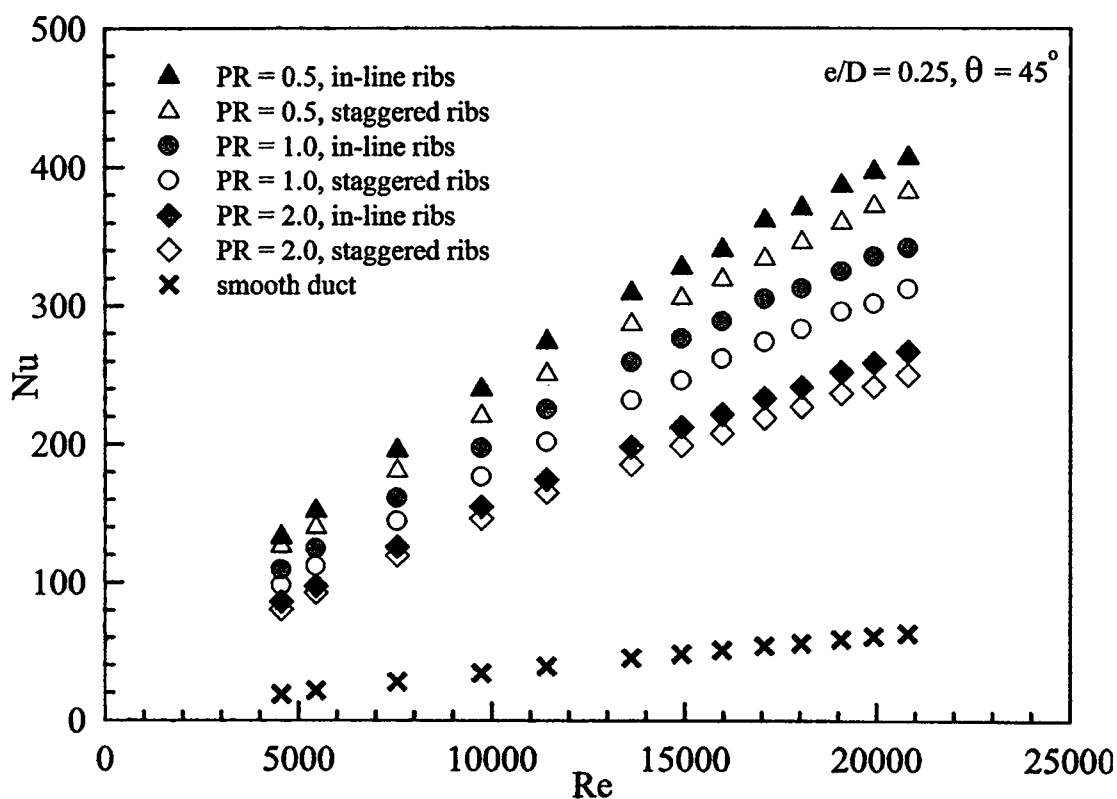
รูปที่ 8.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีกิริยหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนกับด้านล่างและการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

จากกรณีศึกษาชุดทดลองที่มีครีบบนแผ่นร่องตรง กรณีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว และกรณีติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ โดยมีค่าเลขนัสเซลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.51 และ 7.30 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว และกรณีติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.66

8.4 อิทธิพลของการจัดวางครีบบนที่ระยะพิทช์ต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนสูง 5 mm หักทำมุม 45 องศากับทิศทางการไหลของลม โดยมีระยะในการติดครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของร่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบ

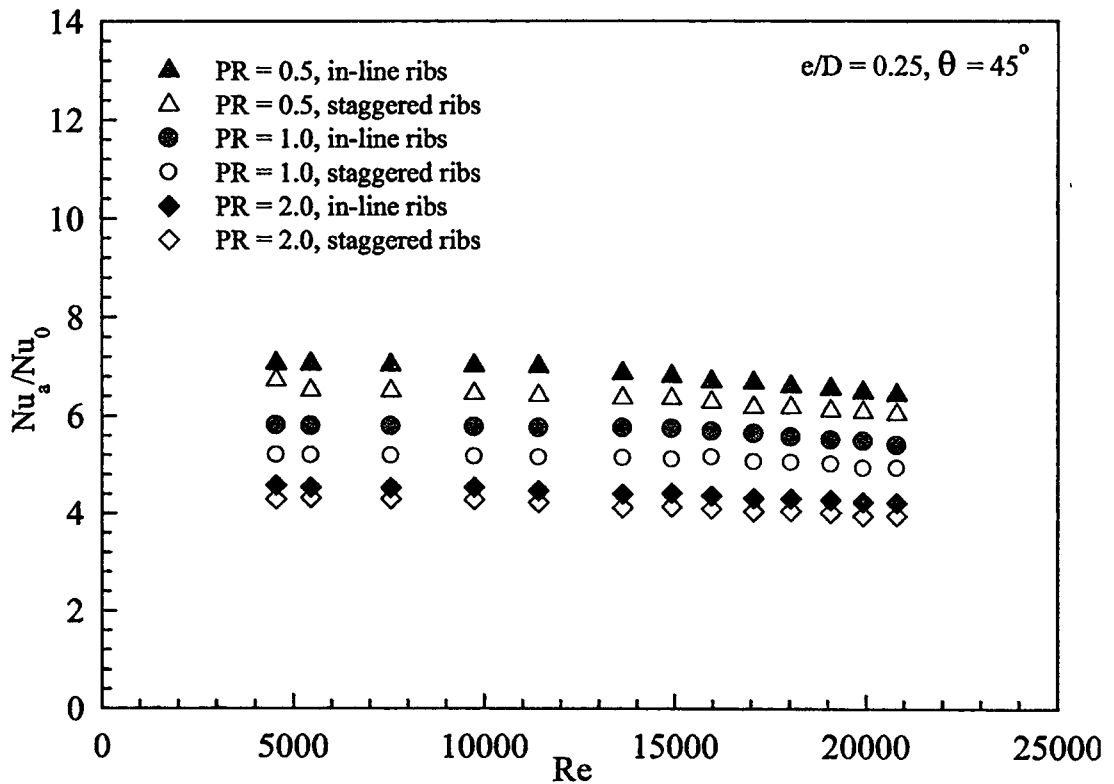
ปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์ของครีบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ท่อที่ติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์มากที่สุด ตามด้วยท่อที่ติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 1.0$ ตามด้วยท่อที่ติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5$ และท่อที่มีผิวเรียบ ซึ่งมีค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงตามลำดับ การติดตั้งครีบบนห้กแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าการติดตั้งครีบบนห้กแบบมีแนวเฉียงเมื่อเทียบกับค่าที่อัตราส่วนพิทซ์เดียวกัน แสดงในรูปที่ 8.18



รูปที่ 8.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่การติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนห้กที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเฉียงกัน

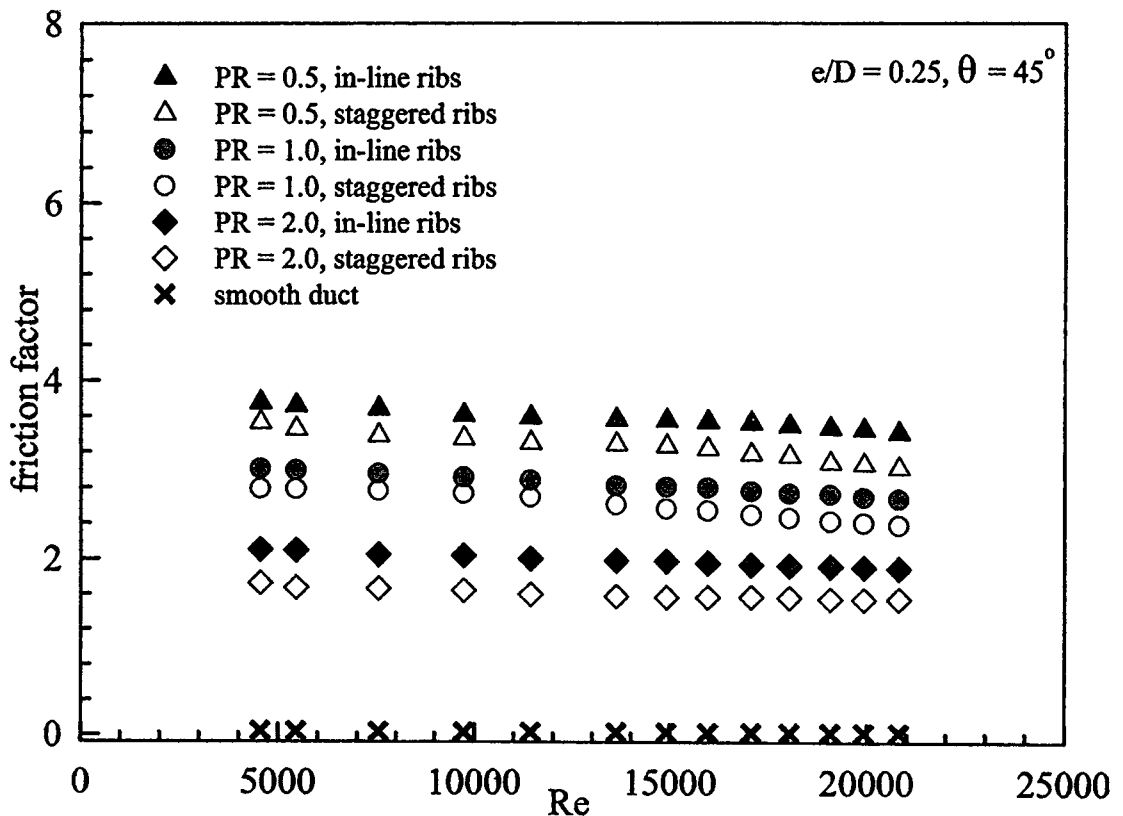
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ต่อเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเฉียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 7.20 และ 6.70 เท่า สำหรับการติดครีบบนห้กที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 1.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.01 และ 5.40 เท่า สำหรับการติดครีบบนห้กที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเฉียงกันตามลำดับ

และท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 2.0$ มีค่าเลขน้สเชิลล์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 4.66 และ 4.38 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.19



รูปที่ 8.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขน้สเชิลล์ต่อเลขน้สเชิลล์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ทุกแบบมีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์น้บเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผิวเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0, 1.0$ และ 0.5 ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันเมื่อเทียบกับค่าที่อัตราส่วนพิทซ์เดียวกัน แสดงในรูปที่ 8.20



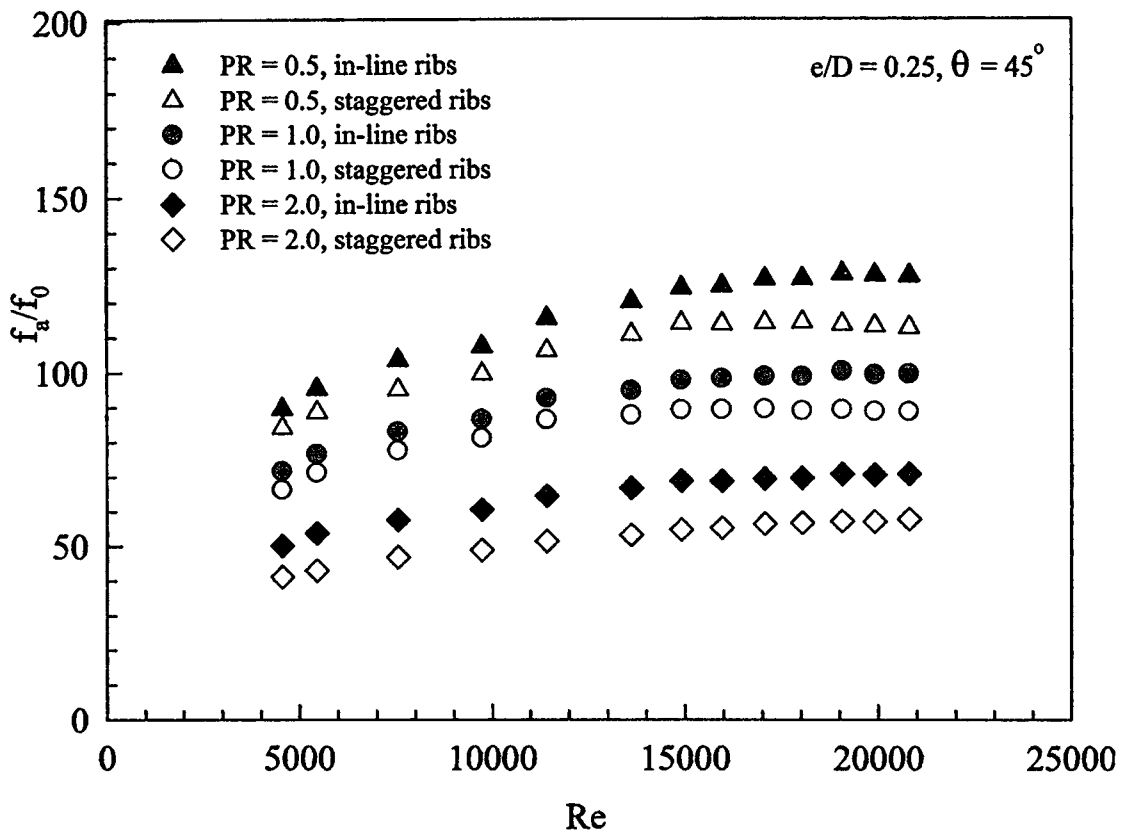
รูปที่ 8.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเดียวกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ

ท่อกับ PR = 0.5 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 116.71 และ 106.25 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ

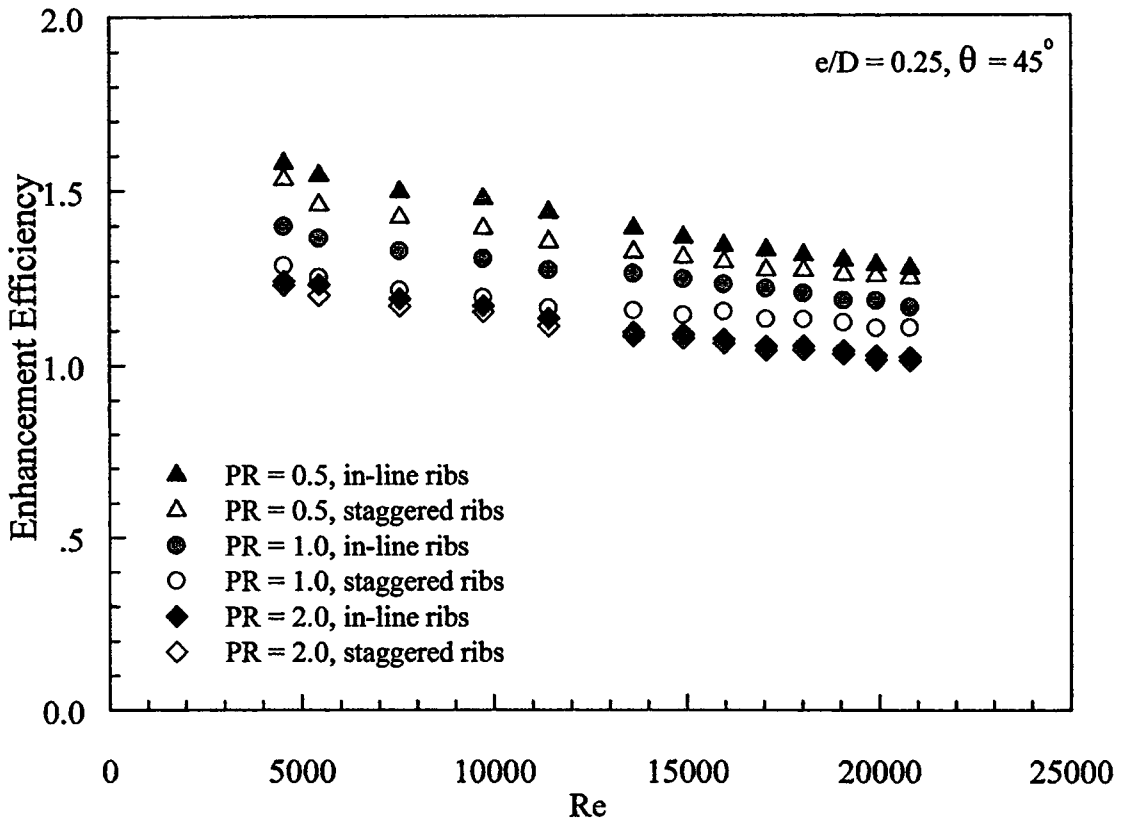
ท่อกับ PR = 1.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 92.11 และ 84.11 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ

ท่อกับ PR = 2.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 64.78 และ 52.27 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.21



รูปที่ 8.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบบนหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.47 และ 1.41 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบบนหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.33 และ 1.23 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบบนหยักที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.17 และ 1.15 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.22

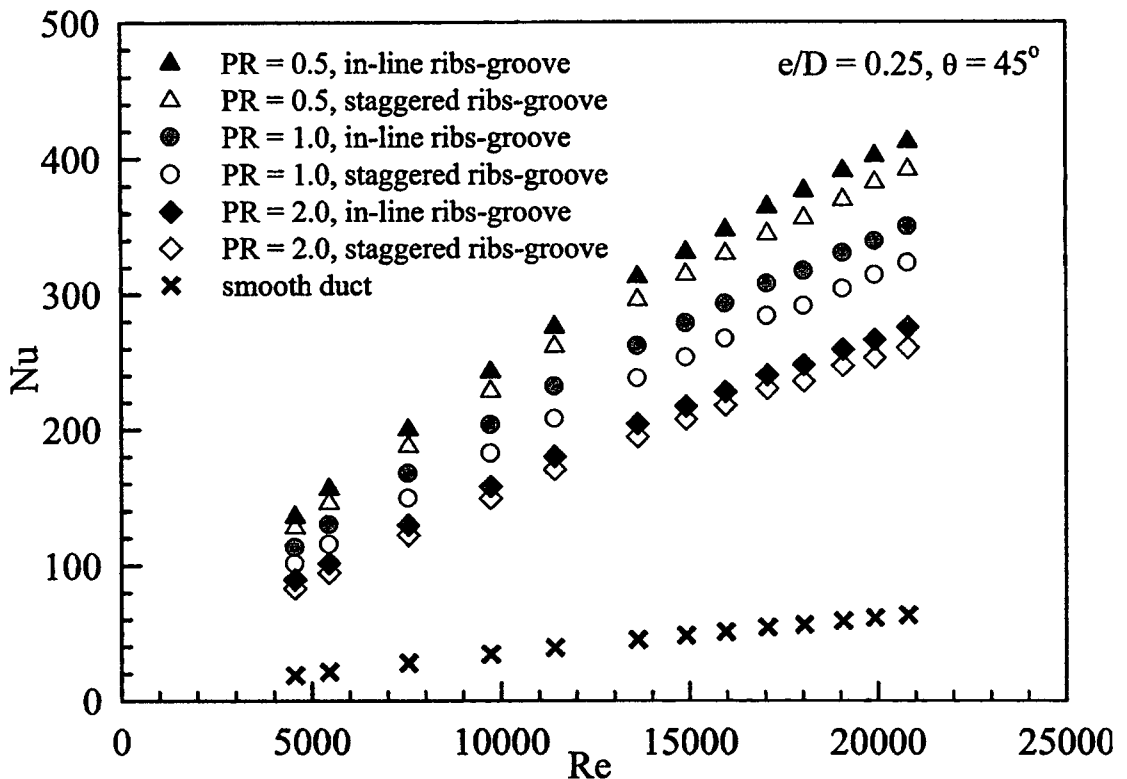


รูปที่ 8.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

จากการศึกษาชุดทดลองที่มีครีบบนห้ก(ไม่มีร่อง)สำหรับกรณีการติดครีบบนแผ่นที่ ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันด้านที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์ สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 7.20 และ 6.70 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ และที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ยังให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 และ 1.41 สำหรับการติดครีบบนแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ

ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนห้กวางหมดกับ ร่องตรง มีการปรับระยะในการติดครีบบนห้กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกัน และแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์ของครีบบนทุก

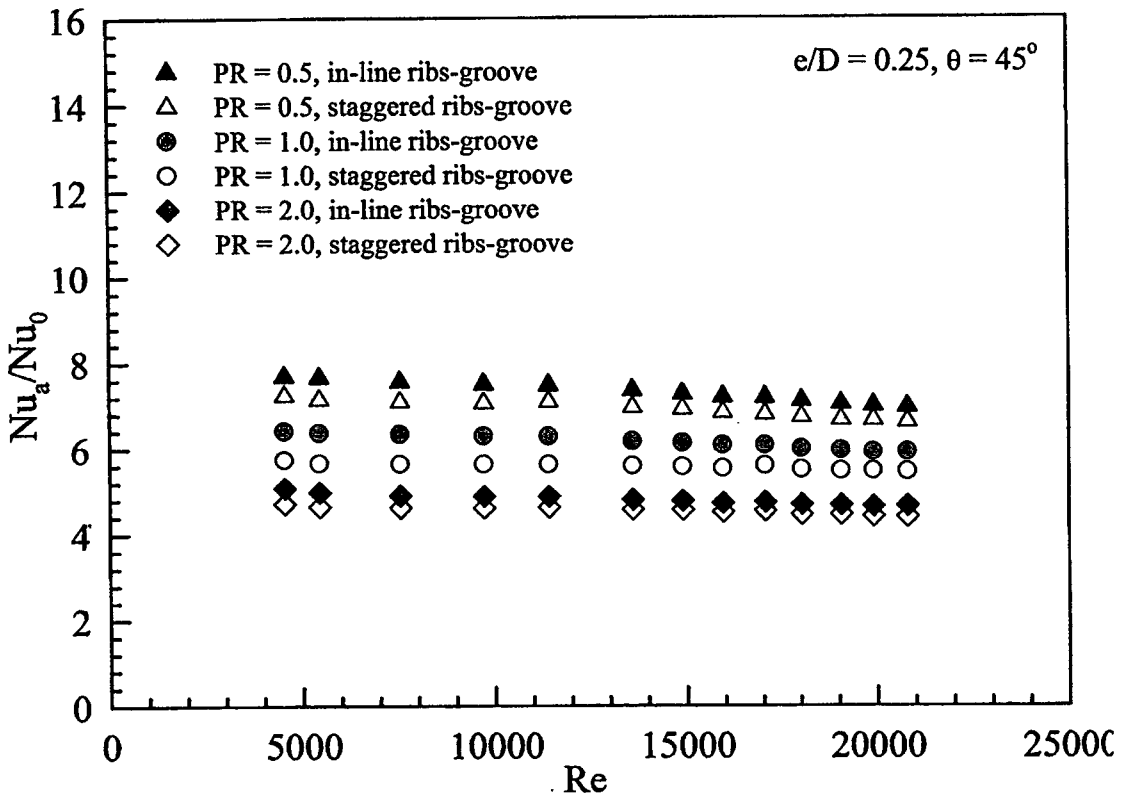
แบบเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้น และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่อค่าอัตราส่วนพิทช์มีค่าลดลงจะทำให้ค่าเลขนัสเซิลต์เพิ่มขึ้น กรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์มากที่สุด ตามด้วยกรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ และกรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ และท่อที่มีผิวเรียบ ซึ่งมีค่าเลขนัสเซิลต์ลดลงตามลำดับ การติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนพิทช์เดียวกัน แสดงในรูปที่ 8.23



รูปที่ 8.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซิลต์กับเลขเรโนลด์ กรณีครีบริบหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์คือเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักวงผสมกับร่องตรง มีการปรับระยะในการติดครีบริบที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน กรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักวงผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 7.37 และ 6.90 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบน

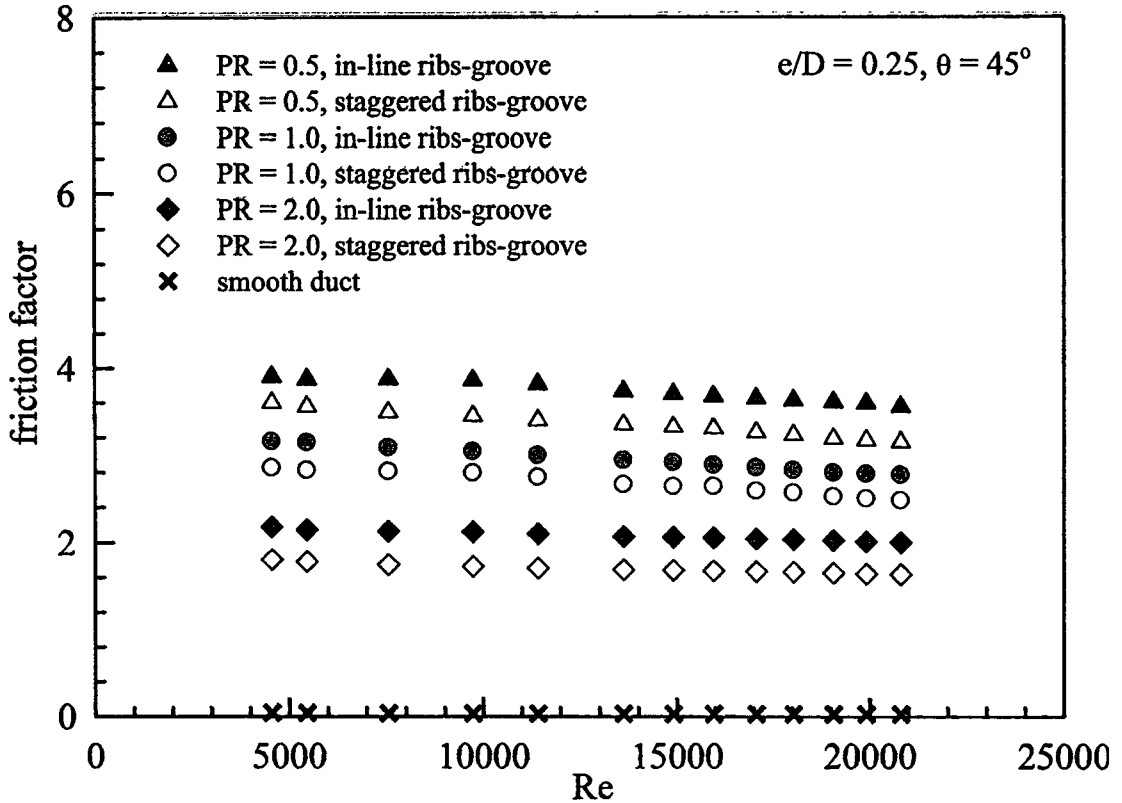
และด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักกว้างผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.58 และ 5.57 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ และกรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักกว้างผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 4.79 และ 4.54 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.24



รูปที่ 8.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ต่อเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเร โนลด์ กรณีครีบริบหักกว้างผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเร โนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักกว้างผสมกับร่องตรง มีการปรับระยะในการติดครีบริบที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ทุกแบบมีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเลขเรย์ โนลด์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผิวเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยกรณีท่อที่มีการติดครีบริบหักกว้างผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0, 1.0$ และ 0.5 ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ การติดตั้งครีบริบหักกว้างผสมกับร่อง

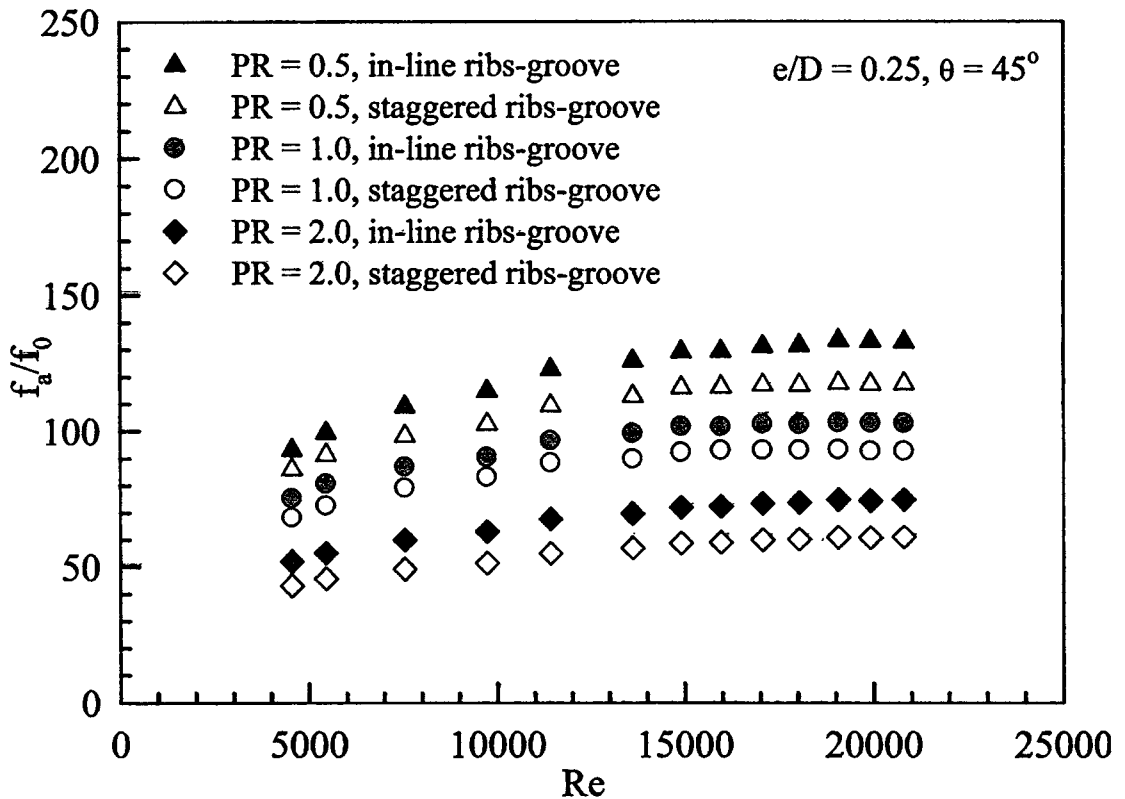
ตรง บนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเอียงกันเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนพิทช์เดียวกัน แสดงในรูปที่ 8.25



รูปที่ 8.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีครีบบนแผ่นที่ด้านบน ผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบน และด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบน ผสมกับร่องตรง มีการปรับระยะในการติดครีบบนที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ PR = 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกัน จากการทดลองพบว่า ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 121.98 และ 109.17 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกัน ท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 1.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 103.65 และ 86.88 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ ท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วน

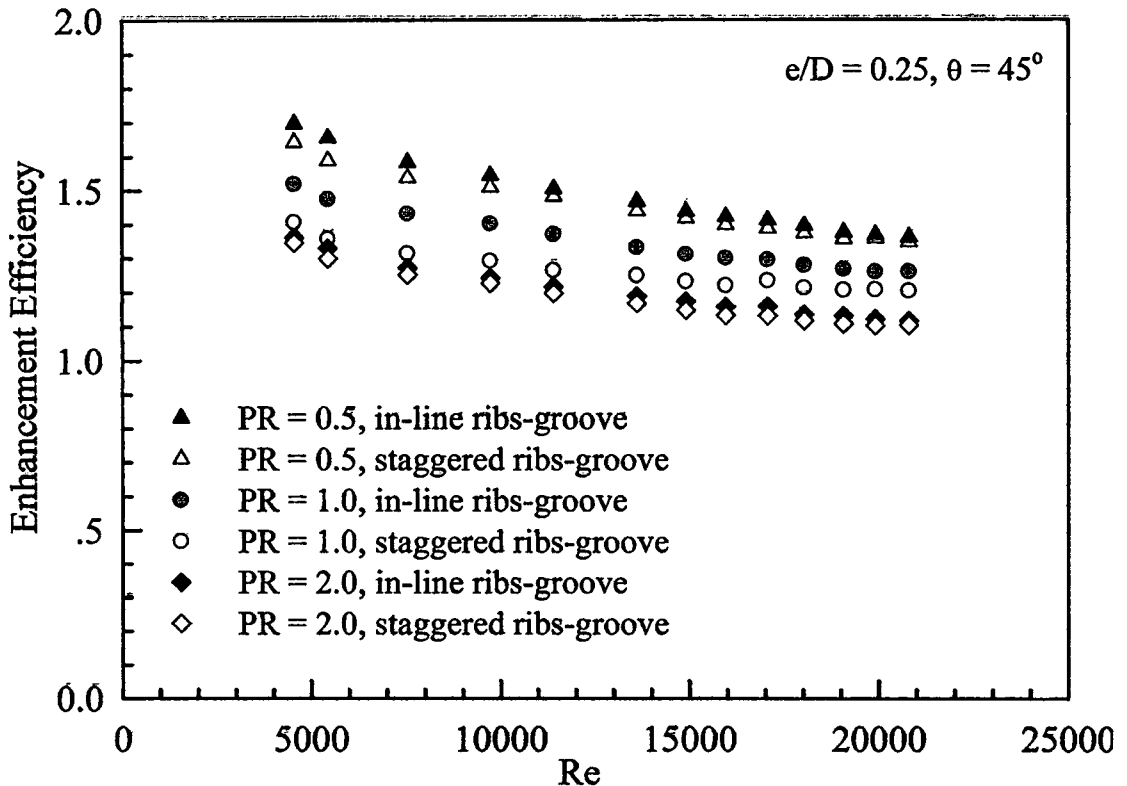
พิทช์ PR = 2.0 มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 67.82 และ 55.44 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.26



รูปที่ 8.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณิศรีบหยักวางผสมกับร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณิศรีบที่ มีการติดครีบบนร่องตรง มีการปรับระยะในการติดครีบบนที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ PR = 0.5, 1 และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm เมื่อติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันและแนวเอียงกันจากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 0.5 มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.54 และ 1.44 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ ท่อที่มีครีบบนที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ PR = 1.0 มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.34 และ 1.26 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ และท่อที่มี

ครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ มีค่าประสิทธิภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.18 และ 1.16 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.27

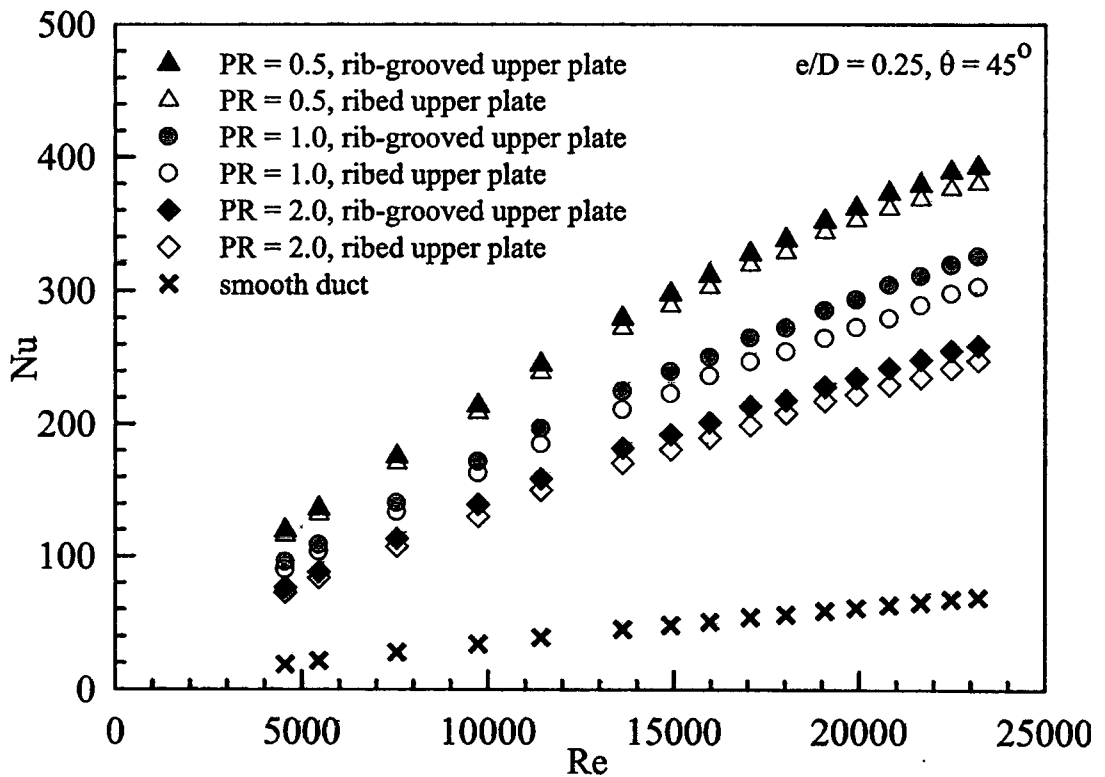


รูปที่ 8.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเร โนลด์กรณีครีบก้นวางผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการจัดวางครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันและแนวเอียงกัน

จากกรณีศึกษาชุดทดลองที่มีครีบก้นผสมร่องตรง กรณีติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวตรงกันที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 7.37 และ 6.90 เท่าสำหรับติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างวางแนวตรงกันและแนวเอียงกันตามลำดับ และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.54 และ 1.47 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนและด้านล่างแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงกันตามลำดับ

8.5 อิทธิพลของครีบก้นและครีบก้นผสมร่องตรง โดยที่มีอัตราส่วนพิทช์ต่างกัน

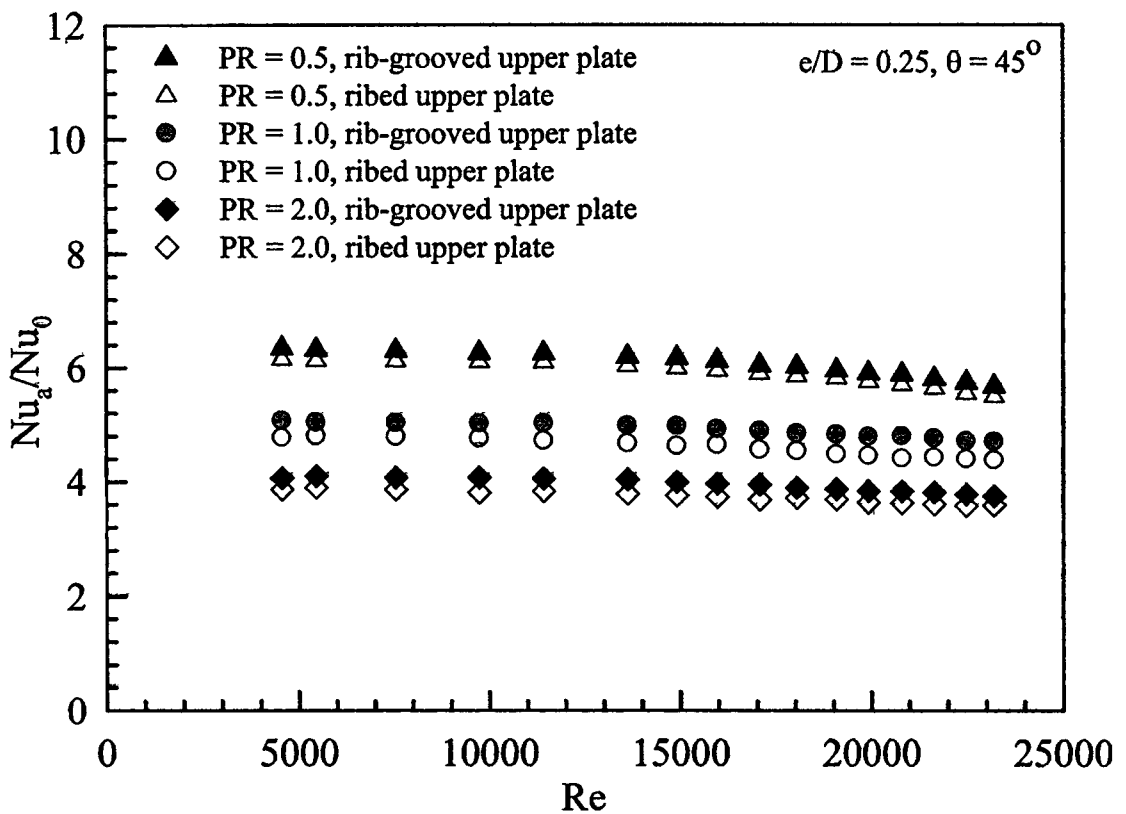
ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์กับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบก้น โดยเปรียบเทียบของสองกรณี คือกรณีที่มีการติดตั้งครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบก้นผสมร่องตรง ซึ่งมีระยะในการติดครีบก้นที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการติดครีบก้นบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อค่าเลขเรโนลด์ของครีบก้นเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าเลขนัสเซลล์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซลล์มากที่สุด ตามด้วยท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 1.0$ ตามด้วยท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ $PR = 2.0$ และท่อที่มีผิวเรียบ ซึ่งมีค่าเลขนัสเซลล์ลดลงตามลำดับ กรณีการติดตั้งครีบก้นกว้างผสมกับร่องตรงจะให้ค่าเลขนัสเซลล์มากกว่าการติดตั้งครีบก้นบนพื้นผิวเรียบที่ค่าอัตราส่วนพิทช์เดียวกัน แสดงในรูปที่ 8.28



รูปที่ 8.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลล์กับเลขเรโนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบก้นและกรณีที่มีการติดตั้งครีบก้นผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทช์ต่างๆ สำหรับการติดครีบก้นบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

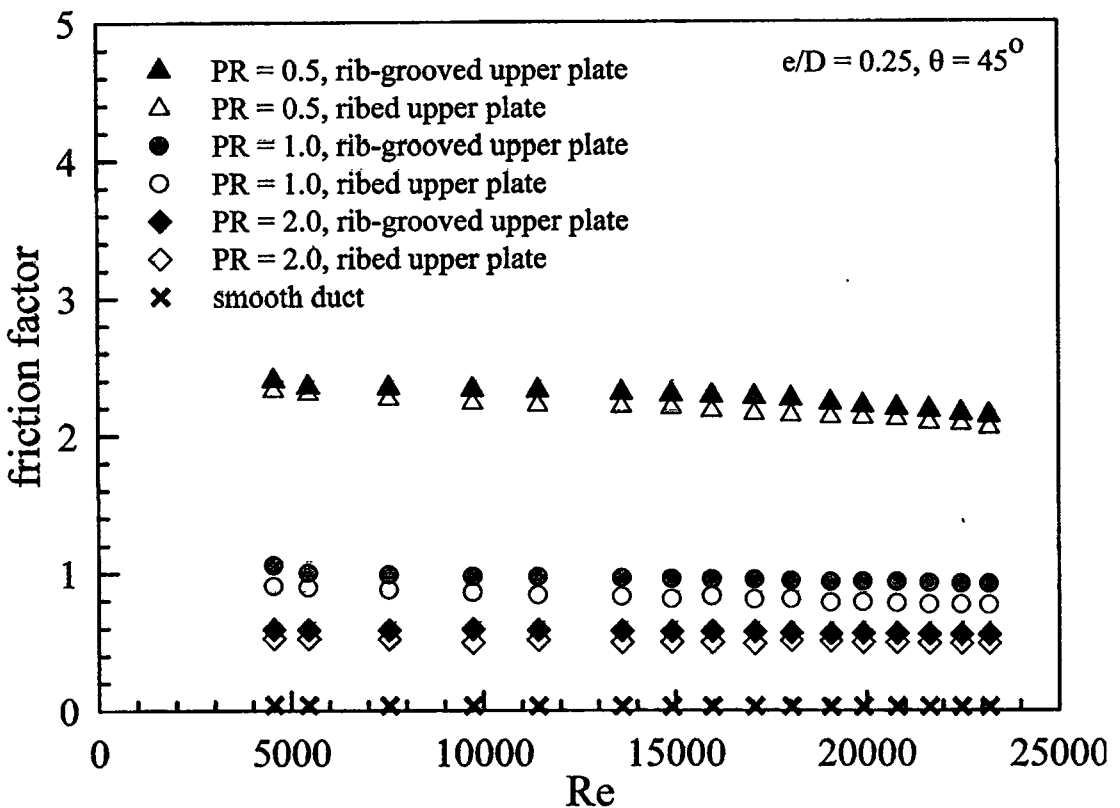
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซลล์ต่อเลขนัสเซลล์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบก้น โดยเปรียบเทียบของสองกรณี คือกรณีที่มีการติดตั้งครีบก้น(ไม่

มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรง ซึ่งมิมีระยะในการติดตั้งที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการติดตั้งบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 6.33 และ 6.51 เท่า สำหรับการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิว(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรงตามลำดับ และท่อที่มีการติดตั้งครีบบนผิวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 4.91 และ 5.23 เท่า สำหรับการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิว(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรงตามลำดับ และท่อที่มีการติดตั้งครีบบนผิวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ มีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 3.98 และ 4.21 เท่า สำหรับการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิว(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรงตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.29



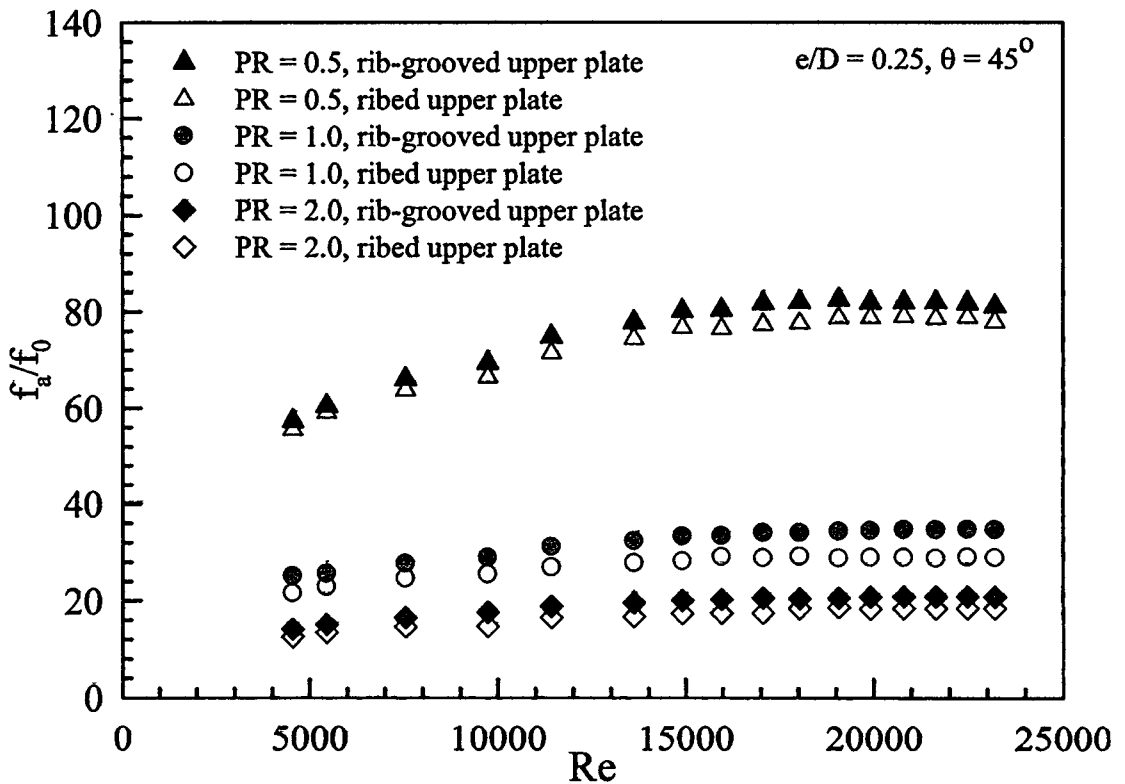
รูปที่ 8.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเลขนัสเซิลต์ต่อเลขนัสเซิลต์ของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวและกรณีที่มีการติดตั้งครีบบนผิวตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดตั้งครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบหัก โดยเปรียบเทียบของสองกรณี คือกรณีที่มีการติดตั้งครีบหัก(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบหักผสมร่องตรง ซึ่งมีระยะในการติดครีบที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบหักที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ มีค่าตัวประกอบเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น ท่อที่มีผิวเรียบมีค่าตัวประกอบเสียดทานน้อยที่สุด ตามด้วยท่อที่มีการติดครีบหักที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ ตามด้วยท่อที่มีการติดครีบหักที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ และตามด้วยท่อที่มีการติดครีบหักที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ซึ่งมีค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นตามลำดับ กรณีการติดตั้งครีบหักวางผสมกับร่องแนวตรงจะให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบหักแบบไม่มีร่อง แสดงในรูปที่ 8.30



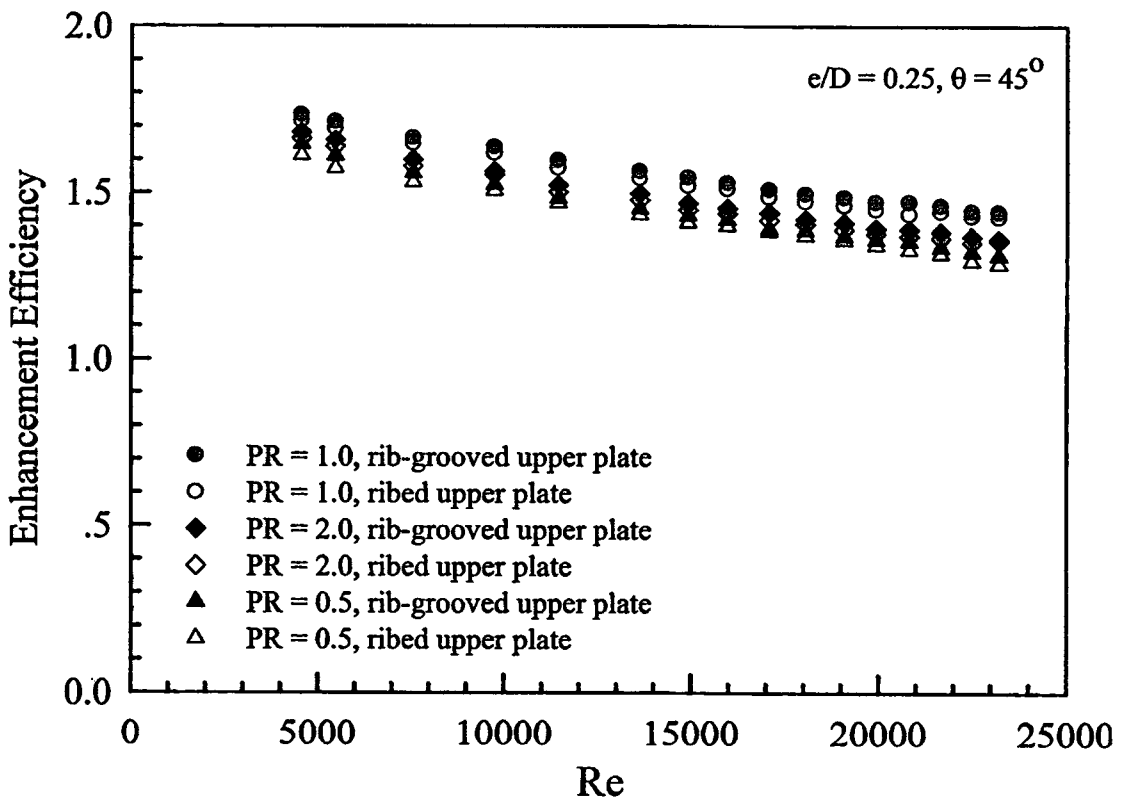
รูปที่ 8.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบเสียดทานกับเลขเรโนลด์ กรณีที่มีการติดตั้งครีบหักและกรณีที่มีการติดตั้งครีบหักผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบก้น โดยเปรียบเทียบของสองกรณี คือกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นผสมร่องตรง ซึ่งมีระยะในการติดครีบก้นที่อัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 71.93 และ 75.09 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นผสมร่องตรงตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 26.95 และ 31.40 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นผสมร่องตรงตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ มีค่าตัวประกอบเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 16.48 และ 18.83 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นผสมร่องตรงตามลำดับ แสดงในรูปที่ 8.31



รูปที่ 8.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนตัวประกอบเสียดทานต่อตัวประกอบเสียดทานของท่อที่มีผิวเรียบกับเลขเรโนลด์ กรณีที่มีการติดครีบก้นและกรณีที่มีการติดครีบก้นผสมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีท่อที่มีการติดครีบก้น โดยเปรียบเทียบของสองกรณี คือกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นพร้อมร่องตรง ซึ่งมีระยะในการติดครีบก้นที่ค่าอัตราส่วนพิทซ์เท่ากับ $PR = 0.5, 1$ และ 2 ตามลำดับ ความสูงของช่องขนาน $D = 20$ mm สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.52 และ 1.54 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นพร้อมร่องตรงตามลำดับ ท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.64 และ 1.66 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นพร้อมร่องตรงตามลำดับ และท่อที่มีการติดครีบก้นที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 2.0$ มีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบ 1.57 และ 1.59 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดครีบก้น(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดครีบก้นพร้อมร่องตรงตามลำดับ แสดงในรูปที่ 9.32



รูปที่ 8.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนกับเลขเรโนลด์ กรณีที่มีการติดครีบก้นและกรณีที่มีการติดครีบก้นพร้อมร่องตรงที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ต่างๆ สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว

จากกรณีศึกษาชุดทดลองที่มีการติดตั้งครีบบั๊ก(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบั๊กผสมร่องตรง สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่เฉพาะด้านบนเพียงด้านเดียว ท่อที่มีการติดครีบบั๊กที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ ซึ่งมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผิวเรียบเท่ากับ 6.33 และ 6.51 เท่า สำหรับการติดตั้งครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดตั้งครีบบั๊กและการติดตั้งครีบบั๊กผสมร่องตรงตามลำดับ ต่อมาท่อที่มีการติดตั้งครีบบั๊กสำหรับการติดครีบบั๊กที่ด้านบนอย่างเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆ โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.64 และ 1.66 เท่า สำหรับการติดครีบบนแผ่นที่ด้านบนเพียงด้านเดียวของกรณีที่มีการติดตั้งครีบบั๊ก(ไม่มีร่อง)และกรณีที่มีการติดตั้งครีบบั๊กผสมร่องตรงตามลำดับ

ตารางที่ 8.1 สรุปผลของการถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และ efficiency (η)

ท่อทดสอบ	$PR = P/D$	การจัดวางครีบบั๊ก	Nu/Nu_0	f/f_0	η
ครีบบั๊ก	0.5	เฉพาะด้านบน	6.33	71.93	1.52
ครีบบั๊ก	1.0	เฉพาะด้านบน	4.91	26.95	1.64
ครีบบั๊ก	2.0	เฉพาะด้านบน	3.98	16.48	1.57
ครีบบั๊ก	0.5	บน-ล่าง วางตรง	7.20	116.71	1.47
ครีบบั๊ก	1.0	บน-ล่าง วางตรง	6.00	92.11	1.33
ครีบบั๊ก	2.0	บน-ล่าง วางตรง	4.66	64.78	1.17
ครีบบั๊ก	0.5	บน-ล่าง วางเฉียง	6.70	106.25	1.41
ครีบบั๊ก	1.0	บน-ล่าง วางเฉียง	5.40	84.11	1.23
ครีบบั๊ก	2.0	บน-ล่าง วางเฉียง	4.38	52.27	1.15
ครีบบั๊กผสมร่อง	0.5	เฉพาะด้านบน	6.51	75.09	1.54
ครีบบั๊กผสมร่อง	1.0	เฉพาะด้านบน	5.23	31.40	1.66
ครีบบั๊กผสมร่อง	2.0	เฉพาะด้านบน	4.21	18.83	1.59
ครีบบั๊กผสมร่อง	0.5	บน-ล่าง วางตรง	7.37	121.98	1.47
ครีบบั๊กผสมร่อง	1.0	บน-ล่าง วางตรง	6.58	103.65	1.34
ครีบบั๊กผสมร่อง	2.0	บน-ล่าง วางตรง	4.79	67.82	1.18
ครีบบั๊กผสมร่อง	0.5	บน-ล่าง วางเฉียง	6.90	109.17	1.45
ครีบบั๊กผสมร่อง	1.0	บน-ล่าง วางเฉียง	5.57	86.88	1.26
ครีบบั๊กผสมร่อง	2.0	บน-ล่าง วางเฉียง	4.54	55.44	1.17

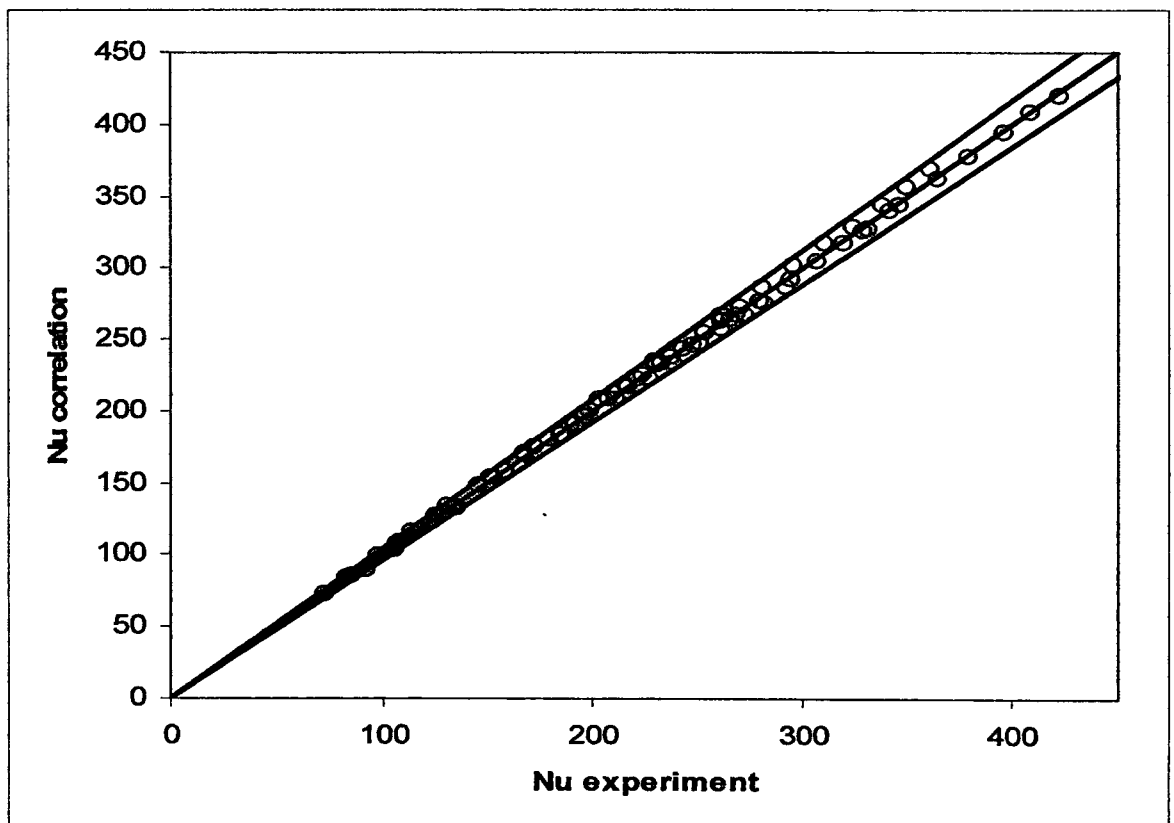
8.6 การหาความสัมพันธ์ของ Nu และ f จากการทดสอบ

8.6.1 กรณีท่อที่มีครีบทึบ สำหรับการวางครีบบนแนวตรงกันและการวางครีบบนที่แผ่นด้านบนด้านเดียวเท่านั้น

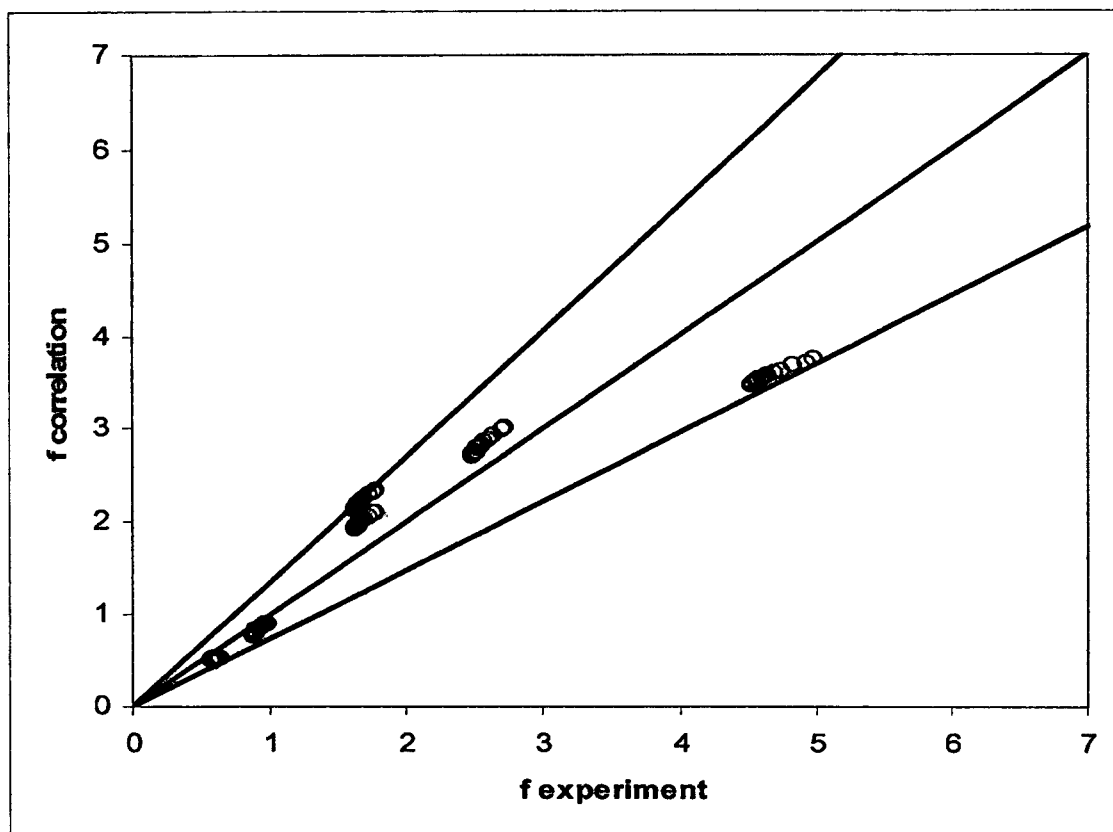
จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000 - 20,000$ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 15 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน โดยสมการความสัมพันธ์ท่อที่มีครีบทึบสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = 0.0978 Re^{0.7573} Pr^{0.4} N^{0.2284} (PR+1)^{-0.1871}$$

$$f = 0.0047 Re^{-0.0632} N^{1.1854} (PR+1)^{1.4825}$$



รูปที่ 8.33 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบทึบ เมื่อมีการจัดวางครีบบนแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบนที่แผ่นด้านบนด้านเดียว



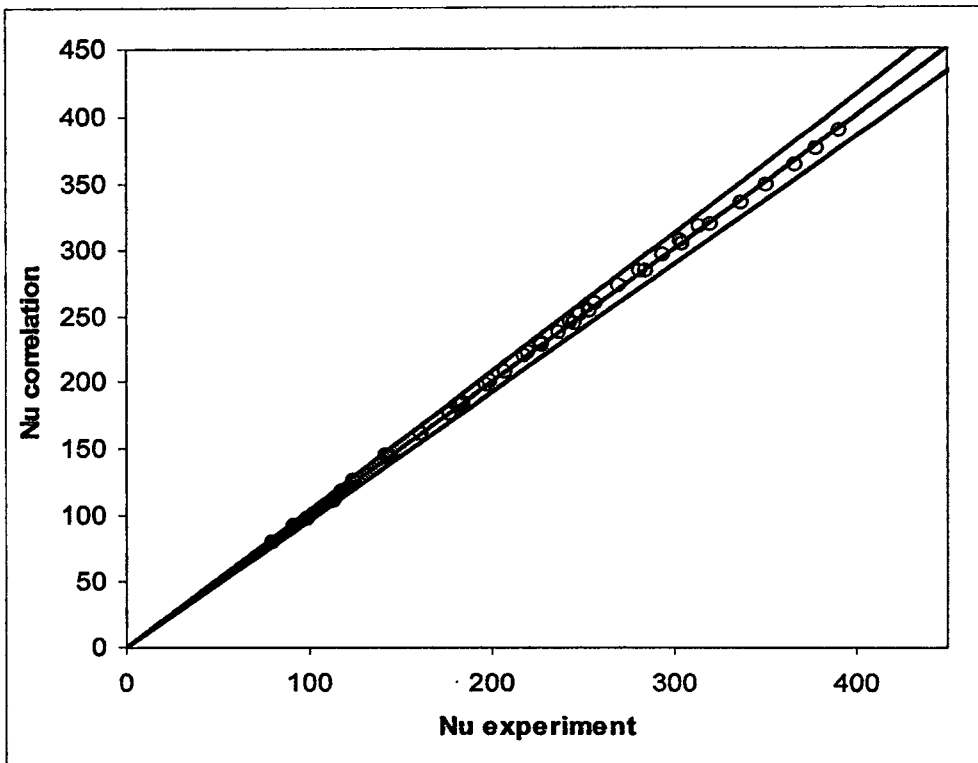
รูปที่ 8.34 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบทึบห้ก เมื่อมีการจัดวางครีบบางแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบที่แผ่นด้านบนด้านเดียว

8.6.2 กรณีท่อที่มีครีบทึบห้ก สำหรับการวางครีบบางแนวเอียงกัน

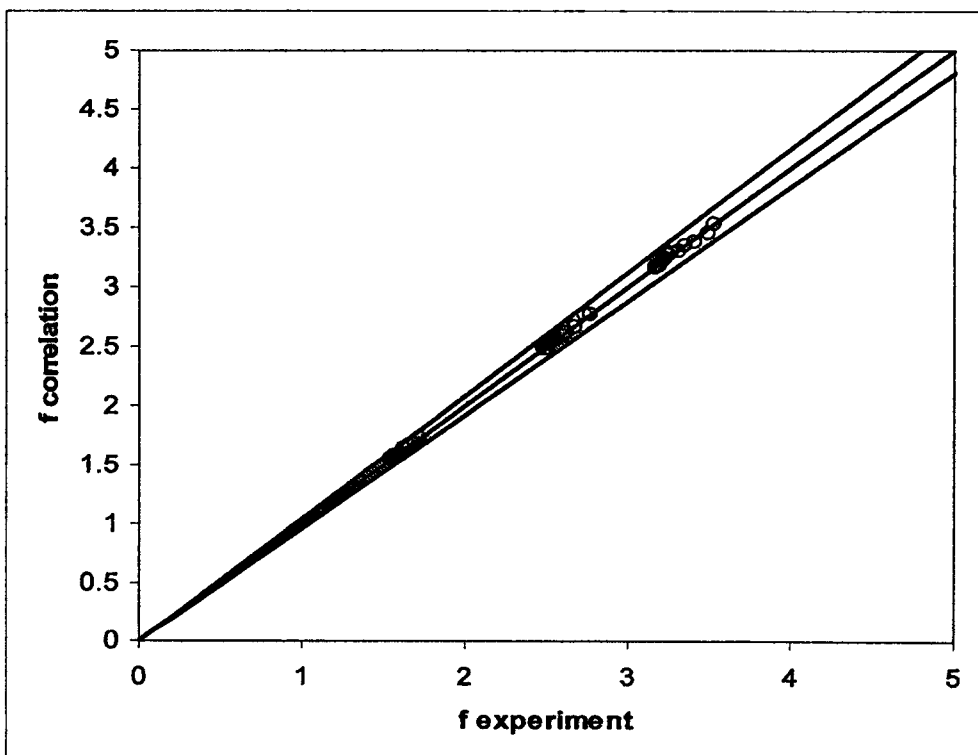
จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000 - 20000$ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน โดยสมการความสัมพันธ์ท่อที่มีครีบทึบห้กแบบวางเอียงสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = 0.0469 Re^{0.7559} Pr^{0.4} N^{0.3501} (PR+1)^{0.0745}$$

$$f = 136.9472 Re^{-0.0717} N^{-0.4823} (PR+1)^{-2.005}$$



รูปที่ 8.35 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก
สำหรับการจัดวางครีบบางแนวเดียวกัน



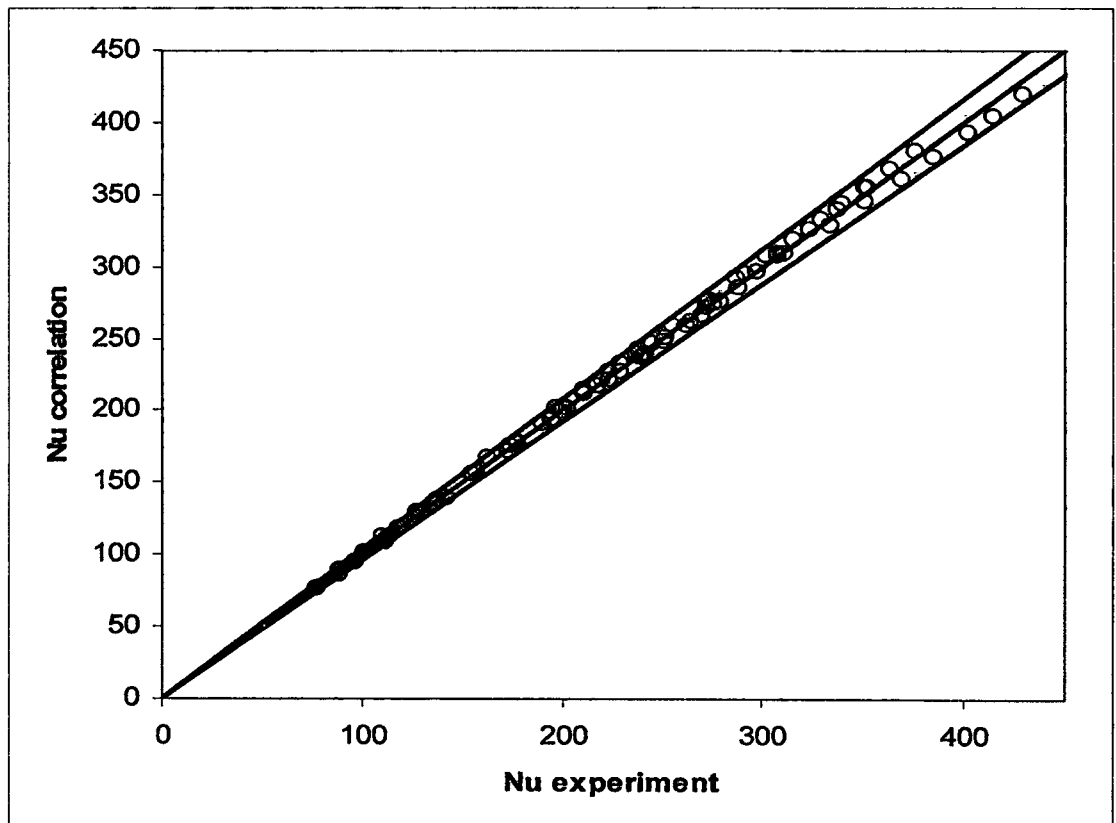
รูปที่ 8.36 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก
สำหรับการจัดวางครีบบางแนวเดียวกัน

8.6.3 กรณีท่อที่มีครีบทึบหรือครีบลอย สำหรับการวางครีบบนแนวตรงกันและการวางครีบบนแผ่นด้านบนด้านเดียวเท่านั้น

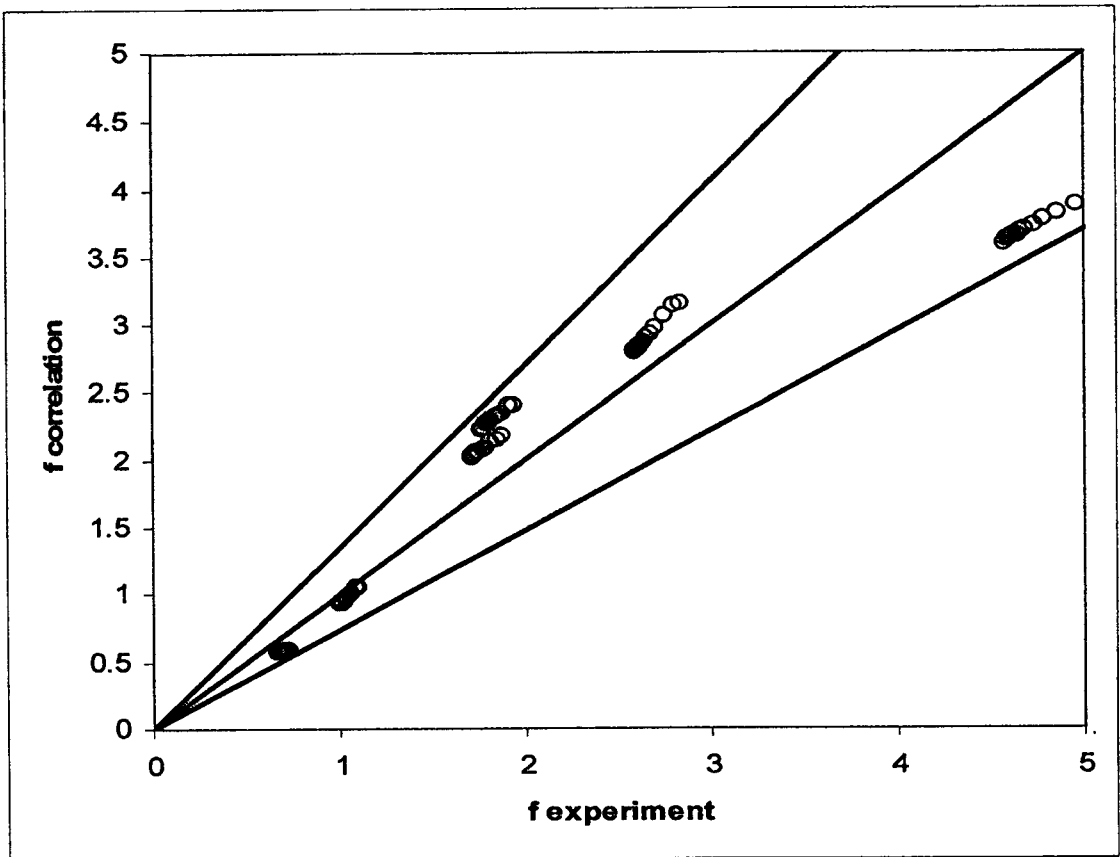
จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000 - 20,000$ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 15 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน โดยสมการความสัมพันธ์ท่อที่มีครีบทึบหรือครีบลอยสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = 0.1193 Re^{0.7584} Pr^{0.4} N^{0.1907} (PR+1)^{-0.2366}$$

$$f = 0.0083 Re^{-0.0595} N^{1.3713} (PR+1)^{1.3217}$$



รูปที่ 8.37 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบทึบหรือครีบลอย เมื่อมีการจัดวางครีบบนแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบนแผ่นด้านบนด้านเดียว



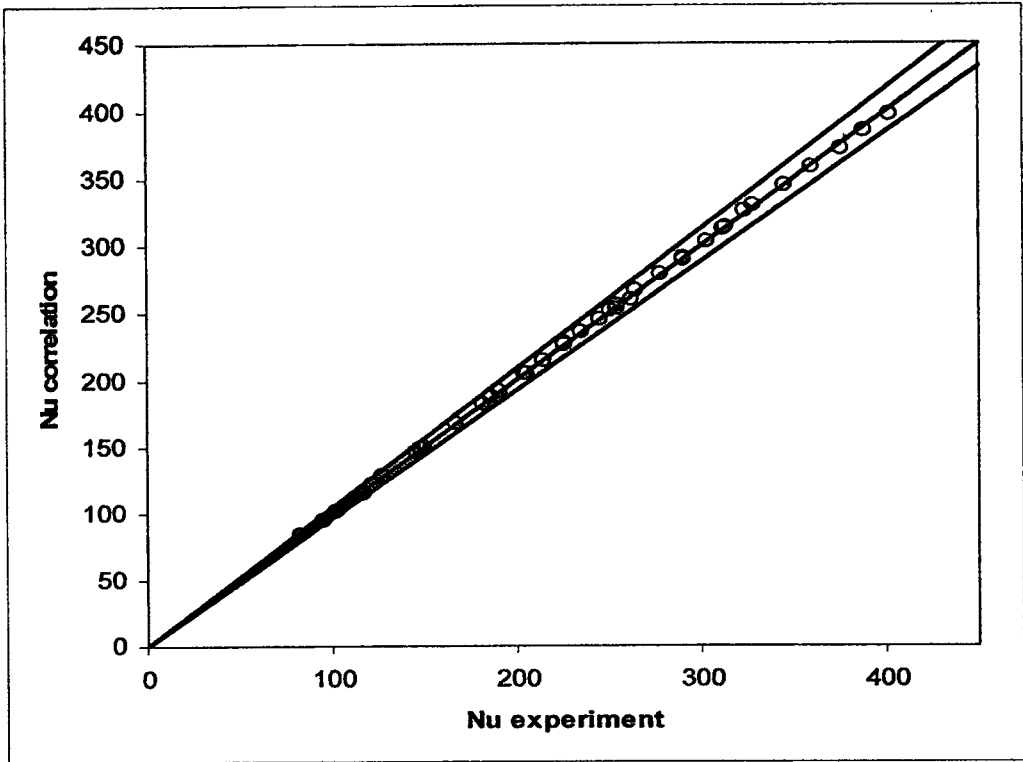
รูปที่ 8.38 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก วางผสมร่อง เมื่อมีการจัดวางครีบบางแนวตรงกันและกรณีที่มีการติดครีบบั๊กที่แผ่ด้านบน ด้านเดียว

8.6.4 กรณีท่อที่มีครีบบั๊กผสมร่อง สำหรับการวางครีบบางแนวเรียงกัน

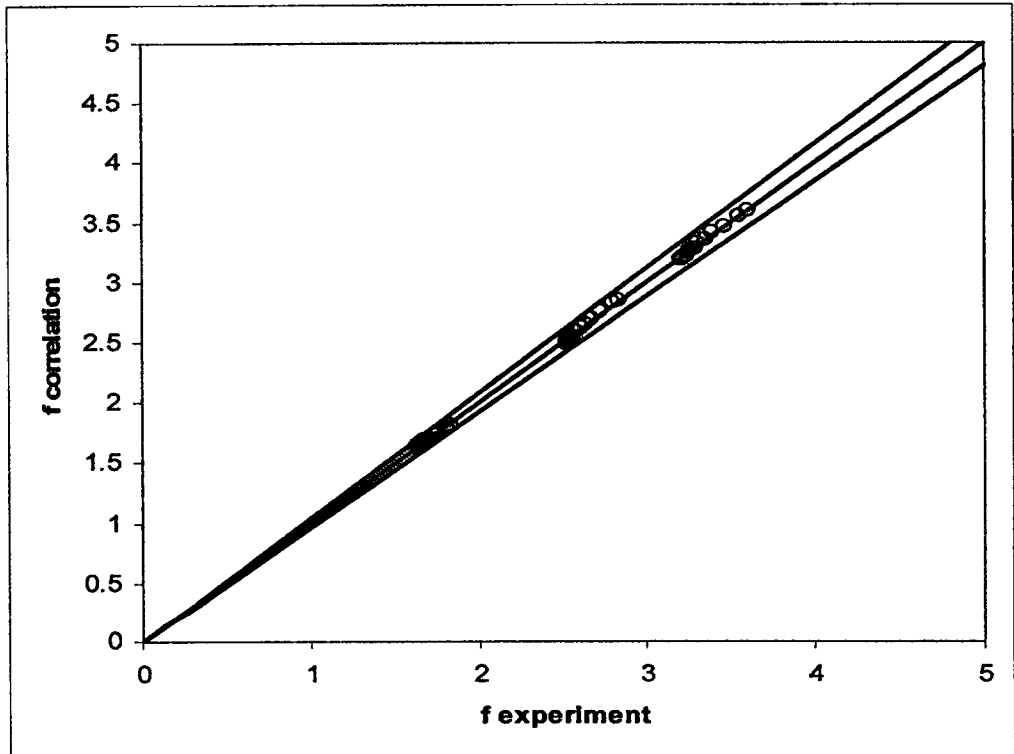
จากการทดสอบนำมาสร้างสมการการถ่ายเทความร้อนและสมการความเสียดทาน โดยการนำสมการที่สร้างขึ้น มาตรวจสอบเทียบกับผลจากการทดสอบว่าอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับหรือไม่ โดยมีขอบเขตในช่วงเลขเรย์โนลด์ $Re = 4,000 - 20,000$ ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าผลของการถ่ายเทความร้อนอยู่ในช่วงเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ผลของความเสียดทานอยู่ระหว่าง ± 2 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน โดยสมการความสัมพันธ์ท่อที่มีครีบบั๊กผสมร่องแบบวางเรียงสามารถเขียนได้ดังต่อไปนี้

$$Nu = 0.0503 Re^{0.7592} Pr^{0.4} N^{0.3352} (PR+1)^{0.0573}$$

$$f = 71.2739 Re^{-0.0777} N^{-0.3546} (PR+1)^{-1.6851}$$



รูปที่ 8.39 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ Nu จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก สำหรับมีการจัดวางครีบบนแนวเฉียงกัน



รูปที่ 8.40 แสดงการตรวจสอบความผิดพลาดจากสมการ f จากการทดลอง กรณีท่อที่มีครีบบั๊ก สำหรับมีการจัดวางครีบบนแนวเฉียงกัน

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยครีบกวนและครีบกวนผสมร่องแนวตรง

การศึกษาและออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบกวน 45 องศา จากการทดลองพบว่า การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในการไหลภายในท่อ โดยการติดครีบกวนที่ผิวภายในท่อ เพื่อให้เกิดปั่นป่วน ช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และผลของท่อที่มีครีบกวน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น การติดครีบกวนจะส่งผลคือ การถ่ายเทความร้อน 2 ประการคือ ประการแรก จะช่วยทำให้เกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างอากาศที่ถูกจ่ายเข้าภายในชุดทดลองกับอากาศที่ผิวครีบกวนมากขึ้น ประการที่สอง เป็นการเพิ่มระยะเวลาในการรับความร้อนที่ผิวครีบกวนให้นานมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น แต่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มสูงตามด้วย โดยทำการทดลองแบ่งเป็นสองกรณีหลักๆ คือ 1. กรณีที่มีการติดครีบกวน (ไม่มีร่อง) 2. กรณีที่มีการติดครีบกวนผสมร่องตรง ซึ่งทั้ง 2 กรณีดังกล่าวสามารถแบ่งเป็นการติดครีบกวนที่ด้านบนอย่างเดียวเท่านั้น และการติดครีบกวนทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งแบบนี้ได้มีการจัดแบ่งการวางครีบกวนได้เป็นสองลักษณะคือลักษณะแนวเดียวกันและลักษณะแนวเอียงกัน ดังนั้นจะทำการสรุปเป็นกรณีของแต่ละกรณี ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

เริ่มจากชุดทดลองที่มีครีบกวน (ไม่มีร่อง) กรณีติดครีบกวนที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบกวนด้านบนด้านเดียว โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.33 เท่า และชุดทดลองที่มีครีบกวน (ไม่มีร่อง) กรณีติดครีบกวนที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบกวนเฉพาะด้านบนด้านเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.64 ถัดมาเป็นชุดทดลองที่มีครีบกวนผสมร่องตรง กรณีติดครีบกวนที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าผนังเรียบสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบกวนด้านบนด้านเดียว โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 6.51 เท่า และชุดทดลองที่มีครีบกวนผสมร่องตรง กรณีติดครีบกวนที่ด้านบนด้านเดียวที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 1.0$ ให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบกวนเฉพาะด้านบนด้านเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.66 ถัดมาเป็นชุดทดลองที่มีครีบกวน (ไม่มีร่อง) กรณีติดครีบกวนทั้งด้านบนและด้านล่างที่มีการวางครีบกวนแบบตรงกันที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ PR

= 0.5 ให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบที่ด้านบนและด้านล่างแบบวางตรงกัน โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.20 เท่า และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบที่ด้านบนและด้านล่างแบบวางตรงกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.47 ซึ่งลักษณะการวางครีบบแบบตรงกันจะให้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยและประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการวางครีบบแบบเอียงกัน ต่อมาเป็นชุดทดลองที่มีครีบบหักผสมร่องตรง กรณีติดครีบบทั้งด้านบนและด้านล่างที่มีการวางครีบบแบบตรงกันที่มีค่าอัตราส่วนพิทซ์ $PR = 0.5$ ให้ค่าเลขนัสเซิลต์สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่มีการติดครีบบที่ด้านบนและด้านล่างแบบวางตรงกัน โดยมีค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 7.37 เท่า และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงที่สุด โดยมีค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.54 ซึ่งลักษณะการวางครีบบแบบแนวตรงจะให้ค่าเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยและประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการวางครีบบแบบแนวเอียงเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ากรณีท่อที่มีการติดตั้งครีบบหักสามารถช่วยเพิ่มค่าเลขนัสเซิลต์ซึ่งจะส่งผลให้ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าสูงขึ้นตามด้วย และให้ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนมากกว่ากรณีท่อที่มีการติดตั้งครีบบตรง ซึ่งกรณีท่อที่มีการติดตั้งครีบบหัก(ไม่มีร่อง)ที่ด้านบนและด้านล่างแบบแนวเดียวกันจะให้ค่าเลขนัสเซิลต์มากกว่าแบบแนวเอียง และกรณีของการติดครีบบหักผสมร่องสามารถช่วยเพิ่มค่าเลขนัสเซิลต์มีค่ามากกว่ากรณีท่อที่มีการติดตั้งครีบบหัก(ไม่มีร่อง) และกรณียังช่วยเพิ่มค่าประสิทธิภาพการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนให้มากกว่ากรณีท่อที่มีการติดตั้งครีบบหัก(ไม่มีร่อง)

9.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบครีบบ, ครีบบหัก และครีบบหักผสมร่องแนวตรงเป็นงานวิจัย ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของลม ไทลแบบตรง และศึกษาผลของตำแหน่งครีบบและระยะห่างของครีบบ โดยติดครีบบที่ผิวบนและผิวล่างท่อ ภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง ฉะนั้นแล้วควรจะมีการศึกษาถึงตัวแปรอื่นๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น เช่น

1. ศึกษาถึงรูปร่างอื่นๆ ของครีบบ
2. ศึกษาถึงค่า aspect ratio อื่นๆ ของชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
3. ศึกษาถึงการใช้ครีบบรูปอื่นๆ เช่น รูปพาราโบลา
4. ศึกษาถึงค่ามุมอื่นๆของครีบบหัก
5. ศึกษาถึงชุดทดลองรูปทรงกระบอก
6. ศึกษาถึงขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน

บรรณานุกรม

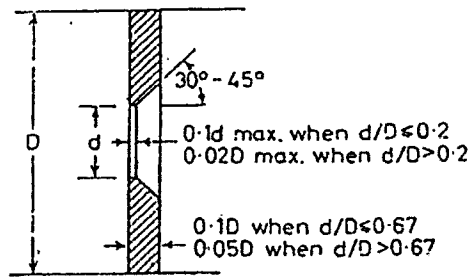
- [1] ชัชวาล เขียวละลิม, ณัฐวุฒิ หลัวพิริยะวงศ์ และนนทศักดิ์ ทองพุ่มพฤษา. 2544. การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. ปริชญานิพนธ์ปริชญาวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] พงษ์เจต พรหมวงศ์. 2542. การถ่ายเทความร้อน. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 167-252.
- [3] Ahn, S.W. 2001. **The effects of roughness types on friction factors and heat transfer in roughened rectangular duct.** Int. Comm. Heat Mass Transfer Vol. 28, pp. 933-942.
- [4] Benlu and Pei-Xue Jiang. 2005. **Experimental and numerical investigation of convection heat transfer in a rectangular channel with angled ribs.** Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science.
- [5] Carl-Olof Olsson and Bengt Sunden. 1998. **Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels.** Experimental Thermal and Fluid Science 16, pp. 349-365.
- [6] Cengel, Yunus A. 1998. **Heat Transfer: A Practical Approach.** McGraw-Hill, New York, pp. 349-394.
- [7] Fox, Robert W. and Alan T. McDonald. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics.** Wiley, New York, pp. 332-395.
- [8] 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.
- [9] Han, J.C., L.R. Glicksman, and W.M. Rohsenow. 1978. **An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces.** Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 21, pp. 1143-1156.
- [10] Han, J.C., Y.M. Zhang, and C.P. Lee. 1991. **Augmented heat transfer in square channels with parallel, crossed, and V-shaped angled ribs.** ASME J. Heat Transfer Vol. 113, pp. 590-596.

- [11] Han, J.C., J.J. Huang, and C.P. Lee. 1993. **Augmented heat transfer in square channels with wedge-shaped and delta-shaped turbulence promoters.** *J. Enhanced Heat Transfer* Vol. 1, pp. 37-52.
- [12] Holman, J.P. 1990. **Heat Transfer.** McGraw-Hill, New York, pp. 217-321.
- [13] Incropera, Frank P. and David P. Dewitt. 1996. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** John Wiley & Sons, New York, pp. 419-461.
- [14] Jaurker, A.R., J.S. Saini, and B.K. Gandhi. 2005. **Heat transfer and friction characteristics of rectangular solar air heater duct using rib-grooved artificial roughness.** *Solar Energy.*
- [15] Metzger, D.E., C.S. Fan, and Y. Yu. 1990. **Effects of Rib Angle and Orientation on Local Heat Transfer in Square Channels with Angled Roughness Ribs.** in: R.K. Shah, A.D. Kraus, D.E. Metzger, *Compact Heat Exchangers*, Hemisphere, Washington.
- [16] Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H. Okiishi. 1990. **Fundamentals of Fluid Mechanics.** John Wiley & Sons, New York, pp. 465-547.
- [17] Ozisik, M.N. 1985. **Heat Transfer: A Basic Approach.** McGraw-Hill, New York, pp. 281-338.
- [18] Rajendra Karwa. 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, pp. 241-250.
- [19] Taslim, M.E., T. Li, and 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.
- [20] Zhang, Y.M., W.Z. Gu, and J.C. Han. 1994. **Heat transfer and friction in rectangular channels with ribbed or ribbed-grooved walls.** *ASME J. Heat Transfer* Vol. 116, pp. 58-65.

ภาคผนวก

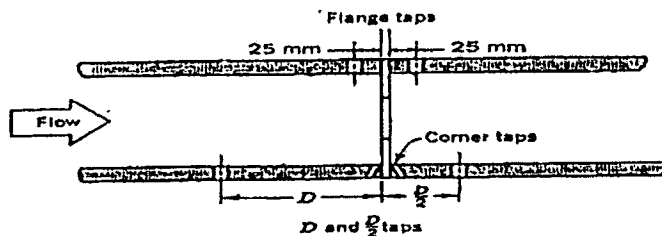
ภาคผนวก ก.
ออริฟิส (Orifice)

ออริฟิซชนิดต่างๆ คล้ายคลึงกัน สามารถอธิบายด้วยกันได้ แต่ลักษณะแตกต่างกันที่ pressure tapping ซึ่ง orifice มาตรฐานกำหนดดังนี้ รูปร่างลักษณะ (description) ออริฟิซ (orifice) ได้แสดงหน้าตัดต่างๆ ดังรูปที่ ก-1



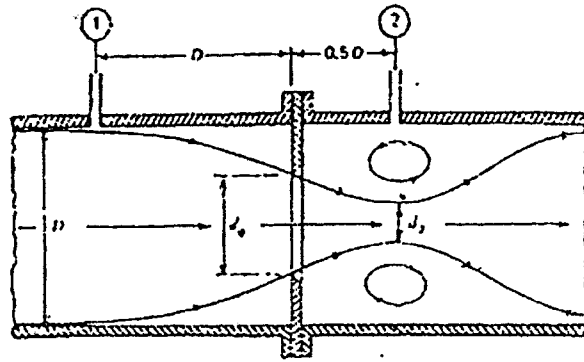
รูปที่ ก-1 Standard orifice plate

แผ่นออริฟิซเป็นแผ่นบางๆ ที่ถูกจับยึดระหว่างขอบของท่อ เนื่องจากมีรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ดังนั้นจึงมีราคาถูก และง่ายในการติดตั้ง หรือการย้ายตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามขอบของแผ่นอาจจะมีการสึกกร่อนได้ อันเนื่องจากการชนของอนุภาคเล็กๆ ที่กระจายอยู่ในของไหล ข้อเสียอีกประการก็คือ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการขยายของด้านข้างของกระแส ทำให้มี head loss ต่ำกว่าที่สูงมาก จุดวัดความดันสำหรับออริฟิซนั้น สามารถกำหนดตำแหน่งได้หลายตำแหน่งดังรูปที่ ก-2 เนื่องจากตำแหน่งของจุดวัดความดันมีอิทธิพลต่อการหาสัมประสิทธิ์การไหล



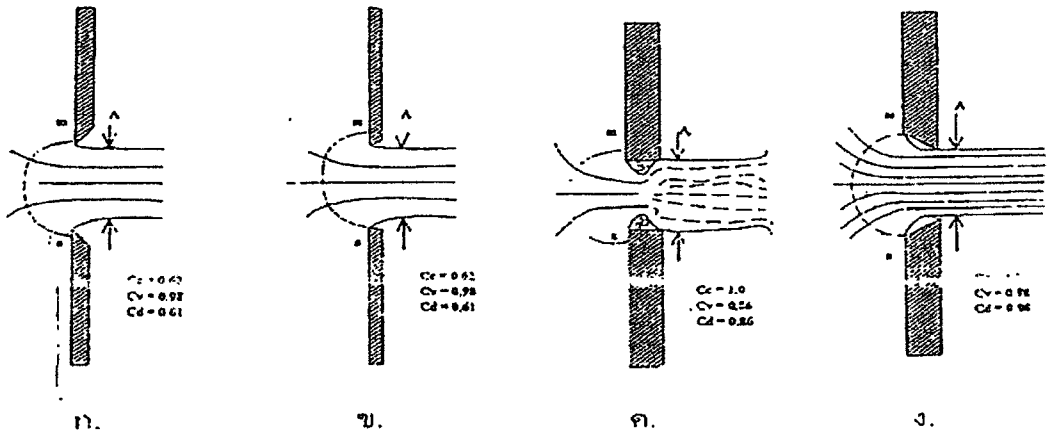
รูปที่ ก-2 แสดง โครงสร้างเชิงเรขาคณิตและจุดวัดความดันของออริฟิซ

สำหรับการวัดอัตราการไหลของของไหลภายในท่อ และจัดได้ว่าออริฟิซเป็นเครื่องมือวัดที่กีดขวางการไหลของพื้นที่หน้าตัด ให้ของไหลไหลผ่านออริฟิซมีขนาดน้อยกว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อ ดังรูปที่ ก-3 ดังนั้นเมื่อนำออริฟิซไปติดตั้งกับท่อ ซึ่งมีของไหล ไหลผ่านจะทำให้เกิดความดันตกคร่อมออริฟิซ ซึ่งความดันตกคร่อมนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราการไหล กล่าวคือถ้าอัตราการไหลมีค่าสูง ความดันตกคร่อมออริฟิซก็จะมีค่าสูง และถ้าอัตราการไหลมีค่าต่ำ ความดันตกคร่อมออริฟิซก็จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปออริฟิซจะถูกนำไปใช้ในการหาอัตราการไหลที่สภาวะ Steady state เท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้วัดอัตราการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Dynamic Response)



รูปที่ ก-3 แสดงการไหลผ่านแผ่นออริฟิส (Orifice)

ในบรรดาเครื่องมือวัดอัตราการไหลทั้งหลาย ออริฟิสถือว่าเป็นเครื่องมือที่มีผู้นำไปใช้อย่างกว้างขวางมากที่สุด ดังนั้นการทดลองชุดนี้จึงได้มีการนำเอาการวัดอัตราการไหลแบบออริฟิสมาใช้ ออริฟิสมาตรฐานที่มีขอบคมดังรูปที่ ก-4 ก. หรือเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ ก-4 ข. นั้นจะสัมพันธ์ด้านน้ำที่ไหลผ่านในลักษณะที่เป็นการสัมพันธ์แบบเส้น ส่วนออริฟิสดังรูปที่ ก-4 ค. และ ก-4 ง. นั้นไม่ใช่เป็นออริฟิสมาตรฐาน ทั้งนี้เพราะด้านน้ำที่ไหลผ่านรูออริฟิสนั้น ถูกกระทบจากความหนาของแผ่นวัตถุ กับความหยาบของผิว และรัศมีของความโค้ง ดังนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบเพื่อความถูกต้อง



รูปที่ ก-4 ออริฟิสแบบต่างๆ

ข้อดีของออริฟิสคือมีราคาต่ำกว่าเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ที่อาศัยหลักการวัดเดียวกัน และสะดวกในการสร้างเพราะมีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อน รวมทั้งมีข้อมูลของการทำวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมในการวัดของไหล ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันอย่างมากมาย ของไหลเมื่อไหลผ่าน square-edged orifice ซึ่งเป็นออริฟิสที่นำมาใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ จะมีทิศทางการไหลเป็นไปดังรูป สมมุติว่าของไหลก่อนเข้าปะทะกับออริฟิส มีความเร็วคงที่ตลอดหน้าตัดของท่อ (หน้าตัดวงกลม) เท่ากับ V_1 เมตรต่อวินาที ของไหลที่บริเวณด้านหลังของออริฟิส จะมีลักษณะเป็นลำของไหล ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของลำของไหลลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเท่ากับ $D/2$ เมตร ณ บริเวณจุดวัดความดันที่ 2 ซึ่งถือได้

ว่าเป็นจุดที่มีพื้นที่หน้าตัดของการไหลน้อยที่สุด (Vena Contracta) ของ Jet ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Jet จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อของไหลเคลื่อนที่ผ่านจุดที่ 2 ไปแล้ว จุดที่ 2 หรือเรียกว่าจุด Vena Contracta ถือได้ว่าเป็นจุดที่ของไหลที่มีความเร็วเฉลี่ยสูงสุด หรือมีความดันสถิตต่ำสุด (จากสมการของ Bernoulli)

สมมติฐานเบื้องต้นสำหรับการวัดอัตราการไหลด้วยออริฟิสในการทดลองนี้คือ ของไหลที่อยู่ภายในท่อไม่สามารถอัดตัวได้ ความเร็วของของไหลมีค่าคงที่ตลอดหน้าตัด (โดยไม่คิดบริเวณที่เรียกว่าบริเวณกระแสไหลวน) ของไหลไม่มีความหนืด และการไหลเกิดขึ้นแบบ Steady flow (อัตราการไหลมีค่าคงที่เมื่อเทียบกับเวลา)

สมการ Bernoulli สามารถนำมาใช้อธิบายคุณสมบัติในการไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อได้ ดังนั้นสมการ Bernoulli สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ของการไหลดังแสดงในรูปที่ ก-3

$$Q_{ac} = C_d A_o \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\rho g \left[1 - \left(\frac{d_o}{D} \right)^4 \right]}}$$

- เมื่อ C_d คือ discharge coefficient
 A_o คือ พื้นที่หน้าตัดรูออริฟิส (m^2)
 P คือ ความดันสถิตของของไหล (N/m^2)
 γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (Specific weight, N/m^3)
 d_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางรูออริฟิส
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ
 Subscript 1t คือ ค่าที่จุดที่ 1 ในทางทฤษฎี
 Subscript 2t คือ ค่าที่จุดที่ 2 ในทางทฤษฎี

ภาคผนวก ข.
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

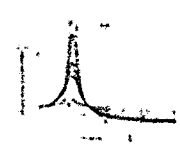
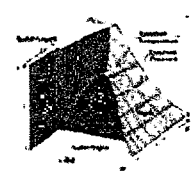
ME NETT
21

การประชุมวิชาการ

เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21

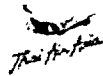
วันที่ 17 - 19 ตุลาคม 2550

ณ โรงแรมเวลด์ม จอมเทียน บีช จ.ชลบุรี



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์
กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ


ผู้สนับสนุนหลัก


ผู้ร่วมสนับสนุน

การถ่ายเทความร้อนในการไหลผ่านช่องขนานที่มีครีบบสามเหลี่ยม

Heat Transfer in triangular-ribbed channel flows

ชานนท์ มะลิกุล ชานทิพย์ ชัยคิลกพัฒน์กุล ชินารุก ธีรานพงษ์ พงษ์เจต พรหมวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 Email: kppongje@kmitl.ac.th

Chanon Malikun , Chanatip Chaidilokpatanukul, Chinaruk Thianpong , 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, Email: kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของช่องขนานที่มีครีบบสามเหลี่ยมชนิดที่มีการถ่ายเทความร้อนคงที่ (constant heat flux) การศึกษาจะพิจารณาถึงสัดส่วนความสูงของครีบบต่อระยะห่างแผ่นความร้อน (e/D) และการจัดรูปแบบแผ่นครีบบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt number) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) โดยมีขอบเขตการศึกษาที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ตั้งแต่วางระหว่าง 3,000 – 20,000 สัดส่วนความสูงครีบบต่อระยะห่างแผ่นช่องขนานความร้อน (e/D) มีค่าเท่ากับ 0.125, 0.187 และ 0.25 การจัดระยะแผ่นครีบบวางตรงและเอียงกัน และระยะพิตต์คงที่เท่ากับ 20 มิลลิเมตร โดยผลที่ได้ จะทำการศึกษาเปรียบเทียบกับผลการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานความร้อนผิวเรียบ ภายใต้สภาวะการทดสอบเดียวกัน จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความสูงครีบบสามเหลี่ยมต่อระยะห่างแผ่นช่องขนาน (e/D) มีค่าเท่ากับ 0.125, 0.187 และ 0.25 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ 1.58, 2.28 และ 2.32 ในกรณีที่ว่าแผ่นครีบบแบบแนวเดียวกัน และในกรณีที่วางแผ่นครีบบเอียงกัน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ 1.62, 2.25 และ 2.28 ตามลำดับและการถ่ายเทความร้อนยิ่งเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

Abstract

This paper presents the study of heat transfer enhancement in a ribbed channel with constant heat flux. Effects of Relative roughness height (e/D) and rib arrangement on heat transfer and friction loss in the ribbed

channel are experimentally investigated. The scope of this experimental work is based on the Reynolds number at the inlet ranging from 3000 to 20,000; Relative roughness height (e/D) of 0.125, 0.187 and 0.25; and pitch length of 40 mm. The ribs used in the channel test section are placed in stagger and in-line arrangements. Experimental results obtained are compared with the results obtained from smooth plates under similar conditions. The experimental result reveals that the heat transfer rate and friction loss increase considerably with the rise of Reynolds number and the Relative roughness height (e/D).

1. บทนำ

การเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทของแผ่นความร้อนที่ได้เคยมีการศึกษาดังนี้ Taslim et al. [1] รายงานค่าประสิทธิภาพที่จุดใดๆ ในท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหยาบเนื่องจากมุมครีบบ, รูปร่างครีบบตัววี และความไม่ต่อเนื่องครีบบ (แนวครีบบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหลและมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลสลับกันตลอดหน้าตัด) บนผิวท่อที่อยู่ตรงกันข้าม โดยให้ผิวท่อด้านหนึ่งถูกให้ความร้อนด้วยพลั๊กความร้อนคงที่ ในขณะที่ผิวท่อด้านอื่นๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดเมื่อแนวครีบบตัววีมีทิศทางเดียวกับการไหล Rajendra Kawa [2] ได้ทำการศึกษาค่าเพิ่มสมรรถนะของช่องหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่มีครีบบวางอยู่หนึ่งด้าน โดยครีบบที่ทดลองมีลักษณะเป็นครีบบตรง ครีบบรูปตัววีต่อเนื่อง 60 องศา, ครีบบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา และครีบบแทงมุม 60 องศา โดยทำการทดลองที่ค่า

ตัวเลขเรย์โนลด์์ในช่วง 3,000 – 20,000 อัตราการส่วนความกว้างต่อความสูงแผ่นทดลองเท่ากับ 7.19-7.75 และอัตราส่วนระยะพิคต์ต่อความสูงแผ่นครีบเท่ากับ 10 ความสูงครีบ 3.4 มิลลิเมตร ความกว้างครีบ 6.58 มิลลิเมตร ถ่ายเทความร้อนชนิดคงที่ Constant Heat Flux โดยผลการทดลองพบว่าครีบบรูปตัววีแบบแยกส่วน 60 องศา จะมีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและมีค่าตัวประกอบความเสียหายน้อยที่สุด ส่วนครีบตรงจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนน้อยที่สุด ส่วนและครีบบรูปตัววีต่อเนื่อง จะมีตัวประกอบความเสียหายมากที่สุด Giovanni Tanda [3] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียหายของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดผิวรูปร่าง V-Shape ชนิดแยกส่วน โดยการศึกษาเป็นการศึกษาในช่วงค่าเรย์โนลด์์ 8,900 – 28,500 ความขรุขระสัมพัทธ์ (e/D_h) 0.009, 0.15 ระยะพิคต์สัมพัทธ์ (p/e) เท่ากับ 4.8, 13.5 อัตราส่วนความสูงพิคต์ต่อความสูงแผ่นช่องทางาน (e/H) 0.15, 0.25 จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงแผ่นครีบ (h) มีค่าสูงขึ้น และแผ่นครีบบมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน ระยะพิคต์ที่ 0.05 เมตรมีค่ามากกว่าระยะพิคต์ที่ 0.03 เมตร และที่การทดลองในช่วงดังกล่าวจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าแผ่นเรียบอยู่ประมาณ 300 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction factor) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความสูงของแผ่นครีบบมีค่าลดลง แผ่นครีบบมีลักษณะเป็นรูปตัววี และครีบบมีลักษณะเป็นแบบแยกส่วน Benlu, Pei-Xue Jiang [4] ได้ทำการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนและคุณสมบัติการเสียหายของแผ่นโซลาร์ฮีตเตอร์สี่เหลี่ยม ชนิดครีบบเอียงทำมุม 0 ถึง 90 องศาที่ทิศทางการไหล โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอัตราการไหลอากาศ 0.001 – 0.0018 kg/s ระยะพิคต์ เท่ากับ 4 มิลลิเมตร ความสูงแผ่นครีบบ 0.8 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร จากการทดลองพบว่า ที่มุมครีบบ 60 องศาจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมมากที่สุดแต่พบว่าที่มุม 20 องศาจะให้ประสิทธิภาพโดยรวมของการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด เมื่อศึกษาต่อที่มุมครีบบ 20 องศาพบว่าที่ระยะพิคต์น้อยลงจะทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนและแรงดันตกคร่อมเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะพิคต์ 1 และ 2 มิลลิเมตรจะให้ประสิทธิภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน

2. ทฤษฎี

การพิจารณาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของช่องทางานชนิดมีครีบบจำเป็นจะต้องพิจารณา ทั้งในส่วนพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนพัดลมและการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศที่ไหลผ่าน โดยพลังงานที่พัดลมใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านแผ่นช่องทางานสามารถพิจารณาได้คือ [5]

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

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

โดยที่

- \dot{W}_m = พลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศให้ไหลผ่านช่องทางาน; Watt
- Q = อัตราการไหลของของไหล, m^3/s
- Δp = ความดันตกคร่อมของของไหล, N/m^2
- f = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
- ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3
- L = ความยาวท่อ, m .
- \bar{V} = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s
- D_h = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter), m .

การสมดุลพลังงานกรณีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวคงที่(constant heat flux)

$$Q = mC_p(T_i - T_o) = hA_s(T_w - T_b) \tag{3}$$

โดยที่

- Q = อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ, Watt
- m = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, kg/s
- C_p = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg \cdot ^\circ K$
- T_i = อุณหภูมิอากาศด้านขาเข้า, $^\circ C$
- T_o = อุณหภูมิอากาศด้านขาออก, $^\circ C$
- h = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot ^\circ K$
- A_s = พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, m^2
- T_w = อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, $^\circ C$
- T_b = อุณหภูมิของไหลเฉลี่ย, $(T_i + T_o)/2$, $^\circ C$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Nusselt number; Nu_D)

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

โดยที่

- Nu_D = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนอากาศ; $W/m \cdot ^\circ K$

ค่าตัวเลขเรย์โนลด์์ (Raynold number)

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

โดยที่

- Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์์
- μ = ค่าความหนืดเชิงกลของอากาศ; $(kg/m.s)$

ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน (η) กรณีพิจารณาถึงการสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลเดียวกัน (constant

pumping power) ระหว่างท่อทดสอบผิวเรียบกับท่อทดสอบที่มีครีบริบ สามารถจัดสมการให้อยู่ในรูปของสมการพลังงานของการไหลได้ดังนี้

$$(\dot{V}\Delta P)_o (\dot{V}\Delta P) \tag{6}$$

โดยที่

$$\dot{V} = \text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารทำงาน, (m}^3/\text{s)}$$

ตัวแปรทางด้านซ้ายมือของสมการ (6) เป็นพลังงานการไหลของไหลในท่อเปล่าและตัวแปรทางด้านขวามือของสมการเป็นพลังงานการไหลของของไหลภายในท่อที่มีแผ่นครีบริบ ด้วยการพิจารณาบนพื้นฐานของการสูญเสียกำลังเนื่องจากการไหลที่เท่ากัน ซึ่งในการพิจารณาประสิทธิภาพของการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนได้นิยามขึ้นมาด้วยสัดส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทดสอบที่มีครีบริบ (h) กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อเปล่า (h_0) หรือนิยามด้วยสัดส่วนของค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อทดสอบที่มีครีบริบ (Nu) กับค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อเปล่า (Nu_0) จากข้อแนะนำของ Webb [6]

$$\eta = \left[\frac{h}{h_0} \right] = \left[\frac{Nu}{Nu_0} \right] \tag{7}$$

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

โดยที่

η = ค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อน

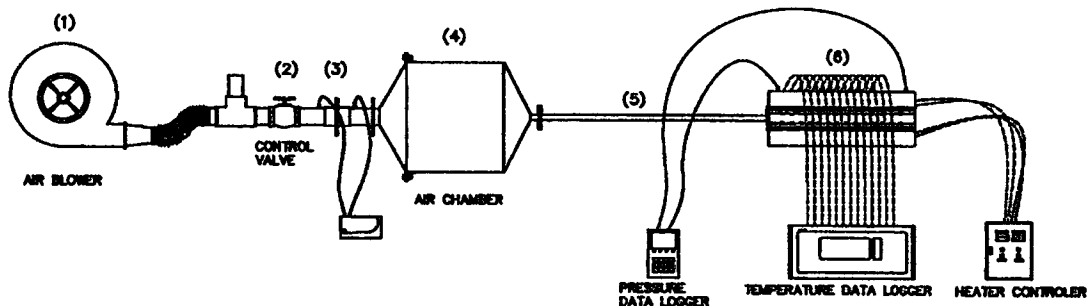
h_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อเปล่า, $W/m^2 \cdot K$

Nu_0 = ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ของท่อเปล่า

f_0 = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อเปล่า

3. อุปกรณ์ทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆตามรูปที่ (1) ด้านล่าง โดยใช้พัดลม (1) (blower) ขนาดพิกัด 1.5 kW เป็นแหล่งกำเนิดลม ซึ่งควบคุมปริมาณลมไหลเข้าชิ้นงานทดสอบโดยการปรับหัววาล์ว (2) โดยปริมาณลมแต่ละครั้งของการทดสอบจะถูกกำหนดโดยค่าความดันตกคร่อมแผ่น orifice (3) อากาศที่ไหลผ่านเข้าสู่ชุดทดลองจะต้องไหลผ่านกล่องลม (4) ซึ่งมีหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศให้มีการไหลปั่นป่วนน้อยที่สุด และให้ไหลผ่านท่อปรับสภาพการไหล (5) เพื่อให้อากาศที่ไหลก่อนเข้าสู่ชุดทดลองมีลักษณะเป็น fully develop และไหลเข้าชิ้นงานทดสอบ (6) ชิ้นงานที่ทดสอบประกอบด้วยช่องขนานอลูมิเนียมที่มีครีบริบขนาดกว้าง 0.20 เมตร ยาว 0.55 เมตร และระยะความสูงของช่องขนาน (D) เท่ากับ 32 มิลลิเมตร โดยลักษณะครีบริบภายในช่องขนานมีขนาดความสูง (e) เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร และกว้าง (g) เท่ากับ 10 มิลลิเมตร และระยะพิคต์ (P) คงที่เท่ากับ 20 มิลลิเมตร โดยแผ่นช่องขนานดังกล่าวถูกทำให้อุ่นด้วย heater ไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ ติดตั้งประกบแผ่นคู่ขนานทั้ง 2 ด้าน โดยอุณหภูมิอากาศที่ไหลเข้าออก และอุณหภูมิผิวภายในถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล type K จำนวนรวมทั้งสิ้น 16 จุด โดยบันทึกค่าที่วัดได้ลงอุปกรณ์ FLUKE 2680A ส่วนค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานตรวจบันทึกค่าที่ได้ลงอุปกรณ์ TESTO 350 M/XL , TESTO 45



รูปที่ (1) แสดงอุปกรณ์การทดลอง

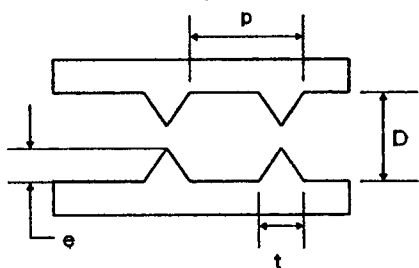
ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะต้องมีการหุ้มฉนวนใยแก้วกัน

ความร้อนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนจากแผ่น Heater ไหลออกสู่บรรยากาศภายนอก

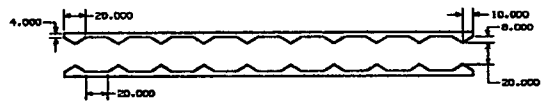
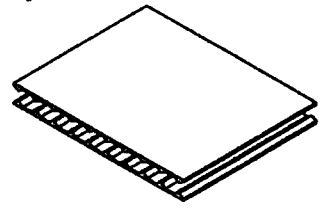
4.วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของแผ่นช่องขนานที่มีครีบ โดยทดลองที่ขนาดความสูงแผ่นช่องขนานที่ (D) 32 มิลลิเมตร โดยลักษณะแผ่นครีบทดลองติดตั้งในลักษณะตรงและเอียงทำมุม 0 และ 180 องศา ตามรูปที่ (3)

การทดลองทำการเปิดพัดลม จากนั้นปรับปริมาณการไหลของลมให้ได้ตามที่ต้องการ โดยควบคุมความเร็วลมให้อยู่ในช่วง 0.20 ถึง 2.20 เมตรต่อวินาที ซึ่งที่ความเร็วดังกล่าวครอบคลุมค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3,000 ถึง 20,000 ในแต่ละช่วงความเร็วลมที่ทดสอบ จะต้องรอให้อุณหภูมิผิวภายในแผ่นช่องขนานและอุณหภูมิอากาศเข้าออก มีค่าคงที่ก่อนจะทำการบันทึกค่า โดยอุณหภูมิแผ่นช่องขนานทำการตรวจวัดทั้งหมด 14 จุด และอีก 2 จุดสำหรับอุณหภูมิอากาศเข้าและออกแผ่นช่องขนาน ในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกค่าความดันตกคร่อมแผ่นช่องขนานดังกล่าวด้วย



รูปที่ (2) แสดงค่าตัวแปรระยะต่างๆ



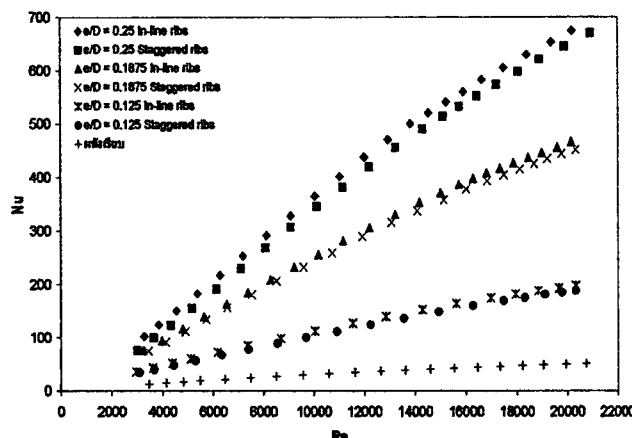
รูปที่ (3) แสดงภาพตัดของขนานชนิดครีบตรง

5.ผลการทดลอง

ผลของการทดลองแสดงในรูปความสัมพันธ์ต่างๆในรูปแบบกราฟ ได้ดังนี้

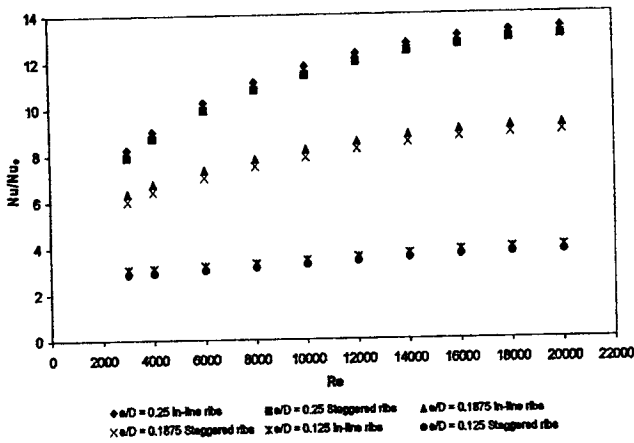
รูปที่ (4) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลล์กับตัวเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง จากการ

ทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ เมื่อค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนาต่างๆ เพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การติดตั้งครีบบนมีแนวเดียวกันจะให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์มากกว่าการติดตั้งครีบบนมีแนวเอียง และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่านัสเซลล์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีขอบเขตการศึกษาอัตราส่วนความสูงครีบต่อระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองในช่วงอัตราส่วน e/D < 0.125 พบว่าที่อัตราส่วน e/D = 0.125 ความสูงครีบเท่ากับ 1.6 เซนติเมตร และระยะห่างระหว่างผิวบนและผิวล่างภายในชุดทดลองเท่ากับ 3.2 เซนติเมตร เมื่อติดครีบที่ผิวบนและผิวล่างท่อกว้างภายในชุดทดลองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า แบบมีแนวเดียวกัน จะไม่ทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านชุดทดลอง



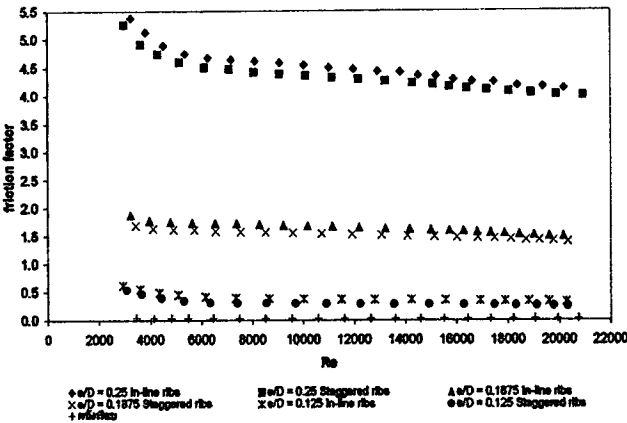
รูปที่ (4) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขนัสเซลล์กับตัวเลขเรย์โนลด์

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซลล์ต่อตัวเลขนัสเซลล์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ กรณีครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดครีบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนซ์ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.25 มีค่านัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 11.50 และ 11.18 เท่า สำหรับการติดครีบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.1875 มีค่านัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 8.11 และ 7.78 เท่า สำหรับการติดครีบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ และ ครีบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน e/D = 0.125 มีค่านัสเซลล์นัมเบอร์เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 3.50 และ 3.32 เท่า สำหรับการติดครีบบนมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ



รูปที่ (5) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนนัสเซลล์ต่อตัวเลขนัสเซลล์ของท่อที่มีผนังเรียบกับเรย์โนลด์นัมเบอร์

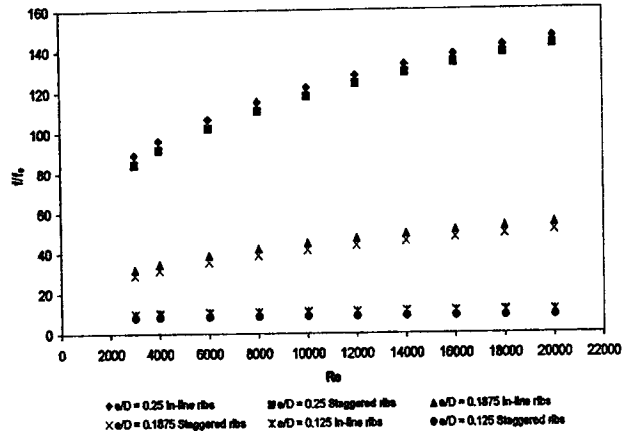
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน กรณีท่อมีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วที่มีความหนาต่างๆ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงเล็กน้อยเมื่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้น การติดตั้งครีบริบแบบมีแนวเดียวกันจะให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมากกว่าการติดตั้งครีบริบแบบมีแนวเอียง และจากการทดลองยังพบอีกว่าเมื่ออัตราส่วน e/D มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าตัวประกอบเสียดทานเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน



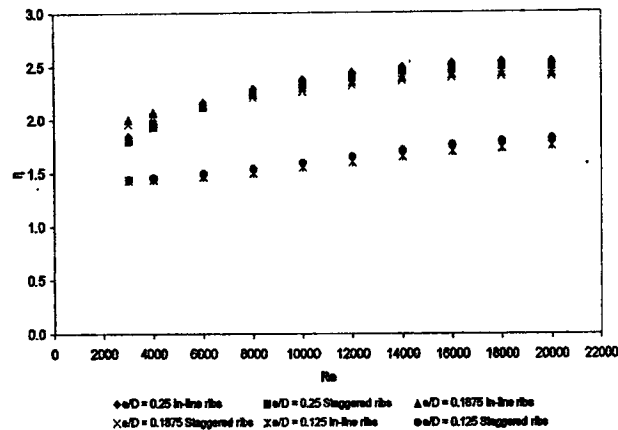
รูปที่ (6) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของขบวนการมีครีบริบต่อช่องขนานเรียบ กรณีท่อมีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 121.68 และ 117.59 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมี

อัตราส่วน $e/D = 0.1875$ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 44.97 และ 41.42 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ และครีบริบรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน $e/D = 0.125$ มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 10.75 และ 8.57 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ



รูปที่ (7) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขเรย์โนลด์ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของขบวนการมีครีบริบต่อช่องขนานเรียบ



รูปที่ (8) ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับตัวเลขเรย์โนลด์

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนกับตัวเลขเรย์โนลด์ กรณีท่อมีครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีความหนา 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร เมื่อติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียง จากการทดลองพบว่าในช่วงการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน $e/D = 0.25$ มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.32 และ 2.28 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ ครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน $e/D = 0.1875$ มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 2.28 และ 2.25 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ และครีบริบสามเหลี่ยมหน้าจั่วมีอัตราส่วน $e/D = 0.125$ มีค่า η เฉลี่ยมากกว่าผนังเรียบ 1.58 และ 1.62 เท่า สำหรับการติดตั้งแบบมีแนวเดียวกันและมีแนวเอียงตามลำดับ

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองช่องทางที่มีครีบบนผนังภายในช่องทาง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนให้เพิ่มสูงขึ้นได้โดยการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ รูปแบบการไหลของอากาศภายในช่องทาง โดยค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่า Nu มีค่าสูงขึ้นตาม รวมถึงการจัดรูปแบบครีบบนผนังภายในช่องทางโดยการวางแผ่นครีบบนผนังจะมีแนวโน้มของค่า Nu สูงกว่าการวางแผ่นครีบบนผนังบางส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในช่องทางที่มีครีบบนผนังสามเหลี่ยมพบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราส่วนตัดส่วนความสูงครีบบนผนังสามเหลี่ยมต่อระยะห่างของแผ่นช่องทางความร้อน (e/D) เท่ากับ 0.125 จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย(ค่อนข้างคงที่)เมื่อ Re มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในช่องทางที่มีครีบบนผนังสามเหลี่ยมพบว่ามีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า Re มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อตัดส่วนความสูงครีบบนผนังต่อระยะห่างของแผ่นช่องทางความร้อน (e/D) มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนรูปแบบการจัดรูปแบบแผ่นครีบบนผนังและแผ่นครีบบนผนังบางส่วนพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและค่าประสิทธิภาพการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าแผ่นเอียง

7. กิตติกรรมประกาศ

ผลการวิจัยภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจาก "ส่วนงานกลาง สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ"

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.E. Tasilim, 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, 2003. Experimental 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 Vol. 47 pp.229-243.
- [4] 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.
- [5] พงษ์เจต พรหมวงศ์ "การถ่ายเทความร้อน" ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2542 หน้า 225-252.
- [6] Webb R L., 1992. Principles of Enhanced Heat Transfer John-Wiley & Sons, New York, USA, pp. 166-194.

ประวัติผู้เขียน

นายชานนท์ มะลิกุล เกิดเมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2526 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547